

# 미시교통시물레이션 기반 도심도로 자율협력주행 서비스 효과 분석

## Impact Analysis of Connected-Automated Driving Services on Urban Roads Using Micro-simulation

이 지 연\* · 손 승 녀\*\* · 박 지 혁\*\*\* · 소 재 현\*\*\*\*

\* 주저자 : 한국지능형교통체계협회 R&BD센터 선임연구원

\*\* 교신저자 : 한국지능형교통체계협회 R&BD센터 실장

\*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 석사과정

\*\*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 조교수

Ji-yeon Lee\* · Seung-neo Son\* · Ji-hyeok Park\*\* · Jaehyun(Jason) So\*\*

\* R&BD Center, ITS Korea

\*\* Department of Transportation Engineering, Ajou University

† Corresponding author : Seung-neo Son, sson@itskorea.kr

Vol. 21 No.1(2022)

February, 2022

pp.91~104

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.1.91>

2022.21.1.91

Received 14 December 2021

Revised 20 December 2021

Accepted 17 January 2022

© 2022. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

Level 3 자율주행차의 상용화가 가시화됨에 따라 자율주행차의 운행설계영역(ODD)이 고속도로 외 도심도로로 확대될 필요가 있다. 본 연구는 도심도로 내 인프라-자율차 간 협력주행 기반의 자율주행차 서비스에 대한 교통운영효율성 및 안전성 측면의 효과평가를 통해 도심도로 자율협력주행 서비스의 실효성을 분석하였다. 도심도로 자율협력주행 서비스의 구현 및 효과평가는 미시교통시물레이션모델을 활용하였으며, 각 서비스별 중점관리목표에 따른 개별적인 효과평가 지표를 선정하여 효과 분석에 활용하였다. 분석 결과, V2X 통신 기반의 자율협력주행 서비스를 통해 자율주행차량의 교통운영 효율성과 안전성이 향상됨을 확인하였고, 그 효과는 자율주행차의 시장점유율이 증가할수록 커지는 것으로 분석되었다. 본 연구는 단속류인 도심도로를 대상으로 V2X 통신 기반의 자율협력주행 서비스의 효과를 도출해낸 것에 의의가 있으며, 향후 자율협력주행 서비스 검증 기반이 마련되는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 자율협력주행, 협력형 지능형교통체계, 시물레이션, 효과분석

### ABSTRACT

The operational design domain (ODD) of autonomous vehicles needs to be expanded on highways and urban roads in light of the substantial commercialization of Level 3 autonomous vehicles. Therefore, this study developed a specific infrastructure autonomous vehicle-based cooperative driving service to ensure the driving safety of autonomous vehicles on city roads. The traffic operation efficiency, safety evaluation, and core evaluation indices for each service were selected and analyzed to study the effect of each service. The result of the analysis confirmed that the traffic operation efficiency and safety of autonomous vehicles were improved through the V2X communication-based autonomous cooperative driving service. On the whole, the significance of this study is in deriving the effect of the autonomous cooperative driving service based on V2X communication on urban roads with interrupting traffic flow.

Key words : Cooperative Autonomous Driving, Cooperative Intelligent transport systems, Simulation, Effect analysis

## I. 서 론

최근 우리나라는 세계 최초로 Level 3 자율주행차 안전기준 6가지를 발표하여 2020년 7월부터 국내에서 Level3 자율주행차의 출시와 판매가 가능해졌다. 미국 자동차기술학회(SAE)에 따르면 자율주행 Level 3는 HD-Map, V2X 통신 인프라 등을 활용하여 주행환경, 운용방법을 설정 및 제한하고 자율주행의 안정성을 확보한 운행설계영역(ODD)에서 자율주행이 가능한 수준을 말한다. 즉, 자율주행 기능이 활성화되면 모든 운전 활동을 자율주행시스템이 담당하고, 비상 시에만 운전자(사람)의 개입을 요청하는 부분자율주행을 의미한다.

Level 3 자율주행차의 상용화가 가시화됨에 따라 자율주행차의 운행설계영역(ODD)이 고속도로 외 도심도로로 확대될 필요가 있다. 도심도로는 고속도로 및 고속화국도와 같은 자동차전용도로와 달리, 접근로를 통한 차량의 진·출입이 빈번하고, 이와 관련한 교차로, 신호 등 다양한 인프라가 존재한다. 또한, 도심도로 일부 구간(구역)의 경우 보행자까지 혼재됨에 따라 자율주행차의 주행안전성 확보를 위한 구체적인 인프라-자율차 간 협력주행 기반의 서비스에 대한 필요성이 제기되었다. 이러한 배경 하에 국토교통부의 “도심도로 자율협력주행 안전·인프라 연구” 과제를 통해 5대 자율협력주행 서비스(16가지 Use-case)가 제안되었다.

다만, 이러한 도심도로 자율협력주행 서비스는 자율주행차량으로 구성된 도로·교통 환경의 안전성, 도로 용량 증대 및 지체 감소, 지·정체 감소로 인한 환경 측면 효과 등에서 그 효과가 기대되나, 각 서비스별 정량적인 효과에 대해서는 실제 도로에서의 직접 적용 및 효과평가에 제한이 있어, 서비스의 효용성에 대한 검증이 어려운 측면이 있다. 또한, 현재 개발 중인 자율주행차의 기술 수준을 고려할 때, 실제 도로에서 실제 운행 중인 주변 차량 및 보행자들과의 혼재 상황에서 실험을 수행하는 것은 안전상의 우려로 사실상 어려울 수 있다.

따라서 본 연구에서는 미시교통시물레이션을 이용한 도심도로 자율협력주행 서비스 효과평가 방법론을 제시하고, 제시된 방법론에 근거한 자율협력주행 서비스의 정량적인 효과평가를 수행하고자 한다. 서비스의 효과평가 지표는 교통운영효율성과 교통안전성 지표를 활용하였으며, 각 서비스의 고유한 운영방식과 중점 관리목표를 고려하여 서비스별 핵심 효과척도를 선정하여 평가에 활용하였다. 또한, 민감도 분석을 통한 서비스 효과 분석의 신뢰성을 제고하기 위하여 다양한 교통량과 자율주행차의 시장점유율 시나리오를 적용하였다. 이를 통해 본 연구에서는 시물레이션 기반의 자율협력주행 서비스 효과평가 방법론을 제시하고, 향후 일반차와 자율주행차의 혼재 상황까지 고려한 자율주행차의 시장점유율에 따른 도심도로 자율주행의 가능성을 확인하였다.

## II. 관련 연구 고찰

### 1. 자율주행 서비스 관련 연구

Lim et al.(2017)은 자율주행차량의 임시운행 허가를 위한 차선유지/차선 변경 기능 평가 시나리오를 개발하였으며, 자율주행의 개별 요소 기술인 ADAS의 기술 규정 및 자율주행차량 시물레이션에 기반한 각 시나리오별 안전성 평가 항목을 개발하였다. 또한, 개발한 시나리오 및 평가항목의 적정성을 검증하기 위해 고속주회로에서 실차 실험을 진행하였다.

Szalay et al.(2020)는 차량 간 센서 및 제어 정보를 교환하기 위한 실증 시나리오를 제시하였다. 실증은 SciL(Scenario-in-the-Loop) 방법론을 통해 수행되었으며, 실도로(M86 고속도로, 헝가리의 Zalazone 시험장) 실

증과 디지털 트윈 실증이 동시에 진행되었다. 실증 결과, 5G 통신이 4G 통신에 비해 성능(속도, 대기시간)이 우수함을 확인하였으며, 5G 통신을 통해 자율주행차량의 협동 주행, 군집주행, 협동 차선 변경, 교차로 안전 주행을 위한 정보 공유가 가능함을 확인하였다.

Song et al.(2021)은 자율주행시스템의 안전성과 정확성, 주행경로 판단의 효율성 개선을 위해 인프라 협력형 자율주행시스템을 제안하고, 실제 필드시험을 통해 프로토콜을 검증하였다. 노변지국국이 자율주행차량에 최적의 경로를 추천하고 주행도로에 존재하는 객체들의 상태를 사전에 전달하는 서비스 시나리오 검증을 통해 인프라 협력형 자율주행의 필요성을 확인하였다.

## 2. 시물레이션을 활용한 자율차 서비스 효과 검증 관련 연구

Park et al.(2015)은 자율주행차량 도입에 따른 교통류 변화를 분석하기 위해 각 서비스 수준(level of service, LOS)의 시장점유율 변화에 따른 시간평균속도, 공간평균속도, 밀도를 분석하였다. 분석 결과, LOS A·B 상황에서는 자율주행차 혼입이 교통류에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으나 LOS C 이상의 상황에서는 자율주행차 도입에 따라 시간평균속도와 공간평균속도가 증가하고, 밀도는 감소하여 긍정적인 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Kim et al.(2018)은 VISSIM의 차량추종모형과 차로변경모형을 활용하여 공사구간에서 일반차와 자율주행차 환경에서의 동적합류제어의 효과를 분석하였다. 동적합류제어(Dynamic Merge Control, DMC)는 공사구간의 상류부 검지기 데이터를 통해 교통상황을 판단하고 동적합류제어를 결정하여, 동적합류제어 정보를 자율주행차에는 V2I로 전달하는 운영 방식이다. 이를 적용하면, 자율차를 기준으로 공사구간 정보 제공 서비스 (I2V)를 제공했을 경우, 제공하지 않았을 때보다 서비스 수준 B~E에서 자율주행차의 통행시간이 감소함을 확인하였다.

Alejandro et al.(2019)는 V2I통신을 활용한 자율주행차량의 협력 주행을 위해 Maneuver Coordination Message(MCM)형식을 제안하고, 다양한 MCM 생성 규칙이 V2X 네트워크 성능과 안정성에 미칠 수 있는 영향을 논의하였다. 또한, 미시적 교통시물레이터 SUMO를 활용하여 고속도로 5km구간(2차로)을 대상으로 검증한 결과, 커넥티드 차량 및 자율주행 차량이 V2X 통신을 활용함으로써 교통 안전성과 효율성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

Kang et al.(2019)은 서울TG-신갈JC 상행 진출입구간을 대상으로 자율주행차의 단계적 MPR(Market Penetration Rate)에 따른 진출입 구간의 운행 효과를 분석하였다. VISSIM의 Wiedemann 99 Model과 Level 4 수준에 해당하는 자율주행차 파라미터를 적용하였으며, 도입 효과를 평가하기 위하여 구간의 평균통행속도, 밀도, 교통량, 대기행렬을 평가 지표로 설정하였다. 분석 결과, 교통류의 서비스 수준이 낮을수록 자율주행차 도입의 효과가 큰 것이 확인되었고, 자율주행차의 MPR이 50%인 상황에서 대기행렬의 증가 등 부정적인 영향이 있는 것으로 나타났다. 이는 총 교통량의 증가, 자율주행차와 일반 차량 간 혼재, 자율주행차의 군집주행상태 및 중차량과의 상충 등으로 인해 혼잡이 큰 폭으로 발생하여 부정적인 결과가 도출되었다고 결론지었다.

Jeong et al.(2021)은 자율주행차에 기본적으로 탑재되는 ADAS장비의 시공간 정보를 통해 동적 교통정보를 수집하고 C-ITS환경(V2I)에서 교통관제센터로 전소하는 중앙집중식 자율주행차 모빌리티 서비스를 개발하였다. VISSIM을 통해 7×7격자형 도로망에서 비사고와 사고 모형으로 이 서비스를 평가하였다. 분석 결과, 자율주행차의 경로변경을 통해 비사고 모형보다 사고모형에서 더 큰 통행시간을 단축시켰으며, 그 정도는 교통량과 자율주행차의 점유율이 커질수록 더 크게 나타났다. 또한, 자율주행차 모빌리티 서비스의 효율은

교통사고 상환 파악의 신속성에 영향을 받는다고 결론을 도출하였다.

Ko et al.(2021)는 영동고속도로 용인IC~양지IC 단방향을 대상으로 구축된 네트워크에서 IDM(Intelligent Driver Model)과 차로변경 매개변수를 이용하여 자율주행차 주행 행태를 구현하고 자율주행차의 시장점유율 변화가 교통류에 미치는 영향을 추정하였다. 분석 결과, 자율주행차의 시장점유율이 증가할수록 이동성은 향상되나, 자율주행차의 시장점유율이 30~80%일 때 교통류의 안전 관리를 위해 자율주행차와 일반차를 분리하는 자율주행 전용차로 도입과 C-ITS의 안전서비스 이용이 필요하다고 결론지었다.

### 3. 기존 연구와의 차별성

자율주행 서비스에 관련된 선행 연구에서는 자율차의 성능 검증과 이를 위한 시나리오를 제시하였으며, 인프라 협력형 자율주행을 위한 네트워크 프로토콜을 제시하고 2가지 서비스(인프라 추천 경로 서비스, 인프라 이벤트 알림 서비스)에 대한 현장시험을 진행하여 인프라 협력형 자율주행의 가능성을 확인하였다.

시물레이션을 활용한 효과 검증 관련 선행 연구에서는 자율주행차의 주행행태를 묘사하는데 있어 Wiedemann 74와 IDM을 활용하였으며, 자율주행차의 도입에 따라 평균속도 증가, 밀도 감소, 통행시간 감소 등의 긍정적인 효과가 있는 것으로 분석되었다.

선행 연구는 V2X를 통한 인프라와 자율주행차 간의 서비스의 가능성을 확인하는 수준이며, 그 효과를 검증하는 연구는 부재한 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구는 기존 시물레이션을 활용한 자율주행차를 묘사한 연구를 참고하여 도심도로 내에서 V2X를 통한 인프라와 자율주행차 간의 서비스 효과를 검증하고자 하는 점에서 기존 연구들과 차별성을 지닌다.

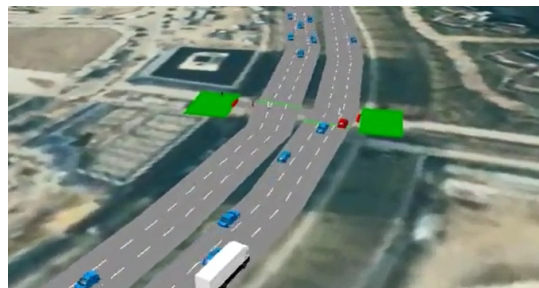
## Ⅲ. 연구 방법론

### 1. 실험 대상지 선정

본 연구에서 자율협력주행 서비스의 효과 분석을 위한 대상지는 화성시 새솔동 수노을중앙로 1.2km 구간을 선정하였다. 선정된 구간은 <Fig. 1>과 같으며, 해당 구간의 차로는 왕복 6~8차로로 구성되어 있고, 교차로 3개소, 보행자 횡단보도 1개소, 버스정류장 6개소 등이 포함되어 있다. 다음 <Fig. 2>는 해당 구간을 시물레이션으로 구현한 모습이다.



<Fig. 1> Test-bed



<Fig. 2> Implementation of Service for Micro-simulation

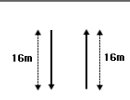
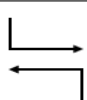

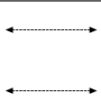
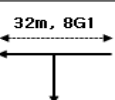

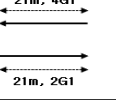
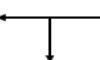

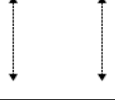
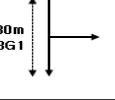
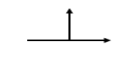
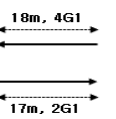
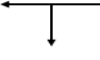



## 2. 자료 수집

본 연구는 7개 자율협력주행 서비스를 대상으로 미시교통시물레이션 모델인 VISSIM을 통한 시물레이션 기반 효과평가를 수행하며, 시물레이션 네트워크 구축을 위해 경기도 화성시 새솔동 수노을 중앙로 구간(약 2km)을 대상으로 기하구조, 교통량, 교통신호제어 정보 등을 수집하였다. 서비스 효과평가 대상구간은 금강 펜테리움 센트럴파크 아파트 앞 교차로(Intersection 1), 대방노블랜드 1차 아파트 앞 교차로(Intersection 2), 대방노블랜드 6차 아파트 앞 교차로(Intersection 3)를 포함하고 있으며, 이 3개 교차로의 교통량 및 교통신호제어 정보를 아래와 같이 수집하였다.

<Table 1> Traffic volume status

Intersection	Time	Total	Traffic volume (veh/h)					
			Passenger vehicle	Van	Taxi	Bus	Cargo vehicle	Two-wheeled vehicle
Intersection 1	11:00~11:30	135	94	15	4	3	17	2
	13:00~13:30	120	93	12	3	-	10	2
	14:00~14:30	127	91	21	2	-	10	3
	15:00~15:30	145	104	23	2	1	11	
Intersection 2	11:00~11:30	126	99	12	1	1	13	-
	13:00~13:30	95	78	10	-	-	5	2
	14:00~14:30	116	87	15	2	-	12	-
	15:00~15:30	126	94	16	3	-	13	-
Intersection 3	11:00~11:30	117	86	8	1	-	21	1
	13:00~13:30	149	120	14	2	2	10	1
	14:00~14:30	152	114	16	4	1	16	1
	15:00~15:30	156	112	17	3	1	20	3

<Table 2> Traffic signal status

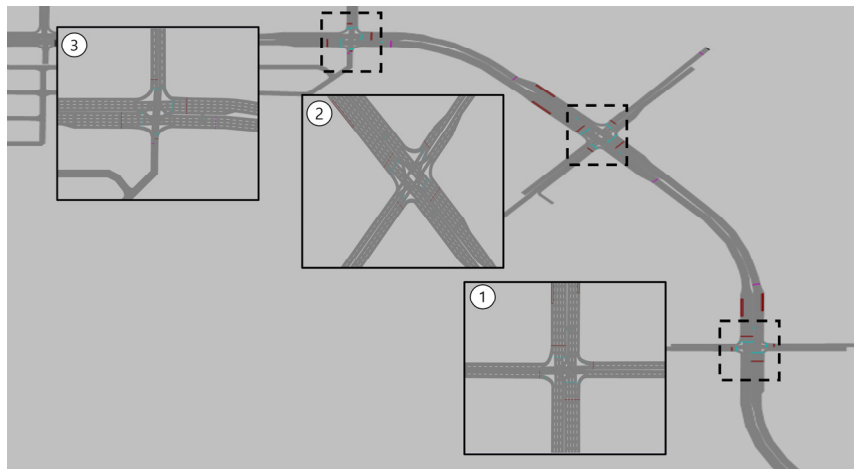
Contents	PHASE1	PHASE2	PHASE3	PHASE4	PHASE5	PHASE6
Intersection 1						
	71(4)	21(4)	22(4)	10(4)	26(4)	
Intersection 2						
	26(4)	34(4)	16(4)	31(4)	1(4)	38(4)
Intersection 3						
	31(4)	54(4)	11(4)	16(4)	14(4)	20(4)

교통량은 2020년 2월 20일부터 24일까지의 오전 11시부터 오후 4시까지 수집된 자료를 활용하였다. 교통량 조사 결과, 수노을중앙로 교차로의 경우 시간당 120~145대, 수노을3로 교차로 경우 시간당 95~126대, 꽃내음1길 교차로의 경우 117~156대의 교통량이 통행하는 것으로 조사되었다. 조사된 교통량 현황은 <Table 1>과 같으며, 시뮬레이션 입력값은 조사된 교통량의 평균값을 활용하였다.

교통신호제어 정보는 3개 교차로에 대해 <Table 2>과 같이 신호현시, 신호순서, 신호주기가 조사되었으며, 조사된 신호제어정보에 기반하여 시뮬레이션 네트워크의 신호정보를 입력하였다.

### 3. 시뮬레이션 네트워크 구축

본 연구에서는 화성시 새솔동 수노을중앙로 대상 자율협력주행 서비스 효과평가를 위해 미시교통시뮬레이션 모델인 PTV VISSIM 소프트웨어를 활용하여 다음 그림과 같이 3개 교차로 대상 시뮬레이션 네트워크를 구축하고, 교통량과 신호정보 등 시뮬레이션에 필요한 정보를 입력하였다. 시뮬레이션 네트워크의 총 길이는 수노을 중앙로 링크 기준 약 2km이며, 해당 네트워크에는 3개의 교차로와 1개의 횡단보도가 포함되어 있다. 해당 링크의 위성사진을 이용하여 실제 도로 기하구조 형상에 기반한 VISSIM 네트워크를 구축한 결과, 다음 <Fig. 3>과 같이 시뮬레이션 네트워크를 구축하였다. 교차로 간 이격거리는 교차로 1과 2는 약 500m, 교차로 2와 3은 약 400m이며 대상지 도로구간의 차로는 왕복 6~8차로이다.



<Fig. 3> VISSIM Network

### 4. 차량 주행행태 모델 구현

#### 1) 자율주행차 주행행태 모형 구현

본 연구는 자율협력주행 서비스 효과 분석을 위해 시뮬레이션에서의 자율주행차의 주행행태 모델 구현이 중요하다. 자율주행차의 주행행태 모델 구현을 위해 본 연구에서는 차량추종모형(종방향 제어 로직)인 IDM(Intelligent Driver Model) 모형을 적용하였다. IDM은 숙련된 운전자의 행동을 근사화하고 반응을 통합한 추종 모델로서, 안정적인 가감속 행태 기반 안전거리 유지 기능 구현이 가능하다(Ko et al., 2021). IDM 차량 추종행태 구현을 위한 차량의 가감속의 조정은 다음 식(1)과 같다(Treiber and Kesting, 2013).

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_o} \right)^\delta - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right], \quad s^*(v, \Delta v) = s_o + \max \left[ 0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, v: 실제 속도
- a: 최대 가속도
- v<sub>0</sub>: 설계 속도
- δ: 가속도지수 (설계속도에 근접 시 값이 클수록 늦게 감속)
- s\*: 설계 동적(dynamical) 거리
- Δv: 전방차량과의 상대속도
- s<sub>0</sub>: 최소 차간거리
- T: 설계 차두시간
- b: 최대 감속도

자율주행차의 차선변경과 같은 횡방향 제어 로직으로는 VISSIM에서 제공하는 횡방향제어 변수들을 기반으로 Ko et al.(2021)에서 제시한 자율주행차 횡방향 주행행태를 반영한 변수 값을 적용하였다. 본 연구에서 활용한 IDM 기반의 종방향 제어 변수와 횡방향 제어 변수는 다음 <Table 3>와 같으며, 이 변수들은 기존 연구에서 자율주행차의 실제 주행궤적과의 비교를 통해 제시했다는 점에서, 본 연구에서 역시 참고문헌의 변수 값을 동일하게 적용하였다.

<Table 3> Self-driving car parameters

Parameter		Value
Longitudinal control (IDM)	Maximum acceleration a	1.4m/s <sup>2</sup>
	Maximum deceleration b	2.0m/s <sup>2</sup>
	Desired speed v <sub>0</sub>	50kph
	Acceleration exponent δ	4
	Minimum gap s <sub>0</sub>	2m
	Desired time headway T	0.6s
Lateral control	Waiting time before diffusion	30s
	Min. headway	0.3m
	Safety distance reduction factor	0.6
	Maximum deceleration for cooperative braking	-3m/s <sup>2</sup>

2) 일반차 주행행태 모형 구현

차량추종모형에는 자유흐름(FreeDriving), 접근(Approaching), 추종(Following), 브레이크(Braking)의 4가지 주행행태 파라미터에 기반하여 차량의 움직임을 정의하는 Wiedemann 모형을 사용하고 있다. Wiedemann 모형은 일반적으로 통행 흐름 특성에 따라 고속도로와 같은 연속류에는 Wiedemann 99를 사용하고, 신호교차로와 같이 차량의 흐름을 방해하는 신호등, 정지신호 등의 고정된 시설에 의해 진행과 정지를 반복하는 단속류에는 Wiedemann 74를 사용한다.(Byun et al., 2020)

따라서, 본 연구에서는 자율주행차를 제외한 일반차량의 주행행태는 단속류 구간에 적합한 Wiedemann 74 모형을 활용하였으며, Wiedemann 74 모형의 매개변수 기본값을 이용하였다.

<Table 4> Driving behavior parameters for normal vehicle

Parameter		Value for normal vehicle
Model name	Parameter	
Wiedemann 74 model	Average Standstill Distance(m)	2.0m
	Additive Part of Safety Distance(m)	2.0m
	Multiplic Part of Safety Distance(m)	3.0m

## 5. 시뮬레이션 실행 및 시나리오 변수

시뮬레이션 평가는 초기 대기시간(warm-up time) 900초 이후 1,800초 동안 수행되었으며, 시뮬레이션 데이터의 출력 빈도를 의미하는 simulation resolution은 0.1초로 설정하였다. 7개의 자율협력주행 시뮬레이션은 조사된 LOS C 기준의 교통량을 적용하였으며, 자율주행차의 점유비율(market penetratio rate)은 0%에서 100%까지 20% 단위로 구분하여 시뮬레이션 효과평가를 수행하였다.

<Table 5> Other evaluation scenarios

Type	Content
Traffic (Level of service)	LOS C
MPR (Market penetration rate)	1. MPR 0% (autonomous vehicle 0%, normal vehicle 100%) 2. MPR 20% (autonomous vehicle20%, normal vehicle80%) 3. MPR 40% (autonomous vehicle40%, normal vehicle60%) 4. MPR 60% (autonomous vehicle60%, normal vehicle40%) 5. MPR 80% (autonomous vehicle80%, normal vehicle20%) 6. MPR 100% (autonomous vehicle100%, normal vehicle0%)

각 시나리오별 시뮬레이션 효과평가 및 결과값 출력은 C# 기반 VISSIM Com interface 모듈 실행을 통해 수행되었으며, 시뮬레이션 5회 수행을 통한 결과값을 평균하여 추출하였다. 또한, 시뮬레이션의 효과평가는 각 서비스별 영향권 범위를 반영하여 약 200m-500m 또는 교차로 접근로 링크 길이를 기준으로 설정하였다.

## 6. 서비스별 평가 지표 선정

### 1) 서비스 개요

도심도로 자율협력주행 서비스는 정보의 제공 주체에 따라 I2V 서비스와 V2V 서비스로 구분된다. I2V 서비스는 인프라로부터 주변 이벤트 상황에 대한 정보를 전달받아 자율주행차량이 감속 또는 차로변경 등 차량을 안전하게 제어하는 서비스로 사각지대 운행지원, 딜레마존 안전주행 서비스가 있다.

사각지대 운행지원 서비스는 인프라 또는 차량으로부터 수집된 전방 혹은 사각지대 인지 정보를 전달받아 감속 또는 차로 변경 등 차량을 안전하게 제어하는 서비스이며, 딜레마존 안전주행 서비스는 V2X 통신을 통해 전방 신호정보를 제공받아 접근차량이 최적 속도로 제어함으로써 신호교차로를 안전하게 통과 또는 정지할 수 있도록 지원하여 추돌 및 충돌사고를 예방하고자 하는 서비스이다.

V2V 서비스는 자율주행차량 간의 통신을 통해 차량 위치, 속도 등 개별 차량 정보를 전달하여 자율주행



차량이 차량 간 거리, 속도 등을 계산하여 차량을 제어하는 서비스로, 우회전 안전지원 서비스, 긴급차량 주행경로 확보 서비스가 있다.

우회전 안전 지원 서비스는 차량의 우회전 중 다른 방향에서 접근하는 차량의 정보(위치, 속도 등)를 V2V 통신을 통해 자율주행 차량에게 전달함으로써 자율주행차량이 적절한 충돌 회피 제어를 할 수 있도록 지원하는 서비스이며, 긴급차량 주행경로 확보 서비스는 긴급차량 접근 시 긴급차량의 위치 및 방향 등에 대한 정보를 V2V통신을 통해 자율주행차량에 전달함으로써 긴급차량의 주행경로를 확보하고 자율주행 차량의 안전을 확보하기 위한 서비스이다.

## 2) 서비스별 평가 지표 선정

자율협력주행 서비스는 도로용량 증대 및 지체 감소와 같은 이동효율성과 더불어 각종 안전 관련 운전자 지원 및 차량제어 알고리즘에 기반한 교통 상충 감소 효과가 있다. 자율협력주행 서비스 효과 평가지표는 아래의 <Table 6>과 같이 교통운영 효율성, 교통 안전성 지표를 기본으로 하고, <Table 7>과 같이 각 서비스별 주요 평가지표를 추가하여 선정하였다.

<Table 6> Common measure of effectiveness

Type	Effectiveness assessment index	Note
Traffic operation efficiency	Average delay	Vissim's own output value
	Average speed	
	Stops	
	Travel Time	
Traffic safety	Speed deviation	VISSIM COM Interface
	Conflicts	

<Table 7> Key evaluation indicators for each service

Service	Key evaluation indicators
Cooperative Perception-blind spot	Conflicts between vehicles and pedestrians
Dilemma zone Safety Crossing	Number of conflicts near intersection
Right turn safety driving	Number of conflicts with the right-turning vehicles
Emergency vehicle priority	Average travel time and speed of emergency vehicle

## IV. 연구 결과 분석

### 1. I2V 서비스 효과 분석 결과

#### 1) 사각지대 운행지원 서비스

사각지대 운행지원 서비스의 교통운영 효율성 지표 분석은 지연시간, 속도, 정지횟수, 통행시간을 효과적으로 선정하였다. 자율주행차의 시장점유율이 높아질수록 차량의 정지횟수가 감소하고, 지연시간이 감소하는 경향을 보인다. 또한, 차량의 속도가 증가하고, 통행시간이 감소하는 경향을 보인다.

안전성 지표 분석은 차대 보행자 상충 횟수, 차량간 상충횟수, 속도 편차를 효과적으로 선정하여 진행하였다. 이 중 핵심적인 효과 척도는 도로를 건너는 보행자와 이에 접근하는 차량 간 상충 횟수이다.

차량들 간 속도 편차는 MPR 20%에서 가장 작았으며, MPR 60%에서 가장 컸다. MPR 20%에서 속도 편차는 가장 작았지만, 차량 간 상충횟수는 가장 많았으며, MPR이 증가할 수록 차량간 상충 횟수는 감소하는 경향을 보인다. 핵심 효과척도는 차대 보행자간 상충횟수는 MPR 80%부터는 상충이 100% 감소하여 0으로 수렴한다.

<Table 8> Results of Cooperative Perception-blind spot

Measure		Before	After				
		MPR 0%	MPR 20%	MPR 40%	MPR 60%	MPR 80%	MPR 100%
Traffic operation efficiency	Delay	56.6	32.6 (-42.4)	29.3 (-48.1)	25.8 (-54.4)	25.4 (-55.2)	24.7 (-56.4)
	Speed(km/h)	6.1	9.7 (58.6)	10.6 (72.1)	11.6 (88.2)	11.6 (89.0)	11.9 (93.9)
	Stops	6.0	2.2 (-62.7)	1.6 (-73.3)	1.7 (-71.5)	1.8 (-70.9)	1.5 (-74.3)
	Travel Time	64.09	40.42 (-36.9)	37.25 (-41.9)	34.06 (-46.9)	33.91 (-47.1)	33.05 (-48.4)
Traffic safety	Speed deviation	2.62	0.46 (-82.4)	1.15 (-56.1)	1.96 (-25.2)	1.43 (-45.4)	1.38 (-47.3)
	Conflicts	109.0	150.0 (37.6)	100.0 (-8.3)	99.0 (-9.2)	94.0 (-13.8)	84.0 (-22.9)
Core measure of effectiveness	Conflicts between vehicles and pedestrians	52.0	10.0 (-80.8)	6.0 (-88.5)	6.0 (-88.5)	0.0 (-100.0)	0.0 (-100.0)

## 2) 딜레마존 안전주행 서비스

딜레마존 안전주행 서비스의 교통운영 효율성 지표 분석은 지연시간, 속도, 정지횟수, 통행시간을 효과적으로 선정하였다. 자율주행차의 시장점유율이 높아질수록 차량의 정지횟수가 감소하고, 지연시간이 감소하는 경향을 보인다. 또한, 차량의 속도가 증가하고, 통행시간이 감소하는 경향을 보인다.

<Table 9> Result of Dilemma zone Safety Crossing

Measure		Before	After				
		MPR 0%	MPR 20%	MPR 40%	MPR 60%	MPR 80%	MPR 100%
Traffic operation efficiency	Delay	127.6	96.7 (-24.2)	79.7 (-37.5)	73.9 (-42.0)	64.6 (-49.3)	61.6 (-51.7)
	Speed(km/h)	5.2	6.6 (27.9)	7.8 (50.8)	8.3 (59.8)	9.3 (79.5)	9.6 (86.5)
	Stops	4.4	3.4 (-21.2)	3.0 (-31.3)	2.5 (-42.8)	2.1 (-52.6)	1.9 (-55.7)
	Travel Time	141.6	110.7 (-21.8)	93.9 (-33.7)	88.6 (-37.4)	78.8 (-44.3)	75.9 (-46.4)
Traffic safety	Speed deviation	3.1	1.9 (-38.6)	1.0 (-67.5)	0.6 (-80.0)	0.4 (-87.1)	0.2 (-93.3)
Core measure of effectiveness	Number of conflicts near intersection	3396.0	3251.0 (-4.3)	3498.0 (3.0)	3432.0 (1.1)	3186.0 (-6.2)	2894.0 (-14.8)

안전성 지표 분석은 차량간 상충횟수, 속도 편차를 효과적으로 선정하여 진행하였다. 이 중 핵심적인 효과 척도는 교차로 부근에서 발생하는 상충 횟수이다.

차량들 간 속도 편차는 MPR이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 핵심 효과척도는 교차로 부근 상충 횟수는 MPR 40~ 60% 구간에서는 오히려 상충이 증가하였다가 MPR 80%부터는 상충이 감소하는 경향을 보인다.

## 2. V2V 서비스 효과 분석 결과

### 1) 우회전 안전지원정보 제공 서비스

우회전 안전지원 정보 제공 서비스의 교통운영 효율성 지표 분석은 지연시간, 속도, 통행시간을 효과적으로 선정하였다. MPR 20%일 때 지연시간이 증가하였으나 그 이후로는 점차 감소하여 MPR 80%인 구간부터는 대폭 감소한다. 속도도 이와 마찬가지로 MPR 20%일 때 오히려 감소하지만 그 이후부터는 점차 증가하여 MPR 80%일 때 38.1km/h로 가장 빠른 속도를 보인다.

안전성 지표 분석은 차량간 상충횟수, 속도 편차를 효과적으로 선정하여 진행하였다. 이 중 핵심적인 효과 척도는 교차로 부근에서 발생하는 상충횟수이다. 직진, 우회전 차량 간의 상충횟수는 MPR 100%에서 100% 감소하였으나, 다른 서비스들과는 다르게 차량 간 상충횟수가 증가하고, 차량 간 속도 편차가 MPR 40% 구간 이후부터 MPR이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 교차로 구역의 우회전 차량을 대상으로 감속 정보가 전달됨에 따라, 우회전 차량의 상류부에 있는 차량들은 대리안전척도(Surrogate safety measure)의 특정 범위에 해당할 경우 정보를 받게 되고 감속이 발생하여 속도 편차와 상충 부분에서 증가 효과가 있는 것으로 해석하였다.

<Table 10> Results of Right turn safety driving

Measure		Before	After				
		MPR 0%	MPR 20%	MPR 40%	MPR 60%	MPR 80%	MPR 100%
Traffic operation efficiency	Delay	1.4	1.5 (5.0)	1.4 (-2.6)	1.4 (-4.9)	1.1 (-27.9)	1.0 (-30.9)
	Speed (km/h)	34.6	34.0 (-1.6)	34.7 (0.4)	35.0 (1.3)	38.1 (10.3)	37.9 (9.6)
	Travel Time	4.3	4.4 (1.6)	4.3 (-0.5)	4.3 (-1.3)	3.9 (-9.3)	4 (-8.8)
Traffic safety	Speed deviation	26.5	26.2 (-1.2)	27.2 (2.6)	28.2 (6.4)	31.5 (19.0)	31.6 (19.1)
	Conflicts	208.0	261.0 (25.4)	248.0 (19.2)	304.0 (46.1)	266 (27.8)	251 (20.6)
Core measure of effectiveness	Number of conflicts with the right-turning vehicles	14.0	10.0 (-28.5)	10.0 (-28.5)	6.0 (-57.1)	5.0 (-64.2)	0 (-100.0)

### 2) 긴급차량 주행경로 확보 서비스

긴급차량 주행경로 확보 서비스는 긴급차량의 주행 경로를 확보하고 자율주행차량의 안전을 확보하기 위한 서비스로 핵심 효과척도를 긴급차량의 평균통행속도와 통행시간으로 선정하였다. 이 외에 교통운영 효율

성 지표는 다른 서비스와 같이 지연시간, 속도, 통행시간을 효과적으로 선정하였다.

긴급차량의 평균 통행속도와 통행시간을 보면 MPR이 증가할수록 통행시간은 18.1% 감소하고, 통행속도는 22.0% 증가하였다. 또한, 자율주행차의 시장점유율이 높아질수록 지연시간이 감소하고, 차량의 속도는 증가하고, 통행시간이 감소하는 경향을 보인다.

안전성 지표 분석은 차량간 상충횟수, 속도 편차를 효과적으로 선정하여 진행하였다. 차량 간 속도 편차는 MPR이 0일때보다 자율주행차량이 유입되었을 때가 높으며, MPR 40% 구간에서 가장 높다. 이는 주변 자율주행차량들이 긴급차량을 위해 차로를 변경하고, 긴급차량의 주행속도가 증가하기 때문에 속도 편차가 증가하였다고 판단하였다. 차량 간 상충은 MPR이 증가할수록 점차 감소하며, MPR 100% 일때, 43.4% 감소한다.

<Table 11> Results of Emergency vehicle priority

Measure		Before	After				
		MPR 0%	MPR 20%	MPR 40%	MPR 60%	MPR 80%	MPR 100%
Traffic operation efficiency	Delay	25.7	25.6 (-0.4)	25.0 (-2.5)	22.3 (-13.0)	20.5 (-20.2)	20.3 (-21.0)
	Speed (km/h)	27.5	28.0 (1.9)	27.6 (0.6)	29.0 (5.7)	29.9 (8.8)	30.4 (10.8)
	Travel Time	54.1	54.4 (0.6)	52.5 (-2.8)	50.0 (-7.5)	48.5 (-10.2)	47.7 (-11.7)
Traffic safety	Speed deviation	18.7	20.0 (7.2)	22.7 (21.5)	19.8 (6.1)	19.5 (4.5)	20.2 (8.2)
	Conflicts	265.0	255.0 (-3.7)	237.0 (-10.5)	231.0 (-12.8)	154.0 (-41.8)	150.0 (-43.4)
Core measure of effectiveness	Average travel time of emergency vehicle	30.3	27.0 (-10.8)	27.0 (-10.8)	26.2 (-13.5)	26.1 (-13.8)	24.8 (-18.1)
	Average speed of emergency vehicle	48.3	54.2 (12.2)	54.2 (12.1)	55.8 (15.5)	56.1 (16.2)	59.0 (22.0)

## V. 결 론

서비스별 효과를 분석하기 위해 교통운영 효율성 지표(지연시간, 속도, 정지횟수, 통행시간)와 안전성 평가 지표(속도 편차, 상충 횟수)를 기본으로 분석하고, 각 서비스별 주요 평가 주안점을 토대로 핵심 평가 지표를 선정하여 분석을 진행하였다. 결과적으로 MPR 0%(일반차량 100%)와 MPR 100%(자율주행차량 100%)를 비교해보면, 인프라에서 차량에게 안전 주행을 위해 정보를 제공할 경우 교통운영 효율성이 증가하였다. 사각지대 운행지원 서비스는 속도93.9% 증가, 정지횟수 74.3% 감소의 효과를 보였다. 딜레마존 안전주행 서비스 역시 속도 87% 증가, 정지횟수 56% 감소의 효과를 보였다.

또한, 각 서비스별로 핵심 효과적도를 기준으로 차대 보행자, 차량 간 상충 횟수도 감소하여, IV2 서비스를 통해 자율주행차량의 안전성이 향상됨을 확인하였다. 차량 간에 안전 주행을 위해 V2V통신을 통해 개별 차량 정보를 제공할 경우에도 교통운영 효율성이 증가하였다. 우회전 안전지원정보 제공 서비스에서는 속도 9.6% 증가, 지연시간 30.9% 감소의 효과를 보였으며, 긴급차량 주행경로 확보 서비스에서는 긴급차량 평균 통행속도 22.0% 증가, 통행시간 18.1% 감소, 긴급차량 외 자율주행차량들의 속도 10.8% 증가, 지연시간

21.0% 감소의 효과가 있음을 확인하였다. 다만, 우회전 안전지원 정보 서비스에서는 직진과 우회전하는 차량 간의 상충횟수는 100% 감소하였지만, 차량 간 상충횟수가 증가하였다. 이는 서비스의 목적이 교차로 내에 우회전 차량과 직진 차량 간의 상충을 감소시키는데 있기때문에 이를 감소시키기 위해 교차로 상류부의 차량까지 정보가 전달되면서 새로운 상충이 발생한 것으로 생각된다.

시물레이션 분석을 통해 V2X 통신 기반의 자율협력주행 서비스의 효과를 확인하였다. 자율주행차의 시장 점유율이 40% 미만일 때도 서비스의 효과는 있으며, 커질수록 교통운영효율성과 안전성이 더 향상됨을 확인하였다. 또한, I2V 서비스에서 자율주행차량의 시장점유율의 증가에 따른 효과지표 변화율이 더 크기 때문에 인프라를 활용한 자율협력주행 서비스를 제공하는 것이 더 효율적이라고 판단된다.

본 연구에서는 미시교통시물레이션인 VISSIM을 활용하여 도심도로 내에서 V2X를 통한 인프라와 자율주행차 간의 서비스 효과 분석 방법론을 제시하였다는데 의의가 있다. 또한 제시된 방법론을 활용하여 자율협력주행 서비스별 중점관리목표를 반영한 효과척도에 근거한 서비스 효과를 측정하였다는데 의의가 있다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 방법론과 서비스 효과 분석 결과가 향후 자율협력주행 서비스 검증 기반이 마련되는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 본 연구에서 제시한 자율협력주행 서비스 효과 분석 방법론과 효과평가의 신뢰성을 제고하기 위해서는 다음과 같은 향후 연구가 필요할 것으로 보인다. 첫째, 시물레이션 내에 구현한 자율주행차의 주행행태 모델의 신뢰성을 높이기 위해 실제 자율주행차의 주행레컬데이터와의 비교를 통한 시물레이션 주행행태 모델 변수 값들의 정산 및 검증이 필요하다. 둘째, 본 연구에서 제시한 자율주행차 이외의 주변 일반차량들의 주행행태를 aggressive driver, gentle driver 등으로 다양화하여 현실에서의 다양한 운전자들의 주행행태를 묘사하여 반영할 필요가 있다. 이를 통해, 실제 도로의 다양한 운전행태 속에서의 자율협력주행 서비스에 대한 신뢰성 있는 효과 분석이 가능할 것이다. 또한, 자율협력주행 서비스는 인프라와 차량간 무선통신을 기반으로 한다는 점에서, 통신지연과 같은 무선통신의 성능 저하 가능성을 고려한 효과평가 방법론의 개발이 필요할 것으로 보인다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 도심도로 자율협력주행 안전·인프라 연구개발사업(과제번호 : 21PQOW-B152473-03)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Alejandro, C., Robert, A., Javier, G., Miguel, S., Michele, R., Robbin, B., Leonhard, L. and Gokulnath, T.(2019), “Infrastructure Support for Cooperative Maneuvers in Connected and Automated Driving”, *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Paris, France.
- Byun, W., Ki, H., Shin, D. and Park, J.(2020), *A Study on Changes in Parking Lots and Roads in the Era of Autonomous Vehicles(In Korean)*, Korea Land & Housing Corporation, pp.70-71.
- Jeong, D., Kim, M., Kim, H. and Chung, Y.(2021), “Development and Evaluation of Centralized Autonomous Vehicle Mobility Service Using ADAS Data”, *Journal of Korean Society of*

- Transportation*, vol. 39, no. 5, pp.631-642.
- Kang, M., Song, J., Hwang, K. and Im, I.(2019), “Analyzing Traffic Impacts of Automated Vehicles on Expressway Weaving Sections: A Case Study using Seoul-Singal Ramp Area”, *Journal of Transport Research*, vol. 26, no. 4, pp.33-47.
- Kim, S., Lee, J., Kim, Y. and Lee, C.(2018), “Simulation-Based Analysis on Dynamic Merge Control at Freeway Work Zones in Automated Vehicle Environment”, *Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, vol. 38, no. 6, pp.867-878.
- Ko, W., Park, S., So, J. and Yun, I.(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.
- Lim, H., Chae, H., Lee, M. and Lee, K.(2017), “Development and Validation of Safety Performance Evaluation Scenarios of Autonomous Vehicle based on Driving Data”, *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, vol. 9, no. 4, pp.7-13.
- Park, I., Lee, J., Lee, J. and Hwang, K.(2015), “Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow-Focused on Seoul-Singal Basic Sections of GyeongBu Freeway-”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Song, Y., Min, K. and Choi, J.(2021), “Research on Protocol and System for Infrastructure Cooperation Autonomous Driving Service(In Korean)”, *Information & Communications Magazine*, vol. 38, no. 6, pp.29-34.
- Szalay, Z., Ficzer, D., Tihanyi, V., Magyar, F., Soós, G. and Varga, P.(2020), “5G-Enabled Autonomous Driving Demonstration with a V2X Scenario-in-the-Loop Approach”, *Sensors*, vol. 20, no. 24, pp.7344-7368.
- Treiber, M. and Kesting, A.(2013), *Traffic Flow Dynamics*, Springer.