

# 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위의 차이에 따른 교통안전시설 설치 및 운영 개선방안 연구

Study on Improvement Plans for Installation and Operation of Traffic Safety Facilities according to Differences in Perception Methods and Range of Autonomous Vehicles and Human Vehicles

장혁준\* · 고은정\*\* · 한음\*\*\* · 장기태\*\*\*\*

\* 주저자 : 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 석사과정  
 \*\* 공저자 : 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 박사과정  
 \*\*\* 공저자 : 도로교통공단 교통과학연구원 책임연구원  
 \*\*\*\* 교신저자 : 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 교수

Hyeokjun Jang\* · Eunjeong Ko\* · Eum Han\*\* · Kitae Jang\*

\* Cho Chun Shik Graduate School of Mobility, KAIST

\*\* Traffic Science Institute, The Road Traffic Authority

† Corresponding author : Kitae Jang, kitae.jang@kaist.ac.kr

Vol. 22 No.1(2023)  
 February, 2023  
 pp.311~326

pISSN 1738-0774  
 eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.1.311>

Received 2 January 2023  
 Revised 17 January 2023  
 Accepted 19 January 2023

© 2023. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

## 요약

본 연구는 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위의 차이를 비교하고 미시적 교통시물레이션을 활용한 교통안전시설의 설치 및 운영 개선방안을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 연구에서는 기존 교통안전표지 설치·관리 업무편람을 검토하고 교통안전시설 중 안전표지를 차량의 행동 변화에 따라 분류하였다. 이후, 분류된 시설에 대해 가상환경에서 시물레이션 실험을 통해 안전표지의 설치 위치를 변경해가며 최적 설치지점을 추론하여 개선방안을 제시하였다. 본 연구는 일반 운전자의 시인성을 기준으로 설치된 교통안전시설이 자율주행차량과 일반차량이 혼재된 상황에서 도로 효율성과 안전성에 어떠한 영향을 주는지 확인하였다. 본 연구를 통해 도출한 교통안전시설의 인지에 대한 임계값은 교통안전시설의 설치·관리에 관한 규칙의 개정 근거로 활용될 수 있다는 데 의의가 있다.

핵심어 : 자율주행차량, 교통안전시설, 인지, 교통 시물레이션

## ABSTRACT

This paper proposes a plan to improve the installation and operation of traffic safety facilities using a microscopic simulation by confirming the difference in the perception method and range of autonomous vehicles and human vehicles. In this study, the existing 『Traffic Safety Sign Installation·Management Guidelines』 was reviewed, and safety signs among traffic safety facilities were classified according to changes in vehicle behavior. Subsequently, for the classified facilities, the installation location of the traffic sign was changed through simulation experiments, and the optimal location was inferred to suggest an improvement plan. This study confirmed how traffic safety facilities installed based on the visibility of human drivers affect road efficiency and safety in mixed traffic flow with autonomous vehicles and human-controlled vehicles. The optimal location derived through this study is meaningful because it can be used as the basis for revising the guidelines on the installation and management of traffic safety facilities.

Key words : Autonomous vehicle, Traffic safety facility, Perception, Traffic simulation

## I. 서론

자율주행 기술은 전 세계적으로 빠르게 발전하고 있으며, 국내에서는 2027년까지 Lv. 4 이상 자율주행차량의 상용화를 목표로 기술 개발의 속도를 높이고 있다. 예를 들어, 2021년 6월 ‘제1차 자율주행 교통물류 기본계획(2021~2025)’이 고시(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022b)되었고, 2022년 10월에는 ‘자율주행자동차 임시운행허가 가이드라인’을 발간(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022a)하였으며, 2022년 11월부터 자율주행차량 시험 운행에 따른 안전사고 예방하기 위해 자율주행차량 시험운전자(안전 관리 요원)를 대상으로 교통안전교육을 시행하는 등 기술 개발의 편의 증진을 위한 제도를 마련하기 시작하였다(Ministry of Culture, Sports and Tourism, 2022). 이처럼, 주행 권한이 일반 운전자에서 차량으로 전이되는 Lv. 4 이상 자율주행차량의 도입이 가까워지고 향후 도로상에 일반차량과 자율주행차량의 혼재 상황 발생이 예상됨에 따라, 원활한 교통정보의 소통을 위한 각종 방안 마련이 요구되고 있다.

차량의 원활한 주행을 위한 대표적인 방안으로, 도로상에 설치되어 주행에 필요한 정보를 전달하는 교통안전시설이 있다. 도로 이용자는 주행 시 다양한 교통안전시설을 직면하게 된다. 그러나, 기존 도로교통법상 명시된 교통안전시설은 일반 운전자의 시인성을 확보할 수 있는 기준으로 설계되어 있으므로, 자율주행차량과는 인지 방식에서 차이가 존재한다(Ahangar et al., 2021; Talebpour and Mahmassani, 2016; Vargas et al., 2021). 먼저, 일반 운전자는 시각에 의존하여 교통안전시설을 인지(Human and Technology, 2022)하나, 자율주행차량은 다양한 센서들(RADAR<sup>1)</sup>, LiDAR<sup>2)</sup>, Camera, Ultrasonic)을 통해 정보를 직접 인지하는 방식과 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신을 통해 정보를 전달받는 방식을 함께 사용하여 인지한다. 자율주행차량은 향후 두 방식을 함께 사용하게 될 것으로 예상되나, 통신 기술의 오류나 지연으로 인하여 정보를 제때 받지 못하더라도 안전한 주행과 효율적인 차량 흐름이 보장되어야 한다. 실제로, 현재 내비게이션 시스템은 교통안전시설의 정보를 제공하지만 실제 도로 상황과 다를 수 있으므로 참고용으로만 사용하고 운행 시에는 실제 도로 상황에 따라 교통법규를 준수하며 운행하는 것이 권장된다(Hyundai, 2022). 이러한 이유로, 자율주행차량은 센서들을 이용한 인지 방식만으로도 명확한 교통정보를 인식해야 할 필요가 있다. 두 번째로, 사람의 인지 범위와 센서의 인지 범위 간 차이이다. 사람이 목표를 식별할 수 있는 최대 거리는 맑은 날 기준으로 1km 이상이다(Perry and Symons, 1991). 이에 반해, 자율주행차량은 센서별 한계가 존재하며(Vargas et al., 2021), 판단·제어 절차에 걸리는 시간 동안 주행하는 거리에 따라 교통류 변화를 초래한다(Talebpour and Mahmassani, 2016; Kim et al., 2017; Jin et al., 2022). 기존 연구들에서도 이러한 시정 변화는 도로용량, 최대 교통류율, 평균 통행속도 등 교통패턴에 변화를 야기하여 도로시설에 중요하게 작용하는 것으로 나타났다(Choi et al., 1999; Camacho et al., 2010; Brooks et al., 2011; Son and Jeon, 2013). 이러한 인지 방식과 범위의 차이는 도로상의 안전 문제를 포함한 여러 문제를 유발할 수 있기 때문에 일반 운전자의 설치 기준과 동일한 기준 적용에 있어 어려움이 존재한다. 따라서, 자율주행차량의 관점에서 기존 교통안전시설을 인지할 수 있는 새로운 설치 기준에 대한 적정성 검토가 필요하다.

적정성 검토에 앞서, 주행 중인 차량이 교통안전시설 직면 시 행동 변화(회방향, 종방향)를 야기하기 때문에 교통안전시설의 행동 구분이 선행적으로 요구되고 시설의 종류와 인지에 따른 설치 기준에 대한 영향을 확인하는 것이 필요하다. 이처럼, 교통안전시설 설치에 대한 개선방안의 필요성이 증가하고 있으나, 교통안

1) RADAR : Radio Detection And Ranging, 전파를 발사해 돌아오는 전파의 소요 시간과 주파수 편이를 측정 해 주변 사물과의 거리와 속도를 탐지하는 장치

2) LiDAR : Light Detection And Ranging, 레이저를 목표물에 방출하고 빛이 돌아오기까지 걸리는 시간 및 강도를 측정해 거리, 방향, 속도, 온도, 물질 분포 및 농도 특성을 감지하는 장치

전시설과 관련된 연구는 부족한 실정이다. 기존 대부분의 연구는 교통안전시설의 설치와 교통사고 발생 간의 관계와 같은 영향 요인이나, 설치·관리에 관해 경찰과의 관계 등과 같은 정책 중심이었다(Kim, 2010; Kim, 2013; Heo, 2016; Yun, 2016; Jang, 2017; Kim, 2017; Joo, 2018). 또한, 자율주행차량에 관련한 연구 중 차량의 시장점유율에 따라 안정성, 운영 효율성 및 환경성의 관점에서 교통류에 미치는 영향을 분석(Jeong et al. 2014; Aria et al., 2016; Hu and Sun, 2019; Zhou et al., 2018; Guo et al., 2020; Ko et al., 2021; Lee et al., 2022)한 연구는 다소 존재하였지만, 교통안전시설의 설치 및 운영에 대한 개선방안 연구는 거의 없었다.

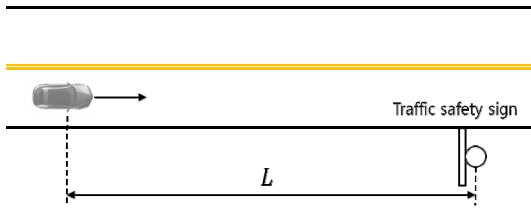
따라서, 본 연구에서는 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위의 차이를 확인하고 미시적 교통 시뮬레이션(Microscopic Traffic Simulation)을 활용한 교통안전시설의 설치 및 운영 개선방안을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해, 기존 교통안전표지 설치·관리 업무편람을 검토하고 교통안전시설 중 정보 인지 시 행동 변화가 요구되는 안전표지를 행동 변화의 종류에 따라 분류하였다. 다음으로, 가상환경에서 시뮬레이션 실험을 통해 시인성 기준을 변경해가며 교통안전시설별 최적 설치 지점을 추론하였다. 시뮬레이션의 도로구간은 연속 교통류 특성과 단속 교통류 특성을 함께 갖고 있어 도로교통 특성의 변동 범위가 폭넓게 관측되는 다차로도로(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013)로 설정하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 다음 장에서는 인지 기반 교통안전시설의 설치지침을 검토하고 일반 운전자와 자율주행차량의 인지 방식 차이를 확인한다. 3장에서는 연구의 대상인 교통안전시설을 행동 변화에 따라 분류하고, 분류된 기준에 따른 시뮬레이션 연구 방법론에 대하여 4장에서 논의된다. 5장에서는 연구 결과를 설명하고, 마지막으로 6장에서는 연구 결과에 대한 논의와 기여를 제시한다.

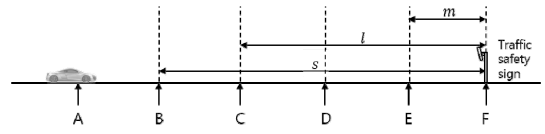
## II. 교통안전시설 설치 및 인지 기준 고찰

### 1. 교통안전시설의 설치 기준

교통안전시설은 도로교통법상에서 신호기와 안전표지로 규정되고 있다. 동법 시행규칙 제8조에 따르면 안전표지는 주의표지, 규제표지, 지시표지, 보조표지, 노면 표시로 구분되며, 각각의 종류와 설치방식에 대해 구체적으로 규정하고 있다. 안전표지의 최소시거 기준은 <Table 1>과 같이 도로교통법 시행규칙 [별표6]에 명시하고 있으며, 이 기준에 근거하여 National Police Agency(2022)는 시인성과 관련한 안전표지의 설치 위치에 대한 권장 사항을 명시하고 있다. <Fig. 1>은 안전표지와 승용차의 운전자와의 거리를 도식화한 것으로 거리( $L$ )는 약 220m~230m 정도가 된다. 이에 따라, 일반적으로 주의·예고 안전표지 거리는 30~200m 범위 내, 규제와 지시 안전표지는 규제 및 지시가 시작되는 지점에 설치하고, 설치 위치가 명시된 경우는 그에 따른다. <Fig. 2>은 표지에 대한 운전자 행동으로 BF를 시인거리( $s$ ), CF를 판단·반응거리( $l$ ), EF를 소실거리( $m$ )라 할 때, 이 간격의 대소관계는  $s \geq l \geq m$ 이어야 함을 설명한다. 이와 더불어, 일반적으로 표지 내용을 인식하고 판단하여 반응하기까지에는 단계별에 따른 소요시간이 필요하며, 안전하게 주행하기 위한 최소선행거리를 확보하도록 설치해야 한다. 인지반응 시간은 국내·외에서 공통적으로 주행속도와 관계없이 약 2~2.5초의 반응시간을 사용하고 있으며, 국내는 위험요소 판단시간인 1.5초와 제동장치 작동시간 1초를 합산한 2.5초를 기준값으로 활용 중이다(Korea Road Traffic Authority, 2018).



<Fig. 1> Distance between human driver and traffic safety sign



<Fig. 2> Driver behavior responding to traffic safety sign  
 A : Perception      B : Starting of reading      C : Completion of reading  
 D : Starting Action      E : Vanishing of view      F : Installation location

<Table 1> Minimum sight distance for traffic safety facilities according to design speed

Design speed(km/h)	20	30	40	50	60
Minimum Sight distance(m)	20	40	60	80	110

## 2. 인지 방식과 범위의 차이

### 1) 일반차량

일반적으로 차량 운전자는 선두 차량뿐만 아니라 주변 차량, 주행 경로, 차량 속도, 주변 차량과의 상대속도, 교통안전시설 정보, 날씨 등 여러 가지 상황정보를 종합적으로 판단하여 주행한다. 일반차량의 인지 범위의 경우, 지표면에서 정상적 시력을 가진 사람이 목표를 식별할 수 있는 최대 거리인 ‘시정(Visibility)’을 사용할 수 있다(Korea Meteorological Administration, 2022). 20km 이상이면 시정이 좋은 상태, 15km면 평상시, 10km면 옅은 안개가 끼어 있는 상태나 이는 항공 및 해상 교통의 안전과 밀접하게 관련된 기상 관측량으로 도로 교통에서 사용하기엔 적절하지 않다. 도로 교통에서의 일반 운전자 기준으로 시정은 운전자가 전방의 물체 또는 대상물을 볼 수 있는 거리로 안개에 따른 영향을 많이 받는다(Broughton et al., 2007; Kim and Lim, 2017). <Table 2>와 같이 시정에 따른 국제 안개 분류 기준(Perry and Symons, 1991)에 따르면, 안개는 시정이 1km 이하일 때를 뜻하고, 그중에서도 200m 이하(짙은 안개와 농밀한 안개)는 도로 이용자의 안전에 가장 중요한 시정 범위이다. 이를 통해, 일반 운전자는 안개 없는 날을 기준으로 1km 이상 볼 수 있음을 유추할 수 있다.

<Table 2> International classification of fog according to visibility

Visibility	Classification
Under 40m	Tense fog
40~200m	Thick fog
200~1000m	Fog
1~2km	Mist
2~4km	Haze
4~10km	Poor visibility
10~40km	Good visibility
Over 40km	Excellent visibility

## 2) 자율주행차량

향후 자율주행차량은 교통안전시설 정보를 RADAR, LiDAR, Camera, Ultrasonic와 같은 다양한 센서로 정보를 직접 인지하는 방식과 V2X 통신기술을 활용한 동적정보 시스템(Local Dynamic Map, LDM)을 통해 전달받는 방식을 함께 사용하여 인지할 것으로 예상된다. V2X 통신방식은 DSRC<sup>3)</sup>기반의 WAVE<sup>4)</sup>(IEEE 802.11p) 통신방식과 C-V2X<sup>5)</sup>(3GPP<sup>6)</sup> Release 14 이상 통신방식으로 구분되며, 통신 범위는 각각 300m 이내, 5km 이상이다(Ahangar et al., 2021). 그러나, 통신기술의 오류나 지연으로 인하여 정보를 제때 받지 못하게 된다면 안전한 주행과 효율적인 차량 흐름을 보장할 수 없으므로, 센서들을 이용한 인지 방식만으로도 명확한 교통정보를 인식해야 할 필요가 있다. 각 센서의 인지 범위와 특성은 <Table 3>과 같다(Vargas et al., 2021). RaDAR와 LiDAR는 물체를 검지하는 센서로 거리, 방향, 속도, 온도, 물질 분포 등을 파악하기 때문에 교통안전시설을 인지할 수 없으며, 이를 위해서는 비전 센서(Vision Sensor)인 카메라를 사용해야 한다. 카메라의 일반적인 인지 범위는 약 200m까지이나, 날씨와 빛의 영향을 받을 수 있으며 장애물에 가리게 될 경우 인지 범위가 제한되어 기존 인지 범위 보다 짧아질 가능성이 존재한다(Talebpour and Mahmassani, 2016).

<Table 3> Performance comparison of autonomous vehicle sensors

Feature	LiDAR	RADAR	Camera	Ultrasonic
Primary Technology	Laser beam	Radio wave	Light	Sound wave
Range	~200 m	~250 m	~200 m	~5 m
Resolution	Good	Average	Very good	Poor
Affected by weather conditions	Yes	Yes	Yes	Yes
Affected by lighting conditions	No	No	Yes	No
Detects speed	Good	Very good	Poor	Poor
Detects distance	Good	Very good	Poor	Good
Interference susceptibility	Good	Poor	Very good	Good

## Ⅲ. 연구 대상

도로 주행 중 직면하게 되는 교통안전시설은 차량에 변화를 야기하므로 교통안전시설의 종류에 따른 행동 구분이 요구된다. Ko et al.(2022)는 교통안전시설에서 전달되는 정보 위반 시 도로교통법 및 형사법상 12대 중과실에 포함되는지 유무와 교통안전시설에 대한 정보가 제공되었을 때 도로 이용자의 행동이 변화하는지 유무에 따라 6가지로 나누어 교통안전시설을 분류하였다. 본 연구에서는 해당 분류에서 신호기를 제외한 안전표지를 차로변경을 a등급, 속도변경을 b등급, 행동 변화가 없는 교통안전시설을 c등급으로 3가지 분류만을 재조합하였고, 앞서 2장에서 언급한 것과 같이 현재 안전표지의 설치 기준에서 행동 시작 위치가 반영된 것을 고려하여 행동 변화만 분류하였다. 교통안전시설의 정보 제공에 따라 구분된 결과는 <Table 4>와 같다. 표와 같이, 교통안전시설 정보는 a등급부터 c등급 순으로 총 3단계로 구분되어 제공되었고 행동 변화가 없는 c등급을 제외한 2가지 행동 변화를 보이는 교통안전시설을 연구 대상으로 설정하고 실험을 진행하였다.

3) DSRC : Dedicated Short-Range Communication, 단거리 전용 통신

4) WAVE : Wireless Access in Vehicular Environments, 차량 환경에서의 무선 접속 기술

5) C-V2X : Cellular Vehicle-to-Everything, 무선통신망 기반 차량 사물 통신

6) 3GPP : 3rd Generation Partnership Project, 이동통신 관련 단체 간의 공동 연구 프로젝트

<Table 4> Classification of traffic safety facilities according to change of driving behavior

Classification	Type(Sign designation)	Number of the traffic safety facilities
a	Entering roadway merge(right)(107), Entering roadway merge(left)(108), Lane reduction(right lane end)(119), Lane reduction(left lane end)(120), Do not enter(201), No automobiles(202), No trucks(203), No vans(204), two-wheeled vehicles and motorized bicycles(206), Weight limit(220), Height limit(221), Automobile only(301), Straight(305), Right turn(306), Left turn(307), Straight and right turn(308), Straight and left turn(309), Left and U-turn(309-2), Left turn and right turn(310), U-turn(311), Detour(316), Bicycle only(318), One way(326), One way(327), One way(328), Bus only(330), High-occupancy vehicle lane(331), Light rail vehicle only(331-2), Median line(501), U-turn line(502), Line(503), Exclusive lane(504), Light rail only(504-2), Unprotected left turn(542), Lane change(543), Do not lane change(506, 507, 508), Variable lane(-), No automobiles	37
b	Railroad crossing ahead(110), Light rail vehicle approaching(110-2), Curved road(right)(111), Curved road(left)(112), Double curved road(right and left)(113), Double curved road(left and right)(114), Two way traffic(115), Uphill slope(116), Downhill slope(117), Road narrows(118), Slippery when wet(126), Roadside road(127), Rough road(128), Speed hump/Raised crosswalk/Raised intersection(129), School zone(133), Bicycle(134), Workzone(135), Bridge(138-2), Width limit(222), Headway(223), Maximum speed limit(224), Minimum speed limit(225), Stop(227), Yield(228), Roundabout(304), Elderly people(323), School zone(324), Handicapped people(324-2), Traffic priority(332), City(334), Speed limit(517), Speed limit(school zone)(518), Stop(521), Yield(522), Roundabout yield line(526-2), Stop line(530), Crosswalk(532), Diagonal crosswalk(532-2), Raised crosswalk(533), Bicycle crosswalk(534), Bicycle only(535), School zone(536), Bicycle priority(535-2), Elderly people(536-2), Handicapped people(536-3), Staggered crosswalk(-)	46
c	Divided highway ahead(122), Airport(136), Gusty winds area(137), Tunnel(138), Wildlife protection(139), Congestion(141), No U-turn(216), Do not pass(217), Divided highway ahead(312), Right lane ahead(313), Left lane ahead(314), Parking lot(319), Shoulder line(505), No right turn(510), No left turn(511), No straight(512), No straight and left turn(512-2), No straight and right turn(512-3), No left and right turn(513), No U-turn(514), No parking(515), No stopping and parking(516, 516-2), No stopping/Parking around firefighting facilities(516-3), Bus stop(523-2), No stop zone(524)	25

#### IV. 연구 방법론

##### 1. 미시적 교통 시뮬레이션 분석

###### 1) 환경 구축 및 시나리오 설정

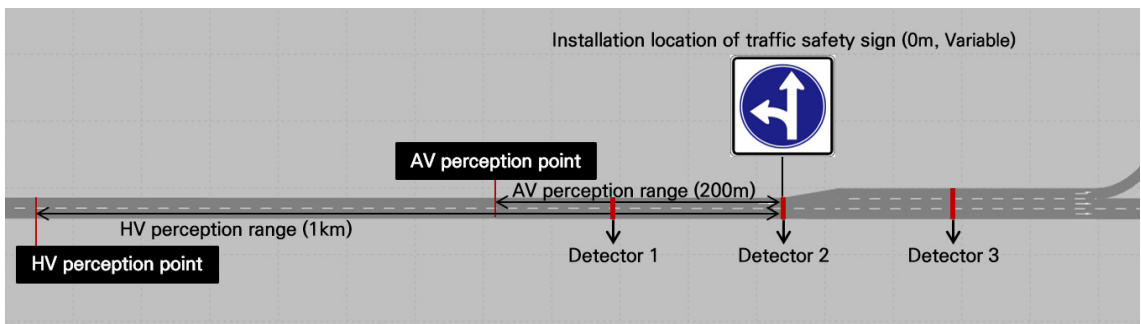
본 연구에서는 미시적 교통 시뮬레이션 프로그램 중에서 가장 널리 사용되고 있는 프로그램 중 하나인 PTV VISSIM 20.0을 활용하였다. <Fig. 3>와 <Fig. 4>는 각각 차로변경(a)과 속도변경(b) 안전표지에 대한 시뮬레이션 구축 환경이다. 차로변경 실험은 2차선 도로에서 안전표지를 인지하고 좌회전을 위해 차선을 변경하는 상황이고, 속도변경 실험은 3차선 도로에서 안전표지를 인지하고 30km/h로 감속하는 상황이다. 본 연구에서는 실제 도로에 기반하여 구배가 없는 단방향 링크 구축을 하였으며, 상황별 안전표지 이전 도로구간의 길이는 모두 1km로 설정하였다. 속도 제한은 국내 도로상에서 일반적으로 시행되고 있는 속도인 50km/h와

70km/h로 각각 설정하였으며, 두 분석 환경 모두 자율주행차량과 일반차량을 동일한 비율로 혼재된 상황으로 설정하였다. 또한, 각각의 구축 환경은 안전표지의 인지지점을 경로지점 지점과 속도 감속 지점으로 설정하여 인지에 따른 제어상태를 거동 변화로 모사했다. 안전표지의 설치지점의 경우, 175m 이전부터 50m 이후 범위 내에서 25m씩 변경하면서 각각 시나리오에 대해 진행하였다. 두 시나리오 모두 안전표지에 대한 일반차량의 인지 범위를 맑은 날 기준인 1km로 고정하고, 자율주행차량의 인지 범위는 200m로 설정하였다. 진입 교통량은 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013)에 따라, 충분한 차량 추종(Car-following) 상황이 발생하는 환경을 만들기 위해 안정된 교통류나 높은 밀도인 다차로도로 유형Ⅱ의 서비스 수준 D에 해당하는 1,100pcphpl으로 설정하였다. 본 연구에서 시뮬레이션의 총분석 시간은 15분(900sec)이며, 네트워크 크기와 특성에 따라 시뮬레이션 환경 내 배경 교통량을 생성하기 위한 세팅 시간은 초기 2분(120sec)으로 설정하였다. 마지막으로, 결과 분석의 객관성을 높이기 위해 시뮬레이션을 식 (1)에 따라 95% 신뢰구간에서 10% 오차한계로 설정하였고 각 시나리오의 난수(Random Seed)를 변경해가며 10회 수행 후 결과의 평균값을 사용하였다. <Table 5>는 본 연구의 시나리오에 대한 자세한 설명이다.

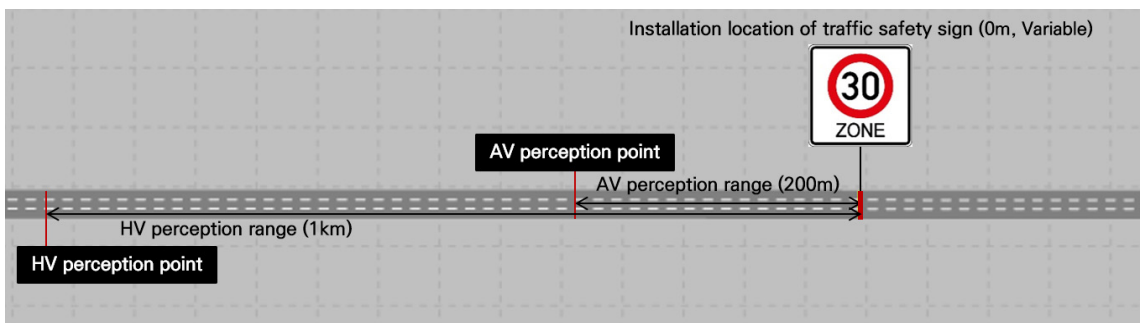
$$n = \left( \frac{S \times Z}{\mu \times \xi} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

where,  $n$  : minimum sample size;  $S$  : standard deviation of sample data;

$Z$  : z-statistic for 95% confidence interval;  $\mu$  : mean of sample data;  $\xi$  : acceptable error rate



<Fig. 3> Simulation environment for lane change(a)



<Fig. 4> Simulation environment for speed change(b)

<Table 5> Design of analysis network and scenario

Classification	Factors	Lane change(a)	Speed change(b)
Road condition	Distance(total)	1,075m(left turn bay: 75m)	1,000m
	Number of lane(main lane)	2 → 3	3
Traffic condition	Speed limit	50km/h	70km/h → 30km/h
	Ratio(autonomous vehicle:human vehicle)	50:50	
	Installation location of traffic safety sign	-175m, -150m, -125m, -100m, -75m, -50m, -25m, 0m, +25m, +50m	
	Traffic volume	1,100pcphpl	
Perception condition	Autonomous vehicles perception range	200m	
	Human vehicles perception range	1km	
	Failure rate	5%	

## 2) 차량 주행행태(Driving Behavior) 구현 모델

PTV VISSIM은 기본적으로 Wiedemann 74와 Wiedemann 99 두 가지 차량 추종 모델을 제공하고, 자유 차선 선택(Free Lane Selection) 규칙과 저속 차선 규칙(Slow Lane Rule)으로 구성된 두 가지 규칙 기반 알고리즘(Rule-based Algorithm)을 제공한다(PTV Group, 2020b). Wiedemann 모델은 Wiedemann의 차량 추종 모델 연구 결과를 기반으로 개발되었으며, 운전자의 생리학적 인지 반응뿐 아니라 심리적인 측면을 고려한다. Wiedemann 74는 도시 환경과 합류 지역을 위해 설계되었으며, Wiedemann 99는 합류 지역이 없는 고속도로 구간을 위해 개발되었다(Chowdhury et al., 2005). 이에 본 연구의 일반차량의 차량 추종 모델은 Wiedemann 74 모델 기본값에 단순만 생성하여 사용하였으며, 차선 변경 모델은 자유 차선 선택 규칙을 이용하여 주행행태를 나타냈다.

자율주행차량 주행행태의 경우, 실제로는 차간거리·속도 제어기능(Adaptive Cruise Control, ACC), 자동 긴급 제동 시스템(Automatic Emergency Braking System) 등과 같은 종방향 첨단 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)과 차로 이탈 방지 보조(Lane keeping Assist) 등 횡방향 ADAS가 복합적으로 작용한다. 이러한 시스템을 모형화하기 위해 시뮬레이션 상 자율주행차량의 주행행태 중 차량 추종 모델은 먼저 Wiedemann 99 모델에 PTV Group(2020a)의 Cautious Driving Parameter를 적용했으며, 차로변경 규칙의 경우 기존의 저속 차선 규칙 알고리즘을 사용하였다. 이후, COM Interface Module을 API로 활용하여 Python 프로그래밍 환경에서 시간대(Time-step)별 앞 차량(Lead Vehicle)의 속도를 추종 차량(Following Vehicle)의 속도로 받아 입력값으로 사용했으며, 속도에 따른 최소 정지시거 유지하는 방식으로 ACC 주행행태를 모사하였다. 자율주행차량의 인지 방식의 경우에는 센서에만 기반하여 주행하는 상황을 가정하였고, 이에 따라 인지 범위의 경우 카메라 센서 범위에 따라 200m로 설정하였다. 또한, 자율주행차량의 인식 실패율을 5%로 설정(Ramanagopal et al., 2018)하여 실패 시마다 1초 간 지연이 발생하도록 구축하였다.

## 2. 평가지표

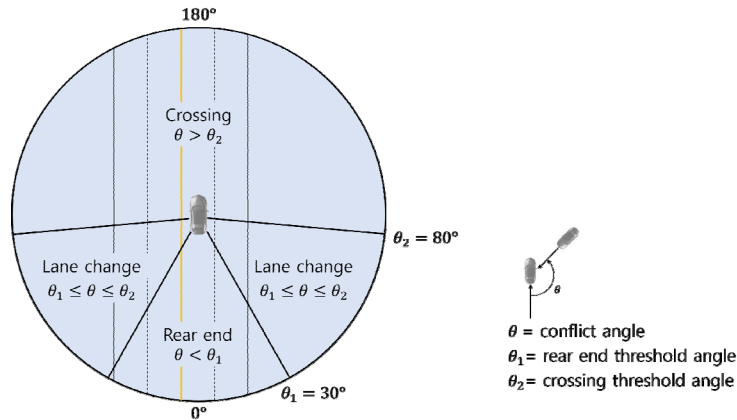
### 1) 도로용량

도로용량은 주어진 도로 조건에서 15분 동안 무리 없이 최대로 통과할 수 있는 승용차 교통량을 1시간 단위로 환산한 값이다. 차량이 차로변경 지점을 늦게 인지하는 경우 무리한 차로변경으로 인한 대기행렬





SSAM는 미시적 교통 시뮬레이션에서 얻은 주행궤적 파일을 분석하여 잠재적인 충돌의 수를 식별하기 위해 하기 위한 프로그램(Federal Highway Administration, 2008)으로 잠재적 충돌의 수와 유형을 결정한다. <Fig. 7>은 SSAM에서 제시하는 충돌유형에 대한 각도 다이어그램으로, 충돌 각도에 따라 후방 충돌(Rear end), 차로변경 충돌(Lane change) 그리고 횡단 충돌(Crossing)을 구분할 수 있다.



<Fig. 7> SSAM conflict angle

본 연구의 시뮬레이션 실험 환경이 단방향 도로이기 때문에 후방 충돌 및 차로변경 충돌에 대해서만 평가했으며, 모든 링크에 대한 충돌을 통합하여 각 시나리오별로 분석을 수행하였다. 차량의 충돌로 결정하기 위한 TTC의 임계값(Threshold) 1.5초를 사용하여(Federal Highway Administration, 2008; Bahram et al., 2014; Katrakazas et al., 2019; Jin et al., 2022) 충돌건수를 평가 지표로 사용하였다. 또한, Jin et al.(2022)에서 정의한 위험 발생비율(Risk Occurrence Rate, ROR)을 사용하여 추중 상황에서 주행 중인 차량 그룹( $G_1$ ) 중에서 사고 위험도가 높은 차량 그룹( $G_2$ )의 개수의 비를 평가 지표로 사용하였다. ROR의 산출 식은 (4)와 같다.

$$G_1 = \{TTC : TTC \leq 3.0\} \dots\dots\dots (4)$$

$$G_2 = \{TTC : TTC \leq 1.5\}$$

$$ROR = \frac{n_{G_2}}{n_{G_1}}$$

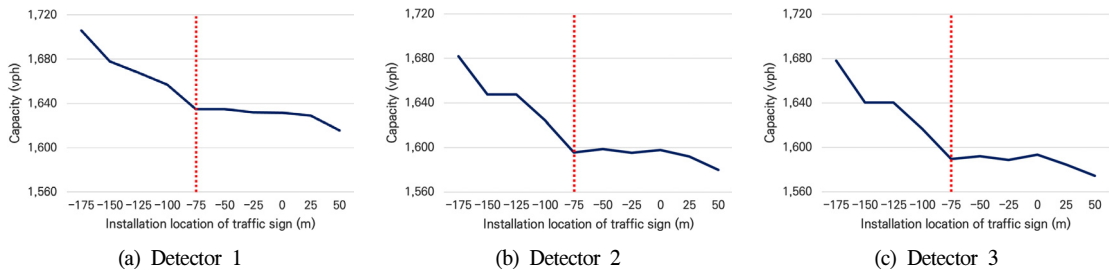
where,  $n_{G_1}$  : number of data samples of  $G_1$ ;  $n_{G_2}$  : number of data samples of  $G_2$

## V. 분석 결과

본 분석 결과는 차로변경 안전표지와 속도변경 안전표지에 관한 실험에 대해 각각의 평가지표를 사용하여 나타냈다. 두 실험 모두 현재 활용 중인 시인성에 관한 안전표지 권장 설치 기준 <Table 1>과 비교하였을 때 권장 기준을 충족하였다. 분석 결과는 4장에서 제시한 각각의 평가지표를 사용하여 나타냈으며, 이를 기준으로 하여 안전표지 설치 위치별 도로 운영 효율성 및 도로 안전성을 평가하였다.

## 1. 차로변경 안전표지 분석 결과

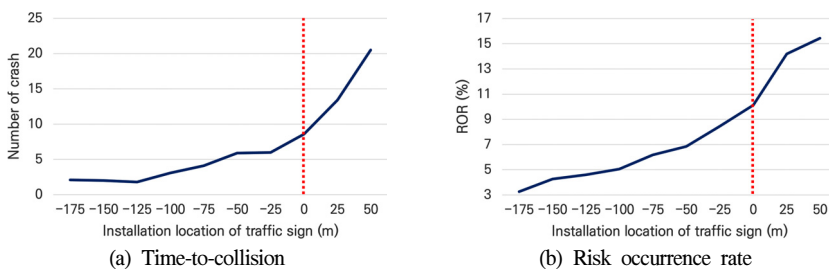
차로변경 안전표지에 따른 시뮬레이션 분석 결과, 교통안전시설에 대한 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위의 차이가 발생하였다. 앞서, <Fig. 4>에 존재하는 3개의 검지기에 따른 도로용량은 결과는 <Fig. 8>과 같다. 대기행렬의 위치와 길이에 따라 검지기의 위치에 따라 용량이 다르게 측정되었다. 좌회전차로 전용차로에서 가장 낮은 용량을 보였으며, 전반적으로 자율주행차량이 안전표지를 미리 인지할수록 도로용량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 안전표지를 75m 이전에 설치할 때부터 급격한 용량 감소 현상이 나타났다. 이는 인지 범위의 차이로 인하여 자율주행차량이 일반 운전자보다 안전표지를 늦게 확인하여 뒤늦게 무리한 차로변경을 시도했고 그 결과로 대기행렬이 생성되었기 때문으로 판단된다. 이러한 점들을 고려할 때, 현재 교통안전시설 설치 기준을 그대로 적용하는 경우, 도로용량이 감소할 수 있다. 따라서, 차로변경에 대한 정보를 포함하는 안전표지 설치 시, 자율주행차량의 센서인지 범위가 200m일 경우, 해당 표지를 최소 75m 이전에는 설치되어야 도로 운영의 효율성이 높아질 것으로 사료된다.



<Fig. 8> Simulation result for lane change(a)

## 2. 속도변경 안전표지 분석 결과

속도변경 안전표지에 따른 시뮬레이션 분석 결과의 경우에도 교통안전시설에 대한 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위의 차이가 발생하였으며, 자율주행차량의 인지 범위에 따른 사고 발생 건수와 ROR의 결과는 <Fig. 9>와 같다. 전반적으로, 자율주행차량이 안전표지를 미리 인지할수록 도로 안전성이 확보되는 것은 차로변경 안전표지 분석 결과와 유사했으나, 속도변경 안전표지 분석 결과에서는 특별한 변곡점이 보이지 않았다. 하지만, 현재 교통안전시설의 설치 기준에서는 카메라 센서의 인지 범위 내에서 현행 도로교통법(2022. 12. 1. 시행)상 주간선도로(70~50km/h)에서 주행 중 어린이 또는 노인보호구역을 만나 30km/h로



<Fig. 9> Simulation result for speed change(b)

감속하더라도 안전거리가 확보되기 때문에 현재의 안전표지 설치 기준을 변경할 필요가 없을 것으로 판단된다. 그러나, 모든 시나리오상에서 총 72건의 충돌이 발생하였으며, 관찰된 사고유형은 모두 급감속으로 인한 후방 추돌사고로 확인되었다. 이러한 결과는 미국 캘리포니아 차량관리국(California Department of Motor Vehicles)에서 제공하고 있는 자율주행차량 교통사고 보고서의 사고유형에서 추돌사고가 지배적인 결과(Favarò et al., 2017; Petrović et al., 2020; Park et al., 2021)와 일치한다. 이는 자율주행차량의 반응속도가 빠르더라도 혼재된 상황에서는 일반차량의 반응속도에 의한 추돌사고로 이어지는 것을 의미한다. 따라서, 추돌사고 방지를 위해서는 자율주행차량을 뒤따르는 일반차량이 안전하게 감속할 수 있도록 도로 내 적정 차간 간격이 확보되어야 한다는 것을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 연구는 PTV VISSIM 프로그램을 활용하여 다차로도로 내 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위에 따른 차이를 비교하고 교통안전시설의 설치 및 운영에 대한 개선방안 제안을 목적으로 하였다. 이에 본 연구에서는 시인성에 기반하여 기존 교통안전표지 설치·관리 업무편람을 검토하였고, 차량의 행동 변화에 따라 안전표지의 종류를 분류하였다. 또한, 일반 운전자와 자율주행차량의 인지 방식과 범위를 조사하여 이에 따라 가상환경에서 실험을 진행하였다. 실험은 크게 차로변경 안전표지에 관한 실험과 속도변경 안전표지에 관한 실험으로 구성되며, 두 실험 모두 안전표지의 설치 기준을 25m씩 변화시켜가며 진행하였다. 시뮬레이션 상의 도로구간은 연속 교통류 특성과 단속 교통류 특성을 함께 갖고 있어 도로 교통 특성의 변동 범위가 폭넓게 관측되는 다차로도로 선정하였으며, 평가지표로는 도로용량과 대리안전척도 중 하나인 TTC를 사용하였다.

분석 결과, 차로변경과 속도변경 안전표지에 따른 두 가지 시뮬레이션 분석 모두 교통안전시설의 설치 위치에 따라 용량과 안전성이 변화됨을 확인했으며, 이를 통해 자율주행차량과 일반차량의 인지 방식과 범위의 차이가 혼재된 교통류에 미치는 영향을 확인하였다. 자율주행차량이 안전표지의 정보를 미리 인지할수록 도로 효율성과 안전성이 개선되었다. 도로 효율성의 경우, 안전표지를 75m 이전에 설치할 때부터 급격한 용량 감소 현상을 보여, 교통안전시설의 설치 기준에 개선이 필요한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 자율주행차량의 도입될 경우 차두시간(Headway)의 감소에 따라 용량이 증가한다는 기존의 연구결과(Friedrich, 2016; Patel et al., 2016)와 상이한 결과로 통신 환경이 구축되지 않은 상황에서는 센서 범위의 한계로 인하여 용량이 감소함을 나타낸다. 따라서, 향후 도로 운영을 위해서는 자율주행차량이 안전한 주행을 보장할 수 있는 안정적인 통신 환경이 우선하여 구축되어야 한 것으로 판단된다. 안전성 분석의 경우에는 특별한 변곡점은 보이지 않았으며, 센서 범위 내에서 충분한 안전거리가 확보되기 때문에 현재의 안전표지 설치 기준을 개선할 필요가 없었다. 하지만, 모든 시나리오상에서 발생한 충돌이 급감속으로 인한 후방 추돌사고로 확인됨에 따라, 추돌사고 방지를 위해서는 자율주행차량을 뒤따르는 일반차량이 안전하게 감속할 수 있도록 도로상에 적정 차간거리 확보가 필요할 것으로 사료된다.

자율주행차량의 시장점유율이 빠르게 증가할 것으로 예상됨에 따라 향후 도로상에서는 자율주행차량과 일반차량의 혼재가 지속될 것으로 사료된다. 이에 본 연구는 향후 자율주행차량의 안전하고 효과적인 도입을 위해 자율주행차량과 일반차량의 교통안전시설 인지 방식과 범위의 차이에 따른 도로 효율성과 안전성을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출한 교통안전시설의 인지에 대한 임계값은 교통안전시설의 설치·관리에 관한 규칙의 개정을 위한 연구 방법론으로써 활용될 수 있다는 점과 개정 근거로 활용될 수 있다는 점에서 의

의가 있다.

본 연구의 발전을 위한 향후 연구의 방향은 다음과 같다. 먼저, 본 연구는 인식 실패율을 고정하고 맑은 날 기준으로 실험을 진행하였다. 이에 향후 연구에서는 악천후나 센서 오작동 등 여러 예기치 못한 상황을 고려하여 인식 실패율에 따른 적정 설치 거리를 제안할 수 있다. 또한, 주의·예고 안전표지와 규제·지시표시 안전표지의 행동 변화 시작 지점의 차이에 따른 분류와 분석도 필요할 것으로 사료된다. 마지막으로, 본 연구에서는 다차로도로를 대상으로 연구를 수행하였으나, 향후에는 대상 지역의 확장을 통해 다양한 기하구조 환경에서 적절한 운영방안을 마련할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 자율주행차량의 실 도로 주행을 위한 교통안전시설 개선방안 연구의 초기 단계이며, 자율주행 기술의 발전에 따라 추가적인 분석이 가능할 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 2022년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No.092021C 26S01000, Lv.4 대응 교통안전 인프라 표준 및 평가기술 개발).

## REFERENCES

- Ahangar, M. N., Ahmed, Q. Z., Khan, F. A. and Hafeez, M.(2021), “A survey of autonomous vehicles: Enabling communication technologies and challenges”, *Sensors*, vol. 21, no. 3, p.706.
- Aria, E., Olstam, J. and Schwietering, C.(2016), “Investigation of automated vehicle effects on driver’s behavior and traffic performance”, *Transportation Research Procedia*, vol. 15, pp.761-770.
- Bahram, M., Ghandeharioun, Z., Zahn, P., Baur, M., Huber, W. and Busch, F.(2014), “Microscopic traffic simulation based evaluation of highly automated driving on highways”, *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, pp.1752-1757.
- Brooks, J. O., Crisler, M. C., Klein, N., Goodenough, R., Beeco, R. W., Guirl, C., Tyler, P. J., Hilpert, A., Miller, Y., Grygier, J., Burroughs, B., Martin, A., Ray, R., Palmer, C. and Beck, C.(2011), “Speed choice and driving performance in simulated foggy conditions”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, no. 3, pp.698-705.
- Broughtona, K. L. M., Switzer, F. and Scott, D.(2007), “Car following decisions under three visibility conditions and two speeds tested with a driving simulator”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 39, no. 1, pp.106-116.
- Camacho, F. J., García, A. and Belda, E.(2010), “Analysis of impact of adverse weather on freeway free-flow speed in Spain”, *Transportation Research Record*, vol. 2169, no. 1, pp.150-159.
- Choi, J. S., Son, B. S. and Choi, J. S.(1999), “The effect of rain on traffic flows in urban freeway basic segments”, *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 17, no. 1, pp.29-40.
- Chowdhury, M., Derov, N., Tan, P. and Sadek, A.(2005), “Prohibiting left-turn movements at

- mid-block unsignalized driveways: Simulation analysis”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 131, no. 4, pp.279-285.
- Daganzo, C. F.(1997), *Fundamentals of transportation and traffic operations*, Pergamon Oxford, pp.66-77.
- Favarò, F. M., Nader, N., Eurich, S. O., Tripp, M. and Varadaraju, N.(2017), “Examining accident reports involving autonomous vehicles in California”, *PLoS One*, vol. 12, no. 9, e0184952.
- Federal Highway Administration(2008), *Surrogate safety assessment model and validation: Final report*.
- Friedrich, B.(2016), “The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic”, In *Autonomous driving*, Springer(Berlin-Heidelberg, Germany), pp.317-334.
- Gettman, D. and Head, L.(2003), “Surrogate safety measures from traffic simulation models”, *Transportation Research Record*, vol. 1840, no. 1, pp.104-115.
- Guo, Y., Xu, H., Zhang, Y. and Yao, D.(2020), “Integrated variable speed limits and lane-changing control for freeway lane-drop bottlenecks”, *IEEE Access*, vol. 8, pp.54710-54721.
- Hayward, J. C.(1971), *Near misses as a measure of safety at urban intersections*, Doctoral Dissertation, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, United States.
- Heo, S. B.(2016), *Study on the design of crosswalk sign with multifunctional for pedestrian safety*, Master’s Thesis, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, South Korea.
- Hu, X. and Sun, J.(2019), “Trajectory optimization of connected and autonomous vehicles at a multilane freeway merging area”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 101, pp.111-125.
- Human and Technology, [http://www.carhnt.com/bbs/board.php?bo\\_table=13&wr\\_id=3](http://www.carhnt.com/bbs/board.php?bo_table=13&wr_id=3), 2022.11.14.
- Hyundai, <https://www.hyundai.com/kr/ko/digital-customer-support/app/bluelink/bluelink-service/smart-driving>, 2022.12.19.
- Jang, S. J.(2017), *A study on the way to improve effectiveness of traffic safety facilities and traffic safety education for students*, Master’s Thesis, Korea National University of Education, Cheongju, Republic of Korea.
- Jeong, E. B., Oh, C., Lee, G. W. and Cho, H. S.(2014), “Safety impacts of intervehicle warning information systems for moving hazards in connected vehicle environments”, *Transportation Research Record*, vol. 2424, no. 1, pp.11-19.
- Jin, H. Y., Kim, S. H. and Kim, T. H.(2022), “A study on safety of urban road traffic flow of autonomous vehicles in adverse conditions”, *Journal of Korea Society of Transportation*, vol. 40, no. 2, pp.161-177.
- Joo, I. Y.(2018), “Precedence analysis of traffic safety facilities installation for traffic accidents”, *Korean Security Science Association*, vol. 55, pp.31-55.
- Katrakazas, C., Quddus, M. and Chen, W. H.(2019), “A new integrated collision risk assessment methodology for autonomous vehicles”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 127, pp.61-79.
- Kim, S. L. and Lim, S. H.(2017), “An analysis of change in traffic characteristics with fog”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 4, pp.92-106.
- Kim, T. H.(2010), “The study on the plan to introduce traffic inducement security system in Korea”, *Journal of Korean Security Science Association*, vol. 23, pp.21-39.

- Kim, W. J.(2013), “A review on a relationship with the police concerning installing and managing traffic safety facilities in road traffic act”, *Public Land Law Review*, vol. 61, pp.287-307.
- Kim, Y. E., Tak, S. H., Kim, J. Y. and Yeo, H. S.(2017), “Evaluation of accident prevention performance of vision and radar sensor for major accident scenarios in intersection”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 5, pp.96-108.
- Kim, Y. S.(2017), *A study on impact analysis of traffic safety facilities in school zones on traffic accidents*, Master’s Thesis, Ajou University, Suwon, Republic of Korea.
- Ko, E. J., Jang, H. J., Han, E. and Jang, K. T.(2022), “Development of a Korean-version integrated message set to provide information on traffic safety facilities for autonomous vehicles”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 6, pp.284-298.
- Ko, W. R., Park, S. M., So, J. H. and Yun, I. S.(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.
- Korea Meteorological Administration, <https://data.kma.go.kr/cmmn/dictionaryPopup3.do?wordId=19779>, 2022.11.14.
- Korea Road Traffic Authority(2018), *R&D planning research for driving system for road driving of autonomous vehicles*.
- Lee, J. Y., Son, S. N., Park, J. H. and So, J. H.(2022), “Impact analysis of connected-automated driving services on urban roads using micro-simulation”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 1, pp.91-104.
- Ministry of Culture, Sports and Tourism, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148907424>, 2022.11.23.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?id=95085718](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95085718), 2022b.11.23.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmspage=1&id=95087342](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=1&id=95087342), 2022a.11.23.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), *Korea highway capacity manual*, Republic of Korea, p.8.
- National Police Agency(2022), *Traffic safety sign installation-management guidelines*, pp.6-28.
- Park, S. M., Lee, H. P., So, J. H. and Yun, I. S.(2021), “Study of analysis for autonomous vehicle collision using text embedding”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 1, pp.160-173.
- Patel, R., Levin, M. W. and Boyles, S. D.(2016), “Effects of autonomous vehicle behavior on arterial and freeway networks”, *Transportation Research Record*, vol. 2561, no. 1, pp.9-17.
- Perry, A. H. and Symons, L. J.(1991), *Highway Meteorology*, E & FN Spon, p.91.
- Petrović, Đ., Mijailović, R. and Pešić, D.(2020), “Traffic accidents with autonomous vehicles: Type of collisions, manoeuvres and errors of conventional vehicles’ drivers”, *Transportation Research Procedia*, vol. 45, pp.161-168.
- PTV Group(2020a), *Micro-simulation guide for automated vehicles-final*.
- PTV Group(2020b), *PTV vissim 2020 User Manual*.
- Ramanagopal, M. S., Anderson, C., Vasudevan, R. and Johnson-Roberson, M.(2018), “Failing to

- learn: “Autonomously identifying perception failures for self-driving cars”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, pp.3860-3867.
- Saunier, N. and Sayed, T.(2010), *Surrogate safety analysis*, Polytechnique Montreal.
- Son, Y. T. and Jeon, J. S.(2013), “A study on traffic-flow characteristic changes on expressway by visibility”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 12, no. 6, pp.116-126.
- Talebpour, A. and Mahmassani, H. S.(2016), “Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 71, pp.143-163.
- Vargas, J., Alsweiss, S., Toker, O., Razdan, R. and Santos, J.(2021), “An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions”, *Sensors*, vol. 21, no. 16, p.5397.
- Yun, Y. I.(2016), *Estimation of traffic accident reduction effect of road safety facilities*, Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Republic of Korea.
- Zhou, Y., Cholette, M. E., Bhaskar, A. and Chung, E.(2018), “Optimal vehicle trajectory planning with control constraints and recursive implementation for automated on-ramp merging”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 9, pp.3409-3420.