

자율주행 자동차 도입 수준에 따른 도시부 도로 탄소배출량 감소효과 추정

Estimation of Carbon Emissions Reductions by the Penetration Rates of Autonomous Vehicles for Urban Road Network

이 혁 준* · 박 종 한** · 고 준 호***

* 주저자 : 한양대학교 도시대학원 도시·지역개발경영학과 석사과정

** 공저자 : 한양대학교 도시대학원 도시·지역개발경영학과 박사과정

*** 교신저자 : 한양대학교 도시대학원 도시·지역개발경영학과 교수

Hyeok Jun Lee* · Jong Han Park* · Joonho Ko*

* Graduate School of Urban Studies, Hanyang Univ, Seoul

† Corresponding author : Joonho Ko, jko@hanyang.ac.kr

Vol.20 No.6(2021)

December, 2021
pp.162~176

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.6.162>

Received 25 October 2021
Revised 1 November 2021
Accepted 7 December 2021

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

요 약

최근 활발한 기술개발이 이루어지고 있는 자율주행 자동차는 다양한 교통문제를 해결하는 데 기여할 것으로 기대되고 있다. 국내 도로부문 온실가스 배출량이 1억 톤이 넘는 등 환경오염 문제가 심각해지면서 자율주행 자동차 도입에 따른 환경오염의 절감 부문에 대한 연구가 필요하다. 하지만 환경오염 절감 측면에서 자율주행에 관련한 실증적 연구는 미비한 상태이다. 이에 본 연구는 미시 시뮬레이션을 통해 서울시 개포동 일대 교차로 8개소를 대상으로 자율주행 자동차 도입에 따른 네트워크 성능변화를 분석하고 이를 통해 이산화탄소 배출량을 추정하였다. 분석결과 내연기관 자율주행 자동차 혼입 시 네트워크 전체 탄소 절감효과는 미미하였으며 혼입율이 적은 상황에서는 오히려 증가하기도 했다. 반면 자율주행 전기자동차 혼입 시 네트워크 전체 탄소 발생량이 크게 감소하는 것으로 분석되었다. 자율주행 자동차 도입만으로는 충분한 탄소배출량 감소 효과를 얻기는 어려우며 적절한 수요관리와 근본적인 연료사용의 전환을 통해 교통 부문 탄소배출을 줄여나가야 할 것으로 보인다.

핵심어 : 자율주행 자동차, 전기 자동차, 탄소 저감, 미시 시뮬레이션 분석

ABSTRACT

Recently, Autonomous Vehicle(AV) has been expected to solve various transportation problems. As the problem of environmental pollution become serious, research to reduce pollution is needed. However, empirical research on AV related pollution is insufficient. Based on this background, this study analyzed network performance changes and CO₂ emissions introduced AVs and Electric Vehicles(EV) in eight intersections. The results show that when AVs with internal combustion engines were, the effect of carbon reduction over the network was insignificant. On the other hand, it was that the total amount of CO₂ generated in the network decreased significantly when EVs and autonomous electric vehicles were. 2 emissions in the transportation sector.

Key words : Autonomous Vehicle, Electric Vehicle, Carbon Reduction, Micro Simulation Analysis

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 세계 각국에서는 자율주행 자동차와 V2X(Vehicle-to-Everything) 등의 자율주행 인프라에 대한 기술발전과 그에 따른 실증 및 시범적 운영이 활발하게 이루어지고 있다. 전문가들은 이르면 2025년, 늦어도 2035년까지는 이러한 기술이 실용화되어 자율주행 자동차가 교통혼잡, 교통사고 등 기존의 다양한 교통문제를 근본적으로 해결할 수 있을 것이라 기대하고 있다(Underwood, 2014). 자율주행 자동차는 차간 간격 최소화 및 감속 최적화로 도로용량 및 교통류의 안정성 증대 등을 실현하여 교통 흐름에 긍정적인 효과를 미칠 것이라 예상된다(Fernandez and Nunes, 2012). 반면, 자율주행 자동차가 노인, 장애인, 면허가 없는 젊은 층 등 운전이 제한된 계층의 차량 이용을 증가시켜 새로운 수요 및 공차 통행으로 인해 오히려 총 통행량과 차량 주행거리가 증가할 것이라는 우려도 있다(Harper et al., 2016).

국내에서는 2027년까지 자율주행 4단계 상용화를 목표로 자율주행 기술개발 및 실증 사업이 진행 중이다. 판교와 세종시에서는 자율주행 버스를 상시 운행하고 있으며 이외에도 고속도로, 도심 내 자율주행 자동차 운행, 수요대응형 자율주행 택시 운행 등 각종 자율주행 시범운행이 실시되고 있다. 아직은 제한적이지만 점차 자율주행 상용화가 다가오고 있으며 자율주행 자동차의 도입 형태에 따라 미래 교통은 이상향이 될 수도 악몽이 될 수도 있다(Sperling, 2018). 이러한 측면에서 볼 때 자율주행 상용화에 앞서 예상되는 사회·경제·환경적 파급효과 및 사회 전반적 편익에 있어 다방면의 연구가 필요한 시기라 판단된다.

최근 급격한 기후변화로 인해 발생하는 각종 재난·재해가 증가하면서 세계 196개국은 2015년 파리협정을 체결하여 21세기 말까지 지구 평균온도 상승을 1.5°C까지 제한하도록 규정하였다(Lee, 2016). 우리나라 역시 “2050 탄소 중립” 추진전략을 발표하고 “탄소중립기본법”이 의결되는 등 여러 탄소 저감 정책을 모색하고 있다. 한국교통안전공단의 교통부문 온실가스관리 시스템(KOTEMS, 2021)에 따르면 환경오염 측면에서 2018년 기준 연간 도로부문 온실가스 배출량은 1억 톤 이상으로 국가 온실가스 배출량의 약 13%에 달한다. 도로부문의 경우 온실가스 저감 잠재성이 큰 부문 중 하나로 타 부문에 비해 상대적으로 적은 투자로 큰 감축 효과를 얻을 것으로 기대된다(Kang et al., 2009). 이에 따라 효과적인 온실가스 배출량 감소 목표 달성을 위해 도로부문의 온실가스 저감에 대한 방안 수립 및 시행이 필수적이라 판단된다.

그러나 국내외 연구를 살펴보면 온실가스 저감 측면에서 자율주행 자동차 도입효과에 대한 연구들은 개념적인 사례가 대부분이며, 특히 국내 자료를 이용한 네트워크 단위의 정량적 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 국내 자료를 이용한 미시적 분석을 통해 자율주행 자동차의 도입에 따른 네트워크 단위의 성능 변화로 인한 이산화탄소 배출량의 감소 효과를 살펴보고, 내연기관 차량과 전기 자동차의 이산화탄소 배출량 차이를 비교 분석한다. 본 연구 결과를 장래 온실가스 저감 부문의 교통정책 수립에 있어 기초자료로 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 서울시 대치동, 개포동 일대의 도곡역 사거리, 대치역 사거리, 구룡초교 사거리, 개포고교 사거리, 영동5교 사거리, 개포2동주민센터 삼거리, 개포도서관 삼거리, 경기여고 사거리의 8개의 교차로를 포함하는 네트워크를 연구대상으로 선정하였으며, 네트워크 내부 및 주변 이면도로를 제외한 교차로 사이의 링크들을 공간적 범위로 설정하여 자율주행 자동차의 운행이 도시부 도로망에 미치는 영향을 분석하고자 하

였다. 교통망 구축 및 교통량 자료 수집과 관련한 시간적 범위는 2019년 10월 10일 목요일, 침두 시간인 오전 8시~ 오전 9시이다.

본 연구는 자율주행 자동차와 미시 시뮬레이션 분석 및 이산화탄소 저감에 대한 이론적 고찰, 연구 방법론 구축, 자율주행 자동차 및 전기자동차 혼입에 따른 네트워크 효과분석 순으로 진행된다. 첫 번째로, 자율주행 자동차 도입에 따른 효과분석에 대한 연구 동향을 파악하였다. 또한, 연구의 방법론적 기반인 미시 시뮬레이션 분석에 대한 선행 연구 검토와 이산화탄소 저감 관련 연구 검토를 통해 분석 방법에 대하여 고찰하였다. 두 번째로, 연구대상 네트워크 범위를 설정하고 본 연구에서 적용할 차량 특성 및 자율주행 자동차 특성을 결정하였다. 이를 바탕으로 SUMO를 활용하여 미시 시뮬레이션 환경을 구축하였고 더불어 이산화탄소 배출량 산정방식을 결정하였다. 마지막으로 전기차 여부를 고려한 도입 차종을 기준으로 시나리오를 구분하여 혼입율에 따른 교통류 변화 및 차종 특성을 기반으로 이산화탄소 배출량의 변화를 분석 후 각 시나리오를 비교 분석하였다. 이에 따라 본 연구는 자율주행 자동차 도입에 따른 도심 네트워크의 이산화탄소 배출량 감소효과를 분석하고 결과를 도출하였다.

II. 선행 연구 검토

1. 자율주행 자동차 도입 효과에 관한 연구

자율주행 자동차 도입으로 인한 주요 파급효과로는 도로용량의 증대 효과가 있다. 도로용량 증대 효과의 경우 자율주행 자동차 도입 시 안전한 주행을 위한 최소 차간거리가 줄어들기 때문에 동일한 시간에 더 많은 차량을 처리할 수 있어 나타나는 결과이다(Park et al., 2018). Hartmann et al.(2017)은 다양한 자율주행 자동차 수준이 교통류에 미치는 영향을 조사하였다. 연구결과 긍정적인 용량 증대 효과는 작은 차두시간을 유지하는 자율협력주행 차량의 경우에만 나타났는데 그 정도는 0%부터 40%까지로 도로 구조에 따라 다양했다. Tientrakool et al.(2011)은 V2V(Vehicle-to-Vehicle) 통신이 있는 자율주행 자동차와 없는 자율주행 자동차를 구분하여 연구를 진행하였다. 고속도로에서 V2V 통신이 없는 자율주행 자동차의 경우 43%, V2V 통신을 하는 자율주행 자동차는 273%의 도로용량 증대 효과가 나타났다.

안전한 차량 주행속도를 결정하는 중요한 요인에는 운전자의 반응속도가 있다. 자율주행 자동차는 운전자의 반응시간을 고려할 필요가 없기 때문에 주행속도가 증가 효과가 나타난다(Lee, 2016). Arnaout and Bowling(2014)은 연속류에서 자율주행 자동차 도입에 따른 평균통행속도 변화에 대한 연구를 진행하였다. 6km 연장의 4차선 트랙구조의 연속류 시뮬레이션 환경을 구성하고 차종을 승용차, 화물차, 자율주행 자동차로 구분하였다. 교통량 및 혼입율을 차등 적용하여 분석한 결과 자율주행 자동차 혼입율이 증가할수록, 교통량이 많을수록 큰 평균속도 증가 효과가 나타났다.

자율주행 자동차가 도입되면 감가상각비, 보험료, 유류비, 주차비 등의 차량운영비가 현저히 줄어들 것이다(Anderson et al., 2014; Dokic et al., 2015). 차량 운행비용의 절감은 통행수요를 유발시키는 요인으로 작용하여 통행수요를 증가시킬 것으로 예상된다(Pinjari et al., 2013). Golbabaei and Yigitcanlar(2020)에 따르면 공유 자율주행 자동차 이용으로 인한 승객의 짧은 통행 시간과 저렴한 요금이 장거리 통행에 대한 수요 증가와 대중교통 이용 감소로 이어질 수 있다. 또한 Hensher(2018)는 공유 자율주행 자동차 이용과 같은 소유에서 공유로의 패러다임 변화에서 공유 자율주행 자동차의 요금이 낮다면 이는 단지 일반 자동차 이용을 줄일 뿐, 오히려 공유 자율주행 자동차 이용 증가로 혼잡을 증가시킬 가능성이 있음을 경고한다.

2. 자율주행 자동차 이산화탄소 배출 저감 효과에 관한 연구

에코 드라이빙은 엔진 효율이 가장 높은 속도에서의 주행 시간의 최대화, 감가속 주기의 빈도를 줄여 낭비되는 에너지를 최소화함으로써 이루어진다(Wadud et al., 2016 ; Barth and Boriboonsomsin, 2009). 자율주행 자동차는 이 과정을 자동화하여 부드러운 감가속을 통한 주행 사이클 조정, 주변 차량 감지, 차량 군집의 형성을 통해 연비를 개선하고 교통 충격과 전파를 최소화하며 배기가스를 줄일 수 있다(Fagnant and Kockelman, 2015). Greenblatt and Saxena(2015)는 저탄소 발전과 함께 공유 자율주행 전기자동차 이용 시 기존 내연기관 자동차에 비해 90% 이상의 이산화탄소 저감 효과가 있다고 추정한다. 반면 Anderson et al.(2014)은 자율주행 자동차로 인해 현재 운전이 불가능한 인구의 개인 차량 사용, 통행 횟수 증가 등으로 추가 총 주행거리가 발생하여 오히려 연료 소비 및 배출량을 크게 증가시킬 것으로 예상한다. Choi and Bae(2010)는 UFNCCC에 승인된 베이스라인 방법론을 바탕으로 Matlab7.1을 활용한 시뮬레이션을 통해 자율주행 자동차 도입에 따른 이산화탄소 배출량을 분석하였다. 연료별, 차종별, 교통량에 차등을 두어 분석한 결과 자율주행 자동차 도입 시 혼잡한 교통상황, 저속 주행상황에서 자율주행 자동차가 일반 차량에 비해 배출량이 적은 것으로 나타났다. Olia et al.(2016)은 시뮬레이션 분석을 통해 토론토 교통망을 대상으로 협력주행 차량 혼입율에 따라 이산화탄소 배출계수 감소량을 분석하였다. Paramics 시뮬레이터를 이용하여 미시적 분석을 수행하였고 Paramics에서 제공하는 Comprehensive Modal Emission Model(CMEM)을 이용하여 이산화탄소 계수를 산출하였다. 분석결과 협력주행 차량 비율이 많아질수록 이산화탄소 배출량이 감소하였으나 혼입율이 50%를 넘어서면 협력주행 차량들의 주행 경로가 중복되어 오히려 혼잡이 증가해 이산화탄소 배출량이 증가하는 것으로 나타났다.

기존 연구를 살펴본 결과 자율주행 자동차의 도입으로 인한 다양한 효과 분석이 진행되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 기존 연구들은 개념적인 연구이거나 가상의 시뮬레이션 네트워크를 기반으로 한 분석이 대부분이며 특히, 국내 연구에서는 실제 도시부 네트워크 및 단속류를 대상으로 진행한 정량적 연구가 미비한 실정이다. 보다 현실적인 연구를 위해서는 실제 네트워크를 기반으로 실제 교통량을 반영할 필요가 있으며 도심부의 자율주행 도입 효과 분석을 위해 단속류를 대상으로 한 네트워크 단위의 연구가 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구는 서울시 개포동 일대의 교차로 8개소 네트워크를 분석 대상으로 설정하여 자율주행 자동차 도입으로 인한 도심부 네트워크 성능 및 이산화탄소 배출량 변화를 분석하고자 하였다. 또한, 보다 현실적인 효과 측정을 위하여 분석 대상지의 실제 첨두 시간 교통량 자료를 반영하여 연구를 진행하였다.

Ⅲ. 연구 방법론

1. 분석의 개요

1) 분석지역

본 연구는 서울시 대치동, 개포동 일대의 도곡역 사거리, 대치역 사거리, 구룡초교 사거리, 개포고교 사거리, 영동5교 사거리, 개포2동주민센터 삼거리, 개포도서관 삼거리, 경기여고 사거리의 8개의 교차로를 포함하는 네트워크를 분석지역으로 설정하였다. 분석을 위한 교통량은 첨두 시간대인 2019년 10월 10일 목요일 오전 8시 ~ 9시에 수집된 자료를 활용하였다. 분석대상 지역의 개요는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Information of study area

Contents	Value
Length	19.3km
# of lane	1~5-lane
# of intersection	8 intersections
Analysis hour	a.m. 08:00 ~ a.m. 09:00
Speed limit	50km/h

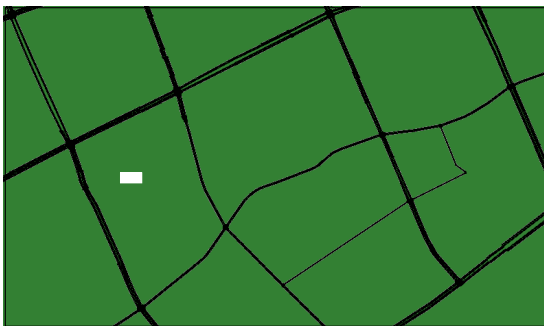
2) SUMO Simulator

본 연구에서는 링크 별 차량 주행거리 및 주행속도 산정, 개별 차량의 파라미터 변경 등을 위해 미시적 분석을 수행하였다. 미시적 분석을 위한 도구로는 SUMO(Simulation of Urban MObility)를 활용하였다. SUMO는 구성된 교통수요가 주어진 도로망에서 어떻게 움직이는지를 보여주는 다모듈·미시교통 시뮬레이션으로 신호계획 평가, 경로 선택과 경로 변경, 차량 간 커뮤니케이션, 교통량 예측, 교통 모니터링 평가 등 다양한 교통평가가 가능하기 때문에 독일, 영국, 호주 등 여러 국가의 프로젝트나 연구에서 활용하고 있다. SUMO를 통한 시뮬레이션 분석과정은 네트워크 및 신호체계 구축, OD Matrix 구축, 통행배정, 시나리오 구성의 네 단계로 진행되었다.

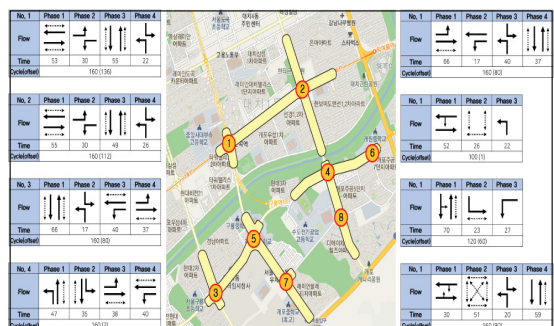
2. 시뮬레이션 구축

1) 네트워크 및 신호체계 구축

네트워크 구축은 무료 지도 서비스인 오픈스트리트맵(www.openstreetmap.org)에서 제공하는 도로망 파일을 기초자료로 활용하였다. 이후 네이버지도 지적편집도 등을 활용하여 네트워크를 비교 및 검토하여 SUMO의 NetEdit 프로그램을 통해 기초자료와 지적편집도를 비교하여 차폭, 제한속도를 수정하는 등 도로망을 재구축하였다. 도로망 속성의 Input은 위치와 차로 수, 제한속도, 회전제약, 신호체계 등으로 구분된다. 도로망의 위치 및 도로 위계는 오픈스트리트맵 사이트의 자료를 활용하였고 도로의 제한속도는 서울중심부 제한속도인 50km/h로 설정하였고 구축된 시뮬레이션 네트워크는 <Fig. 1>과 같다. 신호체계는 서울지방경찰청의 ‘표준 신호제어기 데이터베이스’의 평일 오전 8시~9시의 교차로 신호체계를 활용하여 <Fig. 2>와 같이 각 교차로의 현시, off-set 등을 적용하였다.



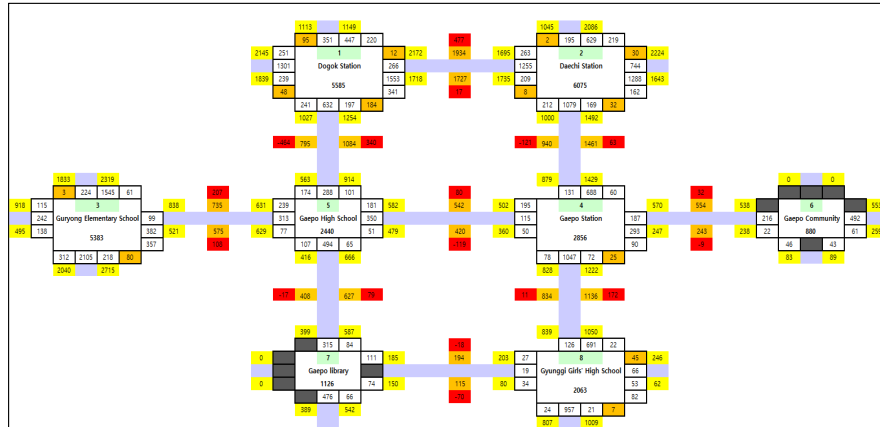
<Fig. 1> SUMO Simulation Network



<Fig. 2> Intersection Traffic Signal Phase

2) OD Matrix 구축

본 연구에서는 시뮬레이션에 사용할 교통량 및 경로 자료를 구축하기 위해 <Fig. 3>의 대상지 지역 일대 교통량 자료를 가공하여 OD Matrix를 산출하였다. OD Matrix 구축을 위해 먼저 각 링크에서 네트워크에 진입하는 교통량을 실제 통행량의 통행경로 비율에 따라 직진, 좌/우회전, 유턴의 경로로 나누었다. 이후, 나란 각 교통량으로부터 파생되는 경로들의 경우의 수를 GRG(Generalized Reduced Gradient) 비선형 알고리즘을 이용하여 각 링크 별 진출 교통량에 근사하도록 최적화하였다. 그 결과는 <Fig. 4>와 같으며 실제 각 링크 진출입량 대비 오차율 2.7% 이내로 실제 교통류 패턴과 매우 근사하였다.



<Fig. 3> Site Traffic Volume Data

구분	Destination																												Total	
	1C	1D	2B	2C	7A	8A	8B	3A	3C	3D	6A	6B	12A	12C	15B	15D	24B	24D	35A	35C	45A	45C	48B	48D	57B	57D	78A	78C		
1C	95	351	99	81	7	15	0	1	5	5	7	1	0	0	0	447	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1114	
1D	251	48	577	471	91	193	0	16	58	62	53	5	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1842	
2B	277	857	30	744	57	56	0	19	69	75	40	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2228	
2C	134	60	219	2	94	321	0	9	34	36	26	3	0	0	0	0	0	0	121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1049	
7A	44	69	133	109	0	40	16	4	15	16	29	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	548	
8A	105	184	269	223	65	7	21	10	35	37	51	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1012	
8B	3	2	46	37	3	82	45	1	1	1	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	250
3A	16	26	49	40	11	14	5	80	2105	312	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2709	
3C	18	29	53	45	12	16	5	1545	3	224	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2013	
3D	4	7	14	11	3	4	1	138	115	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	319	
6A	5	7	13	11	3	4	3	5	16	18	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130	
6B	51	81	142	118	37	46	16	0	2	2	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	556	
12A	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
12C	0	0	469	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	469
15B	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	340
15D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24D	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
35A	20	13	25	20	5	7	2	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120
35C	0	0	0	0	0	0	0	0	25	88	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	207
45A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	34	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
48B	0	0	0	147	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	172
48D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57B	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
57D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1258	2193	1674	2090	358	816	114	1962	2580	918	304	67	0	0	0	648	0	153	0	0	119	0	0	14	0	18	70	18		

<Fig. 4> Simulation OD Matrix

3) 통행 배정 및 차량 속성

차량 속성의 Input 값은 차량 경로와 차종별 특성으로 나뉜다. 차량 경로의 경우 작성한 OD Matrix를 기반

으로 SUMO의 Daurouter 툴의 기능을 이용하여 개략적인 경로를 설정하고 통행을 배정하였다. 그러나 Daurouter 툴의 알고리즘을 이용한 경로와 본 연구에서 교통량 비율을 기반으로 산정한 차량의 통행 경로와 상이한 경우가 있어 세부적인 경로와 교통량을 확인 후 수정하여 대상지 교통류에 적합하게 조정하였다.

본 연구에서의 차종은 모두 승용차로 가정하여 진행하였으며 승용차는 일반 자동차와 자율주행 자동차로 구분된다. 일반 자동차의 차종 특성은 SUMO에서 제공하는 Vehicle Type Parameter Default의 기본값을 이용하였고 자율주행 자동차의 차종 특성의 경우 Lu et al.(2019)의 SUMO를 이용한 네트워크 용량 미시 분석에서 이용한 자율주행 차량 특성 값을 참고로 하였으나 국내 교통상황에 비추어 보았을 때 다소 맞지 않은 수치들이 있어 일부 조정하여 사용하였다. 운전자의 불완전성을 나타내는 Sigma 값은 운전자의 불규칙한 감가속 정도 및 인지-반응시간 특성에 영향을 미치는 파라미터이다. 자세한 차량 속성은 <Table 2>와 같이 설정하였다.

<Table 2> Vehicle Parameter used in Simulation

Vehicle Type	Max Speed	Accel	Decel	Length	Min Gap	Sigma
Human Driven Vehicle	100km/h	2.6m/s ²	4.5m/s ²	4.3m	2.0m	0.5
Autonomous Vehicle	100km/h	3.5m/s ²	4.5m/s ²	4.3m	1.0m	0.0

※Sigma : Driver imperfection (0 ~ 1)

4) 분석 시나리오 구성

본 연구의 시나리오는 일반 내연기관 자동차 비율이 100%인 상황에서 내연기관 자율주행 자동차 혼입 시나리오, 자율주행 전기자동차 혼입 시나리오의 2가지로 구성된다. 또한, 자율주행 혼재 시 혼입율에 따른 네트워크의 성능 변화를 측정하고 혼입율 별 성능 및 효과의 분석을 위해 시나리오별 차량 혼입율에 따른 세부 시나리오를 구성하였다. 세부 시나리오는 혼입율 0%인 현 상태부터 100%인 완전자율주행 상태까지 10%씩 혼입율에 차등을 두어 11가지로 구성하였다. 자세한 시나리오 구성은 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Simulation Scenario Setting

Contents	Vehicle Type	Penetration Rate
Scenario1	Human Driven Vehicle + Autonomous Vehicle (Engine)	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%
Scenario2	Human Driven Vehicle + Autonomous Vehicle (EV)	

3. 분석의 방법

1) SUMO 자율주행 자동차 특성

SUMO의 차량 주행 모델은 Krauss의 Car-following Model을 기반으로 한다. 이 모형은 차량의 안정적인 감가속을 통해 개별 차량이 선행 차량과의 최소 안전거리를 유지하면서 최고속도에 도달할 수 있도록 설계되었다. Car-following model의 안전주행 속도는 식(1)과 같이 표현된다.

$$v_{safe} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)t_r}{\frac{v_l(t) + v_f(t)}{2b} + t_r} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, v_{safe} : 안전 주행속도(m/s)
 $v_l(t)$: t일 때 선행 차량 주행속도(m/s)
 $g(t)$: t일 때 선행 차량과의 거리(m)
 t_r : 운전자의 인지-반응 시간(sec)
 $v_f(t)$: t일 때 추종 차량 주행속도(m/s)
 b : 차량 최대 감속도(m/s²)

여기서 운전자 특성, 차량 특성에 따라 t_r 과 b 의 값이 정해진다. 자율주행 자동차는 운전자의 불완전성인 σ 값을 0으로 하여 t_r 을 0으로 수렴시키고 v_{safe} 를 최대로 만들어 자율주행 자동차가 사람에 의한 운전에 비해 보다 원활한 주행을 가능하게 한다.

2) CO₂ 배출량 측정

차량의 온실가스 배출량을 산정하려면 차량 연료소비의 전 과정(life-cycle)에서 발생하는 온실가스의 양을 산정해야한다. 차량 연료소비 전 과정은 휘발유 연료를 예로 들었을 때, 산지 원유 추출부터, 운반, 자동차에 주유 되기까지의 과정인 Well-to-Tank(WTT) 과정과 차량 운행과정에서 온실가스가 발생하는 Tank-to-Wheel(TTW) 과정이 합쳐진 Well-to-Wheel(WTW) 과정을 의미한다. 내연기관의 WTW 온실가스 배출량을 산정은 차량 평균 연비를 이용하여 WTT과정과 TWW 과정의 연료 소비량 당 온실가스 발생량을 계산하는 방식으로 이뤄진다. 그러나 본 논문에서는 운행 속도에 따른 이산화탄소 발생량을 산정하기 때문에 평균 차량 연비 및 연료 소비량을 변수로 이용할 수 없어 WTT과정에서 발생하는 온실가스의 양을 반영하는 데에 어려움이 있다. 또한, JRC et al.(2014)에 따르면 중형 휘발유 차량의 WTT 과정에서 발생하는 이산화탄소의 양은 전체 WTW 과정의 약 16.7%로 비중이 적으므로 본 논문에서는 WTT 과정에서 발생하는 온실가스의 양은 반영하지 않았다.

내연기관의 자동차의 CO₂ 배출량은 국립환경과학원(2013)의 차종별/연료별 온실가스 및 오염물질 배출량 산정식을 바탕으로 링크 별 평균속도와 통과 교통량, 도로연장을 이용하여 산출하였다. 개별 차량의 km당 배출량 산정식은 식(2)와 같다.

$$E = \alpha V^\beta \dots\dots\dots (2)$$

여기서, E : 차량당 배출량(g/km)
 V : 차량 주행속도(km/h)
 α, β : 계수

각 차종/연료별 배출계수가 정해져 있으나 본 연구에서는 모든 차량을 중형 휘발유 차량으로 가정한다. 이 때, $\alpha=1564.9300$, $\beta=-0.5963$ 이다. 이 배출량을 기반으로 식(3)과 같이 총 CO₂ 배출량을 산출한다.

$$E_T = \sum_i E_i V_i l_i \dots\dots\dots (3)$$

여기서, E_T : 네트워크 전체의 총 CO₂ 배출량(g)
 E_i : 링크 i 의 차량 당 CO₂ 배출량(g/km)
 V_i : 링크 i 의 통과 교통량(대)
 l_i : 링크 i 의 도로 연장(km)

전기자동차는 차량 운행 과정에서 이산화탄소를 배출하지 않는다. 그러나 전기 자동차 운행에 사용되는 전력이 생산되는 과정에서 이산화탄소가 배출되기 때문에 본 연구에서는 이를 전기자동차의 CO₂ 배출량으로 설정한다. 전기 자동차의 CO₂ 배출량은 전력 발전단 온실가스 배출계수, 전비, 통과 교통량, 도로연장을 이용하여 산출한다. 개별 차량의 km당 배출량 산정식은 식(4)와 같다.

$$E = \frac{\alpha_E}{W} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, E : 차량당 배출량 (g/km)
 W : 전비 (km/kWh)
 α_E : 전력발전단 온실가스 배출계수(kgCO₂ /kWh)

전기자동차의 차종 별 전비는 각각 다르나 본 연구에서는 모두 같은 기종의 전기자동차로 가정하고 현대 IONIQ5 Standard 2WD 모델의 표준제원 정부 공인 도심 표준연비인 5.8km/kWh를 사용하였다. 전력발전단 온실가스 배출계수는 2011년 전력거래소 기준 전력발전단 온실가스 배출계수인 0.442tCO₂ /MWh를 사용하였다. 모든 전기 자동차의 조건이 같으므로 모든 차량의 km당 이산화탄소 배출량은 $E=76.2\text{gCO}_2 /\text{km}$ 로 동일하다. 이 배출량을 기반으로 식(5)와 같이 총 CO₂ 배출량을 산출한다.

$$E_T = 76.2 \sum_i V_i l_i \dots\dots\dots (5)$$

여기서, E_T : 네트워크 전체의 총 CO₂ 배출량(g)
 V_i : 링크 i 의 통과 교통량(대)
 l_i : 링크 i 의 도로 연장(km)

IV. 분석 결과

1. 시나리오 분석

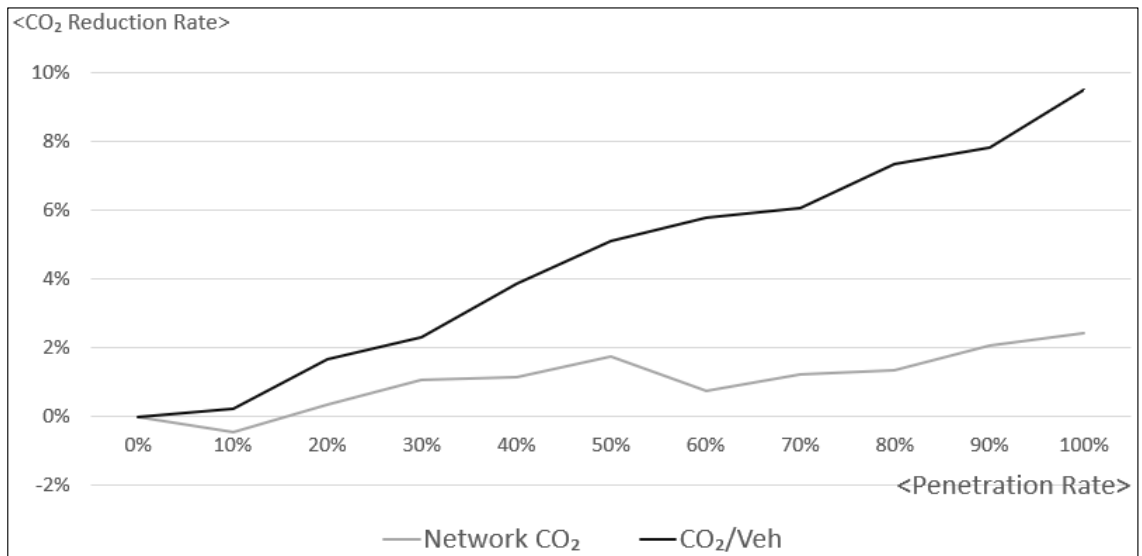
자율주행 자동차 도입으로 인한 이산화탄소 배출량 감소 효과를 분석하기 위해 각 시나리오별로 자율주행 자동차 혼입율에 따른 이산화탄소 배출량 및 차량 당 이산화탄소 배출량을 도출하였다.

1) 시나리오 1 분석결과

시나리오 1은 현 상황에서 내연기관 자율주행 자동차의 도입에 따른 이산화탄소 배출량 감소 효과를 분석하였으며 도출된 결과 값은 <Table 4>와 같다. 분석결과, 자율주행 자동차 혼입율이 증가할수록 평균 통행속도와 네트워크 처리 교통량(유입 및 유출 교통량)이 증가하였다. 전체 이산화탄소 배출량은 혼입율이 증가할수록 감소하는 경향성은 보이나 완전자율주행(100%)일 때에도 감소율 최대값이 약 2.4%로 효과가 미미했다. 또한, <Fig. 5>에서 볼 수 있듯이 자율주행 자동차 혼입율이 증가했음에도 오히려 이전단계보다 이산화탄소 배출량이 증가하는 구간도 관찰할 수 있다. 반면 차량 당 이산화탄소 발생량은 자율주행 자동차 혼입율이 증가함에 따라 보다 꾸준히 감소하였고 완전자율주행 시 9.5%로 전체 이산화탄소 감소율보다 큰 폭의 감소율을 보였다.

<Table 4> Results of scenario 1 : Human Driven Vehicle(HDV) + Autonomous Vehicle (AV)

Performance Index	AV Penetration Rate										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Mean Speed (km/h)	15.14	15.26	15.74	15.86	16.75	16.99	17.06	17.78	17.99	18.18	19.17
Volume (veh)	12069	12151	12232	12224	12412	12493	12711	12687	12846	12824	13012
CO ₂ (kg)	3664.8	3681.2	3652.5	3625.7	3623.3	3600.2	3636.8	3619.3	3614.6	3589.6	3575.5
% Change	(0.0%)	(0.4%)	(-0.3%)	(-1.1%)	(-1.1%)	(-1.8%)	(-0.8%)	(-1.2%)	(-1.4%)	(-2.1%)	(-2.4%)
CO ₂ per vehicle (g/veh)	303.65	302.96	298.60	296.60	291.92	288.18	286.12	285.27	281.38	279.91	274.78
% Change	(0.0%)	(-0.2%)	(-1.7%)	(-2.3%)	(-3.9%)	(-5.1%)	(-5.8%)	(-6.1%)	(-7.3%)	(-7.8%)	(-9.5%)



<Fig. 5> Scenario1 : CO₂ Reduction Rate

위와 같은 지표의 차이는 네트워크 성능 향상으로 인해 증가한 유입교통량에 의한 이산화탄소 배출 증가 효과와 통행속도 증가로 인한 이산화탄소 배출 감소 효과가 동시에 발생하는 것에 기인한다. 이 결과는 자율주행 자동차 도입으로 네트워크 성능이 향상되어도 이산화탄소 배출 증가 효과가 감소 효과보다 큰 경우에는 오히려 전체 네트워크의 이산화탄소 발생량은 더욱 커질 수 있음을 시사한다.

2) 시나리오 2 분석결과

시나리오 2은 현 상황에서 자율주행 전기자동차의 혼입율에 따른 이산화탄소 배출량 감소 효과를 분석하였으며 도출된 결과 값은 <Table 5>과 같다. 분석결과, 전체 이산화탄소 배출량은 자율주행 전기자동차의 혼입율이 10% 증가할수록 평균 약 8.7%씩 감소하며 혼입율 100%에서는 86.7%까지 감소하였다. 차량당 이산화탄소 배출량의 경우 혼입율에 따라 평균 약 8.8%씩 감소하여 전체 이산화탄소 배출량보다 소폭 큰 감소율을 보였다.

시나리오 2 역시 자율주행 자동차 혼입에 따라 네트워크 처리 교통량이 증가하여 이산화탄소 배출 증가 효과와 이산화탄소 배출 감소 효과가 동시에 일어난다. 이로 인해 전체 이산화탄소 배출량 대비 차량당 이산

화탄소 배출량의 감소율이 더 효과적으로 나타난다. 그러나, 시나리오 1과는 달리 내연기관이 아닌 전력의 사용으로 인한 이산화탄소 저감 효과가 월등히 크기 때문에 두 지표의 차이는 미미하다.

<Table 5> Results of scenario 2 : Human Driven Vehicle(HDV) + Electric Autonomous Vehicle (EAV)

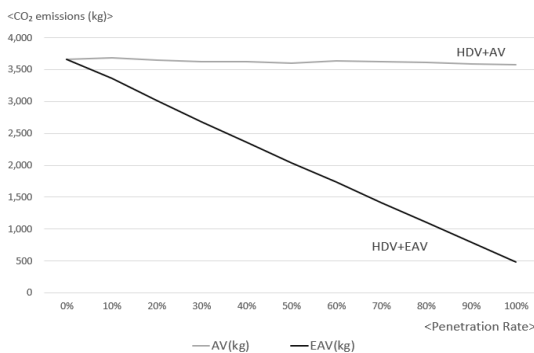
Performance Index	EAV Penetration Rate										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Mean Speed (km/h)	15.14	15.26	15.74	15.86	16.75	16.99	17.06	17.78	17.99	18.18	19.17
Volume (veh)	12069	12151	12232	12224	12412	12493	12711	12687	12846	12824	13012
CO ₂ (kg) % Change	3664.8 (0.0%)	3359.3 (-8.3%)	3014.9 (-17.7%)	2676.7 (-27.0%)	2361.1 (-35.6%)	2035.7 (-44.5%)	1742.4 (-52.5%)	1420.3 (-61.2%)	1109.4 (-69.7%)	792.9 (-78.4%)	487.8 (-86.7%)
CO ₂ per vehicle (g/veh) % Change	303.65 (0.0%)	276.46 (-9.0%)	246.47 (-18.8%)	218.97 (-27.9%)	190.23 (-37.4%)	162.95 (-46.3%)	137.08 (-54.9%)	111.95 (-63.1%)	86.36 (-71.6%)	61.83 (-79.6%)	37.49 (-87.7%)

2. 비교 분석

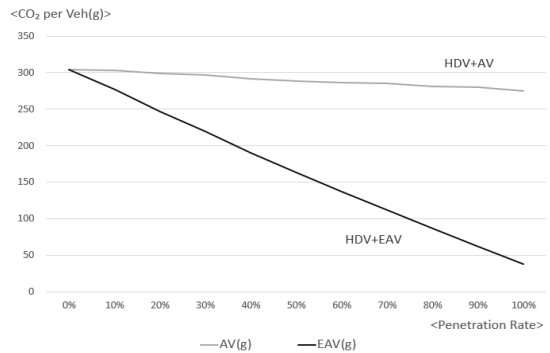
혼입 차종에 따라 구분된 각 시나리오 별로, 혼입율에 따른 네트워크 전체 CO₂ 배출량 변화와 차량당 CO₂ 배출량 변화를 분석하여 자율주행 자동차 도입으로 인한 도심부 네트워크 CO₂ 배출량 감소 효과를 살펴보았다.

네트워크 전체 CO₂ 배출량의 경우 자율주행 자동차 100%에서 최대 감소율 2.4%, 자율주행 전기자동차 100%에서 86.7%로 자율주행 전기자동차가 가장 높은 이산화탄소 배출량 감소율을 보였다. 자율주행 전기자동차가 혼입되는 경우에는 혼입율이 증가함에 따라 네트워크 전체 이산화탄소 배출량이 감소하지만 내연기관 자율주행 자동차의 경우 통행속도 증가로 인한 이산화탄소 배출량 감소 효과보다 네트워크 유입교통량 증가로 인한 증가 효과가 더 큰 구간이 있어 혼입율이 증가함에도 이산화탄소 배출량이 증가하는 구간이 발생한다.

차량당 CO₂ 배출량의 경우 <Fig. 6-b.>와 같이 두 시나리오 모두 혼입율이 증가할수록 감소율이 증가하는 양상을 보인다. 혼입율 100%에서 자율주행 자동차는 9.5%, 자율주행 전기자동차는 87.7%로 자율주행 전기자동차가 더 큰 이산화탄소 배출량 감소율을 보였다. 두 지표를 모두 살펴보았을 때 자율주행으로 인한 이산화탄소 저감 효과에 비해 엔진의 차이로 발생하는 이산화탄소 저감 효과가 월등히 큰 것을 알 수 있다.



a. Network Net-CO₂ Emissions



b. CO₂ Emissions per vehicle

<Fig. 6> Overall analysis

V. 결론 및 향후연구과제

1. 결론

본 연구는 미시 시뮬레이션 분석을 통해 국내 도시부 도로망에서의 전기차 및 자율주행 자동차 도입에 따른 이산화탄소 배출량 저감 효과 분석을 수행하였다. SUMO를 활용하여 실 도로 상황과 근사한 시뮬레이션 환경을 구축하였고 자율주행 자동차 혼입율에 따른 네트워크 성능 변화를 도출하였다. 도출된 값을 바탕으로 국립환경과학원의 배출계수 식과 전력발전단 온실가스 배출계수를 적용하여 CO₂ 배출량을 도출하여 비교·분석하였다.

분석결과 자율주행 자동차, 자율주행 전기자동차의 네트워크 전체 CO₂ 배출 최대 감소율은 혼입율 100%에서 각각 2.4%, 86.7%로 나타났으며, 차량당 CO₂ 배출 최대 감소율은 혼입율 100%에서 각각 9.5%, 87.7%로 나타났다. 자율주행 자동차의 전체 네트워크 CO₂ 배출량의 경우 기대에 비해 효과가 미미하였으며 혼입률 10%에서는 오히려 배출량이 증가하였다. 이는 자율주행 자동차 도입으로 인한 네트워크 처리 용량 증대로 네트워크 내 교통량이 증가하면서 CO₂ 배출량이 증가하는 효과가 나타나는 것으로 해석된다. 반면, 차량당 CO₂ 배출량은 자율주행 자동차 혼입율 증가에 따라 주행속도 개선 효과가 나타나면서 꾸준히 감소하였다.

자율주행 전기자동차의 경우 네트워크 CO₂ 배출량과 차량당 CO₂ 배출량 모두 혼입율 증가 따라 감소하는 양상을 보인다. 자율주행 전기자동차 혼입 시나리오 역시 네트워크 유입교통량 증가로 인한 네트워크 CO₂ 배출량 증가 효과가 나타나지만 사용 연료 차이로 인한 이산화탄소 감소 효과가 월등히 크기 때문에 차량당 CO₂ 배출량과 큰 차이를 보이지 않았다.

본 연구에서는 자율주행 자동차 도입에 따른 네트워크 성능 변화 분석을 통해 이산화탄소 배출량 감소효과를 추정하였다. 본 연구에서는 개포동 일대 네트워크의 혼잡 시간대를 분석했기에 일반화하기는 어렵지만 본 연구의 결과는 자율주행 자동차 도입으로 네트워크 성능이 향상된다고 해서 배출량이 항상 감소하는 것이 아니며 내연기관 방식을 유지한 채로 자율주행 자동차만을 도입한다면 충분한 이산화탄소 배출량 감소효과를 기대하기는 어렵다는 점을 시사한다. 기존의 많은 연구에서 예측하듯 자율주행 자동차 도입으로 인해 차량 이용 수요가 많아진다면 자율주행 자동차의 도입은 오히려 이산화탄소 배출량을 증가시킬지도 모른다. 물론 이는 앞서 말했듯 본 연구의 분석 대상에 한정되어 있어 교통량, 네트워크 규모에 따른 차이가 있을 수 있으며 보다 명확한 분석을 위해서는 좀 더 큰 규모와 다양한 교통상황에서의 추가적인 분석이 필요하다. 그럼에도, 자율주행 자동차 도입을 통해 충분한 이산화탄소 배출량 감소 효과를 얻기 위해서는 내연기관에서 전기 자동차로의 전환과 차량 수요 관리는 필수적일 것으로 보인다.

2. 향후 연구과제

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

첫째, 본 연구에서는 휘발유 이용 승용차에만 국한하여 네트워크에서 발생하는 CO₂ 배출량만을 산출하였으며 내연기관 자동차의 WTT 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 고려하지 못했다. 하지만 보다 현실적인 연구를 위해서는 다양한 연료별, 차종별, 연식별 CO₂ 배출량과 내연기관 자동차의 WTT 과정을 포함한 WTW 전과정의 CO₂ 배출량을 산정하는 등 추가적인 분석이 필요하다.

둘째, 본 연구에서는 개별 차량의 감·가속 사이클 및 정지에 대한 에너지원 소비 차이를 반영하지 않았다.

실제 자율주행 자동차는 일반 차량에 비해 안정적인 감·가속 성능을 보이며 이로 인해 화석 연료 및 전력 소모를 줄일 수 있다. 또한, 내연기관 자동차와 마찬가지로 전기 자동차의 주행속도에 따라 소비 전력에 차이가 있으나 이를 반영하지 않았다. 보다 명료한 분석을 위해서는 감·가속 사이클 및 정지에 대한 에너지원 소모 및 속도에 따른 전비를 반영이 한 연구가 필요하다.

셋째, 본 연구는 2019년 10월 10일 개포동 일대의 자료를 이용하였다. 보다 신뢰성 있는 결과 도출을 위해서는 보다 장기간의 자료와 다양한 네트워크 크기, 다양한 서비스 수준에서의 분석이 추가적으로 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2021년 경찰청의 재원으로 도로교통공단의 지원을 받아 수행된 연구임.(1325163972, 자율주행을 위한 AI기반 신호제어시스템 개발)

본 논문은 한국ITS학회 2021년도 추계학술대회(2021.10.25)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

- Anderson J. M., Kalra N., Stanley K. D., Sorensen P., Samaras C. and Olumatola O. A.(2014), *Autonomous Vehicle Technology: A guide for policymakers*, Santa Monica: RAND Corporation.
- Arnaout G. M. and Bowling S.(2014) “A progressive deployment strategy for cooperative adaptive cruise control to improve traffic dynamics,” *International Journal of Automation and Computing*, vol. 11, pp.10-18.
- Barth M. and Boriboonsomsin K.(2009), “Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system,” *Transport. Research Part D: Transport Environment*, vol. 14, pp.400-410.
- Choi J. E. and Bae S. H.(2010), “Development of Quantitative Analysis Methodology on Environmental Effect through Adaptation of Advanced Safety Vehicle,” *J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.*, vol. 9, no. 6, pp.94-104.
- Dokic J., Muller B. and Meyer G.(2015), *European Roadmap Smart Systems for Automated Driving*, Berlin: EPoSS(European Technology Platform on Smart Systems Integration).
- Fagnant D. and Kockelman K. M.(2015), “The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 40, pp.1-13.
- 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.
- Golbabaei F. and Yigitcanlar T.(2020), “The role of shared autonomous vehicle systems in delivering smart urban mobility: A systematic review of the literature,” *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 15, no. 10, pp.731-748.
- Greenblatt J. and Saxena S.(2015), “Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas

- emissions of US light-duty vehicles,” *Nature Clim Change*, vol. 5, pp.860–863.
- Harper Corey D., Chris T. H, Sonia M. and Constantine S.(2016), “Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 72, pp.1–9.
- Hartmann M., Motamedidehkordi N., Krause S., Hoffmann S., Vortisch P. and Busch F.(2017), “Impact of automated vehicles on capacity of the german freeway network,” *ITS World Congress 2017 Compendium of Papers*.
- Hensher D. A.(2018), “Tackling road congestion-What might it look like in the future under a collaborative and connected mobility model?,” *Transport Policy*, vol. 66, pp.A1–A8.
- JRC R. E., HASS H., LARIVÉ J. F., JRC L. L., MAAS H. and Rickeard D.(2014), *WELL-TO-WHEELS Report Version 4. a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS*, Institute for Energy and Transport, Joint Research Centre, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
- Kang M. O., Kang G. K., Lee S. Y., Han S. W., Min D. K. and Lee B. J.(2009), *Research on the Mitigation Potentials and Mitigation Policies of the Transport and Buildings in Korea*, Korea Environment Institute, pp.1–224.
- KOTEMS(Korea Transport Emission Management System), Transport Emission Statistics, <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/forward?pageUrl=/kotems/ptl/emissionstat/total/KotemsPtlEmissionstatTotalEmissionLs&topmenu1=02&topmenu2=01&topmenu3=02>, 2021.8.28.
- Lee S. M.(2016), *A Basic Study on the Eco-friendliness of Autonomous Vehicles*, Korea Environment Institute, pp.1–36.
- Lee T. H.(2016), “Paris Agreement and Urban Energy Transition: A Lesson for Seoul's Energy and Climate Policy,” *Space and Environment*, vol. 55, pp.48–78.
- Lu Q., Tettamanti T., Hörcher D. and Varga I.(2019), “The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: An experimental analysis by microscopic traffic simulation,” *Transportation Letters*, vol. 12, no. 8, pp.1–10.
- National Institute of Environmental Research(2013), *National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual*.
- Olia A., Abdelgawad H., Abdulhai B. and Razavi S. N.(2016), “Assessing the potential impacts of connected vehicles: mobility, environmental, and safety perspectives,” *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, pp.229–243.
- Park J. Y., Wu S. K. and Lee D. Y.(2018), *Impact Analysis of Autonomous Vehicles and Policy Implications*, The Korea Transport Institute, pp.1–200.
- Pinjari A. R., Augustin B. and Menon N.(2013), *Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles: An assessment*, Tampa: University of South Florida.
- Song J., Wu Y., Xu Z. and Lin X.(2014), “Research on car-following model based on SUMO,” *The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology*, pp.47–55.
- Sperling D.(2018), *Three Revolutions, Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles To a Better Future*, Island Press, p.15.
- Tientrakool P., Ho Y. and Maxemchuk N. F.(2011), “Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance,” *Vehicular Technology*

Conference (VTC Fall).

- Underwood S. E.(2014), “Disruptive innovation on the path to sustainable mobility: Creating a roadmap for road transportation in the United States,” In *Road Vehicle Automation*, Springer, pp.157-168.
- Wadud Z., MakKenzie D. and Leiby P.(2016), “Help of Hindrance? The Travel, Energy and Carbon Impacts of Highly Automated Vehicles,” *Transportation Research Part A.: Policy and Practice*, vol. 86, pp.1-18.