

# 화물차 군집주행 간격에 따른 운전자의 운전수행능력별 심리상태 및 주행안전성 비교 연구

## Comparative Analysis of the Psychological State and Driving Safety for Driving within the Platoons of Trucks by Drivers Driving Performance

박 현 진\* · 박 재 범\*\* · 이 기 영\*\*\* · 송 창 준\*\*\*\*

\* 주저자 및 교신저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 책임연구원  
 \*\* 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 연구위원  
 \*\*\* 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 교통연구실 연구위원  
 \*\*\*\* 공저자 : 한국도로공사 구조물처 구조물관리팀장

Hyun jin Park\* · Jae beom Park\* · Ki young Lee\* · Chang jun Song\*\*

\* Transportation Research Division, Korea Expressway Corporation Research Institute  
 \*\* Expressway Structure Division, Korea Expressway Corporation

† Corresponding author : Hyun jin Park, snowboard@ex.co.kr

Vol.20 No.6(2021)

December, 2021  
pp.147~161

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.6.147>

Received 5 November 2021  
Revised 26 November 2021  
Accepted 2 December 2021

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

### 요 약

화물차 군집주행 차량과 일반차량이 혼재된 상황은 불안정한 교통흐름을 유발하여 소통뿐만 아니라, 안전성 측면에서 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 화물차 군집주행 기술 상용화시, 그 주변을 주행하는 운전자의 심리상태와 주행안전성에 대해 알아보고자 하였다. 이를 위해 도로주행 시뮬레이터를 활용하여 군집주행 대열로 끼어드는 상황과 군집주행 대열 내에서 주행하는 상황으로 실험환경을 구성하였으며, 모의주행 실험을 통해 운전자의 심리상태와 주행안전성에 대해 정성적·정량적으로 분석하고자 하였다. 그 결과, 운전수행능력이 상대적으로 저하되는 운전자 그룹의 경우, 군집내 끼어들기 또는 군집내 주행에서 위험한 상황을 야기했음에도 불구하고, 스스로 안전하게 주행했다고 판단한 경우가 많았다. 특히, 차량간격이 좁을수록 오인지 비율이 크게 증대하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 연결로 구간 등 화물차의 군집주행 간격을 일시적으로 넓혀야하는 경우 최적간격을 도출하거나, 군집주행/일반차량 분리방안 등 비자율차량 운전자를 위한 교통관리 전략을 수립하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 군집주행, 도로주행 시뮬레이터, 운전자 심리상태, 주행안전성평가

### ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the psychological state and driving safety of drivers driving around the truck platoon driving. Using the driving simulator, the experimental environment was constructed with the situation of changing lanes to the platoon and driving within the platoon. We tried to qualitatively and quantitatively analyze the driver's psychological state and driving safety through simulation driving experiments. As a result, in the case of the older driver group, there were many cases where they judged themselves to be driving safely, even though they were driving dangerously in the actual lane change to the platoon or driving within the platoon. In particular, this group showed that the narrower the distance between vehicles, the greater the misrecognition. The results of this study are expected to be useful in deriving the optimum interval when the interval between platooning of trucks needs to be temporarily extended.

Key words : Truck platooning, Driving simulator, Driver psychological state, Safety index

## I. 서론

자율주행기술이 발전함에 따라 이를 활용한 화물차 군집주행에 대한 관심이 높아지고 있다. 군집주행(Platooning)은 여러 대의 차량들이 최소한의 안전거리를 유지한 채 도로위의 기차처럼 일정한 간격으로 주행하는 방식을 의미한다. 즉, 선두차량과 후미차량의 차두간격을 일정하게 좁혀 공기저항을 줄임으로써 연료소비효율 증대 및 배출가스 발생량 감소를 기대할 수 있으며, 장거리 운전자에게는 휴식을 제공하여 화물차의 안전하고 준법적인 주행을 유도할 수 있다. 이처럼 화물차 군집주행 기술의 가장 큰 장점은 에너지효율성과 주행안전성 증대이다(Segata et al., 2014; Zheng et al., 2016). 따라서 화물차 군집주행 기술이 도입된다면, 도로 수송 경쟁력 강화 등 도로·교통체계 전반에 영향을 미칠 것으로 전망된다.

그러나 화물차 군집주행 차량과 일반차량이 혼재된 상황은 불안정한 교통흐름을 유발하여 소통뿐만 아니라, 안전성 측면에서 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높다. 즉, 화물차 군집주행 차량군 주행 시, 일반차량 운전자는 기존과는 다른 주행행태를 보일 가능성이 높으므로, 화물차 군집주행 차량과 일반 차량과의 상호작용에 대한 연구가 필요하다(Lee and Oh, 2017; Suh et al., 2017).

특히 연결로 진출, 전방 차로차단공사 등 강제차로변경(Mandatory lane changing)이 필요한 구간에선 불가피하게 군집주행 차량군 사이로 차로변경을 해야 하는 상황이 발생한다. 이때 일반차량 운전자는 화물차 차량군 사이로 차로변경을 해야 하는데, 좁은 간격으로 주행하는 군집주행 차량군 사이로의 차로변경은 일반 상황에서의 차로변경 시 보다 그 부담감이 가중될 것이다. 이는 운전 능력이 저하되는 고령자에게는 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

우리나라는 급격한 고령화로 인하여 2018년 고령인구 비율이 14%가 넘어 고령사회로 진입하였고 2025년 고령인구 비율 20.3%, 2067년 46.5%가 될 것으로 예측된다(Statistics Research Institute, 2019). 고령자 운전면허 보유 비율은 2014년 7.0%에서 2018년 9.5%로 증가하여 고령운전자의 수가 급격하게 증가하는 추세에 있고 최근 10년간 고령운전자에 의한 사고건수와 부상자수는 연평균 각각 4.5%, 4.8% 증가하여 고령 운전자의 안전운전 문제가 사회적으로 대두되고 있다. 따라서 군집주행기술 상용화시 상대적으로 인지반응 및 운전수행 능력이 저하된 운전자는 군집주행 사이로 끼어드는 행위 또는 군집주행 사이에서 주행하는 것에 대한 심리적 부담감을 더 많이 느낄 것이므로 이에 대한 대책마련이 필요할 것으로 판단된다.

운전자의 주행행태 분석을 위한 최적의 방법은 실제 환경에서 주행실험을 하는 것이지만, 실주행 실험은 사고의 위험성이 높을 뿐만 아니라 비용적인 측면에서도 비효율적이다. 또한 현재 화물차 군집주행 기술은 실제 상용화가 되지 않아 실주행 실험의 기술적 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 도로주행 시뮬레이터를 활용하여 화물차 군집주행 대열로 끼어드는 운전자의 심리상태와 주행안전성에 대해 분석하고자 하였다.

이 연구를 통해 운전자가 군집주행 내로 끼어들시 심리적으로 긴장하였는지, 불안감을 느꼈는지에 대해 알 수 있으며, 운전자 심리상태를 기반으로 한 화물차 군집주행 차량의 적정 간격에 대한 시사점을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이를 활용하여 연결로 구간 등 화물차 군집주행 간격을 일시적으로 넓혀야 하는 경우 최적간격을 도출하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 기존문헌 고찰

### 1. 운전수행능력별 주행특성 분석 연구

Kim and Park(2006)은 연령변화에 따라 운전수행능력 임계점에 대한 분석을 주행 시뮬레이터를 활용하여 수

행하였다. 그 결과, 51세 이상부터 속도예측능력, 주의전환능력, 거리지각능력 등 운전능력이 감소하는 것으로 나타났다. Jo(2008)은 주행 시뮬레이션을 이용하여 고령운전자와 청장년 운전자의 주행특성에 대한 실험을 진행하였다. 분석결과, 청장년층 운전자보다 고령운전자가 상대적으로 저속 주행하는 경향을 나타냈으며, 이상적인 교통상황(Free-Flow)에서 판단시간 지연과 판단 오류 등이 더 많이 나타났다. Lim et al.(2012)은 국내 고령운전자의 운전 및 신체적 특성 자료를 수집하여 교통사고 분석 모델을 개발하였는데, 고령운전자의 경우 속도예측능력, 인지능력 등의 저하를 교통사고 발생 영향요인으로 제시하였다. Oh et al.(2020)은 고속도로의 기본구간(본선) 및 연결로, 터널 구간을 대상으로 고령운전자와 비고령운전자 간의 주행행태 및 작업부하를 비교·분석하였다. 그 결과, 비고령운전자에 비해 고령운전자는 평균주행속도가 낮음에도 불구하고 상대적으로 차로중심을 유지하는 주행능력이 낮고 심리적 작업부하가 높은 것으로 나타났다. Lee and Bae(2021)은 주행 시뮬레이터를 이용하여 고령운전자의 주행특성을 분석하고자 하였다. 실험 결과, 고령운전자는 주행속도, 운전조작(브레이크, 스톱, 스티어링 작동) 등 차로편측을 제외한 모든 항목에서 일반 운전자와는 다른 주행특성을 보인다고 제시하였다. 특히, 차로변경 시 속도유지 및 적정 차간간격 확보가 어렵고, 돌발상황 발생 시 정지거리와 소요시간이 더 많이 필요한 것으로 나타났다. 이처럼 운전자 주행특성 분석 연구의 경우, 고령운전자와 비고령운전자의 운전 및 신체적 능력에 대한 비교 또는 교통사고와의 관계를 규명하는 연구가 대부분이었다.

## 2. 주행 시뮬레이션 활용 군집주행 관련 연구

Lank et al.(2011)은 주행 시뮬레이션을 활용해 군집주행이 환경에서 비자율차 운전자의 작업부하 평가를 실시하였다. 군집주행 시 피실험자가 느끼는 스트레스와 작업부하가 군집주행이 아닐 때 보다 더 높게 나타났다. Gouy et al.(2014)은 주행 시뮬레이션을 활용하여 고속도로 구간에서의 군집주행 환경에서 비자율차 운전자의 종방향 주행행태에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과, 군집주행 중인 차량간 차두간격이 짧을수록 비자율차 운전자의 속도 표준편차가 높게 나타났다. 또한, 화물차 군집주행은 비자율차에 영향을 주었으며, 군집간 간격이 줄어들 때 비자율차도 전방의 차량과 간격을 좁히는 행태를 보였다. Heikoop et al.(2017)은 주행 시뮬레이션을 활용해 군집주행이 운전자의 인지능력, 작업부하, 스트레스에 미치는 영향 분석을 실시하였고, 그 결과 군집주행 시 연령대가 높아질수록 운전자의 작업부하가 높아지는 것으로 나타났다. Larburu et al.(2010)은 주행 시뮬레이터를 활용하여 주행모드전환(자동↔수동)에 대해 안전성 측면에서 운전자 인적요소를 Human-Machine Interface(HMI)를 통해 평가하고자 하였다. Lee and Bae(2017)은 군집주행 환경에서 비자율차의 차로변경행태를 영상기반 인지특성분석, 주행시뮬레이션 실험을 통한 차로변경행태 분석(차로변경시간, 가속소음), NASA-TLX를 통한 운전자 작업부하에 대한 분석을 수행했다.

이처럼 주행 시뮬레이션을 활용하여 자율차와 비자율차 관계에 대해 분석한 타 연구들의 사례를 살펴보면 설문조사를 통한 운전자 작업부하 또는 주행모드 전환에 관련한 연구가 다수를 차지하고 있다.

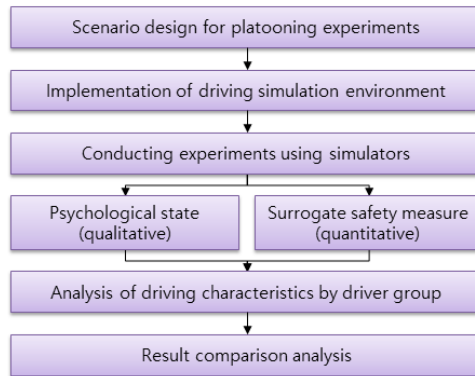
## 3. 기존 연구와의 차별성

기존의 연구는 대부분 소형 시뮬레이터를 활용한 실험으로 실험 결과의 상대적 비교를 통한 결과 제시에 국한되었다. 본 연구는 기존 연구와는 다르게 현실감이 높은 고성능 주행 시뮬레이터를 활용하여 군집주행 환경에서의 비자율차에 대한 횡방향 주행행태와 화물차 사이에서의 주행행태 및 운전자 심리상태에 대한 연구 결과를 제시하였다. 또한 대부분 연구에서 설문조사만을 이용하였는데, 본 연구에서는 신뢰도 높은 차량주행거동행태 데이터와 연계하여 분석을 진행하였다. 뿐만 아니라, 단순히 고령운전자와 비고령운전자에 대한 주행특성 비교 연구가 아니라, Kim and Park(2006)이 제시한 운전수행능력이 저하되는 51세를 기준으로

운전자 그룹을 분류하고, 군집주행 화물차 운전자 관점이 아닌, 비자율차 운전자 관점에서의 운전자의 심리상태와 주행안전성에 대한 비교분석에 초점을 두고 진행하였다는 점에서 기존 연구와의 차별성을 가진다.

### Ⅲ. 분석방법론

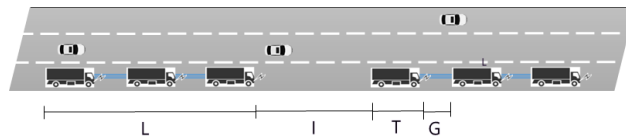
본 연구에서는 <Fig. 1>에 제시한 바와 같이 분석시나리오와 군집주행 시뮬레이션 환경을 구축하여 모의 주행실험을 수행하였으며, 화물차 군집주행 대열 사이를 주행하는 운전자의 심리상태 조사를 위해 매 시나리오를 수행할 때 마다 구두설문을 진행하였다. 그리고 운전자가 실제로 안전하게 주행하였는지에 대해서는 시뮬레이터에서 수집된 차량거동행태 데이터 기반의 주행안전성평가 지표를 활용하였다. 최종적으로 두 분석 결과를 이용하여 운전자 그룹별 주행특성에 대한 결론을 도출하였다.



<Fig. 1> Research flow chart

#### 1. 분석 시나리오

군집주행을 결정짓는 요소는 <Fig. 2>와 같이 크게 화물차수(N), 화물차 길이(T), 화물차간 간격(G), 군집 길이(L), 주행속도(V), 군집간 간격(I) 등으로 구분할 수 있다. 군집에 소속된 화물차 운전자에게는 화물차량 위치(Leading, Following), 화물차간 간격, 주행속도가 주요 영향요인일 것이나, 본 연구에서는 화물차 군집내로 끼어들기를 시도하는 일반 차량 운전자를 분석하는 것이므로, 화물차간 간격이 가장 민감한 요소로 판단된다.



<Fig. 2> Components of truck platooning

군집주행 환경은 “V2X기반 화물차 군집주행 운영기술 개발”에서(MOLIT, 2021) 제시하는 화물차 운행속도와 Time Gap 간격을 인용하여 다음과 같이 설정하였다. 화물차 차량 운행속도는 90km/h이며, 화물차간 간격(Time Gap)은 0.2~1.0초까지 0.2초 간격으로 총 4개의 시나리오로 구성하였다. 따라서 각 시나리오에 대한

시간간격과 거리는 <Table 1>에 제시한 바와 같이 설정하였다. 또한 시나리오 수행 순서에 따른 결과 왜곡요인 제거 및 효율적인 실험운영을 위해 <Table 2>에 제시한 바와 같이 시나리오 시행 순서를 무작위로 배열한 총 4개의 그룹을 구성하여 피실험자 마다 다른 구성으로 실험을 진행하였다.

<Table 1> Design of scenario

Scenario	Time Gap	Distance
(a)	0.4s	10m
(b)	0.6s	15m
(c)	0.8s	20m
(d)	1.0s	25m

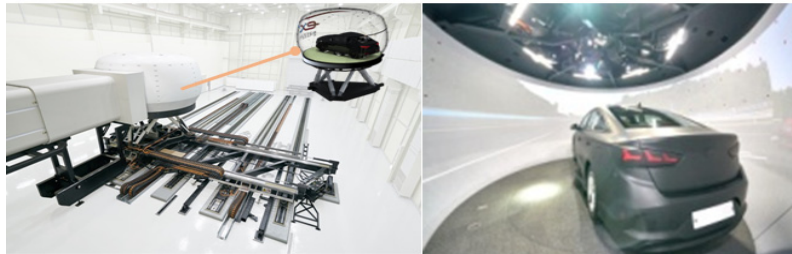
<Table 2> Scenario grouping

Scenario Group	Scenario Order
1	(a) → (c) → (b) → (d)
2	(b) → (d) → (a) → (c)
3	(d) → (b) → (c) → (a)
4	(c) → (a) → (d) → (b)

## 2. 시뮬레이션 환경 구현 및 실험

### 1) 도로주행 시뮬레이터

화물차 군집주행 환경에서 일반차량 운전자의 반응을 측정하기 위해서는 현실과 가까운 주행재현이 가능한 고성능 시뮬레이터가 필요하다. 한국도로공사가 보유중인 도로주행 시뮬레이터는 세계적 수준의 고성능 시뮬레이터로, 운전자가 가상의 환경에서도 실제로 주행하는 느낌을 받을 수 있는 대형실험장비이다. 돔을 지지하는 6개의 축과 X-Y 레일이 실제와 유사한 차량의 운동성을 재현해 내며, 이를 활용하여 현실감 높은 화물차 군집주행 가상환경을 구축하였다(<Fig. 3>).



<Fig. 3> Driving simulator(Korea Expressway Corporation)

### 2) 피실험자 모집 및 실험절차

2021년 9월 15일부터 9월 30일까지 총 24명의 피실험자가 모의주행 실험에 참여하였다. 피실험자의 성별은 남성 19명, 여성 5명이었으며, 연령대는 20대~60대로 피실험자의 세부구성은 <Table 3>에 제시한 바와 같다. 본 연구에서는 Kim and Park(2006)이 제시한 운전능력이 저하되는 51세를 기준으로 그룹A와 그룹B로 구분하였다. 이중 주행 시뮬레이터 부적응자 1명(40대, 여)을 제외한 23명의 데이터를 이용하였다.

<Table 3> Details about the subject

Sex	20s	30s	40s	50s	Over 60s	Total
Number of male	6	5	2	3	2	24
Number of Female	-	2	1	3	-	

<Table 3> Continue

Sex	20s	30s	40s	50s	Over 60s	Total
Average years of driving experience	3.2	8.9	15.0	18.8	31.0	12.4
	7.4			21.9		
Group by driving ability	A group			B group		-

설문조사 및 실험시간은 1명당 약 1시간 정도 소요되었다. 실험전 공통사항으로 군집주행에 대한 안내영상을 시청하고 인적사항에 대한 사전설문조사를 작성하고 피실험자들이 주행 시뮬레이터에 적응할 수 있도록 연습주행에 충분한 시간을 할애하였다. 그리고 본 실험을 진행하며, 주행중 느끼는 상황에 대해 시나리오가 끝날 때 마다 구두로 설문조사를 수행하였다(<Table 4>).

<Table 4> Experimental procedure

STEP	Category	Contents
1	Experiment description	• Watch a video guide to understand truck platooning
2	Pre-Survey	• Pre-survey to identify the subject's information (gender, age, driving history, accident history, etc.)
3	Practice driving	• Practice driving to lane changing between platooning trucks on a highway
4	Conducting experiment	• Conduct a verbal survey while repeatedly driving “cut in → driving in the trucks → cut out”

### 3) 실험환경 및 주행순서

본 연구에서 활용한 도로환경은 실험의 현실성을 높이기 위해 현재 실제 건설중인 서울-세종 고속도로의 안성-용인 약 30km 구간(3차로)으로 설정하였으며, 화물차의 군집주행 대열운행이 가능한 LOS B 수준으로 주변 교통량을 구현하였다. 이때 피실험자의 원활한 차로변경을 위해 피실험자가 주행하고 있는 2차로의 전후방 100m 내에 다른 차량이 접근할 수 없도록 구현하였다. 세부적인 도로교통조건은 <Table 5>에 제시하였다.

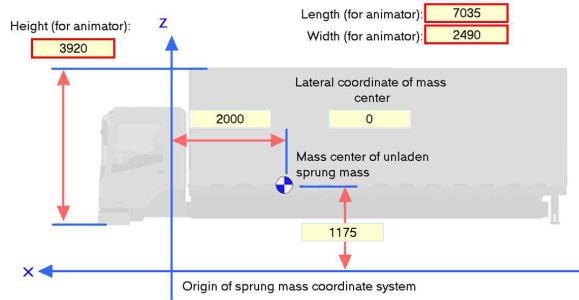
<Table 5> Simulated driving sequence

Category	Contents	
Traffic volume	1,150pcphp(LOS B)	
Numver of lanes	3lanes	
Lane width	3.6m	
Speed limit	Subject driver	120km/h
	Truck Platoons	90km/h
Driving lane	Subject driver	2nd lane
	Truck Platoons	3rd lane

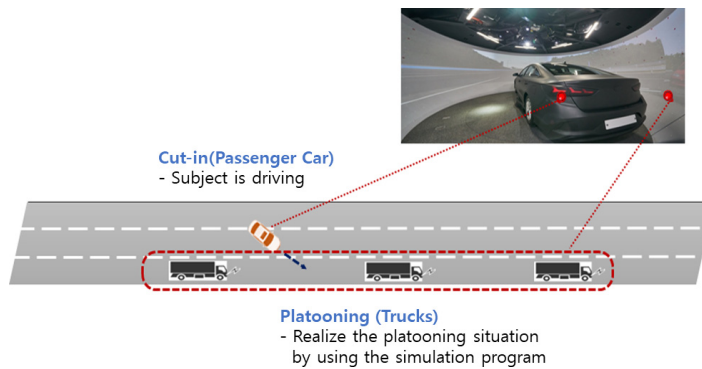
본 연구에서 제시한 군집주행 화물차에 대한 스펙은 <Fig. 4-(a)>에 제시한 바와 같으며, 군집주행을 하고 있는 화물차의 간격은 일반 차량이 끼어들더라도 전방의 화물차를 기준으로 일정한 간격을 유지하며 주행하는 것으로 설정하였다. 그 이유는 본 실험의 목적이 군집주행을 하고 있는 화물차 사이로 얼마나 안전하게 차로변경을 하는지, 또한 화물차 사이에서 주행시 얼마나 불안감을 느끼는지에 대해 알아보고자 한 것이기

때문이다. 만약 일반차가 화물차 사이로 차로변경시 일반차량을 기준으로 다시 후방 화물차가 간격을 조정하게 된다면, 일반차는 화물차간 간격에 관계없이 언제든지 끼어들기가 가능한 상황이 되므로 이는 본 연구의 목적에 부합되지 않는 것으로 판단하였다.

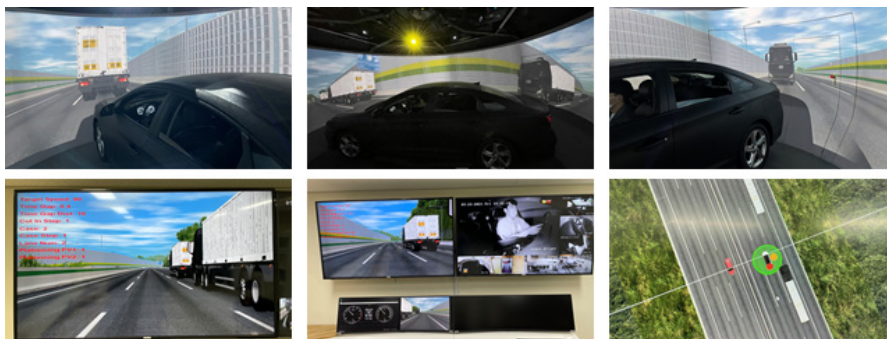
피실험자는 <Fig. 4(b)>와 같이 2차로에서 주행을 시작하며 안내음성에 따라 군집주행을 하고 있는 2번째와 3번째 화물차 사이로 “차로변경(cut-in)→대열사이주행→차로변경(cut-out)”을 반복 수행한다. 피실험자가 실제 모의주행 실험에 참여하여 주행하는 모습과 주변 환경은 <Fig. 4(c)>와 같으며, 모의주행 실험순서에 대한 상세한 내용은 <Table 6>에 제시하였다.



(a) Specifications for platooning trucks



(b) Concept of truck platooning simulation



(c) A photo of truck platooning experiment

<Fig. 4> Illustration of an experimental environment for platooning of trucks

<Table 6> Simulated driving sequence

STEP	Category	Contents
1	Start	- The driver starts from the second lane and drives it to a driving speed of 110kph or more - Drive until you find a platoon (90km/h, Time gap 1.0 sec) ※ Repeat the following Cut-in/Cut-out 4 times according to the scenario configuration
2	Cut-in	1) A passenger car driver drives next to a platooning truck 2) Change of Time Gap of truck platooning 3) (△) Change lanes to the second lane between trucks i) When the cut-in is successful → Run for 1 minute → Cut-out → Perform the next cut-in/out case ii) In case of cut-in failure → Perform the next cut-in/out cas
3	Cut-out	1) (△) Change lanes to the second lane.) 2) (△) Drive at a speed of 110 kph or higher.) * Run until the next platoon appear
4	End	- Instruct the end of the experiment and stop the vehicle

### 3. 운전자 심리상태 설문조사

피실험자는 군집주행을 하는 화물차간 간격이 다른 총 4가지의 시나리오를 주행하였으며, 실험 시나리오 순서는 학습효과를 예방하기 위해 사전에 무작위로 구성된 순서로 진행하였다(<Table 2>). 그리고 매 시나리오가 진행될 때 마다 실험 참가자에게 9점 척도의 2가지의 문항에 대해 구두로 설문을 실시하였으며, 각 문항은 <Table 7>에 제시한 바와 같다. 첫 번째 문항 Q1은 “cut-in 이후, 화물차 군집주행 대열 사이로 끼어드는 행위가 운전자에게 얼마나 난이도가 있었는지”에 대한 것이며, 두 번째 문항 Q2는 “cut-out 전, 군집주행 대열 사이에서 주행하는 것에 대해 운전자가 얼마나 불안/부담감을 느꼈는지”에 대한 것이다. <Table 8>에 제시한 예시와 같이 피실험자는 매 시나리오를 진행하는 동안 Cut-in/cut-out을 한 번씩 반복하는데, 4번의 시나리오를 진행하는 동안 cut-in/cut-out을 각각 4번씩 진행한다(총 8회 설문).

<Table 7> Survey Questions

Category	Question									question
The difficulty of changing lanes within a platooning vehicle group	Q1. How difficult was it to change lanes between truck platoons? (Difficulty)									after cut-in
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	very easy	-	a little easy	-	normal	-	a little difficulty	-	very difficulty	
Questions about anxiety when driving in platooning vehicle groups	Q2. How anxious was it to drive between truck platoons? (anxiety)									before cut-out
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	very stable	-	a little stable	-	normal	-	a little anxiety	-	very anxiety	

<Table 8> Example of survey order

Category	Scenario order									
Scenario Group 1	Start	a		c		b		d		End
		cut-in	cut-out	cut-in	cut-out	cut-in	cut-out	cut-in	cut-out	
Survey	-	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	-



#### 4. 주행 안전성 평가지표

모의주행 실험에서 피실험자는 화물차 군집주행 대열 사이로 끼어드는 상황과 군집주행 대열 사이에서 주행해야하는 2가지 상황을 수행하게 된다. 이때 피실험자에게는 자신이 운전하고 있는 차량의 위치와 속도, 전·후방의 화물차의 속도와 위치가 매우 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 이 2가지 상황에 대하여 주행 안전성을 평가하기 위해 차량의 위치와 속도를 활용한 대표적인 교통안전대체평가지표(Surrogate Safety Measure)로 TTC(Time to collision)와 PET(Post-Encroachment Time)를 채택하였다.

TTC는 사고를 회피하기 위해 어떤 행동을 취한 시점에서부터 사고가 발생할 수 있는 시점까지 잔여시간으로 식(1)과 같이 정의되며, 위치와 속도의 변화에 따라 민감하게 반응을 한다. 속도와 방향을 일정하게 유지할 경우에만 특정시점에서의 충돌 여부 예측이 가능하여, 두 차량 중에서 선행 차량의 속도가 후행 차량의 속도보다 클 경우에는 위험한 상황으로 판단하지 못하는 한계가 있다.

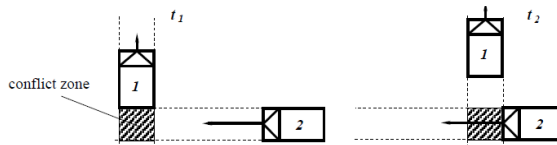
$$TTC = \frac{P_L - P_F - l_L}{V_F - V_L} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $P_L$  : 선행 차량 위치  
 $P_F$  : 후행 차량 위치  
 $l_L$  : 선행 차량 길이  
 $V_F$  : 후행 차량 속도  
 $V_L$  : 선행 차량 속도

PET는 TTC와 함께 가장 자주 사용되는 교통안전대체평가지표로 선행 차량이 어느 한 지점을 통과한 시점과 후행의 차량이 그 지점에 도달한 시점의 시간차이로 정의된다(식(2), <Fig 5>). PET는 직접적인 사고는 회피(“위기일발상황”)하였으나, 사고가 거의 일어날 뻔한 상황을 나타낼 때 사용된다. 즉, 얼마나 근접하게 충돌을 회피하였는지에 대하여 측정이 가능하다.

$$PET = t_{L,P} - t_{F,P} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $t_{L,P}$  : 선행 차량이 위치 P를 통과하는 시각  
 $t_{F,P}$  : 후행 차량이 위치 P를 통과하는 시각



<Fig. 5> Illustration of PET

또한 본 연구에서는 차량 간의 거리도 주행안전성을 평가하는 지표로 사용하였다. 그 이유는 앞·뒤 화물차량간의 거리가 화물차 군집주행 사이로 끼어들고 그 사이에서 주행을 해야 하는 상황에서의 주행안전성을 나타낼 수 있는 가장 직관적이고 명료한 척도이기 때문이다.

## IV. 분석결과

본 연구에서는 도로주행 시뮬레이터를 활용하여 총 23명의 피실험자를 대상으로 화물차 간격별 4가지 시나리오에 대해 화물차 군집주행 대열 사이를 주행하는 모의주행 실험을 진행하였다. 각 시나리오별로 군집내 차로변경 및 군집내 주행이라는 2가지 상황을 수행하게 되며, 각 상황을 수행할 때마다 운전자에게 구두로 운전자 심리상태에 대해 조사를 수행하였다(정성적 분석). 시나리오 ①의 경우, Time gap이 0.4초(10m)로 매우 짧음에도 불구하고 차로변경에 실패하는 경우는 없었다. 또한 시뮬레이터에서 수집되는 차량 거동행태 데이터를 기반으로 주행안전성 평가지표를 산출하여 실제 주행 안전성에 대해서도 분석을 수행하였다. 그리고 각 그룹별 정성적, 정량적 주행특성에 대한 분석결과를 비교하여 제시하였다.

### 1. 운전자 심리상태 분석

화물차 군집주행 대열 사이를 주행하는 운전자의 심리상태 분석을 위해 화물차 대열 간격별 시나리오에 대해 끼어드는 상황과 대열내 주행하는 상황에 대해 각각 설문을 수행하였으며, ‘매우 쉬움/안정 1점’에서 ‘매우 어려움/불안 9점’으로 점수를 측정하였다. 즉, 점수가 높을수록 운전자는 차로변경이 어렵거나 대열내에서 주행하는 것이 불안하였다는 것으로 해석할 수 있다. 설문조사 결과는 <Table 9>에 제시하였다.

설문조사에서 5점이 ‘보통’인 상황을 기준으로 차간시간 0.6초, 차간거리 15m 이상인 경우는 대부분 심리적으로 불안/어려움을 느끼지 않았다고 판단할 수 있다. 또한 시나리오 ④를 제외한 모든 시나리오에서 군집주행 내 끼어드는 것이 군집주행 내 주행하는 것보다 심리적으로 더 안정감이 낮은 것으로 나타났다. 이는 화물차 사이로 차로를 변경하는 것이 운전자가 수행해야하는 육체적/심리적 부담감이 더 높기 때문에 판단된다. 반면 ‘시나리오 ④’는 상대적으로 충분한 간격이 확보되어 끼어들기는 어렵지 않으나, 화물차 사이에서 주행하는 운전자의 불안감이 반영된 결과로 판단된다.

추가적으로 이 설문조사 결과의 표준편차를 살펴보면 차량간 간격이 넓어질수록 작아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 차량간 간격이 좁을수록 끼어들기 또는 차량 사이에서 주행시 불안/어려움을 느끼는 편차가 크게 발생한다는 것인데, 이는 피실험자의 개별 운전수행능력이 심리적인 결과에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

<Table 9> Result of driver psychological state survey

Category		Scenario ① (0.4sec, 10m)	Scenario ② (0.6sec, 15m)	Scenario ③ (0.8sec, 20m)	Scenario ④ (1.0sec, 25m)
Changing lanes in platooning	AVG.	6.8	4.7	4.2	3.0
	STD.	2.64	2.52	2.48	2.07
Driving in platooning	AVG.	6.2	4.5	4.0	3.8
	STD.	2.63	2.22	2.17	2.13

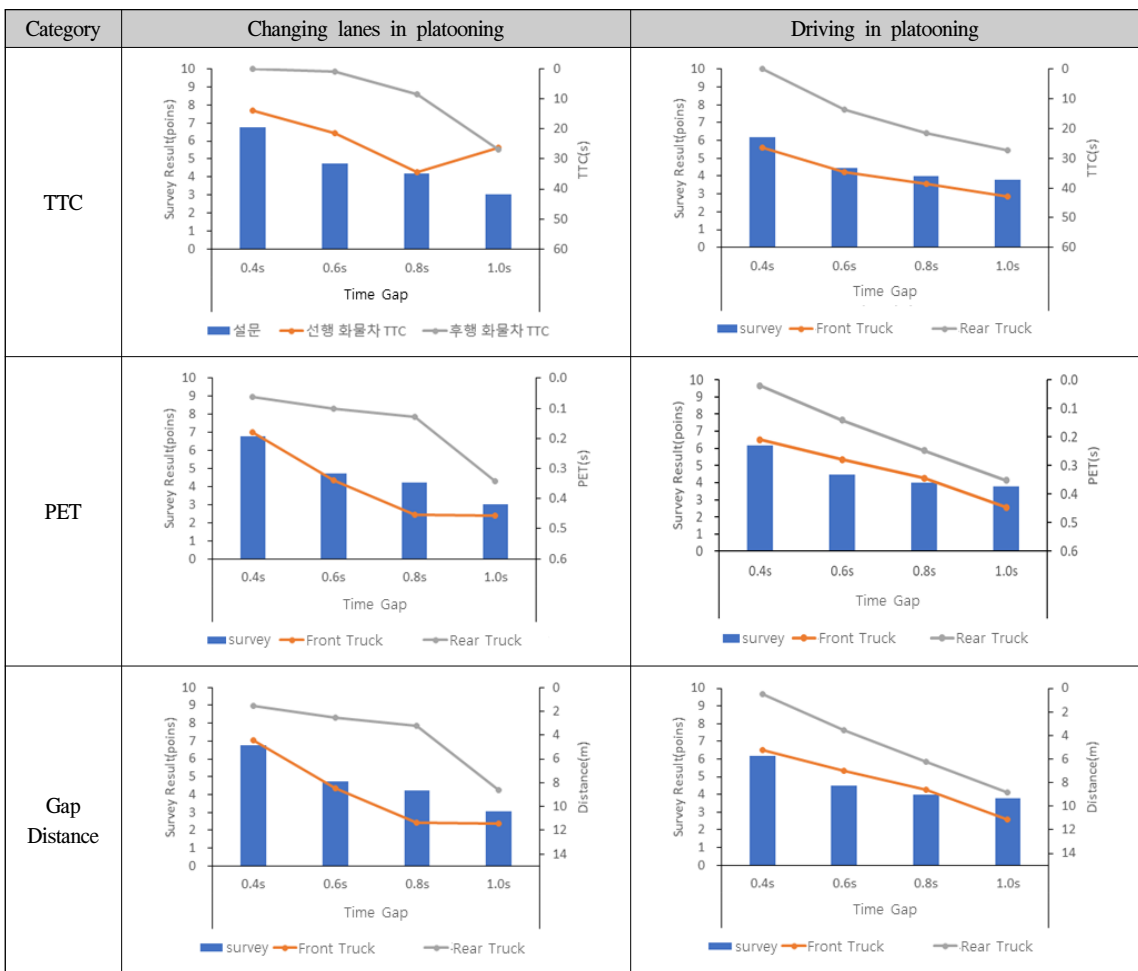
### 2. 주행안전성 평가지표 분석

본 연구에서는 주행안전성을 평가하기 위해 TTC, PET, 차간거리를 활용하였으며, 그 결과를 <Fig. 6>에 제시하였다. 설문조사 점수는 높을수록 불안/어려움을 나타내지만, TTC, PET, 차간거리는 값이 낮을수록 위험한 상황을 의미한다. 따라서 한 그래프 안에서 해석의 용이함을 위해 TTC, PET, 차간거리에 대한 Y축을 역전시켜 나타내었다. TTC, PET, 차간거리 모두 군집주행 대열 간격이 넓을수록 실제 주행에서도 안전하게

주행한 것으로 나타났다.

추가적으로 선행 화물차와 후행 화물차와의 안전성에 대해 비교해보면 선행 화물차보다 후행 화물차와의 관계에서 더 위험한 상황이 많이 발생한 것으로 나타났다. 이는 피실험자가 군집내 끼어들기 또는 군집내에서 주행하는 동안 후행 화물차에 대한 위치, 속도 정보를 잘 인지하지 못하기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 특히, 간격이 좁을수록 군집내로 끼어드는 것이 군집내에서 주행하는 하는 것보다 더 위험한 것으로 나타났다.

설문조사 결과와 주행안전평가지표간의 변화를 살펴보면, 차량간격이 0.4초(10m)에서 0.6초(15m)로 늘어났을 때, 피실험자가 느끼는 불안/어려움 감소만큼 실제 주행위험성이 감소하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 피실험자가 느끼는 안정감 증대가 실제 주행안전성과 정비례하지 않는 것으로 나타났다.



<Fig. 6> Result of Surrogate Safety Measure

### 3. 운전자 주행특성 분석

지금까지 피실험자 전체에 대한 설문조사와 주행안전성 평가지표 분석결과를 살펴보았다. 앞서 제시되었듯이 피실험자들 본인이 느낀 안정감과 실제 주행안전과는 정비례하지 않는 것으로 나타났다. 이는 운전자

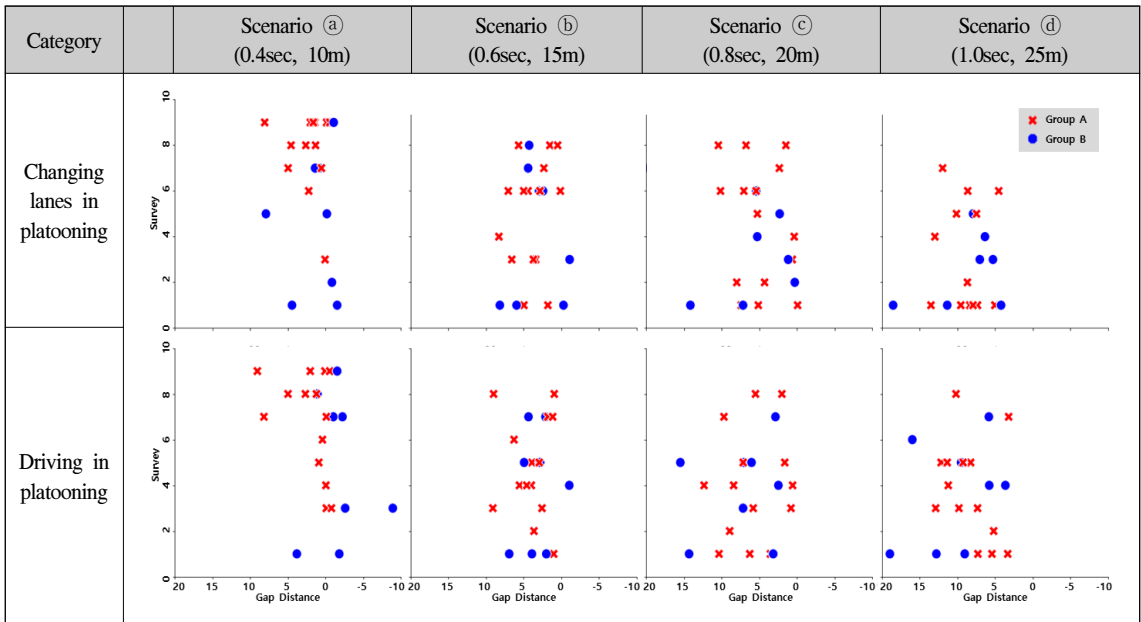
의 주변 상황 인지능력과 운전수행능력의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다.

일반적으로 운전자의 인지 및 운전수행 능력은 나이가 들수록 상대적으로 저하되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 선행연구결과에서 제시한 운전수행능력이 저하되는 51세를 기준으로 운전자를 그룹 A와 B로 분류하였으며, 그룹별 평균 운전경력은 각각 7.4년, 21.9년으로 나타났다. 각 그룹을 대상으로 한 실험에서는 군집주행 대열 내로의 차로변경과 대열 내에서 주행시 각각 어떤 특성이 나타나는지 알아보고자 하였다.

이를 위해 피실험자가 느낀 설문조사결과와 주행안전성지표 중 객관적이고 명료한 차량거리를 활용하여 두 지표 간 관계를 그룹 A(파란색-●)와 그룹B(붉은색-X)로 나누어 비교하였으며, 그 결과를 <Fig. 7>에 제시하였다. 그래프 해석의 용이함을 위해 차량 간 거리를 나타내는 X축을 역전시켜 도식화하였다. 즉, Y축 상단으로 갈수록 운전자가 불안하다고 느끼는 상태이며, X축 우측으로 갈수록 실제 위험하게 주행한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 정비례 관계에 있으면 실제로 안전하게 주행하고 안전하다고 느낀 것이며, 반비례 관계이면 실제로는 위험하게 주행했는데 안전하게 느낀 것으로 해석할 수 있다.

비교 결과, 실제 주행안전성 측면에서는 시나리오①의 화물차 대열 내 주행시에만 그룹 A가 더 안전하게 주행한 것으로 나타났지만, 대부분의 시나리오에서 그룹 A와 B의 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면, 대부분의 그래프에서 우측 하단에 그룹 B가 상대적으로 많이 밀집해 있는 것으로 나타났는데, 이는 그룹 B가 실제 주행에서 위험하게 주행했음에도 불구하고 안전하게 주행했다고 주변 상황을 오인하면서 나타난 결과로 판단된다. 특히, 차량간격이 좁을수록 그룹 B의 오인지 비율이 크게 증대하는 것으로 나타났다.

즉, 군집주행 화물차 대열 사이로 끼어드는 것과 대열 사이에서 주행하는 행위는 운전경험(경력)이 많을수록 더 안전하게 주행한다고 판단할 수 없으며, 이는 그룹 B의 운전자의 운전수행능력 및 주변 인지상황능력이 상대적으로 저하된 결과로 판단된다.



<Fig. 7> Survey results - Scatter plot of vehicle gap distance

## V. 결 론

미래 교통기술 중 하나인 화물차 군집주행 기술이 도입된다면, 도로 수송 경쟁력 강화 등 도로·교통체계 전반에 많은 영향을 미칠 것으로 전망된다. 그러나 자율주행 자동차 기술기반의 화물차 군집주행 기술이 상용화되기 위해서는 많은 기술적, 제도적 보완이 요구되며, 자율주행 기술이 현실화가 되더라도 비자율차 운전자는 여전히 고려해야할 대상이다.

화물차 군집주행 차량과 일반차량이 혼재된 상황은 불안정한 교통흐름을 유발하여 소통뿐만 아니라, 안전성 측면에서 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높다. 또한, 인지반응 및 운전수행능력이 상대적으로 저하되는 51세 이상의 운전자는 화물차 군집주행군 주변을 주행하는 것만으로도 심리적 부담감을 많이 느낄 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 화물차 군집주행 기술 상용화시, 그 주변을 주행하는 운전자의 심리상태와 주행안전성에 대해 알아보고자 하였으며, 운전수행능력에 따라 모의주행시 느끼는 정성적, 정량적 분석결과를 비교·제시하였다.

이를 위해 도로주행 시뮬레이터를 활용하여 군집주행 대열로 끼어드는 상황과 군집주행 대열 내에서 주행하는 상황으로 실험환경을 구성하여 모의주행 실험을 수행하였다. 운전자의 심리상태는 각기 다른 상황을 주행할 때마다 얼마나 불안/부담감을 느꼈는지에 대한 설문을 통해 분석하였으며, 주행안전성에 대해서는 교통안전평가대체지표(SSM)인 TTC, PET, 차간거리를 활용하여 분석하였다.

그 결과, 선행 화물차와 후행 화물차와의 안전성에 대해 비교해보면 선행 화물차보다 후행 화물차와의 관계에서 더 위험한 상황이 많이 발생한 것으로 나타났다. 또한 그룹별 비교·분석결과, 운전수행능력이 낮은 운전자 그룹의 경우, 실제 끼어들기 또는 군집내 주행에서 위험하게 주행했음에도 불구하고, 스스로 안전하게 주행했다고 판단한 경우가 많았다. 특히, 차량간격이 좁을수록 오인지 비율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 크게 두 가지 측면에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 첫째, 군집주행 시스템의 안정화를 위한 운용·관리 전략개발을 효과적으로 지원할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 연결로 구간 등 화물차의 군집주행 간격을 일시적으로 넓혀야하는 경우, 적정 간격을 도출하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 예를 들어, 고속도로 접속부는 일반차량이 고속도로 유출입을 위해 강제적 차로변경이 필요한 구간으로, 군집주행 화물차 대열이 긴 경우에는 화물차간 간격을 좁혀 끼어들지 못하게 하는 것보다 안전한 차로변경을 유도할 수 있도록 간격을 확보하는 것이 필요하다. 반면 화물차간 간격이 너무 벌어지게 되면 운용효율성 저하가 발생하게 된다. 따라서, 본 연구결과는 교통안전과 운영효율성 측면을 모두 고려한 군집주행 화물차간 적정 간격을 도출하는데 활용될 수 있다. 둘째, 군집주행/일반차량 분리방안 등 비자율차량 운전자를 위한 교통관리 전략을 수립하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 자율주행 기술이 한 단계 더 발전되어 실주행 테스트가 진행되고 있는 지금, 자율주행차 또는 군집주행 기술에 대한 연구뿐만 아니라, 비자율차와 혼재된 상황에서 고령운전자, 교통약자, 고위험군 운전자 등에 대한 연구도 활발하게 진행되어야 할 필요가 있다.

본 연구를 발전시키기 위해서는 다음과 같은 한계점을 극복하고 추가 연구가 진행되어야 한다. 첫째, 수행된 결과는 도로주행 시뮬레이터를 활용한 결과로 절대적인 의미를 부여하는데 한계가 있다. 현실 재현력이 높은 시뮬레이터로 모의주행 실험을 진행하였지만, 실제 현실과는 편차가 존재하므로 보다 신뢰도 높은 연구 결과 도출을 위해서는 구현된 해당 군집주행 실험환경에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다. 둘째, 운전자 심리상태 분석을 위해 수행한 설문조사는 정성적 분석 방법이다. 그러나 뇌파, 호흡, 심전도, 근전도 등 생체정보신호를 활용하면 운전자의 심리 상태에 대해 정량적 분석이 가능할 것으로 판단된다. 셋째, 주행안전성 평가를 위해 기존에 많이 활용되고 있는 교통안전평가대체지표(SSM)인 TTC, PET를 사용하였는데, 이

는 보편적인 지표들로 차로변경 등 특수한 경우에 적합하지 않을 수 있을 것이다. 따라서 실험 시나리오에 적합한 보다 체계적이고 검증된 지표를 활용한다면 신뢰도 높은 주행안전성평가 지표 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 21TLRP-B147674-04)에 의해 수행되었습니다. 본 논문은 2021년 한국ITS학회 추계학술대회에 게재되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

## REFERENCES

- Gouy M., Wiedemann K., Stevens A., Brunett G. and Reed N.(2014), “Driving Next to Automated Vehicle Platoons: How do Short Time Headways Influence Non-platoon Drivers’ Longitudinal Control?,” *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behavior*, vol. 27, pp.264-273.
- Heikooop D. D., De Winter J. C., Van Arem B. and Stanton N. A.(2017), “Effects of platooning on signal-detection performance, workload, and stress: A driving simulator study,” *Applied Ergonomics*, vol. 60, pp.116-127.
- Jo J.(2008), “A Study on Driving characteristics of the older drivers and younger drivers using a Driving Simulator,” *Journal of the Korea Safety Management and Science*, vol. 10, no. 2, pp.43-52.
- Kim J. and Park J.(2006), “Difference in perception of male and female drivers regarding the driving ability and driving stress,” *Korean Journal of Psychological and Social Issues*, vol. 12, no. 4, pp.37-53.
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, <https://www.kaia.re.kr/portal/landmark/readTskView.do?tskId=147674&yearCnt=4&year=2021&menuNo=200060>, 2021.11.01.
- Lank C., Haberstroh M. and Wille M.(2011), “Interaction of human, machine, and environment in automated driving systems,” *Transportation Research Record*, vol. 2243 no. 1, pp.138-145.
- Larburu M., Sanchez J. and Rodriguez D. J.(2010), “Safe Road Trains for Environment: Human Factors’ Aspects in Dual Mode Transport Systems,” *ITS World Congress*, Busan, pp.1-12.
- Lee G. H. and Bae G. M.(2021), “Analysis of Driving Characteristics of Elderly Drivers on Roads Using Vehicle Simulator,” *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 1, pp.146-159.
- Lee S. Y. and Oh C.(2017), “Lane Change Behavior of Manual Vehicles in Automated Vehicle Platooning Environments,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 35, no. 4, pp.332-347.
- Lim S. J., Park J. T., Kim Y. I. and Kim T. H.(2012), “Analysis of Elderly Drivers Accident Models Considering Operations and Physical Characteristics,” *Journal of Korean Society of Transportation*,

vol. 30, no. 6, pp.37-46.

Ministry of Land, *Infrastructure and Transport*, <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156470014>, 2021.09.08.

Oh M. S., Jang J. Y., Oh C. and Han K. S.(2020), "Analysis of Driving Behavior and Workload of Elderly Drivers on Freeways," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 38, no. 3, pp.176-189.

Segata M., Bloessl B., Joerer S., Sommer C., Gerla M., Cigno R. L. and Dressler F.(2014), "Towards Inter-vehicle Communication Strategies for Platooning Support, In Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars-Fall)," *2014 7th International Workshop, IEEE*, pp.1-6.

Statistics Research Institute(2019), *KOSTAT Statistics Plus*.

Suh S., Lee S., Oh C. and Choi S.(2017), "Impacts of Automated Vehicle Platoons on Car-following Behavior of Manually-Driven Vehicles," *Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 4, pp.107-121.

Zheng Y., Li S. E., Wang J., Cao D. and Li K.(2016), "Stability and Scalability of Homogeneous Vehicular Platoon: Study on the Influence of Information Flow Topologies," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 1, pp.14-26.