

C-ITS 기반 PVD를 활용한 차량 내 경고정보의 운전자 주행행태 영향 분석

A Study to Evaluate the Impact of In-Vehicle Warning Information on Driving Behavior Using C-ITS Based PVD

김탁영* · 김호선** · 강경표*** · 김승범****

* 주저자 : 한국교통연구원 모빌리티전환연구본부 연구원
 ** 공저자 : 한양대학교 스마트시티공학과 박사과정
 *** 공저자 : 한국교통연구원 자율협력주행연구센터 선임연구위원
 **** 교신저자 : 경상국립대학교 도시공학과/공학연구원(ERI) 부교수

Tagyoung Kim* · Ho Seon Kim** · Kyeong-Pyo Kang*** · Seoung Bum Kim****

* Dept. of Mobility Transformation, Korea Transport Institute, Researcher
 ** Dept. of Smart City Engineering, Hanyang University, PhD Student
 *** Center for Connected and Automated Driving Research, Korea Transport Institute, Senior Researcher Fellow
 **** Division of Architectural, Urban, and Civil Engineering/Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

† Corresponding author : Seoung Bum Kim, kimsb@gnu.ac.kr

Vol. 21 No.5(2022)
 October, 2022
 pp.28~41

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.5.28>

요약

C-ITS(Cooperative-Intelligent Transportation System)는 차량과 차량 또는 차량과 인프라 간의 양방향 무선통신 기술을 기반으로 전방의 교통상황 정보를 제공하는 기술 및 시스템을 의미한다. C-ITS 환경에서는 Vehicle-to-Everything(V2X) 기반의 경고 정보를 제공함으로써 운전자로 하여금 감속을 유도하고, 급격한 감속과 가속을 지양하도록 하여 주행행태를 안정적으로 개선시킬 수 있을 것으로 추측된다. 본 연구는 서울시 C-ITS 기반의 경고 정보의 개별적인 효과를 검증하기 위해 경고정보에 대한 순응여부를 판단할 수 있는 방법론을 개발하였으며 추가로 주행안전성 변화를 분석하여 경고정보의 효과를 정량적으로 평가해 보고자 한다. 순응여부는 정보 제공 유무로 구별되는 사전 PVD (Probe Vehicle Data)와 사후 PVD의 속도 분포를 추출하여 비교하였으며, 주행안전성 평가는 Jerk와 가속소음을 계산하여 분석을 수행하였다. 정량적 분석을 위해서 서울 C-ITS 사업기간동안 수집되었던 PVD와 부족한 데이터 수집을 보완하고자 DTG (Digital Tacho Graph) 데이터를 추가 수집하여 활용하였다. 순응도 분석결과 충분한 유효 샘플이 수집된 경고정보에 대해 운전자는 감속운행행태를 보였으며, Jerk와 가속소음과 같은 주행안전성 지표를 산출하여 분석한 결과 경고정보 제공으로 인해 주행안전성이 개선되었음을 알 수 있었다.

핵심어 : C-ITS, 경고정보, 순응도, 주행안전성, PVD (Probe Vehicle Data)

ABSTRACT

A road system with CV(Connected Vehicle)s, which is often referred to as a cooperative intelligent transportation system (C-ITS), provides various road information to drivers using an in-vehicle warning system. Road environments with CVs induce drivers to reduce their speed or

Received 15 September 2022
 Revised 27 September 2022
 Accepted 20 October 2022

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

change lanes to avoid potential risks downstream. Such avoidance maneuvers can be considered to improve driving behaviors from a traffic safety point of view. Thus, empirically evaluating how a given in-vehicle warning information affects driving behaviors, and monitoring of the correlation between them are essential tasks for traffic operators. To quantitatively evaluate the effect of in-vehicle warning information, this study develops a method to calculate compliance rate of drivers where two groups of speed profile before and after road information is provided are compared. In addition, conventional indexes (e.g., jerk and acceleration noise) to measure comfort of passengers are examined. Empirical tests are conducted by using PVD (Probe Vehicle Data) and DTG (Digital Tacho Graph) data to verify the individual effects of warning information based on C-ITS constructed in Seoul metropolitan area in South Korea. The results in this study shows that drivers tend to decelerate their speed as a response to the in-vehicle warning information. Meanwhile, the in-vehicle warning information helps drivers to improve the safety and comfort of passengers.

Key words : C-ITS, In-vehicle warning information, Compliance rate, Driving Safety Index, PVD

I. 서 론

Cooperative-Intelligent Transportation System (C-ITS)은 기존 ITS의 소통 위주의 교통정보 수집 및 제공방식에서 벗어나 Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I)를 통한 양방향 무선통신 기술을 기반으로 전방의 교통상황 정보를 제공하는 기술 및 시스템을 의미한다. C-ITS는 정보를 제공받은 운전자로 하여금 예기치 못한 상황이 발생할 시 신속하고 안전하게 대응하고, 위험 요소로부터 사고를 미연에 방지하는 것을 목적으로 한다(Guériau et al., 2016; Uhlemann, 2015). 국내의 경우 사업용 차량에 의한 사망사고 비율이 매우 높아 사업용 차량에 대한 사고 예방을 위해 Vehicle-to-Everything (V2X) 기반 첨단 안전 서비스 혁신이 필요한 실정이다(Lee et al., 2016). 또한, 전체적인 교통사고 발생 건수 및 사망자 수는 감소하고 있는 실정이지만, 2018년 기준 교차로와 횡단보도 주변에서 발생한 교통사고는 10만 6천 건으로 전체 교통사고의 48.7%를 차지하였으며, 사망자 수는 1,250명으로 전체의 33.1%를 차지하고 있다(Korea Transport Institute, 2019). 이에 따라 연속류에서의 사고 예방뿐만 아니라 단속류에서의 교통사고 예방을 위한 시스템을 구축이 필요하다.

2000년대부터 미국과 유럽, 일본 등에서는 통신기술과 서비스 개발을 실시하였으며, 사업의 일환으로 수집된 실 주행데이터를 활용하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우 4차 산업혁명에 따른 교통변화에 대응하고 스마트 인프라를 선제적으로 구축하여 Connected Vehicles (CV) 및 자율주행 등 미래 교통산업 육성을 위해 정부 주도하에 지자체 C-ITS 실증사업을 추진하였다. 2014년에 시행된 대전-세종 C-ITS 시범사업을 시작으로 2018년부터 서울시와 제주시, 광주시, 고속도로 중 수도권 일부 구간 등에서 C-ITS 실증사업이 수행되었으며 C-ITS로부터 제공되는 차내 경고정보에 대한 효과평가가 진행되었다. 서울시에서는 대중교통 중심의 C-ITS 구축 및 자율 협력 주행의 기반 조성을 위해 2018년부터 2020년까지 서울 C-ITS 실증사업을 진행하였으며, 2020년부터 2021년까지 중앙버스전용차로 구간에 C-ITS 서비스 구축 및 실증사업을 수행하였다. 서울시 C-ITS 실증사업을 통해서 제공된 차내 경고정보는 총 34개로 차량 추돌 방지지원, 교차로 충돌사고 예방 지원 등과 같은 안전 운행 정보, 신호 알람 및 경고, 돌발상황 CCTV 연계 등과 같은 교통관리 정보, 포트홀 경고, 휴대용 공사 알람 등과 같은 도로관리 정보, 승강장 혼잡알림, 정류소 정차면 안내 등과 같은 버스관리 정보 등이 C-ITS 단말기를 장착한 차량의 운전자에게 실시간으로 제공되고 있다.

이에 대해 C-ITS 경고정보를 제공받은 운전자에 대해 실제 경고정보제공 시점을 기준으로 서비스에 대한

운전자의 순응도, 주행안전성 변화를 통해 경고정보의 개별적인 정량적 효과평가가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 경고정보제공 시점을 기준으로 속도의 분포를 통한 운전자의 순응도와 주체 차량의 거동 변화를 측정할 수 있는 가속소음 (Acceleration Noise, AN), Jerk를 통해 주행안전성 변화를 산출하여 정량적인 효과를 평가하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 차량 내 경고정보제공에 따른 효과평가를 수행한 연구에 대해 기존 문헌을 검토하였으며, 3장에서는 C-ITS 경고정보제공에 따른 운전자의 순응도, 주행안전성을 산출한 방법론에 대해 제시하였다. 4장에서는 분석에 활용한 데이터와 분석 대상 지역에 대해 제시하였으며, 5장에서는 제공된 경고정보별 순응도, 주행안전성 개선에 대한 결과를 제시하였다. 마지막 장에서는 본 연구 결과를 요약하여 결론 및 향후 연구 계획에 대해 서술하였다.

II. 선행연구 고찰

본 연구는 서울시 C-ITS 환경에서 제공되는 V2X 기반 경고정보 제공에 따른 효과를 운전자의 순응도, 주행안전성 개선을 통해 정량적으로 평가하였다. 이에 차량 내 경고정보제공에 따른 효과평가를 도로 특성에 따라 분류하여 선행연구를 검토하였으며, 연속류와 단속류가 모두 포함된 도로를 통행한 개별 차량 데이터의 경우 고찰한 선행연구에서 활용한 평가지표를 검토하고 기존 연구와의 차별점을 제시하고자 한다.

1. 실도로 데이터를 활용한 경고정보 제공에 따른 효과분석 연구

실제 도로에서 수집된 주행데이터를 활용하여 경고정보 제공에 따른 효과분석을 수행한 연구의 경우 단말기를 통해 경고정보를 제공한 기간에 수집된 데이터와 경고정보를 제공하지 않은 기간으로 분류하여 효과평가를 진행하였다. Zhang et al.(2022)은 Global Positioning System (GPS) 데이터와 차량 내 모니터링 데이터를 기반으로 차량 내 경고정보제공 유무에 따른 트럭의 안전성 평가에 대한 연구를 수행하였다. 차량 내 모니터링을 통해 운전자의 행동을 분류하고 그에 따른 속도, 사고 횟수를 평가지표로 활용하였다. 분석 결과 경고정보제공 시 날씨, 운전자의 행동에 상관없이 안정성이 높은 것으로 나타났으며 운전자의 행동 중 하품과 흡연이 충돌 위험과 큰 상관관계가 있는 것으로 나타났다. Saldivar-Carranza et al.(2021)은 C-ITS 환경에서 경고정보 제공이 좌회전 신호 시 운전행태에 미치는 영향을 분석하기 위해 실제 교차로에서 수집된 데이터를 활용하였다. 평가지표로는 급가속, 서비스 수준별 지체시간을 활용하였으며 분석 결과 급가속 비율이 14% 감소한 결과로 나타났다. Gu et al.(2021)는 국내 고속도로 C-ITS 사업의 일환으로 수집된 Advanced Driver Assistance System (ADAS) 데이터를 활용하여, 다양한 종류의 경고정보를 운전자에게 제공하는 것이 교통사고 예방에 유의미한 효과가 나타나는지 연구하였다. 활용한 평가지표는 Time-to-Collision (TTC)이며, 경고정보를 제공하기 전의 데이터와 경고정보를 제공한 후의 데이터를 비교하였다. 분석결과 경고정보를 제공한 후 TTC가 15.25% 증가한 것으로 나타났으며, 한계점으로는 경고정보를 제공하기 전의 데이터가 상대적으로 부족한 점을 언급하였다. Jang et al.(2020)은 한국 고속도로 C-ITS 환경에서 제공되는 경고정보에 대해 분석을 진행하였으며, 평가지표로는 주행속도, 차간간격, TTC, Time Exposed Time-to-Collision (TET), 가속도 표준편차, 제한속도 초과 비율, Peak to Peak Jerk (P2P Jerk)¹⁾, Crash Potential Index (CPI) 기반 사고위험도

1) Jerk의 최댓값과 최소값이 차이

를 활용하였다. 분석결과 경고정보 제공 시 주행속도와 TET 및 제한속도 초과 비율은 감소하고 TTC는 증가하였으며, CPI 기반 사고위험도가 20.7% 감소하는 것으로 나타났다. Xie et al.(2019)는 CV 환경에서 실제 수집된 데이터를 활용하여 새로운 Surrogate Safety Measure (SSM)을 기반으로 사고위험률을 산출하는 분석을 수행하였으며 활용한 SSM은 Time to Collision with Disturbance (TTCD)이다. 분석결과 실제 충돌 분포의 측면에서 TTCD가 TTC보다 후방 추돌 사고 발생률과 더 높은 상관관계로 나타났다.

2. 주행 시뮬레이터를 활용한 경고정보 제공에 따른 효과분석 연구

Ko et al.(2021a)는 CV 환경에서 제공되는 차량 내 경고정보의 효과를 평가하기 위해 Multi-Agent Driving Simulation (MADS) 기법을 활용하였다. 분석 시나리오는 CV와 Regular Vehicle (RV)의 선·후행 결합을 달리 하여 CV-CV, CV-RV, RV-RV, RV-CV로 구성하였다. 활용한 평가지표는 Acceleration Noise Index (ANI), Change in Relative Speed (CRS), Lane Change Location (LCL), CPI이며, 분석결과 선행차량이 CV일 때 속도 측면에서 차량간 상호작용이 안정적인 것으로 나타났다. CPI의 경우 CV-CV 시나리오에서 가장 큰 안전성을 확보한 것으로 나타났으며, 이는 RV-RV 시나리오 비해 CPI가 55% 낮은 결과이다. Ko et al.(2021b)는 C-ITS 환경에서 제공되는 다양한 서비스의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 MADS를 활용하였다. 연구의 시나리오는 경고정보를 제공하지 않은 경우를 “Without” 시나리오, 경고정보를 제공한 경우를 “With” 시나리오로 분류하였으며, 정보제공 시 피실험자의 속도 및 후미추돌 사고위험도가 감소한 경우를 운전자 순응으로 정의하여 순응률에 따른 사고 발생 개연성의 변화를 분석하였다. 분석결과 With 시나리오의 속도가 Without 시나리오에 비해 약 14.29% 감소하였으며, 순응률이 증가할수록 평균 CPI가 감소하는 것으로 나타났다. Zhao et al.(2019)는 안개가 발생한 상태에서 상이한 가시성 수준에 대한 CV 기반 가변 속도 제한 서비스의 효과를 평가하였다. 분석 결과, CV 기반 가변 속도 제한 서비스는 주행속도 감소에 효과적이고 주행속도 관리에 도움이 되는 것으로 나타났다. Ziakopoulos et al.(2019)는 충돌에 대한 차량 내 경고정보 시스템과 유사한 장치의 영향을 분석하기 위해 메타분석을 수행하였다. 메타분석 결과는 전체 충돌의 약 1.66%가 충돌에 대한 차량 내 정보 시스템 작동에 의해 발생하는 것으로 도출되었다. Chang et al.(2019)은 베이징의 실제 도로를 바탕으로 안개가 자욱한 조건에서 교통안전에 대한 CV 안개 경보 시스템이 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 연구 결과, CV 안개 경고 시스템이 안개 지역으로 진입하기 전 속도 감소에 도움이 되며 감속 등의 주행행태를 개선시키는 것으로 나타났다. Ryder et al.(2017)은 운전자에게 실제 사고 데이터셋을 기반으로 핫스팟 경고를 제공하는 차량 내 의사결정 지원 시스템에 대해서 연구를 진행하였으며, 핫스팟 경고정보는 운전자의 주행행태 개선에 도움을 주는 것으로 나타났다.

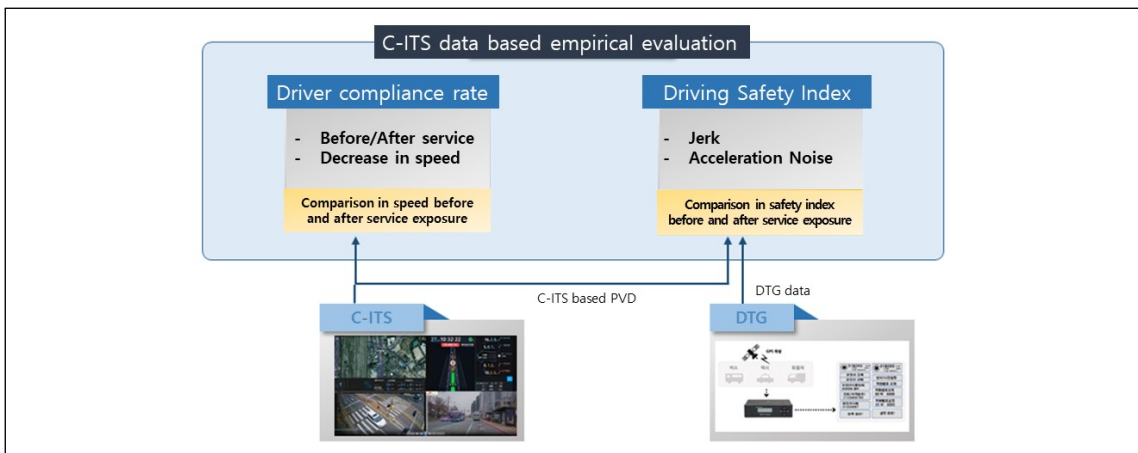
3. 기존연구와의 차별점

본 연구와 직접적인 관련이 있는 C-ITS 환경에서의 차량 내 경고정보제공에 따른 효과분석에 관한 선행연구를 고찰한 결과 대부분의 연구는 경고정보가 제공되기 전과 경고정보를 제공한 후의 시간에 따른 속도변화, 가속도 변화, TTC등을 활용하여 차량 거동 변화를 분석함으로써 효과분석을 진행하였다. 본 연구에서는 선행연구에서도 활용되었던 Jerk, 가속소음을 지표로 활용함과 동시에 개별차량 데이터를 기반으로 한 운전자 순응도를 효과분석 지표로 도입하였다. C-ITS 환경에서 제공되는 각종 경고 및 주의 정보제공 시점을 기준으로 전과 후의 속도분포를 통계적으로 분석함으로써 개선된 주행행태를 정량적으로 평가하였다. 또한, 선행연구와 마찬가지로 경고정보 제공 전과 후의 주행행태를 비교분석했다는 점에서는 동일하지만, 선행연구

의 한계점으로 언급된 부족한 사전데이터를 보완하기 위해 PVD뿐만 아니라 DTG 데이터를 활용하였다는 점에서 차별성을 가진다.

Ⅲ. 연구방법론

본 연구에서는 서울시 C-ITS 실증사업을 통해 구축되는 C-ITS 서비스에 대한 효과를 분석할 수 있는 평가 방법론을 제시하고 현장 데이터를 기반으로 효과를 정량화하는데 목적이 있다. 효과분석을 위해서 먼저 서비스 제공 전/후 비교를 위한 순응도 분석을 수행하였으며, 가속소음과 Jerk를 주행안전성 지표로 선정하여 추가적인 분석을 수행하였다. <Fig. 1>은 효과분석 방법론에 대한 개요를 보여주고 있다.

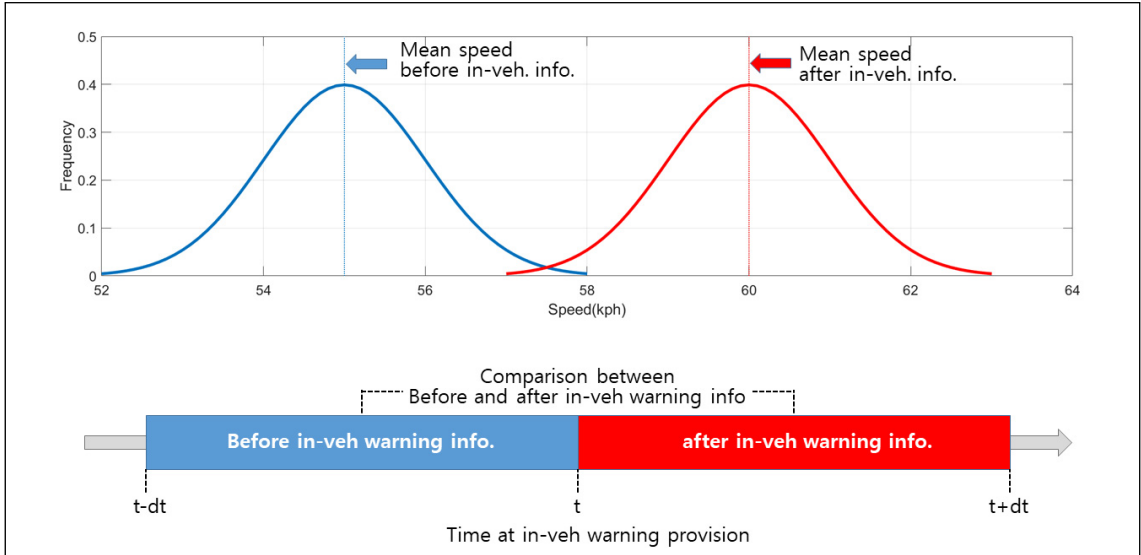


<Fig. 1> Methodology of C-ITS Evaluation

방법론에 대한 자세한 소개에 앞서 분석데이터 추출 방법론에 대한 소개가 필요하다. C-ITS 서비스는 운전자가 전방의 위험 상황을 미리 인지하고 적절한 회피행동을 유도하기 위한 것으로, 정보제공의 효과를 분석하기 위해서는 정보를 제공하지 않을 때와 대비하여 주행행태를 비교·분석하는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 운전자에게 특정 C-ITS 서비스 제공 조건을 만족하여도 차량에 설치된 HMI 디스플레이를 통해 어떠한 정보도 제공되지 않은 상태에서 수집된 개별차량 데이터(사전데이터)와 디스플레이에 해당 정보가 표출된 상태에서 수집된 데이터(사후데이터)를 수집하여 분석에 활용하였다. 서비스 제공 조건이 충족된 상태라면 사전데이터와 사후데이터 구분없이 서비스 제공에 대한 로그가 PVD에 기록된다.

1. 순응도

운전자 순응도는 C-ITS 서비스를 통해서 개선된 주행행태를 정량적으로 평가하기 위한 지표 중 하나로 서울시 C-ITS 서비스를 대상으로 서비스 구현방안에서 제시된 각종 경고 및 주의 서비스에 대해서 운전자가 순응하였는지를 판단하고자 한다. 순응도 분석은 사전데이터와 사후데이터와 관계없이 <Fig. 2>에서 보여지듯이 정보표출 시점을 기준으로 전과 후의 속도 분포를 통계적으로 비교분석하여 순응 여부를 판단하게 된다.



<Fig. 2> Analysis Sample Extraction

사전/사후 비교분석은 서비스 정보표출 시점 전과 후의 속도 분포를 비교하여 서비스 제공 전과 후의 속도 분포가 상이하고 서비스 제공 후의 속도 평균값이 낮을 시 운전자가 감속을 통해 순응한 것으로 판단한다. 사전/사후 분석에서 속도 분포 비교 시 활용한 통계기법은 대표적인 모수적 분석 기법인 two sample t-test를 이용하였고 통계 검증을 위한 귀무가설과 연구가설은 다음과 같다.

- 귀무가설(H₀): 서비스 전 속도 평균값이 서비스 후 속도 평균값보다 작거나 같다
- 연구가설(H_a): 서비스 전 속도 평균값이 서비스 후 속도 평균값보다 크다

즉, 서비스 제공 시점 전·후 각 t초 동안의 표본 추출 후 t-test 검정을 수행하여 귀무가설을 기각하게 될 경우 해당 운전자는 주어진 서비스에 순응한 것으로 간주한다(유의수준 $\alpha=0.05$). 순응도 분석은 통계적 검정을 사전데이터와 사후데이터 별로 수행한 후 그 결과를 비교한다.

2. 주행안전성

C-ITS 서비스는 운전자에게 사전에 전방 상황에 대한 정보를 제공함으로써 운전자가 위험 구간을 안전하게 통과할 수 있도록 유도함과 동시에 교통류에 악영향을 최소화함으로써 교통류의 안전성을 개선하는데 그 목적이 있다. 이러한 주행안전성 증진 효과를 정량적으로 평가하기 위해서 다양한 C-ITS 서비스 경고정보 제공 유무에 따른 주행안전성 변화를 파악할 수 있는 지표선정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다양한 지표 중 주체차량의 거동변화를 측정하는 가속소음과 Jerk를 주행안전성의 지표로 선정하였다.

가속소음은 가속도의 표준편차로써 도로주행시 안전성을 측정할 수 있는 주행특성을 반영한 지표이며 개별차량의 가속소음의 변화는 교통류 안전성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Oh et al., 2009; Ko et al., 2012). 본 연구에서의 가속소음은 C-ITS 차량단말기를 장착한 차량이 전방 위험상황에 대한 정보를 제공받은 지점을 통과한 후, 위험상황이 해제된 지점을 통과할 때까지의 가속도의 표준편차로 정의하며 Eq.1과 같이 계산한다.

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

여기서,

T : 수집시간

a_t : t번째 차량 가속도(m/sec²)

n : 수집시간 T동안 차량 가속도의 개수

Eq.1에서 알 수 있듯이 운전자가 정속 주행 시 가속소음 값은 0이 되며 주행 중 가감속 행태가 빈번할수록 가속소음 값은 증가한다. 도로의 밀도의 정도에 따라 이렇게 증가한 가속소음은 주변 교통류에 전파될 수 있으며 그 결과 주행안전성을 저하시킬 수 있다.

주행안전성을 평가하기 위한 지표 중 본 연구에서는 Jerk를 추가로 고려하였다. Jerk는 가속도의 단위시간당 변화량으로 Jolt, Surge, Lurch 등의 다양한 이름으로 명명되며 운전자 안락감 (Driving Comfort)을 평가할 수 있는 지표라는 점에서 가속소음과 유사하지만, 가감속행태에 더 민감하기 때문에 후미추돌 개연성을 평가하기 위한 대체 지표로(Park et al., 2018) 활용되고 있다는 점에서 차별된다. 운전자는 가속도의 변화에 따라 가속 시 뒤로 쏠리는 현상, 감속 시 앞으로 쏠리는 현상을 경험하게 되고 운전자의 승차감 및 주행안정성이 저하되곤 하는데 일반적으로 Jerk 값의 변화가 클수록 운전자의 승차감 또는 승차의 안락감이 감소하게 된다. 교통안전 분야에서 Jerk 값이 클 경우 주변 차량과의 후미추돌 가능성이 증가하여 2차 사고의 가능성이 있으며, 교통류 안전성에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 대표적으로 Bagdadi and Várhelyi(2013)는 주행안전성을 검지하는 지표로써 Jerk를 활용한 P2P Jerk값을 제시하였다.

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{d^3r}{dt^3} \quad (2)$$

여기서,

j : 가가속도(m/sec³)

a : 가속도(m/sec²)

r : 거리(m)

t : 시간(sec)

본 연구에서는 사전/사후 효과분석 시 C-ITS 서비스별 정보제공 유무에 따른 P2P Jerk 값을 산출하여 운전자의 승차감과 주행안전성을 비교·분석하고자 한다.

IV. 분석 지역 및 데이터

본 연구의 대상 지역은 2021년에 준공 완료된 서울시 C-ITS 실증사업 대상 구간이다. 실증사업의 주요 사업내용은 중앙버스차로 구간에 C-ITS 서비스 구축, 차량시스템 및 C-ITS 인프라 설치, 센터시스템 추가 도입 및 응용 소프트웨어 개발이다. 해당 사업은 3단계에 걸쳐서 진행되었으며 단계별 사업구간의 총 연장은 121.4km이다.

분석데이터는 단말기를 장착한 차량으로부터 C-ITS 서비스 제공기록과 차량운행상태가 기록된 PVD로 차량ID, 차량의 위치정보, 속도, 가속도를 포함해 총 54개의 정보가 기록되어 있다. C-ITS 실증사업을 통해서

차량단말기가 장착된 차량은 버스 1,600대와 택시 100대이며, 동일한 차량에 영상기반 ADAS 역시 설치하였다. 언급하였듯이 PVD는 사전데이터와 사후데이터로 나뉘어 수집되며 두 데이터 셋은 기본적으로 동일한 정보를 포함하고 있다. <Table 1>은 사전/사후데이터 수집시기, 수집차량대수에 대한 개요를 보여주고 있다.

<Table 1> 'Before' and 'After' PVD Data Collection Details

	PVD	
	'Before'	'After'
Duration	2021.02.08 ~ 2021.02.28 2021.04.14 ~ 2021.06.30	2021.03.19. ~ 2021.07.31. 2021.10.01. ~ 2021.10.31.
Total # of days	99days (21days+78days)	166days (135days+31days)
Total # of vehs	1,602 vehs (As of Feb., 2021)	1601 vehs (As of Oct., 2021)

<Table 1>에서 수집 차량 대수는 버스와 택시를 포함하고 있으며 유휴차량으로 인해 총 차량대수 대비 수집 차량 대수는 차이가 있을 수 있다. 사전데이터의 경우 시스템 점검 및 안정화 기간에 수집된 데이터인 만큼 수집 기간 초기에 데이터의 경우 분석에 활용하지 않았다. 사후데이터 역시 같은 이유로 수집 기간 초기에 수집된 데이터 일부는 분석에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 사전데이터의 경우 2021년 5월과 6월을, 사후데이터의 경우 2021년 5월~7월, 10월을 분석 기간으로 정의하였다.²⁾

서울시 C-ITS 실증사업을 통해 제공되는 C-ITS 서비스는 총 34개 서비스이며 이 중 안전운행서비스(차량 추돌방지지원, 차선이탈경고, 위험구간알림경고, 교차로충돌사고예방지원, 무단횡단보행자접근알림, 터널사고정보제공), 교통관리 서비스(신호알림 및 경고), 도로관리 서비스(포트홀경고), 버스 관리 서비스(추월차로 통과감지, 승강장혼잡알림, 정류장혼잡알림, 정류장 정차면안내)의 주요한 12개 서비스를 추려 승용도 및 주행안전성 분석을 수행하였다.

PVD의 경우 상대적으로 사전데이터가 사후데이터에 비해 수집 기간이 짧고, 사전데이터의 경우 다시 수집하기 어려운 한계가 존재한다. 따라서 부족한 PVD 사전데이터를 보완하기 위해 본 연구에서는 2019년에 7월부터 6개월 동안 수집된 DTG 데이터를 분석에 사용하였다. DTG 데이터는 차량ID, 차량타입, 차량번호, 운전자코드, 속도, RPM, 위치정보 등 21개 정보를 포함하고 있다. DTG 데이터의 수집 개요는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> DTG Data Collection Details

	DTG
Duration	2019.07.01 ~ 2019.12.31
Total # of days	184 days
Total # of vehs	990 vehs

PVD와 DTG 수집데이터에는 모두 일 단위로 차량 운행에 대한 다양한 정보가 포함되어 있다. 그 중 PVD와 DTG에 공통적으로 포함되어 있는 차량번호, 저장 시간, 속도, 가속도, 위도, 경도를 추출하여 분석에 활용하였으며, PVD에 국한하여 C-ITS 서비스 ID, 메시지 ID, 서비스 위치 코드 등 서비스 표출과 관련된 정보를 추가적으로 추출하여 분석에 활용하였다.

2) 시스템의 순차적 업데이트로 5월과 6월의 경우 사전데이터와 사후데이터가 동시에 수집된다. 즉 해당기간에는 사전데이터가 수집되는 차량과 사후데이터가 수집되는 차량이 구별된다.

V. 결 과

본 연구에서는 C-ITS 효과평가를 위해서 PVD 기반의 사전/사후 순응도 분석과 주행안전성 분석을 수행하였다. 앞서 언급하였듯이 순응도 및 주행안전성을 평가하기 위해서 C-ITS 서비스 제공 시점 전후의 속도 분포와 주행안전성 지표를 비교하게 된다. 본 연구에서는 서비스 제공 시점 전·후 각각 30초³⁾에 해당하는 데이터를 추출한다. 따라서 서비스 표출 시점을 포함해 61초의 데이터를 하나의 분석 단위로 하며 본 논문에서는 이를 ‘유효샘플’이라고 지칭한다. 하지만 다양한 서비스가 제공되는 C-ITS의 경우 61초 동안에 2개 이상의 서비스가 표출될 수 있으며, 이 경우 어떠한 서비스에 의해서 운전자의 운전행태가 바뀌었는지를 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 61초 동안에 단 하나의 서비스만 표출된 경우만을 유효샘플로 추출하여 분석에 활용하였다. <Table 3>은 12개 서울시 C-ITS 서비스에 대한 유효샘플 수 집계 결과를 보여준다.

서비스별 집계 결과 일부 서비스의 경우 사전데이터와 사후데이터에서 분석에 충분한 유효샘플이 수집되고 있지 않은 것을 알 수 있다. 예를 들어 정류장 주변에서 제공되는 ‘⑪정류장혼잡알림’, ‘⑫정류장정차면안내’ 서비스의 경우 사전 및 사후데이터에서 모두 유효샘플이 존재하지 않았으며 ‘⑤무단횡단보행자접근알림’, ‘⑥터널사고정보제공’, ‘⑧포트홀경고’, ‘⑨추월차로통과감지’ 서비스의 경우 타 서비스에 비해서 상대적으로 유효샘플수가 적은 것을 알 수 있다. 특히 서비스 제공위치가 제한적인 경우 또는 표출 우선순위가 타 서비스에 비해 낮은 경우에 유효샘플로 집계가 어려울 수 있는데, 정류장 주변에서 제공되는 서비스는 두가지 경우에 모두 해당되어 유효샘플이 집계되지 못하였다. 따라서 이들 서비스에 대한 순응도 및 주행안전성 분석 결과는 다른 서비스에 비해 분석 결과에 대한 신뢰성이 낮을 수 있다. 유효샘플수가 충분한 서비스의 경우 대부분 사전에 비해 사후데이터에서 더 많은 유효샘플이 수집된 것을 알 수 있는데 이는 수집기간과 데이터 수집기간동안의 서비스 제공 대상 차량수에 따른 결과로 해석된다. 서비스별 추출된 유효샘플에 대해 순응도 분석 방법론을 적용한 결과는 <Table 4>와 같다.

<Table 3> Number of Valid Samples for Analysis by Service

Service	‘Before’	‘After’
① Forward Collision Warning	136,067	249,679
② Lane Departure Warning	650,540	1,008,617
③ Hazard Section Warning	24,539	81,515
④ Intersection Collision Warning	3,247,377	13,497,573
⑤ Jaywalker Warning	4	360
⑥ Tunnel Collision Warning	1,064	1,910
⑦ Signal Change Warning	436,398	599,572
⑧ Pothole Warning	8	291
⑨ Overtaking Warning	7	201
⑩ Platform Congestion Warning	39,083	137,840
⑪ Bus Stop Congestion Warning	0	0
⑫ Bus Stop Location Information	0	0

□ 서비스는 유효샘플이 존재하지 않거나 분석에 충분하지 않은 유효샘플이 추출된 서비스⁴⁾

3) 서비스제공 전후 효과지표를 비교하기 위해서 적절한 표본추출 대상시간에 대한 기준이 필요하며 본 연구에서는 서울 C-ITS 확정설계서를 참고하여 기준을 마련하였다. 확정설계서에 따르면 서비스 표출시간은 최대 21초로 정의되어 있으며 서비스의 효과를 온전히 포함시키기 위해 추출시간을 30초로 설정하였다.

<Table 4> Results of Compliance Rate by Service

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([2]-[1])
① Forward Collision Warning	64%	82%	18%
② Lane Departure Warning	35%	44%	9%
③ Hazard Section Warning	40%	44%	4%
④ Intersection Collision Warning	31%	43%	12%
⑤ Jaywalker Warning	14%	17%	3%
⑥ Tunnel Collision Warning	33%	33%	0%
⑦ Signal Change Warning	37%	45%	7%
⑧ Pothole Warning	44%	34%	-11%
⑨ Overtaking Warning	50%	40%	-10%
⑩ Platform Congestion Warning	59%	61%	2%
⑪ Bus Stop Congestion Warning	N/A	N/A	N/A
⑫ Bus Stop Location Information	N/A	N/A	N/A

<Table 4>에서 사후데이터 기반 순응도가 사전데이터 기반 순응도보다 큰 경우는 양(+)의 값을 갖게 된다. 예를 들어 ‘①차량추돌방지’서비스의 경우 서비스가 실질적으로 제공되었을 때 순응도가 18% 증가되었음을 알 수 있다. 즉, 해당 서비스가 실질적으로 제공되었을 때 경고정보에 순응하여 감속운행한 운전자가 서비스 제공 전보다 18% 증가하였다고 해석할 수 있다. 12개 서비스에 대한 분석결과에 따르면 유효샘플이 충분히 확보된 모든 서비스(음영으로 표시되지 않은 서비스)에서 순응도의 차이는 0 또는 양수임을 알 수 있다. 더불어 ‘①차량추돌방지’ 서비스는 사전/사후 모두 타 서비스에 비해 순응률이 높은 것을 알 수 있는데, 이는 버스에 기 장착된 ADAS에서 제공되고 있는 전방추돌방지 서비스가 ‘①차량추돌방지’ 서비스와 유사하기 때문인 것으로 판단된다. 사전 또는 사후 유효샘플이 충분하지 않은 서비스의 경우 순응률의 차이가 음(-)의 값을 갖거나 그 효과가 미미한 것을 알 수 있다.

<Table 5>와 6은 동일한 유효샘플에 대해서 Jerk와 가속소음을 계산한 후 사전데이터와 사후데이터를 비교한 결과를 보여준다. 각 Table 마지막 열에 사전분석결과 대비 사후분석결과와의 증감비율을 계산하여 제시하였다. Jerk와 가속소음의 경우 값이 커질수록 주행안전성이 저하되는 것으로 해석될 수 있다.

<Table 5> Results of Jerk by Service

[unit : m/s³]

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([1]-[2])	([1]-[2]) / [1] (%)
① Forward Collision Warning	156	63	93	60% ▼
② Lane Departure Warning	58	48	10	17% ▼
③ Hazard Section Warning	69	37	32	46% ▼
④ Intersection Collision Warning	63	38	25	40% ▼
⑤ Jaywalker Warning	72	0	72	100% ▼
⑥ Tunnel Collision Warning	41	26	15	37% ▼
⑦ Signal Change Warning	66	34	33	49% ▼
⑧ Pothole Warning	62	0	62	100% ▼

4) ‘⑥터널사고정보제공’ 서비스의 경우 상대적으로 적은 유효샘플이 수집되는 서비스로 판단되지만 사전/사후 집계샘플이 유사하다는 측면에서 음영처리하지 않았음

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([1]-[2])	([1]-[2]) / [1] (%)
⑨ Overtaking Warning	69	40	29	42% ▼
⑩ Platform Congestion Warning	80	1	79	99% ▼
⑪ Bus Stop Congestion Warning	N/A	N/A	N/A	N/A
⑫ Bus Stop Location Information	N/A	N/A	N/A	N/A

<Table 6> Results of Acceleration Noise by Service

[unit : m/s²]

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([1]-[2])	([1]-[2]) / [1] (%)
① Forward Collision Warning	89	56	33	37% ▼
② Lane Departure Warning	41	41	0	No Change
③ Hazard Section Warning	40	33	7	17% ▼
④ Intersection Collision Warning	38	32	6	16% ▼
⑤ Jaywalker Warning	38	22	16	42% ▼
⑥ Tunnel Collision Warning	17	17	0	No Change
⑦ Signal Change Warning	43	36	7	16% ▼
⑧ Pothole Warning	33	28	6	17% ▼
⑨ Overtaking Warning	50	38	12	24% ▼
⑩ Platform Congestion Warning	46	37	9	19% ▼
⑪ Bus Stop Congestion Warning	N/A	N/A	N/A	N/A
⑫ Bus Stop Location Information	N/A	N/A	N/A	N/A

<Table 5>와 6에 따르면 유효샘플이 확보된 모든 서비스에서 주행안전성 지표는 전반적으로 개선된 것을 알 수 있다. 예를 들어 ‘①차량추돌방지’ 서비스가 제공되었을 때 Jerk의 경우 60%는 감소하였으며 가속소음의 경우 37%가 감소하였다. 서비스별 차이는 있지만 Jerk의 경우 17%~100%, 가속소음은 0%~42% 감소한 것을 알 수 있으며 결과적으로 C-ITS 서비스로 인해 주행안전성이 전반적으로 개선되었다고 판단된다. C-ITS로 인해 무엇보다 위험상황에 대한 사전대처가 가능하고 그 결과 급가속 또는 급감속 행태가 줄어들 것으로 기대된다. 하지만 주행안전성 지표별로 급가감속에 대한 민감도는 다소 차이가 있을 수 있다. 예를 들어 본 연구에서는 P2P Jerk 값, 즉 시간에 대한 가속도의 최대/최솟값의 차이를 계산하여 분석하기 때문에 일시적인 가속도의 변화에 대해서 가속소음에 비해 민감할 수 있다. 그 결과 <Table 5>와 <Table 6>에서 보여지듯이 지표별 사전 대비 사후 변화량은 Jerk값이 가속소음에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

PVD 기반 사전/사후 효과분석은 사전데이터와 사후데이터 모두가 수집되었을 경우 가능하나 시범사업이나 타 지자체 실증사업의 선례를 봤을 때 C-ITS 구축 후 사전데이터 수집은 제한적인 것이 사실이다. 서울시 C-ITS 실증사업의 경우도 사전데이터를 충분히 확보하기 위해 많은 협의를 거쳤으나 시스템이 안정화된 후 수집된 사전데이터는 3개월에 그친다. 따라서, 본 과업에서 PVD 기반의 사전/사후 효과분석을 보완하기 위해서 C-ITS 구축 이전인 2019년에 C-ITS 차량단말기 장착이 예정되어 있는 차량으로부터 DTG 데이터를 확보하여 주행안전성 지표를 비교분석을 수행하였다. DTG 데이터의 경우 C-ITS 구축 전에 수집된 데이터로 서비스 제공 시점을 알 수 없어 유효샘플 추출이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 동일한 차량에 대해서 DTG와 PVD 각각에 대해서 30초 데이터를 추출하여 주행안전성 지표의 평균값 비교하였으며 그 결과는 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Comparisons of Jerk and Acceleration Noise between DTG Data and PVD

	[1] DTG	[2] PVD	[3] [1]-[2]	[3] x100 / [1]	T-value	P-value
Jerk	15.39m/s ³	15.19m/s ³	0.20m/s ³	1.3% ▼	83	0
Accel. Noise	2.07m/s ²	0.96m/s ²	1.11m/s ²	53% ▼	671	0

각 지표별 평균값을 비교해보며 Jerk의 경우 1.3%, 가속소음의 경우 53%가 감소하였음을 알 수 있다. 즉, 2019년(C-ITS 서비스가 제공되기 전) 대비 C-ITS 서비스가 제공된 후 주행안전성이 개선되었다고 판단된다. 한 가지 특이한 사항은 PVD 기반의 사전/사후 분석 결과인 <Table 5>와 6을 비교했을 때 감소 비율이 다소 낮은 것을 알 수 있다. 이는 <Table 7>의 경우 차량별 전체 운행시간에 수집된 DTG 데이터와 PVD를 이용하여 분석을 수행한 반면 <Table 5>와 6의 경우 C-ITS 서비스 제공시점에 특정 샘플을 대상으로 분석했기 때문에 발생한 결과로 해석된다. 추가적으로 통계적 유의성을 검토하기 위해 t검정을 실시하였다. 그 결과 각 주행안전성 지표별 DTG 기반의 평균값이 PVD 기반의 평균값보다 크다는 대립가설을 채택할 수 있었으며 해당 결과는 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

4차 산업혁명에 따른 교통변화에 대해 대응하고 스마트 인프라를 선제적으로 구축하여 CV 및 자율주행 등 미래 교통산업 육성을 위해 정부 주도하에 지자체 C-ITS 실증사업을 추진하고 있다. C-ITS는 기존 ITS의 소통 위주의 교통정보 수집 및 제공방식에서 벗어나 양방향 정보연계 (V2V, V2I)를 통한 안전 위주의 교통정보 수집 및 제공에 초점이 맞추어져 있다. 본 연구에서는 서울 C-ITS 실증사업을 통해 제공되고 있는 다양한 전방 위험 상황에 대한 정보 제공 서비스에 대한 정량적 효과 분석방법론을 제시하고 PVD와 DTG 데이터를 활용하여 개별차량 데이터 기반의 서비스 효과분석을 실시하였다.

먼저, PVD 기반의 사전/사후 분석을 통해 유효샘플이 충분히 확보된 경우 서비스 제공 시 감속운행태를 보이는 운전자의 수가 그렇지 않았을 때보다 증가했음을 확인하였다. 더불어, Jerk와 가속소음을 기반으로 주행안전성 평가를 수행한 결과 서비스별 정도의 차이는 있지만 Jerk값은 서비스가 제공되었을 때 최대 100%, 가속소음은 최대 42% 감소하였다. 즉, 대다수의 안전서비스가 제공되었을 때 가속도의 편차가 줄어들어 주행안전성이 향상된 것을 알 수 있었다. 사업기간 중 사전데이터의 수집에 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 DTG 데이터를 사전데이터로 활용하여 동일한 분석을 실시하였으며, 그 결과 역시 PVD 기반 분석 결과와 유사함을 알 수 있었다. 순응도 분석과 주행안전성 분석결과를 토대로 C-ITS으로부터 제공하는 정보는 전방위험상황을 회피하기 위한 운전자의 감속을 유도하고 급가감속을 지양시키는데 효과가 있는 것으로 보인다.

지역별로 특화된 C-ITS 기반 서비스가 존재하지만 대부분의 안전서비스의 경우 동일한 서비스 구현 방법이 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 안전서비스에 대한 효과분석 방법론이 정립된다면 지역별 효과의 차이를 객관적으로 비교·평가할 수 있으며 중장기적으로 서비스의 품질을 관리하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한, C-ITS 서비스를 지속적으로 제공하기 위해서 운전자의 서비스 수용성에 대한 감시가 필요하며 본 연구에서 제시한 효과지표에 대한 지속적인 산출을 위한 모니터링 체계가 도움이 될 것으로 기대된다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 보완해야 할 몇 가지 한계점이 존재한다.

첫째, DTG 데이터와 PVD의 결과를 비교함에 있어 2년여의 시간적 간격이 존재하며 그 사이 도로환경 변화를 고려하지 못한 점은 향후 보완되어야 할 것이다. 둘째, 시스템 구축 후 제한된 시간 동안 수집된 PVD를 분석에 활용했다는 점 역시 본 연구에서 향후 보완되어야 할 것으로 보인다. 셋째, 본 연구에서 PVD 및 DTG 데이터를 기반으로 순응도와 주행안전성지표를 산출하여 C-ITS 효과분석을 실시하였으나 서비스별 특성 및 구현방식에 맞는 추가적인 지표개발 및 PVD의 활용이 필요할 것으로 판단된다. 끝으로, 서울시 뿐만 아니라 동일한 서비스를 제공하고 있는 타 지자체의 실증사업에서 수집된 데이터를 활용하여 동일한 분석을 실시한 후 그 결과를 비교하는 연구 또한 향후 진행할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 서울 C-ITS 실증사업을 통해 수집한 데이터를 활용하여, 국토교통부 자율주행기술개발혁신사업 연구개발과제 (RS-2022-00143579)의 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- Bagdadi, O. and Várhelyi, A.(2013), “Development of a method for detecting jerks in safety critical events”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 50, pp.83-91.
- Chang, X., Li, H., Qin, L., Rong, J., Lu, Y. and Chen, X.(2019), “Evaluation of cooperative systems on driver behavior in heavy fog condition based on a driving simulator”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 128, pp.197-205.
- Gu, Y. S., Go, J. E., Jang, J. Y. and Oh, C.(2021), “Analysis of the Effectiveness of Traffic Safety Information using ADAS Data”, *Korean Society of Transportation*, vol. 18, no. 5, pp.69-77.
- Guériau, M., Billot, R., El Faouzi, N. E., Monteil, J., Armetta, F. and Hassas, S.(2016), “How to assess the benefits of connected vehicles? A simulation framework for the design of cooperative traffic management strategies”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 67, pp.266-279.
- 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 & Prevention*, vol. 144, p.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, p.105972.
- Ko, H. G., Kim, J. H., Seong, M. J. and Lee, J. S.(2012), “Safe Driving Inducement Effect Analysis of Smart Delineator through Driving Simulation Evaluation”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 30, no. 4, pp.43-59.
- Ko, J. E., Jang, J. Y. and Oh, C.(2021b), “Assessing the Safety Benefits of In-Vehicle Warning Information by Vehicle Interaction Analysis in C-ITS Environments”, *Korean Society of Transportation*, vol. 39, no. 1, pp.1-13.
- Ko, J., Jang, J. and Oh, C.(2021a), “A multi-agent driving simulation approach for evaluating the

- safety benefits of connected vehicles”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 5, pp.4512-4524.
- Korea Transport Institute(2019), *Improving Legal Systems for Traffic Safety on Community Streets*, pp.1-194.
- Lee, J. S., Jung, S. J., Heo, J. S. and Lee, C. S.(2016), “A Study on Plans for Preventive Measures In Reducing Commercial Truck Crashes”, *Korean Society of Transportation*, vol. 13, no. 3, pp.43-50.
- Oh, D. U., Oh, C. and Jang, M. S.(2009), “Methodology for Evaluating Freeway Interchange Spacing for High Design Speed based on Traffic Safety: Focused on Analysis of Acceleration Noise using Microscopic Traffic Simulations”, *Korean Society of Transportation*, vol. 27, no. 5, pp.145-153.
- Park, J. W., Jang, J. Y. and Oh, C.(2018), “Analysis of Characteristics of Driver’s Intervention on Adaptive Cruise Control Systems and Driving Stability”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 36, no. 6, pp.480-492.
- Ryder, B., Gahr, B., Egolf, P., Dahlinger, A. and Wortmann, F.(2017), “Preventing traffic accidents with in-vehicle decision support systems-The impact of accident hotspot warnings on driver behaviour”, *Decision Support Systems*, vol. 99, pp.64-74.
- Saldivar-Carranza, E. D., Mathew, J. K., Li, H., Hunter, M., Platte, T. and Bullock, D. M.(2021), “Using Connected Vehicle Data to Evaluate Traffic Signal Performance and Driver Behavior after Changing Left-Turns Phasing”, *In 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference(ITSC)*, pp.4028-4034.
- Uhlemann, E.(2015), “Introducing connected vehicles [connected vehicles]”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 10, no. 1, pp.23-31.
- Xie, K., Yang, D., Ozbay, K. and Yang, H.(2019), “Use of real-world connected vehicle data in identifying high-risk locations based on a new surrogate safety measure”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 125, pp.311-319.
- Zhang, X., Wang, X., Bao, Y. and Zhu, X.(2022), “Safety assessment of trucks based on GPS and in-vehicle monitoring data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 168, p.106619.
- Zhao, X., Xu, W., Ma, J., Li, H., Chen, Y. and Rong, J.(2019), “Effects of connected vehicle-based variable speed limit under different foggy conditions based on simulated driving”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 128, pp.206-216.
- Ziakopoulos, A., Theofilatos, A., Papadimitriou, E. and Yannis, G.(2019), “A meta-analysis of the impacts of operating in-vehicle information systems on road safety”, *IATSS Research*, vol. 43, no. 3, pp.185-194.