

시뮬레이션으로 구현된 자율주행차량 거동 적정성 평가 방법론 개발 연구

Suitability Evaluation for Simulated Maneuvering of Autonomous Vehicles

조 영* · 정 아 람** · 오 철*** · 박 재 흥**** · 윤 덕 근*****

* 주저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 박사과정

** 공저자 : 한양대학교 스마트시티공학과 박사과정

*** 교신저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 교수

**** 공저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 수석연구원

***** 공저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원

Young Jo* · Aram Jung** · Cheol Oh* · Jaehong Park*** · Dukgeun Yun***

* Dept. of Transportation and Logistics Eng., Univ. of Hanyang

** Dept. of Smart City Eng., Univ. of Hanyang

*** Research Dept. of Highway and Transportation, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Corresponding author : Cheol Oh, cheolo@hanyang.ac.kr

Vol. 21 No.2(2022)
April, 2022
pp.183~200

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.2.183>

Received 15 February 2022
Revised 9 March 2022
Accepted 4 April 2022

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

요 약

자율주행 기술을 활용하여 사고 예방과 정체 감소를 위한 교통운영관리 전략을 개발하는 다양한 연구가 시뮬레이션 기반으로 수행되고 있다. 이를 위해서는 시뮬레이션에서 구현되는 자율차의 거동이 실제상황을 충분히 반영하여야 하며 일반차량의 거동과 차별화되어야 한다. 그러나 실제 자율차의 주행자료와 일반차량과의 상호작용 자료 취득의 어려움으로 인해 시뮬레이션 상의 자율차 거동에 대한 검증이 미흡한 상황이다. 본 연구의 목적은 주행 및 교통 시뮬레이션 실험을 통해 자율차 거동의 적정성을 평가하는 방법론을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 개별 자율차 주행 시 요구조건과 교통류 내에서 다른 차량과의 상호작용 결과물인 퍼포먼스에 대한 요구조건을 정립하였다. 두 가지 관점의 요구조건에 대한 만족 여부를 주행 시뮬레이션과 교통 시뮬레이션을 이용하여 평가하는 프레임워크를 제시하였다. 본 연구의 결과는 보다 신뢰성 있는 자율주행 시뮬레이션 분석을 위한 유용한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 자율주행, 자율차 거동 적정성, 주행 시뮬레이션, 교통 시뮬레이션

ABSTRACT

A variety of simulation approaches based on automated driving technologies have been proposed to develop traffic operations strategies to prevent traffic crashes and alleviate congestion. The maneuver of simulated autonomous vehicles (AVs) needs to be realistic and be effectively differentiated from the behavior of manually driven vehicles (MVs). However, the verification of simulated AV maneuvers is limited due to the difficulty in collecting actual AVs trajectory and interaction data with MVs. The purpose of this study is to develop a methodology to evaluate the suitability of AV maneuvers based on both driving and traffic simulation experiments. The proposed

evaluation framework includes the requirements for the behavior of individual AVs and the traffic stream performance resulting from the interactions with surrounding vehicles. A driving simulation approach is adopted to evaluate the feasibility of maneuvering of individual AVs. Meanwhile, traffic simulations are used to evaluate whether the impact of AVs on the performance of traffic stream is reasonable. The outcome of this study is expected to be used as a fundamental for the design and evaluation of transportation systems using automated driving technologies.

Key words : Autonomous driving, Suitability of AV maneuvers, Driving simulation, Traffic simulation

I. 서 론

자율주행 상용화를 위해서는 기술 개발 및 법제도, 그리고 교통 안전성 평가 방안이 마련되어야 한다. 자율주행자동차(autonomous vehicle; AV) 도입에 따른 안전성 평가가 수행되기 위해서는 자율차와 비자율차(manually-driven vehicle; MV) 간의 상호작용 분석이 요구된다. 그러나 완전자율주행이 가능한 자율차가 실제로 보급되지 않았으며, 안전성이 보장되지 않은 상황에서의 실차 실험은 어려운 상황이다(Lee and Oh, 2018). 자율차의 시스템 보급률(market penetration rate; MPR)은 2035년 약 75%가 될 것으로 예상되며(Alexander and Gartner, 2013), 자율차와 비자율차가 혼재되어 있는 혼합교통류 상황이 상당 기간 지속될 것이다. 특히 혼합교통류 상황에서는 비자율차 운전자의 주행행태와는 다른 거동을 보이는 자율차로 인하여 불안정한 교통흐름이 유발될 가능성이 높고 상충발생 빈도가 증가할 수 있다(Aramrattana et al., 2017; Lee et al., 2018b). 따라서 혼합교통류 환경에서의 교통 안전성 평가를 위해서는 시뮬레이션 활용이 필수적이다. 기존 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 교통조건, 도로기하구조, 기상조건과 같은 다양한 시나리오를 구현하여 자율주행이 안전성 및 운영효율성에 미치는 영향을 분석한 연구가 다수 수행되었다(He et al., 2020; Nickkar et al., 2020; Sohrabi et al., 2021). 그러나 실제 자율차의 주행자료 취득의 한계로 시뮬레이션 정산(calibration) 및 검증(validation)에 대한 연구는 미비하였으며, 이러한 한계점을 극복하기 위해서는 simulated AV 거동의 현실성 확보 방안이 요구된다.

자율주행 도입에 따른 차량 간 상호작용을 분석하여 주행안전성을 평가하기 위해서는 시뮬레이션 활용이 필수적이다. 시뮬레이션을 이용하여 자율주행이 안전성 및 교통류에 미치는 영향을 분석하기에 앞서 simulated AV 거동의 현실성이 확보되어야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 주행 및 교통 시뮬레이션을 통해 구현된 simulated AV 거동에 대한 적정성 평가 방법론을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 자율차 거동 구현 시 요구되는 사항을 정립하고, 요구사항이 반영된 자율차 거동 제어 알고리즘을 도출하였다. 제안된 알고리즘은 주행 시뮬레이션인 SCANer의 script editor 모듈과 교통 시뮬레이션인 VISSIM의 COM-interface에 적용되었다. 주행 시뮬레이션은 개별차량 단위 주행행태 분석을 통한 자율차와 비자율차의 거동 특성 비교를 목적으로 사용되었다. 또한, 교통류 단위 차량 간 상호작용 분석을 통한 MPR 변화에 따른 퍼포먼스 비교를 위하여 교통 시뮬레이션이 활용되었다. 본 연구의 결과는 car following pair에 따른 주행행태 비교를 통해 simulated AV 거동의 현실성을 확보하는데 의의가 있다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자율주행에 대한 기존 연구동향을 파악하고, 본 연구의 시사점을 제시하였다. 3장에서는 simulated AV 거동의 적정성 평가를 위한 시뮬레이션 활용 기능과 방법론을 제시하였다. 4장에서는 주행 및 교통 시뮬레이션 기반의 simulated AV 거동 적정성 평가결과를 제시하였으며 마지막 장에서는 본 연구의 결과를 요약하고, 연구의 활용방안 및 향후 연구과제에 대해 서술하였다.

II. 이론적 고찰

본 연구는 주행 및 교통 시뮬레이션 환경에서 simulated AV 거동의 적정성을 평가하고자 한다. 이와 관련하여 자율주행시스템 관련 연구를 참고하여 시뮬레이션을 통해 구현하고자 하는 자율차의 기능을 선정하는데 활용하였다. 또한 자율차의 거동 특성을 파악하는데 있어 관련문헌을 고찰하고, 자율차 거동 제어 관련 알고리즘 및 파라미터를 조사하였다.

1. NHTSA 자율주행 시스템

자율주행 기술의 발전에 따라 미국 도로교통안전국은 자율차의 개발과 안전한 도로 운행 및 운영에 중점을 둔 19가지의 자율주행 시스템을 정의하였다(NHTSA, 2018). 자율주행 시스템이 갖는 기술적 및 운영적 기능은 <Table 1>에 제시하였다. 자율차가 고속도로에서 안전하고 원활한 주행을 하기 위해서는 전방차량과 적정 이격거리를 유지하며 사고회피, 분류, 합류를 위한 차로변경 기능이 요구된다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 구현하고자 하는 자율차 기능을 선정하였다.

<Table 1> Tactical and operational automated driving system(NHTSA, 2018)

No.	Systems	Details
1	Parking	Stopping within a vacant parking spot
2	Maintain Speed	Maintaining a safe speed through longitudinal control with acceptable following distances
3	Car Following	Following a target vehicle at acceptable following distance
4	Lane Centering	Staying within a lane through lateral control
5	Lane Changing/Overtaking	Changing lanes an upcoming vehicle based on a projected path or hazard
6	Enhancing Conspicuity	Controlling vehicle blinkers, headlights, horns used to communicate with other drivers
7	Obstacle Avoidance	Identifying and responding to on-road hazards
8	Low-Speed Merge	Merging into a lane below about 45 mph
9	High-Speed Merge	Merging into a lane above about 45 mph
10	Navigate On/Off Ramps	Driving on/off-ramps, which are typically oneway and steeply curved segments
11	Right-of-Way Decisions	Obeying directional restrictions; one-way roads and actively managed lanes
12	Follow Driving Laws	Obeying motor vehicle codes and local ordinances
13	Navigate Roundabouts	Determining right-of-way, enters, navigates, and exits a roundabout
14	Navigate Intersection	Determining right-of-way, enters, navigates, and exits intersections
15	Navigate Crosswalk	Determining right-of-way, enters, navigates, and exits pedestrian crosswalks
16	Navigate Work Zone	Determining right-of-way and traffic patterns, enters, navigates and exits work zone
17	N-Point Turn	Making a heading adjustment to reposition the vehicle within a tight space
18	U-Turn	Determining right-of-way, initiates, and completes a U-turn
19	Route Planning	Using various information to define a route network including road segments

2. 시뮬레이션 기반 자율주행 거동 제어 관련 연구

자율주행 도입 시 자율차 거동 제어를 위한 파라미터는 개별 단위 차량뿐만 아니라 전반적인 교통류의 안전성을 저하시키지 않는 범위 내에서 결정되어야 할 중요 요소이다. 긴급 제동 보조시스템, 차간거리 제어, 충돌 회피 시스템과 같은 제어시스템이 구동되기 위한 알고리즘 개발에 대한 연구가 다수 수행되었다 (ArvindRaj et al., 2011; Han et al., 2014; Kausar et al., 2012). Atkins(2016)는 자율주행이 교통류에 미치는 잠재

적인 영향을 정량화하기 위하여 VISSIM 내의 주행행태 파라미터를 자율주행 단계별로 제시하였다. 미국 도로교통안전국에서 제시한 자율주행 단계는 6단계로 구성되어 있으며, Level 0은 비자동화 단계이고 Level 5는 완전자동화 단계이다(U.S. DOT, 2018). 예를 들어, Level 4 자율주행은 선행차량과의 차두시간을 0.6초로 유지하고, 차량 추종 상황에서 가감속도를 $0.4m/s^2$ 으로 제한한다. 또한, 자율차는 인접차로의 선·후행차량과 2.4초의 차두시간이 확보되면 차로변경을 수행한다(Atkins, 2016). VISSIM의 내부 파라미터 조정을 통한 자율주행 환경 구현이 가능함에 따라 교통류 단위 안전성 및 운영효율성을 분석한 연구가 수행되었다(Aria et al., 2016; Lu et al., 2020; Hu et al., 2021). 또한, VISSIM 내의 주행행태 파라미터를 조정함으로써 자율주행 적극성을 정의한 연구가 수행되었다(Lee et al., 2018a). 자율주행적극성은 자율차의 주행 적극성을 나타내는 수준으로 속도, 가속도, 거리 관련 파라미터 값을 등간격으로 설정하여 9수준으로 구분된다. 9수준에 해당하는 적극적인 자율주행 거동은 1수준인 소극적인 자율주행 거동보다 차두거리와 차로변경을 위한 수락간격이 짧은 행태를 보이는 것으로 나타났다(Lee et al., 2018a; Lee et al., 2019).

3. 자율주행자동차 주행행태 관련 연구

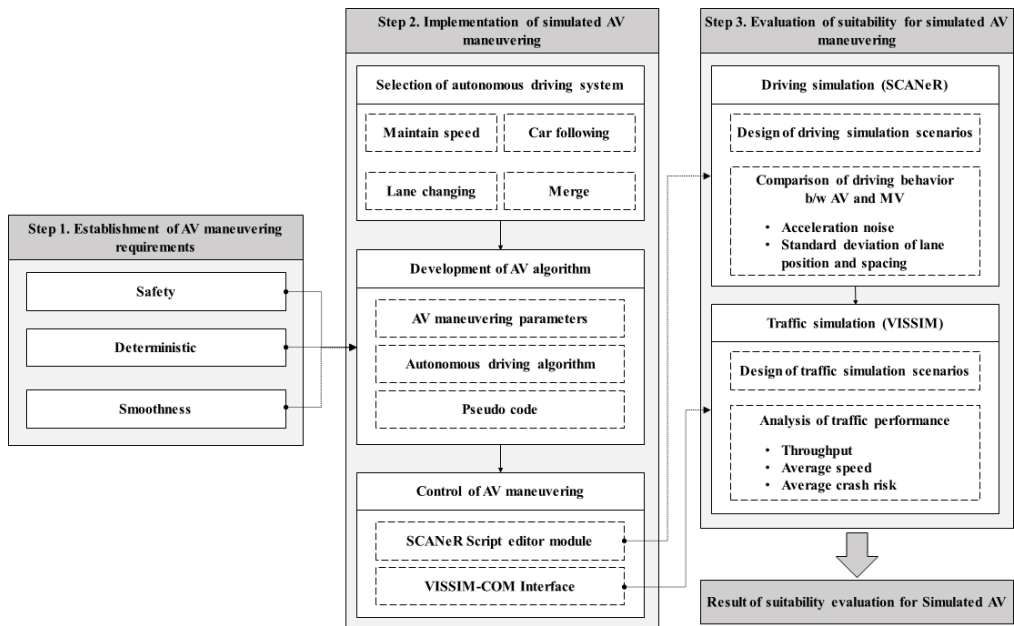
전방 충돌 경고시스템 및 AEB가 장착된 자율차의 도입은 운전자 과실로 인한 사고 예방이 가능하며, 특히 후미추돌 사고를 감소시키는데 효과적인 것으로 보고되었다(Detwiler and Gabler, 2017; Sohrobi et al., 2021). 자율차는 선행차량과 적정 이격거리 및 일정한 속도를 유지하기 때문에 속도의 분산이 감소하여 사고 발생 개연성이 저하된다(Amoozadeh et al., 2015). 이에 따라, 자율차의 MPR 증가할수록 상충건수 및 상충률이 감소하는 것으로 분석되었다(Arvin et al., 2020; Morando et al., 2018; Papadoulis et al., 2019). 한편, 자율차의 path planning 알고리즘 개발 시 smoothness는 주요 성능 평가 대상이며, 자율차가 일정한 속도 및 가감속도를 유지하며 주행하는데 초점을 둔다(Paden et al., 2016). 예를 들어, 차로변경 시 차량의 가속도 및 횡방향 offset을 조정하여 자율차는 안정적인 주행 특성을 나타낸다(Lee and Litkouhi, 2012). 최근에는 강화학습을 기반으로 자율차의 속도, 가속도, 조향, 차두거리를 결정 및 제어하는 알고리즘이 개발됨에 따라 자율차는 비자율차와는 달리 동일한 조건에서는 항상 일정한 주행행태를 보이는 것으로 보고되었다(Lillicrap et al., 2015; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2019).

4. 시사점

앞서 제시한 기존 연구를 검토한 결과, 본연구의 시사점은 총 3가지로 정리될 수 있다. 첫째, 기존 연구에서는 주로 자율주행 관련 파라미터를 조정하는데 초점을 두었으나 본 연구의 주안점은 제어된 자율차 거동의 적정성을 평가하는 것이다. 둘째, 대부분의 연구에서는 미시교통 시뮬레이션을 이용하여 교통류 단위의 효과를 추정하였으나 본 연구에서는 개별차량 단위의 주행행태를 비교하기 위하여 multi-agent driving simulation(MADS)을 활용하였다. 마지막으로 자율차 거동의 요구사항이 반영된 알고리즘 개발을 통한 주행 및 교통 시뮬레이션 기반의 simulated AV 거동의 현실성을 확보하였다. 군집주행 기술을 적용한 기존 연구와는 달리 두 대의 차량 간 pair에 따른 개별차량 단위의 주행행태 특성을 비교함으로써 시뮬레이션으로 구현된 자율차 거동의 적정성을 평가하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 자율주행 도입 이전 및 초기 단계에서 실효성 있는 시뮬레이션 연구가 필요함을 인지하고, 이를 위하여 simulated AV 거동의 적정성 평가 방법론을 개발한 점에서 기존연구와 차별화된다.

Ⅲ. 분석방법론

본 연구에서는 주행 및 교통 시뮬레이션을 기반으로 구현된 simulated AV 거동의 적정성을 평가하는 방법론을 개발하였다. 연구의 수행 절차를 <Fig. 1>에 제시하였다. 우선, 기존 문헌 고찰 결과를 토대로 자율차 거동의 요구사항을 정립한다. 둘째, 주행 및 교통 시뮬레이션을 이용하여 자율차의 거동을 구현한다. 자율주행 기능 선정 및 알고리즘 개발을 통해 주행 시뮬레이션인 SCANeR의 script editor 모듈과 교통 시뮬레이션인 VISSIM의 COM interface에 로직 작성을 수행한다. 셋째, simulated AV 거동의 적정성을 평가한다. 주행 및 교통 시뮬레이션을 기반으로 구현된 자율차의 거동과 비자율차 간의 주행행태 특성을 비교함으로써 simulated AV 거동에 대한 현실성을 확보할 수 있다. 따라서 본 연구의 주안점은 car following pair에 따른 개별차량 단위의 거동 비교·분석을 통한 simulated AV 거동의 적정성을 평가하는 것이다.



<Fig. 1> Overall research procedure

1. 자율차 거동 요구사항 정립

본 연구에서는 자율차와 비자율차의 거동 특성에 차이가 존재한다고 가정하였으며, 기존 연구를 참고하여 자율차 거동에 대한 3가지의 요구사항을 정립하였다. 첫 번째는 safety이다. 자율차는 주변차량의 cut-in/out 등을 제외하고 스스로 위험상황 발생이 불가하다. 두 번째는 deterministic이다. 자율주행 시스템은 사전에 정의된 로직에 따라 주행경로, 가감속, 조향 등을 결정한다(Lillicrap et al., 2015; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2019). 이에 따라, 자율차는 비자율차와는 달리 동일한 조건에서는 항상 일정한 주행행태를 보이는 특성이 있다. 세 번째는 smoothness이다. 자율차의 종·횡방향 제어 기능은 차량의 속도 및 가감속도를 일정하게 유지하고, lane offset을 조정하여 안정적인 주행을 지원하기 때문에 자율차는 smoothness한 주행 특성을 가진다(Paden et al., 2016; Lee and Litkouhi, 2012).

2. 시뮬레이션 기반 자율차 거동 구현

주행 및 교통 시뮬레이션 환경에서 자율차의 거동을 구현하기 위해서는 자율주행 기능 선정 및 알고리즘 개발이 요구된다. 실제 자율주행을 위한 시스템으로는 속도유지, 차량추종 등의 종방향 제어 기능과 차로변경, 장애물 회피, 합류 등의 횡방향 제어 기능이 존재한다(NHTSA, 2018). 본 연구에서는 이러한 시스템이 구동되었을 때의 추상화된 자율차의 거동을 구현하고자 하였다. 추상화란 시스템과 기능의 핵심적인 개념을 명확하게 간추려 단순화시키는 것을 의미한다. 실제 자율차의 인지 및 판단, 통신기능 등을 시뮬레이션 환경에서 구현하는 것은 과도한 계산부하가 요구되기 때문에 자율차 거동 추상화를 통해 시뮬레이션을 수행할 수 있다(Lee et al., 2018a, Lee et al., 2019). 본 연구에서는 속도유지, 차량추종, 차로변경, 합류에 대한 4가지의 기능이 구동되었을 때의 자율차 거동을 추상화하기 위하여 SCANer의 script editor 모듈과 VISSIM-COM interface를 이용하였다. SCANer는 AV, Advanced driver assistance system(ADAS), Human-machine interface(HMI)에 대한 테스트 및 운전을 모두 처리하는 차량 시뮬레이션 소프트웨어이다. SCANer의 script editor 모듈은 개별차량 단위로 속도, 가속도, 차두거리 등을 조절할 수 있는 함수 리스트를 제공한다. VISSIM은 미시적 교통 시뮬레이션 모형으로 차량의 거동을 모델링하기 위한 미시적 시간 단위의 분석 소프트웨어이다. VISSIM-COM interface는 실시간 차량 거동 제어 및 교통류 단위 performance 분석이 가능하다. 주행 및 교통 시뮬레이션 환경에서 자율차 거동 제어에 대한 각 기능별 알고리즘에 대한 pseudo code는 <Table 2>에 제시하였다. 자율차 거동 제어를 위한 파라미터 값은 기존문헌에서 보고된 Level 4 자율주행 수준에 해당하는 파라미터 값을 참고하였다(Atkins, 2016). 자율차 거동 제어 알고리즘에 사용된 파라미터는 다양한 수준에 해당하는 파라미터 값 적용이 가능하다.

<Table 2> Pseudo code of the maneuvering control algorithm for AV

Algorithm 1: Maintain speed and car following	
Input: AV speed at time step t V_t^{AV} ; AV headway at time step t H_t^{AV} ; front vehicle speed at time step t V_t^{FV}	
Parameter setting: target speed $V^{target} = 100km/h$; target headway $H^{target} = 0.6s$	
Process:	
// Maintain speed mode	// Car following mode
For $t = 1, 2, \dots, T$	For $t = 1, 2, \dots, T$
if $V_t^{AV} < V^{target}$ & $V_t^{AV} < 80km/h$	if $H_t^{AV} = H^{target}$ & $V_t^{AV} < V_t^{FV}$
return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} + 3.6m/s^2 \times 1s \times 3.6$	return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} + 0.4m/s^2 \times 1s \times 3.6$
else if $V_t^{AV} < V^{target}$ & $V_t^{AV} \geq 80km/h$	else if $H_t^{AV} = H^{target}$ & $V_t^{AV} > V_t^{FV}$
return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} + 1.8m/s^2 \times 1s \times 3.6$	return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} - 0.4m/s^2 \times 1s \times 3.6$
else if $V_t^{AV} > V^{target}$	else if $H_t^{AV} = H^{target}$ & $V_t^{AV} = V_t^{FV}$
return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} - 1.8m/s^2 \times 1s \times 3.6$	return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV}$
else	end
return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV}$	end
end	
end	
Output: AV speed at time step $t+1$ V_{t+1}^{AV}	

<Table 2> Pseudo code of the maneuvering control algorithm for AV (continuation)

Algorithm 2: Lane changing
<p>Input: AV speed at time step t V_t^{AV}; driving lane of AV at time step t L_t^{AV}; target lane at time step t TL_t; remaining time until diverge deceleration lane at time step t $RT_t^{diverge}$; headway between AV and following vehicle on target lane at time step t H_t^{TLF}; headway between AV and leading vehicle on target lane at time step t H_t^{TLL};</p> <p>Process:</p> <p>For $t = 1, 2, \dots, T$</p> <p style="padding-left: 20px;">if $RT_t^{diverge} < 8s$</p> <p style="padding-left: 40px;">return $TL_t = L_t^{AV} + 1$</p> <p style="padding-left: 40px;">if $H_t^{TLF} > 2.4s \ \& \ H_t^{TLL} > 2.4s$</p> <p style="padding-left: 60px;">return $L_{t+1}^{AV} = TL_t$</p> <p style="padding-left: 40px;">else</p> <p style="padding-left: 60px;">return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} - 2m/s^2 \times 1s \times 3.6$</p> <p style="padding-left: 40px;">end</p> <p style="padding-left: 20px;">else</p> <p style="padding-left: 40px;">return $TL_t = L_t^{AV} + 1$; $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p>end</p> <p>Output: AV speed at time step $t+1$ V_{t+1}^{AV}; driving lane of AV at time step $t+1$ L_{t+1}^{AV}</p>
Algorithm 3: Merge
<p>Input: AV speed at time step t V_t^{AV}; AV acceleration at time step t a_t^{AV}; driving lane of AV at time step t L_t^{AV}; target lane at time step t TL_t; remaining distance until merge acceleration lane at time step t D_t^{merge}; headway between AV and following vehicle on target lane at time step t H_t^{TLF}; headway between AV and leading vehicle on target lane at time step t H_t^{TLL};</p> <p>Parameter setting: perception-reaction time of AV $t_r^{AV} = 0.5s$</p> <p>Process:</p> <p>For $t = 1, 2, \dots, T$</p> <p style="padding-left: 20px;">return $SSD_t^{AV} = V_t^{AV} t_r^{AV} + \frac{(V_t^{AV})^2}{2a_t^{AV}}$; $TL_t = L_t^{AV} - 1$</p> <p style="padding-left: 20px;">if $H_t^{TLF} > 2.4s \ \& \ H_t^{TLL} > 2.4s$</p> <p style="padding-left: 40px;">if $V_t^{TLF} > V_t^{AV}$ or $V_t^{TLL} > V_t^{AV}$</p> <p style="padding-left: 60px;">return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} + 2m/s^2 \times 1s \times 3.6$; $L_{t+1}^{AV} = TL_t$</p> <p style="padding-left: 40px;">else</p> <p style="padding-left: 60px;">return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} - 2m/s^2 \times 1s \times 3.6$; $L_{t+1}^{AV} = TL_t$</p> <p style="padding-left: 40px;">end</p> <p style="padding-left: 20px;">else</p> <p style="padding-left: 40px;">if $D_t^{merge} < SSD_t^{AV}$</p> <p style="padding-left: 60px;">return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} - 4m/s^2 \times 1s \times 3.6$</p> <p style="padding-left: 40px;">else</p> <p style="padding-left: 60px;">return $V_{t+1}^{AV} = V_t^{AV} - 2m/s^2 \times 1s \times 3.6$</p> <p style="padding-left: 40px;">end</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p>end</p> <p>Output: AV speed at time step $t+1$ V_{t+1}^{AV}; driving lane of AV at time step $t+1$ L_{t+1}^{AV}</p>

3. Simulated AV 거동 적정성 평가 방법론

Simulated AV 거동의 적정성은 개별차량 및 교통류 단위로 평가되며 관련 방법론은 <Fig. 2>에 제시하였다. 주행 시뮬레이션은 개별차량 단위의 주행행태 분석을 통한 자율차와 비자율차의 거동 특성 비교를 목적으로 사용되었다. 이때 두 대의 주행 시뮬레이터를 실시간으로 연동하여 차량 간 상호작용 기반 주행행태 및 주행안전성을 분석할 수 있는 MADS를 이용하였다. 개별차량 단위의 주행 특성이 고려된 자율차 거동 적정성 평가지표는 가속소음, lane position 표준편차, spacing 표준편차로 선정하였다. 가속소음은 가속도의 표준편차를 의미하며, lane position은 차로의 중심선으로부터 차량 중심까지의 거리를 나타낸다(Ko et al., 2021; Jang et al., 2020; Jung et al., 2021). 자율차가 비자율차보다 가속소음 및 lane position 표준편차가 낮을수록 자율차의 주행특성은 safety, smoothness하다고 할 수 있다. 또한, spacing은 후행차량의 차두에서 선행차량의 후미까지의 거리를 의미하며(Park et al., 2019; Jang et al., 2020), 자율차가 비자율차보다 spacing 표준편차가 작을수록 자율차는 safety, deterministic한 주행특성을 보이는 것으로 해석할 수 있다. 가속소음, lane position 표준편차, spacing 표준편차의 산출식은 각각 Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3)에 제시하였다.

$$AN = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (a_t - \bar{a})^2}{n}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, AN: acceleration noise (m/s²)
 a_t: acceleration at time t (m/s²)
 ā: average of acceleration (m/s²)
 n: number of data samples

$$stdLP = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (LP_t - \overline{LP})^2}{n}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, stdLP : standard deviation of lane position (m)
 LP_t: lane position at time t (m)
 LP̄: average of lane position (m)
 n: number of data samples

$$stdSP = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (SP_t - \overline{SP})^2}{n}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, stdSP : standard deviation of spacing (m)
 SP_t: spacing at time t (m)
 SP̄: average of spacing (m)
 n: number of data samples

주행 시뮬레이션을 기반으로 자율차가 비자율차보다 가속소음, lane position 표준편차, spacing 표준편차가 작아 자율차 거동의 요구사항이 만족될 경우에는 교통류 단위의 퍼포먼스를 분석한다. 교통 시뮬레이션은 자율차 MPR 변화에 따른 운영효율성 및 안정성 비교를 목적으로 사용되었다. 교통류 퍼포먼스 평가지표는 통과교통량, 평균 속도, 평균 crash potential(CP)로 선정하였다. 통과교통량과 평균 속도는 운영효율성 측면에서 교통류 퍼포먼스를 평가하기 위한 지표로 사용되며, 통과교통량 및 평균 속도가 증가할수록 교통류 퍼포먼스는 증대된다. CP는 특정 시점에서 후행차량이 선행차량과의 충돌을 회피하기 위해 필요로 하는 감속도

(deceleration rate to avoid crash; DRAC)가 차량 고유의 최대 감속도(maximum available deceleration rate; MADR) 보다 클 확률을 의미한다(Cunto and Saccomanno, 2008). 다시 말해서, DRAC이 MADR보다 클수록 사고개연성이 증가하고, 결과적으로 교통류 퍼포먼스가 저하되는 것으로 해석할 수 있다. 평균 CP의 산출식은 각각 Eq. (4)에 제시하였다. 최종적으로 자율차의 MPR이 높을수록 교통류 퍼포먼스가 향상될 경우에는 simulated AV의 거동이 적정하다고 할 수 있다.

$$CP_t = Pr(MADR^{(a_1, a_2, \dots, a_n)} \leq DRAC_t) \dots\dots\dots (4)$$

$$\overline{CP} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n CP_t$$

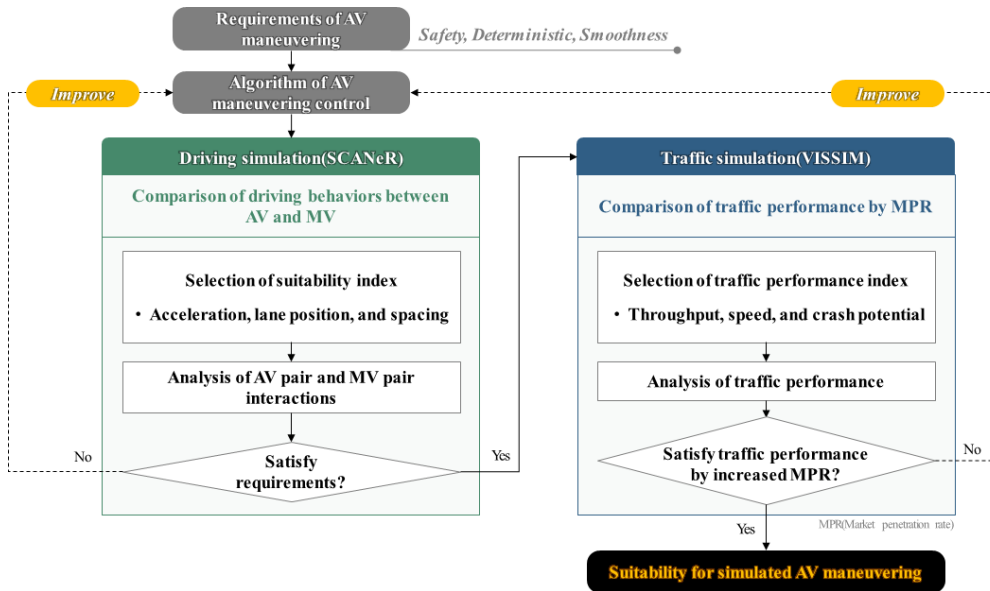
여기서, CP_t : crash potential for following vehicle at time t

\overline{CP} : average of crash potential

$DRAC_t$: deceleration rate to avoid crash for following vehicle at time t (m/s²)

$MADR^{(a_1, a_2, \dots, a_n)}$: Random variable following normal distribution for given set of traffic and environmental attributes (a_1, a_2, \dots, a_n) (m/s²)

n : number of data samples



<Fig. 2> Methodology of suitability evaluation for simulated AV maneuvering

IV. 분석 결과

1. MADS 기반 Simulated AV 거동 적정성 평가

주행 시뮬레이션을 기반으로 구현된 simulated AV 거동의 적정성을 평가하기 위한 주행 시나리오는 <Table 3>와 같다. 본 연구에서는 평면선형(직선, 좌커브, 우커브), 종단선형(평지, 오르막, 내리막), 복합선형이 포함된 총 22.3km의 시뮬레이션 네트워크를 구축하였다. 곡선부의 평면곡선 반지름은 710m로 설정하였

으며, 각 분석구간 사이에는 최소 정지시거인 215m에 대한 직선·평지 구간을 포함한다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020). 또한, 자율차 및 비자율차에 대한 car following pair에 따른 차량간 상호작용 시나리오를 설정하였으며, 총 10명의 피실험자를 모집하여 실험을 수행하였다.

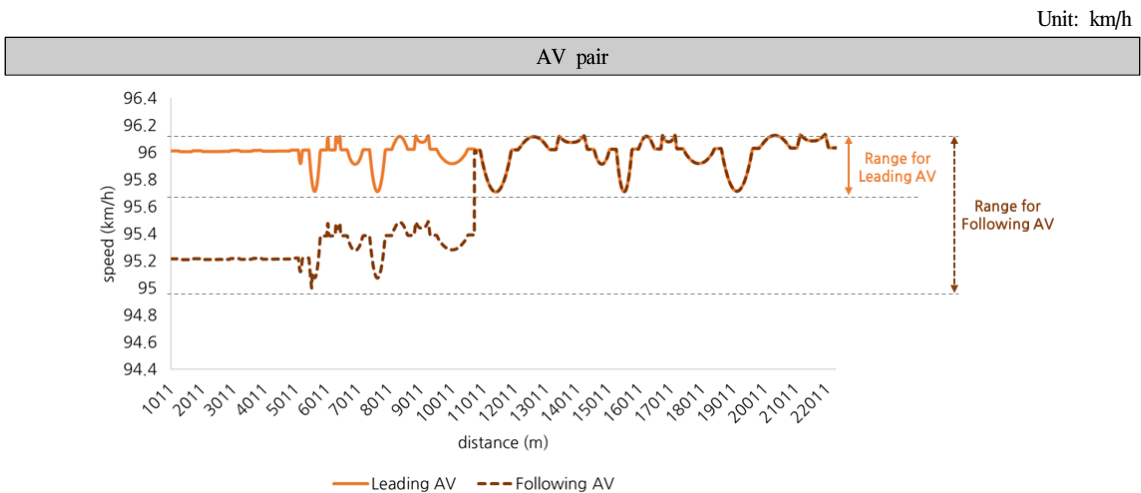
<Table 3> Scenarios of driving simulation

Section ID	Road alignment	Length(m)	Section ID	Road alignment	Length(m)
1	left curve 500m	500	13	left curve 1,000m uphill slope 1%	1,000
2	left curve 1,000m	1,000	14	left curve 1,000m uphill slope 3%	1,000
3	right curve 500m	500	15	right curve 1,000m downhill slope 1%	1,000
4	right curve 1,000m	1,000	16	right curve 1,000m downhill slope 3%	1,000
5	uphill slope 1%	120	17	right curve 500m uphill slope 1%	500
6	uphill slope 3%	360	18	right curve 500m uphill slope 3%	500
7	downhill slope 1%	55	19	left curve 500m downhill slope 1%	500
8	downhill slope 3%	165	20	left curve 500m downhill slope 3%	500
9	left curve 500m uphill slope 1%	500	21	right curve 1,000m uphill slope 1%	1,000
10	left curve 500m uphill slope 3%	500	22	right curve 1,000m uphill slope 3%	1,000
11	right curve 500m downhill slope 1%	500	23	left curve 1,000m downhill slope 1%	1,000
12	right curve 500m downhill slope 3%	500	24	left curve 1,000m downhill slope 3%	1,000

1) 주행속도 프로파일 분석 결과

주행 시뮬레이션으로부터 수집된 개별 자율차 및 비자율차의 주행궤적자료를 이용하여 car following pair에 따른 주행행태를 분석하였다. 동일 구간에서의 AV pair와 MV pair의 주행속도 프로파일 예시는 <Table 4>에

<Table 4> Illustrative example for speed profile by car following pair



<Table 4> Illustrative example for speed profile by car following pair (continuation)

	Average	Standard deviation	Minimum	Maximum	Range
Leading AV	96.00	0.10	95.71	96.13	0.43
Following AV	95.67	0.37	95.00	96.13	1.13
MV pair					
	Average	Standard deviation	Minimum	Maximum	Range
Leading MV	107.85	6.88	88.45	121.83	33.37
Following MV	103.05	7.75	89.07	133.15	44.08

제시하였다. 자율차는 제한속도 100km/h를 준수하며 주행하는 반면에 비자율차 운전자는 제한속도를 벗어나 주행하는 행태를 보였다. 주행 안전성 측면에서의 자율차와 비자율차의 행태 비교를 위하여 주행속도 표준편차를 분석한 결과, AV pair의 경우는 선·후행 자율차의 주행속도 표준편차가 각각 0.10km/h, 0.37km/h로 도출되었다. 반면에, MV pair의 주행속도 표준편차는 각각 6.88km/h, 7.75km/h로 분석되어 자율차가 비자율차보다 안정적으로 주행하는 것으로 나타났다. 또한, 주행속도의 최댓값과 최솟값의 차이를 나타내는 속도의 범위는 선·후행 자율차 각각 0.43km/h, 1.13km/h로 산출되었다. 선·후행 비자율차의 주행속도 범위는 각각 33.37km/h, 44.08km/h로 도출되었다. 따라서 MV pair 대비 AV pair의 주행속도 표준편차가 7.08km/h(약 31배), 속도의 범위는 37.95km/h(약 50배) 낮은 것으로 분석되었다.

2) Simulated AV 거동 적정성 평가 결과

본 연구에서는 simulated AV 거동의 적정성을 평가하기 위한 지표로 가속소음, lane position 표준편차, spacing 표준편차를 선정하였다. 각각의 pair에 대한 평가지표별 기술통계량을 <Table 5>에 제시하였다. 자율차보다 비자율차의 가속소음이 높은 것으로 나타났으며, 이는 비자율차 운전자가 빈번하게 가감속을 수행하여 가속도의 표준편차가 증가한 것으로 분석되었다. 또한, lane position 및 spacing 표준편차 모두 비자율차보다 자율차가 낮은 것으로 도출되어 simulated AV의 거동은 safety, deterministic, smoothness에 대한 요구사항을 만족하는 것으로 나타났다. AV pair와 MV pair에 대해 각 평가지표 간 통계적인 차이가 존재하는 검증하기 위하여 t-test를 수행하였다. 분석 결과, 각 평가지표는 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 차이(p<0.05)가 존재하는 것으로 나타났으며, <Table 6>에 제시하였다.

<Table 5> Results of descriptive statistics for suitability index by car following pair

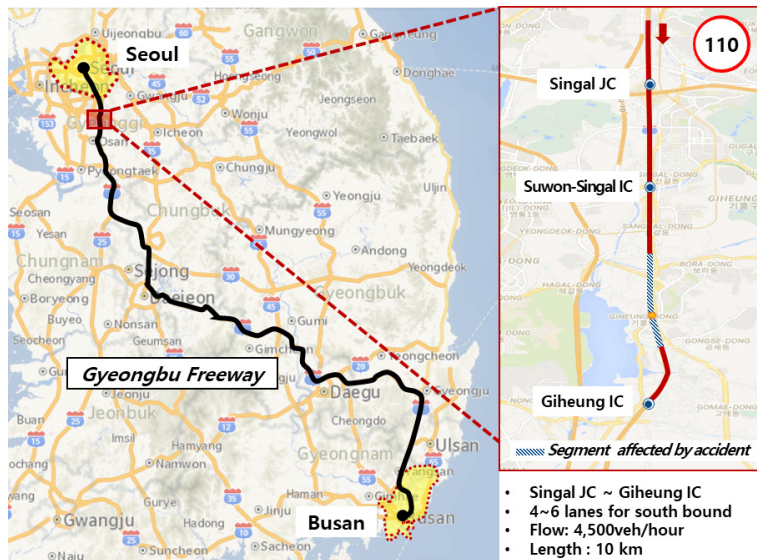
Index	AV pair				MV pair			
	Average	Std.	Minimum	Maximum	Average	Std.	Minimum	Maximum
Acceleration noise(m/s ²)	0.2714	0.0000	0.2714	0.2714	0.3755	0.0804	0.4871	0.2797
Std. lane position(m)	0.0930	0.0000	0.0930	0.0930	0.2495	0.0606	0.3475	0.1523
Std. spacing(m)	31.0000	0.0000	31.0000	31.0000	60.9759	23.9574	90.2800	34.1186
Std.: Standard deviation								

<Table 6> Comparison of suitability index by t-test

		Levene's test for equality variances		T-test for equality of means		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
Acceleration noise	Equal variances assumed	34.679	0.000	4.096	18	0.001
	Equal variances not assumed			4.096	9	0.003
Std. lane position	Equal variances assumed	22.391	0.000	8.170	18	0.000
	Equal variances not assumed			8.170	9	0.000
Std. spacing	Equal variances assumed	41.217	0.000	4.054	14	0.001
	Equal variances not assumed		3.065	5	0.028	
Std.: Standard deviation						

2. VISSIM 기반 Simulated AV 거동 적정성 평가

본 연구에서는 VISSIM-COM interface를 통해 구현된 simulated AV와 비자율차가 혼재된 상황에서의 교통류 퍼포먼스를 분석하였다. 해당구간은 C-ITS 실증사업 구간 중 사고다발구간으로 차량 간 상호작용이 빈번히 발생하는 특성이 있다(Jo et al., 2021). 본 연구에서는 교통흐름이 원활하고 통행자유도가 높은 상황에서의 자율차 및 비자율차의 거동 특성을 분석하기 위하여 서비스수준 B에 해당하는 교통량 4500대/시를 시나



<Fig. 3> Study area

리오에 반영하였다. 이 때, 모든 차종은 승용차로 가정하여 버스전용차로는 본 연구의 시나리오에서 제외하였다. 교통 시뮬레이션을 통해 구현된 분석 네트워크를 일정수준 이상으로 실제 교통흐름과 유사하도록 구현하기 위하여 정산을 수행하였다. 분석 대상 구간에 설치된 4개의 VDS 검지기에서 5분 단위로 수집된 교통자료와 시뮬레이션에서 수집된 자료를 U-Value를 활용하여 검증하였으며, 정산 검증 결과 모두 0.1 이하로 나타나 실제 교통흐름과 유사하다고 분석되었다(Jo et al., 2019; Jo et al., 2021). 한편, 수원실갈IC~기흥IC 구간 내에 사고상황을 구현하여 사고발생 지점으로부터 상류부 1km~하류부 0.5km 구간에 대한 사고영향권의 교통류 퍼포먼스를 분석하였다. 시뮬레이션 시나리오는 MPR 0%, 50%, 100%로 설정하였으며, 총 10회 반복 수행하였다.

1) 교통류 퍼포먼스 분석 결과

자율차 MPR 변화에 따른 사고영향권의 교통류 퍼포먼스를 분석하기 위하여 통과교통량, 평균 속도, 평균 CP를 비교하였다. 사고영향권은 수원실갈IC~기흥IC 구간 내 사고발생 지점으로부터 상류부 1km~하류부 0.5km에 해당하는 총 1.5km 구간이다. 시나리오별 교통류 퍼포먼스 평가지표에 대한 기술통계량을 <Table 7>에 제시하였다. MPR 0%보다 MPR 100%인 상황에서 평균 속도가 26.37km/h(약 1.37배) 증가한 것으로 나타났다으며, 이는 모든 차량이 비자율차인 경우보다 자율차인 경우 사고상황에서 운영효율성이 향상되는 것으로 분석되었다. MPR 증가 시 평균 속도가 높아짐에 따라 통과교통량이 289.8대/시 증대된 것으로 도출되었다. 한편, 평균 CP의 경우는 MPR이 증가할수록 감소하는 패턴을 보이며 MPR 0% 대비 MPR 100%인 경우 평균 CP는 약 2.03배 감소하는 것으로 나타났다. 자율차는 일정한 속도 및 이격거리를 유지하며 주행하기 때문에 MPR이 증가할수록 교통류의 안전성이 증대되는 것으로 해석된다. 최종적으로, MPR의 증가는 통과교통량과 평균 속도를 증대시키고, 평균 CP를 감소시키는 것으로 나타나 교통류 전반의 안전성과 운영효율성이 모두 향상되는 것으로 분석되었다. MPR에 따른 교통류 퍼포먼스 평가지표 간 통계적으로 차이가 존재하는지 검증하기 위하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 분석 결과, 각 평가지표는 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 차이(p<0.05)가 존재하는 것으로 나타났으며 <Table 8>에 제시하였다. 따라서 simulated AV 거동은 교통류 퍼포먼스 측면의 요구조건을 만족한다고 할 수 있다.

<Table 7> Comparison of traffic performance by MPRs

	Throughput (veh/h)			Average speed (km/h)			Average CP		
	MPR 0%	MPR 50%	MPR 100%	MPR 0%	MPR 50%	MPR 100%	MPR 0%	MPR 50%	MPR 100%
Average	4482.40	4678.20	4772.20	71.80	82.65	98.17	0.001009	0.000875	0.000497
Std.	109.23	96.60	92.99	0.35	0.68	0.37	0.000036	0.000042	0.000055
Minimum	4314.00	4480.00	4586.00	71.23	81.42	97.65	0.000936	0.000814	0.000423
Maximum	4654.00	4830.00	4930.00	72.38	83.90	98.80	0.001056	0.000947	0.000622

Std.: Standard deviation

<Table 8> Comparison of traffic performance index by ANOVA

		ANOVA				
		Sum of Squares	d.f	Mean Square	F	Sig.
Throughput	Between Groups	437192.267	2	218596.133	19.734	0.000
	Within Groups	299085.600	27	11077.244		
	Total	736277.867	29			
Average speed	Between Groups	3514.939	2	1757.470	6552.462	0.000
	Within Groups	7.242	27	0.268		
	Total	3522.181	29			
Average CP	Between Groups	1.406.E-06	2	7.028.E-07	311.322	0.000
	Within Groups	6.095.E-08	27	2.258.E-09		
	Total	1.467.E-06	29			

V. 결론 및 향후 연구과제

자율주행 기술을 활용하여 사고예방과 정체 감소를 위한 교통운영관리 전략을 개발하는 다양한 연구가 시뮬레이션을 기반으로 수행되고 있다. 시뮬레이션을 기반으로 구현되는 자율차의 거동이 실제 상황을 충분히 반영되기 위해서는 실제 자율차의 주행자료 수집이 요구된다. 그러나 자율차의 주행자료와 주변 비자율차량과의 상호작용 자료 취득의 한계로 자율차 주행행태가 반영된 시뮬레이션을 수행한 연구는 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 보다 신뢰성 있는 자율주행 시뮬레이션 분석을 위한 simulated AV 거동의 적정성을 평가하는 방법론을 개발하였다.

본 연구에서는 주행 시뮬레이션과 교통 시뮬레이션을 이용하여 simulated AV 거동의 적정성을 평가하였다. 우선, 자율차 거동의 요구사항을 safety, deterministic, smoothness로 정의하였으며, 해당 요구사항을 평가할 수 있는 지표로 가속소음, lane position 표준편차, spacing 표준편차를 선정하였다. 차량 제어 기능 중 maintain speed, car following, lane changing, merge에 대한 알고리즘이 개발되었으며 SCANer의 script editor 모듈과 VISSIM의 COM-interface에 적용되었다. 주행 시뮬레이션은 개별차량 단위 주행행태 분석을 통한 자율차와 비자율차의 거동 특성 비교를 목적으로 사용되었다. 자율차는 비자율차보다 가속소음, lane position 표준편차, spacing 표준편차가 낮은 것으로 나타나 simulated AV 거동의 요구사항을 만족한 것으로 분석되었다. 또한, 교통류 퍼포먼스 분석을 위하여 교통 시뮬레이션을 이용하였다. MPR이 증가할수록 통과교통량과 평균 속도가 높아지고, 평균 CP가 감소하여 교통류 전반의 안전성 및 운영효율성이 증대되는 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 시뮬레이션을 기반으로 자율주행 환경에서의 교통 영향 분석 시 simulated AV 거동의 현실성 확보를 위한 기초연구로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

국내에서는 Level 4 자율주행 상용화를 목표로 자율주행 신기술, 자율주행 생태계, 도로교통융합 신기술을 중심으로 자율주행 기술개발 혁신사업이 수행되고 있다. 자율주행 도입에 따른 도로 안전성 평가 가이드라인이 설계되기 위해서는 다양한 도로교통 조건을 평가할 수 있는 시뮬레이션 활용이 필수적이다. 본 연구에서 제시한 simulated AV 적정성 평가 방법론은 도로 안전성 평가 이전에 시뮬레이션의 실효성을 확보하기 위한 기초 연구자료로 활용될 수 있다. 시뮬레이션 기반 자율주행 환경에서의 차량 간 상호작용 분석 및 주행안전성 평가는 현실성 있는 simulated AV 거동 구현을 통해 가능하다. 안전성 평가 결과는 구간별 집계를

통해 도로 안전 등급을 제시할 수 있으며, 안전한 자율주행이 가능한 구간을 도출함으로써 도로 안전성 평가 가이드라인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서 제시한 simulated AV 거동 적정성 평가 방법에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 비자율차 운전자의 주행정보를 이용하여 비자율차 거동 구현을 위한 알고리즘을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 기반의 자율차 거동 제어에 초점을 두었으나, 실제 비자율차 운전자를 대상으로 주행행태를 분석하여 simulated MV 거동에 대한 로직 개발이 요구된다. 현실성이 확보된 simulated AV 및 MV를 기반으로 실효성 있는 교통 영향 분석이 가능할 것으로 기대된다. 둘째, 도심부 교차로와 같은 단속류 도로를 대상으로 자율차와 비자율차의 거동 특성 분석을 수행할 필요가 있다. 단속류에서의 안전한 자율주행을 위한 navigate roundabouts, intersection, crosswalk에 대한 알고리즘 개발을 통해 추가적인 simulated AV 거동의 적정성 평가가 요구된다. 마지막으로, 자율협력주행 및 군집주행을 대상으로 연구의 범위를 확장하여 다양한 자율차의 거동을 고려할 필요가 있다. 추후 자율차의 실제 주행정보가 수집될 경우에는 시뮬레이션 정산 및 검증을 통해 보다 정교한 차량 제어가 가능할 것으로 기대된다. 본 연구의 결과는 자율주행 도입 이전 및 초기 단계에서 시뮬레이션을 기반으로 교통안전 분석 시 car following pair에 따른 주행행태 비교를 통해 simulated AV 거동의 현실성을 확보하는데 의의가 있다. 앞서 언급한 향후 연구내용에 대한 체계적인 분석을 통해 실질적으로 적용 가능한 기술을 개발하기 위한 다각적인 노력이 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(No. 21AMDP - C160881-01, 자율협력주행을 위한 미래도로 설계 및 실증 기술 개발).

REFERENCES

- Alexander, D. and Gartner, J.(2013), *Self-driving vehicles, autonomous parking, and other advanced driver assistance systems: Global market analysis and forecasts*.
- Amoozadeh, M., Deng, H., Chuah, C. N., Zhang, H. M. and Ghosal, D.(2015), "Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET", *Vehicular Communications*, vol. 2, no. 2, pp.110-123.
- Aramrattana, M., Larsson, T., Englund, C., Jansson, J. and Nabo, A.(2017), "Simulation of cut-in by manually driven vehicles in platooning scenarios", *In 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.1-6.
- Aria, E., Olstam, J. and wietering, C.(2016), "Investigation of automated vehicle effects on driver's behavior and traffic performance", *Transportation Research Procedia*, vol. 15, pp.761-770.
- Arvin, R., Khattak, A. J., Kamrani, M. and Rio-Torres, J.(2020), "Safety evaluation of connected and automated vehicles in mixed traffic with conventional vehicles at intersections", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 2, pp.170-187.

- ArvindRaj, R., Kumar, S. and Karthik, S.(2011), “Cruise control operation from zero to preset speed–simulation and implementation”, *International Journal of Information and Education Technology*, vol. 1, no. 1, p.9.
- Atkins, W. S.(2016), Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, *Stage 2: Traffic Modelling and Analysis Technical Report*.
- Cunto, F. and Saccomanno, F. F.(2008), “Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 40, no. 3, pp.1171-1179.
- Detwiller, M. and Gabler, H. C.(2017), “Potential reduction in pedestrian collisions with an autonomous vehicle”, *In Proceedings of the 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Detroit, MI, USA, pp.5-8.
- Han, I. C., Luan, B. C. and Hsieh, F. C.(2014), “Development of autonomous emergency braking control system based on road friction”, *In 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp.933-937.
- He, S., Guo, X., Ding, F., Qi, Y. and Chen, T.(2020), “Freeway traffic speed estimation of mixed traffic using data from connected and autonomous vehicles with a low penetration rate”, *Journal of Advanced Transportation*, pp.1-13
- Hu, G., Lu, W., Whalin, R. W., Wang, F. and Kwembe, T. A.(2021), “Analytical approximation for macroscopic fundamental diagram of urban corridor with mixed human and connected and autonomous traffic”, *The Institution of Engineering and Technology Intelligent Transport Systems*, vol. 15, no. 2, pp.261-272.
- Jang, J., Ko, J., Park, J., Oh, C. and Kim, S.(2020), “Identification of safety benefits by inter-vehicle crash risk analysis using connected vehicle systems data on Korean freeways”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 144, 105675.
- Jo, Y., Jang, J., Park, S. and Oh, C.(2021), “Connected vehicle-based road safety information system (CROSS) Framework and evaluation”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 151, 105972.
- Jo, Y., Oh, C., Ko, J., Kim, Y. and Park, J.(2019), “A Methodology for Evaluating Real-time Crash Risks in Driving Big Data Era”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 37, no. 4, pp.350-364.
- Jung, A., Jang, J., Park, H. and Oh, C.(2021), “Evaluation of Lateral Driving Safety for Elderly Drivers in High-Speed Curve Driving Conditions”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 39, no. 3, pp.280-298.
- Kausar, T., Gupta, P., Arora, D. and Kumar, R.(2012), “A VANET Based Cooperative Collision Avoidance System for a 4-lane Highway”, *Notes on Engineering Research and Development, Indian Institute of Technology Kanpur Technical Journal*, vol. 4, 25.
- Ko, J., Jang, J. and Oh, C.(2021), “A Multi-Agent Driving Simulation Approach for Evaluating the Safety Benefits of Connected Vehicles”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3045675.
- Lee, J. W. and Litkouhi, B.(2012), “A unified framework of the automated lane centering/changing control for motion smoothness adaptation”, *In 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.282-287.

- Lee, S. and Oh, C.(2018), “A Methodology to Establish Operational Strategies for Truck Platooning on Freeway On-ramp Areas”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 36, no. 2, pp.67-85.
- Lee, S., Jeong, E., Oh, M. and Oh, C.(2019), “Driving aggressiveness management policy to enhance the performance of mixed traffic conditions in automated driving environments”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 121, pp.136-146.
- Lee, S., Oh, C. and Hong, S.(2018), “Exploring lane change safety issues for manually driven vehicles in vehicle platooning environments”, *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 12, no. 9, pp.1142-1147.
- Lee, S., Oh, M., Oh, C. and Jeong, E.(2018), “Automated Driving Aggressiveness for Traffic Management in Automated Driving Environments”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 36, no. 1, pp.38-50.
- Lillicrap, T. P., Hunt, J. J., Pritzel, A., Heess, N., Erez, T., Tassa, Y. and Wierstra, D.(2015), *Continuous control with deep reinforcement learning*, arXiv preprint arXiv:1509.02971.
- Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D. and Varga, I.(2020), “The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity an experimental analysis by microscopic traffic simulation”, *Transportation Letters*, vol. 12, no. 8, pp.540-549.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2020), *Explanation of the Rules on the Standards of Structural Facilities in Roads*.
- Morando, M. M., Tian, Q., Truong, L. T. and Vu, H. L.(2018), “Studying the safety impact of autonomous vehicles using simulation-based surrogate safety measures”, *Journal of Advanced Transportation*, pp.1-12.
- National Highway Traffic Safety Administration(NHTSA)(2018), *The effects of medical conditions on driving performance(Report No. DOT HS 812 623)*, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Nickkar, A., Khadem, N. K. and Shin, H. S.(2020), “Willingness to Pay for Autonomous Vehicles: An Adaptive Choice-Based Conjoint Analysis Approach”, *In International Conference on Transportation and Development 2020*, pp.1-14.
- Paden, B., Čáp, M., Yong, S. Z., Yershov, D. and Frazzoli, E.(2016), “A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles”, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp.33-55.
- Papadoulis, A., Quddus, M. and Imprialou, M.(2019), “Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 124, pp.12-22.
- Park, S., Oh, C., Kim, Y., Choi, S. and Park, S.(2019), “Understanding impacts of aggressive driving on freeway safety and mobility: A multi-agent driving simulation approach”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 64, pp.377-387.
- Sohrabi, S., Khodadadi, A., Mousavi, S. M., Dadashova, B. and Lord, D.(2021), “Quantifying the automated vehicle safety performance: A scoping review of the literature, evaluation of methods, and directions for future research”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 152, 106003.
- United States Department of Transportation(U. S. DOT.)(2018), *Preparing for the future of transportation: Automated vehicles 3.0*, <http://www.Transportation.gov/av/3>, 2022.02.09.

- Wang, Z. J., Chen, X. M., Wang, P., Li, M. X. and Zhang, H.(2021), “A decision-making model for autonomous vehicles at urban intersections based on conflict resolution”, *Journal of Advanced Transportation*, pp.1-12.
- Zhang, Y., Guo, L., Gao, B., Qu, T. and Chen, H.(2019), “Deterministic promotion reinforcement learning applied to longitudinal velocity control for automated vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 1, pp.338-348.