

# 자율주행차량 도입에 따른 교통 네트워크의 효율성 변화 분석연구

## Exploring the Impacts of Autonomous Vehicle Implementation through Microscopic and Macroscopic Approaches

육 동 형\* · 이 백 진\*\* · 박 준 태\*\*\*

\* 주저자 : 국토연구원 국토인프라 연구본부

\*\* 교신저자 : 국토연구원 국토인프라 연구본부

\*\*\* 공저자 : 한국교통대학교 교통시스템공학과

Dong-Hyung Yook\* · Baeck-Jin Lee\*\* · Jun-Tae Park\*\*\*

\* Asso. Reas. Fel.National Infrastructure Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements

\*\* Director, National Infrastructure Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements

\*\*\* Research professor, Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation

† Corresponding author : Baeck-Jin Lee, bjlee@krihs.re.kr

Vol.17 No.5(2018)

October, 2018

pp.14~28

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.5.14>

2018.17.5.14

Received 6 September 2018

Revised 22 September 2018

Accepted 7 October 2018

© 2018. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

차량 통신 및 지능형 교통 시스템의 기술 향상으로 인해 자율 차량이 시장에 서서히 도입될 것으로 예상된다. 본 연구는 자율주행차량이 네트워크 효율성에 미치는 영향을 분석한 것이다. 네트워크의 효율성을 측정하기 위해 이 연구에서는 미시적 및 거시적 시뮬레이션을 결합한 순차적 단계를 적용했다. 미시적 시뮬레이션은 도로에서 자율주행차량의 비율에 의한 용량 변화를 고려하는 반면, 거시적 시뮬레이션은 네트워크 전체의 개선을 식별하기 위해 시뮬레이션 결과를 이용한다. 예상대로, 자율주행차량은 인간의 운전보다 기존 도로 용량을 효율적으로 활용한다. 특히, 고속도로에서 최대 용량 개선은 190.5%로 예상된다. 상당한 용량의 변화는 자율주행차량의 비율이 약 80% 이상일 때 관찰된다. 이러한 개선 사항은 자율주행차량의 보급을 통해 전반적인 네트워크 효율성을 향상시킬 수 있는 거시적 모델로 변환된다. 그러나 본 연구는 자율 주행 차량의 시장 첫 출현이 자유로운 흐름 조건을 보장하지 않는다는 것을 확인하며, 이는 자율주행차량 시대에 맞는 시스템 최적의 경로 체계의 가능한 필요성을 의미한다.

핵심어 : 자율주행차량, 도로 용량, VISSIM, 교통량-지연 함수, 시뮬레이션

### ABSTRACT

Thanks to technical improvement on the vehicle to vehicle communication and the intelligent transportation system, gradual introduction of the autonomous vehicles is expected soon in the market. The study analyzes the autonomous vehicles' impacts on the network efficiencies. In order to measure the network efficiencies, the study applies the sequential procedures that combines the microscopic and macroscopic simulations. The microscopic simulation attends to the capacity changes due to the autonomous vehicles' proportions on the roadway while the macroscopic simulation utilizes the simulation results in order to identify the network-wide improvement. As expected, the autonomous vehicles efficiently utilizes the existing capacity of the roadway than the human driving does. Particularly, the maximum capacity improvements are expected by the 190.5% on the expressway. The significant capacity change is observed when the autonomous vehicles' proportions are about 80%

or more. These improvements are translated into the macroscopic model, which also yields overall network efficiency improvement by the autonomous vehicles' penetration. However, the study identifies that the market debut of the autonomous vehicles does not promise the free flow condition, which implies the possible needs of the system optimal routing scheme for the era of the autonomous vehicles.

Key words : Autonomous vehicles, Roadway capacity, VISSIM, Volume-delay function, Simulation

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

1977년 일본 쓰쿠바 기계공학 연구소에서 세계 최초의 자율주행차를 제작(시속 30km/h)한 이래 자율주행차량 관련 기술은 계속적으로 진보하고 있으며, 2018년 현재 자율주행 레벨 2 이하의 기능을 갖춘 차량들이 양산되고 있는 상황이다.

자율주행차량은 자동차 스스로 주변 환경을 인식, 위험을 판단, 주행경로를 계획하여 운전자 주행조작을 최소화하며 스스로 안전주행이 가능한 인간 친화형 자동차로 정의된다. 더불어, 인간의 주행보다 훨씬 짧은 인지, 반응 시간으로 인해 자율주행차량은 교통흐름에 긍정적인 효과를 미칠 것이라 기대되고 있다 (Anderson *et al.*, 2014; Dokic *et al.*, 2015). Park *et al.*(2015) 또한 불확정적이며 불규칙한 주행 오류의 감소로 정체 및 교통사고의 감소, 그리고 통행시간 절감, 대기오염의 감소효과까지 기대할 수 있을 것으로 예상되고 있다.

최근 들어 여러 대중 매체를 통해 자율주행차량의 기술 발전 및 실제 운행 사례를 중심으로 많은 소개가 이루어지고 있다. 자율주행차량 개발에 가장 선두에 있는 구글은 Google car를 통해 2014년 4월 기준 1.1 백만 km의 누적 주행 테스트 거리를 달성하였으며, 구글 외에 기존 자동차 메이커들 또한 군집주행 기술 (Volvo), 반 자율주행 시스템(GM, BMW)정도의 기술개발을 완료한 상태이다. 기술개발과 함께 자율주행의 시범 테스트나 운행을 위한 정부측면의 제도적, 법적 허용 사례도 점차 증가하고 있는데, 실례로, 미국 네바다 주에서는 화물자동차의 자율주행을 허가하는 법안을 통과시켜 자율주행 전용 운전면허가 발급되고 있는 상황이다. 많은 자동차 메이커들이 2020년을 목표로 자율주행차량을 시장에 판매하는 계획을 세우고 있는 만큼 자율주행차량이 일상의 도로에서 운행되는 시기가 머지않았음을 시사하고 있다.

이러한 기술적 진보의 흐름에서 볼 때, 자율주행차량의 도입이 먼 미래이기 보다는 근접한 미래의 상황일 수 있다는 가정을 한다면 (Litman, 2013) 다양한 기대 효과가 예상되는 자율주행차량의 실질적 도입을 위한 체계적인 정책 마련이 준비되어야 한다. 하지만, 자율주행차량의 기술 진보만큼 국가가 담당하는 도로 인프라의 고도화가 병행되어야 함에도 불구하고 아직 인프라 기술의 고도화 및 발전 방안에 대해서는 구체적인 정책이 없는 실정이다. 이는 자율주행차량 도입이 가져올 상당한 기대 효과가 이에 관련된 정부 정책 수립을 위한 추진 근거로 작용하기에는 아직 미흡한 수준인 것으로 판단되는 바, 본 연구는 개념수준에 머물러 있는 자율주행차량의 기대 효과를 우리나라를 대상으로 한 구체적인 사례 분석을 수행함으로써 장래 자율주행차량의 원활한 도입에 관련된 전반적인 정책 수립에 관한 정당성을 구체화하고자 한다. 이에 본 논문은 우리나라를 대상으로 자율주행차량 도입에 따른 교통 네트워크의 효율성 변화를 계량적으로 산정하는데 그 목적이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 이어지는 선행연구고찰에서는 개념적 측면에 머물러 있는 자율주행차량 도입의 다양한 기대효과를 교통 효율성 측면에 중점을 두어 요약·정리한다. 본문에서는 자율주행차량의 도입효과를 미시적 관점과 거시적 관점에서 분석한다. 짧은 인지·반응시간을 필요로 하는 자율주행차량의 도입이 미시적 교통흐름에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고 그 결과를 거시적 측면의 교통 수요분석에 적

용하여 교통 효율성 증진 효과를 계량화 한다. 마지막 단락에서는 분석 결과의 해석을 바탕으로 우리나라에 적합한 자율주행차량의 도입에 관한 정책 방향을 제시하는 것으로 논문을 마무리한다.

## II. 본 론

### 1. 선행연구 고찰

자율주행차량 관련 국내의 연구동향은 자율주행환경 및 차량의 안전성·통신·보안·운전자 지원 등 산업·기술적 범위에서 활발하게 진행되고 있다. 본 연구의 선행연구 고찰에서는 자율주행차의 도입으로 인한 용량변화 및 이에 따른 광범위한 도로 네트워크의 효율성 변화관련 연구를 다룬다.

Ko *et al.*(2017)은 자율주행차량의 도입으로 인한 과급효과를 정량적으로 추정하였다. 자율주행차량 보급 비율에 따른 용량증대 및 속도 향상효과를 BPR (Bureau of Public Road) 함수에 대입하고 새로운 BPR 모형을 가정하여 KTDB를 이용한 통행배정을 실시하였다. 분석 결과 자율주행차량 보급 비율이 증가할수록 교통사고 절감 편익이 증가하며, 도로 혼잡(V/C)이 개선되어 도로용량 증대 없이도 도로 네트워크의 효율성이 크게 증가 될 것으로 예상하였다.

자율주행차량으로 인한 용량변화에 대한 연구는 주로 미시적 시뮬레이션 모형의 개발에 집중되어 있다. 일반차량과 자율주행 레벨 2 이하 차량이 가장 근접한 미래의 시나리오라고 생각한 Bose and Ioannou(2003)은 10%의 자율주행 레벨 2 이하 차량이 일반차량의 급발진에 의한 교통류의 불안정을 완화할 수 있을 것으로 분석하였다. 그들은 교통 처리 용량의 큰 변화없이 약 28%의 연료 절약과 그에 따른 공해의 감소로 이어질 수 있다고 주장하였다. Fernandez *et al.*(2012)의 연구에서는 자율주행차량의 가·감속 성능과 안정적인 고속주행 기능은 주행 차량 간의 간격을 보다 가깝게 유지할 수 있어 군집운행으로 인한 기존 도로 용량을 5배까지 늘릴 수 있을 것으로 예상하였다. 자율주행차량 도입에 따른 전체교통류의 속도변화를 분석한 연구로 Zhou *et al.*(2012)는 1차로 연속류 구간을 대상으로 모든 차량이 자율주행차량으로 전환된다고 가정 후, 자율주행차량 도입 전·후의 속도를 비교 분석한 결과 자율주행차량 도입으로 전체 교통류의 속도가 증가한다고 분석하였다. 최근에는 양산 차량의 ACC (Autonomous Cruise Control) 기능과 이것이 CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control)로 이어졌을 경우에 대한 실증적 실험이 이어지고 있다. Milanese and Shladover(2014)는 실제 차량에 ACC와 IDM (Intelligent Driver Model; Kesting *et al.*(2010)) 그리고 CACC 제어 시스템을 구축하고 실제 교통상황에서 위 기능들의 성능을 비교한 결과, CACC 시스템이 교통류 흐름의 안전성과 용량증대 측면에서 가장 효율적임을 밝혀내었다. Talebpour and Mahmassani(2016)의 경우, 일반차량, 자율주행차량 그리고 connected vehicle이 혼재된 주행 상황에 대한 미시적 시뮬레이션 분석 프레임워크를 구축하였다. 이러한 미시적 시뮬레이션 분석 틀은 자율주행차량 그리고 connected vehicle의 시장 점유율에 따른 용량 변화를 분석해 낼 수 있었으며 그 결과로써 자율주행차량 그리고 connected vehicle의 점유율이 높아질수록 용량의 증가가 나타남을 밝혀내었다.

우리나라에서는 Moon(2015)의 경우, ITS·자율주행차량의 도입에 의한 도로용량산정방법의 재검토 방안을 제시하였다. ITS관련 요소들이 기존 용량분석에 반영되지 못하는 한계점을 지적하고 「도로용량편람」의 고속도로 기본구간 및 신호교차로의 용량산정식에 ITS운영에 따른 보정계수를 도입하는 방안을 제안하였다. 고속도로 기본구간의 경우 가변속도제어 및 차로제어, 자율주행으로 인한 차두간격 감소 효과, 신호교차로는 출발손실시간 감소 및 포화·차두시간 감소, 보행자감응 기반 보행신호 운영 효과를 도로용량 산정시 반영이 가능하며 ITS운영에 따른 효과를 다양한 방법으로 검토하여 제시할 필요가 있다고 제안하였다.

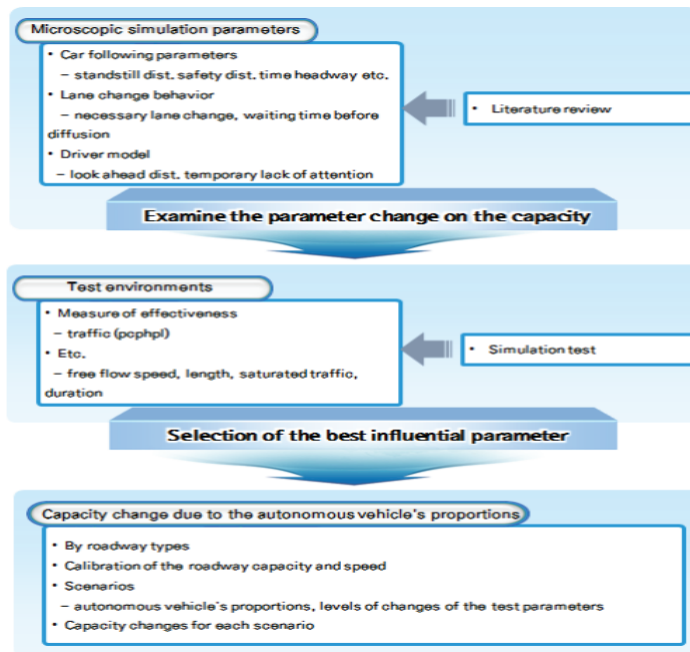
다양한 연구에서 자율주행차량 도입이 교통 효율성 증진에 긍정적인 역할을 할 것으로 분석하고 있지만

(Anderson *et al.*, 2014; CUTR, 2013) 그 기대효과가 개념적이거나 단순한 가정을 바탕으로 산정되고 있으며, 자율차량과 일반차량간의 주행환경에 대한 모형화에 많은 연구가 집중되어 있는 반면 거시적 효과에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. Ko *et al.*(2017)의 경우, 실증적인 분석에 바탕을 두고 있으나, 용량증대효과에 대해 일본의 사례에 바탕을 두어 우리나라의 교통여건에 대한 고려가 적절하게 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 본 연구에서는 자율주행의 도입 효과를 가장 미시적 단계인 교통류 흐름에서부터 시작하고 여기에서 산출된 용량변화 효과를 거시적 관점에서 분석하고자 한다.

이러한 접근은 지금까지의 연구와 다음과 같은 차별성을 갖는다. 대부분의 연구가 자율주행차량의 도입효과를 교통류 흐름의 변화를 분석하는 것으로 연구의 범위를 국한 짓는 반면, 본 연구에서는 미시적 교통류 흐름의 변화를 통해 산출한 자율주행차량의 도입효과를 대규모 네트워크에 적용하여 거시적 교통 효율성 분석을 수행하는 것으로 이는 기존의 자율주행차량의 도입효과를 단순히 교통 혼잡비용을 산정하는 접근방식에서 벗어나 더욱 정밀한 분석틀을 기반으로 자율주행차량의 도입효과를 분석하는 것으로 보다 현실성 있고 구체적인 도입 효과를 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 분석 절차

앞서 언급하였듯이, 자율주행차량의 도입효과는 미시적 및 거시적 분석을 통해 구현된다. 미시적 분석의 목적은 개별 차량 주행에 영향을 미치는 다양한 변수 중에 가장 영향력 있는 변수를 선정하고 그 영향력을 측정하는 것인데, 이 때 영향력 측정의 기준은 용량변화로 한다. 이는 미시적 교통류 분석을 통해 자율주행차량 도입 효과를 분석하는 궁극적인 목적이 산출된 용량증대 효과를 거시적 분석에 적용하는 것이기 때문이다.



<Fig. 1> Study outline

source : Lee *et al.*(2017) An Evaluation of the impacts of Autonomous Vehicles on Use of National Territory, KRIHS

용량을 결과지표로 한 미시적 교통류 분석이 거시적 분석으로 연계될 수 있는 연결 고리는 거시적 분석에 이용되는 교통량-용량간의 관계식인 volume-delay function (VDF)이다. 교통 수요분석 시 이용되는 VDF는 도로 유형별로 정의되어 있으므로, 미시적 분석 또한 도로 유형별로 자율주행차량 도입 효과를 분석하게 된다. 이러한 분석절차는 <Fig. 1>에 나타나 있다.

### 3. 분석 결과

#### 1) 시뮬레이션 대상 차량 제어변수 선정 및 용량증대 효과

미시적 교통류 분석을 수행하기 위해, 본 연구에서는 VISSIM 시뮬레이션을 이용하였다. 이어지는 단락에서는 위 분석틀에 적용되는 교통류 모델을 바탕으로 차량 제어변수를 설명한다.

VISSIM에서는 교통류 흐름을 모형화하기 위해 차량 간 추종모형은 단속류 (Wiedemann 74 car-following)와 연속류 (Wiedemann 99 car-following)로 구분하여 시뮬레이션에 적용하고 있으며, 이외에도 차로 변경 행태 (lane change behavior), 기타 졸음운전과 같은 운전자 특성 (driver model)을 반영하고 있다. 본 연구에서는 위 차량 주행 관련 변수 중 자율주행으로 인해 인간의 주행과 차별화 될 수 있는 주행 관련 변수를 선정한 후 이를 자율주행차량의 속성에 적용하여 그 파급효과를 측정하였다. 선별적으로 차량 주행 관련 변수를 선정한 것은 졸음운전과 같은 자율주행차량과는 상관없는 변수들에 대한 분석은 불필요하기 때문이다.

검토 결과, 정지거리, 차두시간, 추종거리 변동성 그리고 간격수락 최소 차두시간과 같은 주행 관련 변수가 시뮬레이션 분석 대상 변수로 선정되었으며 (<Table 1> 참조), 이들 변수들이 자율주행으로 인해 인간의 운전보다 더욱 광범위한 범위를 가진다는 가정을 하고 이 변수들을 변화시켰을 시 용량의 변화정도를 살펴 보았다. 용량분석을 위한 시뮬레이션 환경은 1.0km의 3차로 연속류 구간으로 구성하였다. 자율주행차량에 적용된 각 변수별 용량분석 결과는 <Table 2>와 같다.

<Table 1> VISSIM simulation parameters

car following models	parameters (abbreviated)	explanations	chosen
Wiedemann 99 model	CC0	stand still distance	○
	CC1	time headway	○
	CC2	following variation	○
	CC3	threshold for entering 'following'	×
	CC4&CC5	negative&positive 'following' threshold	×
	CC6	speed dependency of oscillation	×
	CC7	oscillation acceleration	×
	CC8	standstill acceleration	×
	CC9	acceleration with 80km/h	×
lane changing behaviors	CC10	Necessary lane change	×
	CC11	Waiting time before diffusion	×
	CC12	Min. headway	○
driver model	CC13	Look ahead distance	×
	CC14	Look back distance	×
	CC15	Temporary lack of attention	×

선정된 차량 주행 속성 변수를 자율주행차량의 주행 속성에 적용하여 용량변화 효과를 분석한 결과, 차두 시간 변화로 인한 용량증대 효과가 다른 변수에 비해 상당히 높은 것을 알 수 있다.

<Table 2> Examination results by the different setting of the car following model parameters

car following models	parameters	reference point	variable change	capacity change	
				traffic (pcphpl)	rate
Wiedemann 99 model	CC0	1.5m	1.0m	1,861	1.01
		1,840	0.5m	1,895	1.03
	CC1	0.9s	0.7s	2,433	1.32
		1,840	0.5s	2,666	1.45
	CC2	4.0m	3.0m	1,864	1.01
		1,840	2.0m	1,909	1.04
lane changing behaviors	min. head.	0.5m	0.4m	1,822	0.99
		1,840	0.3m	1,822	0.99

추가적으로 개별적인 차량 주행 관련 변수의 파급 효과가 아닌 이들의 조합에 대한 영향력을 분석하였다. 모든 변수 조합을 고려하는 것은 비효율적이고 차두시간의 변화가 다른 변수의 파급효과보다 훨씬 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으므로 실험적 의미에서 테스트를 진행 하였다. CC0=0.5m, CC1=0.7s CC2=2.0m의 설정한 결과는 CC1=0.7s의 결과와 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 모든 조합에 대한 분석을 바탕으로 자율주행차량의 성능 구현을 위한 가장 영향력 있는 변수를 선정해야 하나 본 연구에서는 차두시간의 지배적인 효과를 근거로 자율주행차량의 파급효과를 시뮬레이션 하는 가장 적절한 변수로 선정하였다.

자율주행차량이 차두시간을 인간의 한계보다 더 짧은 상태로 주행할 수 있는 것은 기계적인 가능성과 이를 허용하는 사회적 합의를 가정하였을 경우 가능하다. 기계적인 주행 가능성의 경우, 현재에도 밀리세컨드 단위로 주행상황을 센싱하고 이를 바탕으로한 ADAS system이 장착된 차량이 출시되는 바, 전자는 가능한 것으로 보았으며 이를 바탕으로한 자율주행차량의 적극적 (assertiveness) 주행 (안전을 위해 자율주행 차량이 보수적으로 주행하는 것이 아닌 기계의 능력을 충분히 활용하여 headway를 극단적으로 줄이거나 적극적으로 차로 변경을 하는 등의 주행을 의미)에 대해 장래에는 사회적 합의에 도달할 수 있을 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 자율주행차량의 적극적 주행에 대한 기존 시나리오 연구 (DfT, 2016)를 바탕으로 하고 있다.

## 2) 도로 유형별 용량증대 효과 추정

KTDB에서 제공하는 서울 광역권의 도로 네트워크는 총 17개 도로유형으로 구성되어 있다. 따라서 자율주행차량 혼입률에 따른 용량변화 분석은 위 17개 도로 유형을 대상으로 수행된다. 본 분석에서는 VISSIM을 이용하여 자율주행차량의 속성을 반영한 후 혼입률에 상응하는 임의의 자율주행차량 집단을 생성하는 방식으로 자율주행차량 혼입에 따른 용량 변화를 분석하였다.

여기서, 각 도로유형별 VDF는 BPR함수에 적용되는 기준 용량이 있다. 시뮬레이션에서 관측되는 도로의 용량과 기준 용량이 정산되어야 이 후 분석의 결과가 의미를 가지므로 각 도로유형별로 이에 대한 정산을 실시하였다. 도로유형별 VDF의 기준 용량에 대한 정산 결과는 <Table 3>과 같다. 해당 도로 유형에 알맞은 기준 속도와 차로수 및 차로폭을 설정한 결과 대부분의 VDF에서 기준 용량과 큰 차이를 보이지 않을 수 있었다.

<Table 3> Calibration results for traffic volume for each VDF

roadway types		BPR	calibrated	
expressway	more than or equal to 3lanes	1,700	1,722	
	less than or equal to 2lanes	1,900	1,913	
urban expressway	more than or equal to 3lanes	1,600	1,635	
	less than or equal to 2lanes	1,800	1,801	
multilane roadway	2lane or more	lv.1	1,650	1,642
		lv.2	1,550	1,569
		lv.3	1,450	1,451
		lv.4	1,300	1,296
		lv.5	1,100	1,099
		lv.6	800	800
	single lane	lv.1	800	808
		lv.2	751	761
		lv.3	703	708
		lv.4	630	630
		lv.5	533	529
		lv.6	387	391
ramp	1lane	1,000	1,006	

시뮬레이션을 위한 환경설정은 5km를 분석구간으로 설정(램프구간 1km)하고 분석시간은 1시간(3,600s)을 기준으로 하였다. 다차로도로의 경우 도로 등급별로 1km당 신호등 밀도 범위가 정해져 있기 때문에 신호등 밀도 기준값과 유사한 밀도로 교차로를 배치(신호주기 120s)하여 시뮬레이션을 실시하였다.

VISSIM에서는 확률에 따른 변동성이 발생하기 때문에 분석결과의 집계화는 random seed를 바꾸어 가며 반복 실행한 결과 값의 평균값을 사용하였다.

도로유형별 시뮬레이션 분석 결과, 자율주행차량 혼입률 및 CC1 (차두시간) 변화에 따라 비선형적 관계로 용량이 증대되는 것으로 분석되었다. 먼저, 단순히 CC1만을 변화 시켰을 경우 용량처리 변화를 보아도 도로의 교통량 처리 능력이 증대되는 것을 알 수 있다. (<Table 4> 참조).

<Table 4> CC1's effect on the traffic flows

CC1	0.9s		0.7s		0.5s	
	traffic flows/hr	ratio to 0.9s	traffic flows/hr	ratio to 0.9s	traffic flows/hr	ratio to 0.9s
results	1840	1.0	1,911	1.04	2,000	1.09

더불어, 아래 <Table 5>는 CC1이 0.1이고 혼입률을 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 고속국도 3차로 이상의 경우 기준용량 대비 최대 약 190.5% 증대효과를, 2차로 이하의 경우 152.0%를 보였다. 도시고속도로의 경우 3차로 이상일 때, 기준용량대비 최대 약 153.9% 증대 효과를 보이며 고속국도와 유사한 패턴으로 용량증가 현상을 나타냈다. 다차로도로의 용량증대 범위는 등급별 차이가 있으나 약 111.6%~ 158.4%로 연속류 구간에 비해 증대 효과는 낮은 것으로 나타났으며 특히 1차로의 경우 6개 유형 평균이 117.8%로 용량증대 효과가 낮은 것으로 나타났다. 램프구간의 경우 최대 용량증대 효과는 130.2%로 나타났다.

<Table 5> Microscopic simulation results by roadway types

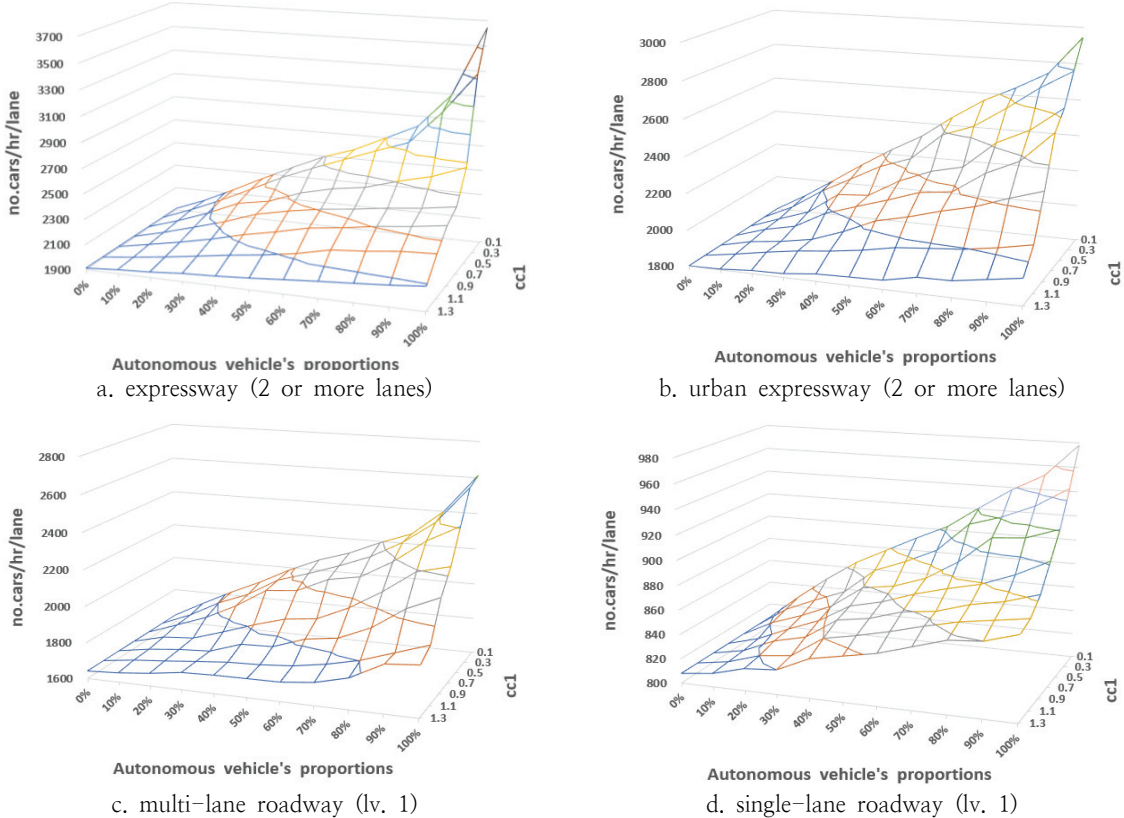
roadway types		capacity changes (pcphpl) as to the autonomous vehicles' proportions											
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
expressway	more than or equal to 3lanes	1,913	2,012	2,132	2,257	2,378	2,491	2,577	2,697	2,819	3,092	3,645	
	less than or equal to 2lanes	1,722	1,786	1,862	1,957	2,035	2,127	2,197	2,247	2,321	2,456	2,617	
urban expressway	more than or equal to 3lanes	1,801	1,899	2,009	2,122	2,228	2,323	2,448	2,559	2,643	2,738	2,945	
	less than or equal to 2lanes	1,635	1,696	1,757	1,812	1,889	1,941	2,034	2,079	2,182	2,348	2,586	
multilane roadway	2lane or more	lv.1	1,642	1,732	1,818	1,896	1,985	2,061	2,117	2,193	2,258	2,402	2,613
		lv.2	1,569	1,638	1,682	1,720	1,755	1,813	1,852	1,886	1,932	2,018	2,102
		lv.3	1,451	1,505	1,545	1,597	1,638	1,673	1,712	1,763	1,801	1,853	1,938
		lv.4	1,296	1,353	1,409	1,446	1,488	1,521	1,548	1,578	1,611	1,693	1,748
		lv.5	1,099	1,140	1,172	1,205	1,243	1,273	1,298	1,320	1,352	1,402	1,462
		lv.6	800	827	853	879	902	931	949	962	983	1,013	1,053
	single lane	lv.1	808	829	848	865	878	891	903	921	938	952	978
		lv.2	761	776	783	794	802	809	819	826	838	852	872
		lv.3	708	719	728	736	742	750	758	763	769	779	798
		lv.4	630	646	649	660	676	695	716	734	747	758	782
		lv.5	529	533	536	540	549	553	558	564	572	580	595
		lv.6	391	398	408	416	422	427	434	439	445	454	462
ramp	1lane	1,006	1,036	1,058	1,083	1,108	1,145	1,169	1,193	1,208	1,235	1,302	

자율주행차량의 도입으로 기존 도로의 용량이 최대 190%정도 상승하는 것은 기존 연구 결과보다는 다소 보수적 결과에 가까운 것을 알 수 있다. 자율주행차량의 도입에 대한 연구 초기에는 인지·반응시간에 대한 단순 산술 계산을 바탕으로 용량증대 효과가 5배까지 이를 것이라는 연구 결과가 있다. (Fernandez and Nunes, 2012; Anderson *et al.* 2014 의인용을 재인용) 하지만, 최근의 연구에 의하면, PinJari *et al.*(2013)의 경우, 50%의 시장 점유율에서 약 1.22배, 100%에서 약 1.8배 정도의 용량증대 효과를 산정하였으며, V2V를 최고레벨의 자율주행 구현으로 가정한 Tientrakool *et al.*(2011)의 연구에서는 100% V2V 상황시의 용량증대 효과를 2.73배로 예측 하였다. 이렇게 자율주행차량의 도입으로 인한 효과가 다양한 것은 분석의 정밀도, 차량 간 안전거리 산정의 임의성, 최고 속도 산정 등에 대한 세밀한 부분의 차이에 기인하는데, 본 연구의 경우, 자율주행차량이라 할지라도 최소한의 안전거리를 유지한 최대용량을 산출하였기 때문에 기존의 연구보다는 약간 낮은 도입 효과가 나타난 것으로 사료된다.

자율주행차량의 혼입률 증가 및 CC1의 동시적 변화에 따른 용량증가 패턴을 살펴보면, 고속도로, 도시고속도로 모두 점유율 80% 이상에서 용량증대가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. (<Fig. 2> 참조) 3차로 이상의 경우 점유율 80%를 경계로 2개의 다른 영역으로 구분되는 것을 알 수 있으며, 그룹1(CC1 0.1-0.3-0.5-0.7)에 비해 그룹2(CC1 0.9이상)의 증대효과가 낮게 나타났다. 3차로 고속도로의 경우, 전체 용량 증가 효과의 절반이 혼입률 80%가 돼서야 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 자율주행차 혼입률이 100%일 때의 용량증가 효과



를 100으로 보면 혼입률이 80% 정도일 때 50의 효과가 나타나고 나머지 50은 나머지 20%에 의해 달성된다  
는 것이다. 다차로도도로의 경우에도 혼입률 80% 이상에서 증대효과가 그 이하의 혼입률에 비해 크다고 할 수  
있으나 연속류 구간에 비해 완만한 곡선 형태를 보이는 것으로 나타났다.



<Fig. 2> Capacity changes (pcphpl) as to the autonomous vehicles' proportions

### 3) 서울 광역권 도로 네트워크의 효율성 변화

미시적 교통류 분석에서 나타난 도로 유형별 자율주행차량 도입에 의한 용량변화는 각 VDF의 용량부분에 적용되어 서울 광역권 도로 네트워크의 효율성 분석에 이용된다. 미시적 시뮬레이션의 결과를 거시적 교통수요 분석 모델의 혼잡 함수 즉, VDF를 통해 반영하는 것이 다소 과도한 집계화로 보여 질 수 있으나, 본 연구에서는 자율주행차 도입의 거시적 효과를 계량화하는데 있어 택할 수 있는 일종의 방법론 중의 하나로 판단하여 이러한 연구 전개 방식을 택하였다.

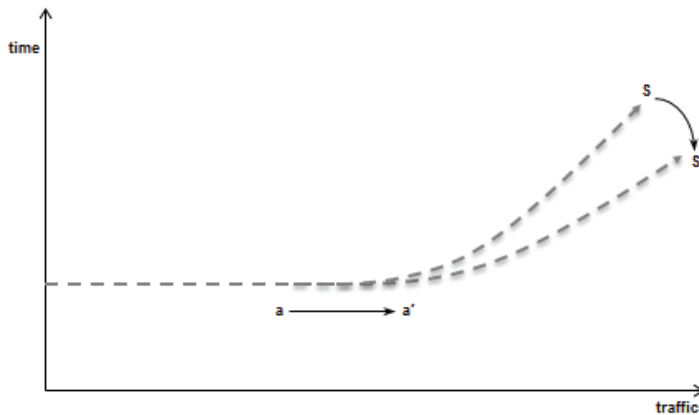
VDF의 형태를 결정하는 BPR (eq. [1])의  $\alpha, \beta$ 에 대해 장래에도 같은 값을 유지할 것이라는 가정을 하였다.

$$T = T_0(1 + \alpha[V/C]^\beta) \tag{1}$$

여기서,  
 $T$  : 통행시간

- $T_0$  : free flow speed (교통량이 거의 없거나 0 일때의 통행 속도)
- $V$  : 교통량
- $C$  : 용량 (차로당 처리용량  $\times$  차로수)
- $\alpha, \beta$  : 파라미터

VDF를 통한 용량증대효과를 두 가지로 구분하면 직접적인 용량 증대 효과 ( $a \rightarrow a'$ )와 속도 증가를 통한 ( $s \rightarrow s'$ ) 방향의 간접 효과로 구분되어 진다 (<Fig. 3> 참조).  $a \rightarrow a'$ 방향의 용량증대는 본 연구의 미시적 교통류 분석 결과와 같이 자율주행차량의 효율적인 도로 용량이용으로 인해 기대할 수 있는 효과이며  $s \rightarrow s'$  방향의 조정은 자율주행차량이 도로 네트워크에 추가적으로 유입되어 발생하는 한계 비용이 더 낮을 수 있을 때  $\alpha, \beta$ 의 조정을 통해 이루어질 수 있다.



<Fig. 3> Two ways of capacity improvement depicted on the BPR

본 연구에서 다루는 용량증대 효과는  $a \rightarrow a'$ 인 자율주행차량의 효율적인 자동주행으로 결정되는 부분만을 고려하는 것이다. 장래 자율주행차량의 효율적인 도로 용량의 이용은 현재 도로 네트워크에서 차량 한 대의 유입으로 발생하는 한계 비용보다 더 낮게 결정되어  $\alpha, \beta$ 의 조정을 통해  $s \rightarrow s'$ 방향의 변화를 예상할 수 있으나, 이러한 격차는 고속도로와 같은 고규격 도로에서 예상될 뿐 대부분의 도로를 구성하는 교차로를 포함한 다차로 도로에서는 큰 차이가 없을 것으로 판단되기 때문이다.

거시적 관점에서 대규모 네트워크의 교통 효율성 분석은 통행수요와 도로용량 공급 간의 균형 상태를 가정하여 이루어진다. 도로 네트워크라는 공간적 이동통로의 공급에 통행수요는 자신의 통행시간을 최소화하려는 경로선택을 통해 목적지에 도달하려는 기본적 통행행태 (Wardrop, 1952의 제1원칙; User Equilibrium (UE) - 이용자 균형)를 반영하여 통행배정을 수행하게 되면 궁극적으로 전체 도로네트워크를 구성하는 각 도로 링크의 도로 이용률, 즉 용량 대비 통행 배정된 통행량을 얻을 수 있게 된다. 본 연구에서는 이를 위해 KTDB에서 제공하는 최신의 서울 광역권 도로 네트워크와 기·중점 통행량을 이용하였으며, 이를 트럭과 승용차 두 개 class로 구분하여 아래와 같은 UE에 의거한 통행배정을 실시하였다. 자율주행차의 도입으로 인해 대중교통 수단으로의 전환 등으로 도로 이용 통행량이 증가 할 수도 있으나, 본 연구에서는 이러한 통행량 변화는 고려하지 않았다. 두 class 간의 균형 상태에 대한 수학적 표현식은 다음 eq.[2]과 같다. 노드( $N$ )와 링크( $A$ )의 집합으로 구성된 네트워크  $\Phi = (N, A)$ 에서, 모든 통행자가 통행시간을 더 이상 감소시킬 수 없는 상태는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 f_k^{rs,m}(c_k^{rs,m} - c_\pi^{rs,m}) &= 0 \quad \forall k \in p^{rs,m}, \forall rs \in RS, \forall m \in M \\
 c_k^{rs,m} - c_\pi^{rs,m} &\geq 0 \quad \forall k \in p^{rs,m}, \forall rs \in RS, \forall m \in M
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,

$RS$  : 기·종점 노드의 집합,  $r$ 은 기점노드의 집합  $r \in N$ ,  $s$ 는 종점노드의 집합  $s \in N$

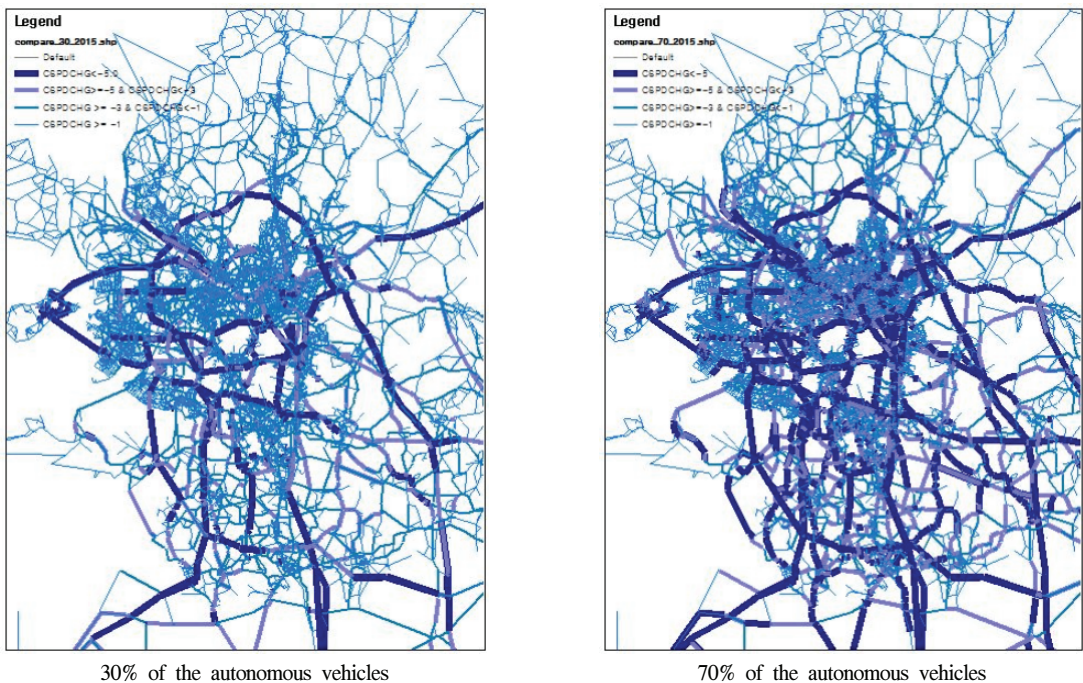
$p^{rs,m}$  : 차량 그룹  $m$ 에 의해 이용된 기·종점  $rs$ 간을 연결하는 경로의 집합

$f_k^{rs,m}$  : 차량 그룹  $m$ 이 기·종점  $rs$ 간에 경로  $k$ 를 이용하는 교통량

$c_\pi^{rs,m}$  : 차량 그룹  $m$ 에 의해 기·종점  $rs$ 간을 통행할 때 소요되는 최소 통행시간

시간적 및 공간적 조건을 고정하체 2025년의 혼입률을 30% 및 70%로 가정하여 해당 년도의 서울 광역권 네트워크에 기·종점 통행량을 배정한 결과는 다음과 같다.

미시적 교통류 분석에서의 용량증대 효과는 자연스럽게 거시적 분석에도 이어져 자율주행차량의 도입은 상당한 효율성 증진효과를 얻을 수 있는 것으로 추정되었다. 특히, 도로 유형별로 다른 용량증대 효과를 적용한 결과, 연속류 도로 위주로 교통 상황이 개선되는 것을 알 수 있었다. <Fig. 4>의 왼쪽은 자율주행차량의 혼입률이 30%일 때 혼입률이 0%일 경우로 부터의 교통속도 개선효과를 시각화한 것으로 서울 광역권을 둘러싼 외곽순환도로와 경부, 중부, 서해안 고속도로와 같은 고규격 도로들의 교통속도 개선효과가 타 도로에 비해 큰 것을 알 수 있다. (음영이 진할수록 개선효과가 큼을 의미한다. 왼쪽 위의 범례는 맨 위부터, 도로망, 5km/h이상의 속도 차, 3km/h ~ 5km/h의 속도차, 1km/h ~ 3km/h의 속도차, 5km/h이하의 속도 차를 나타낸다.) 자율주행차량 혼입률이 70%일 때는 (오른쪽) 도입효과가 공간적으로 더욱 확대되는 것을 알 수 있다. 이를 시스템 전체적으로 정량화한 결과는 <Table 5>와 같다. 자율주행차량의 혼입율이 70% 일 때, 통행시간절감 효과는 수치적으로 거의 2배에 가까운 것을 알 수 있다.



<Fig. 4> Network wide representation of the autonomous vehicles' penetration effects

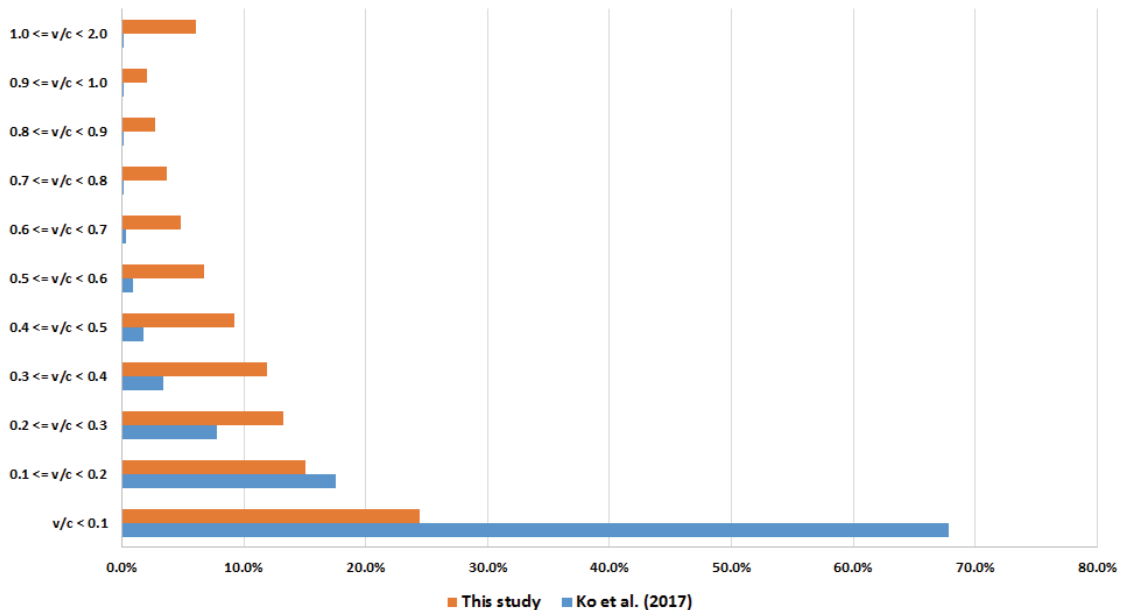
<Table 6> Reduced Travel Time Under Different Scenarios

unit : vehicle · mins./day

	0% autonomous vehicle	30% autonomous vehicle		70% autonomous vehicle	
	total travel time	total travel time	total reduction	total travel time	total reduction
time cost	468,737,688	446,200,938	22,536,749	426,720,754	42,016,933

이러한 개선효과를 더욱 자세하게 살펴보기 위해 통행배정결과를 바탕으로 전체 도로에 대한 V/C (volume/capacity)를 산정한 후, 이의 분포를 기존 연구 결과 Ko *et al.*(2017)과 비교하였다. <Fig. 5>는 기존 연구결과와의 V/C 분포 비교결과로 대부분의 혼잡이 사라질 것으로 예측한 기존 연구결과와 본 연구와의 결과는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 기존 연구결과는 V/C가 LOS (Level Of Service) A 혹은 B 수준에 해당되는 링크가 대부분임에 반해 본 연구의 결과는 약 15% 이상의 링크 (V/C ≥ 0.6)에서 혼잡이나 교통류의 흐름이 불안정해지기 시작해지는 것으로 예측되었다. Ko *et al.*(2017)의 경우, 자율주행차량의 도입으로 인한 최대 용량증가가 약 3배까지 이를 것이라는 예측을 바탕으로 분석되어 가장 높은 규격의 도로에서만 약 1.9배의 용량증가를 바탕으로 한 본 연구의 결과와는 매우 다른 V/C 분포를 보이는 것으로 판단된다. Ko *et al.*(2017)의 연구는 용량증가에 대해 본 연구의 접근처럼 미시적 분석에 대한 결과를 근거로 하기 보다는 가정에 의한 분석결과를 적용하였기 때문으로 판단된다. 위 결과는 모든 이용자들이 상호간의 경로선택을 알고 있다는 완전경쟁시장의 가정을 바탕으로 한 UE기준의 통행배정결과이므로 현재의 최단거리 기준 통행경로 선택이 계속된다면 이 보다는 더욱 높은 혼잡이 예상된다.

Distribution of V/C ratio



<Fig. 5> Comparison of the V/C distributions with the existing studies

### Ⅲ. 결 론

#### 1. 시사점

자율주행차량의 도입효과를 미시적 및 거시적 관점에서 분석한 본 연구의 결과는 자율주행 시대의 도로 정책에 대해 중요한 시사점을 안겨준다. 첫째, 자율주행차량의 단계적 도입방식에 대한 방향을 제시하고 있다. 미시적 교통류 분석 결과에 의하면, 고규격 도로 일수록, 그 도입효과가 다른 유형의 도로에 비해 큰 것을 알 수 있다. 고규격 도로의 주 기능이 이동성이므로 자율주행의 도입효과가 가장 크게 나타나는 고규격 도로를 필두로 자율주행 시스템을 추진하는 것이 효과적임을 의미한다. 여기에, 100% 자율주행 시스템이 구현되었을 때의 효과를 100이라고 본다면 혼입률이 80%일 때 50~ 60 정도가 실현되는 분석 결과에 의하면 일반차량에 의해 자율주행의 효과가 반감되는 것을 알 수 있다. 따라서 자율주행 시스템을 고규격 도로의 자율주행차량 전용으로 추진할 필요가 있음을 시사한다. 이렇게 될 경우, 일반차량과 혼재상태를 허용하는 것보다 그 효과가 더욱 극대화 될 것으로 판단되며 이는 교통안전 측면에서도 합리적인 선택일 것이다.

두 번째는 자율주행 시스템에서의 차량 경로 선택에 대한 시사점이다. 자율주행 시스템이 보편화되는 시점은 지금보다 훨씬 많은 이용자들이 통행경로 선택에 있어 네비게이션 시스템을 이용할 것이다. 현재에도 스마트폰의 보편적인 보급으로 인해 많은 이용자들이 경로선택에 있어 네비게이션에 의존하는 현실에 근거하면 자율주행 시대에는 경로선택부터 모든 것을 자율주행차량이 자동적으로 결정하는 상황은 쉽게 예상 가능하다. 이러한 경로정보는 지금보다 훨씬 광범위하고 정확한 교통소통 자료를 바탕으로 생성될 것이다. 그러한 상황에서 경로정보 제공자는 자신이 제공한 경로정보를 통해 전체 시스템의 통행비용을 결정 할 수 있게 된다. 경로정보의 생성은 다양한 관점에서 생성가능한데, 크게 이용자 관점(UE)과 시스템 최적(System Optimal) 측면으로 구분할 수 있다. 경로정보의 생성을 이용자 균형 (UE)에 의거하여 생성하면 모든 이용자가 더 이상 통행시간을 단축시킬 수 없는 경로를 제공받을 수 있고, 체계최적(SO)의 측면에서 경로를 생성하면 전체 시스템의 비용을 줄일 수 있게 된다. UE 와 SO간의 차이가 없어지는 상황은 차량의 추가적인 주행으로 인한 한계비용이 거의 0에 가까운 혼잡이 없는 경우인데, 이 경우 (Ko et al., 2017), 이용자 균형에 의한 경로와 체계최적에 의한 경로가 동일하게 시스템의 최소 비용을 나타내므로 경로제공에 대한 정책적 방향 설정이 필요하지 않게 됨을 의미한다.

하지만, 본 연구의 결과, 즉, 자율주행 시대에도 congestion free 상태를 기대하기 어려운 장래 교통상황은 두 통행배정간의 차이가 발생한다는 것으로 경로 제공을 통해 시스템 전체의 비용을 제어할 수 있는 상황에서 시스템의 전체 비용을 최소화하기 위한 방안으로 경로생성 및 제공에 대한 정책적 가이드라인, 예를 들면, 경로 정보 제공자에게 SO에 기반한 경로 정보를 제공하도록 유도하는 정책 등 이 필요할 수 있음을 시사한다.

#### 2. 요약 및 맺음말

운전자의 개입이 없이 인간의 운전보다 정확하고 신속한 차량 제어를 통한 자율주행이 어떠한 파급효과를 미칠 것인가에 대한 연구가 필요한 시점에서 본 연구는 미시적, 거시적 접근방법을 적용하여 자율주행차량의 도입으로 인한 도로 네트워크의 효율성 변화분석을 수행하였으며 그 기대효과를 제시하였다. 미시적 교통류 분석을 통해서 자율주행차량의 세밀한 주행 능력으로 인한 기존 도로의 용량증대 효과를 알아보았으며, 그러한 효과가 고규격 도로, 그리고 혼입률이 높아야만 극대화 될 수 있음을 파악할 수 있었다. 이를

거시적인 대규모 네트워크의 효율성 분석에 적용한 결과, 자율주행차량이 대부분을 차지하는 상황에서도 교통 혼잡이 없는 (congestion free) 상황은 기대할 수 없어, 장래 경로정보제공에 대한 효율성 증진 측면의 정책이 필요함에 대한 시사점을 제시할 수 있었다.

본 논문은 자율주행차의 도입 영향을 파악하기 위해 미시적 교통류 분석의 결과를 거시적 모형인 교통수요 분석 모형에 적용함에 있어 VDF를 이용하였는데, 이러한 접근은 이론적 배경이 강하지 못해 본 연구의 한계로 지적된다. 향후, 이를 개선하기 위해 수학적 결정론에 기반한 문제의 formulation과 이를 해결하기 위한 iterative method와 같은 solution algorithm의 개발을 향후 연구 방향으로 남겨 둔다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 국토연구원의 연구보고서 (Lee *et al.*(2017) An Evaluation of the impacts of Autonomous Vehicles on Use of National Territory, KRIHS)를 바탕으로 작성되었으며, 대한교통학회 제77회 학술발표회 발표집에 수록된 내용을 재구성 한 것입니다.

## REFERENCES

- Anderson J. M., Kalar N., Stanely K. D., Sorensen P., Samaras C. and Olumatola O. A.(2014), *Autonomous vehicle technology; A guide for policymakers*, RAND Corporation
- Bose A. and Ioannou P. A.(2003), "Analysis of Traffic Flow with Mixed Manual and Semiautomated Vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 4, pp.173-188.
- Center for Urban Transportation Research(CUTR)(2013), *Highway capacity Impacts of autonomous vehicles: an assessment*.
- Department for Transport (DfT)(2016), *Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow*.
- Dokic J., Muller B. and Meyer G.(2015), *European roadmap smart systems for automated driving*, European Technology Platform on Smart System Integration.
- Fernandez P. and Nunes U.(2012), "Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 1, pp.91-106.
- Kesting A., Treiber M. and Helbing D.(2010), "Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity," *Philos. Trans. Roy. Soc. A* 368, pp.4585-4605.
- Ko Y., Yook D. and Noh J.(2017), *Traffic network capacity change effect due to the autonomous vehicle's proportions, A Study on the national territory 93issue*, Korea Research Institute for Human Settlements, pp.17-24.
- Lee B., Yook D., Kim K., Cho C., Jang K., Bellemans T. and Cho S.(2017), *An Evaluation of the impacts of Autonomous Vehicles on Use of National Territory*, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong.
- Litman T.(2013), *Autonomous vehicle implementation predicitions; Implications for transport planning*,

Victoria Transport Policy Institute.

- Milanes V. and Shladover S. E.(2014), “Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data,” *Transportation Research Part C* 48, pp.285-300.
- Moon Y.(2015), “Autonomous system development direction and traffic-flow measure of effectiveness,” *Telecommunications Review*, vol. 25, no. 3, SKtelecom, pp.442-448.
- National Statistical Office(2016), *future population projection: 2015~2065years, report material*.
- Park I., Lee J., Lee J. and Hwang K.(2015), “Highway traffic-flow effect due to the autonomous vehicle's proportions,” *Korea ITS Society Journal*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Pinjari A. R., Augustin B. and Menon N.(2013), *Highway capacity impacts of autonomous vehicles: An assessment*, University of South Florida.
- Talebpour A. and Mahmassani H. S.(2016), “Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput,” *Transportation Research Part C* 71, pp.143-163.
- Tientrakool P., Ho Y. -C. and Maxemchuk N. F.(2011), “Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance,” *Vehicular Technology Conference*, IEEE, pp.1-5.
- Vissim, PTV Vissim manual, PTV Group, Accessed <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/training-support/support/ptv-visum/>, 2017.12.
- Wardrop J. G.(1952), “Some theoretical aspects of road traffic research,” *Proc. Inst. Civil Engr.*, vol. 2, no. 1, pp.325-378.
- 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.