

## 가상현실기술을 활용한 터널부 길어깨 확장 효과 분석

# Analysis of Shoulder Width Extension Effect in the tunnel Using Virtual Reality Technology

김형규<sup>1</sup>, 김병곤<sup>2\*</sup>

Hyung-Kyu Kim<sup>1</sup>, Byung-Kon Kim<sup>2\*</sup>

### 요 약

우리나라는 안전 및 운영 효율성을 고려하여 터널을 지속적으로 설치하였으며, 지난 10년간 터널 설치 개수는 약 2배 정도 증가하였다. 터널부의 경우 지침에 의거하여 설계되고 있으나, 터널 입구부 분의 경우 암순응 및 압박감에 의하여 감소하게 되며, 실제 일본 고속도로에서 발생하는 정체의 약 13%가 터널 입구부에서 발생하고 있으며 이에 따른 정체 및 추돌사고가 야기되고 있다. 이에, 본 연구에서는 가상주행 시뮬레이터를 활용하여 터널 입구부 사고를 감소시킬 수 있도록 터널 진입부 길어깨 확대에 의한 안전성을 분석하였다. 동일한 조건에서 우측 길어깨 폭만의 변화에 따른 주행안전성을 비교하기 위하여 가상주행 시뮬레이션을 이용하여 20대~60대 피실험자 30명을 대상으로 실험을 진행하였다. 오른쪽 길어깨는 고속도로 설계지침서와 도로의 구조 설치 기준의 관한 규칙에 따라 2.5m와 3.0m로 구분하여 시나리오를 구성하였다. 분석구간의 평균 주행속도와 터널 진입시 평균 주행 속도와의 속도편차, 차로중심에서 벗어난 거리 및 차량 핸들 조향각도를 분석한 결과, 길어깨 폭이 3.0m일 때 2.5m일 때에 비하여 주행안전성 측면에서 안전성을 느끼는 것으로 나타났다. 연구결과를 종합할 경우, 우측 길어깨 폭이 3.0m로 하는 것이 주행안전성 측면에서 우수하나, 건설비용을 고려하여 일평균 교통량 33,000대를 이상의 교통량을 보이는 도로구간에 대해서는 향후 고속도로 설계시 우측 길어깨 폭을 3.0m 이상으로 확장시켜 안전성 및 운영성을 모두 확보할 필요가 있다.

핵심어 : 주행안전성, 길어깨, 터널, 가상주행시뮬레이터

### Abstract

South Korea continuously installed tunnels in consideration of the safety and operation efficiency, and the number of installed tunnels has doubled over the past 10 years. The tunnel section is designed based on the guidelines, but the tunnel entrance becomes narrow due to dark adaptation and pressure. In fact, around 13% of traffic in expressways of Japan happens in the entrance and this leads to congestion and rear-end collision accidents. Therefore, this study aims to analyze the stability from the expansion of the

1 Department of Highway and Transportation Research, KICT, Gyeonggi-do, Korea [Senior Researcher]  
e-mail: hyoungkyukimi@kict.re.kr

2 Department of Future and Smart Construction Research, KICT, Gyeonggi-do, Korea [Research Fellow]  
e-mail: bkkim@kict.re.kr(Corresponding author)

\* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21POQW-B152690-03).

Received(November 2, 2021), Review Result(1st: November 22, 2021), Accepted(December 10, 2021), Published(December 31, 2021)



© 2021 The Authors. Published by NCISS.  
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

shoulder width in the tunnel entrance by applying virtual reality driving simulator in order to reduce the accidents that happen in the tunnel entrance. To compare the driving stability based on the changes in the width of the right shoulder under the same condition, virtual reality driving simulator is used to conduct an experiment on 30 subjects in their 20s to 60s. The right shoulder is classified into 2.5m and 3.0m based on the design guidelines of the expressways and the road structure installation regulations. As a result of analyzing the speed deviation between the average driving speed of the analysis section and the average driving speed when entering the tunnel, the distance away from the center of the lane, and the steering angle of the vehicle steering wheel, safety in terms of driving safety was improved when the shoulder width was 3.0 m compared to that of 2.5 m. turned out to be felt In addition.

Keyword : Driving stability, Shoulder width, Tunnel, Virtual reality driving simulator

## 1. 서론

도로상의 터널설치는 안전 및 운영 효율성을 고려하여 적용되고 있으며, 터널 설치의 이점으로 인하여 지난 10년간(2010년~2019년) 터널 설치 개수는 [표 1]과 같이 약 2배정도 증가하였다 [1].

[표 1] 도로등급별 터널 설치현황(2010년~2019년)

[Table 1] Tunnel installation status by road grade (2010-2019)

(단위 : 개소)

구분	총계	고속국도	일반국도	특별,광역시도	국가지원지방도	지방도	시도	군도	구도
2010년	1,332	623	374	142	47	63	62	20	1
2011년	1,465	708	402	144	52	69	67	20	3
2012년	1,578	775	421	146	67	72	73	21	3
2013년	1,659	793	461	156	64	79	80	20	6
2014년	1,777	810	494	172	71	101	101	21	7
2015년	1,944	925	532	176	76	102	104	22	7
2016년	2,189	1,054	608	185	86	116	106	27	7
2017년	2,382	1,159	668	187	91	119	119	32	7
2018년	2,566	1,161	735	192	99	121	211	34	13
2019년	2,682	1,204	761	212	110	132	207	41	15

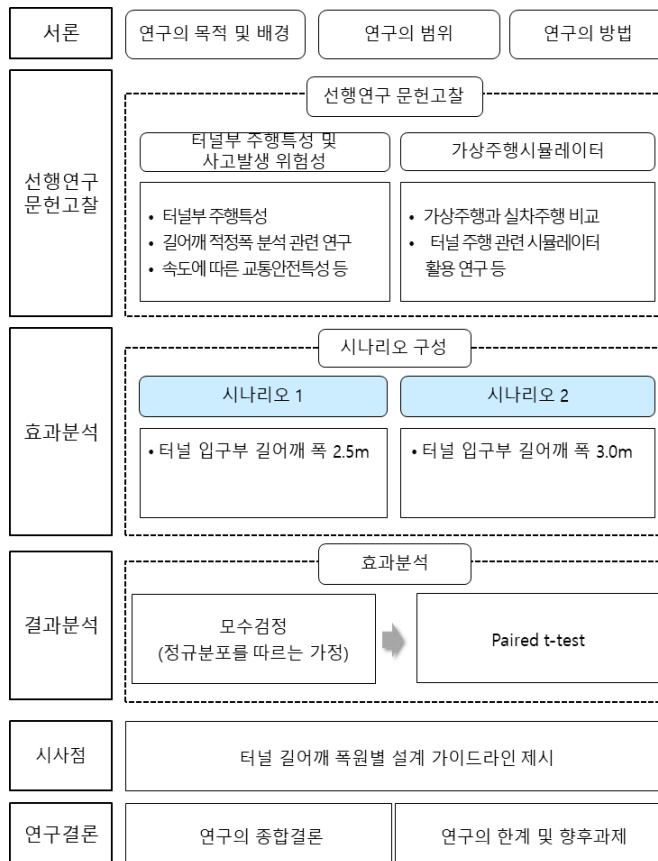
터널부(터널 진출입부와 터널 내부를 포함)의 경우 도로의 구조 설치 기준에 관한 규칙에 의거하여 설계되고 있으나, 터널 입구부분의 경우 운전자들의 시야가 어두워지면서, 압박감에 의해 감속하게 되어, 불필요한 정체를 야기할 수 있다. 일본의 동일본고속도로주식회사(NEXCO :Centrol Nippon Experssway)는 일본 고속도로에서 발생하는 정체의 약 13%가 터널입구부에서 발생하고 있으며, 이에 따른 정체 및 추돌사고가 야기된다고 분석하였다 [2].

2020년 3월 국토교통부는 안전상의 이유로 길어깨 폭을 확장하고자 관계법령(도로의 구조·설치 기준)의 관한 규칙을 개정하였으나, 길어깨를 주행차로로 이용할 경우에만 적용이 가능하여 터널진

입부의 길어깨 확대 적용에는 한계가 존재한다.

터널 진입부 길어깨 폭별 터널 교통사고 분석 및 가상주행시뮬레이션을 활용하여 터널 진입부 길어깨 확대에 의한 안전성을 분석할 경우, 보다 안전하고 실용적인 도로건설정책 추진이 가능할 것으로 예상된다. 특히 터널구간이 증가하는 국내 도로건설 사업에서 도로이용자들의 안전성과 시간가치 충족과 더불어 도로건설 실무자들의 업무추진에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 터널 진입부의 길어깨 폭별 운전자의 주행특성을 분석하고, 최적화된 터널진입부 길어깨 폭원을 제시하고자 한다. 동일한 기하구조상에서 길어깨 폭만을 변화시켰을 때의 변화만을 측정하기 위해서 가상주행시뮬레이션을 활용하며, 공간적 범위를 고속도로로 한정하여 진행한다.



[그림 1] 연구 흐름도

[Fig. 1] Study flow chart

연구순서는 [그림 1]과 같이 기존 문헌을 고찰하여, 터널 정체 발생의 원인 및 분석방법을 정립하고, 연구목적에 맞는 실험과정을 설계한다. 그 후 시나리오를 구성하여 각 시나리오별 길어깨 폭원을 변경하여 폭원별 운전자의 주행행태를 비교한다. 주행행태 변화에 대한 효과척도(Measure Of

Effectiveness)는 주행속도, 차로중심에서 벗어난 거리 및 핸들조향 각도이며, 터널 진입 전부터 후까지의 주행위치에 따른 속도데이터를 수집한다.

대응표본 검정의 통계적 방법을 이용하여 길어깨 폭원별 주행행태 변화가 발생하였는지 검증한 후, 안전성 측면에서 유의미한 결과가 나타난 시나리오를 중심으로 터널 길어깨 폭원별 설계 가이드라인을 제시한다.

## 2. 관련연구

### 2.1 터널의 정의

터널이란 산, 바다, 강 밑을 뚫어 만든 굴 형태의 통로를 의미한다. 터널 설계시 평면선형은 가능한 직선으로 설계하여야 하며 차량의 속도 등에 따라 결정되어야 한다.

### 2.2 국내터널 횡단구성 지침

고속도로 설계지침서에 따르면, 터널 대부분의 차로폭원은 3.5m, 좌우 측방여유폭원은 1.0m 정도를 기준으로 하고 있다. 고속도로의 경우 우측 측방 여유폭은 일방향 2차로 터널의 경우 2.5m 이상, 일방향 3, 4차로 터널의 경우 1.0m 이상으로 설치하도록 규정하고 있다 [3].

또한 도로의 구조·설치 기준의 관한 규칙에 따르면, 차로의 오른쪽에 설치하는 길어깨의 폭의 경우 설계속도가 100km/h 이상인 지방지역은 3.00m로 규정하고 있다.

### 2.3 터널부 주행특성

일반 본선부에서 주행하는 차량은 터널부에 진입하면서 터널의 횡단면(차로폭, 좌/우측 길어깨 폭 등), 선형(종단, 평면선형 등)과 같은 기하구조에 의해 심리적인 폐쇄감이 발생하여 속도저하가 발생하게 된다.

관련 연구로, 터널구간 진입시 측방여유폭 및 조도의 변화로 운전자의 좌우 주시폭이 저하되어 속도가 저하된다고 판단하였다 [4]. 터널 진입부에서 운전자의 반응을 뇌파분석해본 결과, 터널 진입직전 운전자의 불안뇌파가 19.7%(터널 전 21.28에서 입구 25.48) 증가하였다 [5].

중부고속도로 육십령터널 진입시의 주행특성 분석결과, 터널 진입전 200m보다 터널 입구에서 각성수준이 약 41% 증가하였다 [6].

또한, 터널부 길어깨 폭원에 의한 근본적인 속도감소 영향은 고속도로와 같이 높은 주행속도를 갖는 터널부의 차로당 약 800대/시 이상에서 약 1,400대/시 이하의 일정 교통량 수준에서 일부 발생하는 것으로 나타났다 [7].

## 2.4 길어깨 적정폭 분석 관련 연구

가상주행 시뮬레이터를 이용하여 왕복 8차선 고속도로에서 길어깨 폭이 0m, 0.5m, 0.75m, 1.5m, 2.5m일 때 주행속도 및 차로 중심에서 벗어난 거리를 분석한 결과, 길어깨 폭과 주행속도는 영향이 없는 것으로 나타났으며 길어깨 폭이 2.5m일 때 가장 차로의 중앙에서 주행하는 것으로 나타났다 [8]. 터널 내부에서 길어깨 폭에 따른 안전성을 가상주행 시뮬레이터를 이용하여 분석한 결과, 길어깨 폭이 3.0m 이상으로 증가할수록 차로 편측이 감소한다고 제시하였다 [9].

## 2.5 가상현실기술 활용 연구

터널부의 주행안전성을 분석하기 위하여 가상현실기술을 활용한 시뮬레이션 적용 연구가 진행되고 있다. 관련 연구로 동영상식 VMS로 사전정보제공시 터널 내 2차 사고의 감소효과를 분석하였으며, 운전경력 1년 이상의 총 99명의 남녀 운전자를 대상으로 가상주행 실험을 실시하였다. 주행속도, 브레이크 시점 등에 대해 그룹간의 비교는 모수방법 및 비모수방법 모두 사용하여 비교분석하였으나, 20~30대의 연령대의 실험참여자가 대부분으로 일반화로 적용하는데는 제한점을 지닌다 [10]. 또한, 터널부 갓길차로제를 시행효과를 분석하였으며, 운전자의 안정적인 주행 여부를 분석하고자 20~30대의 25명 및 고령운전자 22명을 대상으로 가상주행 실험을 실시하였다. 연구에서는 뇌파 및 주행행태에 대해 ANOVA 분석을 실시하였으나, 40대~60대의 피실험자가 없으며 운전자의 실제 주행능력이나 숙련 정도의 차이를 반영하지 못하였다 [11].

## 2.6 기존연구의 한계와 본 연구의 차별성

터널 진입전 주행속도 감소는 도로기하구조, 구조물 등의 다양한 요인이 존재하며, 이는 운전자의 심리에 영향을 미쳐 불필요한 감속을 유발한다. 운전자의 심리에 영향을 미치는 주요요인은 차로폭, 우측길어깨폭 등이다. 차로폭의 경우 도로등급에 따라 일정하게 건설되고, 전체노선의 도로폭을 동일하게 해야하기 때문에 공사비 측면에서 확폭이 어려운 상황이다. 하지만, 우측길어깨의 경우 가변차로운행과 더불어 확폭이 가능하고, 일부 터널구간에서만 적용도 가능하다. 이를 고려하여 터널 진입부의 우측길어깨 폭에 대한 다수의 연구가 진행되었지만, 속도측정의 어려움으로 1개 터널에 대하여 영상장비만을 사용하여 분석한 수준이다. 또한 동일한 조건에서 우측길어깨폭만의 변화를 비교할 수 없어, 외생변수의 영향으로 순수한 길어깨 확폭 효과라 단정지을 수 없었다.

이를 보완하고자 본 연구에서는 가상현실기술(가상주행시뮬레이션)을 이용하여 동일한 조건에서 길어깨 폭만을 변화시켜 길어깨 폭 확장에 따른 효과를 상대비교하도록 한다.

또한, 가상주행시뮬레이션의 장점으로 기존에 20m 단위로 측정한 속도정보를 10m 단위 이하로

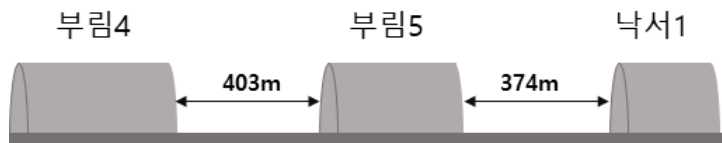
자세하게 분석할 수 있으며, 주행속도 외에도 가상주행시뮬레이션시 추출할 수 있는 차로중심에서 벗어난 거리 및 핸들조향을 분석하여 속도변화 뿐만 아니라 차로이탈 가능성 등도 검토한다.

실험에 참가할 피실험자는 기존 연구에 착안하여 통계적 유의성을 판단할 수 있는 샘플 확보가 가능한 30명으로 하였으며, 보다 현실적인 가상주행환경 제공을 위하여 실제 도로를 배경으로 실험맵을 설계하여 진행하였다.

### 3. 길어깨 폭에 따른 주행안전성 효과분석방법

#### 3.1 대상지역

본 연구의 대상구간은 고속국도 제14호선 함양-창녕 제11공구(부림~남지)로 왕복 4차로의 6.46km의 도로이다. 제11공구는 곡선반경이 2,600m~5,000m로 이루어져 있으며 연속된 터널부와 교량부로 구성된 긴 도로구간이다. 해당 도로는 설계단계의 도로로서 의령낙동대교를 포함하여 총 7개의 교량이 있으며, 부림4터널을 포함하여 약 3,414m의 3개소 터널이 있다. [그림 2]와 같이 본 연구의 대상구간인 3개 터널은 전방터널의 출구와 후방터널의 입구가 500m 미만으로 연속터널로 구성되어 있으며, 교통 측면에서 최대 이격거리가 403m로 이루어져 있다.



[그림 2] 연구 대상구간의 터널 이격거리

[Fig. 2] Tunnel separation distance of study subject

전 구간은 제한속도 100km/h의 도로이며 편도 2차로로 구성되어 있으며, 차로 폭은 3.6m, 터널 내부 좌측 길어깨 폭은 1.0m 및 교량의 좌측 길어깨 폭은 1.2m로 구성되어 있다.

#### 3.2 분석방법

본 연구는 계획 중인 도로에서 다양한 기하구조별로 운전자의 주행행태를 분석하는 것으로 실제 차량으로 주행데이터를 분석하는 것은 불가능하다. 또한, 실제 도로의 경우 실험 중에 발생할 수 있는 교통사고요인을 배제할 수 있으며 모든 피실험자에게 동일한 상황을 제공할 수 있어 다양한 변수를 통제할 수 있다. 이에 본 연구에서는 가상주행시뮬레이터를 활용하여 효과분석을 하고자 한다.

본 연구에 활용되는 자료는 터널 진입부의 우측 길어깨 폭에 따른 주행안전성 효과를 분석하고자 함양-창녕 고속국도 11공구의 기하구조 정보를 바탕으로 가상주행 맵을 구축하였으며, 피실험자를 대상으로 가상주행시뮬레이터로 가상주행실험을 실시하여 취득하였다.

과거의 가상주행 시뮬레이터는 애니메이션화된 화면을 2차원 평면으로 피실험자에게 보여줘 피실험자는 실제 운전상황과 상이하게 느꼈으나, 현재는 3차원 공간으로 주행환경을 제공하여 실제 운전상황과 거의 유사하게 재현이 가능하다.

본 연구에서 사용된 장비는 I-drive 3ch, 2DOF MP 품종으로 PCIG영상 엔진, 32인치 3채널, 1/4차량 형태의 캐빈 및 CFLS, 2축 전기식 1인승 모션 플랫폼, 운영 computer 1식, 조명 및 Air Conditioner 1식으로 구성되어 있으며, [그림 3]과 같다.



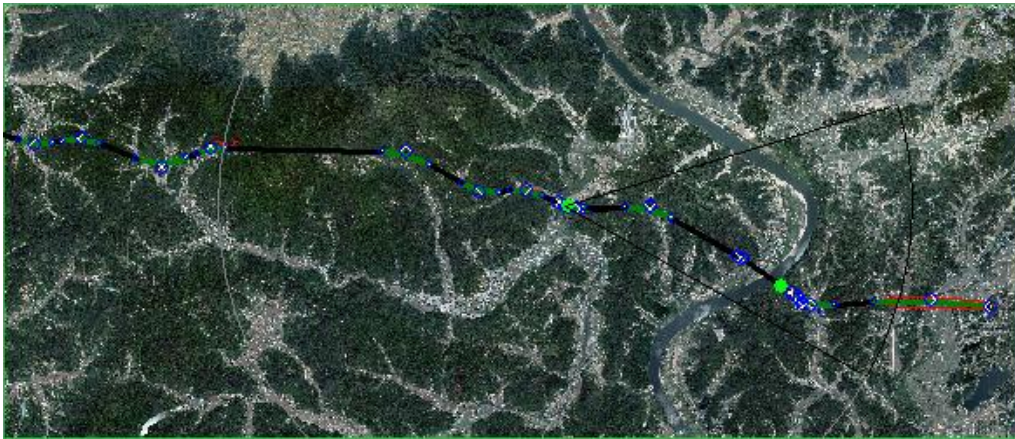
[그림 3] 가상주행 시뮬레이터

[Fig. 3]Driving Simulator

### 3.3 실험개요

본 연구의 실험은 터널 입구부의 길어깨 폭을 달리할 경우 운전자가 주행안전성 측면에서 변화가 있는지를 분석하는 것으로, 터널 입구부의 길어깨 폭을 2.5m와 3.0m로 다르게 하여 실험을 진행하였다.

터널의 연장이 짧을 경우 토공부와 터널 내부의 길어깨의 폭원변화가 잦아 운전자가 주행차로에 대해 혼선을 유발시킬 수 있으나, 본 연구 구간은 터널 연장이 평균 571m로 터널 내 주행시간이 평균 20초로 토공부와 터널 내부의 길어깨의 폭원 변화에 따른 혼선은 유발시키지 않는 것으로 판단하였다. 이에 본 연구에서는 길어깨 폭을 고속도로 설계지침서에서 규정하고 있는 고속도로 2차로 터널의 우측 측방여유폭인 2.5m와 동일하도록 2.5m와 교량부와 도로의 구조·설치 기준의 관한 규칙에 따라 지방지역의 설계속도 100km/h 이상인 도로의 오른쪽 길어깨 최소 폭인 3.0m로 하여 실험을 진행하였다. [그림 4]는 실험 대상 노선도이다.



[그림 4] 실험구간 노선도

[Fig. 4] Route map of the experimental section

다음 [그림 5]는 시나리오 1(길어깨 폭 2.5m)과 시나리오 2(길어깨 폭 3.0m)의 맵 구축 모습이다.



[그림 5] 터널 진입부 길어깨 폭 (좌) 시나리오 1- 2.5m, (우) 시나리오 2 - 3.0m

[Fig. 5] Tunnel entry shoulder width of Scenario 1- 2.5m(left) and Scenario 2 - 3.0m(right)

실험은 차량시뮬레이터에 실험에 대한 절차 및 전반적인 유의사항 등을 주지시킨 후 시뮬레이터에 적응을 위하여 연습운전을 실시하였으며, 연습운전 후에는 sickness를 최소화하기 위하여 약 5분간의 휴식을 취한 후 실험을 진행하였으며, 실험에서는 제한속도 100km/h라는 정보만을 제공하였다. 또한, 실험순서는 실험자별로 랜덤으로 진행하였다.

### 3.4 피실험자 구성

피실험자는 30명을 대상으로 하였으며, 다양한 연령층에 대해 실험을 진행하고자 20대에서 60세 이상의 피실험자를 모집하였다. 피실험자의 구성은 [표 2]와 같다.

[표 2] 실험별 피실험자 구성

[Table 2] Composition of subjects

(단위 : 명)						
구분	20대	30대	40대	50대	60세 이상	합계
남	6	3	2	2	5	18
여	6	1	3	2	0	12

### 3.5 효과척도 및 통계적 분석방법

효과척도로는 주행안전성 측면을 분석하고자 주행속도(km/h), 차로 중심에서 벗어난 거리 및 핸들조향 각도를 선정하여 길어깨 폭별 운전행태를 비교분석하였다. 운전자 별로 길어깨 폭의 차이에 따른 주행특성을 비교하기 위하여 기술통계분석에서는 길어깨 폭 별로 평균, 표준편차, 최소값, 최대값을 분석하였으며, 통계적 분석방법으로는 각 집단의 케이스가 30명 이상이기때문에 두 표본의 평균을 비교하는 대응표본 t검정(paired t-test)를 수행하였다. 대응표본 t검정은 같은 집단의 대응되는 두 변수를 비교할 때 활용하는 방법으로 모집단이 정규분포를 따른다는 가정을 만족하여야 한다. 통계적 분석의 신뢰수준은 95%로 하여 결과를 해석했으며, 본 연구의 통계적 가정은 다음과 같다.

$H_0$ (귀무가설) : 길어깨 폭의 2.5m일 때와 3.0m일 때의 평균 차이는 없다.

$H_1$ (대립가설) : 길어깨 폭의 2.5m일 때와 3.0m일 때의 평균 차이는 있다.

## 4. 분석결과

### 4.1 주행속도

#### 4.1.1 평균 주행속도

[표 3] 평균 주행속도 분석결과

[Table 3] Results of average driving speed analysis

구분	부림4	부림5	낙서1	평균
시나리오1 - 길어깨 2.5m	100.92km/h	100.08km/h	99.38km/h	100.73km/h
시나리오2 - 길어깨 3.0m	101.89km/h	101.28km/h	100.38km/h	101.69km/h

터널 진입부 전 200m부터 터널 내부의 주행속도를 분석한 결과, [표 3]과 같이 길어깨 폭이 3.0m인 경우 길어깨 폭이 2.5m일 때보다 0.96km/h 높게 나타났다. 길어깨 폭이 2.5m일 때와 3.0m

일 때 모두 주행을 하면서 평균 주행속도가 감소하였으며, 이는 터널 입구부에서 감속한 운전자가 터널 길이도 짧으며 터널간 간격이 짧아 주행속도를 높이지 못하여 발생한 결과로 판단된다.

#### 4.1.2 터널 입구부 속도편차

터널 입구부의 평균 주행속도는 [표 4]와 같이 길어깨 폭이 3.0m일 때가 2.5m일 때보다 약 2.15km/h 높은 것으로 나타났다. 이는 평균 주행속도가 길어깨 폭이 3.0m일 때가 더 높기 때문인 것으로 판단된다.

[표 4] 터널 입구부 평균 주행속도

[Table 4] Average driving speed at the entrance of the tunnel

구분	부림4	부림5	낙서1	평균
길어깨 2.5m	97.56km/h	97.76km/h	97.70km/h	97.67km/h
길어깨 3.0m	99.89km/h	100.06km/h	99.52km/h	99.82km/h

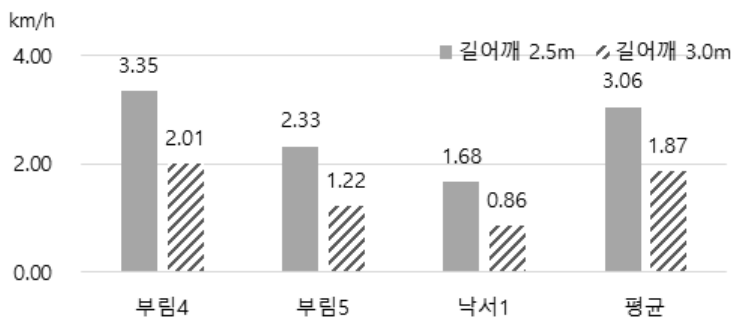
분석 구간의 평균 주행속도와 터널 입구부의 주행속도의 차이를 분석한 결과, [표 5]와 같이 길어깨 폭이 2.5m일 때는 평균 3.06km/h의 속도편차가 발생하였으며 길어깨 폭이 3.0m일 때는 평균 1.87km/h의 속도편차가 발생한 것으로 나타났다.

[표 5] 터널 입구부 속도편차

[Table 5] Speed deviation at the entrance of the tunnel

구분	부림4	부림5	낙서1	평균
길어깨 2.5m	3.35km/h	2.33km/h	1.68km/h	3.06km/h
길어깨 3.0m	2.01km/h	1.22km/h	0.86km/h	1.87km/h

[그림 6]은 길어깨 폭별 터널 입구부 속도편차를 그래프로 나타낸 것이다.



[그림 6] 터널별 터널 입구부 속도편차

[Fig. 6] Speed deviation at the entrance of the tunnel

#### 4.1.2 통계적 검증 및 소결

길어깨 폭이 2.5m일 때와 3.0m일 때의 평균 주행속도와 속도편차는 상이하게 나타났다. [표 6]과 같이 평균 주행속도의 경우 길어깨 폭이 2.5m일 때는 100.73km/h, 길어깨 폭이 3.0m일 때는 101.69km/h로 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타나 차이가 없는 것으로 분석되었다. 이는 길어깨 폭이 주행속도 측면에서는 영향이 크게 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

분석구간의 평균 주행속도와 터널 진입시 평균 주행속도와의 속도편차를 분석한 결과, 길어깨 폭이 2.5m일 때는 3.06km/h, 길어깨 폭이 3.0m일 때는 1.87km/h로 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이는 길어깨 폭이 3.0m일 경우 주행안전성 측면에서 안전성을 느낄 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

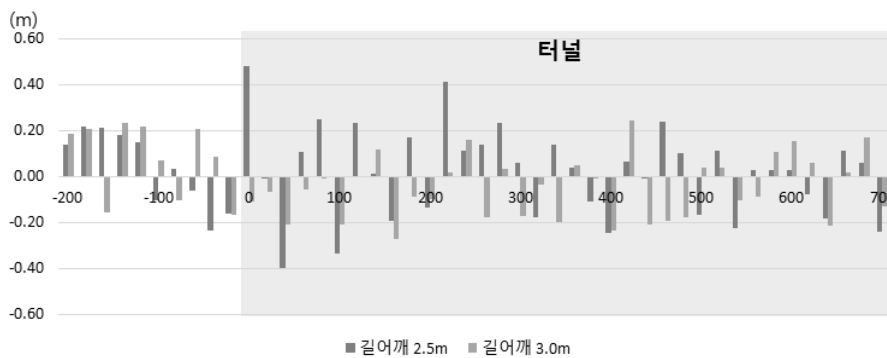
[표 6] 통계적 검증 결과 - 주행속도 및 속도편차

[Table 6] Results of Statistical Verification - Driving Speed and Speed Deviation

구분		M	SD	Paired t-test	
				T	P-value
주행속도 (km/h)	길어깨 2.5m	100.73	3.96	-0.88	0.38
	길어깨 3.0m	101.69	4.25		
속도편차 (km/h)	길어깨 2.5m	3.06	0.59	7.58	0.00
	길어깨 3.0m	1.87	0.55		

#### 4.2 차로 중심에서 벗어난 거리

차로 중심에서 벗어난 거리에 대해 절대값을 분석한 결과, [그림 7]과 같이 길어깨 폭이 2.5m일 때는 0.16m, 길어깨 폭이 3.0m일 때는 0.13m로 나타났다.



[그림 7] 길어깨 폭에 따른 차로 중심에서 벗어난 거리

[Fig. 7] Distance from the center of the lane according to shoulder width

대응표본 t-test를 활용하여 통계적 유의성을 분석한 결과, [표 7]과 같이 95% 신뢰수준에서 p-value 값이 0.05 이상으로 나타나 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 길어깨 폭이 차로 중심에서 벗어난 거리에 영향이 크게 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

[표 7] 통계적 검증 결과 - 차로 중심에서 벗어난 거리

[Table 7] Statistical Verification Results - Distance from the center of the lane

구분		M	SD	Paired t-test	
				T	P-value
차로 중심에서 벗어난 거리	길어깨 2.5m	0.16	0.10	1.59	0.12
	길어깨 3.0m	0.13	0.08		

### 5. 결론

국내 고속도로 터널은 한국도로공사의 고속도로 설계지침서에 따라 우측길어깨폭을 2.5m 이상으로 설치하고 있다. 하지만 개통시기에 따라 우측 길어깨 폭이 1.5m~3.5m 까지 다양하고, 일부 구간에서는 사고다발 및 상습정체가 발생하고 있다. 우측 길어깨 폭에 따른 운전자들의 행태를 분석하고, 교통안전 및 운영상의 문제발생 원인을 도출하고자 하였다.

과거 연구에서는 고속도로 CCTV 및 별도의 촬영영상을 비교분석하여, 우측 길어깨 폭에 따른 주행행태변화를 분석하고자 하였다. 하지만 지점별 도로기하구조를 비롯한 교통환경에서 차이가 존재하여, 순수한 길어깨 폭 변화에 따른 주행행태변화를 분석하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 가상주행시뮬레이터를 활용하여 터널 길어깨 폭별 주행행태를 분석하였다. 우측 길어깨 폭은 고속도로 설계지침서에 따라 2.5m일 때와 3.0m일 때로 구분하여 주행속도, 속도편차, 차로 중심에서 벗어난 거리 및 핸들조향 각도를 분석해 보았다.

여기서 2.5m와 3.0m로 상대비교를 한 것은, 2009년 고속도로 설계지침서 발간 이후 우측 길어깨 폭은 2.5m를 준수하여 건설되고 있으며, 2018년 이후 교통량 증가로 교통소통에 문제가 야기되는 구간에 대해서는 우측길어깨를 3.0m 이상으로 건설하여 가변차로로 운영하는 구간이 증가하고 있기 때문이다.

연구 결과, 터널 진입시 운전자가 터널에 진입시 심리적 압박감으로 인해 발생하는 불필요한 감속이 38.9% 감소하였다. 이는 터널진입 전후 속도편차로 확인이 가능하였다. 즉, 우측길어깨가 0.5m만 증가하여도 운전자들의 심리적 안정감이 크게 증가한다고 판단할 수 있다. 그에 주행속도는 우측길어깨 폭 증가시 약 1.0%(0.96km/h) 증가하여 소통측면에서도 일부 향상되었다. 피실험자가 도로를 단독으로 주행하여, 주위차량의 방해가 없어 속도 증가폭이 높진 않았지만, 교통량이 많은 구간에서는 주위차량과의 연쇄작용으로 인해 주행속도의 폭이 증가할 수 있다.

실험을 통해 분석된 결과 외에도 고속도로 사고자료를 기반으로 우측 길어깨 폭에 따른 사고율

을 비교분석하였다. 우측 길어깨가 2.5m 이하일 경우 3.0m 이상일 경우에 비해 평균 사고율이 약 1.6배 높은 것으로 나타났다. 이는 실험결과와 같이 터널 진입시의 속도변화가 후미추돌과 같은 사고로 이어질 수 있다는 것을 객관적으로 설명할 수 있다.

연구결과를 종합하여, 터널진입부 사고다발지점의 개선과 신규 고속도로 노선 중 교통량이 높은 구간에 대한 설계 개선방안을 제시하고자 한다. 터널 길어깨 폭의 3.0m 확장은 안전성만을 고려할 경우 높은 증진 효과를 나타낼 수 있으나, 건설비용을 고려할 경우 모든 고속도로 터널구간에서의 확장은 비용적 한계가 있다.

과거 한국도로공사(2014)에서는 도로용량에 근거하여 길어깨 폭적용 교통량을 제시한 적이 있다. 해당 연구에서 사용한 기준교통량 산정 방식을 사용하여 서비스 수준이 F이하로 떨어져 교통사고 및 소통에 문제가 발생하는 구간의 교통량을 제시하고자 한다.

$$\begin{aligned} \text{기준 교통량} &= \text{기본용량}/\text{KD} \times \text{PDF} \times f_{HV} \times f_W \times v/c \\ &= 2,200\text{pcphpl} / 0.0556 \times 0.897 \times 1 \times 1 = 33,363 \text{ 대/일} \end{aligned}$$

여기서, KD : 중방향설계시간계수(전국고속도로평균)

PHF : 중차량 구성비(전국고속도로평균)

$f_{HV}$  : 중차량 보정계수(전국고속도로평균)

$f_W$  : 측방여유폭 보정계수(도로용량편람)

상기 식에서 고속도로 기본구간의 측방여유폭 보정계수는 국토교통부 도로용량편람에서 좌측과 우측 길어깨폭의 평균이 1.5m 이상으로 보정계수 1을 적용하고 있다. 하지만 터널부의 경우 측방여유폭에 의한 용량이 본선부와 달리 터널 입구부 감속으로 인하여 1이하로 감소하기 때문에 해당 구간에서 서비스수준 F로 내려가며, 정체가 발생한다. 따라서, 일평균 교통량 33,000대를 기준으로 33,000 대 이상의 교통량을 보이는 도로구간에 대해서는 향후 고속도로 설계시 우측 길어깨 폭을 3.0m 이상으로 확장시켜 안전성 및 운영성을 모두 확보할 필요가 있다.

본 연구는 연구범위의 한계상 터널 입구부 조명밝기, 교통량, 제한속도 등 안전성에 영향을 미치는 영향요인의 다변화 및 상관관계를 고려하지 못하였으며, 속도편차에 대한 안전성 저하수준을 정량화하지 못하고 상대비교 결과만을 제시하였다.

향후에는 영향요인에 따른 실험 범위를 확대하여 터널부 안전성 향상을 위한 최적의 설계방안을 제시할 필요가 있다. 또한, 연구결과의 논리적인 활용 근거를 강화하기 위해서는 실제 터널부에 IoT 센서를 장착하고 수집된 빅데이터를 가공 분석할 수 있는 IoT 플랫폼과의 연계가 필요하다. 현재 국내에서 도로교통관 관련된 IoT 도로정보(운영, 포장, 구조물 등) 수집 플랫폼이 개발되고 있는 시점으로, 수년 내 해당 기술과의 연계는 현실화될 것이다.

## References

- [1] Ministry of Land Infrastructure and Transport, "Facility Statistics", [bti.kict.re.kr](https://bti.kict.re.kr), <https://bti.kict.re.kr/bti/publicMain/main.do>, (accessed October 5, 2021).
- [2] East Japan Expressway Co., Ltd., "Cause of congestion at the entrance of the tunnel", [c-nexco.co.jp](https://www.c-nexco.co.jp), <https://www.c-nexco.co.jp/ko>, (accessed October 11, 2021).
- [3] Ministry of Land Infrastructure and Transport, "Rule Commentary on Road Structure and Facility Standards", [law.go.kr](https://www.law.go.kr), <https://www.law.go.kr/LSW/eng/engMain.do?eventGubun=060124>, (accessed October 11, 2021).
- [4] H. Y. Kim, "Study on Analysis of Driver's Visual Behavior on the Tunnel Section of Expressway", Master's thesis, Department of Transportation Engineering, Myungji University, Republic of Korea, 2000. [Online]. Available: <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=DIKO0011788987&dbt=DIKO>.
- [5] S. P. Hong, M. S. Jang, C. Oh, J. Y. Kim, "Analyzing drivers' physiological reaction in highway tunnel entrances", Conference of the Korean Transportation Association, November 3-4, 2006, Seoul, Republic of Korea, pp. 694-700.
- [6] J. Y. Kim, H. J. Kim, M. S. Jang, "Analyzing drivers' visual response variation in very long expressway tunnel ; the Yuksimnyeong tunnel", *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 27, no. 1, February 2009, pp. 17-25.
- [7] J. H. Lee, J. Y. Kim, D. S. Kim, S. B. Lee, "A Study on Safety Improvement of Safety Devices at Entrance of Expressway Tunnels", *International Journal of Highway Engineering*, vol. 10, no. 4, December 2008, pp. 235-245.
- [8] H. Ding, X. Zhao, J. Rong, "Driving Simulator Study of Effect of Inside Shoulder on Vehicle Operation", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, iss. 2, January 2015, pp. 1-6. doi: 10.1155/2014/834131.
- [9] S. Liu, J. Wang, T. Fu, "Effects of Lane Width, Lane Position and Edge Shoulder Width on Driving Behavior in Underground Urban Expressways: A Driving Simulator Study", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13, no. 10, October 2016, doi: 10.3390/ijerph13101010.
- [10] S. M. Shin, S. B. Lee, H. K. Kim, M. J. Park, K. T. Kim, "Effect of Prior Information Given by Video type VMS on Reduction of Secondary Accidents in Tunnels", *Journal of Korean Society of Safety*, vol. 34, no. 2, April 2019, pp. 56-62, doi: 10.14346/JKOSOS.2019.34.2.56.
- [11] S. C. Hwang, S. H. Kim, D. M. Lee, "Driving Behavior on Hard-Shoulder Lanes in Tunnels using a Driving Simulator", *International Journal of Highway Engineering*, vol. 21, no. 3, June 2019, pp. 87-96, doi: 10.7855/IJHE.2019.21.3.087.