

PVD를 활용한 C-ITS 차량 내 경고정보 제공에 따른 주행 및 환경영향 분석

Analysis of Driving and Environmental Impacts by Providing Warning Information in C-ITS Vehicles Using PVD

김윤미* · 김호선** · 강경표*** · 김승범****

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

Yoonmi 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. 22 No.5(2023)
 October, 2023
 pp.224~239

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.5.224>

요 약

C-ITS(Cooperative-Intelligent Transportation System)는 차량과 차량 또는 차량과 인프라 간의 양방향 무선통신 기술을 기반으로 전방의 교통상황 정보를 제공하는 이용자 안전중심의 기술 및 시스템을 의미한다. 2016년 대전-세종 시범사업을 시작으로 고속도로 및 지자체 실증사업을 통해 통신 인프라 구축, 단말기 보급, C-ITS 안전 서비스를 제공하고 있다. 본 연구에서는 광주광역시 C-ITS 실증사업을 통해 수집된 개별차량 데이터를 활용하여 경고 정보의 개별적인 효과를 검증하기 위한 방법론을 개발하였다. 효과분석은 크게 주행영향 분석과 환경분석으로 나뉘며 주행영향 분석을 위해 순응도 분석과 주행안전성 평가를 수행하였다. 추가로 C-ITS 실증사업 기간동안 수집되었던 PVD (Probe Vehicle Data)의 부족한 데이터 수집을 보완하고자 DTG (Digital Tacho Graph) 데이터를 추가 수집하여 효과분석에 활용하였다. 순응도 분석결과 충분한 유효샘플이 수집된 경고정보에 대해 운전자는 감속운행태를 보였으며, Jerk와 가속 소음과 같은 주행안전성 지표를 산출하여 분석한 결과 경고정보 제공으로 인해 주행안전성이 개선되었다. 반면 감속운행태로 C-ITS 구축 이후 배출가스 양은 소폭 증가한 것을 알 수 있었다.

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

ABSTRACT

C-ITS (Cooperative-Intelligent Transportation System) refers to user safety-oriented technology and systems that provide forward traffic situation information based on a two-way wireless communication technology between vehicles or between vehicles and infrastructure. Since the

Received 12 October 2023
 Revised 23 October 2023
 Accepted 24 October 2023

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

Daejeon-Sejong pilot project in 2016, the C-ITS infrastructure has been installed at various locations to provide C-ITS safety services through highway and local government demonstration projects. In this study, a methodology was developed to verify the effectiveness of the warning information using individual vehicle data collected through the Gwangju Metropolitan City C-ITS demonstration project. The analysis of the effectiveness was largely divided into driving behavior impact analysis and environmental analysis. Compliance analysis and driving safety evaluation were performed for the driving impact analysis. In addition, to supplement the inadequate collection of Probe Vehicle Data (PVD) collected during the C-ITS demonstration project, Digital Tacho Graph (DTG) data was additionally collected and used for effect analysis. The results of the compliance analysis showed that drivers displayed reduced driving behavior in response to warning information based on a sufficient number of valid samples. Also, the results of calculating and analyzing driving safety indicators, such as jerk and acceleration noise, revealed that driving safety was improved due to the provision of warning information.

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 감소추세를 보이고 있지만, 2021년 기준 교차로와 횡단보도 주변에서 발생한 교통사고는 약 10만건으로 전체 교통사고의 49%를 차지하였으며, 사망자 수는 995명으로 전체의 34.1%를 차지하고 있다(Korea Transport Safety Authority, 2023). 이에 따라 연속류에서의 사고 예방뿐만 아니라 단속류에서의 교통사고 예방을 위한 시스템을 구축이 필요하다.

2000년대부터 미국과 유럽, 일본 등에서는 통신기술과 교통 안전정보 제공을 위한 시스템 개발을 실시하였으며 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 정부는 2013년 차세대 ITS 활성화 추진계획을 수립하고 지자체 C-ITS 실증사업을 추진하였다. 2014년 대전-세종 C-ITS 시범사업을 시작으로 서울시(2018~2021)와 제주시(2018~2020), 울산시(2019~2021), 광주시(2019~2021), 고속도로(2018~2019) 중 수도권 일부 구간 등에서 C-ITS 실증사업을 수행하였다. 광주시는 실증사업을 통해 대중교통버스 중심의 C-ITS 구축 및 자율 협력 주행의 기반 조성을 추진하였으며, 제공된 차내 경고정보는 총 24개로 차량 충돌 방지지원, 교차로 충돌사고 예방 지원 등과 같은 안전 운행 정보, 사고 잠재구간 모니터링 및 돌발대응, AI 스마트 교차로 신호제어 등과 같은 교통서비스 정보, 도로 작업구간 주행 알람 서비스, 통합주차정보제공 등과 같은 도로서비스 정보 등이 C-ITS 단말기를 장착한 차량의 운전자에게 실시간으로 제공되고 있다. 모든 서비스는 차량의 위치정보를 기반으로 구현방안이 마련되어 있으며 위치정보를 포함해 다양한 차내 정보 및 서비스 로그는 PVD(Probe Vehicle Data) 형태로 저장된다.

본 연구에서는 광주시 C-ITS 기반 PVD를 활용하여 C-ITS 경고정보를 제공받은 운전자에 대해 실제 경고

정보제공 시점을 기준으로 서비스에 대한 운전자의 순응도, 주행안전성 개선효과, 환경성 분석을 수행하고자 한다. 순응도 분석을 위해서 경고정보제공 시점을 기준으로 속도의 분포를 서비스 제공 전과 후를 비교분석 하였으며, 주행안전성 개선효과는 주체 차량의 거동 변화를 측정할 수 있는 가속소음 (Acceleration Noise, AN), Jerk와 같은 대표적인 주행안전성 지표를 산출하였다. 끝으로 환경성 분석은 서비스 제공 전·후 오염물질(CO, VOC, NOx) 배출량을 산출하여 비교분석 하였다.

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, 주행안전성, 환경성 지표를 산출하기 위한 방법론에 대해 제시하였다. 4장에서는 분석에 활용한 데이터와 분석 대상 지역에 대해 제시하였으며, 5장에서는 제공된 경고정보별 순응도 및 주행안전성 개선효과와 환경성 분석 결과를 제시하였다. 마지막 장에서는 본 연구 결과를 요약하여 결론 및 향후 연구 계획에 대해 서술하였다.

II. 선행연구 고찰

본 연구는 광주시 C-ITS 환경에서 제공되는 V2X 기반 경고정보 제공에 따른 효과를 운전자의 순응도, 주행안전성, 환경성 분석을 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)은 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 사고위험도를 활용하였다. 분석결과 경고정보 제공 시 주행속도와 TET 및 제한속도 초과 비율은 감소하고 TTC는 증가

하였으며, 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 경고 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. 순응도 분석을 위해 C-ITS 환경에서 제공되는 각종 경고 및 주의 정보제공 시점을 기준으로 전과 후의 속도분포를 통계적으로 분석하여 개선된 주행행태를 정량적으로 평가하였다. 또한, 선행연구와 마찬가지로 경고정보 제공 전과 후의 주행행태를 비교분석했다는 점에서는 동일하

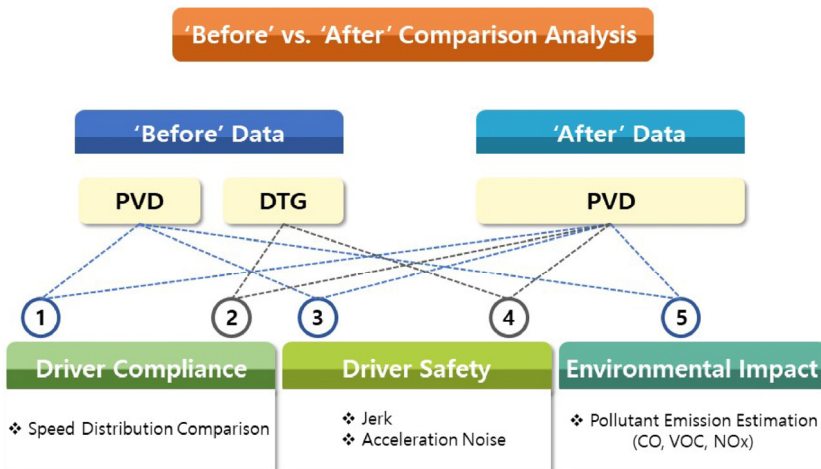
1) Jerk의 최댓값과 최소값이 차이

지만, 선행연구의 한계점으로 언급된 부족한 사전데이터를 보완하기 위해 PVD뿐만 아니라 DTG 데이터를 활용하였다는 점에서 차별성을 가진다. 끝으로 본 연구에서는 국내 실증사업 중 유일하게 환경성 분석을 실시하였다. C-ITS 서비스에 주된 목표가 소통보다는 주행안전성 향상에 초점을 맞추고 있는 만큼 C-ITS 도입으로 인한 환경적 영향분석이 필요하다.

Ⅲ. 연구방법론

본 연구에서는 광주시 C-ITS 실증사업을 통해 구축되는 C-ITS 서비스에 대한 효과를 분석할 수 있는 평가 방법론을 제시하고 현장 데이터를 기반으로 효과를 정량화하는데 목적이 있다. 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.

효과분석은 크게 서비스 제공 전·후 분석은 순응도 분석, 주행안전성 분석, 환경성 분석으로 나뉘며 PVD를 기반으로 서비스별 사전·사후 데이터 비교분석을 수행한다. 다만 PVD 사전데이터의 경우 수집기간이 충분치 않을 경우 분석이 제한 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실증사업 이전에 수집된 DTG 데이터를 사전 데이터로 가정하여 PVD 사후데이터와 비교분석을 추가적으로 실시하였다. <Fig. 1>은 효과분석 방법론에 대한 개요를 보여주고 있다.

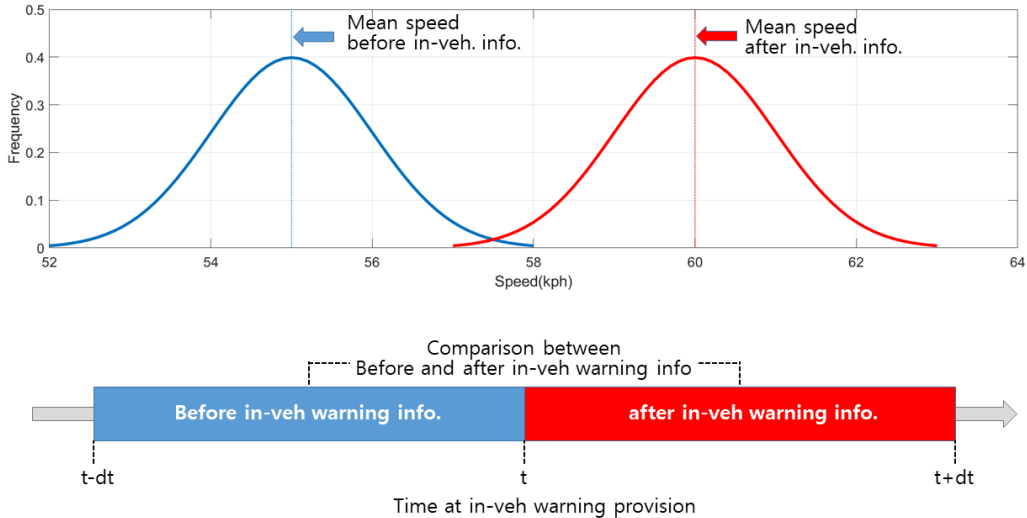


<Fig. 1> Methodology of C-ITS Evaluation

1. 순응도

운전자 순응도는 C-ITS 서비스를 통해서 개선된 주행행태를 정량적으로 평가하기 위한 지표 중 하나로 광

주시 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 식 (1)과 같이 계산한다.

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

여기서,

- T : 수집시간
- a_t : t번째 차량 가속도(m/sec²)
- \bar{a} : 평균 차량 가속도(m/sec²)
- n : 수집시간 T동안 차량 가속도의 개수

식(1)에서 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.

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

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 식(2)에 따라 산출하여 운전자의 승차감과 주행안전성을 비교·분석하고자 한다.

3. 환경성분석

교통환경 효과평가에 운전자의 주행특성 및 C-ITS 서비스를 반영하기 위해 적절한 교통 환경성 지표를 선

정해야 하며, 이를 활용 및 개발하여 C-ITS 효과 측정방안을 마련해야 한다. 대기오염물질 배출량은 C-ITS 서비스 적용 시 변화하는 교통시스템의 환경성을 평가하기 위해 활용될 수 있는 지표이다. 본 연구에서는 기 수집된 미시적 차량 궤적 데이터(예: PVD 또는 DTG)를 활용해 주어진 도로구간에서의 평균 통행속도를 추정하고 CAPSS모형을 활용하여 대기오염물질을 추정하는 방법론을 활용한다.

환경부와 국립환경과학원이 운영하는 도로이동오염원 배출량 분석모형으로 총 7개의 대기오염물질, 8개 차종, 배출유형을 고려하여 배출량을 산정하며 본 연구에서는 그 중 주요 오염물질인 CO, VOC, NOx 에 대해서 배출량을 산정하였다. 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람에 따르면 도로이동오염원 배출량은 식(3)으로 추정한다.

$$F = k \times d \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

- F : Yearly average pollutant emissions
- k : Emission factor
- d : Yearly average travel distance

여기서 차량의 연평균 총 주행거리 d 는 도로별 평균 주행거리를 말하며 식(4)를 따른다.

$$d = d_{daily\ average} \times n \times 365 \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

- $d_{daily\ average}$: Daily average travel distance
- n : number of vehicles

배출계수의 경우 도로이동오염원의 주행속도에 따라 오염물질별 배출량이 상이하며 본 연구에서는 대부분의 C-ITS 단말기 장착 차량이 버스를 감안해 CNG 시내버스 오염물질별 배출계수 산정식을 따른다 (Table 1 참조).

<Table 1> CNG Bus emission factor

Mode Type	Fuel Type	Material	Model year	Emission Factor k	
Bus	Urban	CNG	CO	after 2014	0.935
			VOC	after 2014	$0.0004 \times V^2 - 0.0563 \times V + 2.4117$
			NOx	after 2014	$0.0003 \times V^2 - 0.041 \times V + 1.4756$

IV. 분석 지역 및 데이터

본 연구의 대상 지역은 2021년에 준공 완료된 광주시 C-ITS 실증사업 대상 구간이다. 실증사업의 주요 사업내용은 일반버스 노선구간에 C-ITS 서비스 구축, 차량시스템 및 C-ITS 인프라 설치, 센터시스템 추가 도입 및 응용 소프트웨어 개발이다. 3단계(2019년, 2020년, 2021년)로 진행된 해당 사업을 통해 광주광역시 시내·외 30개 주요버스노선 총 183.4km 구간에 걸쳐 79개의 RSU가 설치(평균 2.4km/기)되었으며 시내버스, 택시,

교통약자/긴급차량을 대상으로 2,000여대의 단말기가 보급되었다.

분석데이터는 단말기를 장착한 차량으로부터 C-ITS 서비스 제공기록과 차량운행상태가 기록된 PVD로 차량ID, 차량의 위치정보, 속도, 가속도를 포함해 총 90개의 정보가 기록되어 있다. 언급하였듯이 PVD는 사전 데이터와 사후데이터로 나뉘어 수집되며 두 데이터 셋은 기본적으로 동일한 정보를 포함하고 있다. <Table 2>는 사전·사후 데이터 수집시기, 수집차량대수에 대한 개요를 보여주고 있다. 참고로 <Table 2>에서 유희차량으로 인해 사전·사후데이터 간 차량 대수는 차이가 존재한다.

<Table 2> 'Before' and 'After' PVD Data Collection Details

	PVD	
	'Before'	'After'
Duration	2021.11.13 ~ 2021.12.12	2021.12.17.~2021.12.18. 2022.01.01.~2022.01.07. 2022.01.25.~2022.02.12. 2022.02.14.~2022.02.23.
Total # of days	30 days	39 days
Total # of vehs	1,609 vehs	1,692 vehs

광주시 C-ITS 실증사업을 통해 제공되는 C-ITS 서비스는 교통안전(10개), 교통관리(7개), 도로관리(7개) 등 총 24개 서비스이며 이 중 도로 위험구간정보 제공, 도로작업구간 주행 알림, 교차로 신호위반 위험경고 알림, 차량 추돌방지 지원, 보행자 충돌방지 지원, 교통약자 전용차량 승하차 알림, 스쿨존 속도제어 및 보행자 진입 안내와 같은 주요한 7개 서비스²⁾를 추려 운용도 및 주행안전성 분석을 수행하였다.

PVD의 경우 상대적으로 사전데이터가 사후데이터에 비해 수집 기간이 짧고, 시스템이 구축된 이후 사전 데이터 수집이 어렵다. 따라서 부족한 PVD 사전데이터를 보완하기 위해 본 연구에서는 2020년 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 3>과 같다.

<Table 3> DTG Data Collection Details

	DTG
Duration	2020.07.01 ~ 2020.12.31
Total # of days	184 days
Total # of vehs	1,708 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) 본 연구에서는 24개 서비스 중 실질적인 주행행태 변화를 요구하는 주요한 '교통안전' 서비스와 '도로관리' 서비스 중 분석 유효샘플 취득이 용이한 7개의 서비스를 추려 분석대상 서비스로 선정하였다.

V. 결 과

본 연구에서는 C-ITS 효과평가를 위해서 PVD 기반의 사전·사후 순응도 분석, 주행안전성 분석, 환경성 분석을 수행하였다. 앞서 언급하였듯이 순응도 및 주행안전성을 평가하기 위해서 C-ITS 서비스 제공 시점 전·후의 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 4>는 7개 광주시 C-ITS 서비스에 대한 유효샘플 수 집계 결과를 보여준다.

<Table 4> Number of Valid Samples for Analysis by Service

Service	‘Before’	‘After’
① Hazard Section Warning	10,828	23,794
② Road work Section Notification	161	1,842
③ Intersection Collision Warning	34,840	30,777
④ Forward Collision Warning	855	1,121
⑤ Jaywalker Warning	8,947	38,817
⑥ Notification for the transportation disadvantaged	13	38
⑦ School Zone Speed Control Notification	239,900	1,330,340

 Services for which sufficient samples were not collected

서비스별 집계 결과 일부 서비스의 경우 사전데이터와 사후데이터에서 분석에 충분한 유효샘플이 수집되고 있지 않은 것을 알 수 있다. 예를 들어 ‘②도로작업구간 주행 알림’의 경우 다른 서비스 대비 사전 및 사후데이터에서 모두 유효샘플이 수가 적은 것을 알 수 있는데 이는 해당 서비스가 제공되는 차량이 일반버스가 아닌 특수차량이기 때문이다. 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 5>와 같다.

<Table 5> Results of Compliance Rate by Service

Service	[1] ‘Before’	[2] ‘After’	Difference ([2]-[1])
① Hazard Section Warning	21%	29%	8%
② Road work Section Notification	2%	59%	57%
③ Intersection Collision Warning	48%	59%	11%
④ Forward Collision Warning	36%	55%	19%

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

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([2]-[1])
⑤ Jaywalker Warning	33%	39%	6%
⑥ Notification for the transportation disadvantaged	38%	55%	17%
⑦ School Zone Speed Control Notification	35%	40%	5%

Services for which sufficient samples were not collected

<Table 5>에서 사후데이터 기반 순응도가 사전데이터 기반 순응도보다 큰 경우는 양(+)의 값을 갖게 된다. 예를 들어 ‘④차량추돌방지’서비스의 경우 서비스가 실질적으로 제공되었을 때 순응도가 19% 증가되었음을 알 수 있다. 즉, 해당 서비스가 실질적으로 제공되었을 때 경고정보에 순응하여 감속운행한 운전자가 서비스 제공 전보다 19% 증가하였다고 해석할 수 있다. 7개 서비스에 대한 분석결과에 따르면 유효샘플이 충분히 확보된 모든 서비스(음영으로 표시되지 않은 서비스)에서 순응도의 차이는 양수임을 알 수 있다. 가장 높은 순응도의 차이를 보인 서비스는 ‘②도로작업구간 주행 알림’ 서비스로 절반 이상의 운전자가 해당 서비스가 제공되었을 때 감속운행 한 것으로 보인다. 다만 이 경우 사전데이터의 유효샘플 수가 사후데이터의 샘플 수보다 현저하게 적어 추가적인 분석이 필요해 보인다. 2번째로 높은 순응도의 차이를 보인 서비스는 ‘④차량 추돌방지 지원’ 서비스로 해당 서비스는 다른 지자체에서 수행한 효과분석의 순응도와 유사한 수치를 보였다 (Kim et al., 2022).

<Table 6>과 7은 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 해석할 수 있다.

<Table 6> Results of Jerk by Service

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([1]-[2])	([1]-[2])x100/[1]
① Hazard Section Warning	114m/s ³	68m/s ³	46m/s ³	41% △
② Road work Section Notification	94m/s ³	65m/s ³	29m/s ³	31% △
③ Intersection Collision Warning	116m/s ³	53m/s ³	63m/s ³	54% △
④ Forward Collision Warning	231m/s ³	49m/s ³	182m/s ³	79% △
⑤ Jaywalker Warning	120m/s ³	56m/s ³	65m/s ³	54% △
⑥ Notification for the transportation disadvantaged	135m/s ³	74m/s ³	60m/s ³	45% △
⑦ School Zone Speed Control Notification	113m/s ³	56m/s ³	57m/s ³	51% △

<Table 7> Results of Acceleration Noise by Service

Service	[1] 'Before'	[2] 'After'	Difference ([1]-[2])	([1]-[2])x100/[1]
① Hazard Section Warning	49m/s ²	46m/s ²	3m/s ²	6% △
② Road work Section Notification	43m/s ²	50m/s ²	-7m/s ²	16% ▼
③ Intersection Collision Warning	61m/s ²	52m/s ²	9m/s ²	14% △
④ Forward Collision Warning	86m/s ²	51m/s ²	35m/s ²	40% △
⑤ Jaywalker Warning	59m/s ²	56m/s ²	3m/s ²	6% △
⑥ Notification for the transportation disadvantaged	63m/s ²	54m/s ²	9m/s ²	15% △
⑦ School Zone Speed Control Notification	52m/s ²	48m/s ²	4m/s ²	8% △

<Table 6>과 7에 따르면 유효샘플이 확보된 모든 서비스에서 주행안전성 지표는 전반적으로 개선된 것을 알 수 있다. 예를 들어 ‘④차량추돌방지’ 서비스가 제공되었을 때 Jerk의 경우 79%는 감소하였으며 가속소음의 경우 40%가 감소하였다. ‘②도로작업구간 주행 알림’ 서비스의 경우 서비스 제공이후 가속소음이 증가된 것을 알 수 있는데 앞서서도 언급한 바와 같이 사전데이터와 사후데이터간의 유효샘플의 차이에 기인한 것으로 보인다. 해당 서비스에 대해서는 추가적인 데이터 수집을 통한 효과분석이 필요해 보인다. 서비스별 차이는 있지만 Jerk의 경우 31%~79%, 가속소음은 6%~40% 감소한 것을 알 수 있으며 결과적으로 C-ITS 서비스로 인해 주행안전성이 전반적으로 개선되었다고 판단된다. C-ITS로 인해 무엇보다 위험상황에 대한 사전 대처가 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 6>과 <Table 7>에서 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. 광주시 C-ITS 실증사업의 경우도 사전데이터를 충분히 확보하기 위해 많은 협의를 거쳤으나 시스템이 안정화된 후 수집된 사전데이터는 1개월에 그친다. 따라서, 본 과업에서 PVD 기반의 사전·사후 효과분석을 보완하기 위해서 C-ITS 구축 이전인 2020년에 C-ITS 차량단말기 장착이 예정되어 있는 차량으로부터 DTG 데이터를 확보하여 주행안전성 지표를 비교분석을 수행하였다(DTG/PVD 사전·사후분석). 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 30초 평균값 비교하였으며 그 결과는 <Table 8>과 같다.

<Table 8> 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	12.78m/s ³	11.74m/s ³	1.0m/s ³	8.1%	274.4	0
Accel. Noise	4.72m/s ²	3.54m/s ²	1.2m/s ²	25.1%	1091.8	0

각 지표별 평균값을 비교해보며 Jerk의 경우 8.1%, 가속소음의 경우 25.1%가 감소하였음을 알 수 있다. 즉, 2020년(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 6>과 7을 비교했을 때 감소 비율이 다소 낮은 것을 알 수 있다. 이는 <Table 8>의 경우 차량별 전체 운행시간에 수집된 DTG 데이터와 PVD를 이용하여 분석을 수행한 반면 <Table 6>과 7의 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.

본 연구에서는 C-ITS 지자체 실증사업 중 유일하게 환경성 분석을 실시하였다. 환경성 분석은 PVD 데이터를 기반으로 수행하였으며 서비스 제공에 따른 정보표출로 인해 차량에서 배출되는 오염물질(CO, VOC, NOx)의 변화를 비교하였다. <Table 9>는 PVD 기반 사전·사후데이터 분석 결과를 보여준다.

<Table 9> Comparisons of Emission between 'Before(PVD)' and 'After(PVD)'

Material	[1] 'Before' from PVD	[2] 'After' from PVD	[3] [1]-[2]	[3]x100/[1]
CO	6.07g/km	6.62g/km	-0.54g/km	9.0%▼
VOC	2.83g/km	3.01g/km	-0.17g/km	6.1%▼
NOx	84.70g/km	90.15g/km	-5.45g/km	6.4%▼

<Table 9>에서 주요 오염물질 배출량이 C-ITS 서비스 제공 이후 전반적으로 증가한 것을 알 수 있다. 일반적으로 낮은 속도구간에서는 속도와 오염물질 배출량은 반비례관계(Bokare and Maurya, 2013)에 있으며, 특히 시속 60kph미만에서 오염물질의 배출량의 변화는 속도의 변화에 비해 증가한다. 따라서 순응도 분석에서 C-ITS 구축 이후 감속운행패턴이 증가하였다는 분석결과와 연계해 볼 때, 사후데이터에서 오염물질 배출량이 높게 나올 수 있음을 유추할 수 있다. 즉, <Table 9>에 따르면 C-ITS 제공이 환경적 측면에서 반드시 긍정적인 효과를 가져온다고 보기는 어렵다.

앞서 주행안전성 분석에서 소개한 바와 같이 DTG 데이터를 사전데이터로 가정하여 환경성 분석에 추가할 수 있다. 하지만 DTG 데이터의 경우 2020년 7월부터 12월까지 수집된 데이터로 차량으로부터 배출되는 오염물질의 계절별 차이가 있을 수 있고 2020년 이후 지속적인 친환경버스 도입, 연식변경 등 여러 분석환경 변화로 2021년 말에 수집된 PVD 데이터와 직접 비교가 어려웠다.

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-ITS로부터 제공되는 서비스의 핵심은 전방의 위험 상황에 대한 정보를 실시간으로 운전자에게 제공하고 사고를 미연에 방지하는데 있다. 본 연구에서는 광주 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 79%, 가속소음은 최대 40% 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. 더불어 본 연구에서는 지자체 실증사업 효과분석 중 유일하게 환경성 분석을 실시하였다. PVD 기반 분석결과 C-ITS 구축 이후 감속운행패턴 증가로 오염물질 배출량이 구축 이전대비 최대 9% 증가한 것을 알 수 있었다.

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 효

과의 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, 시스템 구축 후 제한된 시간 동안 수집된 PVD를 분석에 활용했다는 점 역시 본 연구에서 향후 보완되어야 할 것으로 보인다. 둘째, PVD 수집의 한계를 극복하고자 본 연구에서는 DTG 데이터를 추가로 수집하여 분석하였지만 PVD의 결과를 비교함에 있어 1년여의 시간적 간격이 존재하며 그 사이 도로환경 변화를 고려하지 못한 점은 향후 보완되어야 할 것이다. 셋째, 충분한 데이터 수집을 통해 도로구간, 요일 및 시간, 날씨 등 다양한 시공간적 변수를 고려하여 미시적인 서비스 효과분석을 수행할 필요가 있다. 끝으로, 광주시 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 광주 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.
- Bokare, P. S. and Maurya, A. K.(2013), “Study of Effect of Speed, Acceleration and Deceleration of Small Petrol Car on ITS Tail Pipe Emission”, *International Journal for Traffic & Transport Engineering*, vol. 3, no. 4, pp.465-478.
- 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, 105675.
- Jo, Y., Jang, J., Park, S. and Oh, C.(2021), “Connected vehicle-based road safety information system (CROSS): Framework and evaluation”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 151, 105972.

- Kim, T., Kim, H. S., Kang, K. and Kim, S. B.(2022), “A Study to Evaluate the Impact of In-Vehicle Warning Information on Driving Behavior Using C-ITS Based PVD”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 21, no. 5, pp.28-41.
- 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 Korea Transportation Research Society*, vol. 30, no. 4, pp.43-59.
- Ko, J. E., Jang, J. Y. and Oh, C.(2021), “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.(2021), “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.
- Korea Transport Safety Authority, <https://www.data.go.kr>, 2023.10.03.
- 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”, *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, 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.