

# IDM을 이용한 자율주행자동차 시장점유율 변화가 고속도로 교통류에 미치는 영향 분석

## Analysis of Effects of Autonomous Vehicle Market Share Changes on Expressway Traffic Flow Using IDM

고 우 리\* · 박 상 민\*\* · 소 재 현\*\*\* · 윤 일 수\*\*\*\*

\* 주저자 : 아주대학교 교통공학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 연구조교수

\*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 조교수

\*\*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Woori Ko\* · Sangmin Park\*\* · Jaehyun(Jason) So\*\* · Ilsoo Yun\*\*

\* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Ajou

\*\* Dept. of Transportation System Eng., Univ. of Ajou

† Corresponding author : Sangmin Park, stylecap@ajou.ac.kr

Vol.20 No.4(2021)

August, 2021  
pp.13~27

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.4.13>

Received 9 June 2021  
Revised 5 July 2021  
Accepted 19 July 2021

© 2021. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

본 연구에서는 영동고속도로 용인IC~양지IC구간을 대상으로 2020년 데이터를 활용하여 자율주행자동차의 시장점유율 변화가 교통류에 미치는 영향을 추정하였다. 교통류에 미치는 영향 정도를 추정하기 위해 미시교통시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하였다. 자율주행자동차의 종방향 제어를 반영하기 위해서 intelligent driver model(IDM)을 구축 후 VISSIM에 적용하여 일반차와 비교를 수행하고 주행행태를 검증하였다. 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 이동성 및 안전성 분석 결과, 자율주행자동차 도입 시 시장점유율이 높아질수록 네트워크의 이동성은 향상되지만, 안전성의 경우 차종이 혼재되었을 때 교통류가 불안정해지므로 더욱 안전 관리에 집중해야 한다는 것을 확인하였다.

핵심어 : 자율주행자동차, 시장점유율, Intelligent driver model(IDM), 이동성, 안전성

### ABSTRACT

In this study, the impact of traffic flow on the market penetration rate of autonomous vehicles(AV) was analyzed using the data for the year 2020 of the Yongin IC~Yangji IC section of Yeongdong Expressway. For this analysis, a microscopic traffic simulation model VISSIM was utilized. To construct the longitudinal control of the AV, the Intelligent Driver Model(IDM) was built and applied, and the driving behavior was verified by comparison with a normal vehicle. An examination of the study results of mobility and safety according to the market penetration rate of the AV, showed that the network's mobility improves as the market penetration rate increases. However, from the point of view of safety, the network becomes unstable when normal vehicles and AVs are mixed, so there should be a focus on traffic management for ensuring safety in mixed traffic situations.

Key words : Autonomous vehicle, Market penetration rate, Intelligent driver model(IDM), Mobility, Safety

# 1. 서 론

## 1. 연구의 배경 및 목적

자율주행자동차(Autonomous vehicles, AV)의 글로벌 시장은 2040년까지 모든 차량이 미국 자동차공학회(SAE International) 레벨2 이상의 자율주행 기능을 포함하고, 레벨3 자율주행 시스템이 2040년까지 자동차 시장의 큰 부분을 차지할 것으로 예측하였다(Lux Research, 2021). 또한 글로벌 자율주행자동차 시장 규모는 2035년에 1,334조 원으로 성장할 것으로 전망하였고, 국내 자율주행자동차 시장 규모는 2020년에 약 1,509억 원에서 2035년 약 26조 1,794억 원으로 성장할 것을 전망하였다(KPMG, 2020). 이와 같이, 자율주행자동차 시장은 그 규모가 눈에 띄게 확대될 것으로 예상된다. 더불어, 최근 국내에서는 레벨3에 해당하는 부분자율주행자동차의 고속도로 차로유지와 관련된 안전기준이 세계 최초로 제정되어 고속도로에서의 자율주행자동차 도입 및 주행이 증가될 것으로 예상된다.

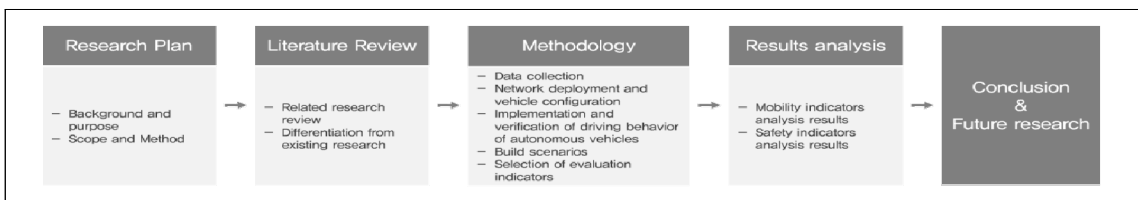
하지만, 고속도로에서 자율주행자동차의 시장점유율(market penetration rate, MPR)이 충분히 높아지기까지는 자율주행자동차와 일반차가 혼재하여 주행하는 혼합 교통 상황(mixed traffic situation)이 발생할 것으로 판단된다. 주행 특성이 다른 자율주행자동차와 일반차의 혼합 교통 상황이 발생하면, 전체 교통류는 다른 양상을 보일 것으로 판단되며, 이에 따른 이동성과 안전성에 차이를 보일 것으로 예상된다. 혼합 교통 상황에서의 교통류 변화를 파악하면 고속도로 설계와 운영전략 수립에 적용하여 합리적인 결과를 도출할 수 있다(Choi et al., 1999). 따라서 고속도로 내 혼합 교통 상황에서의 자율주행자동차 시장점유율에 따른 이동성 및 안전성 측면에서 교통류 변화를 측정하는 것은 교통 설계 및 운영 측면에서 필수적이다.

본 연구에서는 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 교통류 변화를 파악하기 위해, 미시교통시물레이션을 이용하여 자율주행자동차와 일반차의 혼합 교통 상황을 구현하는 방법론과, 이동성과 안전성을 분석하는 방법론을 제시하고자 하였다. 또한, 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 고속도로 내 이동성과 안전성을 분석하여 혼합 교통 상황에서의 고속도로 교통운영 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구를 수행하기 위한 시간적 범위는 2020년이며, 공간적 범위로 영동 고속도로 용인IC~양지IC 구간을 선정하였다. 선정된 용인IC~양지IC 구간은 차로수가 4차로로 동일하게 유지되고, 직선구간과 곡선구간이 적절하게 섞여 있는 특징을 가져 연구 수행을 위한 적절한 구간으로 판단하여 선정하였다.

본 연구에서는 자율주행자동차 시장점유율에 따른 고속도로 교통류 분석을 수행하기 위해 <Fig. 1>과 같이 선정 구간의 데이터를 수집하고, 미시교통시물레이션을 이용한 연구 방법론을 수립하였다. 또한, 미시교통시물레이션을 이용하여 자율주행자동차 시장점유율에 따른 이동성과 안전성 분석을 수행하고, 그 결과를 분석하였다. 마지막으로, 분석 결과를 바탕으로 결론 및 향후 연구과제를 도출하였다.



<Fig. 1> Procedure of the research

## II. 관련 연구 고찰

### 1. 관련 연구 고찰

Kim et al.(2021)은 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 교통류 영향을 자율주행 전용차로 도입 시나리오에 따라 평가하였다. 평가를 위해 시나리오별로 시장점유율에 따른 공간평균속도, 평균통행시간, time-to-collision(TTC) 변화를 분석하였고, 그 결과 시장점유율이 낮은 자율주행자동차 도입 초기에는 버스전용차로와 자율주행 전용차로가 혼합된 시나리오가 효과적이며 도입 중·장기엔 자율주행 전용차로만 설치하는 시나리오가 효과적임을 확인하였다.

Park et al.(2015)은 자율주행차량 도입에 따른 교통류 변화를 분석하기 위해 각 서비스 수준(level of service, LOS)의 시장점유율 변화에 따른 시간평균속도, 공간평균속도, 밀도를 분석하였다. 분석 결과, LOS B를 기점으로 자율주행자동차의 시장점유율이 높아질수록 시간평균속도와 공간평균속도가 증가하고, 밀도는 감소하여 긍정적인 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Ko et al.(2017)은 자율주행자동차의 차량추종 모형을 최적화하기 위해 Wiedemann 99 모형의 파라미터를 자율주행자동차의 실도로 주행 데이터와 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 이용하여 정산하였다. 실도로 주행 자율주행자동차 데이터 기반의 정산된 Wiedemann 99 모형은 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 결과를 내는 것으로 확인하였다.

Zhou et al.(2017)은 고속도로 합류구간에서 합류 효율성을 극대화하기 위해 cooperative intelligent driver model(CIDM)을 개발하여 다양한 자율주행자동차 시장점유율에서 시스템의 성능을 검사하였다. 속도편차, 통행시간, 평균속도 분석 결과, 자율주행자동차의 비율이 증가하면 총 이동 시간이 줄고, 합류구간에서 빈번하게 발생하는 반복적인 가·감속을 완화할 수 있어 CIDM이 긍정적이고 능동적인 방법이라는 결론을 도출하였다.

Zhu et al.(2018)은 중국 상하이에 적합한 차량추종 모형을 조사하기 위해 5개의 대표적인 모델을 보정하고 평가하였다. 평가 결과 Gazis-Herman-Rothery model, Gipps model, intelligent driver model(IDM), Full velocity difference model, Wiedemann model 중 IDM의 보정 및 검증 단계 오류가 19%로 성능이 가장 우수하였다. 이후 60명의 참가자 운전행태를 경험적 관찰을 통해 무작위 표본 추출하여 IDM 매개변수를 도출하였다. IDM 매개변수는 보정값과 관측값 비교를 통해 두 값이 유사하게 분포하나 관측값이 더 큰 경향이 있었고, 더 나은 차량 주행 재현을 위해서는 매개변수의 실제값도 보정이 필요하다고 결론지었다.

Sun et al.(2020)은 교통 정체를 압축하고 완화하고자 교통류 모델링의 두 가지 기본 개념인 차량추종 불안정성(instability) 분석과 트래픽 진동(oscillation) 분석을 연계하여 두 분석 사이의 관계를 확립하였다. 해당 연구에서는 IDM을 통해 1,600개의 매개변수 조합을 시뮬레이션하여 진동 분석 결과를 도출하였고, 이를 유전 알고리즘으로 보정하여 차량추종 불안정성을 계산하였다.

### 2. 기존 연구와의 차별성

관련 연구들을 고찰한 결과, 미시교통시뮬레이션을 통한 자율주행자동차의 종방향 제어 구현을 위해 Wiedemann 99 모형, CIDM, IDM과 같은 다양한 모형들이 활용되었다. Wiedemann 99 모형은 연속류에서의 차량추종 모형을 최적화하기 위해 정지거리, 차두시간, 정지가속도 등 총 10개의 변수를 조정함으로써 차량의 주행행태를 묘사하는 모형이다(Lee and Oh, 2018). 하지만 Wiedemann 99 모형은 가속도 값이 미리 지정되어 자율주행자동차의 주행행태를 묘사하기에 어려움이 있어 제외하였다. 반면 IDM의 경우 전방 차량의 실제속도, 상대속도, 차간거리에 따라 가속도가 유동적으로 변하기 때문에 미시교통시뮬레이션에서 자율주행

자동차의 주행행태를 구현하는데 적합하다고 볼 수 있다. 특히, 본 연구에서는 고속도로 본선을 대상으로 자율주행자동차와 일반차가 혼재되어 있는 혼합 교통 상황을 구현하기 위해 Zhou et al.(2017)의 CIDM은 고려하지 않고, IDM을 활용하여 종방향 제어를 구현하였다.

또한, 선행 연구들에서는 자율주행자동차의 주행행태를 묘사하는데 종방향 제어 모델링을 주로 수행하였으며, 횡방향 제어 모델링이 많이 포함되어 있지 않음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 자율주행자동차와 유사한 주행 행태를 묘사하기 위해 횡방향 제어를 추가적으로 구현하였다. 횡방향 제어 구현을 위해 시뮬레이션의 차로변경 관련 매개변수를 수정하여 자율주행자동차의 주행 행태를 묘사한 점에서 기존 연구들과의 차별성을 지닌다.

### Ⅲ. 연구 방법론

#### 1. 자료 수집

앞서 선정된 공간적 범위인 용인IC~양지IC 구간을 미시교통시물레이션을 이용하여 네트워크로 구축하기 위해 자료를 수집하였다. 네트워크 구축 시 필요한 기하구조 자료, 교통량 자료, 속도 자료를 수집하였다. 기하구조 자료 수집을 위해 카카오맵(<http://map.kakao.com>)의 위성지도를 이용하였다. 교통량 및 속도 자료의 경우 한국도로공사 고속도로 공공데이터 포털(<http://data.ex.co.kr>)의 구간교통량 자료 및 AVC 차종별 교통량 자료와 구간 통행속도 자료를 이용하였다. 분석구간에 해당하는 용인IC~양지IC 구간은 편도 4차로이며, 오전 첨두시 평균 교통량은 약 5,286vph였다. 다음 <Fig. 2>는 분석구간의 개요를 나타낸다.



<Fig. 2> Test site of Yongin IC~Yangji IC

#### 2. 네트워크 구축

본 연구에서는 자율주행자동차 시장점유율에 따른 고속도로 교통류 영향 분석을 위해 미시교통시물레이션을 이용하였다. 미시교통시물레이션 소프트웨어로는 신뢰할 만한 차량추종 모형인 Wiedemann 99 모형을

보유하고 있으며, 사용자가 직접 차량추종 모형을 구현할 수 있는 장점을 가진 VISSIM ver 10.0을 이용하여 네트워크를 구축하였다. 네트워크 구축 시 카카오맵의 위성사진을 배경으로 실제 도로 모습과 동일하도록 구축하고, 고속도로 공공데이터 포털에서 얻은 교통량 자료를 이용하여 교통량을 입력하였다. 이때 교통량은 AVC 차종별 교통량 자료에서 1, 3종은 일반차, 2종은 버스, 나머지는 중차량으로 구분하여 차종 구성 비율을 산정한 후, 구간교통량에 차종 구성 비율에 따라 승용차환산계수를 곱하여 산출한 5,815pcph를 입력하였다. 또한, 실제 제한속도가 100kph이기 때문에, 시뮬레이션의 차량 속도 분포(desired speed distribution)를 88~110kph로 설정하여, 실제 통행속도와 VISSIM에서 산출된 통행속도를 유사하게 네트워크를 구축하였다. 마지막으로 구축된 네트워크를 검토하여 차량의 움직임에 이상 없는지 확인해 네트워크 구축을 완성하였다.

### 3. 주행행태 구현

#### 1) 일반차 주행행태 구현

일반차의 주행행태 구현은 VISSIM 내 연속류 차량추종 모형(car-following model)인 Wiedemann 99 모형을 이용하여 구현하였다. Wiedemann 99 모형은 CC0부터 CC9 까지로 10가지의 매개변수로 구성되어있다. 본 연구에서는 일반적인 차량추종을 나타낸 Wiedemann 99 모형의 매개변수 기본값을 이용하였다. 또한, 일반차의 주행행태를 사람의 운전행태와 최대한 유사하게 설정하여 현실성을 높이기 위해 전방 시야 거리(look ahead distance)와 일시적 부주의(temporary lack of attention)를 설정하였다. 전방 시야 거리의 경우 Song et al.(2012)의 연구에서 설정한 최소 100m ~ 최대 220m를 적용하였고, 일시적 부주의의 경우 돌발상황에 영향을 줄 수 있는 변수를 설정한 Kang et al.(2018)의 연구를 참고하여 5.0초와 5.0%를 적용해 일반차의 주행행태를 구현하였다. 일반차의 횡방향 제어는 VISSIM 기본값을 이용하여 일반차의 주행행태를 구현하였다. <Table 1>은 본 연구에서 사용한 일반차의 매개변수를 나타낸다.

<Table 1> Driving behavior parameters for normal vehicle

		Parameter		Value for normal vehicle
Model name	Code	Parameter		
		Longitudinal control	Wiedemann 99 model	CC 0
CC 1	Headway Time			0.9s
CC 2	'Following' Variation			4m
CC 3	Threshold for Entering 'Following'			-8
CC 4	Negative 'Following' Threshold			-0.35
CC 5	Positive 'Following' Threshold			0.35
CC 6	Speed dependency of Oscillation			11.44
CC 7	Oscillation Acceleration			0.25m/s <sup>2</sup>
CC 8	Standstill Acceleration			3.50m/s <sup>2</sup>
CC 9	Acceleration with 80 km/h			1.50m/s <sup>2</sup>
		Look ahead distance		min: 100m, max: 220m
		Look back distance		min: 0m, max: 150m
		Temporary lack of attention		Duration: 5s, Probability: 5%
Lateral control			Waiting time before diffusion	60s
			Min. headway	0.5m
			Safety distance reduction factor	0.6
			Maximum deceleration for cooperative braking	-3m/s <sup>2</sup>

2) 자율주행자동차 주행행태 구현

자율주행자동차의 주행행태를 반영한 종방향 제어를 위한 차량추종 모형으로 intelligent driver model(IDM)을 이용하였다. IDM은 숙련된 운전자의 행동을 근사화하고 반응을 통합한 차량추종 모형이다(Sultani and Choi, 2010). IDM은 안정적인 가감속으로 최소 안전거리를 유지하면서 최고 속도로 주행할 수 있도록 고안되었다(Park et al., 2015). 따라서, IDM은 연속적이고 정확하면서 간단하여 미시적 차량추종 모형에 오랫동안 사용되어 왔다(Liebner et al., 2012). IDM에서 차량추종을 위한 가속도를 도출하는 수식은 다음 식 (1)과 같다 (Treiber and Kesting, 2013).

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[ 0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, v: 실제 속도
- a: 최대 가속도
- v<sub>0</sub>: 설계 속도
- δ: 가속도지수 (설계속도에 근접 시 값이 클수록 늦게 감속)
- s\*: 설계 동적(dynamical) 거리
- Δv: 전방차량과의 상대속도
- s<sub>0</sub>: 최소 차간거리
- T: 설계 차두시간
- b: 최대 감속도

본 연구에서는 VISSIM에서 차량의 주행행태를 사용자가 직접 구현할 수 있는 external driver model API를 이용하여 IDM을 구축하였다. IDM을 구축하기 위해 프로그래밍 언어인 C++ 언어를 이용하여 코딩하였고 Visual studio 2019를 사용하여 빌드하였다. IDM은 Treiber and Kesting(2000), Zhou et al.(2017)에서 적용한 값을 활용하여 구축 후 자율주행자동차의 차종(vehicle types) 설정에 적용하였다.

또한, 자율주행자동차의 횡방향 제어를 반영하기 위해서 VISSIM 자체적으로 제공하는 횡방향 제어 파라미터를 이용하여 혼동대기시간(waiting time before diffusion)과 최소 차두거리(min headway)를 조정하였다. 차

<Table 2> Driving behavior parameters of autonomous vehicle

Parameter		Value for autonomous vehicle
Longitudinal control (IDM)	Maximum acceleration a	1.4m/s <sup>2</sup>
	Maximum deceleration b	2.0m/s <sup>2</sup>
	Desired speed v <sub>0</sub>	110kph
	Acceleration exponent δ	4
	Minimum gap s <sub>0</sub>	2m
	Desired time headway T	0.6s
Lateral control	Waiting time before diffusion	30s
	Min. headway	0.3m
	Safety distance reduction factor	0.6
	Maximum deceleration for cooperative braking	-3m/s <sup>2</sup>

로변경을 위한 운전자의 판단력이 느리면 혼잡을 유발할 수 있기 때문에 Park et al.(2013)의 연구를 바탕으로 혼동대기시간을 30초로 설정하였으며, 최소 차두거리는 자율주행자동차가 차두거리를 극단적으로 줄일 수 있다는 Yook et al.(2018)의 연구를 바탕으로 0.3m로 설정하였다. 자율주행자동차의 종방향 및 횡방향 제어를 위한 설정값은 <Table 2>와 같다.

특히, 본 연구에서는 자율주행자동차가 부착된 센서들을 통해 선행 차량의 감속을 인지 및 판단하여 급정거보다는 부드러운 감속을 수행할 것이며, 장착된 센서를 기반으로 전방 상황을 전달하므로 일반차보다 차로변경이 적을 것으로 가정하였다. 이후, 구축된 자율주행자동차의 종방향 및 횡방향 제어를 검증하기 위해 동일한 네트워크에서 같은 조건으로 일반차만 주행 시와 자율주행자동차만 주행 시 매초 개별 차량의 주행행태와 차로변경 성능을 비교하였다. 주행행태와 차로변경 성능을 비교한 결과, 자율주행자동차는 일반차보다 차선변경을 적게 하는 등 주행행태에 차이가 있음을 확인하였다.

#### 4. 시나리오 구축

본 연구에서는 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 교통류 영향을 분석하기 위해 총 11개의 시나리오를 구축하였다. 각 시나리오는 <Table 3>과 같이 일반차와 자율주행자동차의 구성비가 다르며, 자율주행자동차의 시장점유율이 10%씩 증가하도록 구축하였다.

<Table 3> Market penetration rate scenarios

MPR (%)	Normal vehicle (%)	Autonomous vehicle (%)
0	100	0
10	90	10
20	80	20
30	70	30
40	60	40
50	50	50
60	40	60
70	30	70
80	20	80
90	10	90
100	0	100

#### 5. 평가 지표 선정

교통류 영향 분석을 위해 이동성과 안전성 두 가지 측면에서 평가 지표를 선정하였다. 교통 분야에서 이동성을 나타내는 지표로는 공간평균속도, 시간평균속도, 밀도, 시간당 통과교통량, 평균 지체, 평균통행시간 등이 있다. 이 중 본 연구에서는 이동성 지표로 공간평균속도와 평균통행시간을 선정하였다. 공간평균속도(space mean speed, SMS)는 특정 시간에 도로구간을 통과한 차량 속도의 조화평균을 의미하며, 다음 식 (2)와 같다.

$$\bar{\mu}_{SMS} = \frac{n \times d}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{n}{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^n t_i} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (\frac{t_i}{d})} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu_i}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $\bar{\mu}_{SMS}$ : 공간평균속도  
 n: 차량 대수  
 d: 구간 길이  
 $t_i$ : 차량 i의 통행시간  
 $\mu_i$ : 차량 i의 속도

평균통행시간(travel time)은 개별 차량이 일정 구간을 통과하는데 걸린 시간의 산술평균 값을 의미하며, 다음 식 (3)과 같다.

$$TT = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, TT: 평균통행시간  
 $t_i$ : 차량 i의 통행시간  
 n: 차량 대수

안전성 지표 선정을 위해 기존 연구를 바탕으로 안전성 지표를 검토한 결과, 주로 사용되는 지표로는 차 두거리, 속도분산, 사고건수, 사고심각도, TTC, 충돌 후 시간(post-encroachment time, PET), 상충 등이 조사되었다. 특히, 본 연구에서는 고속도로에서 상충과 직결되는 항목을 도출하고자 충돌 상충에는 급정거율(brakes hard rate, BHR), 차로변경 상충에는 차로변경률(lane change rate, LCR)을 안전성 지표로 도출하고자 하였다. 이에 따라 네트워크에서 전체 차량의 급정거율과 차로변경률을 산정하였다. VISSIM에서는 매초 개별 차량의 주행행태(drive state)를 나타내는 항목이 존재하며, 주행행태 항목은 기본(default), 급정거(brakes hard), 적당한 감속(brakes moderately), 차선변경(changing lane), 차선변경완료(has changed lane), 주의력상실(loss of attention)으로 분류된다. 여기서 급정거는  $-3.0m/s^2$ 미만을 기준으로 한다(PTV, 2018). 급정거율은 급정거 횟수를 분석동안 매초 기록된 전체 데이터 수로 나눈 것을 의미하며, VISSIM에서 매초 생성되어 저장되는 개별 차량 데이터를 바탕으로 산출된다. 산출 방법은 다음 식 (4)와 같다.

$$BHR_i = \frac{b_i}{nr_i} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $BHR_i$ : 차종 i의 급정거율  
 $b_i$ : 차종 i의 급정거 횟수  
 $nr_i$ : 분석 시간 동안 차종 i의 매초 기록된 데이터 수  
 i: 일반차, 자율주행자동차, 전체(일반차 및 자율주행자동차)

차로변경율은 전체 차량의 차로변경횟수를 분석동안 매초 기록된 전체 데이터 수로 나눈 것을 의미하며, VISSIM에서 매초 생성되어 저장되는 개별 차량 데이터를 바탕으로 산출된다. 산출 식은 다음 식 (5)와 같다.

$$LCR_i = \frac{l_i}{nr_i} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, LCR: 차종 i의 차로변경률  
 $l_i$ : 차종 i의 차로변경 횟수  
 $nr_i$ : 분석 시간 동안 차종 i의 매초 기록된 데이터 수  
 i: 일반차, 자율주행자동차, 전체(일반차 및 자율주행자동차)



## IV. 연구 결과 분석

구축된 11개의 시나리오를 각각 5번의 반복 수행을 통해 이동성과 안전성 결과를 분석하였다. 미시교통시물레이션은 난수(random seed)에 따라 다른 결과가 도출되므로 결과의 신뢰성 보장을 위해 반복 수행(multi-run)이 필요하므로 수행 횟수는 5회로 설정하였다. 또한, 연구의 결과를 분석하기 위해 기초 통계 분석을 수행하고 상자 그림(box plot)을 이용하여 시각화하였다.

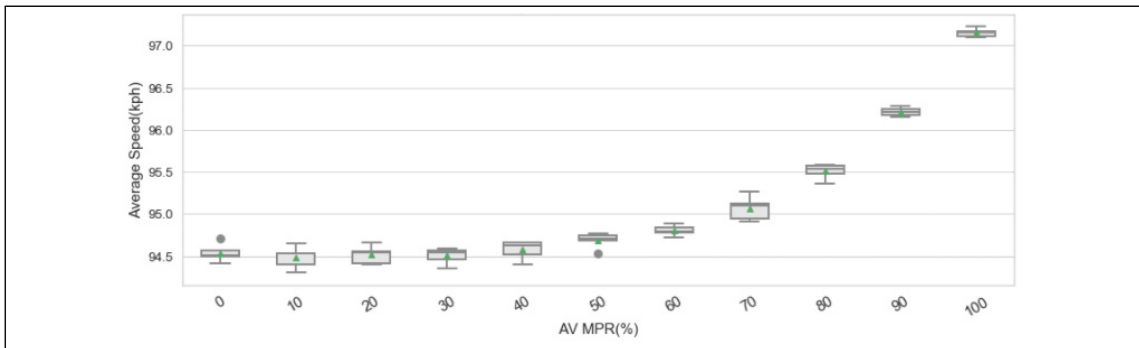
### 1. 이동성 지표 분석 결과

이동성 지표의 분석을 위하여 공간평균속도와 평균통행시간을 효과적으로 선정하여 분석하였다. 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 차종별 공간속도 변화는 <Table 4>와 같으며, 자율주행자동차의 시장점유율이 증가함에 따라 일반차와 자율주행자동차 모두 공간평균속도가 점차 증가하는 추세를 보였다.

<Table 4> Space mean speed(kph) results between NV and AV

MPR(%)	mean, ( ): Standard Deviation										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
NV	94.536 (0.099)	94.538 (0.119)	94.622 (0.104)	94.638 (0.087)	94.718 (0.115)	94.808 (0.090)	94.808 (0.052)	94.916 (0.119)	95.088 (0.088)	95.250 (0.110)	-
AV	-	93.952 (0.129)	94.090 (0.098)	94.184 (0.093)	94.356 (0.083)	94.566 (0.083)	94.802 (0.060)	95.132 (0.139)	95.612 (0.084)	96.316 (0.053)	97.154 (0.047)
Total	94.537 (0.099)	94.482 (0.119)	94.515 (0.095)	94.503 (0.084)	94.575 (0.010)	94.689 (0.085)	94.805 (0.057)	95.067 (0.127)	95.509 (0.081)	96.213 (0.045)	97.154 (0.047)

또한, 전체 네트워크의 분석결과는 <Fig. 3>과 같으며, 자율주행자동차의 시장점유율 0% ~ 60%까지는 증감률이 0.1% 이하로 유사하지만, 70% 이상부터는 10% 증가할 때마다 증감률이 각각 0.3%, 0.5%, 0.7%, 1.0%로 점차 커져 공간평균속도가 큰 변화율로 증가하는 모습을 보이는 것으로 나타났다. 이는 자율주행자동차의 시장점유율이 70% 이상으로 증가할 경우 고속도로의 공간평균속도가 상승하여 이동성이 향상되는 긍정적인 효과를 지니는 것으로 분석되었다.



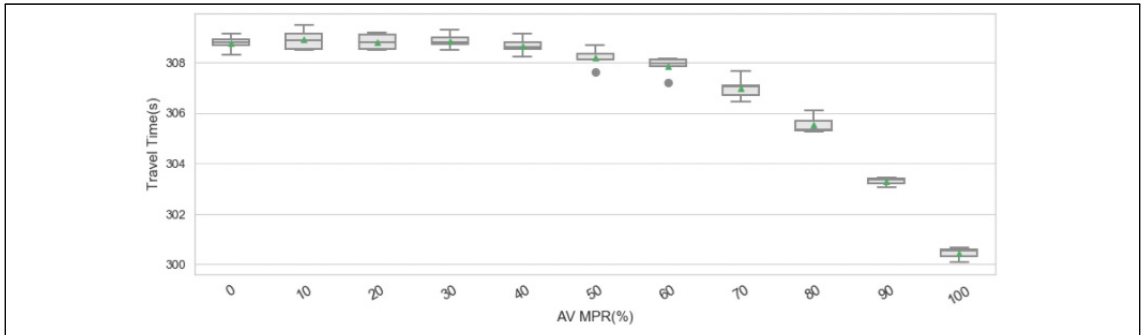
<Fig. 3> Space mean speed results of mobility analysis in the network

또 다른 이동성 지표인 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 차종별 및 네트워크 전체의 평균통행시간 변화를 분석하였다. 자율주행자동차 시장점유율에 따른 차종별 평균 통행시간 변화 결과는 <Table 5>와 같으며, 공간평균속도와 마찬가지로 평균통행시간은 두 차종 모두에서 감소하는 추세가 나타났다.

<Table 5> Travel time(s) results between NV and AV

MPR(%)	mean, ( ): Standard Deviation										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
NV	308.766 (0.273)	308.720 (0.379)	308.466 (0.310)	308.386 (0.308)	308.188 (0.367)	307.768 (0.383)	307.850 (0.364)	307.458 (0.452)	306.862 (0.378)	306.348 (0.453)	-
AV	-	310.670 (0.372)	310.212 (0.316)	309.922 (0.255)	309.356 (0.261)	308.586 (0.325)	307.856 (0.327)	306.780 (0.448)	305.214 (0.317)	302.958 (0.134)	300.426 (0.211)
Total	308.768 (0.274)	308.913 (0.370)	308.816 (0.277)	308.850 (0.269)	308.656 (0.311)	308.179 (0.346)	307.853 (0.338)	306.983 (0.417)	305.535 (0.318)	303.284 (0.136)	300.426 (0.210)

전체 네트워크에서의 분석결과, 자율주행자동차의 시장점유율 0% ~ 60%까지는 증감률이 약 -0.1%로 유사하게 나타났으며, 70% 이상부터는 10% 증가할 때마다 증감률이 -0.3%, -0.5%, -0.7%, -0.9%로 점차 커져 70% 이상일수록 더욱 크게 감소하는 추세가 나타났다. 따라서 자율주행자동차가 증가할수록 전체 네트워크의 통행시간이 줄어 이동성에 긍정적인 효과를 가진다고 판단하였다. 그 결과는 <Fig. 4>와 같다.



<Fig. 4> Travel time results of mobility analysis in the network

여기서 주목할 점은 공간평균속도와 평균통행시간 모두 시장점유율이 낮은 0~60%에서는 증감률의 절댓값이 0.1% 이하로 그 차이가 미미하다가, 시장점유율이 70%를 넘어가는 시점부터 0.3%, 0.5%, 0.7%, 1.0%에 가깝게 변화하여 그래프상에서 눈에 띄게 이동성이 향상된다는 점이다. 따라서 자율주행자동차의 시장점유율이 증가할수록 고속도로에서 이동성 측면에서 효과적임을 확인하였다.

## 2. 안전성 지표 분석 결과

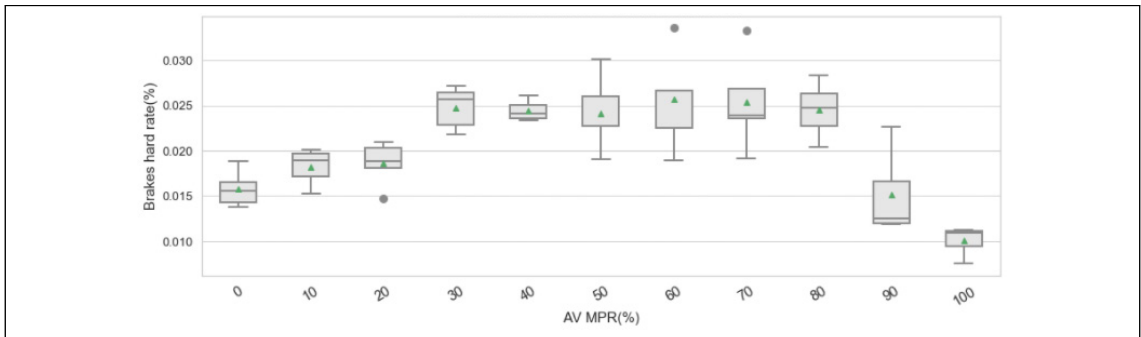
안전성 분석을 위하여 급정거율과 차로변경률을 효과적으로 선정하고 이를 분석하였다. 우선 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 차종별 급정거율을 분석하였다. 분석결과, 자율주행자동차의 시장점유율이 80%까지 증가할수록 일반차는 점차 급정거율이 증가하는 양상을 띠었으며, 자율주행자동차는 일정 수준 내에서

변동하다가 시장점유율 60%를 기점으로 감소하였다. 다음 <Table 6>은 차종별 급정거율을 분석한 결과이다.

<Table 6> Brakes hard rate(%) results between NV and AV

MPR(%)	Mean, ( ): Standard Deviation										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
NV	0.016 (0.002)	0.018 (0.002)	0.017 (0.002)	0.023 (0.002)	0.023 (0.001)	0.024 (0.003)	0.024 (0.006)	0.027 (0.005)	0.025 (0.004)	0.017 (0.009)	-
AV	-	0.024 (0.004)	0.025 (0.004)	0.029 (0.002)	0.026 (0.003)	0.024 (0.005)	0.027 (0.005)	0.025 (0.005)	0.024 (0.004)	0.015 (0.004)	0.010 (0.001)
Total	0.016 (0.002)	0.018 (0.002)	0.019 (0.002)	0.025 (0.002)	0.024 (0.001)	0.024 (0.004)	0.026 (0.005)	0.025 (0.005)	0.025 (0.003)	0.015 (0.004)	0.010 (0.001)

전체 네트워크에서의 급정거율을 분석한 결과, 다른 주행행태를 가진 일반차와 자율주행자동차가 혼재되면 급정거율이 증가하는 모습을 보였다. 증감률을 살펴보면 자율주행자동차 시장점유율이 20%에서 30%가 될 때 급정거율이 약 31.6% 증가하였고, 80%에서 90%가 될 때 약 40% 감소하였다. 급정거율이 증가하면 추돌 위험이 커지며 사고로 이어질 가능성이 높아진다. 시장점유율 30~80% 구간에서 급정거율이 높게 나타난 것은 일반차의 주행행태는 차두거리가 일정치 않고 변동이 있는 반면, 자율주행자동차의 주행행태는 차두거리를 비교적 일정하게 유지하는 특징이 있다. 따라서 서로 다른 주행행태를 가지고 있는 일반차와 자율주행자동차가 혼재되는 구간인 30~80% 구간에서 급정거율이 높아짐을 확인하였다.



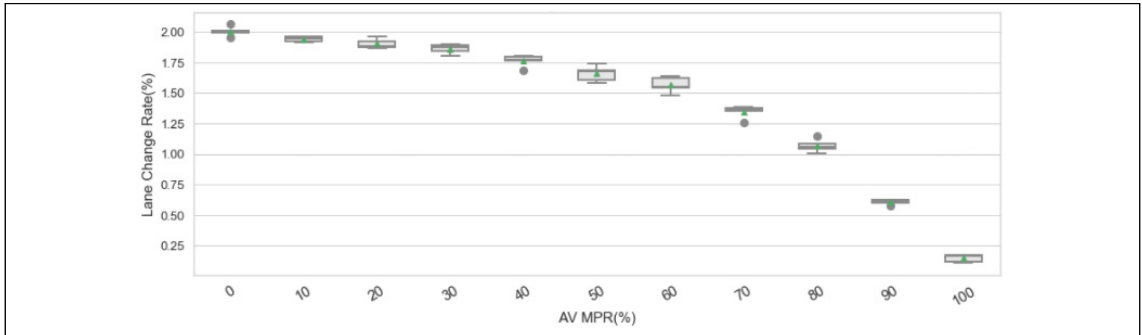
<Fig. 5> Brakes hard rate results of safety analysis in the network

본 연구에서는 차로변경률을 추가적인 안전성 지표로 선정하여 분석하였다. 차로변경의 증가는 차로변경에 따른 상충의 증가로 이어질 수 있어 안전성뿐만 아니라 이동성도 저하시킬 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 선정된 안전성 지표인 차로변경률이 낮을수록 안전성이 높다고 판단하였다. 우선 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 차종별 차로변경률을 분석한 결과, 시장점유율이 증가할수록 일반차와 자율주행자동차 모두 차로변경률이 감소하였다. 다음 <Table 7>은 자율주행자동차의 시장점유율에 따른 차종별 차로변경률을 나타낸다.

<Table 7> Lane change rate(%) results between NV and AV

		Mean, ( ): Standard Deviation										
MPR(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
NV	2.005 (0.034)	1.922 (0.024)	1.856 (0.050)	1.789 (0.038)	1.697 (0.046)	1.596 (0.043)	1.480 (0.045)	1.337 (0.053)	1.113 (0.023)	0.746 (0.051)	-	
AV	-	2.114 (0.129)	2.089 (0.038)	2.032 (0.083)	1.867 (0.042)	1.720 (0.077)	1.620 (0.068)	1.352 (0.052)	1.058 (0.055)	0.592 (0.015)	0.148 (0.028)	
Total	2.005 (0.034)	1.941 (0.019)	1.903 (0.035)	1.862 (0.035)	1.765 (0.041)	1.658 (0.058)	1.564 (0.056)	1.347 (0.046)	1.068 (0.048)	0.607 (0.017)	0.148 (0.028)	

전체 네트워크의 차로변경률을 분석한 결과는 <Fig. 6>과 같으며, 차종별 분석결과와 마찬가지로 시장점유율이 증가할수록 차로변경률이 감소하는 것을 확인하였다. 시장점유율이 0~60%일 땐 차로변경률의 증감률이 -1.9%에서 -6.1%로 나타났는데 비해 70%부터는 시장점유율이 10%씩 증가할 때마다 -13.9%, -20.7%, -43.2%, -75.6%의 증감률을 보여 차로변경의 비율이 급격히 줄어들음을 확인하였다.



<Fig. 6> Lane change rate results of safety analysis in the network

안전성 분석 결과, 자율주행자동차의 시장점유율이 높아질수록 차로변경률은 감소하지만, 급정거율은 증가하다가 감소하는 추세를 가지는 것으로 분석되었다. 따라서, 자율주행자동차와 일반차가 혼재된 혼합 교통 상황에서는 교통류의 안전 관리를 위한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

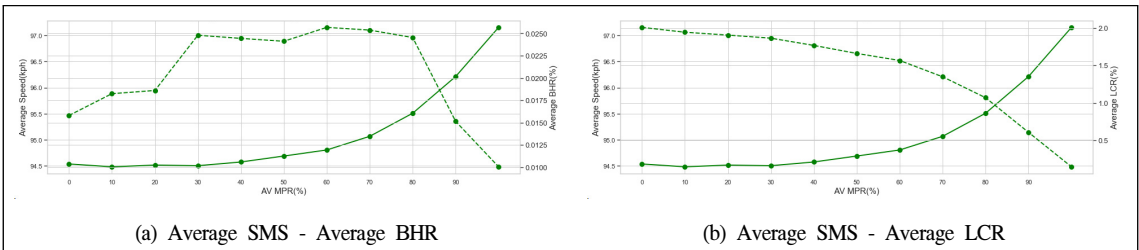
### 3. 종합 분석 결과

이동성과 안전성을 종합적으로 분석하기 위해 개별 효과척도 분석 결과를 <Fig. 7>과 같이 종합하였다. 이동성과 안전성의 종합 분석을 위해 공간평균속도와 급정거율, 공간평균속도와 차로변경률 결과를 비교 분석하였다. 평균통행시간은 공간평균속도와 반비례 관계임에 따라 평균통행시간에 따른 안전성 변화에 대한 분석은 생략하였다.

우선 공간평균속도와 급정거율의 그래프를 종합적으로 분석하였다. 분석 결과, 자율주행자동차 시장점유율 30%~70% 구간에서는 급정거율이 증가하였으며, 공간평균속도는 소폭 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 두 지표를 종합적으로 본다면, 이 구간에서는 교통류의 안전관리가 필요한 자율주행자동차 시장점유율 구간인 것으로 판단된다.

또한, 공간평균속도와 차로변경률의 그래프를 종합적으로 분석하였다. 분석 결과, 자율주행자동차 시장점유율 70% 이상부터 공간평균속도는 증가하고 차로변경률 또한 큰 폭으로 감소되는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구의 결과를 종합하여 보면, 공간평균속도, 평균통행시간, 차로변경률 지표의 경우 자율주행자동차의 시장점유율이 낮을 땐 그 차이가 미미하다가 시장점유율이 70% 이상부터 효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 반면, 안전성 효과측도 중 급정거율은 혼합교통상황에서 수치가 비교적 높게 나타났지만, 단일 차종의 시장점유율이 우세한 교통 상황에서는 그 수치가 급격히 낮아졌다. 급정거율이 혼합교통상황에서 비교적 높게 나타나는 현상은 일반차의 주행행태는 차두거리가 비교적 변동이 크며, 가·감속이 잦은 특성이 있어 전방 차량이 감속하는 상황에 크게 영향을 받기 때문이라고 판단된다. 이에 따라 향후 자율주행자동차의 도입이 시작되면 자율주행자동차의 시장점유율이 증가할수록 이동성과 안전성이 점차 증가하지만 두 차종이 혼합된 교통 상황에서 안전 관리에 유의할 필요가 있음을 확인하였다.



<Fig. 7> Total analysis results in the network

## V. 결론 및 향후 연구과제

### 1. 결론

본 연구에서는 영동고속도로 용인IC~양지IC 단방향을 대상으로 미시교통시뮬레이션을 이용하여 자율주행자동차 시장점유율에 따른 고속도로 교통류 영향 분석을 수행하였다. 구축된 네트워크에서 IDM과 차로변경 매개변수를 이용하여 자율주행자동차 주행 행태를 구현하였다. 종방향 제어로 IDM을 적용함으로써 더 현실적인 자율주행의 구현이 가능하였고, 구축한 자율주행자동차의 주행행태 모형은 검증을 통해 급정거율과 차로변경률이 일반차보다 낮아 자율주행 행태를 잘 묘사하였다고 판단하였다. 검증 이후 자율주행자동차의 시장점유율을 0%에서 10%씩 증가시켜 총 11개의 시나리오를 5회씩 반복수행해 분석하였다. 분석 결과, 이동성 MOE인 공간평균속도는 자율주행자동차의 시장점유율이 높아질수록 점차 증가하였고, 평균통행시간은 점차 감소하여 이동성이 향상됨을 확인하였다. 안전성의 경우 급정거율은 일반차와 자율주행자동차가 섞이면 교통류가 불안정해지므로 시장점유율이 30~80%일 때 증가하여, 안전성 관리에 더욱 집중해야 할 것으로 보이고, 차로변경률은 시장점유율이 증가함에 따라 점차 감소하여 안전성에 긍정적인 영향을 가진다고 판단하였다. 이를 바탕으로 자율주행자동차의 시장점유율이 30~80%일 때 교통류의 안전 관리를 위해 자율주행자동차와 일반차를 분리하는 자율주행 전용차로 도입 및 운영을 검토할 필요가 있다고 판단된다. 또한 혼합 교통 상황에서 일반차가 안전한 주행을 할 수 있도록 C-ITS의 안전서비스를 이용할 필요가 있다고 판단된다.

## 2. 향후 연구과제

본 연구는 미시교통시물레이션을 이용하여 자율주행자동차 시장점유율에 따른 고속도로 교통류 영향 분석을 수행하였으나 몇 가지 연구의 한계가 존재한다.

우선, 버스전용차로와 터널, 휴게소, 진출입 구간을 반영하지 않은 기본구간에 대해 분석을 진행하였기 때문에 다양한 기하구조를 반영하여 연구를 수행하지 못하였다는 한계가 존재한다. 그러므로 보다 정확한 분석을 위해 향후 다양한 고속도로 기하구조를 반영하여 연구를 수행할 필요가 있다.

두 번째로, 시물레이션을 수행함에 있어 차종의 영향을 최소화하기 위해 승용차환산교통량을 입력하고 승용차만을 구현하였다는 한계가 존재한다. 하지만 자율주행자동차가 도입되면 중차량과 버스 등 다른 차종의 영향을 받을 것으로 보인다. 이에 따라 전 차종의 구성비율, 속도, 교통량 등을 현실과 유사하게 구현하여 분석을 진행하면 연구의 신뢰성이 향상될 것으로 기대된다.

세 번째로, 자율주행자동차 구현에 있어 종방향 제어를 위한 IDM의 매개변수 선정에 있어 문헌고찰을 바탕으로 연구를 수행하였다는 점이다. 자율주행자동차의 종방향 제어 능력은 제조사 마다 다를 수 있으므로 자율주행자동차를 구현하기 위해 IDM의 매개변수별 효과를 정량적으로 분석하여 연구를 수행한다면 보다 다양한 자율주행자동차를 미시교통시물레이션에서 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, 자율주행자동차 구현에 있어 미시교통시물레이션의 차량추종 모형과 차로변경 모형을 이용하였다는 점이다. 자율주행자동차는 부착된 센서를 통해 상황을 인지하고 판단하여 차량을 제어하므로, 미시교통시물레이션에서는 자율주행자동차를 완전히 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 향후 센서 기반의 자율주행 시물레이션과 미시교통시물레이션을 혼합하여 사용한다면, 보다 연구의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 21AMDP-C160637-01) 및 2020년도 정부(교육부) 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2020R111A1A01072166) 지원에 의해 수행되었습니다. 본 논문은 2021년 한국ITS학회 춘계학술대회에 게재되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

## REFERENCES

- Choi J., Son B. and Choi J.(1999), "The Effect of Rain on Traffic Flows in Urban Freeway Basic Segments," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 17, no. 1, pp.29-39.
- Kang S., Kwon B., Kwon C., Park S. and Yun I.(2018), "Development of Incident Detection Algorithm Using Naive Bayes Classification," *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 17, no. 6, pp.25-39.
- Kim J., Lim D., Seo Y. and Kim H.(2021), "Influence of Exclusive Lanes for Autonomous Vehicles on Highway Traffic Flow," *Korean Society of Transportation 84th Academic Presentation*.
- Ko H., Park S., Yi K., So J., Chae H., Park J. and Yun I.(2017), "Development of Car-following Model for Automated Vehicle in Microscopic Traffic Simulation using Measured Data," *ITS World*

*Congress 2017 Montreal.*

- KPMG Korea(2020), *Sanjong Insight*, vol. 69, p.15.
- Lee S. and Oh C.(2018), “A Methodology to Establish Operational Strategies for Truck Platooning on Freeway On-ramp Areas,” *Korean Society of Transportation*, vol. 36, no. 2, pp.67-85.
- Liebner M., Baumann M., Klanner F. and Stiller C.(2012), “Driver intent inference at urban intersections using the intelligent driver model,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Madrid, Spain, pp.1162-1167. doi: 10.1109/IVS.2012.6232131
- Lux Research(2021), *Autonomous Vehicle Market Forecast: Demystifying the \$50 Billion Opportunity*, p.6.
- Park I., Lee J., Lee J. and Hwang K.(2015), “Impact of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow-Focused on Seoul-Signal Basic Sections of GyeongBu Freeway-,” *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Park J., Oh C. and Chang M.(2013), “A Study on Variable Speed Limit Strategies in Freeway Work Zone Using Multi-Criteria Decision Making Process,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 31, no. 5, pp.2-15.
- PTV(2018), *PTV Vissim 10 User Manual*, p.805.
- Song G., Yu L. and Zhang Y.(2012), “Applicability of traffic microsimulation models in vehicle emissions estimates: Case study of VISSIM,” *Transportation Research Record*, vol. 2270, no. 1, pp.132-141.
- Sultani W. and Choi J. Y.(2010), “Abnormal Traffic Detection Using Intelligent Driver Model,” *20th International Conference on Pattern Recognition*, Istanbul, Turkey, pp.324-327. doi: 10.1109/ICPR.2010.88
- Sun J., Zheng Z. and Sun J.(2020), “The relationship between car following string instability and traffic oscillations in finite-sized platoons and its use in easing congestion via connected and automated vehicles with IDM based controller,” *Transportation Research Part B*, vol. 142, pp.58-83.
- Treiber M. and Kesting A.(2013), *Traffic Flow Dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, eBook ISBN 978-3-642-32460-4, DOI 10.1007/978-3-642-32460-4.
- Treiber M., Hennecke A. and Helbing D.(2000), “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations,” *Phys. Rev. E, Stat. Phys., Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Top.*, vol. 62, pp.1805-1824.
- Yook D., Lee B. and Park J.(2018), “Exploring the Impacts of Autonomous Vehicle Implementation through Microscopic and Macroscopic Approaches,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 17, no. 5, pp.14-28.
- Zhou M., Qu X. and Jin S.(2017), “On the Impact of Cooperative Autonomous Vehicles in Improving Freeway Merging: A Modified Intelligent Driver Model-Based Approach,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 6, pp.1422-1428.
- Zhu M., Wang X., Tarko A. and Fang S.(2018), “Modeling car-following behavior on urban expressways in Shanghai: A naturalistic driving study,” *Transportation Research Part C*, vol. 93, pp.425-445.