

# 실도로 데이터를 활용한 교차로 유형별 자율주행 보수성 평가 연구

## Evaluation of Autonomous Driving Conservativeness by Urban Intersections with Real-World Data

지 정 훈\* · 강 경 표\*\* · 이 호 윤\*\*\* · 오 철\*\*\*\*

\* 주저자 : 한양대학교 ERICA 교통물류공학과 석사과정  
\*\* 공저자 : 한국교통연구원 자율협력주행기술연구팀 선임연구위원  
\*\*\* 공저자 : 한양대학교 ERICA 교통물류공학과 석사과정  
\*\*\*\* 교신저자 : 한양대학교 ERICA 교통물류공학과 교수

Jeonghoon Jee\* · Kyeong-Pyo Kang\*\* · Hoyoon Lee\* · Cheol Oh\*

\* Dept. of Transportation and Logistics Eng., Hanyang University ERICA  
\*\* Center for Connected and Automated Driving Research, Korea Transport Institute, Senior Researcher Fellow

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

Vol. 23 No.5(2024)  
October, 2024  
pp.293~307

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.293>

Received 24 June 2024  
Revised 18 July 2024  
Accepted 27 August 2024

© 2024. The Korean Society of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

혼합교통류 환경에서 자율차의 보수적인 주행행태는 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 선제적으로 혼합교통류의 이동성과 안전성을 관리하기 위해서는 실도로에서 수집된 자율주행 데이터를 활용하여 주행행태를 과학적 평가하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 Waymo Open Dataset을 활용하여 단속류 교차로 유형별 자율차와 비자율차의 주행행태를 비교 평가하는 방법론을 제안하였다. 영상자료를 통해 도로구간을 구분하고, 차량 추종 상황에서 자율차와 비자율차의 Time-to Collision(TTC)를 기반으로 상충률 차이를 비교하는 자율주행 보수성 지표(Autonomous Driving Conservativeness Index, ADICI)를 고안하였다. 분석 결과 모든 TTC 임계값에서 4지 비신호 교차로가 높은 ADICI로 관찰되었다. 이는 교차로 유형 중 4지 비신호 교차로에서 자율차의 주행 보수성(Conservativeness)이 높아, 비자율차 대비 보수적이게 주행함을 의미한다. 장기간 지속될 혼합교통류 환경에서 자율차가 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 주지 않기 위해 도로구간별 주행행태를 분석하고 지원방안을 도출할 필요함을 시사한다. 본 연구의 방법론은 실도로 데이터셋 기반 자율차에 영향을 미치는 요인들을 분석하는 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 혼합교통류, 자율차 주행행태, 교차로, Waymo Open Dataset, 보수성

### ABSTRACT

In mixed traffic conditions, the conservative driving behavior of autonomous vehicles (AV) would negatively affect overall traffic performance. In order to manage mobility and safety in mixed traffic conditions, it is essential to scientifically evaluate driving behavior using autonomous driving data collected from real-world. This study proposed a methodology to evaluate the driving behavior of autonomous vehicles (AV) and manual vehicles (MV) at different types of intersections using the Waymo Open Dataset. Urban street were identified through video data, and the autonomous driving

conservativeness index (ADCI) was devised to compare the difference in time-to-collision (TTC) based conflict rates between AV and MV in car following situations. The results showed that unsignalized 4-way intersections had the highest ADCI value, indicating greater conservativeness in driving behavior. This indicates the necessity of analyzing the driving behavior of each road section and deriving support measures to prevent AV from negatively affecting the overall traffic performance in mixed traffic conditions. The methodology of this study is expected to serve as foundational for analyzing factors affecting AV using real-world datasets.

Key words : Mixed traffic condition, AV driving behavior, Intersection, Waymo Open Dataset, Conservativeness

## I. 서 론

자율주행 기술은 교통사고 감소, 교통 체증 완화, 연료 효율성 향상과 같은 기존의 도로 교통 체계에 혁신적인 변화를 가져올 잠재력이 있다(Szűcs and Hézer, 2022). 안전하고 효율적인 자율주행 기술이 적용된 자율차를 상용화하기 위해 다각적인 연구 및 실도로 테스트가 진행 중이다. 국내 사례로는 서울 상암 지구 자율주행 테스트베드, 자율주행 실험도시(K-City) 및 화성시 자율주행 리빙랩 등을 통해 자율차 주행 테스트가 수행 중이다. 해외 사례로는 국제자동차기술자협회(Society of Automotive Engineers International, SAE International)에서 구분한 Level 4 수준의 자율주행 택시인 로보택시(Robotaxi)가 미국 캘리포니아에서 운영 중이다. 이러한 실도로에서 진행된 자율차 테스트를 기반으로 자율주행 기술의 안전성 및 효율성을 검증할 수 있으며, 보다 진보된 기술 개발을 촉진시킬 수 있다.

완전한 자율주행 시대가 도래하기 이전, 자율차와 비자율차가 혼재된 혼합교통류 환경이 장기간 지속될 것으로 전망된다(Jo et al., 2022). 자율차는 도로 교통 체계에 긍정적인 변화를 가져올 잠재력을 가지고 있지만, 혼합교통류 환경에서 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Jung et al., 2023). 자율주행 Level 4 수준의 자율차인 미국 캘리포니아 로보택시는 지속적으로 안전성 및 이동성 문제가 보고되고 있으며, 자율차로 인한 교통사고와 차량의 알고리즘적 문제로 인해 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 준 사례가 발생하곤 한다. 이에 지난해 8월 캘리포니아주 차량관리국(Department of Motor Vehicles, DMV)은 GM사의 자회사인 크루즈(Cruise)에 로보택시 배치 및 무인 자율주행 테스트 허가를 중단하는 사건이 발생하였다. 또한 올해 2월에는 군중들에 의해 웨이모(Waymo) 로보택시가 전소되는 등, 미국 캘리포니아 지역 내 자율차에 대한 반달리즘 현상이 확산되고 있다. 이는 자율차의 상용화를 위해 해결해야할 과제들이 남아 있음을 시사한다.

혼합교통류 환경의 복잡한 도로 교통 체계에서 자율차의 안전하고 효율적인 주행을 위해서는 도로·교통적 요인들을 고려한 주행 전략이 필요하다. 이러한 요인에는 도로기하구조, 기상조건 및 주변 정적·동적 객체가 포함된다. 실도로에서의 자율차 테스트 기반 경험적 데이터를 수집한 기업들이 증가하고 있으며, Argo Dataset, Lyft Level 5 AV Dataset, nuScenes Dataset 및 Waymo Open Dataset과 같은 자율차 주행 궤적 데이터셋이 공개되었다. 공개된 데이터셋을 활용하여 혼합교통류 환경에서 자율차 주행에 영향을 미치는 다양한 도로·교통적 요인들에 대한 분석이 가능하다. 이를 통해 자율차의 주행 경로 결정을 위한 전략을 수립함에 선제적으로 고려해야 할 요인들을 식별하고, 안전하고 효율적인 주행을 위한 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 목적은 교차로 유형별 자율-비자율차 주행행태 비교를 통해, 비자율차 대비 자율차가 상대적으로 보수적인 행태를 보이는 구간을 식별하는 것이다. 분석 데이터는 실도로 자율차 데이터셋인 Waymo Open Dataset의 주행 궤적자료와 영상자료를 활용하였다. 영상자료를 통해 데이터 수집 시점에 따른 교차로 유형을 구분하고,

주행 궤적자료를 통해 개별차량의 time-to collision(TTC) 상충률을 계산하였다. 이후 비자율차와 자율차의 상대적인 TTC 상충률의 차이를 나타내는 자율주행 보수성 지표(Autonomous Driving Conservativeness Index, ADCI)를 고안하였다. ADCI 값이 높을수록 해당 교차로 유형에서 비자율차 대비 자율차가 보수적으로 주행함을 의미한다. 최종적으로 가장 높은 ADCI를 보이는 교차로 유형을 확인하고, 결과 해석 및 시사점을 제시하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자율차와 비자율차의 주행행태 비교 분석과 도로구간을 구분하여 분석을 수행한 기존 문헌을 검토하여 연구 동향을 파악한다. 3장에서는 분석에 활용한 데이터셋을 설명한다. 주행 궤적자료를 기반으로 분석 대상을 선정하고, 영상자료를 바탕으로 데이터 도시가로구간(urban street segment) 별 교차로 유형을 구분한다. 이를 통해 분석에 활용한 데이터 샘플수를 제시하였다. 4장에서는 방법론에 대해 서술한다. 자율차와 비자율차의 상대적인 주행행태 차이를 나타내는 지표인 ADCI(Autonomous Driving Conservativeness Index)를 활용하여 교차로 구간별 비교 평가방안을 설계하였다. 마지막 장에서는 연구 결과에 대한 요약 및 해석, 연구의 한계점과 향후 연구 방향을 제시하였다.

## II. 기존문헌 고찰

혼합교통류 환경에서 자율차는 안전성을 최우선으로 고려하여 비자율차 대비 지나치게 보수적으로 주행하는 경향이 있다. Seth and Cummings(2019)는 미시 교통 시뮬레이션인 VISSIM내 자율차의 주행행태를 CoExist 모델을 기반으로 구현하고, 혼합교통류 환경에서 안전성과 이동성을 평가하였다. 분석 결과 자율차의 비율이 높아질수록 통행시간이 증가하고, 교통사고 상충 건수가 증가함을 확인하였다. 이를 통해 보수적인 자율차의 주행행태가 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 초래할 수 있음을 지적하였다. Hu et al.(2023a)는 Waymo Open Dataset을 활용하여 자율차(Autonomous Vehicles, AV)와 비자율차(Human-driven Vehicles, HV)의 차량 추종 페어를 AV-HV / HV-AV / HV-HV 3그룹으로 분류하였다. 차량 추종 페어별 후행 차량의 TTC와 DRAC(Deceleration Rate to Avoid a Crash)을 산출하여 자율차와 비자율차의 주행행태를 비교하였다. 비교 결과 자율차는 비자율차 대비 높은 차두시간과 차간거리를 유지하며 주행함을 확인하였다. 이를 기반으로 IDM 모델을 구현한 결과, 차량 추종 상황에서 자율차의 보수적인 주행행태는 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이때 비자율차는 선행 차량이 자율차인 경우와 비자율차인 경우에 주행행태의 변화는 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. Wen et al.(2022)는 Waymo Open Dataset의 차량 추종 페어에서 자율차를 추종하는 상황과 비자율차를 추종하는 상황에 비자율차의 주행행태를 비교하였다. 평가지표로는 표준편차와 변동계수를 포함한 운전 변동성 지표(Driving behavior indicators)와 TTC를 활용하였다. 분석 결과, 자율차를 추종하는 비자율차가 변동성이 감소하고 높은 TTC 값을 가짐을 확인하였다.

단속류 도로구간은 자율차의 센서와 알고리즘이 주변 환경을 인식하고 반응함에 직접적인 영향을 준다. 따라서 자율차의 안전성을 실효성 있게 평가하기 위해서는 단속류 도로구간을 반영하여 다양한 항목을 평가 시나리오에 고려할 필요가 있다(Ko et al., 2022). Wang et al.(2023)은 Waymo Open Dataset을 활용하여 신호 교차로에서 자율차와 비자율차의 주행행태를 비교하였다. 신호 교차로에서 차량 유형을 적색 신호 대기열에 접근하는 차량, 대기열에 첫 번째 차량으로 녹색 신호 반응하는 차량, 대기열이 사라질 때 대기열에 있는 선행 차량에 반응하는 차량으로 구분하였다. 이때 자율차는 신호 교차로 정지 상태에서 비자율차 대비 선행 차량과 상대적으로 넓은 차간거리를 유지하는 경향이 있음을 확인하였다. 이를 자율차의 보수적인 주행 전략으로 설명하였다. Deluka Tibljaš et al.(2018)은 VISSIM을 활용하여 자율차의 도입에 따른 회전 교차로의 안전성과 이동성의 변화를 확인하였다. 분석 결과 자율차의 도입은 회전 교차로의 안전성과 이동성이 부정적

인 영향을 미칠 수 있음을 확인하였고, 교차로 설계를 개선하여 자율차의 성능 저하와 사고 발생 가능성을 최소화할 필요성을 제시하였다.

기존 문헌을 검토한 결과, 자율차와 비자율차의 주행행태 비교를 통해 자율차의 보수적인 주행행태가 전체 교통류에 부정적인 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 또한 신호 교차로 및 회전 교차로 등 다양한 단속류 도로구간에 따라 자율차의 주행행태를 비교 평가할 필요성을 확인하였다.

### III. 데이터셋

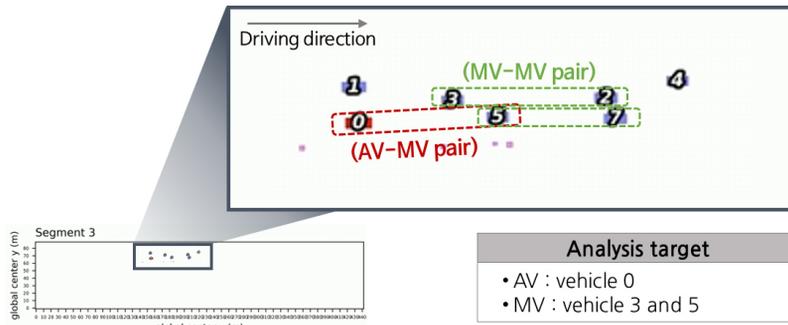
본 연구에서는 실도로 자율차 데이터셋인 Waymo Open Dataset을 분석에 활용하였다. Waymo Open Dataset은 3D 객체 검지 및 추적을 위한 perception 데이터셋과 차량 주행 및 상호작용 예측을 위한 motion 데이터셋으로 구성된다. perception 데이터셋은 각 세그먼트에 기록된 자율차의 주행 궤적을 포함한다. motion 데이터셋은 주행 궤적 중 일부 세그먼트의 특정 상황 백터맵을 포함한다. 본 연구에서는 perception 데이터셋을 활용하였으며, 이는 주행 궤적 자료와 영상자료로 구성되어있다. 주행 궤적 자료는 가공되어 공개된 Waymo Open Dataset을 활용하였다(Hu et al., 2023b). 해당 데이터셋은 이상치 제거, 노이즈 필터링, 일관성 확인 및 궤적 완전성 분석을 통해 원본 데이터보다 품질이 향상되었다(Hu et al., 2022). 주행 시점의 영상자료는 Waymo 공식 홈페이지(<https://waymo.com/open>)에 공개된 자료를 활용하였다. 자율차 주행 궤적 자료와 영상자료는 동일한 시점에서 수집된 자료이다. 자율차 주행 궤적 자료와 영상자료는 동일한 시점에서 수집된 자료이다. 데이터는 총 1000개의 도시가로구간(urban street segment)를 포함하고 있으며, 한개의 도시가로구간은 0.1초 단위로 수집된 20초간의 자율차 주행 자료이다. 주행 궤적 자료는 75m 라이더 범위 이내의 주변 차량들과 주행하는 자율차의 제원과 수집 시간, 위치 및 차량 속도, 가속도 정보를 포함한다. 수집된 변수명, 단위, 변수에 대한 설명을 포함한 데이터 명세를 <Table 1>에 제시하였다.

<Table 1> Dataset specifications

Attribute	Unit	Description	Attribute	Unit	Description
segment_id	-	Integer number, from 1 to 1000	global_center_x	m	Float, global x coordinate of the object center
frame_label	-	Integer number, from 1 to around 200	global_center_y	m	Float, global y coordinate of the object center
time_of_day	-	String, 'Day'/'Dawn'/'Dusk'/'Night'	global_center_z	m	Float, global z coordinate of the object center
location	-	String, abbreviated names of US cities	length	m	Float, length of the object
weather	-	String, 'sunny'/'rain'	width	m	Float, width of the object
obj_type	-	string, 'vehicle'/'bicycle'/'pedestrian'	height	m	Float, height of the object
obj_id	-	'ego' is AV, other ids are detected objects	heading	m	Float, global heading for AV, local heading for other objects
global_time_stamp	-	Float, Micro seconds since Unix epoch	speed_x	m/s	Float, speed x of the object
local_time_stamp	s	Float, Local time from 0s to around 20s	speed_y	m/s	Float, speed y of the object
local_center_x	m	Float, local x coordinate of the object center	accel_x	m/s <sup>2</sup>	Float, acceleration x of the object
local_center_y	m	Float, local y coordinate of the object center	accel_y	m/s <sup>2</sup>	Float, acceleration y of the object

Attibute	Unit	Description	Attibute	Unit	Description
local_center_z	m	Float, local z coordinate of the object center	angular_speed	rad/s	Float, angular speed x of the object, only available for AV
laser_veh_count	-	Integer number, the number of vehicles detected by Lidar in current frame			

자율차와 비자율차의 주행행태를 비교하기 위해 차량간 상호작용 관점의 평가지표인 TTC를 활용하였다. TTC를 산출하기 위해서는 선행 차량과의 차간거리 및 속도 차이 정보가 필요하다. 따라서 <Fig. 1>와 같이 차량 추종 페어 상황에 후행 차량을 분석 대상으로 선정하였다. 또한 분석에 활용한 전처리 된 주행 궤적 자료에는 (Autonomous vehicle, AV)와 비자율차(Manual vehicle, MV)의 차량 추종 페어를 3그룹(AV-MV / MV-AV / MV-MV)으로 구분하여 제공한다. AV를 추종하는 MV 페어 상황(MV-AV)는 선행 차량인 자율차의 보수적인 주행행태가 후행 차량인 비자율차의 주행행태가 크게 영향을 줄 수 있기때문에 분석 대상인 비자율차의 주행행태를 대표할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 MV를 추종하는 MV 페어 상황(MV-MV)만을 통해 비자율차의 주행행태를 추출하였다. 최종적으로 MV를 추종하는 AV 페어 상황(AV-MV) 145건과 MV를 추종하는 MV 페어 상황(MV-MV) 775건을 분석에 활용하였다.



<Fig. 1> Selection of analysis vehicles

주행 시점의 영상자료를 기반으로 도시가로구간별 자율차 주행 당시의 단속류 도로구간을 구분하였다. 분석 데이터셋은 총 1000개 도시가로구간으로 구성되어 있으며, 큰 범주에서 교차로와 단일로로 구분할 수 있다. 이때 분석의 공간적 범위는 교차로에 한하여 수행하였다. 교차로는 신호, 비신호 및 회전으로 분류되며, 신호 및 비신호 교차로의 경우, 교차하는 도로의 수에 따라 3지, 4지, 5지로 세분화하였다. 교차로 유형을 구분하는 과정은 수작업으로 진행되었다.

차량간 상호작용 관점의 평가지표를 산출하기 위해 차량 추종 페어 상황에서 후행 차량만을 분석 대상으로 선정하였다. 총 1000개의 도시가로구간으로 구성된 데이터셋 중 차량 추종 페어 상황이 없는 도시가로구간은 분석에서 제외하였다. 또한 도로구간이 회전 교차로로 구분된 모든 도시가로구간에서는 자율차 1대만 주행하였기 때문에 차량 추종 페어 상황이 없어 분석에서 제외하였다. 5지 신호 교차로 및 5지 비신호 교차로로 구분된 도시가로구간에서는 절대적인 데이터 샘플수가 부족하였으며, 특히 AV-MV 페어가 관찰되지 않아 분석에서 제외하였다. 따라서 단일로와 회전 교차로, 5지 신호 교차로, 5지 비신호 교차로는 분석에서 제외하여, 최종적으로 본 연구에서 고려한 교차로 유형은 총 4가지로 3지 신호 교차로, 4지 신호 교차로 및 3지 비신호 교차로, 4지 비신호 교차로이다.

한 개의 도시가로구간 내에서 다수의 차량 추종 상황이 존재하며, MV-MV 페어 상황만 존재하는 경우도

존재한다. 예를 들어 도시가로구간 132번의 경우, AV-MV 페어 1건, MV-MV 페어는 7건이 존재한다. 이에 구간별 자율차와 비자율차의 데이터 샘플수가 다르다. 최종적으로 교차로 유형별 데이터 도시가로구간 개수 및 자율차와 비자율차 샘플수를 <Table 2>에 제시하였다.

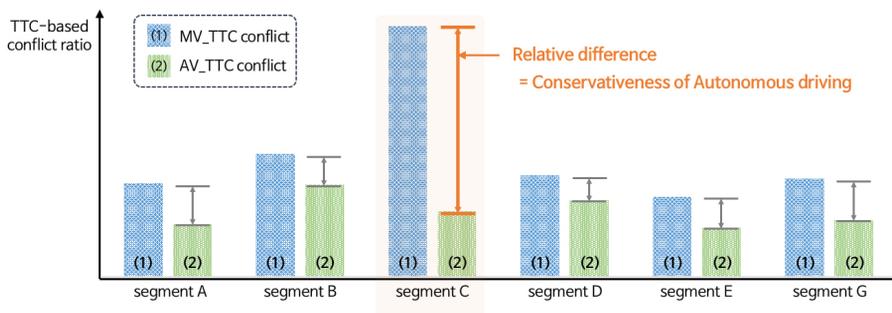
<Table 2> Number of segment by intersection

Intersection	Number of data segments	Vehicle type	Number of samples
3-way signalized intersection	17	AV	9
		MV	45
4-way signalized intersection	265	AV	120
		MV	668
3-way unsignalized intersection	22	AV	8
		MV	44
4-way unsignalized intersection	24	AV	8
		MV	18
<b>total</b>	<b>426</b>	<b>AV</b>	<b>145</b>
		<b>MV</b>	<b>775</b>

## IV. 방법론

### 1. 자율주행 보수성(Conservativeness)

영상자료를 통해 교차로 유형을 3지 신호 교차로, 4지 신호 교차로, 3지 비신호 교차로 및 4지 비신호 교차로로 구분하였다. 이때 구분된 도로 유형별 차량의 주행행태가 다를 수 있다. 예를 들어, 특정 도로 유형에서 다른 구간 대비 속도 분포가 높게 형성될 수 있고, 차간거리는 짧게 형성될 수 있다. 이러한 차이로 인해 교차로 유형을 비교함에 절대적인 자율차의 평가지표 값만을 기준으로 판단할 경우, 특정 구간에서 주행행태가 확대 해석될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 교차로 유형에 따른 자율차의 주행행태를 평가함에 동일한 유형에서 주행한 비자율차의 행태와 상대적 비교를 통해 도출할 필요성이 있다고 판단하였다. 이때 평가지표는 속도와 차간거리를 모두 포함하는 TTC 상충률을 활용하였으며, 비자율차와 자율차의 TTC 상충률의 상대적인 차이를 나타내는 자율주행 보수성 지표(Autonomous Driving Conservativeness Index, ADCI)를



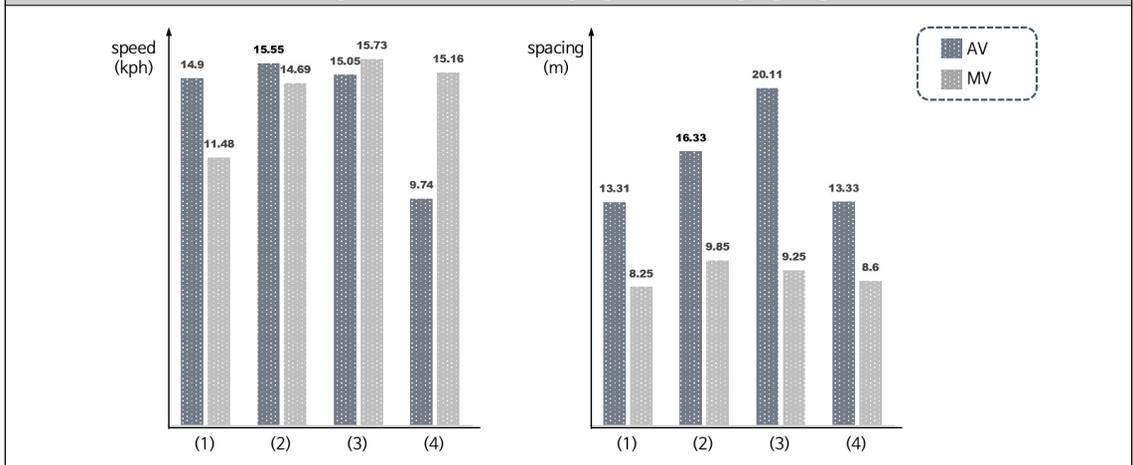
<Fig. 2> Conservativeness description

제안하였다. 가장 높은 지표 값을 보이는 교차로 유형에서 자율차는 비자율차 대비 보수적으로 주행한다고 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 보수적 주행행태를 “보수성(Conservativeness)”로 정의한다. 보수성 설명 그림을 <Fig. 2>에 제시하고, 분석에서 활용된 교차로 유형별 평균 속도와 평균 차간거리의 기술통계량을 <Table 3>에 제시하였다.

<Table 3> Descriptive statistics of average speed and spacing

Categories	Intersection	Vehicle type	Average	Standard deviation	Max	Min
speed (kph)	(1) 3-way signalized intersection	AV	14.9	15.98	49.79	1.91
		MV	11.48	7.52	25.99	1.51
	(2) 4-way signalized intersection	AV	15.55	14.11	61.63	0.61
		MV	14.69	12.46	72.76	0.32
	(3) 3-way unsignalized intersection	AV	15.05	9.36	29.52	4.14
		MV	15.73	14.08	56.27	1.91
	(4) 4-way unsignalized intersection	AV	9.76	5.36	21.10	3.13
		MV	15.16	12.42	63.47	4.61
spacing (m)	(1) 3-way signalized intersection	AV	13.31	10.38	38.95	5.93
		MV	8.25	4.12	18.29	1.83
	(2) 4-way signalized intersection	AV	16.33	10.77	52.9	3.44
		MV	9.85	6.96	66.04	1.54
	(3) 3-way unsignalized intersection	AV	20.11	14.75	47.19	7
		MV	9.25	4.68	21.68	1.67
	(4) 4-way unsignalized intersection	AV	13.33	4.73	19.22	7.56
		MV	8.6	4.1	21.47	4.24

Graphical illustration of average speed and average spacing

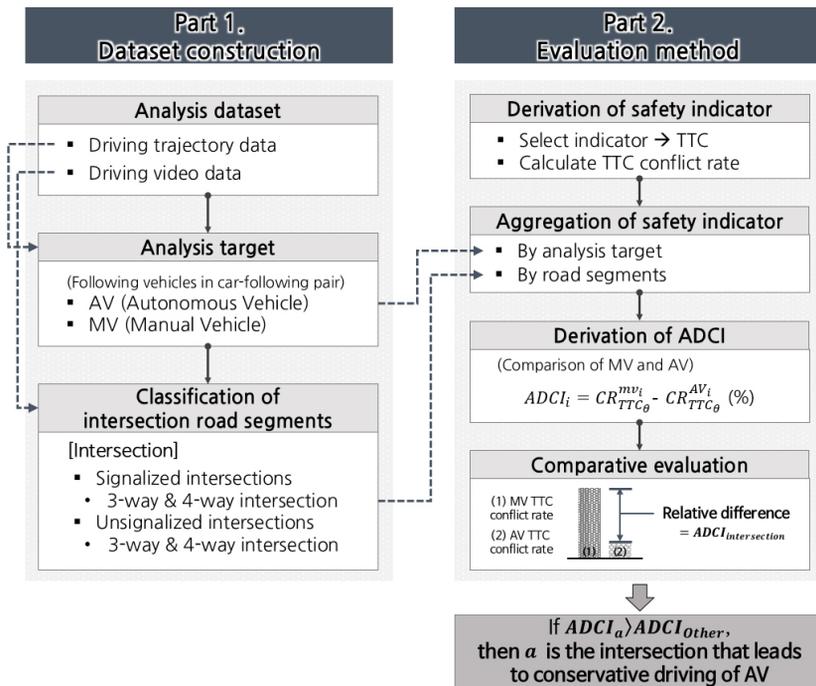


## 2. 연구 방법론

공개된 실도로 자율차 데이터셋을 기반으로 자율차 주행에 영향을 미칠 수 있는 다양한 도로·교통적 요인들에 대한 분석이 가능해졌다. 다양한 도로·교통적 요인 중 영상자료를 통해 데이터의 도시가로구간별 교차

로 유형을 구분할 수 있다. 본 연구에서는 실도로 자율차 데이터셋인 Waymo Open Dataset을 기반으로 교차로 유형을 반영하여 자율차와 비자율차의 주행행태 비교 분석 방법론을 제시한다.

주행 궤적 자료를 통해 선정된 분석 대상인 자율차와 비자율차의 TTC 상충률을 산출한다. TTC 상충률은 분석 대상 단위와 교차로 유형 단위로 집계된다. 이후 구분된 4가지 교차로 유형에 따라 자율차와 비자율차의 상대적인 주행행태 차이를 나타내는 지표인 자율주행 보수성 지표(Autonomous Driving Conservativeness Index, ADCI)를 제안한다. 다른 교차로 유형 대비 ADCI 값이 높을수록 해당 구간에서 자율차가 비자율차 대비 보수적인 주행행태를 보인다고 해석할 수 있다. 최종적으로 자율차가 보수적인 주행하는 교차로 유형을 확인하였으며, 연구 흐름도는 <Fig. 3>에 제시하였다.

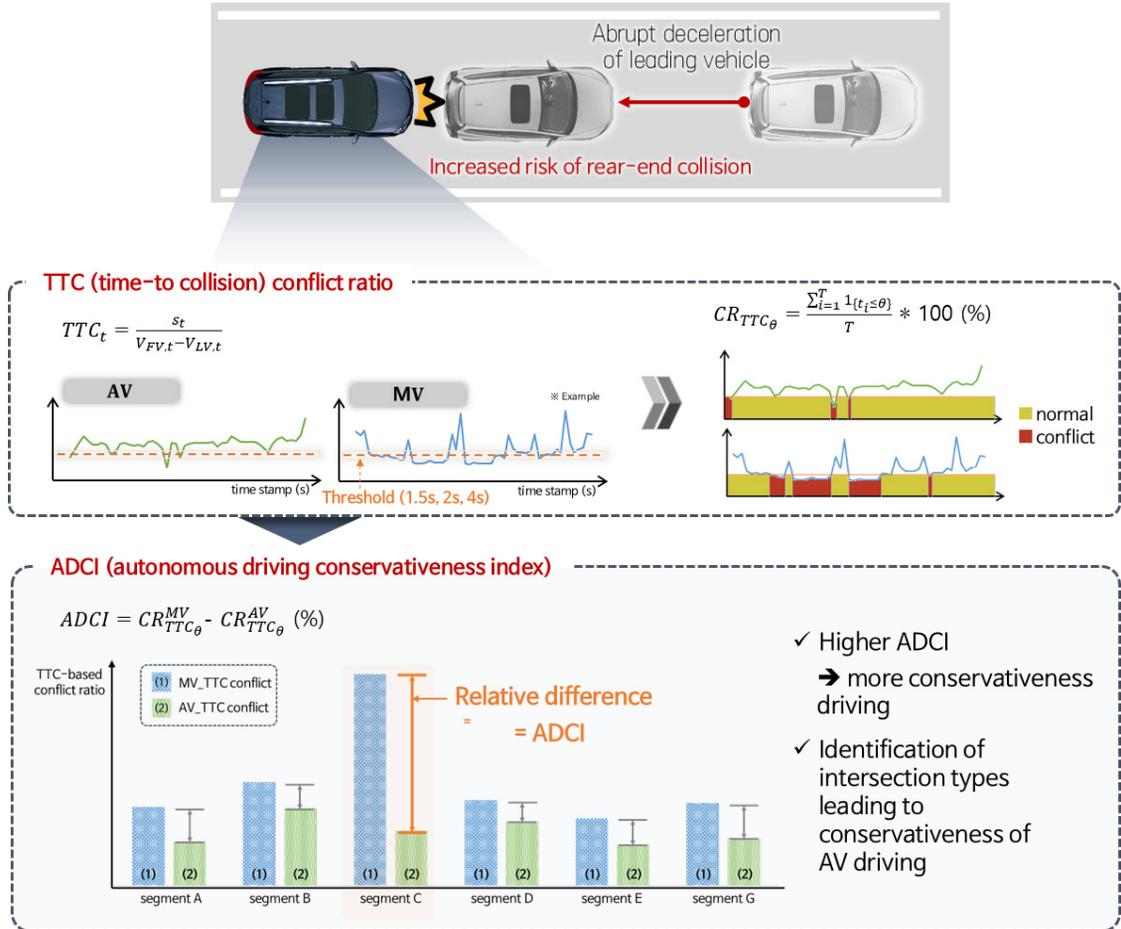


<Fig. 3> Overall research procedure

본 연구에서는 혼잡교통류 환경에서 다양한 교차로 유형별로 자율차의 보수적 주행행태를 평가하기 위해 자율주행 보수성 지표(ADCI)를 제안한다. 차량 추종 상황에서 선행 차량의 급격한 주행행태의 변화는 후미 추돌 위험성을 증가시킬 수 있다. 이러한 사고개연성을 정량적으로 추정하고자 차량간 상호작용 평가지표인 TTC를 활용하였다. 분석 대상인 자율차와 비자율차의 TTC 값을 기준으로 임계값 이하의 상충 상황을 도출하고, 전체 주행 시간을 고려하여 TTC 상충률을 계산하였다. 이후 교차로 유형별로 비자율차의 TTC 상충률과 자율차의 TTC 상충률의 상대적 차이를 산출한 것이 ADCI이다. ADCI를 통해 차량 추종 페어 상황에서 발생할 수 있는 잠재적인 상충 상황을 고려하여 자율차가 비자율차 대비 얼마나 보수적으로 주행하는지를 정량적으로 추정할 수 있다.

자율차의 주행 알고리즘은 안전을 최우선으로 고려하도록 설계되어 복잡한 교차로와 같은 환경에서 보다 보수적인 속도 조절과 차간거리를 유지하는 전략을 채택한다(Li et al., 2022). 이를 반영하여 ADCI는 동일한 교차로 유형을 주행하는 비자율차의 주행행태와의 비교를 통해 자율차의 보수성을 평가하였다. ADCI를 교

차로 유형별로 비교할 경우, 가장 큰 ADCI가 관찰된 교차로 유형이 자율차가 주행함에 보수적으로 주행하도록 유도하는 교차로 유형으로 해석할 수 있다. 교차로 유형별 ADCI를 구분하여 도출한 것은 구간별 특성을 고려한 것이다. 최종적으로 교차로 유형별 ADCI에 비교를 통해 혼합교통류 환경에서 선제적으로 고려되어야 할 도로구간적 특성을 파악할 수 있다. ADCI에 대한 개념도를 <Fig. 4>에 제시하고, ADCI에 대한 산출식은 Eq. (1)에 제시하였다.



<Fig. 4> ADCI conceptual diagram

$$ADCI_i = CR_{TTC_\theta}^{MV_i} - CR_{TTC_\theta}^{AV_i} (\%) \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $ADCI_i$  : Autonomous Driving Conservativeness Index  $i$

$CR_{TTC_\theta}^{MV_i}$  : Conflict rate of MV for road segment  $i$  (%)

$CR_{TTC_\theta}^{AV_i}$  : Conflict rate of AV for road segment  $i$  (%)

ADCI를 산출함에 차량간 상호작용 관점의 평가지표인 TTC(time-to collision)를 활용하였다. TTC는 차량의

주행 안전성을 평가하는데 가장 일반적으로 사용되는 지표이다(Vogel, 2003; Meng and Qu, 2012; Mahmud et al., 2017). 이러한 TTC는 두차량이 현재 방향과 속도를 유지하며 주행할 경우 충돌까지 남은 잔여시간으로, 상충 상황을 구분하기 위한 다양한 TTC 임계값이 사용되고 있다. TTC 값은 증가할수록 안전성이 높다고 해석할 수 있기 때문에, 임계값 미만인 경우를 상충 상황으로 구분한다. 이에 따라 TTC 임계값 설정에 대한 기존 문헌을 확인하였다. Li et al.(2020)은 상충 상황에 대한 TTC 임계값이 일반적으로 1~4초 사이에 다양하게 설정되고 있음을 제시하였다. Hu et al.(2023a)은 1초, 2초, 4초의 TTC 임계값을 설정하여 분석을 수행하였다. Kuang et al.(2015)은 상충 상황을 구분하기 위한 TTC 임계값을 1.5초를 제안하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 TTC 임계값을 1.5초, 2초, 4초로 설정하고, 주행 시간을 고려하여 임계값에 따른 상충률을 평가지표로 활용한다. TTC 산출 수식과 상충률 산출식을 Eq. (2), Eq. (3)에 제시하였다.

$$TTC_t = \frac{s_t}{V_{FV,t} - V_{LV,t}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $V_{FV,t}$  : Speed of the following vehicle at time  $t$  (m/s)  
 $V_{LV,t}$  : Speed of the leading vehicle at time  $t$  (m/s<sup>2</sup>)  
 $s_t$  : Spacing at time  $t$  (m)

$$CR_{TTC_\theta} = \frac{\sum_{i=1}^T 1\{t_i \leq \theta\}}{T} * 100 (\%) \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $CR_{TTC_\theta}$  : Conflict rate based on TTC with threshold  $\theta$   
 $\theta$  : Conflict threshold value  
 $T$  : Total travel time in road segment  
 $t_i$  : Observed TTC value at time  $i$

구분된 4가지 교차로 유형별로 자율차와 비자율차의 TTC 상충률을 3가지 임계값을 기준으로 산출하였다. 이때 유효하지 않은 데이터를 제거하였으며, 유효하지 않은 데이터 판단 기준은 다음과 같다.

- 1) 분석 대상 차량이 주행한 시간 동안 선행 차량 보다 속도가 느린 경우
- 2) TTC 값이 음수로 산출된 경우

1)의 경우, 데이터 수집 시간동안 차량 추종 페어 상황에서 항상 선행 차량 속도가 후행 차량보다 빠르기 때문에, 산출된 TTC 값을 분석에 활용할 수 없으므로 데이터를 제거하였다. 2)의 경우, 이론적으로 사고가 발생하였을 때 TTC는 0 이하의 수가 나온다. 하지만 해당 데이터에 영상자료를 확인해본 결과 사고가 발생하지 않았기 때문에 데이터 이상치로 판단하고 제거하였다. <Table 1>은 이러한 유효하지 않은 데이터를 제거한 이후의 결과물이다.

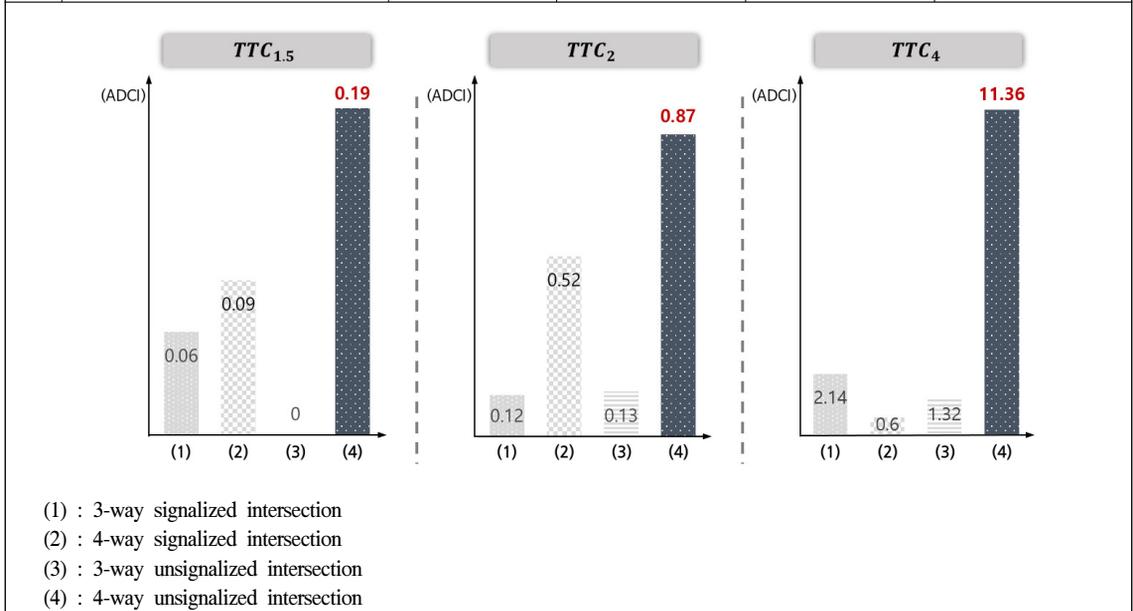
연구에서 사용된 분석 데이터셋의 장점은 자율차의 라이다를 통해 자율차 뿐만 아니라 주변 비자율차에 대한 주행 궤적 정보 수집이 가능하다는 점이다. 이를 활용하여 영상자료를 기반으로 구분한 교차로 유형 내 동일한 구간으로 분류된 데이터에서 자율차와 비자율차의 주행행태 비교가 가능하다. 예를 들어, 3지 신호 교차로에 해당하는 구간에서 자율차와 비자율차의 TTC 상충률 계산하여 비교할 수 있다.

### 3. 분석 결과

영상자료를 통해 교차로 유형을 3지 신호 교차로, 4지 신호 교차로, 3지 비신호 교차로 및 4지 비신호 교차로로 구분하였다. 주행 궤적 자료를 통해 분석 대상의 선행 차량과의 차간거리 및 선·후행 차량 속도 차이를 활용하여 TTC를 산출하였다. 이때 상충 상황 구분을 위한 TTC 임계값은 1.5초, 2초, 4초로 설정하였다. 이후 차량의 주행 시간을 반영한 TTC 상충률을 계산하였다. 교차로 유형별 비교 평가를 수행함에 동일한 구간에서 비자율차와 자율차간의 상대적인 차이 값인 ADCI를 활용하였다. ADCI의 산출 결과, 모든 TTC 임계값에서 비자율차의 상충률이 자율차보다 높게 도출되었다. 3가지 임계값에 따른 자율차와 비자율차의 TTC 상충률과 ADCI 산출 결과를 <Table 4>에 제시하였다.

<Table 4> ADCI calculation values

No	Interrupted road segment	Group	$TTC_{1.5}$	$TTC_2$	$TTC_4$
1	3-way signalized intersection	AV	0	0	2.55
		MV	0.06	0.12	4.89
		<b>ADCI</b>	<b>0.06</b>	<b>0.12</b>	<b>2.14</b>
2	4-way signalized intersection	AV	0	0	5.79
		MV	0.09	0.52	6.39
		<b>ADCI</b>	<b>0.09</b>	<b>0.52</b>	<b>0.6</b>
3	3-way unsignalized intersection	AV	0	0	3.97
		MV	0	0.13	5.29
		<b>ADCI</b>	<b>0</b>	<b>0.13</b>	<b>1.32</b>
4	4-way unsignalized intersection	AV	0	0	1.70
		MV	0.19	0.87	13.86
		<b>ADCI</b>	<b>0.19</b>	<b>0.87</b>	<b>11.36</b>



교차로 유형별 ADCI를 산출한 결과, 모든 TTC 임계값 경우에서 4지 비신호 교차로가 가장 높게 도출되었다. TTC 임계값이 1.5초인 경우, 3지 비신호 교차로의 ADCI가 0으로 나타났다. 이는 해당 구간에서 자율차와 비자율차 모두 1.5초 이하의 TTC 값이 없었음을 의미한다. TTC 임계값이 4초인 경우의 다른 임계값 대비 4지 비신호 교차로 ADCI가 뚜렷한 차이를 보였고, 3지 신호 교차로에서 두 번째로 높은 값을 보였다. 최종적으로 4지 비신호 교차로는 다른 교차로 유형에 비해 자율차의 보수성이 높으며, 자율차가 보수적인 주행 행태를 보이는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

자율주행 기술은 교통사고 감소, 교통 체증 완화 및 연료 효율성 향상과 같은 도로 교통체계에 긍정적인 변화를 가져올 잠재력이 있다. 이를 위해 다수의 기업은 실도로 자율차 테스트를 수행하여 안전성과 효율성을 검증하고, 결과를 바탕으로 연구와 개발을 이어가고 있다. 그러나 자율주행 테스트 중 지속적으로 발생하는 교통사고 사례는 자율차가 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 복잡한 혼합교통류 환경에서 자율차의 안전하고 효율적인 주행을 위해서는 경험적 테스트 수행 결과인 데이터를 바탕으로 다양한 도로·교통적 요인을 고려하여 주행 전략을 설계할 필요가 있다. 최근 Waymo Open Dataset과 같은 공개된 데이터셋이 생겨남에 따라 실도로 환경에서 자율차에 영향을 미치는 다양한 요인들에 대한 심층적인 분석이 가능해졌다.

본 연구에서는 실도로 자율차 데이터셋을 기반으로 교차로 유형을 고려한 주행행태 비교 분석 방법론을 제시하였다. 분석 데이터셋은 주행 궤적 자료와 영상자료를 활용하였다. 자율차 주행 시점의 영상자료를 통해 단속류 도로구간을 수작업으로 구분하고, 주행 궤적 자료에서 차량 추종 페어 상황의 후행 차량을 분석 대상으로 선정하여 1.5초, 2초, 4초의 임계값에 따른 TTC 상충률을 계산하였다. 자율차와 비자율차의 상대적인 주행행태 차이를 나타내는 자율주행 보수성 지표(ADCI)를 제안하고, ADCI를 통해 교차로 유형별 주행행태를 비교 평가하였다. 모든 경우에서 4지 비신호 교차로가 높은 ADCI를 보였으며, 이는 자율차가 4지 비신호 교차로에서 높은 보수성을 보이며, 비자율차 대비 보수적이게 주행함을 의미한다.

4지 비신호 교차로에서 자율차의 보수적인 주행행태의 원인은 다음과 같이 추정할 수 있다. 첫째, 자율차의 주행 알고리즘은 안전을 최우선으로 설계되어 있다. 단일로에 비해 교차로와 같은 복잡한 기하구조에서는 잠재적인 충돌을 피하기 위해 보수적인 주행 전략을 채택할 것이다. 따라서 교차로 접근 시 속도를 줄이고, 더 많은 외부적 요인을 수집하여 안전하게 통과할 가능성이 높다. 둘째, 비신호 교차로는 신호등이 없기 때문에 도로 이용자 간의 상호작용이 더욱 복잡하다. 자율차는 모든 방향에서 접근하는 차량을 고려하여 주행해야 하므로 보수적인 주행을 채택하게 될 것이다.

본 연구의 분석 방법론이 가지는 의의는 3가지로 정리할 수 있다. 첫째, 공개된 실도로 자율차의 주행 데이터를 활용하여 분석을 수행하여 결과의 현실성을 높였다. 둘째, 자율차의 주행 시점 영상을 통해 단속류 도로구간 구분이 가능하다. 영상자료를 바탕으로 교차로 유형을 구분하고, 구간별 자율차의 주행행태를 비교 평가하였다. 셋째, 혼합교통류 환경에서 자율차의 주행행태를 평가함에 비자율차의 주행행태를 반영하였다. 동일한 교차로 유형을 주행한 자율차와 비자율차의 상대적인 주행행태 차이인 자율주행 보수성 지표 ADCI를 제시하였다. 이를 통해 비자율차 대비 자율차가 가장 보수적으로 주행하는 교차로 유형을 확인할 수 있었다.

분석 결과가 가지는 시사점은 다음과 같다. 자율차는 기존 도로 교통체계에서 안전성과 이동성 증진에 공

정적인 잠재력을 가지고 있다고 알려져 있다. 그러나 분석 결과로 도출된 4지 비신호 교차로에서는 자율차의 보수적인 주행행태가 전체 교통흐름에 부정적인 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 이는 앞으로 다가올 자율주행 시대를 대비하여 4지 비신호 교차로에서 개선할 필요성을 시사한다. 이를 위해 C-ITS(Cooperative-Intelligent Transport Systems)의 경고 정보 제공과 같이, 자율차가 안전하고 효율적인 주행을 하기 위해서 주행 중인 4지 비신호 교차로에 주변 상황 정보를 제공하는 인프라 가이드스 정보를 활용하여 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구의 신뢰성을 높이기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 실도로 자율차 데이터를 활용하여 분석을 수행하였다는 점에서 의의가 있으나, 분석에 활용한 자율차 샘플수와 비자율차의 샘플 수 차이가 있어 데이터 불균형이라는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 오버샘플링과 언더샘플링을 연구방법론 설계과정에서 고려하였으나, 분석 데이터의 샘플수가 충분히 확보되지 않았기 때문에 이러한 기법을 자료에 적용하는 경우에 결과를 왜곡할 가능성이 있다고 판단하였다. 따라서 향후 추가적인 데이터 수집을 통해 한계를 극복할 필요가 있다. 둘째, 도로구간 이외에도 자율차에 영향을 미칠 수 있는 다양한 도로·교통적 요인들이 존재하며, 영상자료를 통해 버스정류장 유무, 자전거 도로 유무 등 외적 요인에 대한 정보 수집이 가능하다. 이에 따라 자율차 주행에 영향을 주는 다른 추가적인 요인들에 대한 연구가 가능할 것으로 예상된다. 셋째, 교차로는 신호와 같은 외부적 요인에 영향을 크게 받는 구간이다. 따라서 신호를 포함한 외부적 요인의 영향이 배제된 구간이나 지점에서의 자율차의 주행행태를 분석할 필요성이 있다. 또한 교차로 외에도 다양한 단속류 도로구간을 반영하여 분석을 설계하고, 차선 변경을 포함한 단속류 도로구간에서 이뤄지는 다양한 상호작용을 고려하여 다면적 분석 방안을 설계할 필요가 있다. 넷째, TTC의 임계값을 기준으로 상충 상황을 구분하였다. 상충 상황이 아닌 비교적 안전한 상황에서 차량의 주행행태는 다소 랜덤하게 산포되는 경향이 있다. 본 연구에서 활용한 TTC 임계값 4초의 경우에는 상충 상황을 구분하기에는 다소 높은 기준일 수 있으며, 이로 인해 안전한 상황에서의 랜덤한 주행행태가 포함될 수 있다. 그러나 TTC는 자율차가 자율주행을 하기 이전에 비자율차를 평가하기 위해 고안된 지표이다. 상충 상황을 구분하기 위한 TTC 임계값 4초라는 기준은 비자율차에게 있어서 비교적 안전한 상황에 랜덤한 주행행태가 포함될 수 있으나, 보수적으로 설계된 자율차를 평가하기 위해서는 유의미한 임계값이 될 수 있다. 추가적으로 TTC 임계값 4초에서 도출된 ADCI 결과와 보수적 주행행태 간의 관계를 확인하는 과정을 통해 임계값 4초에 기준의 정당성을 확인할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(RS-2022-00143579, 자율주행 Lv.4/4+ 공유차(Car-Sharing) 서비스 기술 개발)

## REFERENCES

Deluka Tibljaš, A., Giuffrè, T., Surdonja, S. and Trubia, S.(2018), “Introduction of Autonomous Vehicles: Roundabouts design and safety performance evaluation”, *Sustainability*, vol. 10, no. 4, 1060.

- Hu, X., Zheng, Z., Chen, D. and Sun, J.(2023a), “Autonomous vehicle’s impact on traffic: Empirical evidence from Waymo Open Dataset and implications from modelling”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 6, pp.6711–6724.
- Hu, X., Zheng, Z., Chen, D., Zhang, X. and Sun, J.(2022), “Processing, assessing, and enhancing the Waymo autonomous vehicle open dataset for driving behavior research”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 134, 103490.
- Hu, X., Zheng, Z., Zhang, X., Chen, D. and Sun, J.(2023b), “Vehicle trajectory data processed from the Waymo Open Dataset”, *Mendeley Data*, vol. 3, doi: 10.17632/wfn2c3437n.3.
- Jo, Y., Jung, A. R., Oh, C., Park, J. H. and Yun, D. G.(2022), “Suitability evaluation for simulated maneuvering of autonomous vehicles”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 2, pp.183–200.
- Jung, A. R., Jo, Y. and Oh, C.(2023), “A methodology of identifying hazardous freeway segment based on multi-agent driving simulations for the mixed situation of autonomous and manual vehicles”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 41, no. 4, pp.495–508, doi:10.7470/jkst.2023.41.4.495
- Ko, W. R., Yun, I. S., Park, S. M., Jeong, H. R. and Park, S. H.(2022), “Derivation of assessment scenario elements for automated vehicles in the expressway mainline section”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 1, pp.221–239.
- Kuang, Y., Qu, X. and Wang, S.(2015), “A tree-structured crash surrogate measure for freeways”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 77, pp.137–148.
- Li, G., Li, S., Li, S. and Qu, X.(2022), “Continuous decision making for autonomous driving at intersections using deep deterministic policy gradient”, *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 12, pp.1669–1681.
- Li, Y., Wu, D., Lee, J., Yang, M. and Shi, Y.(2020), “Analysis of the transition condition of rear-end collisions using time-to-collision index and vehicle trajectory data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 144, 105676.
- Mahmud, S. S., Ferreira, L., Hoque, M. S. and Tavassoli, A.(2017), “Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs”, *IATSS Research*, vol. 41, no. 4, pp.153–163.
- Meng, Q. and Qu, X.(2012), “Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 48, pp.254–263.
- Seth, D. and Cummings, M. L.(2019), “Traffic efficiency and safety impacts of autonomous vehicle aggressiveness”, *Simulation*, vol. 19, 20.
- Szűcs, H. and Hézer, J.(2022), “Road safety analysis of autonomous vehicles: An overview”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, vol. 50, no. 4, pp.426–434.
- Vogel, K.(2003), “A comparison of headway and time to collision as safety indicators”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 35, no. 3, pp.427–433.
- Wang, Y., Farah, H., Yu, R., Qiu, S. and van Arem, B.(2023), “Characterizing behavioral differences of autonomous vehicles and human-driven vehicles at signalized intersections based on Waymo Open Dataset”, *Transportation Research Record*, vol. 2677, no. 11, pp.324–337.
- WAYMO open dataset, [online] Available: <https://waymo.com/open/>

Wen, X., Cui, Z. and Jian, S.(2022), “Characterizing car-following behaviors of human drivers when following automated vehicles using the real-world dataset”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 172, 106689.