

레이더 검지기 자료를 활용한 SSM 기반 터널 교통안전정보 제공 서비스 효과분석

Analysis of the Effectiveness of Tunnel Traffic Safety Information Service Using RADAR Data Based on Surrogate Safety Measures

김 옹 주* · 이 재 현** · 정 성 용*** · 이 청 원****

* 주저자 : 서울대학교 공학연구원 연구원
** 공저자 : 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석박사통합과정
*** 공저자 : 서울대학교 건설환경종합연구소 연구원
**** 교신저자 : 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

Yongju Kim* · Jaehyeon Lee** · Sungyong Chung*** · Chungwon Lee****

* Inst. of Engineering Research, Seoul National Univ.
** Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National Univ.
*** Inst. of Construction and Environmental Eng., Seoul National Univ.
**** Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National Univ.

† Corresponding author : Chungwon Lee, chungwon@snu.ac.kr

Vol. 22 No.3(2023)
June, 2023
pp.73~87

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.3.73>

Received 6 April 2023
Revised 2 May 2023
Accepted 4 May 2023

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

요 약

교통안전정보를 제공하는 서비스는 운전자에게 도로의 위험상황을 미리 전달함으로써 교통사고 예방에 도움을 줄 수 있다. 이에 다양한 센서로 도로 상황을 즉각적으로 인지하고 적절한 교통안전정보를 제공하는 스마트 도로조명 플랫폼 개발 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 Surrogate Safety Measures (SSM)를 활용하여 스마트 도로조명의 터널 교통안전정보 제공 서비스 운영에 대한 단기적인 교통 안전성 개선 효과를 분석하였다. 분석에 활용된 자료는 강릉시 안인피암 1, 2 터널구간에서 레이더 검지기를 이용하여 수집된 차량 궤적자료이며, 이를 통해 개별 차량의 주행행태를 분석하였다. 교통안전정보 제공 사전과 사후의 과속, 속도 변동, 충돌 예상시간, 충돌회피 감속도를 비교한 결과, 모든 SSM이 통계적으로 유의하게 개선되어 터널 교통안전정보 제공 서비스가 교통안전 향상에 효과적인 것으로 나타났다. 터널구간과 접속구간을 세분화하여 사고 위험성을 분석한 결과, 교통안전정보 제공 시 대부분의 구간에서 교통사고 발생 가능성이 저하된 것이 확인되었다. 본 연구는 교통안전정보 제공 서비스에 대한 단기 효과분석으로 유익한 사례가 될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 스마트 도로조명, 터널구간, 레이더 검지기, 교통안전정보

ABSTRACT

Furnishing traffic safety information can contribute to providing hazard warnings to drivers, thereby avoiding crashes. A smart road lighting platform that instantly recognizes road conditions using various sensors and provides appropriate traffic safety information has therefore been developed. This study analyzes the short-term traffic safety improvement effects of the smart road lighting's tunnel traffic safety information service using surrogate safety measures (SSM). Individual driving behavior was investigated by applying the vehicle trajectory data collected with RADAR in

the Anin Avalanche 1 and 2 tunnel sections in Gangneung. Comparing accumulated speeding, speed variation, time-to-collision, and deceleration rate to avoid the crash before and after providing traffic safety information, all SSMs showed significant improvement, indicating that the tunnel traffic safety information service is beneficial in improving traffic safety. Analyzing potential crash risk in the subdivided tunnel and access road sections revealed that providing traffic safety information reduced the probability of traffic accidents in most segments. The results of this study will be valuable for analyzing the short-term quantitative effects of traffic safety information services.

Key words : Smart road lighting, Tunnel, RADAR, Traffic safety information

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

교통안전정보 제공 서비스는 지능형교통체계(Intelligent Transport Systems, ITS)의 일부로서, 교통안전을 향상하기 위해 도로 이용자에게 실시간으로 사고 차량 등 돌발상황을 포함한 위험상황 정보를 제공하는 서비스이다. 교통안전정보를 제공함으로써 도로 이용자는 위험상황을 인지하고 사고를 회피하기 위해 행동할 것이며, 이에 따라 교통사고 발생 가능성 및 심각도가 감소하여 교통 안전성이 향상될 수 있다. 하지만 적절하지 못한 교통안전정보의 제공은 도로 이용자에게 오히려 혼란을 야기하여 교통안전을 악화시킬 위험이 있다(Song et al., 2009; Park et al., 2010). 따라서 교통안전정보 제공 서비스의 도입 이후에는 교통안전에 긍정적인 영향을 미치는지 정량적인 분석을 통해 확인할 필요가 있다.

교통안전정보 제공 서비스의 효과분석은 시뮬레이션 활용 분석과 현장자료 활용 분석으로 구분할 수 있다. 시뮬레이션 활용 방법은 실제 도로 환경을 모사한 가상 환경을 구축하여, 교통안전정보 제공 서비스를 도입하기 전과 후의 환경에서 운전자의 주행행태와 교통사고 발생 가능성 등을 분석하는 방법이다. 실제 도로에서 현장자료를 수집하는 것보다 비교적 적은 시간과 비용이 소모되며, 다양한 시나리오를 시뮬레이션하여 서비스의 효과를 검증할 수 있다. 그러나 시뮬레이션은 운전자의 부주의로 인한 위험성, 주변 차량과의 복잡한 상호작용 등을 완전하게 구현하지 못하는 한계가 있다(Gu et al., 2021). 현장자료 활용 방법은 실제 도로에서 교통안전정보 제공 서비스를 운영하며 수집된 자료를 분석하는 방법이며, 대표적으로 정보 제공 여부에 따른 교통사고 발생 건수 비교, 교통검지기 데이터를 활용한 거시적인 교통류 영향평가 등이 가능하다. 하지만 교통사고 발생 건수 비교를 위해서는 장기간 자료 관측이 필요하여 서비스의 효과를 단기적으로 평가하기 어려운 한계가 존재한다. 교통검지기(특히 지점검지기) 데이터를 활용하는 경우 운전자의 주행특성이 반영된 미시적인 자료 수집이 어려워 차량 간의 상호작용을 포함하는 교통 안전성 분석이 불가능하다. 따라서 최근에는 차세대 지능형교통체계(Cooperative-ITS, C-ITS) 단말기, 첨단 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) 등의 자료를 활용한 교통안전정보 제공 서비스의 효과분석이 수행되고 있다(Jang et al., 2020; Gu et al., 2021).

본 연구의 목적은 터널 교통안전정보 제공 서비스의 운영이 교통 안전성 개선에 효과가 있는지 정량적으로 평가하는 것이다. 레이더 검지기에서 수집된 차량의 궤적자료를 이용하여 Surrogate Safety Measures (SSM)를 산정하고 개별 차량의 주행행태와 차량 간 미시적인 상호작용을 분석하고자 한다. 또한 터널구간 및 접속구간의 세부 구간별 사고 위험성을 산정하여 운전자의 주행특성과 교통 안전성을 비교·분석하고, 교통안전

정보 제공 서비스의 고도화 방안에 대한 시사점을 도출하고자 하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 현재 수행되고 있는 ‘스마트 도로조명 플랫폼 개발 및 실증연구’ 위험상황 인식 및 경고 서비스의 효과를 터널실증지인 강릉시 안인피암 1, 2 터널구간에 설치된 레이더(Radio detection and ranging, RADAR) 검지기 자료로 분석하고자 한다. 위험상황에는 과속차량, 저속차량, 역주행 등이 포함되며 서비스의 운영은 운전자에게 위험상황을 경고하여 대상 차량의 감가속을 통한 위험상황의 해소를 목표로 한다. 또한 후행 차량의 주의운전을 유도하여 선행 차량과의 안전거리를 확보하고, 사고 위험성을 감소시켜 교통사고를 예방하고자 한다. 본 연구는 위험상황 인식 및 경고 서비스의 운영 사전·사후에 수집된 레이더 검지기 자료에 대해 SSM을 산출하고 기술통계분석 및 통계적 유의성 검정으로 그 효과를 분석한다. 1단계 전체 구간 안전성 효과분석을 통해 교통안전정보 제공을 통한 교통 안전성 변화여부를 확인하고, 2단계 구간별 안전성 효과분석으로 터널구간과 접속구간에서의 안전성 개선효과를 면밀히 검토한다.

II. 문헌 고찰

교통안전정보 제공 서비스의 효과분석 연구는 국내외에서 지속적으로 수행되어 왔으며, 실시간 서비스의 운영은 교통 안전성 개선에 효과적임이 증명되었다. C-Roads Platform(2018)은 도로 안전성, 이동성, 환경성 측면에서 현장자료를 활용하여 C-ITS 서비스의 유효성을 평가하는 방법을 제안하고, 사용자의 시스템 수용성을 평가하기 위한 설문지를 개발했다. 교통안전에 대한 서비스 효과를 분석할 때는 개별 차량의 속도 변화, 속도의 표준편차, 감가속 등을 분석해야 한다고 제시하였다. Lee et al.(2021b)은 제주특별자치도에서 2017년~2019년 렌터카 사고 건수를 이용하여 C-ITS 실증사업의 효과를 정량적으로 분석하였다. C-ITS 서비스 제공 후에는 전년도 같은 시기 대비 사고 건수가 다소 감소한 경향을 보였다. 또한 실증사업 구간에서 발생한 사고가 그렇지 않은 구간에서 발생한 사고보다 현저히 적었고, 단말기 장착 차량의 사고가 단말기 미장착 차량의 사고보다 총 건수가 적게 나타났다. 따라서 C-ITS 교통안전 서비스 제공 후 안전성이 개선되었다고 판단했으나, 단순한 사고 건수 비교였으며 렌터카 사고 상세 자료의 구득이 불가하여 추가적인 분석을 수행하지 못하였다.

He et al.(2018)은 Safety Pilot Model Deployment (SPMD) 자료를 이용하여 SSM을 산출하고 간접적으로 교통 안전성을 평가하는 연구를 수행하였다. SPMD는 USDOT (United States Department of Transportation)가 2012년 미시간주 앤아버에서 실증한 차량 간 통신(Vehicle-to-Vehicle) 및 차량과 인프라 간 통신(Vehicle-to-Infrastructure)를 활용한 교통 안전성 향상 프로젝트인 Safety Pilot의 일환이다. 승용차, 화물차, 버스에 대해 각기 다른 교통안전 서비스가 운영되었으며, 승용차의 경우 전방 충돌 경고(Forward collision warning)를 포함하여 6가지의 교통안전정보가 제공되었다. Jang et al.(2020)은 국내 고속도로 C-ITS 실증에 활용된 커넥티드카(Connected vehicle)의 자료를 이용하여 전방 위험상황 경고(Forward hazardous situation warning)의 제공 여부에 따른 충돌 위험성을 비교하였다. 그 결과 정보 제공으로 평균속도가 10% 감소하고, Time-to-Collision (TTC)가 5% 증가하였으며, Crash Potential Index (CPI)가 21% 감소하여 교통 안전성이 향상되었음을 정량적으로 보였다. Gu et al.(2021)은 국내 고속도로 C-ITS 실증사업에서 수집된 ADAS 자료를 이용하여 전방 위험상황 경고 서비스, 추돌사고 예방 경고 서비스 등 교통안전정보 제공 서비스의 효과를 분석하였다. 서비스 제공 사후에 TTC가 유의하게 증가하였

으며, 정보 제공 건수를 기준으로 경부고속도로 금토분기점과 양재나들목 부근 등 4개 구간을 잠재적 위험 지역으로 선정하였다. 터널 내에서 수집된 자료는 위성항법시스템(Global Positioning Systems, GPS)의 신호 수신 이 원활하지 않아 터널 진입 전이나 후에 서비스 제공 위치가 집중되는 양상이 나타났고, 별도의 분석을 통해 정보가 가장 많이 제공된 곳은 수암터널이고, TTC 기준 위험도가 높은 곳은 안양터널임을 확인하였다.

본 연구는 터널구간에서 레이더 검지기 자료를 활용하여 교통안전정보 제공 서비스의 교통안전 개선 효과를 SSM 기반으로 정량적으로 분석하고자 하였다. 특히 정확도 높은 차량 궤적자료의 수집이 어려운 터널 구간에서 수집된 국내 현장자료를 활용하여 구간별 분석을 수행하였다는 점과, 신기술인 스마트 도로조명 플랫폼의 교통안전정보 제공 서비스를 대상으로 단기적인 효과를 확인했다는 점에서 기존 연구와 차별성이 있다.

Ⅲ. 분석 대상 서비스 및 방법론

1. 분석 대상 서비스

스마트 도로조명 플랫폼은 교통안전 서비스 지원을 위한 멀티센서 융합 시스템으로 도로 환경 정보를 수집하고 위험상황을 인지·판단하여 도로 이용자에게 정보를 제공함으로써 교통사고 저감에 기여하는 것을 목표로 한다. 플랫폼은 <Fig. 1>과 같이 조명 장치, 가변형 도로표지 및 안전표지 표출 장치, 스피커, 정보수집 장치, 환경 센서 등으로 구성되어 있다. 비주얼 시그널은 상황에 따라 4가지 색상을 점멸로 표출할 수 있는 장치이며, 디지털 사이니지와 고보조명은 픽토그램, 문자, 제한속도 등을 표출한다. 스피커는 음향을 통해 도로 이용자에게 정보를 제공한다.

스마트 도로조명 플랫폼에서 제공하는 교통안전 서비스에는 위험상황 인식 및 경고, 보행자 안전 횡단 지원, 불법 주차차 차량 인식 및 경고가 있다. 위험상황 인식 및 경고 서비스는 과속차량 접근, 사고 발생 등



<Fig. 1> Display devices of smart road lighting platform <Fig. 2> Examples of traffic safety information service

위험상황이 발생하였을 때 차량 간 또는 차량과 보행자 간 사고를 예방하기 위한 위험경고 서비스이다. <Fig. 2>와 같이 디지털 사이니지에 과속위험, 전방위험 등의 안전정보가 표출되며 위험상황에 따라 고보조명과 스피커를 통한 정보 제공도 함께 이루어진다. 보행자 안전 횡단 지원은 보행자와 차량 간 충돌 위험상황을 경고하고, 불법 주정차 차량 인식 및 경고는 주정차 금지 구역에 불법 주정차 차량이 발생하는 경우 이를 인식하고 경고하는 서비스이다.

본 연구의 분석 대상 서비스는 강릉시 터널실증지에서 운영 중인 ‘위험상황 인식 및 경고 서비스’로, 서비스 운영 중 위험상황이 발생하여 교통안전정보가 제공되었으며 충분한 양의 데이터가 수집되었다. 터널 교통안전정보 제공 서비스는 과속차량, 저속차량, 역주행, 사고로 의심되는 정지차량, 터널 내 보행자를 위험상황으로 인식하며 각 상황에 적절한 표출 장치를 통해 <Table 1>과 같이 교통안전정보를 제공한다.

<Table 1> Traffic safety information service in this study and display devices

Traffic Safety Information Service	Detection Target	Display Device			
		Speaker	Visual Signal	Digital Signage	Gobo Light
Hazard Awareness and Warning	Speeding Vehicle		○	○	
	Low Speed Vehicle		○	○	
	Reverse Driving	○	○	○	○
	Stopped Vehicle	○	○	○	○
	Pedestrian in Tunnel	○	○	○	○

2. Surrogate Safety Measures 선정

앞서 언급한 바와 같이 교통안전정보 제공 서비스의 목적은 위험상황 발생 시 도로 이용자의 신속한 상황 인지를 지원하고, 운전자의 감속 또는 급가감속 억제 등 주의운전을 유도하여 충돌을 예방하는 것이다. 본 연구는 교통 안전성을 정량화하기 위해 차량 궤적자료를 활용하여 안전성을 분석한 선행 연구(Moreno and Garcia, 2013; Lee et al., 2021a; Wang et al., 2021)를 참고하여, 여러 가지 SSM 중 차량의 주행태도와 관련된 2개의 지표와 정보를 제공 받은 주체 차량과 주변 차량 간 상호작용과 관련된 3개의 지표를 선정하여 <Table 2>와 같이 총 5개의 지표를 분석에 활용하였다.

<Table 2> Surrogate safety measures selected in this study

Type of SSM	SSM	Unit	Description
Related to the subject vehicle	Accumulated Speeding (AS)	km/h	The normalized relative area (per unit length) bounded between the speed profile values higher than the speed limit and the speed limit line (Moreno and Garcia, 2013)
	Speed Variation (SV)	km/h	The standard deviation of the speed
Related to surrounding vehicles	Time-to-Collision (TTC)	sec	The time that remains until a crash between two vehicles would have occurred if the crash course and speed difference are maintained (Hayward, 1972)
	Deceleration Rate to Avoid Crash (DRAC)	m/s ²	The minimum braking rate required for a vehicle to avoid collision with another vehicle (Wang et al., 2021)
	Crash Potential Index (CPI)	-	The probability that DRAC exceeds the maximum deceleration rate at a moment (Cunto, 2008)

1) Accumulated Speeding (AS)

AS는 개별 차량의 속도 프로파일을 활용하여 기준(제한) 속도를 초과하는 속도 프로파일과 제한 속도선 사이의 영역을 누적하여 이동거리 또는 구간의 길이로 나눈 값이다. 누적 과속과 직접적으로 관련되어 있어 값이 클수록 상대적으로 위험한 주행행태임을 의미한다.

$$AS = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (v(t) - v_{standard}) \times \Delta x(t)}{L} \text{ for } v(t) > v_{standard} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, $v(t)$ = 시간간격 t 일 때 속도
- $v_{standard}$ = 기준 속도
- $\Delta x(t)$ = 시간간격 t 일 때 이동거리
- t_i = 첫 시간간격
- t_f = 마지막 시간간격
- L = 총이동거리 또는 구간길이

2) Speed Variation (SV)

SV는 차량의 속도 표준편차 값으로, 본 연구에서는 개별 차량이 해당 구간을 주행할 때의 속도 프로파일을 활용하여 SV를 산정하였다. 값이 클수록 무분별한 속도 변경이 발생하여 상대적으로 위험한 주행행태임을 의미하며, 값이 감소하면 주행행태가 개선되었음을 나타낸다.

$$SV = \sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (v(t) - v_{mean})^2}{N}} \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서, $v(t)$ = 시간간격 t 일 때 속도
- v_{mean} = 평균 속도
- t_i = 첫 시간간격
- t_f = 마지막 시간간격
- N = 시간간격(자료) 수

3) Time-to-Collision (TTC)

TTC는 Hayward(1972)가 처음 제시하였으며, 충돌까지의 시간 측면에서 사고 가능성을 정량화하여 미시적인 교통안전 영향을 평가하는 가장 대표적인 SSM 중 하나이다. 선행 차량의 속도와 차간거리를 포함하여 주체 차량의 안전성 뿐만 아니라 선행 차량과의 상호작용을 함께 분석할 수 있다. TTC는 최소 인지시간(The minimum perception/reaction time) 1.5초 미만일 때 충돌을 피하기 어려운 위험상황으로 판단한다(Hayward, 1972; Horst, 1991). 그 값이 작을수록 충돌까지의 시간이 짧아 상대적으로 위험한 상황임을 의미하며, 값이 증가하면 주체 차량과 선행 차량 간 안전거리가 확보되어 교통 안전성이 개선되었음을 나타낸다.

$$TTC = \frac{(x_l - x_f) - L}{|v_l - v_f|} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, x_l = 선행 차량의 위치
 x_f = 후행(주체) 차량의 위치
 L = 선행 차량의 길이
 v_l = 선행 차량의 속도
 v_f = 후행 차량의 속도

4) Deceleration Rate to Avoid the Crash (DRAC)

DRAC는 Cooper and Ferguson(1976)이 처음 제시한 감속도 기반의 SSM으로, 차량이 충돌을 회피하기 위해 감속하는 행위에서 착안하여 차량 간 상호작용의 심각성을 정량화하기 위해 제안되었다. 주체 차량은 방향을 조정하지 않고 감속을 통해 회피 행동을 취하고 선행 차량은 속도와 방향을 유지한다고 가정하여, 충돌 회피를 위한 최소 감속도를 산정한 값이다. DRAC 값이 클수록 요구되는 감속도가 커 상대적으로 위험한 상황을 의미한다.

$$DRAC = \frac{(v_f - v_l)^2}{2[(x_l - x_f) - L]} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, v_f = 후행 차량의 속도
 v_l = 선행 차량의 속도
 x_l = 선행 차량의 위치
 x_f = 후행(주체) 차량의 위치
 L = 선행 차량의 길이

5) Crash Potential Index (CPI)

DRAC가 기준 감속도 경계값보다 크게 나타나는 경우에는 사고 발생의 위험이 있다. 따라서 선행-후행 차량 간 상호작용이 나타나는 시간 중 사고의 위험성이 있는 시간의 비율을 활용하여 위험에 노출된 시간의 비율을 산정할 수 있다. 이 시간 비율은 DRAC가 기준 감속도보다 큰 시간의 비율인 CPI이며, 잠재적 후미추돌의 위험성(Rear-end collision risk)을 정량화할 수 있다(Cunto, 2008). 본 연구는 American Association of State Highway and Transportation Officials(2004)가 제시한 대부분의 운전자가 편안하게 느끼는 최대 감속도 3.40m/s^2 를 기준 감속도 경계값으로 활용하여 사고 위험성 분석을 수행하였다.

$$CPI = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} P(DRAC_t \geq MADR) \Delta t}{T} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $DRAC_t$ = 시간간격 t 일 때의 DRAC
 $MADR$ = 최대 감속도(The maximum braking rate)
 $P(DRAC_t \geq MADR)$ = DRAC가 MADR보다 클 확률

Δt = 시간간격의 길이

b = 이진 변수(차량 간 상호작용이 존재하면 1, 그렇지 않으면 0)

T = 총통행시간

3. 분석 대상지 및 자료

본 연구에 활용된 교통안전정보 제공 서비스 실증 현장자료는 <Fig. 3>의 강릉시 강동면 울곡로 안인피암 1, 2 터널 인근 양방향 2차로 350m 구간에서 수집되었다. 안인피암 1, 2 터널은 30m 간격으로 설치된 85m 길이의 연속터널이다. 자료는 해당 구간에 약 100m 간격으로 설치된 4개의 레이더 검지기로부터 수집된 차량 궤적자료로, 검지기 설치 위치를 기준으로 차량의 X, Y 좌표와 순간속도, 차량의 길이 등이 약 0.7초 주기로 수집되었다. 일반적으로 터널 내에서는 GPS 신호 수신에 원활하지 않아 이를 활용한 차량 궤적자료 수집이 어렵다(Lee and Kim, 2011). 반면, 본 연구에 활용된 레이더 검지기는 200m 범위 내에서 최대 256개의 움직이는 물체를 동시에 인식하고 추적한다. 이를 통해 도로를 주행하는 차량들의 실시간 속도와 위치를 검지하고 구간 내 차량의 궤적자료를 생성하며, 교통량 기준 차로별 검지 정확도는 95% 이상이다. 따라서 터널 내 차량의 주행궤적에 대한 정확도 높은 자료의 수집과 이를 활용한 터널구간과 접속구간에 대한 구간별 분석이 가능하다.



<Fig. 3> Spatial range of this study

본 연구에서 교통안전정보를 제공하지 않은 경우를 ‘사전(before)’, 정보를 제공한 경우를 ‘사후(after)’로 정의하였다. 사전 자료는 2022년 11월 7~20일 2주간, 사후 자료는 2023년 1월 11~17일, 2월 20~26일 총 2주간 수집하였으며, 수집된 자료 가운데 레이더 검지기에 오류가 발생한 시간대는 분석 자료에서 제외하였다. 사전 자료는 스마트 도로조명 시스템 구축 후 위험상황 등의 도로 정보를 수집하되 교통안전정보를 제공하지 않는, 즉 시스템 구축 전과 같은 환경에서 수집하였다. 사후 자료는 디지털 사이니지, 비주얼 시그널 등 표출 장치를 통해 교통안전정보를 제공하는 서비스 운영 환경에서 수집하였다. 서비스 운영 사전과 사후의 총통행량은 각각 69,333대, 61,007대, 자료수집기간 일평균 4,952대, 4,358대 수준으로 사전 통행량이 사후보다 크게 나타났다.

4. 분석 흐름

터널 교통안전정보 제공 서비스 운영에 의한 교통안전 개선 효과를 분석하기 위해 1단계 전체구간 안전성 효과분석, 2단계 구간별 안전성 효과분석을 진행하였다. 1단계에서는 교통안전정보를 제공하기 전과 후인 사전, 사후 자료로부터 앞서 선정한 SSM을 산출하였다. AS, SV, TTC, DRAC 각각에 대해 기술통계분석을 수행하여 교통안전정보 제공을 통한 교통 안전성의 변화여부를 확인하였으며, 통계적 유의성 검정으로 교통안전 개선효과의 유의미성을 검토하였다. 2단계에서는 방향별, 구간별 SSM 산출 및 비교를 통해 터널구간과 접속도로구간에서의 개선효과 차이를 확인하였다. 방향은 북향 노선과 남향 노선, 구간은 터널구간과 접속도로구간으로 구분하였다. 마지막으로 구간을 30m 간격으로 세분화하여 사고 위험성 분석을 수행하고 터널 교통안전정보 제공 서비스 고도화 방안에 대한 시사점을 도출하였다.

IV. 분석 결과

1. 전체구간 안전성 효과분석 결과

이 장에서는 실증구간의 북향 또는 남향 노선을 구분하지 않고 양방향에 대해 분석을 수행하였으며, 분석에 사용한 자료 중 차량의 주행행태 관련 자료는 사전 177,910건, 사후 162,203건이다. <Table 3>에 제시한 바와 같이 교통안전정보를 제공하였을 때 차량 당 평균 AS는 2.10km/h로 정보를 제공하지 않았을 때 2.72km/h 대비 약 23% 감소하였다. 표준편차 또한 감소하여 정보 제공 후에 상대적으로 과속행태가 개선되었음을 나타낸다. 평균 SV는 교통안전정보 제공 시 0.83km/h로 정보를 제공하지 않았을 때 대비 약 2% 감소하였다. 감소폭은 작으나 ‘과속주의’, ‘전방위험’ 등의 정보 표출 시 운전자가 감속할 수 있음을 고려할 때, 무분별한 속도 변동 행태가 다소 개선되었음을 알 수 있다.

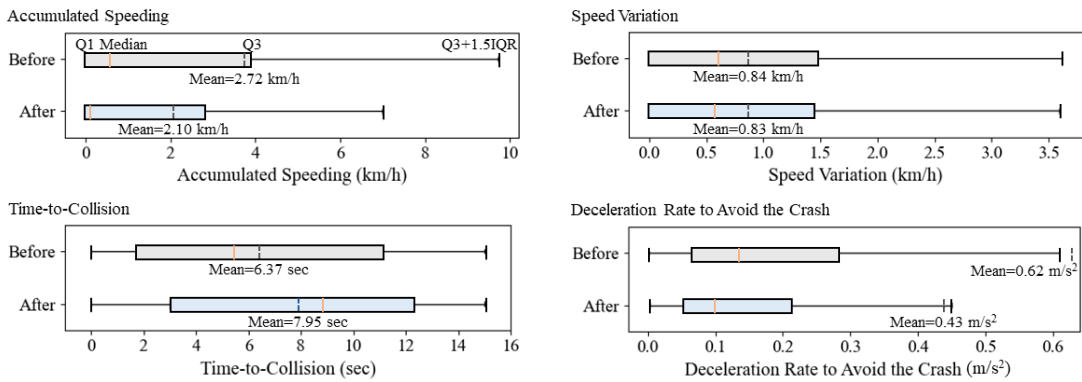
TTC와 DRAC는 위험상황에 따라 교통안전정보가 제공되는 시점 전후 각 15초 동안 구득된 자료를 활용하여 분석하였다. TTC는 선행 차량과 후행 차량의 속도가 같거나 차이가 매우 작으면 무한대가 된다. 따라서 통계량 산정 시 특정값을 초과하는 TTC 값은 고려하지 않으며, 본 연구는 기존 문헌을 참고하여 15초 이상의 TTC 값은 제외하였다(Green, 2013; Xyntarakis et al., 2017). 그 결과 정보를 제공 받은 주체 차량과 주변 차량 간 상호작용이 관찰될 때의 자료는 사전 9,380건, 사후 5,314건으로 나타났다. 교통안전정보를 제공하였을 때 평균 TTC는 7.95초로 정보를 제공하지 않았을 때 6.37초와 비교하여 1.58초(약 25%) 증가하였다. 이는 정보 제공 사후에 사전 대비 차간거리가 길어져 사고 위험성이 낮아진 것으로 해석된다. TTC의 표준편차는 정보를 제공하지 않았을 때 4.92초인 반면, 정보를 제공하였을 때 4.78초로 다소 감소하였다. 사분위수와 중앙값은 <Fig. 4>에 나타난 바와 같이 정보 제공 사후에 사전 대비 증가하였다. DRAC의 경우 교통안전정보 제공 시 평균은 0.43m/s²으로 정보를 제공하지 않았을 때 0.62m/s² 대비 약 38% 감소하였다. DRAC의 표준편차 또한 감소하였으며, 사분위수와 중앙값도 감소하였다. DRAC의 감소는 충돌 회피를 위해 요구되는 감속도가 작아진 것으로, 위험성이 저하되었음을 나타낸다.

사전과 사후의 차이가 통계적으로 유의미한지 검정하기에 앞서 Kolmogorov-Smirnov test를 이용하여 정규성 검정을 수행하였다. 검정 결과 <Table 4>에 제시한 것과 같이 네 개의 SSM은 사전과 사후 모두 유의수준 5%에서 정규성을 만족하지 못하였다. 정규성을 만족하지 못하는 분포에 대해 비모수 검정인 Mann-Whitney test로 사전과 사후의 차이에 대한 통계적 유의미성을 확인하였다. 검정 결과 <Table 5>와 같이 모든 SSM의

사전과 사후 차이가 유의수준 5%에서 유의미하였다. 따라서 교통안전정보 제공 서비스가 SSM의 변화에 유의미한 영향을 미쳤으며, 결과적으로 과속과 무분별한 속도 변동, 차량 간 사고 위험성 측면에서 교통 안전성을 개선하였음을 알 수 있다.

<Table 3> Summary of statistics for surrogate safety measures

SSM	Scenario	Count	Mean	Standard Deviation	1st Quartile	Median	3rd Quartile
AS	Before	177,810	2.7208	4.4024	0.0000	0.5718	3.8874
	After	162,203	2.1041	3.8326	0.0000	0.1395	2.7977
SV	Before	177,810	0.8444	0.9242	0.0045	0.6111	1.4490
	After	162,203	0.8253	0.9100	0.0045	0.5698	1.4400
TTC	Before	9,380	6.3696	4.9224	1.7206	5.4179	11.0741
	After	5,314	7.9488	4.7842	2.9988	8.8186	12.2276
DRAC	Before	9,380	0.6199	4.8713	0.0649	0.1335	0.2827
	After	5,314	0.4250	2.9856	0.0531	0.0980	0.2120



<Fig. 4> Box plots of SSM for before and after scenarios

<Table 4> Kolmogorov-Smirnov test results

SSM	Scenario	Degree of Freedom	Test Statistics	Significance
AS	Before	177,810	0.5000	0.000*
	After	162,203	0.5000	0.000*
SV	Before	177,810	0.5000	0.000*
	After	162,203	0.5000	0.000*
TTC	Before	9,380	0.7160	0.000*
	After	5,314	0.7921	0.000*
DRAC	Before	9,380	0.5010	0.000*
	After	5,314	0.5014	0.000*

*: P-value < Significant Level 0.05

<Table 5> Mann-Whitney test results

SSM	Mann-Whitney U	P-value
AS	13022293085.0	0.000*
SV	14249166914.5	0.000*
TTC	20481088.0	0.000*
DRAC	21491830.5	0.000*

*: P-value < Significant Level 0.05

2. 구간별 안전성 효과분석 결과

안인피암 1, 2 터널구간과 접속도로구간을 구분하여 SSM의 사전과 사후에 대한 Mann-Whitney test를 수행한 결과는 <Table 6>과 같다. 먼저 북향 노선에 대해 안인피암 1~2 터널구간에서 모든 SSM이 교통안전정보 제공 시 유의수준 5%에서 통계적으로 유의하게 개선되었다. 이는 정보 제공을 통해 터널구간에서 개별 차량의 속도 관련 주행행태가 개선되고, 주변 차량과의 상호작용도 상대적으로 안전해졌음을 나타낸다. 접속구간에서는 AS와 SV만 유의하게 개선되어 정보 제공 이후 과속과 무분별한 속도 변동 행태가 저감되었음을 확인하였다. 남향 노선에 대해서는 터널구간에서 SV를 제외하고 AS, TTC, DRAC가 통계적으로 유의하게 개선되었다. 따라서 속도 변동은 감소하지 않았지만, 과속행태가 개선되고 주변 차량과 안전거리가 확보되어 교통안전이 개선되었다고 판단할 수 있다. 접속구간에서는 북향 노선과 마찬가지로 차량 주행행태 관련 SSM인 AS와 SV만 유의미하게 개선되었다. 따라서 교통안전정보의 제공은 터널구간에서는 개별 차량의 주행행태는 물론 차량 간 상호작용 측면에서 교통안전 개선 효과가 있었으며, 접속구간에서는 과속과 속도 변동의 측면에서 효과가 있었다.

<Table 6> Results of Mann-Whitney test for scenarios under different directions and sections

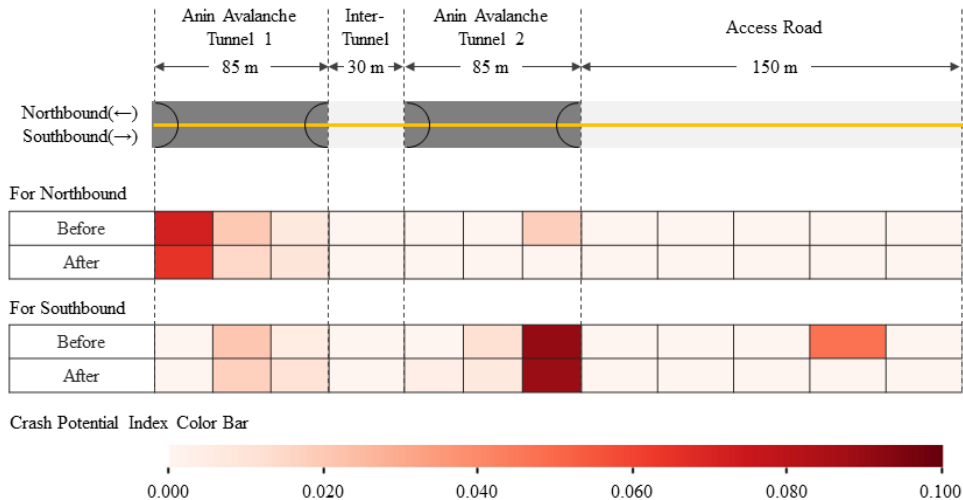
Direction	Section	Index	SSM			
			AS	SV	TTC	DRAC
Northbound (←)	Anin Avalanche Tunnel 1~2	μ_{before}	3.5935	0.8769	4.9278	0.7808
		μ_{after}	2.8836	0.8386	6.2436	0.5534
		Mann-Whitney U	1000275405.5	1090142506.5	8049786.0	8459129.0
		P-value	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
	Access Road	μ_{before}	3.3957	0.9881	10.8069	0.0929
		μ_{after}	2.7250	0.9588	10.5932	0.0933
		Mann-Whitney U	761863884.5	826376341.0	212454.0	215970.5
		P-value	0.000*	0.000*	0.079	0.181
Southbound (→)	Anin Avalanche Tunnel 1~2	μ_{before}	1.5682	0.8104	8.9507	0.3518
		μ_{after}	1.1883	0.8234	9.2446	0.4057
		Mann-Whitney U	1131632509.5	1244957598.0	969729.5	935191.5
		P-value	0.000*	0.073	0.025*	0.000*
	Access Road	μ_{before}	2.2459	0.6552	10.8073	0.1199
		μ_{after}	1.6802	0.6385	11.0872	0.1004
		Mann-Whitney U	458630448.5	488518430.0	121904.5	125788.5
		P-value	0.000*	0.001*	0.055	0.220

*: P-value < Significant Level 0.05

추가적으로, 30m 간격으로 구간을 세분화하여 방향별 구간별 사고 위험성 분석을 수행하였다. 세부 구간 별로 사전과 사후의 잠재적 추돌 위험성 지표인 CPI를 산정하고 히트맵으로 표현한 결과는 각각 <Table 7>, <Fig. 5>와 같다. 교통안전정보 제공 후에는 제공 전 대비 대부분의 구간에서 CPI가 감소하여 사고 위험성이 저하된 것으로 확인되었다. 구간별로 비교한 결과, 방향에 관계 없이 안인피암 1~2 터널구간에서 접속구간보다 사고 위험성이 크게 나타났다. Amundsen(1992)에 의하면 긴 터널구간은 운전자의 시인성 불량과 심리적 불안정으로 인해 접속구간보다 사고 위험성이 높으며, 길이 200m 미만의 연속터널에서도 터널구간이 접속구간보다 위험한 것이 확인되었다. 접속구간에서 터널에 진입할 때는 감속하는 주행행태에 의해(Jung et al., 2002; Eo et al., 2013) 차간거리가 짧아져 CPI가 증가한 것으로 보인다. 터널 입구부와 출구부를 비교할 경우, 입구부 대비 출구부에서 후미추돌 사고 위험성이 높았다. 특히 북향 노선의 경우 안인피암 1터널, 남향 노선의 경우 안인피암 2터널의 출구부에서 CPI가 0.05 이상으로 나타났다. 이는 터널 진출 시 가속하는 운전자의 특성에 의해(Choi et al., 2015) 간격이 좁은 연속터널 중 두 번째 터널 출구부에서 가속하여 타 구간 대비 위험성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 북향과 남향 모두에서 두 번째 터널 진출 시 추가적인 교통안전정보를 제공하는 서비스를 운영한다면 구간의 교통안전을 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

<Table 7> Results of Crash potential index for before and after scenarios

Direction	Scenario	Section											
		Anin Avalanche Tunnel 1			Inter-Tunnel	Anin Avalanche Tunnel 2			Access Road				
North-bound	Before	0.072	0.021	0.007	0.000	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	After	0.065	0.015	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
South-bound	Before	0.000	0.021	0.006	0.000	0.000	0.012	0.091	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000
	After	0.000	0.018	0.011	0.000	0.004	0.007	0.090	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



<Fig. 5> Crash potential index heatmap for before and after scenarios

V. 결 론

교통안전정보 제공 서비스는 도로상에서 발생하는 위험상황에 대한 정보를 제공하고 운전자의 주의운전을 유도하여 교통안전성을 향상하고 사고 위험성을 감소시키는 것을 목적으로 한다. 본 연구는 스마트 도로조명 실증사업 구간인 강릉 안인피암 1, 2 터널구간에서 수집한 레이더 검지기 자료를 분석에 활용하였다. 교통안전정보 제공 서비스의 운영이 교통 안전성 향상에 효과가 있는지 SSM을 활용하여 평가하고 세부 구간별 사고 위험성 분석을 수행하였다. 분석 결과 교통안전정보를 제공함으로써 TTC가 증가하고 AS, SV, DRAC가 감소하는 것으로 나타났다. 전체구간에 대해 차량당 평균 AS는 교통안전정보 제공 사후에 약 23%, SV는 약 2%, 평균 TTC는 약 25%, DRAC는 약 38% 개선되었다. 통계적 검정 결과 정보 제공 사전과 사후의 차이는 모든 SSM에 대해 유의하였으며, 교통안전정보 제공 서비스를 통해 교통 안전성이 향상되었음을 정량적으로 확인하였다. 터널구간과 접속구간을 구분하여 방향별로 비교한 결과 안인피암 1~2 터널구간에서 AS, TTC, DRAC의 개선이 유의미하게 나타났으며, 접속구간에서는 개별 차량의 속도와 관련된 AS와 SV가 유의미하게 개선되어 양방향에 대해 정보 제공이 교통안전 개선에 효과적이었음을 확인하였다. 또한 방향별·구간별로 CPI를 분석한 결과, 교통안전정보 제공을 통해 교통사고 발생 위험성이 저하된 것으로 나타나, 결론적으로 터널 교통안전정보 제공 서비스는 실증구간의 교통 안전성 개선과 사고 발생 위험성 저하에 효과적인 것으로 확인되었다. 터널 진출부의 경우에는 가속하는 운전자의 주행행태에 의해 타 구간 대비 사고 발생 위험성이 높으므로, 해당 구간에 대한 서비스 고도화가 수행된다면 효과를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 교통안전정보 제공 서비스 운영 사전·사후의 자료수집 기간은 2주로 다소 짧아, 장기적인 효과를 분석하지 못했다는 점에서 한계점이 존재한다. 또한 공간적 범위 측면에서 85m의 짧은 연속터널을 대상으로 분석하였으므로, 길이가 긴 장대터널에 대해서도 서비스를 운영하고 효과를 분석해야 할 것이다. 본 연구에서는 주행행태 관련 지표인 AS와 SV, 차량 간 상호작용 관련 지표인 TTC, DRAC와 CPI를 활용하였으나, 향후 다양한 SSM을 활용한 교통 안전성 개선 여부를 확인할 필요가 있다. 마지막으로 개별 운전자의 서비스 순응도는 사고 예방으로 이어지는 중요 요소이므로 서비스 제공 사전·사후 개별 차량의 주행자료를 분석하여 순응도 및 안전성 효과평가를 수행해야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 22PQWO-C155408-04). 그리고 서울대학교 공학연구원과 서울대학교 건설환경종합연구소의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

American Association of State Highway and Transportation Officials(2004), *A policy on geometric design of highways and streets*, Washington, DC.

- Amundsen, F. H.(1992), “Driver behaviour in Norwegian road tunnels”, *Toward a Deeper Understanding. Directorate of Public Roads, Oslo.*
- Choi, J. C., Lim, J. B., Hong, J. Y. and Lee, S. Y.(2015), “Study on the Ways to Improve Deep Underground Road Facilities and Operation Based on the Cases of Longitudinal Tunnel”, *Journal of the Korean Society of Transportation*, vol. 30, no. 6, pp.122-131.
- Cooper, D. F. and Ferguson, N.(1976), “Traffic studies at T-Junctions. 2. A conflict simulation Record”, *Traffic Engineering and Control*, 17(Analytic).
- Cunto, F.(2008), *Assessing safety performance of transportation systems using microscopic simulation*, UWSpace.
- C-Roads Platform(2018), *Working Group 3 evaluation and assessment. Evaluation and Assessment Plan-Final Version.*
- Eo, H. K., Park, B. J. and Huh, J. N.(2013), “Operational Effectiveness of Variable Speed Limits System on Tunnel by Micro Traffic Flow Simulator”, *Proceedings of the 69th Korean Society of Transportation Conference*, pp.84-88.
- Gay, K. and Kniss, V.(2015), *Safety pilot model deployment: Lessons learned and recommendations for future connected vehicle activities* (No. FHWA-JPO-16-363), United States, Department of Transportation, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office.
- Green, P.(2013), “Standard definitions for driving measures and statistics: Overview and status of recommended practice J2944”, *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, October, pp.184-191.
- Gu, Y., Ko, J., Jang, J. and Oh, C.(2021), “Analysis of the Effectiveness of Traffic Safety Information Using ADAS Data”, *Transportation Technology and Policy*, vol. 18, no. 5, pp.69-77.
- Hayward, J. C.(1972), “Near Miss Determination through Use of a Scale of Danger”, *Highway Research Record*, pp.24-35.
- He, Z., Qin, X., Liu, P. and Sayed, M. A.(2018), “Assessing surrogate safety measures using a safety pilot model deployment dataset”, *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 38, pp.1-11.
- Horst, R. V. D.(1991), “Time-to-collision as a cue for decision-making in braking”, *Vision in Vehicles -III.*
- 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 and Prevention*, vol. 144, p.105675.
- Jung, C., G., Seo, S. H. and Won, J. M.(2002), “A Study on the Speed Variation Characteristics According to Tunnel Intervals in the Continuous Tunnel Conditions”, *Journal of the Korean Society of Transportation*, vol. 20, no. 2, pp.49-58.
- Lee, H. and Kim, J.(2011), “An Implementation of Positioning System Using Multiple Data in Smart Phone”, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 15, no. 10, pp.2195-2202.
- Lee, J., Moh, D., Hong, J. and Lee, C.(2021), “The Effect Analysis of Safe Driving Education for High-Risk Driver Groups in Sudden Pedestrian Crossing Situation Using a Driving Simulator”, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 5, pp.18-34.
- Lee, K., Yoon, T., Shin, J. and Ko, S.(2021), “C-ITS User Survey Result and Rent-a-Car Accident

- Analysis: Using Jeju C-ITS Demonstration Project Data”, *Journal of the Korean Society of Transportation*, vol. 39, no. 1, pp.30-42.
- Moreno, A. T. and García, A.(2013), “Use of speed profile as surrogate measure: Effect of traffic calming devices on crosstown road safety performance”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 61, pp.23-32.
- Park, J. Y., Oh, C., Kim, M. J. and Jang, M. S.(2010), “Evaluation of In-vehicle Warning Information Modalities by Kansei Engineering”, *Journal of the Korean Society of Transportation*, vol. 28, no. 3, pp.39-49.
- Song, T. J., Oh, C. and Oh, J. T.(2009), “Analysis of User Preference for Designing Real-Time Warning Information”, *Journal of the Korean Society of Transportation*, vol. 27, no. 4, pp.7-16.
- Wang, C., Xie, Y., Huang, H. and Liu, P.(2021), “A review of surrogate safety measures and their applications in connected and automated vehicles safety modeling”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 157, p.106157.
- Xyntarakis, M., Alexiadis, V., Punzo, V., Campbell, R., Skabardonis, A., Flanigan, E. and Systematics, C.(2017), *A framework for validating traffic simulation models at the vehicle trajectory level* (No. FHWA-JPO-16-405), United States, Department of Transportation, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office.