

# 자율주행차량 도입에 따른 고속도로 교통류 영향분석 - 경부고속도로 서울-신갈 기본구간을 중심으로

## Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow - Focused on Seoul-Singal Basic Sections of GyeongBu Freeway -

<b>박인선*</b> (In-seon Park) (Hongik Univ.)	<b>이종덕**</b> (Jong-deok Lee) (The Korea Transport Institute)	<b>이재용***</b> (Jae-yong Lee) (The Korea Transport Institute)	<b>황기연****</b> (Kee-yeon Hwang) (Hongik Univ.)
---	--	--	--

· Corresponding author : Kee-yeon Hwang (Hongik University), hwangkeeyeon@gmail.com

### 요약

최근 활발히 개발되고 있는 자율주행차량은 현대사회의 다양한 교통문제를 해결하기 위한 근본적인 대안으로 주목 받고 있으며, 그 효과를 예측하기 위한 연구 또한 지속적으로 진행되어왔다. 하지만 기존연구는 주로 가상의 도로를 대상으로 하여 현 도로교통시스템에 가져올 다양한 편익에 대한 검토는 미비한 상태이다. 이에 본 연구는 자율주행차량 테스트베드 구축 예정구간인 경부고속도로 서울-신갈 기본구간을 대상으로, 자율주행차량 도입에 따른 속도 및 밀도 등 다양한 교통류의 변화를 분석하였다. 분석 결과, 교통량이 적은 서비스수준 A, B 상황에서는 자율주행차량 혼입이 교통류에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 교통량이 많아지는 서비스수준 C 이상의 상황에서는 자율주행차량 도입에 따라 평균속도가 증가하고 밀도가 감소하여 교통류에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이에 따라, 자율주행차량 도입이 교통혼잡 등 다양한 교통문제를 효과적으로 해결할 수 있을 것이라 기대된다.

핵심어 : 자율주행차량, 교통류, 고속도로 기본구간, 행위자기반모형, 넷로고

### ABSTRACT

These days Automated Vehicle(AV) has been receiving attention as a fundamental solution to resolve the various transportation problems and various researches related to the benefits of AV have been done. However, previous researches mainly analyzed the effects in the virtual network. The purpose of this research is to predict and to find out the benefits by introducing the Automated Vehicle to present road traffic system. Thus, the study analyzes the traffic-flow changes of Gyeongbu freeway Seoul-Singal basic section which is planned for setting the test-bed. The results show that Automated Vehicle can have negative effects on the traffic-flow in low volume of LOS A and B. However, the average speed increases and the traffic density decreases in more than LOS C, the traffic volume increase. Therefore, the introduction of Automated Vehicle achieves positive effect on various transportation problems such as the traffic congestion.

**Key words** : Automated Vehicle, Traffic-flow, Freeway, Agent-Based-Model, NetLogo

† 본 연구는 2013년도 홍익대학교 학술연구진흥비의 지원을 받아 수행하였습니다.

\* 주저자 : 홍익대학교 도시계획과 석사과정

\*\* 공저자 : 한국교통연구원 국정교통연구본부 교통기술연구그룹 Post-Doc

\*\*\* 공저자 : 한국교통연구원 도로교통본부 전문연구원

\*\*\*\* 공저자 및 교신저자 : 홍익대학교 도시공학과 교수

† Received 30 October 2015; reviewed 1 December 2015; Accepted 15 December 2015

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 목적

자동차는 도시가 점차 광역화되는 현대사회에서 가장 대표적이고 편리한 통행수단이 되었으며, 이에 따라 자동차 등록대수도 꾸준히 증가해 왔다. 그러나 도로교통수요의 증가와 통행의 광역화는 교통혼잡 가중이라는 부정적인 결과를 초래했다. 2012년 기준 국내 도로교통혼잡비용은 30조3천억 원으로, 교통 혼잡이 국가 경제활동에도 큰 영향을 미치고 있으며 현대사회에서 심각한 사회문제로 대두되고 있다.

최근 다양한 교통문제를 근본적으로 해결할 수 있는 대안으로 자율주행차량이 주목받고 있다. 세계 각국에서는 자율주행차량과 V2I, V2X 기술이 개발 중이며 향후에는 이 기술들이 실용화되어 교통류에 다양한 영향을 미칠 것으로 예상하고 있다. 즉, 다양한 자율주행기술이 차간간격 최소화 및 교통류 안정성 유지 등을 실현화하여 교통흐름에 긍정적인 효과를 미칠 것이라 기대된다.

이와 더불어 국내에서도 '2020년 부분 자율주행차량 상용화'를 목표로 자율주행차량과 관련된 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 자율주행차량의 대중화 시대가 점차 현실로 다가오고 있다. 특히, 2017년까지 서울~신갈~호법을 잇는 고속도로를 자율주행차량 테스트베드로 구축하여, 자율주행차량 상용화를 위한 시험주행을 진행할 계획에 있다[1]. 이러한 측면에서 볼 때, 자율주행차량 도입이 현 도로교통시스템에 가져올 다양한 편의에 대한 예측 및 검토가 필요한 시기가 판단된다.

이에 본 연구는 자율주행차량의 테스트베드 구축예정 구간의 일부인 경부고속도로 서울TG-신갈JC 기본구간을 대상으로 자율주행차량의 단계적 보급상황에 따른 교통류의 변화를 예측 및 검토하고자 한다. 또한, 본 연구를 통하여 장래 보급이 확산될 자율주행차량이 고속도로 교통흐름에 미치는 영향 정도를 파악하여 향후 테스트베드 구축을 위한

기초자료로 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 실제 자율주행차량 시험주행이 이루어질 경부고속도로 서울TG-신갈JC 구간을 연구대상으로 선정하였으며, 합류 및 분류, 엇갈림으로 인한 영향을 받지 않는 구간 즉, 고속도로 가·감속차로가 없는 구간인 기본구간을 공간적 범위로 설정하여 자율주행차량이 고속도로 교통류에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 시각적 범위는 2014년 4월 둘째 주 주말이며, 분석을 위한 교통자료는 서울TG-신갈JC 기본구간에 설치된 차량검지기(VDS : Vehicle Detection System) 및 자동 차종분류조사 장비(AVC : Automatic Vehicle Classification)를 통해 수집된 1시간 간격의 자료를 활용하였다.

본 연구는 크게 자율주행차량 및 분석방법론에 관한 이론적 고찰, 분석 방법론 구축, 자율주행차량 도입에 따른 고속도로 기본구간의 효과분석 순으로 진행된다.

첫 번째로, 자율주행차량의 정의 및 기술동향을 살펴보고 자율주행차량 도입에 따른 효과분석과 관련된 연구 동향을 파악하였다. 이와 더불어 본 연구의 이론적 기반인 행위자기반모형에 관한 선행연구 검토를 통하여 구체적인 분석방법 및 내용에 관하여 고찰하였다.

두 번째로, 연구대상구간을 설정하고 평가지표를 선정하였으며, 본 연구에서 적용할 자율주행차량의 특성 및 차량에 적용할 모형을 결정하였다. 이를 바탕으로 행위자기반모형을 활용한 미시적 시뮬레이션 환경을 구축하였으며, 시뮬레이션 구축을 위하여 NetLogo 5.2.0을 활용하였다.

마지막으로 교통량을 기준으로 시나리오를 구분하여 자율주행차량의 혼입율에 따른 속도 및 밀도의 교통류 변화를 분석하였다.

이에 따라 본 연구는 자율주행차량 도입에 따른 고속도로 기본구간의 교통류 특성변화를 분석하고 결과를 도출하였다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 자율주행차량(Automated Vehicle)

#### 1) 자율주행차량(AV) 정의

자율주행 자동차는 운전자 또는 승객의 조작 없이 자동차 스스로 운행이 가능한 자동차를 의미한다(자동차관리법 2015.08.11. 개정).

자율주행 자동차의 기술은 예방안전기술, 사고회피기술, 그리고 편의성 향상 기술 등 매우 다양하다 [2]. 이러한 기술을 바탕으로 미국 도로교통안전국(NHTSA)에서는 자율주행 자동차를 기술수준과 운전자의 발(가·감속), 손(조향), 눈(전방주시)의 사용 유무에 따라 총 5단계로 구분하고 가이드라인을 발표하였으며, 다음 <표 1>과 같다[3].

#### 2) 자율주행차량 도입효과에 관한 연구

최근 자율주행차량의 기술 개발과 함께 그 효과를 예측하기 위한 연구 또한 지속적으로 진행되어 왔다. 자율주행차량의 도입효과 분석에 관한 국내외 연구는 자율주행차량 도입에 따른 교통류 변화와 관련된 연구가 주를 이루었다.

Vanderwerf et al.(2003)은 1차선 연속류를 대상으로 자율주행차량 도입에 따른 용량 변화를 분석하였다. 시뮬레이션 환경은 1.6km의 1차선 연속류로 500m의 합류부 및 200m의 분류부가 있는 환경으로 설정하였다. 자율주행차량은 ACC(Adaptive Cruise

Control) 시스템이 적용된 경우와 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control) 시스템이 적용된 경우 두 가지 시나리오로 나누어, 연속류의 용량 변화를 분석하였다. 연구 결과에 따르면, ACC 시스템이 적용된 자율주행차량은 혼입을 40% 이하에서 용량증대 효과가 있으며, CACC 시스템이 적용된 자율주행차량의 경우 혼입율이 높아질수록 용량증대효과가 큰 것으로 나타났다[4].

Kesting et al.(2008)은 3차선 연속류를 대상으로, 자율주행차량 도입에 따른 통행속도 및 통행시간 변화를 분석하였다. 시뮬레이션 환경은 10km의 3차선 연속류로 1개의 합류부가 존재하며, 차종은 승용차, 화물차, 자율주행차량 3가지로 구분하였다. 자율주행차량은 ACC 시스템이 적용된 것으로 가정하였으며, 0~25%의 혼입율에 따른 합류구간의 통행속도, 통행시간을 분석하였다. 분석결과, 자율주행차량 혼입율이 높아질수록 통행속도가 증가하며 통행시간이 감소하는 것으로 나타났다[5].

Ma(2012)는 1차선 연속류를 대상으로, 자율주행차량 도입에 따른 전체교통류의 속도변화를 행위자 기반모형을 활용하여 분석하였다. 모든 차량이 자율주행차량으로 전환된다고 가정하였으며, 자율주행차량 도입 전·후의 속도를 비교분석하였다. 자율주행차량의 기능으로 CACC 시스템을 적용하였으며 분석결과, 자율주행차량 도입으로 전체 교통류의 속도가 증가하는 것으로 분석되었다[6].

Arnaout et al.(2014)는 4차선 연속류를 대상으로 자율주행차량 도입에 따른 평균통행속도 변화를 분

<표 1> 미국 도로교통안전국(NHTSA)의 자율주행 단계 정의(3)

<Table 1> NHTSA levels of vehicle automation(3)

Level	Definition	Description	Whether or not to use		
0	No-Automation	· The human driver is in complete control of all functions of the car			
1	Function-Specific Automation	· One functions is automated		or	
2	Combined Function Automation	· More than one function is automated at the same time, but the driver remains attentive			
3	Limited Self-Driving Automation	· Driving functions are sufficiently automated - the driver can safely engage in other activities			
4	Full Self-Driving Automation	· The car is self-driving - no human driver required			

석하였다. 시뮬레이션 환경으로는 4차선 트렉 구조의 연속류로 총 연장은 6km로 설정하였다. 차종을 승용차와 화물차, 자율주행차량으로 구분하였다. 또한, 자율주행차량의 기능으로 CACC 시스템을 적용하였으며 교통량 및 혼입율에 따른 전체교통류의 평균속도의 변화를 분석하였다. 분석결과, 자율주행차량 혼입율이 증가할수록 평균속도가 증가하였으며 그 효과는 교통량이 많은 상황에서 더욱 큰 것으로 분석되었다[7].

J. D. Lee. et al.(2015)는 혼잡상태의 2차선 연속류 도로를 대상으로, 자율주행차량 혼입율에 따른 혼잡완화효과를 행위자기반모형을 활용하여 분석하였다. 자율주행차량의 기능으로 ACC 시스템을 적용하였으며, 혼잡상태의 도로에 혼재될 경우 전체 교통류 속도가 개선되는 것으로 나타났다[8].

## 2. 행위자기반모형(Agent-Based Model)

### 1) 행위자기반모형(ABM) 정의

행위자기반모형은 미시적 행위자의 특성에서 출발하여, 시뮬레이션을 통해 거시적 현상을 끌어내는 모형이다. 즉, 행위자들의 의사결정 규칙 등의 미시적 특성을 통해 공간패턴 및 질서와 같은 거시적 행동을 얻을 수 있다[9]. 주로 복잡계(complex system)를 구현하고 특정 현상을 분석하기 위한 도구로 사용되며 도시 시뮬레이션, 교통 흐름 등의 사회적 시뮬레이션에 많이 활용되고 있다[10].

NetLogo는 행위자기반모형을 구현할 수 있는 시뮬레이션 도구로 1999년 미국 노스웨스턴 대학에서 개발한 언어기반의 프로그램이다. NetLogo는 시간에 따라 발생하는 복잡한 현상들을 모델링하는데 최적화되어 있으며, 자연 및 사회과학의 다양한 분야에서 응용할 수 있다. 다른 행위자기반모형 시뮬레이션 도구에 비해 상대적으로 프로그래밍이 쉬워 컴퓨터언어전공이 아닌 일반 연구자들도 쉽게 사용 가능하다는 장점이 있다[11].

### 2) 행위자기반모형에 관한 연구

행위자기반모형에 관한 다수의 선행연구에서는

모형의 방법론에 대해 설명하고 있으며 다양한 분야에서의 활용가능성에 대해 제시하고 있다. 특히, 교통 분야에서도 행위자기반모형을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

J. H. Lee et al.(2003)는 오늘날의 교통시스템은 하부시스템의 다양화와 상호작용에 따른 하나의 복잡계(complex system) 형태로 볼 수 있으며, 다양한 교통문제 대처에 있어 전통적인 상의하달(top-down) 접근에 한계가 있다고 보았다. 따라서 시스템의 개별 구성원을 하나의 행위자로 보고, 행위자간 상호작용에 따른 변화에 초점을 두는 하의상달(bottom-up) 방식의 행위자기반의 접근이 필요하다고 밝혔다[12].

Lansdowne(2006)는 고속도로 교통시스템을 복잡계로 설정하고, HOV(High Occupancy Vehicle) 차로 도입에 따른 효과분석을 시행하였다. 개별 운전자와 도로시스템을 행위자로 설정하여 HOV차로 유무에 따른 평균통행시간을 분석하였다. 그 결과, HOV차로 도입 후 전체 교통류의 평균통행시간이 감소하여 HOV차로 도입 효과가 긍정적인 것으로 분석되었다[13].

Arnaout(2010)은 혼잡상황의 255m 단일차로 연속류에 지능형차량 1대 도입으로 인한 속도개선 효과를 분석하였다. 이 연구에서는 혼잡상황의 도로시스템을 하나의 복잡계로 가정하고 운전자 및 지능형차량을 행위자로 설정하였으며, 행위자간 상호작용 결과로 전체 교통류의 속도변화를 분석하였다. 분석 결과, 지능형차량 1대만으로도 전체 교통류의 평균속도가 증가하는 것으로 나타났다[14].

Mitra(2013)는 ACC 기술이 적용된 차량 도입에 따른 효과를 행위자기반모형을 활용하여 분석하였다. 이 연구에서는 다차로 교차로를 복잡계로 설정하고, ACC 기술이 적용된 차량을 행위자로 설정하였으며, 교차로에서의 대기시간 및 속도 개선효과를 분석하였다[15].

I. J. Lim et al.(2015)는 2차선 연속류 교통시스템을 복잡계로 설정하고, 초소형·초경량 개인교통수단(Personal Mobility) 도입에 따른 운행효과 분석을 위하여 행위자기반모형을 활용하였다. 일반 운전자

와 PM을 행위자로 설정하여, PM 혼입율에 따른 속도개선 효과를 확인하였다[16].

### 3) 기존연구와의 차별성

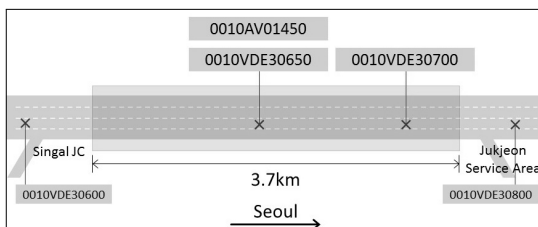
선행연구 검토 결과, 자율주행차량의 도입에 따른 효과분석이 활발히 진행되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 기존 연구에서는 주로 가상의 네트워크에서 분석이 시행되어 보다 현실적인 분석을 위해 실제 네트워크와 실제 교통량 및 속도 자료를 반영할 필요가 있다고 판단되었다. 또한, ACC 또는 CACC 시스템 외에 교통류에 영향을 미칠 수 있는 자율주행차량의 기술을 반영한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이라 판단하였다. 마지막으로, 행위자기반모형을 활용한 다양한 교통관련 시뮬레이션 연구가 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구는 자율주행차량 테스트베드 구축 예정구간인 경부고속도로를 연구대상으로 설정하여, 자율주행차량 도입으로 인한 고속도로 교통류 영향을 분석하고자 하였다. 자율주행차량은 CACC 시스템과 군집주행(Platooning), 차선 유지 보조시스템을 결합한 2단계로 설정하였다. 또한, 분석방법론으로 행위자기반모형을 활용하여 고속도로 교통시스템을 하나의 복잡계로 보고 승용차 및 화물차, 그리고 다양한 자율주행 기술이 적용된 자율주행차량을 행위자로 설정하여 연구를 진행하였다.

## III. 연구방법론

### 1. 분석의 개요

#### 1) 분석구간



<그림 1> 분석구간  
<Fig. 1> Study Area

<표 2> 분석구간 정보  
<Table 2> Information of study area

Contents		Description
Study Area	Length	3.7km
	# of lane	4-lane (except bus-only lane)
	Operating hour of bus-only lane	a.m. 7:00 ~ p.m. 8:00
	Speed limit	car : 110km/h other vehicles <sup>1)</sup> : 90km/h
Data	VDS	traffic volume & speed
	AVC	traffic volume of vehicle type

1) trucks exceeding 1.5t, special vehicles, vehicles carrying dangerous goods and construction machinery

본 연구는 자율주행차량 테스트베드 예정구간인 경부고속도로 서울TG-신갈JC 상행선 기본구간을 분석구간으로 설정하였으며, 버스전용차로를 제외한 일반차로 4차선으로 한정하였다. 분석기간은 강우 및 사고로 인한 영향이 없었던 2014년 4월 둘째 주 주말 버스전용차로 운영시간으로 설정하였으며 이와 관련된 내용은 <그림 1>와 <표 2>와 같다.

### 2) 자료수집 및 가공

본 연구에서는 <그림 1> 분석구간 내에 설치된 검지기 중, 동일한 지점에 위치한 교통량과 차종분류 조사를 동시에 실시하는 자동 차종분류 조사 장비(AVC)와 교통량과 속도를 수집하는 차량검지기(VDS) 자료를 사용하였다. 즉, 한국도로공사가 제공하는 1시간 단위의 지점 교통량, 지점 속도, 차종별 교통량 자료를 이용하였다.

본 연구는 버스전용차로를 제외한 일반차로를 분석구간으로 설정하였기 때문에, 시뮬레이션 구축을 위해 필요한 일반차로의 차종별 교통량 및 속도 자료를 얻기 위하여, 자동 차종분류 조사 장비(AVC) 교통량자료의 12종 차종별 비율을 차량검지기(VDS) 일반차로 교통량 및 속도 자료에 반영하여 최종적으로 ‘차종별 교통량 및 속도’ 자료로 가공하였다. 따라서 본 연구에서는 가공된 차량검지기(VDS)의 1시간 단위 ‘차종별 교통량 및 속도’ 자료를 분석 자료로 활용하였다.

### 3) 평가지표

고속도로 기본구간의 서비스수준을 나타내는 효과적도는 <표 3>과 같이 밀도와 교통량 대 용량비 (V/c)를 사용한다. 밀도는 특정 시각, 단위 구간에 들어있는 차량의 대수를 말하며 고속도로 서비스수준을 나타내는 주 효과적도로 사용된다. 교통량 대 용량비는 통과 교통량 대 용량의 비를 말하며, 해당 시설을 이용하는 교통류의 상태를 설명해주는 효과적도이다[17].

본 연구에서는 경부고속도로의 설계속도 120kph를 기준으로, 자율주행차량 도입에 따른 교통류 영향을 분석하기 위한 척도로 ‘시간당 통과교통량’, ‘시간 및 공간평균속도’, ‘밀도’를 선정하여 비교분석하였다.

## 2. 분석의 방법

### 1) 본 연구의 자율주행차량 특성

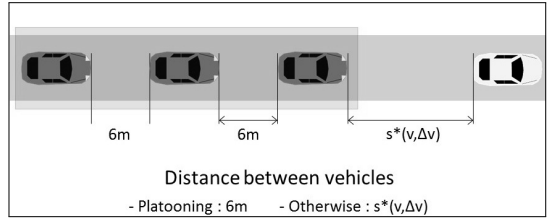
자율주행차량은 II. 이론적 고찰에서 살펴보았듯 다양한 기술이 적용될 것으로 예상되나, 본 연구에서는 반응시간지체 및 가·감속변화와 같은 운전자의 주행오류를 해결하여 실제 고속도로 기본구간 교통흐름에 큰 영향을 미칠 것이라 판단되는 핵심 기술만을 적용하였다.

- CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)

CACC는 차량 간 통신(V2V)과 차량 센서를 융합한 형태의 기술을 의미하며, CACC가 가능함에 따라 전방의 한 차량뿐만 아니라 전방의 교통류에 대

<표 3> 고속도로 기본구간의 서비스수준  
<Table 3> LOS of freeway basic section

LOS	Density (pcpkmpl)	Design speed 120kph	
		Traffic volume(pcp/hpl)	V/c
A	≤ 6	≤ 700	≤ 0.30
B	≤ 10	≤ 1,150	≤ 0.50
C	≤ 14	≤ 1,500	≤ 0.65
D	≤ 18	≤ 1,900	≤ 0.83
E	≤ 28	≤ 2,300	≤ 1.00
F	> 28	-	-



<그림 2> 군집주행 전략  
<Fig. 2> Platooning strategy

한 정보 습득을 통해 적합한 감·가속이 가능해진다 [17]. 본 연구에서는 CACC 시스템이 적용된 자율주행차량이 선행차량과 0.5초의 시간차(time-gap)를 유지하면서 주행하도록 설정하였다[4, 18].

- 군집주행(Platooning)

군집주행은 CACC 시스템을 통해 두 대 이상의 차량 간격을 일정하게 제어하면서 하나의 군집 형태로 주행하는 방식을 말한다[19]. 본 연구에서는 군집주행 시 다음 <그림 2>과 같이 6m의 차간 간격을 유지하며 주행하도록 설정하였다.

자율주행차량의 CACC 시스템 및 군집주행은 센서 기반의 ACC 시스템보다 교통류 안정성 및 효율성 측면에서 우수할 것으로 기대된다. 특히, 차간간격을 효과적으로 줄여주어 용량을 증가시킬 수 있을 것이다. 이 외에도 차선 유지 보조시스템을 적용하여 본 연구의 자율주행차량을 두 개 이상의 제어 기능이 복합된 2단계로 설정하였다.

### 2) 차량행태모형

본 연구에서는 일반 운전자와 ACC 기술이 장착된 자율주행차량 모두에게 적용할 수 있도록 고안된 차량추종모형(Intelligent Driver Model, IDM)을 적용하였다[20, 21]. 이 모형(IDM)은 안정적인 가·감속을 통해 개별 차량이 앞차와 최소 안전거리를 유지하면서 최고속도( $v_0$ )에 도달할 수 있도록 고안되었으며, 단일차로에 적용 가능한 모형이다. 개별 차량의 가·감속( $\dot{v}$ )은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\dot{v}(s, v, \Delta v) = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^4 - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

- 여기서,  $\dot{v}$ : 가·감속도(m/s<sup>2</sup>)
- $v_0$ : 최고속도(km/h)
- $a$ : 차량의 최대 가속도(m/s<sup>2</sup>)
- $v$ : 주행속도(km/h)
- $s^*(v, \Delta v)$ : 선행차량과의 최소안전거리(m)
- $s$ : 선행차량과의 차간거리(m)

본 연구에서는 최고속도( $v_0$ )를 해당 도로의 제한속도로 설정하였으며, 최소 안전거리( $s^*(v, \Delta v)$ )에 정지시거를 적용하였다.

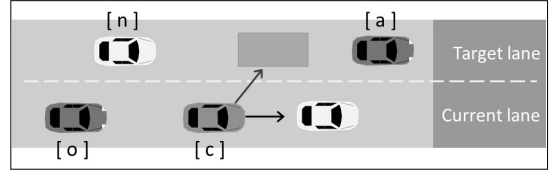
정지시거(D)는 운전자가 같은 차로 상에 있는 장애물 또는 위험요소를 알아차리고 제동을 걸어서 안전하게 정지하거나, 장애물을 피해서 주행하기 위하여 필요한 길이를 의미한다[22]. 이는 기준차량의 주행속도( $v$ )와 선행차량의 주행속도( $v_a$ ) 및 반응시간( $t$ )에 따라 결정되며, 식(2)와 같이 표현된다.

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

- 여기서,  $D$ : 정지시거(m)
- $t$ : 반응시간(sec)
- $v$ : 기준차량의 주행속도(km/h)
- $v_a$ : 선행차량의 주행속도(km/h)
- $g$ : 중력가속도(9.8m/sec<sup>2</sup>)
- $f$ : 노면과 타이어 간의 종방향 미끄럼마찰계수

본 연구에서는 차량추종모형(IDM)과 함께 적용할 수 있도록 고안된 차선변경모형(Minimizing Overall Braking Induced by Lane change, MOBIL)을 적용하였다[23]. 운전자와 자율주행차량은 안전기준과 효용기준을 모두 만족하는 경우 차선을 변경하며, 본 연구에서는 안전기준에 한 가지 조건을 추가 적용하였다.

차선변경 시 기준차량(c)은 현재 차선의 후행차량(o), 그리고 변경하고자하는 목표차선의 선행차량



<그림 3> 차선변경을 위한 차량 관계도  
<Fig. 3> Vehicle relations for lane-changing

(a) 및 후행차량(n)을 고려해야하며, 차량들의 관계는 <그림 3>와 같다.

안전기준은 목표차선의 후행차량의 차선변경으로 인한 급격한 감속을 막기 위한 기준이다. 즉, 목표차선 후행차량의 감속도( $\tilde{a}_n$ )가 임계감속도( $-b_{safe}$ )를 넘지 않아야 하는 것으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\tilde{a}_n \geq -b_{safe} \quad (3)$$

- 여기서,  $\tilde{a}_n$ : 차선변경 후, 목표차선 후행차량(n)의 감속도(m/s<sup>2</sup>)
- $-b_{safe}$ : 임계감속도(-1.5m/s<sup>2</sup>)

본 연구에서는 안전기준에 안전거리확보 조건을 추가하였다. 이 안전거리는 차선변경으로 인한 목표차선 차량과의 충돌을 막기 위한 거리로, 목표차선의 후행차량(n)과 기준차량(c) 각각의 최소정지시거(D)로 산정된다. 이는 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$\tilde{s}_n \geq \tilde{D}_n \quad \text{and} \quad \tilde{s}_c \geq \tilde{D}_c \quad (4)$$

- 여기서,  $\tilde{s}_n$ : 차선변경 후, 목표차선 후행차량(n)과 기준차량(c)간의 차간거리(m)
- $\tilde{D}_n$ : 차선변경 후 목표차선 후행차량(n)의 최소정지시거(m)
- $\tilde{s}_c$ : 차선변경 후 목표차선 선행차량(a)과 기준차량(c)간의 차간거리(m)
- $\tilde{D}_c$ : 차선변경 후 기준차량(c)의 최소정지시거(m)

효용 기준은 차선변경으로 인한 효용을 계산하여 차선변경 여부를 판단하는 기준이다. 본 모형(MOBIL)은 기존 차선변경모형과 달리 개별 차량의 속도개선뿐만 아니라 주변 차량에 미치는 영향을 함께 고려하여 차선변경을 결정한다. 효용은 기준차량(c), 현 차선의 후행차량(o), 그리고 목표차선의 후행차량(m)의 가속도 변화를 통해 잠재적인 속도 증가/감소를 비교하여 평가하며, 이를 식으로 나타내면 식(5)와 같이 표현된다.

$$\tilde{a}_c - a_c + p(\tilde{a}_n - a_n + \tilde{a}_o - a_o) > \Delta a_{th} \quad (5)$$

여기서,  $a_c$ : 기준차량(c)의 가속도( $m/s^2$ )

$a_n$ : 목표차선 후행차량(n)의 가속도( $m/s^2$ )

$a_o$ : 현 차선 후행차량(o)의 가속도( $m/s^2$ )

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

$\tilde{a}_n$ : 차선변경 후, 목표차선 후행차량(n)의 가속도( $m/s^2$ )

$\tilde{a}_o$ : 차선변경 후, 기존 차선 후행차량(o)의 가속도( $m/s^2$ )

$p$ : 주변차량 고려 지표(0~1)

$\Delta a_{th}$ : 효용판단 임계값(0~1 $m/s^2$ )

주변차량 고려지수( $p$ )는 값이 작을수록 주변차량의 고려 없이 개별차량 자신만을 고려하는 것을 의미하며, 효용판단 임계값( $\Delta a_{th}$ )은 값이 작을수록 적

〈표 5〉 차량 속성변수

〈Table 5〉 Variables of vehicles

Variables	Description	Variable values by vehicle type			
		Car	Small Truck	Heavy Truck	Automated Vehicle
$v_a$	Desired speed(km/h)	110 + 10	90 + 5	90 + 5	110
$a$	Maximum acceleration( $m/s^2$ )	2.2 ± 0.1	1.8 ± 0.1	1.6 ± 0.1	2.2 ± 0.1
$t$	Response time(sec)	1.4 ± 0.15	1.7 ± 0.15	2.0 ± 0.15	0.5
$f$	Road-tire coefficient of sliding friction	0.8	0.68	0.6	0.8
$platoon$	Platoon Spacing(m)	-	-	-	6
$-b_{safe}$	safe deceleration threshold value( $m/s^2$ )	-1.5			
$p$	Politeness index	1			
$\Delta a_{th}$	Lane change utility threshold value( $m/s^2$ )	0.5			

은 효용에도 차선을 변경하는 것을 의미한다.

운전자와 자율주행차량은 위의 안전기준 및 효용기준을 지속적으로 평가하며 모든 조건을 만족할 때 차선을 변경한다.

### 3) 행위자기반모형기반 시뮬레이션 구축

본 연구는 각 차량을 행위자로 설정하였으며, 행위자에 대한 속성부여 및 미시적 시뮬레이션 분석이 가능한 행위자기반모형 시뮬레이션 구축을 위해 NetLogo 5.2.0을 시뮬레이션 도구로 선정하였다.

본 연구에서는 분석구간인 경부고속도로 서울 TG-신갈JC 상행선 기본구간 약 3.7km의 도로를 구축하였다. 또한, 버스운영차로를 제외한 편도 4차선으로 구성하였다. 기타 분석구간의 시뮬레이션 환경과 관련된 내용은 다음 <표 4>와 같다.

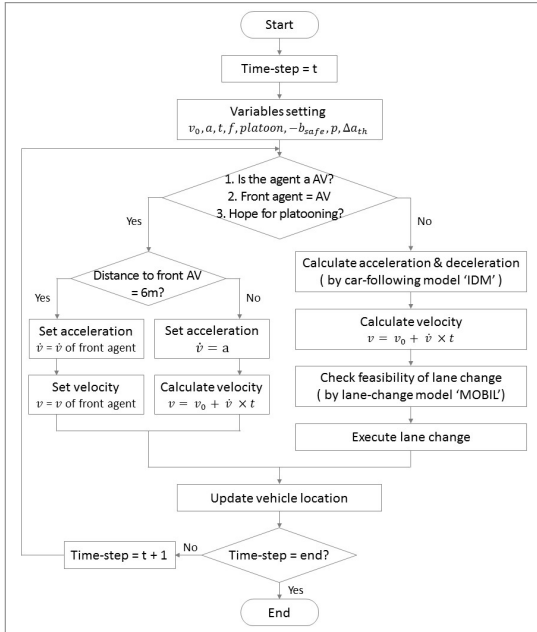
〈표 4〉 시뮬레이션 환경

〈Table 4〉 Simulation environment

Contents	Description
Length	3.7km
# of Lanes	4-lane (except bus-only lane)
Lane width	more than 3.5m
Lateral margin	more than 1.5m
Slope	under 2% (flat)

차량 유형은 승용차, 소형화물차, 중대형화물차, 자율주행차량 총 4가지로 구성하였으며, 자율주행차량은 승용차에만 적용되어 혼입율에 따라 승용차





〈그림 4〉 행위자간 의사결정 알고리즘  
 〈Fig. 4〉 Decision making algorithm of agents

를 대체하는 형태로 공급된다. 시뮬레이션 입력자료인 각 차량의 속성변수들은 <표 5>와 같다. 차량의 최고속도( $v_0$ )는 경부고속도로의 제한속도를 기준으로, 현실 교통류 상황을 반영하기 위하여 5~10km/h의 차등을 두었으며, 자율주행차량의 경우 제한속도를 넘지 않도록 설정하였다. 차량의 최대가속도( $a$ )의 경우, 국내 자동차 전문지 MOTOR에서 수행한 승용차의 4종의 가속성능 실험을 통해 도출된 평균 추밀가속성능  $2.2m/s^2$ 을 기준으로 하였으며, 화물차의 경우 토크 및 무게를 고려하여 재산정하였다[24]. 또한, 반응시간( $t$ )은 국내 도로용량편

〈표 6〉 시나리오 구성표  
 〈Table 6〉 Scenario setting

Contents	Date_time	Traffic volume (pcphpl)	Speed (kph)	LOS	Ratio of Vehicles(%)			
					Car	Small Truck	Heavy Truck	Automated Vehicle <sup>1)</sup>
Scenario1	April 6_7a.m.	572	108.5	A	66	33	1	0%, 25%, 50%, 100%
Scenario2	April 6_8a.m.	873	102.4	B	67	32	1	
Scenario3	April 6_9a.m.	1195	91.9	C	68	31	1	
Scenario4	April 12_6p.m.	1461	88.7	D	69	30	1	
Scenario5	April 12_4p.m.	1665	80.8	E	70	29	1	

1) Cars are replaced with Automated Vehicles in accordance with the ratio of Automated Vehicles.

람 기준인 2.5초가 다소 과대 설정되었다고 판단하여, 운전자 반응시간과 관련한 다수의 국내외 연구를 통해 약 1.4초 내외로 적용하였다[25-30]. 자율주행차량의 경우, CACC 기술을 통한 시간차(time-gap) 0.5초를 반영하였다. 노면과 타이어간 종방향 미끄럼마찰계수( $f$ )는 본 연구의 범위가 맑은 날 건조한 아스팔트 도로인 점을 고려하여 0.8로 적용하였으며, 화물차의 경우 경찰청 업무처리지침에 따라 일반 승용차의 마찰계수의 75~85%인 0.68~0.6을 적용하였다[31]. 그 외의 변수는 차선변경모형(MOBIL)에서 제시한 값을 적용하였다.

각 행위자들은 다음 <그림 4>의 알고리즘에 따른 의사결정을 토대로 움직이도록 설정하였다.

이를 토대로 구축된 시뮬레이션은 실증 자료와/의 매칭작업을 통한 정산(Calibration) 및 검증(Validation)을 수행하였다.

각 시나리오는 총 1시간 10분 동안 이루어지며 결과분석은 초기 10분을 제외한 1시간을 대상으로 하였다. 또한, 결과의 신뢰도를 높이기 위해 각 시나리오를 20회 반복 수행하여 평균값을 사용하였다.

#### 4) 분석 시나리오 구성

각 시나리오는 <표 6>과 같이 교통량에 따라 구분되며, 본 연구의 분석구간의 차량검지기(VDS) 자료 중 2014년 4월 둘째주 주말 오전 7시~오후 8시 교통량 중 서비스수준 A~E에 해당하는 교통량 5개를 선정하였다. 속도의 경우 차량검지기(VDS)의 지점 속도를 의미하며, 차량 유형의 구성비는 자동차종분류 조사 장비(AVC)의 차종별 비율을 적용하였

다. 또한, 자율주행차량 혼입율은 0~100%로 25%씩 차등을 두었다.

#### IV. 분석결과

##### 1. 시나리오 분석

자율주행차량 도입으로 인한 고속도로 기본구간 교통류 영향을 분석하기 위해 교통량에 따라 구분된 각 시나리오별로 자율주행차량 혼입율에 따른 ‘시간 및 공간평균속도’, ‘밀도’를 도출하였다.

###### 1) 시나리오 1 분석결과

시나리오 1은 서비스수준 A에 해당하는 교통량이 가장 적은 상황에서, 자율주행차량 도입에 따른 교통류 영향을 분석하였으며, 도출된 결과 값은 <표 7>과 같다.

분석결과, 자율주행차량 도입으로 인해 소형화물차와 중·대형화물차의 속도가 미세하게 증가하는 것으로 나타난 반면 승용차와 전체 시간평균속도(TMS)가 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 시간평균속도(TMS)는 승용차가 자율주행차량으로 100% 전환된 후 자율주행차량 도입 이전보다 약 3.6% 감소하였다. 서비스수준 A의 완전한 자유 통행 상태에서 다수의 승용차의 경우 제한속도 110km/h를 넘는 높은 속도로 주행한다. 이에 따라, 제한속도를 준수하는 자율주행차량이 도입됨으로 인해 전체 시

<표 7> 시나리오 1 분석결과  
<Table 7> Results of scenario 1

Contents	Ratio of AV					
	0%	25%	50%	75%	100%	
Time Mean Speed(km/h)	Car	115.3	114.5	113.6	112.2	-
	Small Truck	93.2	93.4	93.5	93.7	93.7
	Heavy Truck	92.8	93.1	93.3	93.0	93.4
	AV	-	107.8	108.1	108.6	108.9
	Mean	107.6	106.6	105.1	104.0	103.7
Space Mean Speed (km/h)	106.4	105.6	104.2	103.4	103.2	
Density(pcpkmp)	5.4	5.4	5.5	5.5	5.6	
Flow(pcppl)	571	572	572	572	572	

간평균속도(TMS)가 감소한 것이라 판단된다. 공간평균속도(SMS)는 일정시간동안 도로의 한 구간을 주행하는 차량들의 평균속도로 시간평균속도(TMS)와 동일한 경향을 보였다.

밀도(D)의 경우, 자율주행차량이 혼입됨에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났다. 승용차가 자율주행차량으로 완전히 전환된 후의 밀도는 자율주행차량 도입 이전보다 약 3.7% 증가한 5.6pcpkmp로 나타났다. 이는 교통류 모형에 따라, 교통량이 고정된 상태에서 공간평균속도(SMS)의 감소로 인한 것으로 판단된다. 또한, 고속도로 기본구간 서비스수준의 효과적도인 밀도 값이 증가하였으나 서비스수준 A를 유지하였다.

교통량이 적은 상황에서 자율주행차량의 도입에 따른 시간 및 공간평균속도와 밀도를 분석한 결과, 자율주행차량의 혼입율이 높아질수록 평가지표 값이 부정적으로 나타나는 것을 알 수 있다.

###### 2) 시나리오 2 분석결과

비교적 양호한 자유 통행 상태인 서비스수준 B의 상황에서, 자율주행차량 도입에 따른 교통류 영향을 분석한 결과 <표 8>과 같이 나타났다.

시나리오 2의 시간 및 공간평균속도, 밀도를 분석한 결과, 시나리오 1과 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 자율주행차량의 혼입율이 증가할수록 소형화물차와 중대형화물차의 속도가 증가하는 반면,

<표 8> 시나리오 2 분석결과  
<Table 8> Results of scenario 2

Contents	Ratio of AV					
	0%	25%	50%	75%	100%	
Time Mean Speed(km/h)	Car	110.0	109.3	108.9	108.8	-
	Small Truck	91.6	91.8	92.0	92.1	92.2
	Heavy Truck	90.9	91.0	91.3	91.1	92.1
	AV	-	106.0	107.0	107.3	107.6
	Mean	103.6	102.8	102.6	102.3	102.4
Space Mean Speed (km/h)	102.5	101.9	101.8	101.6	101.7	
Density(pcpkmp)	8.6	8.6	8.6	8.7	8.7	
Flow(pcppl)	879	878	880	879	878	

승용차와 전체 시간 및 공간평균속도는 감소하는 것으로 분석되었다.

밀도(D)의 경우에도 자율주행차량이 혼입될수록 공간평균속도(SMS)가 감소함에 따라 점차 증가하는 것으로 나타났지만, 증가폭이 적어 서비스수준 B를 유지하는 것으로 분석되었다.

시나리오 1과 마찬가지로 자율주행차량 도입에 따라 평가지표 값이 부정적으로 나타남을 알 수 있다. 다만, 시간 및 공간평균속도와 밀도의 변화폭이 1% 내외로 작게 나타난 것으로 보아, 자율주행차량 도입에 따른 영향이 비교적 적은 것으로 판단된다.

### 3) 시나리오 3 분석결과

시나리오 3은 운행 서비스 질이 떨어지기 시작하는 서비스수준 C의 상황에서의 자율주행차량 도입에 따른 교통류 영향을 분석하였으며, 도출된 결과 값은 <표 9>과 같이 나타났다.

분석결과, 앞의 두 시나리오와 달리 자율주행차량이 혼입됨에 따라 시간 및 공간평균속도가 증가하는 것으로 나타났다. 승용차의 약 25%가 자율주행차량으로 전환될 경우, 시간평균속도(TMS)가 약 1.5% 증가하였다. 또한, 자율주행차량의 혼입율이 100%에 도달할 경우 약 98.9km/h로 자율주행차량 도입 이전에 비해 약 7%의 속도 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 교통류가 점차 불안정 상태에 접어들기 시작하면서, 차간간격을 줄여주고 교

통 흐름의 안정성을 증대시켜주는 자율주행차량의 효과가 나타나기 시작하는 것으로 판단된다.

밀도(D)의 경우, 자율주행차량이 혼입될수록 점차 감소하는 것으로 나타났다. 자율주행차량이 혼입되기 이전 상황의 밀도(D)는 13.1pcpkmpl로 나타났으나 승용차의 절반이 자율주행차량으로 전환됨에 따라 약 3.1%가 감소하고, 자율주행차량의 혼입율이 100%에 이르면 약 6.1%까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 자율주행차량 도입에 따라 통행의 자유도가 증가하는 것으로 분석되었다.

비교적 교통량이 많은 시나리오 3의 분석결과, 자율주행차량 도입에 따라 밀도(D)가 감소함에 따라 운전자의 통행에 미치는 제한이 적어지고, 운행 서비스 질이 개선되는 것으로 분석되었다.

### 4) 시나리오 4 분석결과

통행 자유도가 상당히 제한되는 상황에서, 자율주행차량 도입에 따른 교통류 영향을 분석한 결과 다음 <표 10>과 같이 나타났다.

시나리오 4의 분석결과, 자율주행차량이 혼입율이 높아짐에 따라 시간 및 공간평균속도가 개선되었으며, 그 폭이 시나리오 3보다 크게 나타났다. 즉, 승용차의 약 25%가 자율주행차량으로 전환될 경우 시간평균속도(TMS)가 90.5km/h로 약 3.8% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 혼입율이 100%일 경우에는 시간평균속도(TMS)가 98.3km/h로 혼입 이전보

<표 9> 시나리오 3 분석결과  
<Table 9> Results of scenario 3

Contents		Ratio of AV				
		0%	25%	50%	75%	100%
Time Mean Speed(km/h)	Car	96.7	98.6	100.0	101.8	-
	Small Truck	83.4	84.4	85.4	85.6	85.5
	Heavy Truck	83.4	84.0	85.4	85.2	84.4
	AV	-	97.6	100.2	102.9	105.2
	Mean	92.4	93.8	95.5	97.2	98.9
Space Mean Speed (km/h)		91.5	92.9	94.5	96.0	97.5
Density(pcpkmp)		13.1	12.9	12.7	12.5	12.3
Flow(pcp/h)		1196	1195	1197	1196	1194

<표 10> 시나리오 4 분석결과  
<Table 10> Results of scenario 4

Contents		Ratio of AV				
		0%	25%	50%	75%	100%
Time Mean Speed(km/h)	Car	90.1	94.3	97.7	100.1	-
	Small Truck	80.8	81.8	83.3	84.1	83.6
	Heavy Truck	80.2	80.8	82.9	83.9	83.1
	AV	-	94.9	97.8	100.6	105.0
	Mean	87.2	90.5	93.2	95.4	98.3
Space Mean Speed (km/h)		86.7	89.7	92.3	94.3	96.8
Density(pcpkmp)		16.8	16.2	15.7	15.4	15.0
Flow(pcp/h)		1449	1448	1449	1451	1451

〈표 11〉 시나리오 5 분석결과  
 〈Table 11〉 Results of scenario 5

Contents		Ratio of AV				
		0%	25%	50%	75%	100%
Time Mean Speed(km/h)	Car	84.0	90.0	93.5	96.1	-
	Small Truck	74.1	77.5	80.5	82.7	80.8
	Heavy Truck	73.5	77.6	79.5	82.1	80.3
	AV	-	89.6	92.7	96.1	102.8
	Mean	81.0	86.2	89.3	92.1	96.0
Space Mean Speed (km/h)		80.4	85.2	88.2	90.9	94.1
Density(pcpkmpl)		20.5	19.4	18.8	18.1	17.6
Flow(pcpkphl)		1650	1649	1650	1647	1652

다 약 12.7%가 증가하는 것으로 분석되었다.

밀도(D)의 경우에도 자율주행차량이 혼입됨에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 승용차가 자율주행차량으로 완전히 전환된 후의 밀도는 자율주행차량 도입 이전보다 약 10.7% 감소한 15.0pcpkmpl로 나타났다.

자율주행차량 도입에 따라 평가지표인 시간 및 공간평균속도와 밀도 값이 긍정적으로 나타났으며, 개선 폭은 시나리오 3에 비해 큰 것으로 나타났다.

5) 시나리오 5 분석결과

시나리오 5는 통행이 매우 불안정한 상태인 서비스 수준 E 상황으로, 분석을 통해 도출된 결과 값은 <표 11>과 같다.

분석결과, 앞의 두 시나리오 3,4와 같이 자율주행

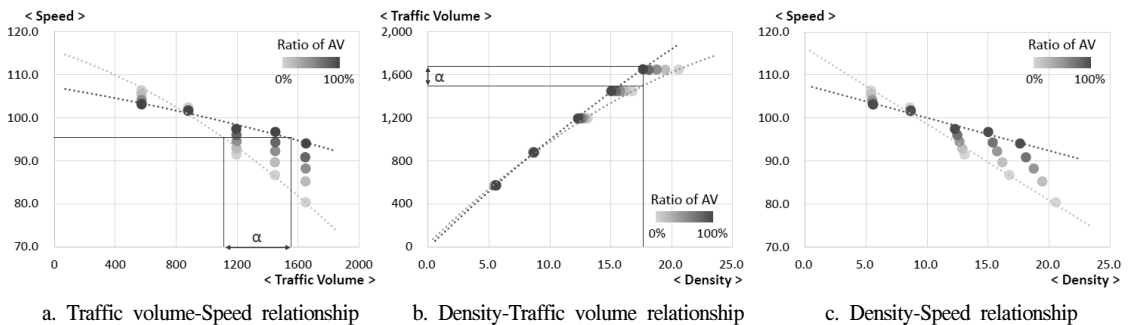
차량 혼입에 따라 시간 및 공간평균속도가 증가하였다. 즉, 자율주행차량의 혼입율이 100%에 도달할 경우 시간평균속도(TMS)가 약 94.1km/h로 자율주행차량 도입 이전에 비해 약 18.5%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 앞의 두 시나리오와 비교했을 때 가장 큰 폭의 증가로, 자율주행차량이 교통량이 많은 불안정한 교통류에서 더욱 효과적일 것이라 판단된다.

밀도(D)의 경우에도 자율주행차량 혼입으로 긍정적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 모든 승용차가 자율주행차량으로 전환될 경우, 밀도가 약 14.1% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라, 밀도를 기준으로 판단하였을 때, 서비스수준이 E에서 D로 상향된 것으로 분석되었다.

용량상태에 다다른 불안정한 교통류에서 자율주행차량 도입에 따른 영향 정도는 다른 시나리오에 비해 가장 큰 것으로 나타났다. 즉, 시간 및 공간평균속도와 밀도 등의 평가지표가 모두 가장 큰 폭으로 개선된 것으로 분석되었다. 이에 따라, 서비스수준 F 상황의 혼잡상태에서는 자율주행차량 도입이 보다 효과적일 것이라 기대된다.

2. 비교분석

서비스수준에 따른 교통량으로 구분된 각 시나리오별로, 자율주행차량 혼입율에 따른 ‘속도’와 ‘밀도’변화를 분석하여 자율주행차량 도입으로 인한 고속도로 기본구간 교통류 영향을 살펴보았다.



〈그림 5〉 종합분석  
 〈Fig. 5〉 Overall analysis

시간 및 공간평균속도의 변화를 분석한 결과는 <그림 5>의 a 그래프와 같다. 서비스수준 A, B의 양호한 자유 통행상태에서는 자율주행차량 혼입율이 높아짐에 따라 시간 및 공간평균속도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 제한속도를 준수하는 자율주행차량으로 인한 것으로 판단된다. 즉, 교통량이 매우 적은 자유 통행상태에서 승용차와 화물차의 과속으로 높게 유지되었던 전체 평균속도가 제한속도를 준수하는 자율주행차량 혼입으로 인해 전체 평균속도가 감소하는 것이다. 반면, 교통량이 많은 불안정한 교통류의 경우 자율주행차량이 혼입됨에 따라 시간 및 공간평균속도가 증가했으며, 그 증가 폭은 교통량이 가장 많은 경우 가장 크게 나타났다. 즉, 반응시간 지체와 가·감속 변화 등 운전자의 특성으로 발생할 수 있는 혼잡의 원인을 자율주행차량의 기술을 통해 해결함으로써, 혼잡을 해소하고 교통류의 안정성을 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 차량이 같은 속도로 주행한다고 가정할 때, 자율주행차량이 혼입될수록 더 많은 교통량을 처리할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 자율주행차량의 CACC, 군집주행 기술을 통해 차간간격을 줄여 고밀도로 밀착하여 주행이 가능함에 따라, 자율주행차량 혼입으로 도로의 용량증대 효과가 나타나는 것이라 판단된다.

다음으로 <그림 5>의 b와 같이 밀도 변화를 분석한 결과, 교통량이 적어 주변 환경 변화에 영향을 거의 받지 않을 경우 자율주행차량이 혼입됨에 따라 밀도가 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 교통량이 많은 상황의 경우 자율주행차량 혼입으로 밀도가 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라 교통 흐름에 긍정적인 효과를 가져올 것이라 판단된다. 또한, 자율주행차량이 혼입될 경우 같은 밀도로 더 많은 교통량을 처리할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 자율주행차량의 CACC, 군집주행 기술을 통해 반응시간 지체 및 가·감속 변화를 줄여 충격과 발생을 줄여줌에 따라 전체 교통류의 흐름이 개선되는 것이라 판단된다.

## V. 결론 및 향후 연구과제

### 1. 결론

최근 현대사회에서 심각한 사회문제로 대두되고 있는 교통 혼잡을 해결하기 위한 근본적인 대안으로 자율주행차량이 주목받고 있다. 이와 더불어 2017년을 목표로 자율주행차량 시험주행을 위한 테스트베드가 구축될 예정이다. 따라서 자율주행차량 도입이 현 도로교통시스템에 가져올 다양한 편익에 대한 예측 및 검토가 필요한 시기가 판단된다. 이에 본 연구는 자율주행차량의 테스트베드 구축 예정구간의 일부를 대상으로 자율주행차량의 단계적 보급 상황에 따른 교통류의 변화 분석하였다.

자율주행차량 도입에 따른 고속도로 기본구간의 교통류 변화를 분석하기 위하여 자율주행차량 테스트베드 구축 예정구간인 경부고속도로 서울TG-신갈JC 상행선 기본구간을 분석대상으로 설정하였으며, 버스운영차로를 제외한 일반차로만을 대상으로 하였다. 분석 방법론으로는 행위자기반모형을 사용하였으며, 교통량을 기준으로 시나리오를 구분하여 자율주행차량 혼입율에 따른 ‘속도 및 밀도’ 등의 변화를 분석하였다.

분석결과, ‘속도 증가 및 밀도 감소’같은 자율주행차량의 효과는 서비스수준 B의 교통량을 기점으로 나타나기 시작하며, 교통량이 많아질수록 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 일반 운전자에게서 나타날 수 있는 반응시간지체 및 가·감속 변화는 교통량이 적은 상황에서는 교통 흐름에 영향을 미치지 않고, 교통량이 많은 불안정한 상황에서 교통 흐름에 영향을 미쳐 혼잡을 유발하기 때문이다. 따라서 자율주행차량의 CACC, 군집주행으로 인한 반응시간지체, 차간간격, 가·감속 변화 감소 효과가 교통량이 많은 상황에서 나타나는 것이라 판단된다. 따라서 교통량이 많은 고속도로에 자율주행차량이 도입될 경우, 운행 서비스 질 측면에서 긍정적인 효과를 얻을 수 있을 것이라 기대된다.

본 연구에서는 자율주행차량 도입에 따른 고속도로 기본구간 교통류 변화 분석을 통해 그 효과를

예측 및 검토하였다. 연구를 통해 도출된 결과를 바탕으로, 향후 자율주행차량 도입에 따른 교통흐름 개선 및 용량증대 효과를 통하여 교통 혼잡 문제, 신규도로 건설비용 문제 등의 다양한 교통문제를 효과적으로 해결할 수 있을 것이라 예상된다. 또한, 향후 테스트베드 구축을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

## 2. 향후 연구과제

본 연구의 한계점을 보완하고 보다 현실적이고 체계적인 연구를 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

첫째, 본 연구는 자율주행차량 도입에 따른 교통류 영향의 기초분석으로 고속도로 기본구간으로 한정하였다. 하지만 보다 현실적인 연구를 위해서는 고속도로의 엇갈림 구간과 연결로 및 연결로 접속부 등 다양한 구간에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

둘째, 본 연구는 2014년 4월 둘째 주 주말 자료를 이용하였으나 보다 신뢰성 있는 결과 도출을 위하여 보다 장기간의 자료를 통한 분석이 필요하다. 또한, 서비스수준 F와 같이 혼잡이 발생하는 보다 다양한 교통량 수집이 가능한 구간에 대한 분석이 추가적으로 필요하다.

## REFERENCES

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Support plan for automated vehicle commercialization, 2015.
- [2] I. B. Yang, "Trends of intelligent vehicles technology," *Electronic Componets*, pp.26-31, 2008.
- [3] J. D. Moon and K. O. Cho, "Direction of technology development of MOTIE in autonomous driving vehicle," *Korea Evaluation Institute of Industrial Technology*, PD Issue Report, vol. 14-12, pp.33-43, Dec. 2014.
- [4] J. VanderWerf, M. T. Khasawneh, J. Zhang and S. R. Bowling, "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, 2002.
- [5] A. Kesting, M. Treiber, M. Schonhof and D. Helbing, "Adaptive cruise control design for active congestion avoidance," *Transportation Research Part C*, vol. 16, pp.668-683, 2008.
- [6] J. Ma, F. Zhou and M. J. Demetsky, "Evaluating mobility and sustainability benefits of cooperative adaptive cruise control using agent-based modeling approach," *Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp.74-78, Apr. 2012.
- [7] G. M. Arnaout and S. Bowling, "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, Feb. 2014.
- [8] J. D. Lee, I. S. Park and K. Y. Hwang, "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, Mar. 2015.
- [9] S. B. Chae and H. H. Cheng, "Agent-based model and application," *The Journal of the Korean Physical Society*, pp.10-14, Oct. 2007.
- [10] C. W. Ahn, M. S. Choi, Y. S. Bae, E. H. Paik, E. J. Choi and K. H. Kim, "Trend in micro simulation technologies for population dynamics," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 29, no. 4, pp.11-20, Aug. 2014.
- [11] J. H. Yang and H. K. Kim, *Understanding and application of agent-based model : urban planning and transportation*, Dong-A Press, pp.25-29, 2012.
- [12] J. H. Lee, "Application of agent-based modelling on transport systems analysis," *Journal of Korea*

- Transportation Research Society*, vol. 21, no. 1, pp.147-156, Feb. 2003.
- [13] A. Lansdowne, "Traffic simulation using agent-based modelling," *University of the West of England*, 2006.
- [14] G. M. Arnaout, M. T. Khasawneh, J. Zhang and S. R. Bowling, "An intelliDrive application for reducing traffic congestions using agent-based approach," *Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp.221-224, Apr. 2010.
- [15] I. J. Lim, K. Y. Hwang and S. Y. Lee, "Analyzing macro-traffic impacts of incremental diffusion of personal mobility on two-lane free-ways," *The Korea Transport Institute, Journal of Transportation Research*, vol. 22, no. 3, pp.55-71, Sept. 2015.
- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Korea Highway Capacity Manual*, 2013.
- [17] S. E. Shladover, C. Nowakowski, X. Y. Lu and R. Ferlis, "Cooperative adaptive cruise control definitions and operating concepts," *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015.
- [18] B. van Arem, C. J. G. van Driel and R. Visser, "The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics," *Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp.429-436, 2006.
- [19] Y. J. Moon, J. J. Lee, B. K. Park, K. W. Kang and M. H. Lim, "Research for traffic model revision affected by ITS operation," *The Korea Transport Institute, Research Series*, vol. 2013-07, Oct. 2013.
- [20] M. Treiber, A. Hennecke and D. Helbing, "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," *Physical Review E*, vol. 62, no. 2, pp.1805-1823, Aug. 2000.
- [21] M. Treiber and A. Kesting, "Traffic flow dynamics, data, models, and simulation," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013.
- [22] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Road design criteria*, 2012.
- [23] A. Kesting, M. Treiver and D. Helbing, "General lane-changing model MOBIL for car-following models," *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1999, pp.86-94, 2007.
- [24] T. C. Kim and S. J. Lee, "What is good motion?," *MOTOR Magazine*, pp.58-63, May. 2006.
- [25] N. L. Broen and D. P. Chiang, "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, 1996.
- [26] D. Fambro, R. Koppa, D. Picha and K. Fitzpatrick, "Driver perception-brake response in stopping sight distance situations," *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1628, pp.1-7, 1998.
- [27] M. Green, "How long does it take to stop? methodological analysis of driver perception-brake times," *Transportation human factors*, vol. 2, no. 3, pp.195-216, 2000.
- [28] J. H. Ju, S. W. Ha, Y. H. Jung and C. S. Lee "A study of person response time on various scenario driver simulation," *Journal of Korea Transportation Research Society*, vol. 63, pp.452-457, Busan, Korea, Oct. 2010.
- [29] M. S. Jang, S. K. Lee, J. S. Kim, S. M. Hong and K. J. Lee "The chronological evolution of drivers's perception reaction time," *Transportation Technology and Policy*, vol. 18, no. 6, pp.55-61, Dec. 2011.
- [30] S. B. Lee, M. S. Chang, C. U. Do and W. C. Kim "A study for human factors in road design," *The Korea Transport Institute, Research Series*, vol. 2001-01, Jan. 2001.
- [31] Fire Safety Authority of Gwangju, *Safety education textbook for vehicle operators*, 2014.

저자소개



**박 인 선 (Park, In-Seon)**

2014년 3월 ~ 현 재 : 홍익대학교 일반대학원 도시계획과 석사과정  
2014년 2월 : 홍익대학교 공과대학 건설도시공학부 도시공학전공, 학사  
e-mail : innsun445@naver.com



**이 중 덕 (Lee, Jong-Deok)**

2015년 10월 ~ 현 재 : 한국교통연구원 국정교통연구본부 교통기술연구그룹 Post-Doc  
2015년 8월 : 홍익대학교 도시계획과 교통공학, 박사  
2008년 8월 : 홍익대학교 도시계획과 교통공학, 석사  
2006년 8월 : 홍익대학교 공과대학 건설도시공학부 도시공학전공, 학사



**이 재 용 (Lee, Jae-Yong)**

2009년 12월 ~ 현 재 : 한국교통연구원 도로교통본부 전문연구원  
2014년 2월 : 홍익대학교 도시계획과 교통공학, 박사수료  
2006년 2월 : 명지대학교 교통공학과, 석사  
2004년 2월 : 명지대학교 교통공학과, 학사



**황 기 연 (Hwang, Kee-Yeon)**

2005년 9월 ~ 현 재 : 홍익대학교 도시공학과 교수  
2013년 4월 ~ 2014년 3월 : 도시정책학회 회장  
2008년 9월 ~ 2011년 8월 : 한국교통연구원 원장  
1992년 5월 : 미국 남가주대학교(USC) 도시 및 지역계획, 박사  
1987년 2월 : 미국 Oregon 주립대학교 도시 및 지역계획, 석사  
1981년 8월 : 연세대학교 행정학과, 학사