

자율주행차 혼재 시 시범운행지구 교통운영전략 수립: 판교제로시티를 중심으로

Traffic Operation Strategy for the Mixed Traffic Flow on Autonomous Vehicle Pilot Zone: Focusing on Pangyo Zero City

임 동 현* · 김 우 석** · 김 중 호*** · 김 형 주****

* 주저자 : 차세대융합기술연구원 첨단교통체계연구실 연구원
 ** 공저자 : 차세대융합기술연구원 첨단교통체계연구실 연구원
 *** 공저자 : 차세대융합기술연구원 첨단교통체계연구실 연구원
 **** 교신저자 : 차세대융합기술연구원 첨단교통체계연구실 연구실장

Donghyun Lim* · Woosuk Kim* · Jongho Kim* · Hyungjoo Kim*

* Advanced Institutes of Convergence Technology

† Corresponding author : Hyungjoo Kim, hyungjoo@snu.ac.kr

Vol. 22 No.1(2023)
February, 2023
pp.172~191

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.1.172>

Received 22 November 2022
Revised 30 November 2022
Accepted 20 December 2022

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 연구는 국내 자율주행차 시범운행지구 지정 및 운영에 따라 자율주행차 혼재 시 예상되는 교통 변화를 분석하여, 시범운행지구의 자율주행차 혼재 교통운영전략 수립을 목적으로 한다. 시범운행지구가 자율주행차의 안정적 상용화를 위한 테스트 베드로서의 역할을 해내기 위해서는 안전하고 효율적인 교통운영전략 수립이 요구됨에도 현재까지는 자율주행차 혼재에 따른 교통운영전략은 부재하다. 이에 본 연구에서는 자율주행차 혼재 시 자율주행차 시범운행지구의 교통운영전략을 수립하고자 한다. 자율주행차 도입 단계별 교통운영전략 수립을 위해 자율주행차 혼입률에 따른 교통 효율성 및 안전성 분석을 수행하였으며, 분석 결과를 토대로 자율주행차 혼입률 30%, 70%를 기준으로 도입기, 과도기, 안정기로 구분하였다. 본 연구에서 자율주행차 도입 단계별로 제시한 교통류와 교통안전 관점의 교통운영전략은 다음과 같다. 교통류 운영전략은 자율주행차 도입기에는 기존 도로 인프라 첨단화, 과도기에는 자율주행차 전용차로 및 일반차 마일리지 제도 운영, 안정기에는 자율주행차 전용차로 확대 운영 및 제한속도 완화를 제시하였다. 교통안전 전략은 도입기에는 자율주행차 사고 발생 대응 매뉴얼 및 법제도 마련, 과도기에는 자율주행차 사고 원인 분석 및 예방정책 시행, 안정기에는 자율주행차 시스템 고도화 및 보안정책 강화를 제시하였다. 본 연구에서 제시한 교통운영전략을 통해 향후 자율주행차 시범운행지구 내 자율주행차 혼재로 인해 예상되는 교통류 및 교통안전 관에서 선제적으로 대응할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 자율주행차, 시범운행지구, 교통운영전략, 교통류, 교통안전

ABSTRACT

This study was undertaken to strategize the mixed traffic operation of autonomous vehicles in the pilot zone. This was achieved by analyzing the changes expected when autonomous vehicles are mixed in the autonomous vehicle pilot zone. Although finding a safe and efficient traffic operation strategy is required for the pilot zone to serve as a test bed for autonomous vehicles, there is no

available operation strategy based on the mixture of autonomous vehicles. In order to presents a traffic operation strategies for each period of autonomous vehicle introduction, traffic efficiency and safety analysis was performed according to the autonomous vehicle market percentage rate. Based on the analysis results, the introduction stage was divided into introductory stage, transition period, and stable period based on the autonomous vehicle market share of 30% and 70%. This study presents the following traffic operation strategies. Considering the traffic flow operation strategy, we suggest the advancement of the existing road infrastructure at the introductory stage, and operating an autonomous driving lane and the mileage system during the transition period. We also propose expanding the operation of autonomous driving lanes and easing the speed limit during the stable period. In the traffic safety strategy, we present a manual and legal system for responding to autonomous vehicle accidents in the introductory stage, an analysis of the causes of autonomous vehicle accidents and the implementation of preventive policies in the transition period, and the advancement of the autonomous system and the reinforcement of the security system during the stable period. Through the traffic operation strategy presented in this study, we foresee the possibility of preemptively responding to the changes of traffic flow and traffic safety expected due to the mixture of autonomous vehicles in the autonomous vehicle pilot zone in the future.

Key words : Autonomous vehicle, Pilot zone, Traffic operation strategy, Traffic flow, Traffic safety

I. 서 론

최근 사람의 운전 없이 주행할 수 있는 자율주행차 상용화에 대한 기대감과 함께 자율주행차 시장 규모가 점차 확대되고 있다. 자율주행차 센서 시장의 규모는 2030년에 약 53조 원까지 성장할 것으로 예측되고 있다 (Prescient & Strategic Intelligence, 2020). 그에 따라 국내·외 자율주행 기술은 지속적으로 고도화 되고 있으며, 자율주행 관련 산업 또한 발전을 거듭하고 있다. 국내에서는 2019년에 「미래자동차 산업 발전 전략」을 수립하여 2030년까지 Level 4 자율주행차를 양산하고, 전국 주요도로에 상용화를 목표로 자율주행 산업을 지원하고 있다(Joint Ministry, 2019).

지난 2020년에는 「자율주행자동차 상용화 촉진 및 지원에 관한 법률」 제정에 따라 자율주행차 상용화를 위한 제도가 마련되었다(Gyeonggi Research Institute, 2020). 해당 법률 제정으로 국토교통부의 심의를 통해 자율주행차 시범운행지구 지정이 가능해졌다. 이에 2022년 6월을 기준으로 경기도 판교, 서울 상암, 세종, 충북·세종, 광주, 대구, 제주 등 14개의 자율주행차 시범운행지구가 지정되어 운영 중에 있다. 자율주행차 시범운행지구는 ‘자율주행자동차의 연구·시범운행을 촉진하기 위하여 규제특례가 적용되는 구역’이라는 정의에 맞게 자율주행차가 일반차와 혼재되어 주행할 수 있도록 특례가 적용된다. 또한, 향후 자율주행차의 안전한 상용화를 위한 실도로 테스트 베드로서 다양한 자율주행 인프라가 설치되어 있다. 그 중 경기도 판교는 지난 2021년 4월에 처음 자율주행 시범운행지구로 지정되었으며, 2022년 6월 시범운행지구 구역을 일부 확장하여 다양한 자율주행 업체의 자율주행차가 실도로 주행을 할 수 있는 환경이 조성되었다. 이처럼 자율주행차의 주행이 가능하도록 규제 및 환경이 조성되었으나, 다양한 자율주행차가 갑작스럽게 도로에 혼재될 시 교통 효율성 및 안전성이 저하될 우려도 존재한다. 이에 각 자율주행차 시범운행지구에서는 갑작스러운 자율주행차 혼재로 인한 잠재적 위험에 대비하고자 자율주행차를 활용한 유상 및 무상 허가대수를 제한하고 있으나, 자율주행차 혼입률에 따른 명확한 교통운영전략 및 정책은 부재한 실정이다. 자율주행차 시범운행지구가 자율주행차의 안정적 상용화를 위한 테스트 베드로서의 역할을 해내기 위해서는 자율주행차 혼재 시의 안전하고 효율적인 교통운영전략 수립이 요구된다.

자율주행차 시범운행지구 지정 등 자율주행차가 상용화되어 실도로를 주행할 날이 가까워지고 있음에도 불구하고 자율주행차 사고는 지속적으로 발생하고 있다. 특히, 자율주행차 사고는 연속류보다는 다양한 도로 요인과 변수가 존재하는 도시부 도로에서 주로 발생하였다. 미국 캘리포니아 교통국에 따르면 2015~2019년 까지 자율주행차 관련 사고 81건 중 60건이 도시부 도로인 교차로에서 발생하였다(Department of Motor Vehicles, 2019). 이처럼 도시부 도로는 다양한 정적 및 동적 요인들로 인해 자율주행차 혼재 시에 효율성 및 안전성 측면에서 기존 교통류에 많은 영향을 끼칠 것으로 예상되기 때문에 도로 운영자 관점에서 도시부 도로에서의 자율주행차 혼재 교통류 분석을 통한 대책 및 교통운영전략 수립이 요구된다.

이에 본 연구에서는 도시부 자율주행차 시범운행지구인 판교 시범운행지구를 대상으로 자율주행차 도로 혼재 시의 교통 효율성·안전성 분석을 수행하고, 분석 결과를 토대로 자율주행차 시범운행지구의 혼재 교통운영전략을 수립하고자 한다. 연구는 도시부의 자율주행차 혼재 시 교통 효율성·안전성 분석을 위해 1) 자율주행차의 혼입률에 따른 분석, 2) 판교 교통 특성을 고려한 침두·비침두 시간대에 따른 분석으로 진행한다. 본 연구에서는 미시적 교통 시뮬레이션인 VISSIM 2021을 활용하여 판교 시범운행지구 네트워크를 구축하며, 실도로 네트워크를 정밀하게 구현하기 위해 교통량, 신호현시 등 판교에서 수집한 정적 및 동적 요인을 활용한다. 또한 시뮬레이터 데이터를 정량화한 교통류 지표와 시뮬레이터 데이터로 산정된 교통안전 지표에 따라 최종적으로 자율주행차 시범운행지구 혼재 교통운영전략을 제시한다. 교통운영전략은 교통류와 교통안전 운영전략으로 구분하였으며, 각 지표의 삼분위수를 활용하여 도입기, 과도기, 안정기 구분 후 각 단계별로 적절한 운영전략을 수립한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 연구의 배경 및 목적에 대해 설명한다. 2장에서는 자율주행차 시범운행지구 운영전략과 자율주행차 혼재 교통류 영향 평가 관련 문헌 고찰을 통해 본 연구의 차별성을 도출한다. 3장에서는 본 연구의 방법론에 대해 자세히 설명하고, 4장에서는 방법론 적용 및 분석 결과와 교통운영전략을 제시한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 연구의 시사점을 제시한다.

II. 관련 문헌 고찰

1. 자율주행차 시범운행지구 현황 및 관련 문헌 고찰

자율주행차 시범운행지구는 ‘자율주행자동차의 연구·시범운행을 촉진하기 위하여 규제특례가 적용되는 구역’을 의미하며 향후 자율주행차의 안전한 상용화를 위한 실도로 테스트 베드로서 자율주행차와 일반차가 혼재되어 주행하게 된다. 자율주행자동차법 제7조 제 1항에 따라 2020년 12월에 서울 상암 등 6개의 자율주행차 시범운행지구가 처음으로 지정되었으며(MOLIT, 2020), 경기도 판교는 2021년 4월에 시범운행지구로 지정되어 운영되고 있다(MOLIT, 2021). 현재 경기도 판교와 서울 상암을 포함하여 총 14개의 자율주행차 시범운행지구가 운영되고 있으며, 자율주행차 시범운행지구는 자율주행차의 시범운행을 위해 다음과 같은 규제 특례가 적용된다.

자율주행자동차법 제9조에 따른 여객의 유상운송에 관한 특례, 제10조에 따른 화물자동차 운송사업에 관한 특례, 제11조에 따른 자동차 안전기준에 따른 특례, 제12조에 따른 지능형교통체계 표준에 관한 특례, 제13조에 따른 도로시설에 관한 특례가 적용된다. 그 중 제9조 및 10조에 의해 자율주행차 시범운행지구 내에서는 자율주행차를 활용한 유상 운송이 가능해졌기 때문에 각 시범운행지구에서는 자율주행차를 활용한 다양한 서비스를 운영 및 계획하고 있다. <Table 1>은 국토교통부 고시에 명시된 시범운행지구별 도입 예정인

자율주행 서비스 현황이다. 이처럼 자율주행차 시범운행지구에서는 다양한 자율주행차의 도로 혼재가 예상됨에도 불구하고, 자율주행차 혼입률에 따른 명확한 교통운영전략 및 정책이 부재하기 때문에 자율주행차 혼재 교통류에 대한 안전하고 효율적인 운영이 가능할지 우려가 존재한다.

자율주행차 시범운행지구 관련 법령 외에 현재까지는 자율주행차 시범운행지구의 교통운영전략 관련 연구보다는 자율주행차 도입에 따라 예상되는 변화 및 서비스 전략에 대한 연구들이 진행되었다.

Gyeonggi Research Institute(2016)은 자율주행차 서비스 도입을 위해 경기도의 현황과 미래 변화를 전망하여 자율주행차의 기술개발현황 정책 동향을 분석하여 판교의 자율주행차 운행 지원 방안에 대한 정책 연구를 수행하였다. 그 결과 대중교통 전용지구 조성, 부설주차장 설치 및 주차 상한제 도입, 관련 법 개정 등의 정책을 제안하였다.

Korea Transport Institute(2022)은 자율주행차 시범운행지구에서 이루어지고 있는 자율주행 기반 서비스를 위주로 설문 조사 및 수집데이터를 분석하여 자율주행차 상용화 촉진을 위해 다음과 같은 운영전략을 제안하였다. 자율주행 서비스 이용자에 대한 설문 조사 및 분석이 지속적으로 수행되어야 하며, 정성적 만족도 평가 외에도 주행 데이터를 활용한 정량적 안정성 평가의 필요성을 제시하였다. 또한, 기존 서비스와 연계·통합을 통한 자율주행 서비스 확산 방안, 자율주행 서비스에 대한 이행과 수용성 제고를 위한 홍보 방안 등의 운영전략을 제시하였다.

<Table 1> Introduction service by autonomous vehicle pilot zone

No.	Local government	Autonomous service
1	Pangyo	Demand response-type autonomous taxi service
		Route-type passenger transport service
2	Siheung	Demand response-type passenger transport service
3	Sangam	Village bus passenger transport service
		Regional-type passenger transport service
		Truck transport service
4	Gangnam	Car transport service for a fee
		Route-type passenger transport service
		Demand response-type passenger transport service
5	Cheonggyecheon	Route-type passenger transport service
6	Gangneung	Demand response-type passenger transport service
		City circulation shuttle bus service
7	Wonju	Demand response-type circulation shuttle bus service
8	Chungbuk · Sejong	Autonomous bus service
9	Sejong	Circular route-type service
		Internal circulation-type public transportation service
10	Gwangju	Autonomous special vehicle demonstration service
11	Daegu	Village bus passenger transport service
		Demand response-type robot taxi service
12	Jeju	Demand response-type autonomous shuttle service

13	Gunsan	Demand response-type shuttle service
		Robot taxi service
		Mobility service for the handicapped
14	Suncheon	Demand response-type shuttle service
		Autonomous shuttle movement support service

2. 자율주행차 혼재 교통류 영향 평가 관련 문헌 고찰

Yook et al.(2018)은 도로의 용량을 지표로 활용하여 자율주행차의 도로 혼재시의 교통 효율성에 대한 분석을 수행하였다. 고속국도, 도시고속도로, 다차로도로, 램프구간의 도로유형에서 자율주행차의 혼입률을 0%에서 100%까지 10%씩 변화를 주며 분석을 수행하였다. 모든 도로 유형에서 자율주행차의 혼입률이 증가할수록 도로용량이 증가하여 교통 효율성이 증대되는 것으로 분석되었다. 고속국도의 경우 기준용량 대비 최대 약 190.5% 증대효과를 보였으며, 도시고속도로는 153.9%, 다차로도로는 158.4%, 램프구간은 130.2%의 최대 증대효과를 보였다. 자율주행차 혼재 시에 도로 용량의 변화를 분석하여 효율성 증대를 확인하였으나, 도로 대상이 연속류에 초점이 맞춰져 있어 도시부 도로 등 단속류에 대한 고려가 부족한 점은 연구의 한계로 남았다.

Lee et al.(2018)은 사고 상황의 유·무, 서비스 수준, 자율주행차 MPR(Market Percentage Rate)에 따라 자율주행 혼재 교통류 시나리오를 설정하고 평균지체시간과 비자율주행차의 상충률로 그 효과를 분석하였다. 자율주행차의 주행 모형은 VISSIM에 내장된 Wiedemann99 모델의 파라미터를 조정하여 자율주행 강도를 1~9 레벨로 구분하여 구현하였다. 평균지체시간 분석결과 사고의 유·무와 관계 없이 모든 서비스 수준에서 자율주행의 레벨이 높아질수록 평균지체시간이 낮게 분석되었다. 비자율주행차의 상충률 결과, 서비스 수준이 높아질수록, 자율주행차의 MPR이 높아질수록, 자율주행 강도가 약할수록 상충률이 증가하였고, 사고 상황에서 상충률이 비사고 상황보다 높게 발생하였다. 비교적 교통류 흐름이 단순한 연속류를 대상으로만 분석이 진행된 점은 연구의 한계로 남았다.

Ekram and Rahman(2018)은 미국 플로리다 주의 I-10 도로에 대하여 긴급 상황 발생 시에 자율협력주행차의 MPR에 따라 교통류가 받는 영향을 평가하였다. 그 결과, 자율협력주행차가 전체 교통량의 30% 이상일 때 총 지체시간 및 총 이동시간이 크게 감소하여 평균통행속도가 크게 증가한 것으로 나타났다. 차량 대 차량(V2V) 및 차량 대 인프라(V2I) 통신이 가능한 자율협력주행차의 비율이 증가할수록 효율적인 교통 운영이 가능한 것을 확인하였다.

Zhou et al.(2012)는 연속류의 1차로를 대상으로 해당 도로를 이용하는 모든 차를 자율주행차로 가정하여 자율주행차 도입 효과를 통행속도를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 일반차로 주행했을 때 보다 전체 교통류의 속도가 증가하여 자율주행차가 전체 교통류를 구성할 때 교통류의 효율성이 향상되는 것을 확인하였다. 그러나, 점진적으로 늘어날 것으로 예상되는 자율주행차의 시장점유율을 고려하지 못한 것은 연구의 한계로 남았다.

Ko et al.(2021)은 영동고속도로 용인IC~양지IC구간을 대상으로 자율주행차 시장점유율 변화에 따른 이동성 및 안전성 분석을 수행하였다. VISSIM을 이용하여 네트워크를 구축하였으며, Intelligent Driver Model (IDM)을 활용하여 자율주행차의 주행행태를 구현하였다. 공간평균속도와 평균통행시간을 활용하여 이동성을 분석한 결과 자율주행차의 시장점유율이 높아질수록 네트워크의 이동성이 향상되었다. 또한, 자율주행차와 일반차가 혼재될 때 안전성 지표인 급정거율이 증가하여 교통류가 불안정해지는 경향을 보였다. 자율주

행차의 시장점유율 변화가 고속도로 교통류에 미치는 영향을 분석하여 향후 자율주행 전용차로 도입 및 운영에 대한 필요성을 제시하였다.

Kim et al.(2022)은 고속도로 환경에서 자율협력주행차의 도입 영향을 평가하기 위하여 3가지 차로운영 방안을 제시했다. 이는 자율협력주행차의 혼재 운영(버스 전용차로)과 비 혼재 운영(자율협력주행 전용차로, 자율협력주행 및 버스 공용 전용차로)으로 구분되며, 자율협력주행차 도입률에 따른 교통류 영향을 평가했다. 분석결과 자율협력주행차 도입초기(10-30%) 자율협력주행 및 버스 공용 전용차로 운영, 도입 중장기에는 (40-80%) 자율협력주행 전용차로 운영 시 효율성 및 안전성 측면에서 최적의 교통운영전략으로 제시하였다.

Park et al.(2015)는 경부고속도로의 서울-신갈 기본구간을 대상으로 자율주행차 도입에 따른 교통류 변화를 분석하였다. 고속도로의 각 서비스 수준별 자율주행차의 도입률에 따라 시간평균속도, 공간평균속도, 밀도를 평가지표로 하여 분석하였다. 교통량이 적은 경우에는 자율주행차의 큰 영향을 받지 않았으나, 서비스 수준 B를 기점으로 자율주행차의 도입률이 증가할수록 밀도가 감소하여 교통 흐름에 긍정적인 효과를 가져올 것으로 판단하였다.

Kesting et al.(2008)은 10km의 3차선 연속류를 대상으로 자율주행차 도입에 따른 교통류 변화를 통행속도와 통행시간을 활용하여 분석하였다. 분석 결과 자율주행차의 혼입률이 높아질수록 통행속도가 증가하고 통행시간은 감소하는 것으로 나타났다.

Jeong et al.(2020)은 제한속도, 자율주행차 혼입률, 교통량, 자율주행 단계, 신호 운영 체계를 변수로 하여 자율/비자율 환경에서의 도시부 효과 평가를 수행하였다. VISSIM을 통해 자율주행 혼재 교통류를 구축하였으며 평균 상충률, 평균 통행시간, 총 CO 배출량을 활용하여 운영 효율성, 안전성, 환경성을 분석하였다. 분석 결과 제한속도를 60km/h에서 50km/h로 하향 했을 때 자율주행차의 혼입률이 증가할수록 안전성과 환경성이 개선되었으며, 감응식 신호 운영 시 자율주행차 혼입률이 50% 이상에서 안전성이 개선되었다. 도시부를 대상으로 자율주행차 도입 시에 예상되는 효과를 분석하였으나, 도시부의 교통 특성인 첨두·비첨두 시간 교통량에 대한 고려가 이뤄지지 않은 점은 한계로 남았다.

Morando et al.(2017)은 신호교차로와 회전교차로에서의 자율주행차 혼입률에 따른 안전성을 상충건수를 평가지표로 하여 분석하였으며, VISSIM을 통해 Level 4의 자율주행차를 구현하였다. 분석 결과 자율주행차의 혼입률에 따라 상충건수가 신호교차로에서는 최대 65% 감소하였으며, 회전교차로의 경우 최대 64% 감소하였다.

3. 본 연구의 차별성

자율주행차 시범운행지구 관련 문헌의 경우 시범운행지구 선정과 규제 특례에 대해 정의한 법률 및 선행 연구를 검토한 결과, 자율주행차 시범운행지구 내 자율주행차 혼입률에 따른 교통운영전략 및 정책이 부재하였다. 또한, 현재까지는 자율주행차 시범운행지구에 대하여 자율주행차 도입에 따른 서비스 전략 위주로 연구가 진행되어 시범운행지구 교통운영전략 수립 연구의 필요성을 도출하였다.

자율주행차 혼재 교통류 영향 평가 관련 선행 연구는 주로 고속도로 등 연속류를 대상으로 진행되었으며, 연속류보다 다양한 정적 및 동적 요인이 변수로 작용되는 단속류에 대한 연구가 미비하였다. 또한, 단속류를 대상으로 교통류 영향 평가를 수행한 연구의 경우 전체 네트워크가 아닌 특정 교차로를 대상으로 수행되거나, 시간대에 따라 다른 도시부의 특성을 정밀하게 구현하지 못했다는 한계가 있었다.

이에 본 연구에서는 선행 연구의 한계를 극복하기 위해 판교 자율주행차 시범운행지구 네트워크를 대상으로 도시부 혼재 교통류 분석을 수행하며, 시간대별로 다른 도시부 교통 특성을 반영하기 위해 시간대별로

구분하여 시나리오를 설정하였다. 또한 교통량, 신호현시, 노선버스 등의 정적요인과 동적요인을 반영하여 실제 도시부 교통류를 정밀하게 구현하였다. 도시부 자율주행차 혼재 교통류 분석 결과를 토대로 시범운행지구 내 자율주행차 혼재 시 예상되는 변화를 교통 효율성 및 교통 안전성 측면에서 예측하고, 향후 자율주행차 시범운행지구의 자율주행차 혼재 교통운영전략을 수립하고자 한다.

Ⅲ. 연구방법론

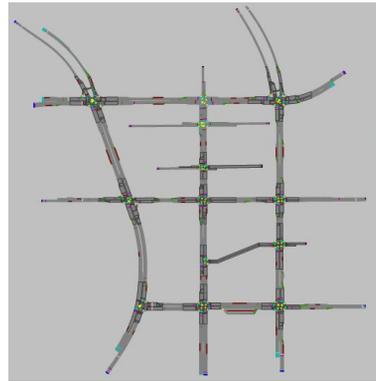
본 연구는 자율주행차 시범운행지구가 운영되고 있는 경기도 판교 지역을 대상으로 도시부 도로에서의 자율주행차 혼재 교통류 영향 평가를 수행한다. 시범운행지구 네트워크 구축을 위해 미시적 교통 시뮬레이션인 VISSIM2021을 활용한다. 판교제로시티의 정적 및 동적요인을 기준으로 구축된 시뮬레이션 데이터를 활용하여 분석을 수행하며, 도출된 분석 결과를 토대로 자율주행차 시범운행지구의 자율주행 혼재 교통운영 전략을 수립한다. 자세한 연구방법론은 다음과 같다.

1. 판교 시범운행지구 네트워크 구축

본 연구에서는 VISSIM 2021을 활용하여 판교 시범운행지구 네트워크를 구축하였다. 본 연구에서 구축한 시뮬레이션 네트워크는 <Fig. 1>을 통해 확인할 수 있다. 네트워크 구축을 위해 판교 시범운행지구의 정적요인과 동적요인을 반영하였다. 정적요인 중 도로기하구조는 13개의 신호교차로를 포함하여 차로 수, 차로 폭, 경사도 등을 실제 판교 시범운행지구와 동일하게 구현하였으며, 노선버스는 경기버스정보(<https://www.gbis.go.kr/>)에서 조회 가능한 해당 네트워크에 존재하는 37개의 정류장과 해당 노선을 경유하는 82대의 노선버스를 명시된 배차 간격에 따라 설정하였다. 동적요인 중 신호현시 정보는 각 교차로별로 조사된 시간대별 TOD(Time of Day) 신호현시 정보를 활용하여 실도로 신호체계와 동일하게 구현하였으며, 제한속도는 도로교통법 시행규칙 제19조의 안전속도 5030의 정책에 따라 일반도로의 경우 50km/h로, 골목길은 30km/h로 설정하였다. 또 다른 동적요인인 교통량은 2021년 6월 2일 현장 조사를 통해 얻은 교통량 데이터를 활용하였으며, 네트워크 내 모든 교차로의 방향별 및 차종별 교통량 데이터를 수집하여 시뮬레이션에 구현하였다. 또한, 시뮬레이션 내에서 자율주행차와 일반차의 주행 형태를 구현하기 위해 VISSIM 2021에 내장된 Wiedemann 99model의 Parameter를 조정하여 활용하였다. 일반차 주행에 대한 Parameter는 VISSIM 2021의 기본 값을 사용했으며, 자율주행차의 주행 수준은 SAE International에서 규정한 Level 0~5단계 중 Level 4로 가정하였으며, 선행연구에서 Level 4 자율주행차 구현에 보편적으로 활용된 ATKINS가 제시한 Level 4 자율주행차 Parameter를 적용하였다(Atkins-Department for Transport, 2016; Jeong et al., 2020; Kim et al., 2021; Kim et al., 2018; Jo et al., 2022.). 본 연구에서 시뮬레이션 네트워크 구축을 위해 활용한 정적 및 동적요인은 <Table 2>를 통해 확인할 수 있으며, 자율주행차 및 일반차 주행 Parameter는 <Table 3>와 같다.



(a) Pangyo autonomous vehicle pilot zone



(b) Simulation network

<Fig. 1> Pangyo simulation network

<Table 2> Factors used to build the simulation network

Factors		Explanations
Static factors	Road geometry	• Set the road geometry such as signal intersections, number of lanes, lane width, and slope to be the same as Pangyo Zero City
	Route bus	• Set 7 bus stops and 82 route buses passing through the route
Dynamic factors	Signal system	• Set TOD(Time of Day) signal by intersection
	Desired Speed	• Normal roads are set to 50km/h and alleys are set to 30km/h.
	Traffic volume	• Set using traffic volume data by direction and vehicle type
	Driving behavior parameter	• Set as level 4 autonomous vehicles parameters of atkins

<Table 3> Driving behavior parameters

Parameter	Explanations	Human-driven vehicles	Autonomous vehicles
CC0	Stand still distance (m)	1.5	0.5
CC1	Time headway (sec)	0.9	0.6
CC2	Following Variation('following' distance oscillation) (m)	4	0
CC3	Threshold for entering 'following'	-8	0
CC4	Negative 'following' threshold	-0.35	0
CC5	Positive 'following' threshold	0.35	0
CC6	Speed dependency of oscillation	11.44	0
CC7	Oscillation acceleration (m/s^2)	0.25	0.40
CC8	Standstill acceleration (m/s^2)	3.5	3.8
CC9	Acceleration with 80km/h (m/s^2)	1.5	1.8
LC4	Safety distance reduction factor (%)	60	30
LC5	Min. headway (m)	0.5	0.2
MG1	Minimum time gap (sec)	3	2.4
MG1	Minimum headway (m)	5	3.5

2. 시나리오 설정 및 평가지표 선정

본 연구의 공간적 배경인 판교 자율주행차 시범운행지구는 출·퇴근 인구 등의 영향으로 인해 시간대별로 교통량의 큰 차이를 보인다. 이러한 교통 특성을 고려하여 오전첨두, 비첨두, 오후첨두 시간대로 나누어 시나리오를 설정하였다. 또한, 자율주행차의 도입시기에 따른 시범운행지구 운영전략 수립을 위해 자율주행차의 MPR 즉, 혼입률에 따른 분석을 수행하였다. 자율주행차의 혼입률은 각 시나리오별로 0~100%(Unit: 10%)로 설정하였다. 시뮬레이션 분석 시간은 교통류 형성에 소요되는 초기 Warm up time 1,800초를 제외하고, 1,800~5,400초까지 총 3,600초 동안 수행하였다. 본 연구에서 설정한 시나리오는 <Table 4>와 같다. 최종적으로 구축된 시뮬레이션의 실도로 구현 정확도 검증을 위해 GEH(Geoffrey E Havers) 통계기법을 활용하여 Calibration을 수행하였다. GEH검증은 교통분야에서 미시 시뮬레이션의 모사 수준을 분석하는 주로 활용되는 통계기법이다(Kabashkin and Prentkviskis, 2017). GEH 식은 (1)과 같다. 본 연구에서는 시뮬레이션 수행 후 9개 메인교차로에 대해서 방향별 교통량을 수집하였으며, 실제 관측값과 시뮬레이션값을 활용하여 GEH검증을 수행하였다. 일반적으로 GEH 값이 5 이하인 지점이 전체 지점의 85% 이상인 경우에 실제 관측 값과 일치하여 사용하기에 타당하다고 판단하는데(Transportation Technology and Policy., 2009), 본 연구에서는 3가지 시나리오에서 모두 GEH가 5이하인 교차로의 비율이 전체의 94.28%로 나타나 시뮬레이션이 실제 네트워크를 상당히 유사한 수준으로 구현되었음을 확인하였다. 본 연구의 GEH검증 결과는 <Table 5>을 통해 확인할 수 있다.

또한, 각 시나리오에 대한 자율주행차 혼재 교통류의 교통 효율성과 안전성을 분석하기 위한 평가지표를 선정하였다. 먼저, 교통 효율성 지표로는 평균통행속도(km/h)와 평균지체시간(sec)을 선정하여 네트워크 전체의 효율성을 분석하였다. 또한, 교통 안전성을 평가하기 위한 지표로는 자율주행차 도입에 따라 교통류에서 발생하는 급정거를 분석하기 위해 급정거율(%)을 활용하였다(Ko et al., 2021; Bruce et al., 2009). 총 급정거건수는 시나리오별로 다른 교통량을 고려하지 못하기 때문에 교통량에 직접적인 영향을 받지 않는 급정거율을 선정하였다. <Table 6>는 본 연구에서 효율성 및 안전성을 평가하기 위해 선정한 평가지표이다.

<Table 4> Simulation scenario

Classification	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Time	Morning peak hour (08:00~09:00)	Non-peak hour (12:00~13:00)	Evening peak hour (18:00~19:00)
Autonomous vehicle MPR	0 ~ 100%(unit: 10%)		
Running time	5,400 sec (warm up: 1,800sec)		

<Table 5> GEH analysis results

Intersection	Scenario 1			Scenario 2			Scenario 3		
	Modelled flow	Counted flow	GEH	Modelled flow	Counted flow	GEH	Modelled flow	Counted flow	GEH
① N	1256	1263	0.21	853	889	1.21	1222	1263	1.15
① W	2082	2294	4.52	1117	954	5.06	1402	1453	1.36
① S	811	902	3.10	630	640	0.41	651	703	2.00
① E	1568	1657	2.22	1038	1125	2.66	1068	1210	4.22
② N	696	715	0.72	180	185	0.39	106	142	3.27

② W	1559	1687	3.17	1030	1054	0.74	1183	1253	2.00
② S	657	580	3.11	436	458	1.04	514	548	1.49
② E	1236	1001	7.03	1003	1220	6.52	1221	1258	1.05
③ N	662	652	0.39	711	758	1.75	1071	904	5.32
③ W	1993	2149	3.44	1018	1055	1.16	1149	1157	0.25
③ S	1032	1115	2.54	539	557	0.78	739	786	1.70
③ E	1386	1184	5.64	1030	1028	0.07	1215	1258	1.21
④ N	1453	1406	1.25	692	723	1.17	719	750	1.13
④ W	1135	1011	3.78	249	286	2.26	180	186	0.47
④ S	776	816	1.42	797	815	0.62	764	904	4.84
④ E	646	698	2.02	259	278	1.18	564	596	1.33
⑤ N	960	951	0.28	325	351	1.40	408	475	3.19
⑤ W	751	663	3.32	252	278	1.58	268	268	0.02
⑤ S	520	470	2.26	380	389	0.44	674	742	2.57
⑤ E	312	237	4.55	203	207	0.30	417	458	1.98
⑥ N	794	703	3.34	619	625	0.25	833	975	4.73
⑥ W	1043	1185	4.26	212	235	1.56	227	235	0.50
⑥ S	574	558	0.67	527	552	1.08	759	774	0.54
⑥ E	192	138	4.23	94	98	0.44	279	286	0.40
⑦ N	2115	2214	2.13	767	853	3.01	608	635	1.07
⑦ S	969	1030	1.92	977	1078	3.16	884	989	3.42
⑦ E	968	1070	3.20	605	685	3.14	990	1240	7.48
⑧ N	841	941	3.36	428	478	2.37	624	652	1.11
⑧ W	554	636	3.38	404	489	4.04	436	457	0.99
⑧ S	768	673	3.54	472	512	1.80	766	785	0.69
⑧ E	530	630	4.17	474	585	4.84	827	856	0.99
⑨ N	888	961	2.39	652	675	0.88	1050	1210	4.76
⑨ W	525	547	0.96	352	384	1.69	402	405	0.13
⑨ S	842	725	4.17	766	798	1.13	925	986	1.96
⑨ E	256	229	1.75	358	368	0.52	544	574	1.28
Total	35			35			35		
Number of GEH below 5	32			32			32		
Percentage of GEH below 5	94.28%			94.28%			94.28%		

* ① ~ ⑨: Intersection number

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \times (M - C)^2}{M + C}} \quad \text{여기서 } M = \text{Modelled flow}, C = \text{Counted flow} \dots\dots\dots (1)$$

<Table 6> Evaluation index

Index		Description
Efficiency	Average speed (km/h)	Average speed of all vehicles driving on the network
	Average delay (sec)	Average delay of all vehicles driving on the network
Safety	Hard braking rate (%)	Percentage of hard braking on typical vehicles driving on the network

3. 자율주행차 혼재 교통류 분석 결과 도출

오전첨두·비첨두·오후첨두 시간대 및 자율주행차의 혼입률로 구분하여 설정한 각 시나리오에 대해 시물레이션을 수행하였다. 분석 결과는 3번의 시물레이션 결과의 평균값을 활용하였다. 교통 효율성 지표인 혼입률과 평균지체시간은 VISSIM 2021의 Vehicle Network Performance를 통해 수집되는 전체 차에 대한 평균값을 도출한다. 교통 안전성 지표인 급정거율은 VISSIM 2021에서 수집되는 개별차의 trajectory데이터를 활용하였다. VISSIM 2021에서는 차량의 주행 상태를 기본 상태(Default), 차선변경완료(Has changed lane), 적당한감속(Brakes moderately), 주의력상실(Loss of attention), 급정거(Brakes heavily) 등으로 분류하고 있다. 여기서 급정거는 감속도가 $-3.0m/s^2$ 미만인 주행 상태로 규정한다(PTV, 2021). 본 연구에서의 급정거율은 0.1초 단위로 수집되는 차량 주행 데이터에서 급정거 횟수를 전체 주행 데이터 수로 나누어 차종별로 계산한다. 결과적으로 평균통행속도, 평균지체시간, 급정거율을 활용하여 시간대와 자율주행차 혼입률에 따라 설정된 시나리오에 대한 교통 효율성과 교통 안전성을 분석한다. 분석된 교통 효율성 및 안전성 지표를 토대로 교통운영전략 수립을 위한 교통류 및 교통안전 지표를 생성한다.

4. 교통운영전략 수립을 위한 교통류 및 교통안전 지표 선정

시범운행지구의 교통운영전략을 수립하기 위해서는 기존 자율주행 정책방안을 검토할 필요가 있다. 자율주행 시대에 대비한 첨단 도로 인프라의 정책방안은 도입 초기, 활성화, 안정화 단계로 구분하여 각 시기에 적절하게 마련되었다(Oh, 2017). Lee(2017)은 자율주행차의 도입과 확산 과정에서 일반차 혼재로 인한 문제에 대해 단계별 대응 마련이 필요하다는 정책적 제안을 하였다. 환언하면, 자율주행차 혼재 시 발생하는 문제에 대응하기 위해서는 도입 시기별 적절한 정책을 마련할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 자율주행차 혼입률에 따라 단계별 운영전략을 수립하고자 한다.

교통류와 교통안전 지표를 기반으로 자율주행차 혼입률의 구분 기준을 산정하였다. 교통류 지표는 평균통행속도와 평균지체시간을 정규화하였으며, 교통안전 지표는 급정거율을 활용하였다. Park(2017)은 여러 항목을 정규화하여 지표를 산정하는 방식으로 Z정규화, TOPSIS, VIKOR, TOPSIS-수정모형을 구분하였으나, 순위역전 현상이 덜 발생하는 TOPSIS-수정모형을 가장 적합한 방식으로 제안하였다.

TOPSIS-수정모형은 TOPSIS의 벡터 정규화가 평가지표의 단위를 비례가 아닌 형태로 바꾸었을 때 서로 다른 순위가 나타나는 한계(Opricovic and Tzeng, 2004)를 보완하기 위해 선형 정규화 과정을 거쳐 TOPSIS를 적용하였다. 본 연구는 TOPSIS-수정모형을 활용하여 교통류 지표를 산정하였고 TOPSIS-수정모형은 다음과 같은 단계를 거친다.

단계1 : 평가항목 i 와 평가기준 j 에 대해평가값 x_{ij} 에 대한 선형 정규화

$$g_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \dots\dots\dots (2)$$

단계2 : 정규화 값 g_{ij} 에 평가지표 j 의 가중치 w_j 를 곱하여 보정값 h_{ij} 를 계산

$$h_{ij} = w_j \times g_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

단계3 : 평가지표 j 가 값이 클수록 좋은 지표이면 h_{ij} 의 최대값으로, 작을수록 좋은 지표이면 h_{ij} 의 최솟값을 갖는 이상적인 최상의 대안 H^* 와 이상적인 최악의 대안 H^- 를 구분(B^1 =클수록 좋은 지표, B^2 =작을수록 좋은 지표)

$$H^* = h_1^*, h_2^*, \dots, h_m^* = (\max_i h_{ij} \mid j \in B^1), (\min_i h_{ij} \mid j \in B^2) \dots\dots\dots (4)$$

$$H^- = h_1^-, h_2^-, \dots, h_m^- = (\min_i h_{ij} \mid j \in B^1), (\max_i h_{ij} \mid j \in B^2)$$

단계4 : 항목의 $h(j=1,2,\dots,m)$ 로부터 이상적인 최상의 대안 및 이상적인 최악의 대안과의 유클리안 거리 U_i^* 와 U_i^- 를 계산

$$U_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (h_{ij} - h_j^*)^2}, U_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (h_{ij} - h_j^-)^2} \dots\dots\dots (5)$$

단계5 : 지표의 상대적 거리 D_i 계산

$$D_i = U_i^- / (U_i^* + U_i^-) \dots\dots\dots (6)$$

5. 자율주행차 시범운행지구 교통운영전략 수립

본 연구는 시범운행지구의 교통운영전략을 교통류와 교통안전으로 구분하여 수립하고자 한다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 자율주행차 혼입률을 기준으로 단계를 구분하고 단계별 운영전략을 달리한다. 단계를 구분하기 위해 교통류와 교통안전 지표의 삼분위수(tertile)를 활용한다.

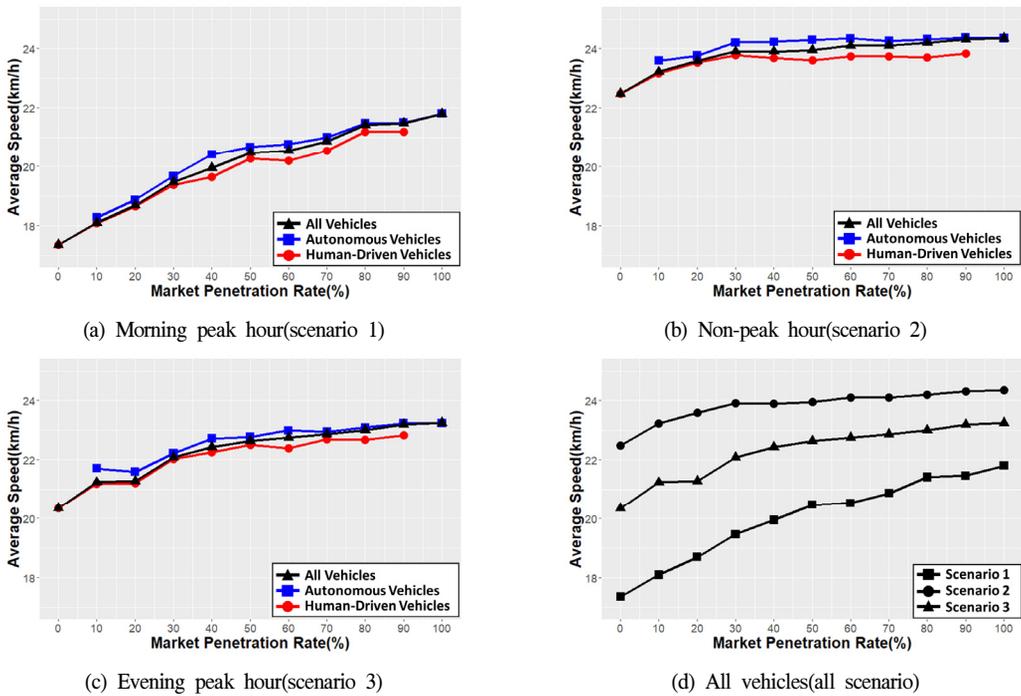
삼분위수는 데이터 표본을 3개의 동일한 부분으로 나눈값을 의미하며, 1/3 지점인 제1삼분위수(T_1), 2/3 지점인 제2삼분위수(T_2)로 구분한다. Oh et al.(2016)는 유병률 순위 기준을 삼분위수로 그룹화하였고 Yoon et al.(2018)은 학업성취도의 삼분위수를 기준으로 고성취, 보통성취, 저성취로 집단을 구분하였다. 따라서 본 연구는 교통류 및 교통안전 지표의 삼분위수를 기준으로 자율주행차 혼재의 도입기, 과도기, 안정기로 구분하여 교통운영전략을 수립한다.

IV. 방법론 적용 및 분석

1. 자율주행차 혼입률에 따른 시나리오별 평균통행속도

각각 오전첨두·비첨두·오후첨두 시간대로 구성된 시나리오 1, 2, 3에 대하여 자율주행차의 혼입률에 따

른 전체 교통류의 평균통행속도를 활용하여 교통 효율성을 분석하였다. 교통량이 많은 오전첨두 시간대(시나리오 1)의 경우 모든 혼입률에서 평균통행속도가 22km/h이하로 나타났으며, 혼입률이 0%일 때는 전체 차의 평균통행속도가 18km/h 이하로 분석되었다. 그러나 혼입률이 증가할수록 평균통행속도가 개선되어 혼입률이 100%일 때는 21.8km/h까지 상승하였다. 비첨두 시간대를 기준으로 시물레이션 네트워크가 구성된 시나리오 2의 경우 전체적으로 모든 자율주행차 혼입률 상황에서 평균통행속도가 22km/h보다 높게 나타났으며, 혼입률이 증가할수록 평균통행속도가 꾸준히 증가하여 자율주행차가 교통량의 100%를 차지했을 때는 최대 24.35km/h로 분석되었다. 퇴근 통행량이 많이 발생하는 오후첨두 시간대(시나리오 3)는 전체적으로 앞선 시나리오 1, 2와 유사한 경향을 보였으며, 혼입률이 증가할수록 평균통행속도가 증가하였으며 혼입률이 100%일 때 최대 23.24km/h까지 상승하였다. 각 시나리오별 전체차량의 평균통행속도를 비교한 결과, 교통량이 가장 적은 비첨두 시간대(시나리오 2)의 평균통행속도가 가장 높게 나타났으며, 교통량이 가장 적었던 오전첨두 시간대(시나리오 1)의 평균통행속도가 가장 낮게 분석되었다. 시나리오 1, 2, 3에 대한 평균통행속도 분석 결과는 <Fig. 2>를 통해 확인할 수 있다.

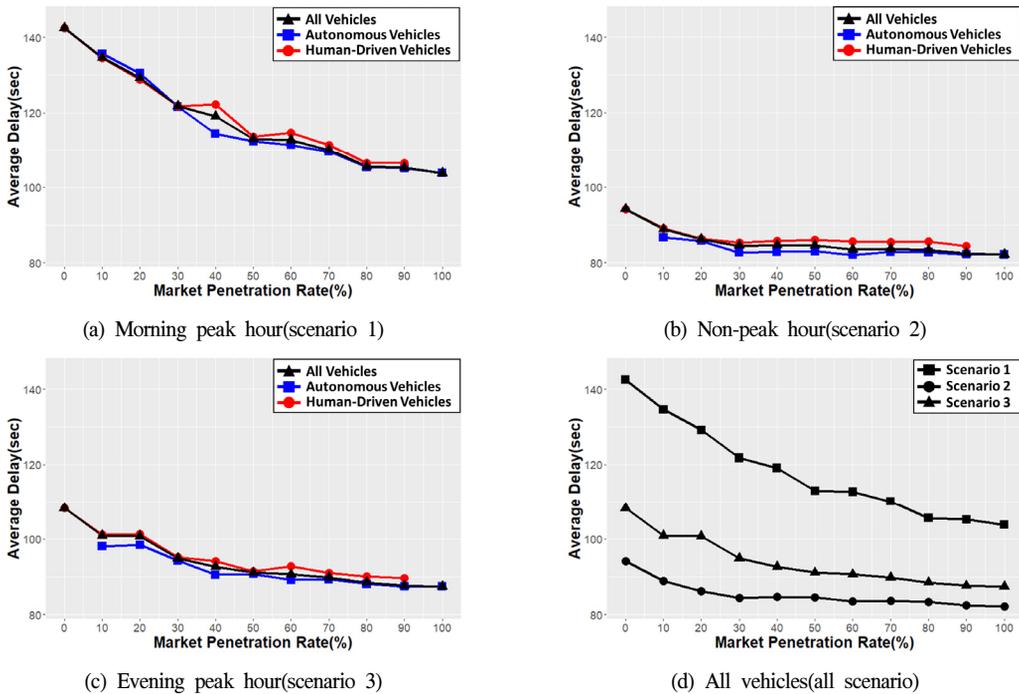


<Fig. 2> Average speed by scenario

2. 자율주행차 혼입률에 따른 시나리오별 평균지체시간

또 다른 교통 효율성 평가지표인 평균지체시간을 활용하여 시나리오 1, 2, 3를 자율주행차의 혼입률에 따라 분석하였다. 시나리오 1에서는 모든 혼입률에서 평균지체시간이 100sec이상으로 나타나 전체적으로 교통류가 정체를 겪은 것으로 분석되었다. 그러나, 자율주행차의 혼입률이 증가할수록 평균지체시간은 감소하는 경향을 보였으며, 혼입률 0% 대비 100%에서 평균지체시간이 약 27%까지 감소하였다. 비첨두 시간대인 시나

리오 2의 경우 모든 혼입률에서 평균지체시간이 95sec 이하로 분석되어 첨두시간대 시나리오보다 지체가 적은 것을 확인하였다. 또한, 시나리오 1와 동일하게 혼입률 증가에 따라 평균지체시간이 꾸준히 감소하여 자율주행차 혼입률이 100%일 때는 82.15sec까지 감소하였다. 오후첨두 시간대인 시나리오 3도 시나리오 1, 2와 동일하게 혼입률이 증가할수록 평균지체시간은 감소하여 교통 효율성이 향상되는 것을 확인하였다. 시나리오 3에서는 혼입률 0% 대비 100%에서 평균지체시간이 약19% 감소하였다. 시나리오 1, 2, 3의 평균지체시간을 비교한 결과, 전체적으로 출근 통행으로 인해 교통량이 가장 많은 시나리오 1에서 가장 큰 지체가 발생하였으며, 비첨두 시간대인 시나리오 2에서 가장 적은 지체가 발생한 것으로 분석되었다. 시나리오 1, 2, 3에 대한 분석 결과는 <Fig. 3>을 통해 확인할 수 있다.

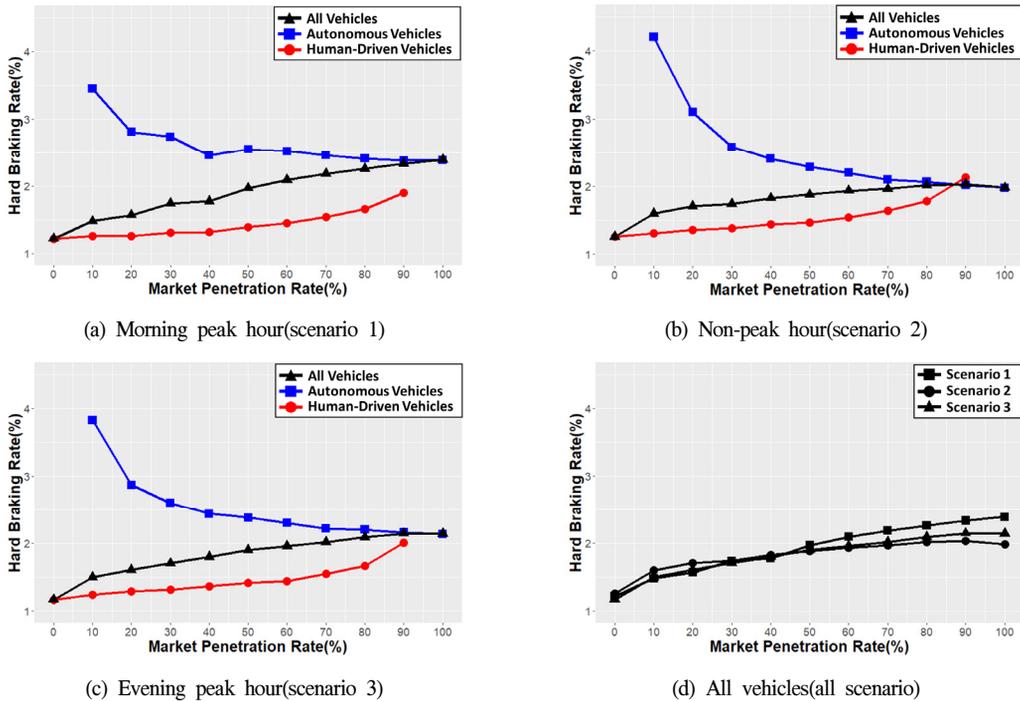


<Fig. 3> Average delay by scenario

3. 자율주행차 혼입률에 따른 시나리오별 급정거율

교통 안전성 평가지표인 급정거율을 활용하여 시나리오 1, 2, 3에 대한 자율주행차 혼재 시 교통 안전성을 분석하였다. 오전첨두 시간대 배경인 시나리오 1의 경우 자율주행차 혼입률이 높아질수록 일반차의 급정거율은 증가하는 경향을 보였으나, 자율주행차의 급정거율은 감소하여 자율주행차의 안전성이 향상되는 것으로 분석되었다. 특히 자율주행차의 혼입률이 100%일 때는 자율주행차의 급정거율이 2.39%까지 감소하였다. 시나리오 2인 비첨두 시간대에서도 자율주행차 혼입률이 증가할수록 일반차의 급정거율은 다소 증가하였으나, 자율주행차의 급정거율은 꾸준히 감소하여 혼입률 10% 대비 혼입률 100%에서 약 53% 감소하였다. 오후 첨두 시간대인 시나리오 3에서도 자율주행차의 혼입률이 증가할수록 자율주행차의 안전성이 향상, 일반차의 안전성이 저하되는 경향을 보였다. 전체적으로 모든 시나리오에서 자율주행차의 혼입률 증가에 따라 자율주

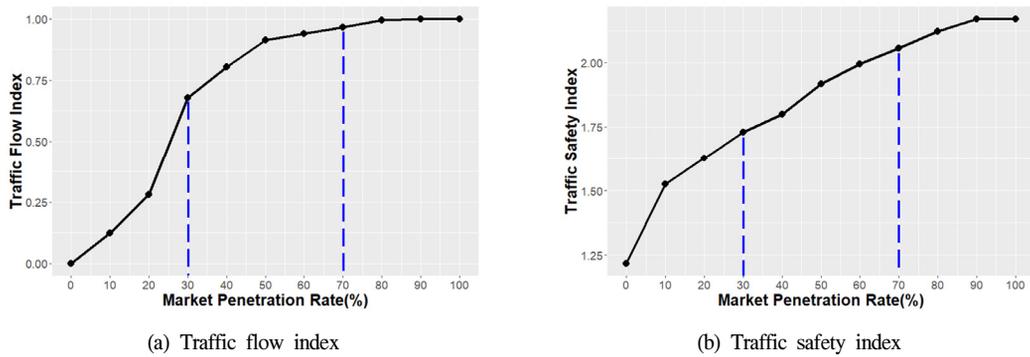
행차의 안전성은 향상하는 경향을, 일반차의 안전성은 하락하는 경향을 보였다. 이는 일반차와 자율주행차는 서로 다른 주행 행태를 갖는데, 교통류에 같은 주행 행태를 갖는 차량이 많을 때 차두거리가 비교적 일정하게 유지되기 때문으로 추정된다. 즉, 자율주행차의 비율이 늘어날수록 자율주행차는 차두거리를 비교적 안정하게 유지하여 안전성이 향상되나, 일반차는 다른 주행행태를 갖는 자율주행차의 혼재가 심해질수록 차두거리가 일정하지 못하게 변동하면서 급정거율이 증가하는 것으로 판단된다. <Fig. 4>을 통해 시나리오 1, 2, 3에 대한 급정거율 분석 결과를 확인할 수 있으며, (d)를 보면 자율주행차의 혼입률 증가에 따라 전체 교통류의 급정거율은 증가하여 전체적인 교통 안전성은 다소 저하되는 것으로 분석되었다.



<Fig. 4> Hard braking rate by scenario

4. 교통류 및 교통안전 지표 분석

운영전략을 시간대별로 구분하여 수립하는 것은 운영의 혼란을 야기할 수 있기 때문에, 교통류 및 교통안전 지표는 오전첨두, 비첨두, 오후첨두의 구분없이 산정하였다. 교통류 지표는 평균통행속도와 평균지체시간의 정규화 방법론 TOPSIS-수정모형으로 산정하였으며, 교통안전 지표는 급정거율을 활용하였다. 분석결과, 교통류와 교통안전 지표는 자율주행 혼입률에 정비례하는 경향을 보였다. 먼저 교통류 지표는 혼입률이 30%에서 급격히 증가하였으며, 이후 점진적으로 증가하였다. 교통안전 지표는 혼입률별로 증가 폭이 유사하였다. 교통류와 교통안전 지표의 삼분위수를 분석한 결과, <Fig. 5>에서 표시된 바와 같이 교통류와 교통안전 지표의 제1삼분위수와 제2삼분위수가 혼입률 30%, 70%로 동일하게 나타났다.



<Fig. 5> Traffic flow and safety index by market penetration rate

5. 자율주행차 시범운행지구 운영전략 수립

시범운행지구의 특성상 혼입률이 일정수준에 도달하면, 일반도로의 자율주행차 상용화 초기 단계로 시범운행지구의 의미가 퇴색된다. 그러나 본 연구는 시범운행지구의 의미가 퇴색되는 혼입률을 산정하는데 한계가 있다는 점에서, 시범운행지구의 혼입률이 100%임을 가정하고 운영전략을 수립하였다. 자율주행차 시범운행지구의 운영전략을 교통류와 교통안전으로 구분하여 각 지표의 삼분위수를 기준으로 단계별로 수립한다. 교통류 지표의 제1삼분위수(T_1)는 0.678, 제2삼분위수(T_2)는 0.967로 MPR 30%와 70%에 해당된다. 교통안전 지표의 제1삼분위수(T_1)는 1.72, 제2삼분위수(T_2)는 2.05로 MPR 30%와 70%에 해당된다. 따라서 본 연구는 교통류 운영전략을 도입기($MPR < 30\%$), 과도기($30\% < MPR < 70\%$), 안정기($MPR > 70\%$)로 구분하고, 교통안전 운영전략을 도입기($MPR < 30\%$), 과도기($30\% < MPR < 70\%$), 안정기($MPR > 70\%$)로 구분하여 <Table 7>과 같이 수립하고자 한다.

<Table 7> Step deviation by MPR

MPR	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Traffic flow	Introductory stage			Transition period				Stable period		
Traffic safety	Introductory stage			Transition period				Stable period		

본 연구는 교통류 운영전략으로 <Table 8>과 같이 도입기에 기존도로 인프라의 첨단화, 과도기에 자율주행 전용차로 운영 및 일반차 마일리지 제도, 안정기에 자율주행차 효율성 극대화를 제안한다. 교통안전 운영전략으로는 도입기에 사고 시 대응 매뉴얼 및 법제도, 과도기에 사고 예방 및 관리정책, 안정기에 자율주행차 인증 기준 강화 및 보안정책 강화를 제안한다.

교통류 운영전략의 도입기에는 평균통행속도와 지체시간이 급격히 증가하는 구간으로 기존도로 인프라를 첨단화 할 필요가 있다. 일반차 중심으로 설계된 기존 도로 인프라에 대해 자율주행차는 주행의 어려움이 발생할 것으로 예상되고 교통 환경 조건의 급격한 변화에 대응이 부족하여 교통사고가 증가할 수 있다는 우려가 제기되고 있다(Oh, 2017). 따라서 자율주행차가 도로주행을 하기 시작하는 도입기에는 일반차 중심의 도로 인프라를 자율주행차에 적합하게 점차 첨단화 해야 한다. 본 연구는 인프라 첨단화에 필요한 전략을 차선, 도로표지, RSE 등 도로 시설물의 고도화, 정밀도로지도 개발, 자율주행 혼재 시 교통서비스 운영으로 제안한다.

과도기에는 평균통행속도와 지체시간이 꾸준히 증가하는 구간으로 자율주행차와 일반차의 분리가 필요한 시기이다. 자율주행차가 일정 비율 이상 도달한 시기로, 일반차와 혼재 시 발생할 수 있는 안전 문제를 개선

하고 군집주행을 통한 효율 극대화를 위해 자율주행차 전용차로 운영이 필요하다(Oh, 2017). 또한, 자율주행차 전용차로를 운영하면 군집주행은 차로의 용량을 약 2.5배 더 효율적으로 활용할 수 있으며, 이는 정체 감소와 온실가스 배출량 감소로 이어져 대기 질 개선 효과를 기대할 수 있다(Tientrakool et al., 2011). 자율주행 전용차로를 운영하기 위해서는 일반차의 용량감소로 인한 피해를 보상할 수 있는 방안을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 자율주행 전용차로와 일반차 마일리지 제도를 제안한다.

안정기는 평균통행속도와 지체시간의 변화가 거의 없는 구간으로 자율주행차의 비율이 크게 증가하고 자율주행차 상용화가 안정된 상태이며, 교통류 효율성을 극대화할 필요가 있다. 과도기에서 운영이 시작된 자율주행차 전용차로를 확대하고 제한속도를 현행 50km/h에서 60~70km/h로 완화하여 운영의 효율성을 높일 것을 제안한다.

교통안전 운영전략의 도입기에는 급정거율이 급격히 증가하는 구간으로 자율주행차의 사고 발생 시 대응 메뉴얼 및 법 제도를 마련해야 한다. 인간의 개입 없이 주행하는 자율주행차의 사고는 현행 법률의 적용에 한계가 있으며, 자율주행차의 제조적 결함, 소프트웨어 오류로 인한 사고는 원인 규명에 많은 어려움이 있는 만큼 제조물 책임법을 어떻게 적용할 것인지가 중요하다.(Park, 2020) 운전자의 손해배상책임을 근간으로 하는 구조에서 제조자의 손해배상책임을 중심으로 하는 방향으로 전환되어야 하고 소프트웨어 결함으로 인한 사고 발생 시 법제도 마련을 중심으로 논의해야 한다. 또한, 자율주행차의 사고 발생 시 이해관계자 정의, 사고대응센터 운영, 단계별 대응방안 등 대응 메뉴얼을 마련해야 한다.

과도기에는 급정거율이 소폭 증가하는 구간으로 자율주행차의 사고 예방 및 관리 정책이 필요하다. 자율주행차 사고 데이터 기반 원인을 분석하고 원인에 따른 예방정책을 시행해야 한다. 도로 시설물과의 통신 오류에 따른 사고는 자율주행차에게 전송되는 정보의 전달 방식, 속도 등을 고도화하는 등의 대응이 필요하다.

안정기는 급정거율의 변화가 거의 없는 구간으로 자율주행차의 시스템 고도화 및 보안정책을 실시해야 한다. 자율주행차의 결함으로 인한 사고를 최소화하기 위해 사고의 주요 원인이 되는 부분에 대한 인증 기준을 강화해야한다. 또한, 자율주행차 해킹으로 인한 사고를 예방하기 위해 보안 시스템을 강화하고 처벌 기준 강화 등의 정책 마련이 필요하다.

<Table 8> Traffic operation strategy by step

Classification	Introductory stage	Transition period	Stable period
Traffic flow	Modernization of existing road infrastructure	Autonomous vehicle Reserved lane	Maximize efficiency
Traffic safety	Manual and law	Accident prevention	Reinforcing standard

V. 결 론

자율주행차가 주행하는 시범운행지구는 교통환경의 급격한 변화에 대응이 부족하여 교통사고가 증가할 수 있다는 우려가 제기되고 있으며(Oh., 2017), 일반차와의 혼재 시 교통류 흐름에 부정적인 영향을 미칠 수도 있다는 지적이 있다(Jung et al., 2020). 따라서 본 연구는 자율주행 혼입률에 따른 교통류와 교통안전의 분석 결과를 기반으로 도입기, 과도기, 안정기로 구분하여 단계별 시범운행지구 교통운영전략을 수립하였다.

먼저 자율주행 혼입률에 따른 평균통행속도, 평균지체시간, 급정거율을 오전첨두, 비첨두, 오후첨두로 구분하여 분석하였다. 일평균 교통수요는 대부분 특정 시간대에 집중됨으로써(kim and Jang, 2012), 교통량에

따른 교통환경의 변화를 야기하기 때문에 오전첨두, 비첨두, 오후첨두로 시나리오를 구분하였다. 자율주행차 혼입률에 따른 시간대별 분석은 유사한 경향을 보였는데, 혼입률이 증가할수록 평균통행속도가 증가하고 평균지체시간은 감소하여 교통 효율성이 향상되는 것을 확인하였다. 상반되게, 자율주행차 혼입률과 급정거율은 비례 관계로 안전성에 부정적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

시범운행지구의 도입기, 과도기, 안정기를 구분하기 위해 교통류와 교통안전 지표의 삼분위수를 활용하였다. 교통류 지표는 평균통행속도와 평균지체시간의 정규화 값을 활용하여 자율주행 혼입률 30%, 70%를 구분 기준으로 적용하였고, 교통안전 지표는 급정거율을 활용하여 자율주행 혼입률 30%, 70%로 단계를 구분하였다. 따라서 교통류와 교통안전의 단계별 운영전략을 다음과 같이 수립하였다. 교통류 운영전략으로 자율주행차의 도입기에 기존도로 인프라의 첨단화, 과도기에 자율주행차 전용차로 및 일반차 마일리지 제도 운영, 안정기에 전용차로 확대 및 제한속도 완화를 제안한다. 교통안전 운영전략으로는 도입기에 사고 발생 시 대응매뉴얼 및 법제도 마련, 과도기에 사고예방 및 관리정책 실시, 안정기에 시스템 고도화 및 보안정책 강화를 제안한다. 본 연구는 시범운행지구의 교통류와 교통안전의 단계별 운영전략을 수립하였는데, 이는 자율주행차가 일반차와 혼재되어 주행하면서 발생하는 교통사고(Oh, 2017)와 교통류 부정적인 영향(Accenture, 2017)을 사전에 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 연구에서 제안한 시범운행지구 단계별 운영전략의 효과성을 극대화하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 첫째, 자율주행차 모델링 시 다양한 차량 주행 모형을 활용하여야 한다. 본 연구는 자율주행차 주행 모형을 가정하여 분석하였으나, 향후 연구에는 멀티에이전트 기반의 다양한 자율주행차 모형을 고려한 자율주행차 혼재 분석이 수행되면, 분석의 정확도 및 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 보인다. 둘째, 다양한 평가지표를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 평균통행속도, 평균지체시간, 급정거율을 활용하여 교통 효율성과 안전성을 분석하였으나, 향후 연구에서는 다양한 교통 효율성 및 안전성 평가지표 활용과 친환경성 평가를 동반하여 한층 세부적인 분석이 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Institute for Information & Communication Technology Planning & Evaluation(IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2021001415).

REFERENCES

- Accenture, <https://www.accenture.com/us-en/industries/insurance-index>, 2017.11.01.
- Atkins-Department for Transport(2016), *Research on the impacts of connected and autonomous vehicles(cavs) on traffic law*, pp.1-57.
- Bruce, G. S., Marie, C. O., Jing, W., Sheila, G. K., Suzanne, E. L. and Thomas, A. D.(2009), “Hard braking events among novice teenage drivers by passenger characteristics”, *Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design 2009 June 22*, pp.236-242.
- Department of Motor Vehicles(2015-2019), *Autonomous Vehicle Collision Reports*, Department of Mo

- torVehicles, United States. Available from www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-collision-reports/, 2021.03.18.
- Ekram, A. A. and Rahma, M. S.(2018), “Effects of connected and autonomous vehicles on contraflow operations for emergency evacuation: A microsimulation study”, *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, pp.18-25.
- Gyeonggi Research Institute(2016), *A study of the measure to support the driving of autonomous vehicles in Pangyo creative economy vally*, pp.1-170.
- Gyeonggi Research Institute(2020), *A study of inferring factors of the commuter’s mode choice considering the introduction of the autonomous driving shuttle services*, p.3.
- Jeong, J. H., Park, J. Y. and Kim, K. Y.(2020), “Evaluation of the effect of urban network on the autonomous and non-autonomous environment using traffic simulation”, *The 82th Conference of Korea Society of Transportation*, p.33.
- Jo, Y., Jung, A. R., Oh, C., Park, J. H. and Yun, D. G.(2022), “Suitability Evaluation for Simulated Maneuvering of Autonomous Vehicles”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 2, pp.183-200.
- Joint Ministry(2019), *Future Automotive Industry Development Strategy*.
- Jung, G. Y., Kim, Y. H. and Park, S. Y.(2020), “A Study on diverse preference for driving behaviors of the automated vehicles and the simulation methodology for its impact on the traffic”, *KOTI Handbook*, RR-20-01, pp.1-192.
- Kabashkin, I. Y. and Prentkvskis, I.(2017), *Reliability and statistics in transportation and communication* (1st ed.), Springer International Publishing, Switzerland.
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M. and Helbing, D.(2008), “Adaptive Cruise Control Design for Active Congestion Avoidance”, *Transportation Research Report Part C*, vol. 16, pp.668-683.
- Kim, H. J. and Jang, S. E.(2012), “Calculate of the Peak-hour Ratio for Road Traffic Volumes using a Hybrid Clustering Technique”, *Korean Society of Transportation*, vol. 30, no. 1, pp.19-30.
- Kim, H. J., Baek, S. C., Yun, D. G. and Park, J. J.(2021), “A Study on the Scenario Development for the Analysis of Mixed Traffic Characteristics Following the Introduction of Freeway Exclusive Lanes for Autonomous Vehicles”, *Korean Society of Transportation*, vol. 39, no. 6, pp.838-848.
- Kim, J. H., Lim, D. H., Seo, Y. H., So, J. H. and Kim, H. J.(2022), *Influence of dedicated lanes for connected and automated vehicles on highway traffic flow*, The Institution of Engineering Technology Intelligent Transport Systems, pp.1-13.
- Kim, S. H., Lee, J. H., Kim, Y. J. and Lee, C. W.(2018), “Simulation-Based Analysis on Dynamic Merge Control at Freeway Work Zones in Automated Vehicle Environment”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, vol. 38, no. 6, pp.867-878.
- Ko, W. R., Park, S. M., So, J. H. and Yun, I. S.(2021), “Analysis of effects of autonomous vehicle market share changes on expressway traffic flow using IDM”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 4, pp.13-27.
- Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2020), *Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-904*.
- Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2021), *Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2021-337*.

- Korea Transport Institute(2022), *A case study of mobility services in autonomous vehicle demonstration areas*, no. 21-07, pp.1-146.
- Lee, B. J.(2017), *Korea Research Institute for Human Settlements Policy Brief*, no. 600, p.1.
- Lee, S. Y., Oh, M. S., Oh, C. and Jeong, E. B.(2018), “Automated driving aggressiveness for traffic management in automated driving environments”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 36, no. 1, pp.38-50.
- Morando, M. M., Trung, L. T. and Vu, H.(2017), “Investigating safety impacts of autonomous vehicles using traffic micro-simulation”, *Australasian Transport Research Forum 2017*, pp.1-6.
- Oh, S. H.(2017), *Korea Research Institute for Human Settlements Policy Brief*, no. 637, p.1.
- Oh, W. S., Hieu, N. C., Kim, S. M., Sohn, J. W. and Heo, J.(2016), “Spatial Autocorrelation of Disease Prevalence in South Korea Using 2012 Community Health Survey Data”, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 34, no. 3, pp.253-262.
- Opricovic, S. and Tzeng, G. H.(2004), “The Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS”, *European Journal of Operational Research*, vol. 156, no. 2, pp.445-455.
- Park, I. S., Lee, J. D., Lee, J. Y. and Hwang, K. Y.(2015), “Impact of automated vehicles on freeway traffic-flow-focused on Seoul-signal basic sections of GyeongBu freeway”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Park, J. H.(2020), “A Study of the Application of Product Liability Law to Autonomous Vehicle Accidents”, *Jeju National university International Law Review*, vol. 12, no. 1, pp.69-90.
- Park, Y. S.(2017), “Rank Reversal Phenomenon According to Normalization Methods in Quantitative Data”, *Academic Society of Global Business Administration*, vol. 14, no. 6, pp.215-237.
- Planung Transport Verkehr(PTV) Group(2021), *PTV Vissim 2021 User Manual*, p.223.
- Prescient & Strategic Intelligence(2020), *ADAS Sensor Market Research Report: By Type (Radar, LiDAR, Camera, Ultrasonic), Vehicle Autonomy (Semi-Autonomous Vehicle, Fully-Autonomous Vehicle), Vehicle Type (Passenger Car, Commercial Vehicle), Application (ACC System, AEB System, BSD System, LKAS, AFL System, CTA System, DMS, IPA System, NVS)-Industry Size, Trend, Growth and Demand Forecast to 2030*.
- Tientrakool, P. C., Ho, Y. C. and Nicholas, F. M.(2011), “Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance”, *Proceeding from Vehicular Technology Conference*, pp.1-5.
- Transportation Technology and Policy(2009), *Microscopic traffic simulation model settlement overview*, pp.229-337.
- Yook, D. H., Lee, B. J. and Park, J. T.(2018), “Exploring the impacts of autonomous vehicle implementation through microscopic and macroscopic approaches”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 17, no. 5, pp.14-28.
- Yoon, H. S.(2018), *The Effects of High School Type on Self-Esteem Change*, Seoul National University.
- Zhou, J., Ma, F. and Demetsky, M. J.(2012), “Evaluating mobility and sustainability benefits of cooperative adaptive cruise control using agent-based modeling approach”, *Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp.74-78.