

자율주행자동차 도입으로 인한 교통흐름 변화 분석

Impacts of Automated Vehicles on Traffic Flow Changes

정승원* · 문영준** · 이성렬*** · 황기연****

* 주저자 : 홍익대학교 과학기술연구소 연구교수
 ** 공저자 : 한국교통연구원 교통기술연구소장
 *** 공저자 : 삼성교통안전문화연구소 책임연구원
 **** 교신저자 : 홍익대학교 도시공학과 교수

Seung weon Jung* · Young jun Moon** · Sung Yeol Lee*** ·
 Kee Yeon Hwang****

* Research Professor, Hongik Univ. Research Institute of Science and Technology
 ** Chief Director, The Korea Transport Institute
 *** Senior Researcher, Samsung Traffic Safety Research Institute
 **** Professor, Hongik Univ.

† Corresponding author : Kee Yeon Hwang, keith@hongik.ac.kr

Vol.16 No.6(2017)

December, 2017
 pp.244~257

ISSN 1738-0774(Print)
 ISSN 2384-1729(On-line)
<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.6.244>

Received 24 November 2017
 Revised 17 December 2017
 Accepted 20 December 2017

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

요 약

교통혼잡은 운전자의 인지반응시간, 운전미숙, 무리한 차로변경 등 인적요인으로부터 발생된다. 자율주행자동차가 도입되면 이러한 인적요인들이 배제되고 군집주행으로 인해 평균 주행속도 상승, 교통흐름 안정화, 도로용량 증대 효과가 예상된다. 본 연구는 자율주행자동차 도입으로 인한 교통흐름 변화를 교통량-밀도-속도 산포도 그래프를 통해 분석하고, 도로용량 증대 효과를 도출하였다.

분석 결과, 자율주행자동차의 혼입율이 높아질수록 교통량-밀도-속도의 그래프 곡선이 완화되며, 폭이 줄어들어 교통류가 안정적으로 변화하였다. 또한 자율주행자동차 혼입율 100%에서는 도로용량이 약 120% 증대되는 것으로 분석되었다. 자율주행자동차 도입으로 인한 교통혼잡개선 및 교통수요관리 측면에서 긍정적인 기대효과가 있을 것으로 분석되었다.

핵심어 : 자율주행자동차, 행위자기반모형, 교통흐름, 도로용량

ABSTRACT

Traffic congestion occurs from drivers' human factors such as driver reaction time, reckless lane change, and inexperienced driving. When Automated Vehicles are introduced, human factors are excluded, resulting in increased average vehicle speed, stabilizing traffic flow, and increasing road capacity. This study analyzed traffic flow changes through traffic volume-speed-density plots, and increased road capacity due to Automated Vehicles.

As a result of the analysis, when rate of automated vehicles gets higher, the traffic flow became stable. Additionally, it was analyzed that when all vehicles were automated, the road capacity increased by about 120%. It is expected that there will be a positive expectation in terms of traffic congestion and traffic demand management due to the introduction of Automated Vehicles.

Key words : Automated Vehicles, Agent Based Model, Traffic Flow, Road Capacity

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

자율주행자동차의 도입으로 인한 개선 효과는 교통사고 감소, 운전자 편의성 향상, 교통혼잡 개선 등이 있다. 교통혼잡은 운전자의 인지반응시간과 전체 교통류를 고려하지 않은 차로변경, 미숙한 운전 실력 등 다양한 인적요인으로 인해 발생된다. 자율주행자동차는 일정한 차간간격과 일정한 차두시간을 유지하여 주행함으로써 기존의 교통류에서 교통혼잡을 야기하는 근본적인 원인이 해소될 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구는 자율주행자동차가 도입 되었을 때 교통흐름의 변화를 분석하여 자율주행자동차의 교통혼잡 개선효과를 검토하였다. 시뮬레이션 분석을 수행하여 자율주행자동차의 혼입율에 따른 교통량-밀도, 밀도-속도, 속도-교통량의 관계 그래프를 통해 교통흐름 변화와 도로용량 증대 효과를 검토하였다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 자율주행자동차 도입으로 인한 혼잡 개선 및 도로용량 증대 효과와 전체적인 교통류의 흐름 변화를 알아보기 위해 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 자율주행자동차의 혼입율을 0%, 50%, 100%로 구분하여 밀도-속도, 교통량-밀도, 속도-교통량 그래프를 통해 전반적인 교통흐름 변화와 도로용량 증대 효과를 분석하였다. 분석방법으로 행위자기반모형(Agent Based Model)에 최적화 되어있는 시뮬레이션 툴 Netlogo 6.0.1을 이용하였다. Netlogo는 언어기반 시뮬레이션 툴로서, 행위자기반모형에 최적화 되어있고, 비교적 쉬운 언어구조를 가지고 있으며 다양한 속성 값들을 추가 또는 변경 하는 것이 용이하여 활용하게 되었다.

시뮬레이션 환경은 4차로 연속류를 대상으로 승용차, 화물차, 버스를 적용하였고, 자율주행자동차의 혼입율 0%, 50%, 100%일 때 교통흐름 변화 및 도로용량 증대 효과를 분석하였다.

II. 기존연구 고찰

1. 자율주행자동차의 정의

국내 자동차관리법 제2조(정의)에 따르면 자율주행자동차란 “운전자 또는 승객의 조작 없이 자동차 스스로 운행이 가능한 자동차”를 말한다(자동차관리법 제2조. 2015.08.11. 개정).

자율주행자동차는 운전자의 눈(주시), 손(조향), 발(가감속)의 사용 유무에 따라 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)는 0~4의 5단계, SAE(Society of Automation Engineers)는 0~5의 6단계로 구분하고 있다. SAE 기준으로 정의할 때, 0단계는 자율주행기술이 적용되지 않은 일반 자동차를 의미하며, 1~2단계는 운전자를 지원하는 부분적 자율주행 단계로 현재 일부 상용화 되어있는 기술 수준에서 크게 벗어나지 않는 단계이다. 3~4단계는 특정 상태에서 자율주행이 가능한 상태로 운전자가 운전석에 착석한 상황에서 손과 발을 자유롭게 할 수 있는 단계이다. 5단계는 완전 자율주행이 가능한 상태로 구글카와 같은 Driverless Car, 혹은 Unmanned Car의 상태를 의미한다.

현재 국내의 기술 개발 목표는 SAE기준 2~3단계라고 할 수 있으므로, 본 연구 또한 2~3단계를 기준으로 자동차 특성 등을 설정하여 분석하였다.

2. 자율주행자동차 관련 선행연구

근래에 들어 자율주행자동차와 관련된 연구가 급증하였으나 대부분이 법·제도와 관련된 연구이며, 그 외 분야에서도 통신, 전자 등의 분야가 주를 이루고 있다. 교통 분야에서 시뮬레이션 분석과 같은 공학적인 연구는 많지 않다. 자율주행자동차 도입으로 인한 교통흐름 및 교통혼잡 개선효과를 시뮬레이션 분석을 통해 분석한 연구를 위주로 검토하였다.

Vander werf et al.(2003)은 합류부와 분류부가 존재하는 연속류 1.6km 1차로에서의 자율주행자동차의 도입 효과를 검토하였다. 자율주행자동차는 ACC(Adaptive Cruise Control)와 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control) 기능의 개선 효과를 검토하였다.

Van Arem et al.(2006)은 4차로에서 3차로로 변경되는 병목구간에서, CACC 기능이 장착된 자율주행자동차가 기존 교통류에 도입되었을 때의 효과를 검토하였다. 분석 결과 자율주행자동차의 혼입율 40% 이하에서는 평균주행속도가 오히려 감소하지만, 혼입율 60% 이상에서는 평균주행속도가 증가하는 분석 결과를 도출하였다.

Kesting et al.(2007)과 Kesting et al.(2008)은 본 연구에서 활용한 IDM(Intelligent Driver Model)과 MOBIL(Minimizing Overall Braking Induced by Lane change)을 활용한 연구로서 본 연구의 선구적 연구라고 할 수 있다. Kesting et al.(2008)은 1개의 합류부가 존재하는 연속류 10km 3차로 구간에서 자율주행자동차의 ACC 기능으로 인한 교통흐름 개선 효과를 분석하였다.

Arnaout et al.(2010)과 Arnaout et al.(2014)는 행위자기반모형과 Netlogo를 이용하여 자율주행자동차의 혼잡 개선 효과를 검토한 연구이다. Arnaout et al.(2010)은 연속류 255m 1차로 구간에서 자율주행자동차 1대 도입으로 인한 평균주행속도 개선 효과를 분석하였다. 자율주행자동차 1대만을 적용하였고 차종구분이 없는 등 다소 시험적인 연구이다. Arnaout et al.(2014)는 이를 발전시켜 연속류 6km 4차로 구간에서의 자율주행자동차 도입효과를 분석하였다. 화물차를 추가하여 차종 구분을 하였고, 교통량과 혼입율에 따른 자율주행자동차의 도입효과를 검토하였다. 분석결과 혼잡한 상황에서의 자율주행자동차 도입효과가 크게 나타났다.

Shladover et al.(2012)은 기존 교통류에 ACC와 CACC 기능이 장착된 차량이 도입 되었을 때 도로용량 변화를 분석하였으며, 시뮬레이션 툴로 미시, 메조 시뮬레이션 툴 AIMSUN을 이용하였다. ACC로 인한 개선 효과는 크지 않은 것으로 분석되었으며, CACC의 도입효과는 혼입율이 높아질수록 도로용량이 더 크게 증대되어, 최대 약 4000veh/h/l로 기존 교통류에서 약 2배 증가하는 것으로 분석되었다.

Ma et al.(2012)는 1차로 연속류에서 CACC기술이 적용된 자율주행자동차가 100% 도입되었을 때의 효과를 분석하였다. 행위자기반모형을 활용하였으며 분석 결과 자율주행자동차가 도입되었을 때 평균주행속도가 증가하는 것으로 분석되었다.

Park et al.(2015)은 연속류 4차로 기본구간에서 자율주행자동차 혼입율에 따른 교통량, 밀도, 속도 변화를 행위자기반모형을 활용하여 분석하였다. 자율주행자동차의 혼입율에 따른 개선효과를 분석한 결과, 밀도가 높을수록 자율주행자동차의 개선효과가 더 좋게 분석되었다. Kesting et al.(2008)에서 활용한 IDM, MOBIL 모형을 활용하였으며 시뮬레이션 툴로 Netlogo를 이용하였다. 특히 자율주행자동차 혼입율 0%일 때, 시뮬레이션 구축 환경과 유사한 연속류 도로의 실제 교통량을 적용하여 시뮬레이션을 분석하였다. 분석 결과 실측된 평균주행속도와 유사한 결과를 도출함으로써, 본 연구에서 활용되는 IDM, MOBIL 모형과 Netlogo를 활용한 시뮬레이션 분석 방법의 신뢰성을 높인 연구이다.

Ⅲ . 연구방법론

1. 자동차의 기본 특성 설정

본 연구는 차량 특성 및 차량의 행태 특성을 설정하여 시뮬레이션을 구축하였다. 안전한 거리를 유지하며 가속하는 차량 추종 모형과, 자기 자신 혹은 주변 차량들의 주행속도를 고려하여 차선 변경을 시도하는 차선 변경 모형에 따라 차량들이 통행하도록 하였다.

설계속도는 기존 교통모형과 비교가 수월하기 위해 연속류 일부에서 적용되는 제한속도 100km/h 를 적용하였다. 가속도의 경우 가장 일반적으로 상용화 되고 있는 차량의 제원을 토대로 적용하였다. 정지한 상태에서 가속하는 가속도 제한이 아닌 일정한 속도로 주행 중일 때 목표 속도까지 가속할 때의 가속 성능을 의미하는 추월가속성을 적용하였다. 설계속도와 가속도는 인적요인을 감안하여 정규분포에 따른 분산 값을 적용하여 설계속도는 $\pm 10\text{km/h}$, 가속도는 $\pm 0.1\text{m/s}^2$ 을 적용하였다.

차량 크기 또한 가장 흔하게 상용화되는 차량들의 제원을 적용하였다. 승용차의 마찰계수는 건조한 아스팔트 도로의 미끄럼마찰계수 0.8을 적용하였으며, 대형차량은 승용차 마찰계수의 75~85%를 차등 적용하고 있으므로, 소형화물차를 85%인 0.68, 버스와 대형화물차를 75%인 0.6으로 적용하였다.

자율주행자동차의 인지반응시간은 0.15초를 적용하였다. 자율주행자동차는 사람과 달리 인지반응시간이라는 개념으로 보기 어렵지만 편의상 인지반응시간으로 표현하였으며, 사실은 통신지연시간에 가깝다. 통신지연시간은 이보다 짧을 것으로 예상되고 있으나, 기존 선행연구에서 0.1~0.5초를 적용하고 있으며, 안전을 고려하여 비교적 여유 있게 반영하였다(Lee et al., 2015; Park et al., 2015; Vander Werf, J. et al., 2003; Van Arem, B. et al., 2006; Kesting, A. et al., 2008)

일반자동차의 인지반응시간은 1.5초를 적용하였다. 국내 도로용량편람 등에서는 2.5초를 적용하여 최소정지거 등을 제안하고 있으나, 이는 안전을 위해 비교적 여유 있게 설정되었다고 볼 수 있다. 본 연구는 기존의 인지반응시간에 관한 연구를 참고하여 1.5 ± 0.1 초로 설정하였다(Olson and Sivak, 1996; Broen and Chiang, 1996; Green, 2000; Fambro et al., 2007).

설계속도, 가속도, 인지반응시간 등의 자동차 기본 특성을 정리하면 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Variables of Vehicles

Description	Automated Vehicle	non Automated Vehicle		
		Car	Small Truck	Bus & Heavy Truck
Desired Speed (km/h)	100	100 ± 10	100 ± 10	100 ± 10
Maximum Acceleration (m/s^2)	-	2.2 ± 0.1	1.8 ± 0.1	1.6 ± 0.1
P.I.E.V(s) ¹⁾	0.15	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1
Coefficient of Sliding Friction	-	0.8	0.68	0.6
Size (m)	-	5	6	10
Platoon Spacing (m)	6	-	-	-

1) Perception-Identification-Emotion-Volition

2. 자동차의 행태 특성 설정

Kesting et al.(2008)에서 활용한 IDM(Intelligent Driver Model)을 적용하여 자동차 행태 특성을 설정하였다. IDM은 개별차량의 인지반응시간과 가속도에 따라 안전한 차간거리를 유지하며 주행할 수 있도록 설계된 모형으로, 비교적 단순하면서 실제 차량의 흐름과 유사한 행태를 보인다는 장점이 있다. 또한 자율주행자동차와 일반자동차가 혼재되어있는 교통류를 대상으로 하고 있으므로, 인지반응시간의 차이를 잘 보여줄 수 있는 모형이다. IDM은 식(1) 과 같이 표현된다.

$$\dot{v}(s, v, \Delta v) = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_{\max}} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

where,

\dot{v} : 주행가속도 (m/s^2)

a : 차량의 최대가속도 (m/s^2)

v_{\max} : 설계속도 (km/h)

s : 차간거리 (m)

$s^*(v, \Delta v)$: 최소안전거리 (m)

여기서 $s^*(v, \Delta v)$ 최소안전거리는 식(2)와 같이 국내 도로설계기준의 최소정지시거를 적용하였다.

$$D = d_1 + d_2 = \frac{v}{3.6} \cdot t + \frac{v^2}{2g \cdot f(3.6)^2} \quad (2)$$

where,

D : 정지시거 (m)

d_1 : 반응시간동안의주행거리 (m)

d_2 : 제동정지거리 (m)

v : 주행속도 (m/s)

t : 인지반응시간 (s)

g : 중력가속도 ($9.8m/s^2$)

f : 종방향미끄럼마찰계수

차로 변경에 대한 행태 특성은 MOBIL(Minimizing Overall Braking Induced by Lane change)을 활용하였다. MOBIL은 당 차량의 주행속도(가속도)가 향상되고, 주변 차량 (후행차량, 변경한 후의 차로에서의 선행 및 후행 차량) 또한 고려하여 차로변경을 시도하는 모형이다. 주변차량을 고려하는 지표 및 임계값 등을 통해 자율주행자동차와 일반자동차의 차이를 줄 수 있다(Kesting et al., 2007).

우선, 차로를 변경한 이후, 변경한 차로의 후행 차량의 감속도는 임계감속도를 넘을 수 없다. 차로변경으로 인해 후행 차량이 급격하게 감속하는 것을 제한하기 위해서이며 식(3)과 같다. 본 연구에서는 임계감속도를 모든 차량에 동일하게 $1.5m/s^2$ 를 적용하였다.

$$\tilde{a}_n \geq -b_{safe} \tag{3}$$

where,

\tilde{a}_n : 차로변경 후, 후행차량의 감속도 (m/s^2)

$-b_{safe}$: 임계감속도 ($-1.5m/s^2$)

MOBIL은 주변 차량의 영향을 고려하여 가속할 수 있을 때에 차로변경을 시도하는 모형이다. 차로 변경을 하고자 하는 차로의 앞 차량과의 차두거리가 확보되었을 때 우선적으로 차로변경을 시도하며, 이 때 현재 차로의 후행차량과 차로 변경을 시도하는 차로의 후행 차량의 가속도를 고려하여 차로 변경을 결정한다. 이러한 과정은 식(4)와 같다.

주변 차량 고려지표(p)는 차로변경을 결정할 때 주변 차량을 얼마나 고려하는가를 설정하는 지표로서, 자율주행자동차는 고려지표를 1, 일반차량은 0.5로 설정하였다. 즉, 자율주행자동차가 보다 더 주변 차량을 고려하여 차로 변경을 시도한다는 것을 의미한다. 효용판단임계값(Δa_{th})은 어느 정도의 효용에서 차로 변경을 결정하는가를 판단하는 기준으로 자율주행자동차는 $1m/s^2$, 일반차량은 $0.5m/s^2$ 으로 설정하였다.

$$\tilde{a}_c - a_c + p(\tilde{a}_n - a_n + \tilde{a}_o - a_o) > \Delta a_{th} \tag{4}$$

where,

a_c : 기준차량(c)의 가속도 (m/s^2)

a_n : 목표차로 후행차량(n)의 가속도 (m/s^2)

a_o : 현재차로 후행차량(o)의 가속도 (m/s^2)

\tilde{a}_c : 차로 변경 후, 기준차량(c)의 가속도 (m/s^2)

\tilde{a}_n : 차로 변경 후, 목표차로 후행차량(n)의 가속도 (m/s^2)

\tilde{a}_o : 차로 변경 후, 기준차로 후행차량(o)의 가속도 (m/s^2)

p : 주변차량 고려지표 (0 ~ 1)

Δa_{th} : 효용판단임계값 (0 ~ $1m/s^2$)

차로를 변경하기 위해 기본적으로 최소안전거리를 확보하도록 식(2)의 최소정지시거를 유지할 수 있을 때에만 차로변경을 시도하도록 하였으며, 이는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$s' \geq D \tag{5}$$

where,

s' : 선, 후행차량과 기준차량간의 차간거리 (m)

D : 기준차량과의 최소정지시거 (m)

3. 시뮬레이션 구축 및 시나리오 설정

시뮬레이션 구축은 행위자기반모형에 최적화 되어있는 언어기반시뮬레이션 툴 Netlogo 6.0.1을 이용하였다. Netlogo는 언어기반의 시뮬레이션 툴로서, 차량 특성, 통행 행태 특성 등을 비교적 쉽게 추가하고 변경이 가능하다는 장점이 있다.

행위자라고 할 수 있는 차량은, 실제 도로교통 상황을 구현하고자 승용차, 버스, 소형화물차, 대형화물차로 차종 구분을 하였고, 차종 비율은 교통량 정보제공 시스템 (TMS, <http://www.road.re.kr>)의 2016년 상시조사 지점의 고속도로 차종별 교통량을 비율로 환산하여 적용하였다. 환산된 차종별 비율은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Permanent Traffic Volume Survey in Freeway

Description	AADT	Car	Bus	Small Truck	Heavy Truck
Traffic Volume (veh/h/l)	68,872	41,738	2,047	21,747	3,341
Percentage (%)	100	60.6	3	31.6	4.9

참고 : TMS(교통량 정보제공 시스템) <http://www.road.re.kr>

화물차는 3,4차로를 주로 이용하도록 하였고, 다른 차종의 차로 제한 혹은 선호하는 차로는 따로 적용하지 않았다. 자율주행기술은 승용차에게만 적용되는 것이 아니므로 모든 차종이 혼입율에 따라 자율주행 기술이 적용되도록 하였다.

자율주행자동차의 혼입율은 0, 50, 100(%) 적용하여 자율주행자동차의 혼입율에 따른 교통량-밀도-속도 관계 그래프를 통해 교통흐름 및 교통류 변화를 분석하였다. 혼입율을 보다 세분화하여 분석하지 않고 3단계로만 적용한 것은, 자율주행자동차의 혼입율에 따른 도입효과를 분석하는 것이 아닌, 자율주행자동차로 인한 교통류의 흐름 변화 및 도로용량 증대 효과 등을 비교적 눈에 띄게 파악하는 것을 최우선으로 하였기 때문이다.

시뮬레이션 환경은 편도 4차로 3km 구간으로 구축하였으며, 교통량-밀도-속도는 시작지점 1km 이후부터 1km구간(즉, 1~2km 구간)에서 측정하였다. 시간에 따라 교통량이 변화는 상황에서 교통흐름 변화를 분석하기 위해 시뮬레이션 시작 이후 교통량을 점차 증가하도록 시뮬레이션을 구현하였다. 시뮬레이션 상 일정한 교통량만큼 차량을 생성시키는 것은, 차량이 일정시간마다 생성되는 개념이므로 교통류율, 혹은 차두시간의 개념이라고 할 수 있다. 따라서 교통류율 700veh/h 기준으로(차두시간 5s/veh) 5분 이후부터 90초당 차두시간을 0.1초씩 감소하여 차량을 생성시켰다. 시뮬레이션 상에서 차로 당 2,400veh/h/l (9,600veh/h) 이상 차량을 생성할 경우, 생성 지점까지 정체가 이어지면서 거의 정지하여 차량생성 또는 IDM, MOBIL 모형에 오류가 발생할 수 있다. 따라서 2,400veh/h/l (1.5s/veh)까지만 증가하도록 설정하였다.

교통량이 700veh/h/l에서 2,400veh/h/l까지 증가하는데 시뮬레이션 상 56분이 소요된다. 따라서 시뮬레이션 분석은 약 1시간 동안 실행하였으며 결과의 신뢰도를 향상시키기 위해 10회 이상 반복 수행하였다.

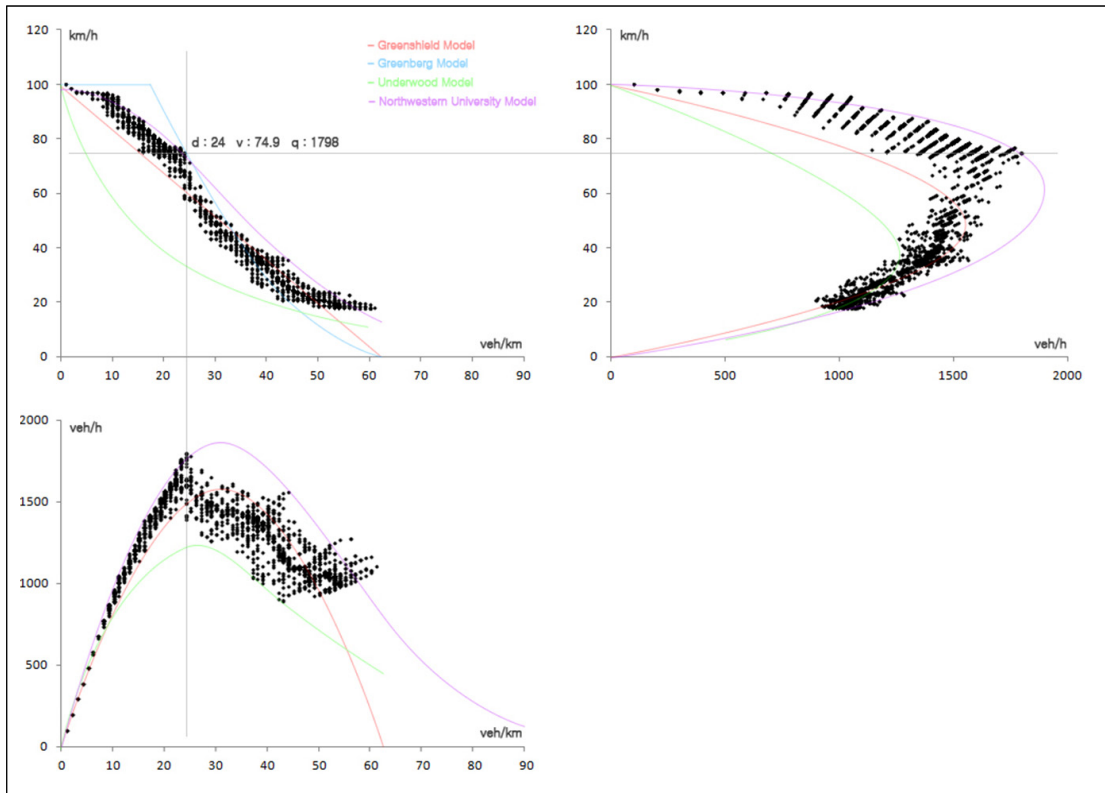
구축된 시뮬레이션 환경에서 자율주행자동차의 혼입율에 따라 교통량-밀도, 밀도-속도, 속도-교통량 관계를 산포도 그래프를 도출하였다. 산포도 그래프를 바탕으로 자율주행자동차의 혼입율에 따른 교통흐름 변화와 도로용량 증대 효과를 분석하였다.

IV. 분석 결과

1. 혼입율 0% 분석 결과

자율주행자동차 혼입율 0%일 때의 분석은 자율주행자동차 도입으로 인한 교통흐름 변화를 알아보기 위한 기준이 되며, 본 연구에서 활용한 시뮬레이션이 실제 교통류를 얼마나 유사하게 구현하고 있는지 보여주는 과정이다.

<Fig. 1>은 자율주행자동차의 혼입율 0%일 때, 밀도-속도, 교통량-밀도, 속도-교통량 분석 결과를 산포도 그래프로 그리고, 분석 결과물의 임계밀도(k_m)와 최대밀도(k_j), 임계속도(u_m), 최대속도(u_f)를 통해 기존 교통공학 분야에서 자주 활용되는 모형인 Greenshield, Greenberg, Underwood, northwestern University 모형 추세선을 추가한 그래프이다. 비교에 활용한 모형들은 기존 교통공학 분야에서 자주 활용되는 모형이므로, 자세한 모형에 대한 설명은 생략하였다.



<Fig. 1> Traffic Volume - Speed - Density relationship in rate of Automated Vehicle 0%

혼입율 0%에서의 밀도-속도 관계는 기존의 교통류 모형과 어느 정도 유사한 형태를 취하고 있으며, Greenshield 모형과 Northwestern University 모형이 가장 유사한 형태를 보이고 있다.

<Table 3>은 분석 결과 임계밀도, 임계속도, 최대교통량 등을 정리한 결과이다.

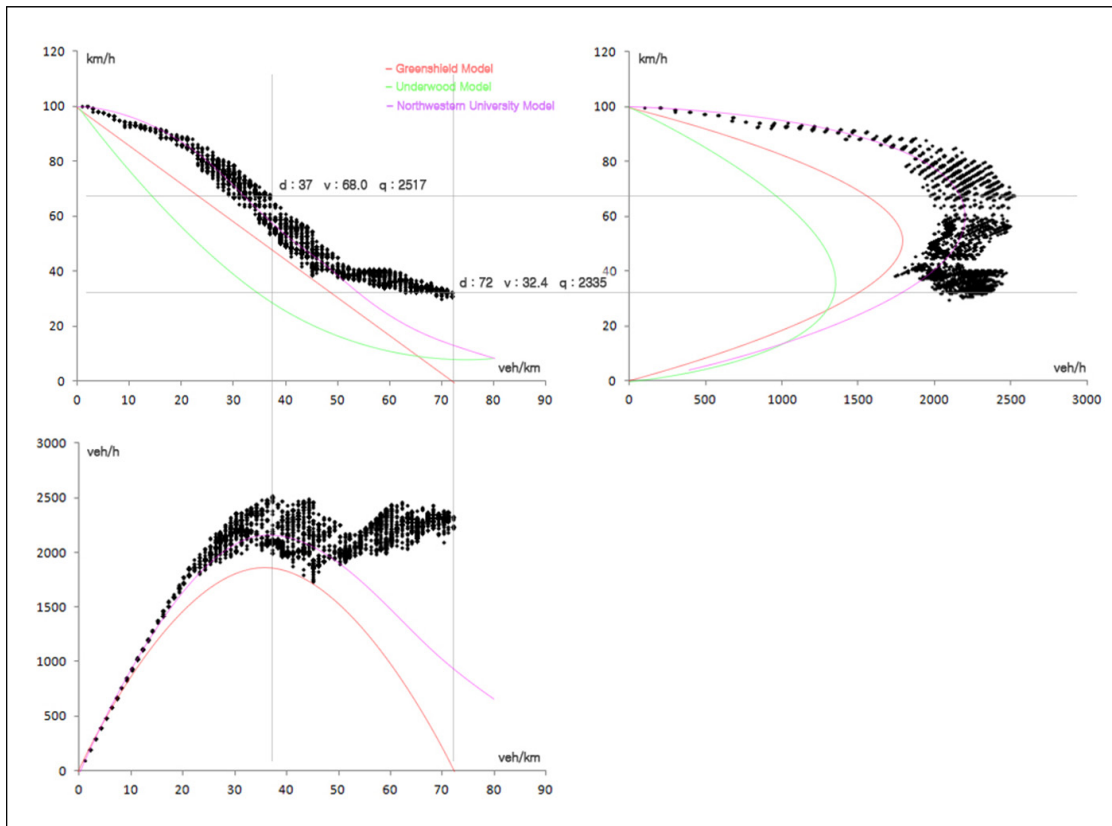
<Table 3> Results of rate of Automated Vehicle 0%

Maximum Traffic Volume (Max Capacity)	1,796 <i>veh/h/l</i>
Optimum Density	24 <i>veh/km/l</i>
Optimum Speed	74.9 <i>km/h</i>
Jam (Congested) Density	72 <i>veh/km/l</i>

분석 결과 밀도 11 *veh/km/l*까지는 자유교통류 상태로 밀도에 따라 주행속도가 크게 감소하지 않는다. 임계밀도 k_m 은 24 *veh/km/l*로서, 임계밀도에서의 임계속도 u_m 은 74.9 *km/h*이고 이 때 최대 교통량은 1,796 *veh/km/l*다. 이는 곧 도로용량 상태를 의미한다. 임계밀도 이후 속도와 교통량이 감소하기 시작하며 최대(혼잡)밀도 k_j 는 72 *veh/km/l*이다.

2. 혼입율 50% 분석 결과

자율주행자동차 혼입율 50%에서의 교통량-밀도-속도 관계 분석결과는 <Fig. 2>, <Table 4>와 같다.



<Fig. 2> Traffic volume - Speed - Density relationship in rate of Automated Vehicles 0%

<Table 4> Results of rate of Automated Vehicle 50%

Maximum Traffic Volume (Max Capacity)	2,517 veh/h/l
Maximum Traffic Volume (Jam)	2,335 veh/h/l
Optimum Density	37 veh/km/l
Optimum Speed	68.0 km/h
Jam Density	72 veh/km/l

혼입율 0%일 때와 비교하면 산포도의 속도 폭이 좁아져 교통류가 상대적으로 안정화 되고 있음을 알 수 있다. 또한 최대밀도가 72veh/km/l로 자율주행자동차 도입 전과 비교했을 때 약 2veh/km/l 증가하였다.

혼입율 50%에서의 임계밀도는 37veh/km/l, 임계속도는 68km/h이고, 최대교통량(도로용량)은 2,517veh/h/l이다. 자율주행자동차 도입 전과 대비하여 도로용량이 약 40% 정도 증가하였다. 전체적인 교통류 흐름은 임계밀도 이후 교통량이 감소하다가 밀도 45veh/km/l에서 다시 증가하는 추세를 보인다. 밀도가 높은 극심한 혼잡 상태에서는 모든 차량이 빈번하게 가감속을 해야 하며, 차로변경 시 전체 교통류의 영향 또한 클 수 있다. 자율주행자동차는 인지반응시간이 짧아, 가감속으로 인한 손실이 상대적으로 적다. 또한 자율주행자동차는 주변 차량을 더 고려하여 차로변경을 시도하도록 설정하였으므로 상층 횡수 또한 적고, 군집주행을 할 경우 차로변경을 거의 시도하지 않게 됨으로서 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다.

자율주행자동차의 혼입율 50% 분석 결과 평균주행속도 증가 및 도로용량 증대 효과는 분명하게 나타났다. 기존 교통류에서는 임계밀도 이후 밀도가 증가함에 따라 교통량이 감소했으나, 자율주행자동차 혼입율 50%에서는 밀도가 매우 혼잡해지는 밀도 45veh/km/l 이후로 교통량이 다시 증가하는 추세를 보임으로서 극심한 혼잡 상황에서 자율주행자동차의 혼잡 개선 효과가 더 크다고 볼 수 있다.

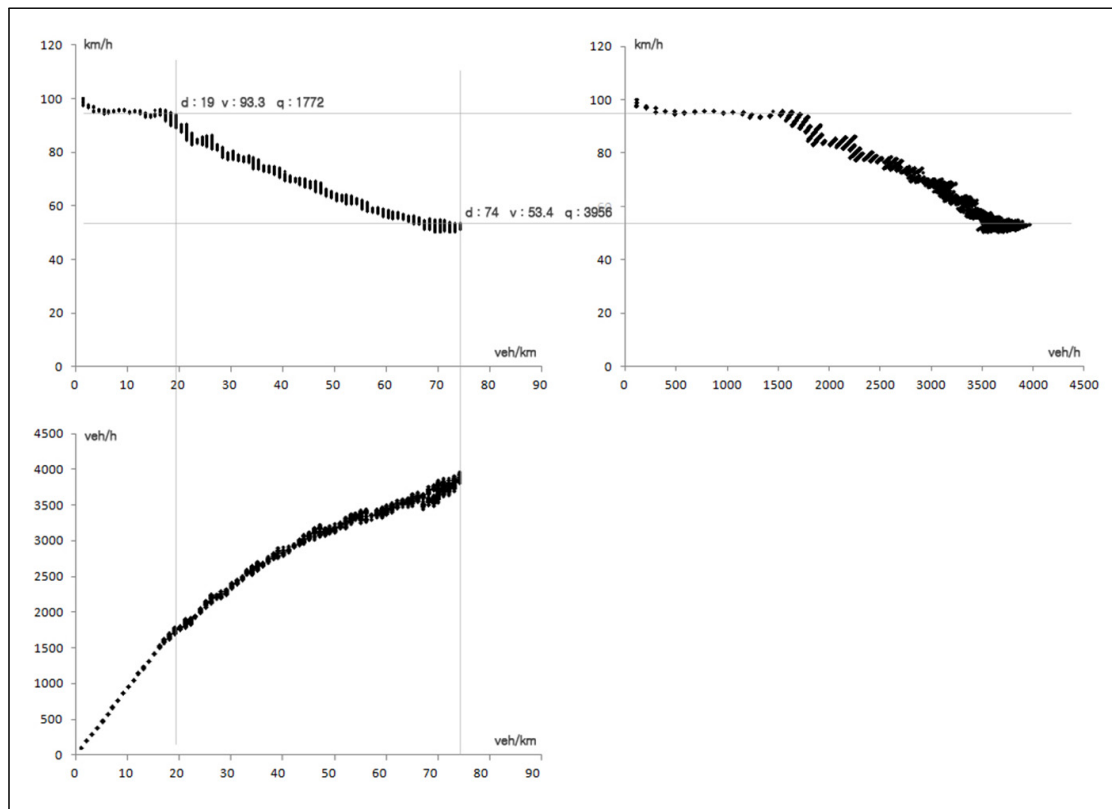
3. 혼입율 100% 분석 결과

자율주행자동차 혼입율 100% 일 때, 교통량-밀도-속도 분석 결과는 <Table 5>, <Fig. 3>과 같다.

<Table 5> Results of rate of Automated Vehicle 100%

Maximum Traffic Volume (Max Capacity)	1,772 veh/h/l
Maximum Traffic Volume (Jam)	3,956 veh/h/l
Optimum Density	19 veh/km/l
Optimum Speed	53.4 km/h
Jam Density	74 veh/km/l

자율주행자동차 혼입율 0%와 50%일 때는 밀도가 증가할수록 교통량도 증가하다가 임계밀도에서 도로용량 상태가 되고, 임계밀도 이후 교통량이 감소하는 2차 곡선의 형태를 취하고 있다. 그러나 자율주행자동차 혼입율 100%에서는 밀도가 증가할수록 교통량도 증가하여 임계밀도가 곧 최대(혼잡)밀도가 되며, 최대밀도에서 도로용량 상태가 된다. 즉 교통혼잡으로 인한 손실이 거의 발생되지 않는 결과를 보인다.



<Fig. 3> Traffic Volume - Speed - Density relationship in rate of Automated Vehicles 0%

밀도 19veh/km/l까지는 자유교통류 상태에 가까운 교통흐름을 보이며, 최대 밀도는 74veh/km/l, 이때의 교통량은 3,956veh/h/l로 최대교통량 및 도로용량 상태이다. 이때의 평균주행속도는 53.4km/h이다.

자율주행자동차의 혼입율이 100%가 되면 교통흐름이 매우 안정화되고 도로용량이 크게 증대되는 것으로 분석되었다. 자율주행자동차 혼입율 0%일 때와 비교했을 때, 도로용량은 약 2.2배 정도 증가하였고, 평균주행속도는 매우 혼잡한 상태라고 할 수 있는 밀도 60veh/km/l에서 약 2배 이상 증가하였다.

자율주행자동차는 인지반응시간이 짧고 교통흐름을 저하하는 인적요인이 없으며, 가감속 빈도수를 최소화하여 군집주행하기 때문에 고밀도의 극심한 혼잡 상태에서도 평균주행속도가 크게 감소하지 않는 것으로 판단된다.

4. 소 결

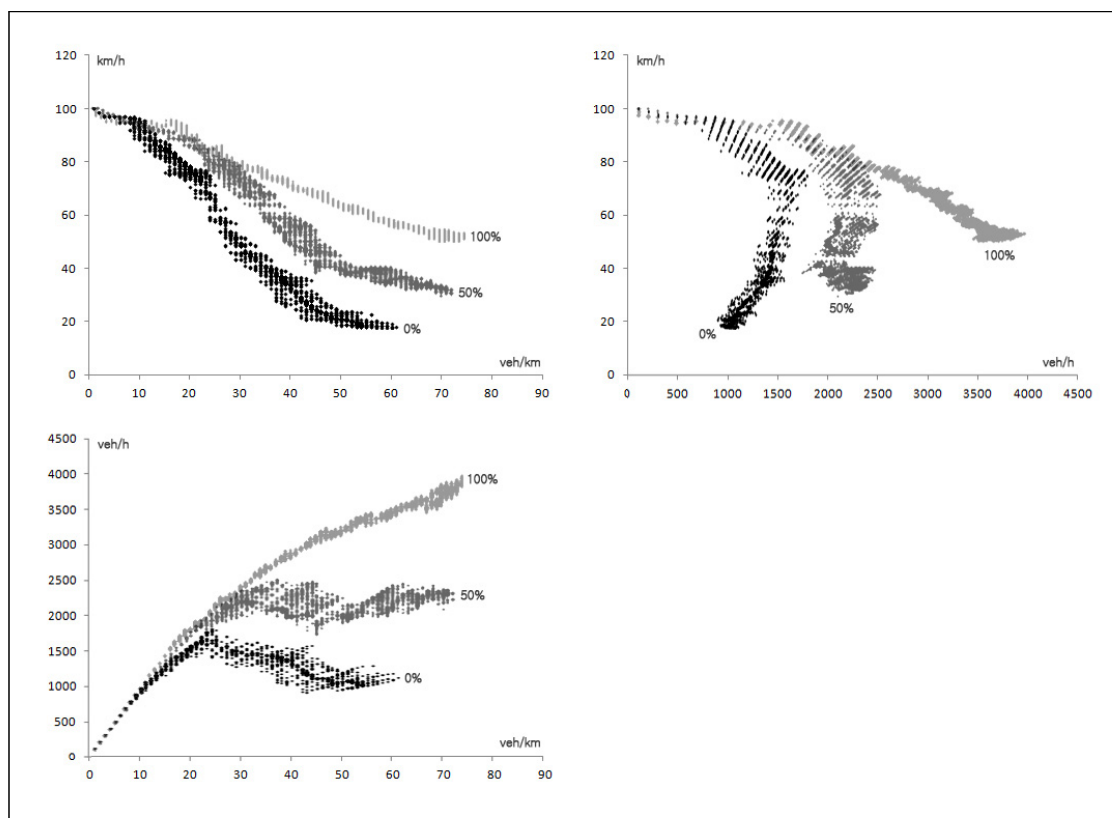
자율주행자동차의 혼입율 0%, 50%, 100%에서 교통흐름 변화를 교통량-밀도-속도의 관계 그래프를 통해 분석하였다. 혼입율에 따른 임계밀도, 임계속도, 최대교통량은 <Table 6>으로 정리하였고, 밀도-속도, 교통량-밀도, 속도-교통량의 산포도 그래프 변화는 <Fig. 4>와 같이 정리하였다.

〈Table 6〉 Results by rate of Automated Vehicles

혼입율 (%)	임계밀도 (veh/km)	임계속도 (km/h)	최대교통량 (veh/h)
0	24	74.9	1,796
50	37	68	2,517
100	74	53.4	3,956

자율주행자동차 0%에서는 비교적 기존 교통류 모형과 실측값과 유사한 흐름을 보이는 것으로 분석되었다. 밀도가 증가함에 따라 교통량이 증가하다가 임계밀도 이후 교통량이 감소하는 2차 곡선의 추세를 보이며, 임계밀도는 24veh/km, 도로용량은 1,796veh/h로 분석되었다.

자율주행자동차의 혼입율이 증가할수록 임계밀도 값이 커지고, 그래프는 점차 선형에 가까워지며, 특히 혼잡한 상태에서 교통량이 증가하는 것으로 분석되었다. 자율주행자동차의 혼입율이 100%가 되면 그래프는 보다 선형에 가까워지고 폭이 작아져 교통흐름이 안정화되며, 도로용량은 3,956veh/h까지 증가하는 것으로 분석되었다. 자율주행자동차 100%에서는 기존 임계밀도 이후 교통량이 감소하지 않고, 밀도가 증가함에 따라 교통량이 증가하여, 최대밀도가 곧 임계밀도가 되며 그 때가 도로용량 상태가 되었다.



〈Fig. 4〉 Traffic Volume - Speed - Density relationship by rate of Automated Vehicles

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 자율주행자동차의 혼입율에 따른 교통흐름의 변화를 교통량-밀도-속도의 관계 그래프를 통해 분석하였다. 자율주행자동차 도입으로 인해 교통흐름이 어떻게 변화하고, 도로용량 증대 효과가 어느 정도인지 시뮬레이션 분석을 통해 도출하였다. 자율주행자동차가 100%가 되면 기존 도로용량이 2배 이상 증가할 것으로 예상하는 전문가들이 많다. 자율주행자동차는 인지반응시간이 짧고 교통흐름을 저하하는 인적요인이 없으며, 차간거리를 최소화하고 가감속 빈도수 또한 최소화하며 군집주행하기 때문에 고밀도의 혼잡한 상태에서 평균주행속도가 크게 감소하지 않을 것으로 예상되었다.

본 연구의 분석 결과 자율주행자동차의 혼입율이 증가할수록 교통 흐름이 안정화되고 교통혼잡으로 인한 손실이 감소하여, 자율주행자동차 혼입율이 100%가 되면 도로용량이 최대 약 2.2배 증대되는 것으로 분석되었다. 자율주행자동차 도입으로 인한 교통혼잡개선 및 교통수요관리 측면에서의 기대효과를 공학적으로 증명한 연구로서 의미를 가진다.

그러나 본 연구에서는 다음과 같은 연구의 한계를 가진다. 다음과 같은 연구의 한계점을 보완, 반영하여 향후 추가적인 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

첫 번째로, 본 연구는 자율주행자동차 도입으로 인한 교통흐름 변화를 눈에 띄게 알아보기 위해 연속류 일반구간으로 한정하였다. 진출입로나 단속류에서는 본 연구와는 다른 결과가 나타날 수 있다.

두 번째로, 이론적 교통류 모형의 흐름을 도출하기 위해 최소한의 인적요인만을 반영하였다. 현 도로교통의 자유교통류 상태에서 설계속도보다 훨씬 높은 속도로 주행하는 운전자가 많으며, 주변차량이나 차간거리를 고려하지 않고 차로변경을 시도하는 운전자도 많다. 이러한 인적요인들을 고려할 경우, 언제나 설계속도와 안전거리를 준수하는 자율주행자동차로 인한 평균주행속도 감소와 같은 결과도 예측할 수 있다.

세 번째로, 교통류의 흐름을 명확하게 분석하기 위해서는 각 개별 차량의 궤적과 충격과 변화를 분석할 필요가 있다고 판단된다. 개별차량의 궤적을 통해 가감속 빈도, 충격과의 크기 및 빈도수를 파악한다면 보다 심도 있는 교통류의 흐름 변화를 분석할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2015학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해 지원되었습니다. 본 논문은 주저자의 박사학위 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

REFERENCES

- Arnaut G. M. and Bowling S.(2014), "A progressive deployment strategy for cooperative adaptive cruise control to improve traffic dynamics," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 11, no. 1, pp.10-18.
- Arnaut, G. M., Khasawneh M. T., Zhang J. and Bowling S. R.(2010), "An IntelliDrive application for reducing traffic congestions using agent-based approach," *Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp.221-224.
- Broen N. L. and Chiang D. P.(1996), "Braking response times for 100 drivers in the avoidance of an

- unexpected obstacle as measured in a driving simulator,” *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 40, no. 18, pp.900-904.
- Fambro D., Koppa R., Picha D. and Fitzpatrick K.(1998), “Driver perception-brake response in stopping sight distance situations,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1628, pp.1-7.
- Green M.(2000), “How long does it take to stop? Methodological analysis of driver perception-brake times,” *Transportation human factors*, vol. 2, no. 3, pp.195-216.
- Kesting A., Treiber M. and Helbing D.(2007), “General lane-changing model MOBIL for car-following models,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1999, pp.86-94.
- Kesting A., Treiber M., Schonhof M. and Helbing D.(2008), “Adaptive cruise control design for active congestion avoidance,” *Transportation Research Part C*, vol. 16, no. 6, pp.668-683.
- Lee J. D., Park I. S. and Hwang K. Y.(2015), “Comparative traffic analysis between electric personal mobility and partial autonomous vehicle using agent-based model,” *The Korea Transport Institute, Journal of Transportation Research*, vol. 22, no. 1, pp.27-44.
- Ma J., Zhou F., and Demetsky M. J.(2012), “Evaluating mobility and sustainability benefits of cooperative adaptive cruise control using agent-based modeling approach,” *Systems and Information Design Symposium (SIEDS) 2012 IEEE*, pp.74-78.
- Olson P. L. and Sivak M.(1986), “Perception-response time to unexpected roadway hazards,” *Human Factors*, vol. 28, no. 1, pp.91-96.
- Park I. S., Lee J. D., Lee J. Y. and Hwang K. Y.(2015), “Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow-Focused on Seoul-Singal Basic Sections of GyeongBu Freeway,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Shladover S., Su D. and Lu X. Y.(2012), “Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2324, pp.63-70.
- Van Arem B., Van Driel C. J. and Visser R.(2006), “The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp.429-436.
- Vander Werf J., Shladover S., Miller M. and Kourjanskaia N.(2002), “Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1800, pp.78-84.