

터널 조명배열 유형과 운전자 주행행동 및 인식 간의 관계 분석

Exploratory research on the relationship between tunnel lighting
design and driving behavior and cognition

주 저 자 : 신소현 (Shin, So Hyeon)

한양대학교 실내건축디자인학과

교 신 저 자 : 민아람 (Min, Aram)

한양대학교 실내건축디자인학과

mindeed@hanyang.ac.kr

<https://doi.org/10.46248/kids.2021.3.299>

접수일자 2021. 08. 28. / 심사완료일자 2021. 09. 14. / 게재확정일자 2021. 09. 26.
본 논문은 2021학년도 2학기 한양대학교 산학협력단 BK21연구비에 의하여 연구 되었습니다.

Abstract

Recently, an increase in the number of tunnels and their elongation have raised the risk of accident rates in tunnels. The closed and narrow characteristics of the tunnels inevitably affect the psychology and the cognition of the drivers. In this research, we quantify tunnels over 1km by design elements, and the relationship with real-world accident data is analyzed using multiple linear regression. As a result, we found out that the tunnel's width, number of lanes, presence of a curve, and presence of lighting in the tunnel's end had a significant relationship to the accident data. Meanwhile, the number of lighting colors and lighting array types had a minimal relationship. To investigate the regression results more in-depth, we conducted experiments that simulate the driving situations with diverse lighting array counts and sides at curved parts of the tunnels. For the experiment, we designed six different scenarios, each with three different tunnels with three different crash points. There were 18 participants, and each was given one scenario to drive using a racing wheel for the sense of reality. After the simulation experiment, we interviewed the subjects to identify the drivers' attitudes toward the actual road and tunnel driving experiences. From the interviews, we were able to identify that the relationship between the tunnel lighting designs and driving behaviors and cognition of the drivers is, in fact, complex. For instance, while the subjects answered that they felt more focused when there was a single array of lighting, the actual crash rate was substantially lower when there was a double line of lighting. These findings indicate that there needs further research with various lighting designs such as the color, spacing, and shape.

Keyword

Tunnel lighting design, Driving simulation, Driving behavior

요약

최근 터널의 증가와 터널의 장대화로 터널 내 사고율의 위험성이 높아지고 있다. 터널의 폐쇄적이고 협소한 공간은 운전자들의 심리를 자극한다. 이에 따라 국내외 각종 터널 관련 문헌 조사 및 분석, 국내외 터널 조명 관련 분석 등을 바탕으로 1km 이상 터널을 와내부 디자인 요소별로 정량화하며 사고데이터와 관계를 분석한다. 데이터 기반 사전연구를 통해 터널의 어떤 디자인 요소가 사고량과 가장 연관성이 있는지 규명하고 이후 관련 요인에 대한 심층적 분석을 위해 운전 시뮬레이션을 이용한 2차 실험을 진행하여 정확하게 어떤 관계가 있는지 파악하는 것이 연구의 목적이다. 다중회귀분석으로 이행된 데이터 기반 사전연구에 의하면 터널의 넓이, 차선 수, 터널 곡선의 유무, 그리고 출구부 조명의 여부가 사고량과 유의미하게 관련이 있는 것으로 도출되었다. 이 외 조명 색의 다양성과 조명의 개수 및 위치가 미미한 관계를 보였는데, 이에 대한 심층적 요인 파악을 위해 시뮬레이션 실험을 총 18명의 피실험자를 대상으로 진행하였다. 몰입감 있는 운전 주행 시뮬레이션을 위해 게임 엔진인 Unity를 활용하여 실제 터널 모양과 유사하게 모델링 하였으며 현실감을 위해 Racing Wheel을 활용하였다. 각 참여자는 총 6가지의 터널 시나리오 중 하나의 시나리오를 배정받아 주행하였으며 각 시나리오는 3개의 터널에 3개의 충돌지점이 포함되어 설계되었다. 터널 주행 후에는 인터뷰를 진행하여 운전자들의 실제 도로 또는 터널 운전 경험에서 나오는 감정 요인을 파악하였다. 이 결과 터널 내에서의 조명개수 및 위치는 운전자 주행 행동 및 심리인식적 측면과 다소 복잡한 관계를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 특히 조명배치가 1배열일 때 집중도가 높아졌다는 인터뷰 결과와 상반되는 2배열일 때 충돌률이 줄어드는 수치적 결과는 오히려 조명 디자인이 너무 한곳에 집중되어 있으면 시각적 장애물 역할을 한다는 것을 유추할 수 있었으며, 조명이 전체적으로 너무 과할 경우, 눈에 피로도 또한 운전 주행에 방해가 될 수도 있다는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 조명 디자인의 다양한 유형(색상, 배치 간격, 형태 등)에 관한 심층적 연구의 확장이 필요함을 강조할 수 있었다.

목차

1. 서론

- 1-1. 연구의 배경 및 목적
- 1-2. 연구의 범위
- 1-3. 연구의 흐름

2. 장대 터널디자인 요소

- 2-1. 터널의 와내부 디자인 요소
- 2-1. 조명의 필요성
- 2-2. 조명 디자인의 중요성

3. 데이터 기반 사전연구

- 3-1. 분석 방법
- 3-2. 분석 결과

4. 시뮬레이션 실험

- 4-1. 실험설계 및 시나리오
- 4-2. 실험 장비
- 4-3. 실험절차

5. 분석결과

- 5-1. 기초 분석
- 5-2. 측면 조명개수 및 위치와 충돌 위치 관계
- 5-3. 운전자의 부정적 심리상태와 조명개수 및 위치별 충돌률 관계
- 5-4. 터널 조명에 대한 인지도와 운전 주행 관계

6. 결론

참고문헌

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

도로를 주행하는 운전자들은 다양하게 변화하는 도로의 형상 그리고 구조물들을 인지하면서 주행 행동을 한다. 특히, 터널 구간의 경우 운전자들은 시각적인 영향은 물론 심리적인 측면의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다.

우리나라 터널의 도로는 고속국도, 일반국도, 특별광역시도, 지방도, 시도, 군도, 구도로 구분이 되며, 이러한 도로에 속한 터널은 2019년 12월 말까지 통계로 보면 2,682개소이다 (통계청, 2020)¹⁾. 도로 터널에서는 1km 이상을 장대 터널, 5km 이상을 초장대 터널이라 부른다. 우리나라의 지형적 조건과 안전한 선형설계를 위한 방편으로 터널 구간이 불가피하게 많이 건설되고 있다²⁾. 왕이완 외 3인 (2010)은 “최근에는 친환경적인 건설에 관한 관심이 높아짐에 따라 터널에 대한 수요가 늘어나는 추세다³⁾”라고 언급했다. 이러한

추세는 터널의 장대화로 이어지게 되었다.

터널은 일반도로와는 달리 폐쇄적이고 협소하고 운전자에게 심리적 불안감을 준다. 터널은 운전자의 집중력을 저하하며, 사고의 위험성을 내포하고 있는 도로 구간이다. Robatsch and Nussbaumer (2004)는 터널 충돌의 주요 원인은 경각심 부족과 행동 측면이라고 언급하는데 여기서 경각심 부족은 피로, 주의 산만, 부주의 등을 포함하며 행동 측면은 안전거리확보, 차선 유지, 추월 등이다⁴⁾. Thiffault and Bergeron (2003)⁵⁾은 단조로운 운전 시간이 길면 지루함과 피로를 유발할 수 있다고 언급하였다. 장대 터널이 점점 보편화됨에 따라 단조로운 터널의 문제는 운전자의 집중력에

1) 통계청, 도로 교량 및 터널 현황조사, 2020

2) 서임기, 박계진, 안병호, 이준영, 로짓모형을 이용한 고속도로 장대터널 교통사고특성분석에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 2012. 제32권, 제6D호

3) 왕이완, 금기정, 손승녀, 유재상, 감성공학을 고려한 터널 내부경관 평가 모형개발에 관한 연구, 한국도로학회논문집, 2010. 제12권, 제1호

4) Robatsch, K., Nussbaumer, C., Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr tunnels with uni- and bi-directional traffic, Im Auftrag des Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr, Stra Benforschung, 2004, 539

5) Thiffault, P., Bergeron, J., Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study, Accident Analysis & Prevention, 2003, 35.3

영향을 주어 속도감을 평가하는 능력을 저하하기도 하며 심하면 잃게 되기도 한다. 그 이유는 일반도로와 비교하면 운전자 주변의 시야가 좁혀지고 환경의 변화로 인한 시각적 자극이 부족하기 때문이다.

현재 우리나라 몇몇 터널을 제외하고는 터널의 디자인은 획일적이고, 디자인적 요소가 포함되어있지 않다. 또한, 터널에 관한 기존연구들은 터널의 안전성, 사고 분석 조명, 길이 등 많은 연구가 이루어지고 있지만⁶⁾⁷⁾⁸⁾, 터널의 구체적 디자인적 요소들을 이용하여 실제 사고데이터와 관계를 분석하여 관계 요인들을 측정하려는 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구는 국내외 각종 터널 관련 문헌 조사 및 분석, 국내외 터널 조명 관련 분석 등을 바탕으로 1km 이상 터널을 디자인 요소별로 정량화하며 사고데이터와 관계를 분석한다. 이로 인해 터널의 어떤 디자인 요소가 사고량과 연관성이 있는지 규명하고 이후 관련 요인에 대한 심층적 분석을 위해 운전 시뮬레이션을 이용한 2차 실험을 진행하여 정확하게 어떤 연관 관계가 있는지 파악하는 것이 연구의 목적이다.

1-2. 연구의 범위

본 연구는 국내 1km 이상의 장대 도로 터널을 대상으로 연구를 진행하였다. 255개의 장대 터널 중 온전한 데이터들로 구성된 185개의 터널을 연구 데이터로 사용하였다. 터널 사고데이터는 TAAS 교통사고 분석 시스템⁹⁾에서 2015년부터 2019년까지의 최근 5년간 데이터를 수집하였으며, 수집된 데이터는 터널 구간별 일일 교통량에 따라 사고량을 정규화(normalize)하였다. 그리고 해당 터널들의 디자인적 요소를 외부와 내부로 구분 지어 네이버 맵과 Google Map에서 제공하는 위성사진과 로드뷰를 활용하여 수집하였다. 외부 물리적 고려사항은 길이, 넓이, 높이, 차선 수, 터널 형

태 (직선/곡선), 터널 곡률(degree of curvature)로 나뉘며 내부 물리적 요소는 터널 압출구 부위의 조명 여부, 조명 색, 조명배열 패턴이다. 각 변수 선정 기준에 대한 내용은 2-1장에서 문헌조사와 함께 정리하였다.

1-3. 연구의 흐름

앞서 언급하였듯 본 연구는 일차적으로 데이터 기반 분석을 진행하였고, 이 분석결과에 따라 2차 실험을 진행하여 정확하게 어떤 인과관계가 있는지 심층적 분석을 하였다.

데이터 기반 분석의 경우, 교통량에 따라 정규화된 사고량과 유의미하게 연관성이 있는 터널디자인 요소를 규명하기 위해 와내부 디자인 요소를 정량화하였다. 정량화된 데이터를 통해 통계 프로그램 R을 활용하여 다중회귀분석을 진행하였다.

2차 실험의 경우, 위 사전 연구 결과를 바탕으로 유의미성이 미미한 요소로 나온 조명개수 및 위치에 대해 시뮬레이션 실험 진행하여 피실험자의 도로 및 터널에 대한 심리와 조명에 대한 인지 상태를 고려하여 분석해보았다. 몰입감 있는 운전 주행 시뮬레이션 구현을 위해서는 게임 엔진인 Unity를 활용하여 실제 터널 모양과 유사하게 모델링 하였다. 그리고 현실감을 위해 Racing Wheel을 활용하여 실험을 이행하였다.

본 논문에서는 데이터 기반 사전연구의 분석방법 및 결과를 정리하고 시뮬레이션 실험연구를 중점으로 피실험자의 도로 및 터널에 대한 심리와 조명에 대한 인지 상태를 고려하여 측면 터널 조명배열 변화와 충돌량에 대한 실험결과를 도출하였다.

2. 장대 터널디자인 요소

2-1. 터널의 와내부 디자인 요소

터널의 계속되는 증가로 인해 터널에 대한 연구는 다방면에서 진행되고 있는데, 그 중에서도 디자인 및 설계 측면과 안전성에 대한 연구들이 이루어지고 있다. [표 1]에서 정리하였듯이 선행연구들을 살펴보면 터널의 와내부 디자인 요소로 분류할 수 있다. 외부디자인은 터널의 곡률, 높이, 넓이, 차선 개수와 길이, 그리고 내부 디자인은 내벽 디자인, 조명에 따라 구분된다.

6) Kircher, K., Ahlstrom, C., The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers, Accident Analysis & Prevention, 2012, 47

7) He, S., Liang, B., Tähkämö, L., Maksimainen, M., The influences of tunnel lighting environment on drivers' peripheral visual performance during transient adaptation, Displays, 2020, 64

8) 한승희, 박억철, 운전자 선호도를 고려한 고속도로 터널 내 조명디자인의 조형특성 연구, 한국기초조형학회, 2014, Vol.15, No.2, 62호

9) <http://taas.koroad.or.kr/>

[표 1] 터널 디자인 요소 관련 선행연구

디자인 요소	연구내용
외부	터널 곡률 곡선 도로구간에서 운전자의 시각적 특성은 운전안전성을 향상시키는데 큰 의미를 가지고 있음 ¹⁰⁾
	높이 터널의 높이가 낮을수록 화재사고에 취약함 ¹¹⁾
	넓이 터널의 제한적인 공간 때문에 사고의 위험률이 높고 더 치명적인 피해로 갈 확률이 높음 ¹²⁾
	차선 개수와 길이 차선의 수가 많아질수록 차량 간의 충돌이 많아져 사고의 위험이 증가하며, 터널의 길이에 대해서는 길이가 증가함에 따라 운전자의 집중력이 감소하기 때문에 충돌횟수가 증가한다고 언급 ¹³⁾
내부	내벽 디자인 터널 설계 및 조명의 안전 효과를 평가한 결과, 밝은 색깔의 터널 내벽이 안전에 도움이 될 수 있음을 강조하였으며 ¹⁴⁾ , 터널 내벽의 디자인과 패턴의 폭과 길이의 장식들이 운전자의 속도에 영향을 미친다고 결과를 도출 ¹⁵⁾ ¹⁶⁾
	조명 컨조인트 분석을 통해 터널조명시설 설치조합과 운전자의 선호도 관계를 파악한 연구로서, 연구결과를 조명의 배열수가 운전자의 선호도에 가장 큰 영향을 미침 ¹⁷⁾
	조명이 터널의 안전시설 중 가장 기본적인 중요한 설비이며 벽면에 조명을 설치하는 것 보다 천정에 조명을 설치하는 것이 더 안전성과 시각적 쾌적함이 높아짐 ¹⁸⁾
	터널 내부경관에 대한 연구이며 터널 내부의 색체에 대한 선호도 감성요인을 분석하여 터널 내 조명 색체에 따른 운전자의 경관선호도에 영향을 미치는 색체의 정서성과 기능성을 제시 ¹⁹⁾
	주간에 터널로 진입할 경우에 발생하는 암순응에 의한 블랙홀 현상을 최소화하기 위해서 국내외 터널 조명 구역에서는 터널의 입구부에 밝은 조명을 설치하여 터널 외부와 내부의 밝기 차이를 감소시키는 방법을 제안 ²⁰⁾

- 10) Jiao, F., Du, Z., Wang, S., Yang, L., Ni, Y., Research on drivers' visual characteristics in different curvatures and turning conditions of the extra-long urban underwater tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99
- 11) 박원희, 터널 화재시 연기발생량 및 온도 예측 프로그램 개발, 한국철도학회논문집, 2007, 제10권, 5호
- 12) Zhou, Z., Meng, F., Song, C., Sze, N. N., Guo, Z., Ouyang, N., Investigating the uniqueness of crash injury severity in freeway tunnels: A comparative study in Guizhou, China, Journal of safety research, 2021.06, Vol.77
- 13) Caliendo, C., De Guglielmo, M. L., & Guida, M.,

2-2. 조명의 필요성

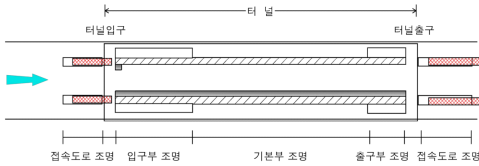
터널 내 조명은 주간과 야간에 터널 내부 및 접속 도로에서 차량의 운전자가 안전하고 쾌적하게 주행하도록 하는 시설이다²¹⁾. 터널 내 도로는 일반도로와는 다르게 한정되고 협소한 공간으로 위험성에 쉽게 노출될 수 있는 특수한 조건에 놓여있다. 따라서 터널을 주행하는 운전자들은 터널 내 주위상황을 모두 인지하고 있어야 한다. 이때 조명은 운전자에게 주변 정보(속도감, 다른 차량과의 거리, 다른 차량의 차선 변경 등)를 인지하게 해줌으로써 안전하게 터널 주행을 할 수 있게 도와준다.

터널을 통과하면서 운전자는 터널 외부환경과 내부 환경의 차이에서 오는 조도 차이 변화에 많은 시각적 어려움을 겪는다. 예를 들면 운전자가 터널 진입 시 더 많은 빛을 받아들이기 위해 동공이 확장되면서 주변 환경이 차츰 보이는 현상을 겪게 된다. 동공의 변화로 운전자는 터널 안에서 안전거리가 확보되었다고 착각할 수 있는 위험 상황이 발생할 수 있다²²⁾. 이러한 위험

A crash-prediction model for road tunnels, Accident Analysis & Prevention, 2013, 55

- 14) Kircher, K., Ahlstrom, C., The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers, Accident Analysis & Prevention, 2012, 47
- 15) Manser, M. P., Hancock, P. A., The influence of perceptual speed regulation on speed perception, choice, and control: Tunnel wall characteristics and influences, Accident Analysis & Prevention, 2007, Vol. 39, No. 1
- 16) 박철희, 장대터널내 사고감소 방안과 공공디자인으로서의 벽화조성에 관한 연구, 한국도로학회지: 도로, 2017, 19권, 2호
- 17) 이해령, 금기정, 정현정, 컨조인트 분석에 의한 터널 내 조명시설 설치조합별 경관 선호도 분석, 한국도로학회논문집, 2012, 14권, 6호
- 18) 한완모, 장우진, 이인환, 도로터널에서 최적의 조명기구 위치 연구, 조명·전기설비학회논문지, 2004, 18권, 4호
- 19) 박일동, 지길용, 임성빈, 금기정, LISREL 모형을 이용한 조명색채별 감성공학적 터널 내부경관 연구, 대한교통학회지, 2004, 22권, 4호
- 20) 이중현, 이동욱, 터널 입구에서의 블랙홀 현상 완화를 위한 카메라 기반의 전면유리 투과율 제어 방법, 전기학회논문지, 2016, 65권, 8호
- 21) 한국도로공사, 도로설계요령: 제4권 터널 9-3편, 2020

상황을 최소화하기 위해 터널 조명은 네 가지로 구분
이 되는데, 기본 부 조명, 입구부 조명, 출구부 조명,
접속 도로 조명으로 구성된다 ([그림 1])²³⁾.



[그림 1] 터널 구간별 조명유형 구분

출구부 조명은 밝은 외부의 환경에 시각적으로 적응
하기 위한 조명이다. 접속 도로 조명은 입구부, 출구부
에 설치를 하는데, 야간에 운전자가 주행할 때 직접적
으로 시각에 영향을 주는 것을 최소화하는 조명을 말
한다. 기본 부 조명이란, 터널 내에서의 운전자가 주변
상황에 대한 인지 능력을 확보하기 위하여 터널 전체
길이에 걸쳐서 설치하는 조명을 말한다. 입구부 조명은
밝은 곳에서 어두운 곳으로 이동하며 겪는 시각적 적
응 문제를 해결하기 위한 조명으로 기본 부 조명에 추
가하여 설치하는 조명이다²⁴⁾.

2-3. 조명 디자인의 중요성

터널 조명의 주요기능은 터널 내에서 사고가 나지
않도록 운전자의 주행을 도와주는 역할을 한다. 운전자
들은 일반도로에서 운전할 때보다 터널에서 운전할 때
속도감을 잃어버리는 경우가 있다. 즉, 일반도로보다
시각적 자극에 대한 운전자의 주변 시야 확보 또는 환
경 변화의 부족으로 인해 발생하기 때문이다.²⁵⁾

그래서 조명 디자인에 대해 연구적으로, 그리고 실
무적으로 신경을 쓰고 있는데 예를 들면 국외 연구의
경우, Domenichini (2016)에 따르면 다양한 유형의
조명과 구조가 운전 행동과 시선 행동 모두에 영향을

22) 한국도로공사, 도로설계요령: 제4권 터널 9-3편,
2020

23) Ibid.

24) Ibid.

25) Domenichini, L., La Torre, F., Vangi, D., Virga,
A., Influence of the lighting system on the driver's
behavior in road tunnels: a driving simulator study,
Journal of Transportation Safety & Security, 2017,
Vol.9, No.2

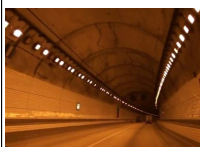
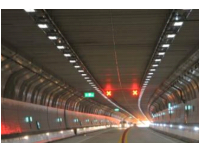
미친다는 사실을 알아내었다. 그리고 국내 설치사례의
3km 이상의 장대 터널에서는 일반적으로 쓰이는 주황
색 조명보다는 줄음을 감소시킬 수 있게 자극적인 색
감의 조명을 쓰기 시작하였다 ([표 2])²⁶⁾²⁷⁾.

[표 2] 국내외 특수조명 설치사례

래르달 터널 (Norway)	인제양양터널
	

하지만, 아직 일반적으로는 [표 3]에서 정리하였듯
기본 조명 방식은 조명배열의 개수와 위치를 다르게
하여 총 6가지 유형으로 나눌 수 있다. 조명배열 개수
의 경우, 1열과 2열 두 가지 유형으로 나뉘며 위치는
측면(좌우), 중앙, 천정, 바닥으로 분류된다.

[표 3] 기본조명 방식별 배열 및 특징

배열	설치사례	배열	설치사례
측면 2열		중앙 1열	
천정 2열 (1)		천정 2열 (2)	
측면 1열		바닥 1열	

26) <https://www.google.com/maps/래르달터널>

27) <https://www.google.com/maps/인제양양터널>

3. 데이터 기반 사전연구

3-1. 분석 방법

본 연구는 터널 내 사고 원인을 알아보기 위해 [표 4]에서 정리한 듯 국내 185개의 장대 터널을 기준으로 와내부 물리적 요소에 대한 데이터를 수집하고 R을 활용하여 다중회귀분석을 진행하였다.

[표 4] 사전연구 변수

변수		데이터 및 기간	출처 데이터 유형	비고
독립변수	터널 수	TAAS 2020.09 -2020.12	연속형	
	구간별 일일 교통량	공공데이터포털	연속형	
종속변수	외부 물리적 요소	터널 길이 (m)	2020.09 -2020.12	연속형
		터널 넓이 (m)		연속형
		터널 높이 (m)		연속형
		차선 수		연속형
	내부 물리적 요소	터널의 형태	Google Map Naver map	범주형 직선 / 곡선
		최소곡률값	Rhino	연속형
		최대곡률값	(Grasshopper)	연속형
		평균곡률값		연속형
		입출구부 조명 여부	Google Map Naver map	범주형 Y/N
		조명의 형태		범주형 Regular/ Dynamic
		조명색의 다양성		범주형 단색/ 다색
		조명의 개수 및 위치		범주형 (1 배 열, 배열) (천정, 측면, 바닥)

독립변수 산출을 위해 연간 구간 교통량에 따라 각 터널 사고량을 정규화하였으며, 종속변수는 외부 물리적 요소와 내부 물리적 요소로 구분하여 자료를 수집하였다. 외부 물리적 요소의 경우 고속도로 공공 데이터 포털²⁸⁾에서 제공하는 터널의 외형적 치수를 활용하였으며 터널의 곡률의 경우, 구글 지도에서 제공하는 위성사진을 활용하여 3D 모델링 프로그램인 Rhinoceros의 Grasshopper를 활용하여 Curvature 분석 알고리즘으로 곡률값을 산출하였다. 내부 물리

적 요소의 경우, 터널 입구부와 출구부 조명의 여부, 조명 디자인의 형태, 색의 다양성, 조명의 배열로 나뉘어 네이버 지도와 구글 지도의 로드뷰 기능을 활용하여 자료를 수집하였다. 조명의 형태를 Regular와 Dynamic으로 구분하였는데 여기서 Regular는 규칙적으로 배치된 조명 형태이며 Dynamic은 무지개와 같은 화려한 조명을 의미한다. 본 연구에서는 다수의 터널을 대상으로 내벽 재질 파악이 로드뷰로 불명확하여 변수에서 제외하였다.

3-2. 분석 결과

구간별 일일 교통량에 따라 정규화한 각 터널의 사고량을 독립변수로 하여 다중회귀분석을 시행한 결과, 터널의 넓이와 사고량이 가장 유의미한 관계가 있는 것으로 산출되었으며 넓이와 유사한 차선 수 또한 사고량과 유의미한 관계가 있다고 결론지을 수 있다. 터널의 곡률에서는 터널이 직선인지 혹은 곡선인지(터널의 형태)와 그리고 조명 디자인에서는 출구부 조명의 여부가 사고량과 유의미하게 연관성이 있는 것으로 도출되었다. 이 외 조명 색의 다양성과 조명의 개수 및 위치는 아래 [표 5]에 정리되었듯이 미미한 관계가 있는 것으로 분석 결과가 도출되었다.

[표 5] 사전연구 회귀분석 결과

변수		회귀계수	p-value ²⁹⁾
외부 물리적 요소	터널 길이 (m)	0.00002056	0.342457
	터널 넓이 (m)	-0.05988	0.000209**
	터널 높이 (m)	0.003274	0.883622
	차선 수	0.1323	0.020434**
	터널의 형태	-0.143	0.019269**
	최소곡률값	-0.0000003573	0.700266
	최대곡률값	-0.00000003036	0.565133
	평균곡률값	0.0000000197	0.53713
	입구부 조명 여부	0.009572	0.890166
	출구부 조명 여부	0.1455	0.021186**
내부 물리적 요소	조명의 형태	-0.02716	0.566349
	조명색의 다양성	-0.2281	0.083354*
	조명의 개수 및 위치	-0.03152	0.099336*

28) <http://data.ex.co.kr/>

29) **p-value<0.05, *p-value<0.1

이에 따라 본 연구진은 미미한 관계가 나타난 디자인 요소 중 하나인 조명의 개수 및 위치를 심도 있게 분석하고자 시뮬레이션 실험을 이행하였다.

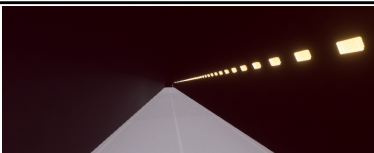
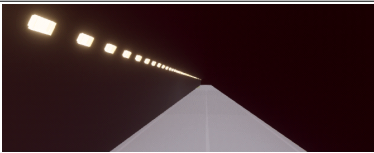
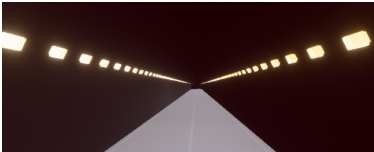
4. 시뮬레이션 실험

4-1. 실험설계 및 시나리오

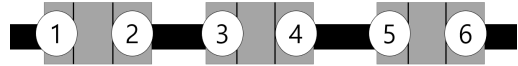
앞서 언급하였듯 본 논문에서는 운전 시뮬레이션 실험을 수행하여 측면 조명개수 및 위치가 운전자의 운전 행위 및 심라인지에 어떤 영향을 주는지 심도 있게 살펴보았다.

도로 시뮬레이션 주행을 위해 일반도로와 터널 도로를 결합한 도로를 3D Max와 Unity 환경에서 가상으로 구현하였다. 실험의 편향된 결과를 방지하기 위해 총 6가지의 실험 시나리오를 구현하였으며 각 시나리오당 3개의 터널에 3개의 충돌지점을 포함하여 설계하였다. 총 주행 길이는 4.5km였다. 조명 개수 및 위치 변수의 경우, 터널별로 측면 조명개수를 다르게 설치하였다. 예를 들면 [표 6]에서 볼 수 있듯이 오른쪽 1배열, 왼쪽 1배열, 그리고 2배열로 설치하였다. 본 연구에서는 이 외의 다른 조명 디자인 요소는 흔하게 찾아볼 수 있는 값을 활용하여 통제하였다. 조명 색상과 밝기의 경우 로드뷰에서 시각적으로 보이는 것과 유사하도록 하였고, 조명간의 간격의 경우 일반적인 10미터 간격으로 배치하였다.

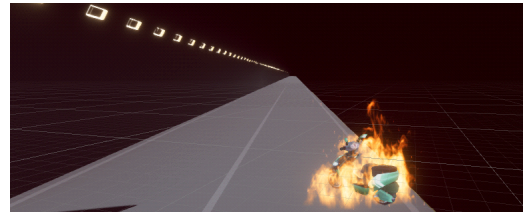
[표 6] 조명 개수 및 위치 유형

유형	예시
오른쪽 1배열	
왼쪽 1배열	
2배열	

그리고 각 터널 안에는 곡선으로 디자인한 입출구 부쪽에 무작위로 돌발상황을 설치하였으며 ([그림 2]) 돌발상황으로는 [그림 3]과 같이 사고 차량, 사람, 방지턱 등을 배치하였다.



[그림 2] 터널 충돌지점 위치



[그림 3] 터널 충돌상황 예시

구체적으로 [표 7]에서 정리하였듯이 시나리오 1에서의 충돌 위치는 1, 4, 5번이었으며 시나리오 2에서의 충돌 위치는 2, 3, 6번, 시나리오 3에서의 충돌 위치는 1, 4, 6번, 시나리오 4에서의 충돌 위치는 2, 3, 5번 시나리오 5에서의 충돌 위치는 2, 4, 6번 시나리오 6에서의 충돌 위치는 1, 3, 5번으로 설정하였다.

[표 7] 시나리오 설정

시나리오	터널 순번	조명배열 유형	충돌 위치	
S1	첫 번째	오른쪽 1배열	1	2
	두 번째	왼쪽 1배열	3	4
	세 번째	2배열	5	6
S2	첫 번째	왼쪽 1배열	1	2
	두 번째	오른쪽 1배열	3	4
	세 번째	2배열	5	6
S3	첫 번째	오른쪽 1배열	1	2
	두 번째	2배열	3	4
	세 번째	왼쪽 1배열	5	6
S4	첫 번째	왼쪽 1배열	1	2
	두 번째	2배열	3	4
	세 번째	오른쪽 1배열	5	6
S5	첫 번째	2배열	1	2
	두 번째	왼쪽 1배열	3	4
	세 번째	오른쪽 1배열	5	6
S6	첫 번째	2배열	1	2
	두 번째	오른쪽 1배열	3	4
	세 번째	왼쪽 1배열	5	6

4-2. 실험 장비

몰입감 있는 운전 주행 시뮬레이션을 제작하기 위해 게임 엔진인 유니티(Unity) 프로그램을 사용하였으며 주행을 현실감 있게 하도록 [그림 4]에서 처럼 Racing Wheel (겜맥 아우라 레이싱 휠 PC / PS4)을 활용하였다.



[그림 4] Racing Wheel을 활용한 주행 시뮬레이션 모습

4-3. 실험절차

실험참여자는 총 18명의 참여자를 모집하였으며 13명은 여성, 5명은 남성으로 구성되었다. 실험은 Racing Wheel이 설치되어있는 실험실에서 진행하였다. 각 실험참여자는 총 6가지의 시나리오 중 2개의 시나리오가 할당되었다.

본 실험에 들어가기에 앞서 모든 실험참여자는 VR 가상환경에 적응하기 위해 연습시나리오를 총 1회씩 주행하였다. 연습주행 환경은 유니티에서 기본적으로 제공하는 asset인 'Vehicle'을 이용하여 피실험자가 실험 환경에 충분히 적응할 수 있도록 실험자가 원하는 만큼 연습주행을 진행하였다. 연습주행 피실험자별로 6가지 시나리오 중 두 개의 시나리오를 할 수 있도록 배정하였다.

실험 후, 설문을 진행하였는데 설문 문항은 배재한 외 2인(2015)³⁰⁾가 사용한 설문 문항을 참고하여 3가지 부분으로 나누었다. 하나는 전반적인 도로에 대한 피실험자의 심리(일반도로 주행에 대한 불안감, 긴장감, 안정감, 주의산만, 예민함, 즐거움 등), 다른 하나는 터널에 대한 심리(터널 내 주행에 대한 불안감, 긴장감, 피로감, 주의산만, 일반도로와 주행 비교,

집중도 등), 그리고 마지막으로 실험 도중의 조명 변화에 대한 인지도(조명배열에 따른 집중도 정도)였는데 예로 “조명배열의 변화가 운전엔 영향을 미쳤는가”에 대한 대답으로 5-likert scale이 주어졌다. 총 33가지의 문항이었으며 실험 소요시간은 20~30분 정도 동안 진행되었다.

5. 분석 결과

5-1. 기초 분석

운전 주행 시뮬레이션 실험에서 충돌률 변수와 다른 변수 간의 상관관계 분석을 위해 카이제곱 검정 (Chi-Square Test)을 진행하였다. 본 분석을 진행하기에 앞서, 사고가 난 그룹과 그렇지 않은 그룹의 분포비교를 진행하였다. 변수별로 사고가 발생하지 않은 그룹은 0, 사고가 발생한 그룹은 1로 나누어 이 차이가 충돌률과 어떤 관계가 있는지 알아보았다. 18명의 피실험자를 대상으로 각 6가지의 충돌상황을 접했기 때문에 총 108개의 충돌상황을 기준으로 분석하였다. 그중 충돌이 발생하지 않은 경우는 75번, 그리고 충돌이 발생한 경우는 33번이었다. 카이제곱 검정은 R 통계 프로그램을 활용하였으면 [표 8]에 정리하였다.

[표 8] 카이제곱 검정 결과

변수	0 (N=75)	1 (N=33)	p-value ³¹⁾
조명 개수 및 배치	2배열 30 (40.0%)	6 (18.2%)	0.083
	왼쪽 1배열 23 (30.7%)	13 (39.4%)	
	오른쪽 1배열 22 (29.3%)	14 (42.4%)	
사고 지점	터널 종점 47 (62.7%)	19 (57.6%)	0.775
	터널 시점 28 (37.3%)	14 (42.4%)	
충돌 요인 의 위치	좌측 28 (37.3%)	8 (24.2%)	0.268
	우측 47 (62.7%)	25 (75.8%)	
도로 주행 에 대한 심리	긍정 36 (48.0%)	18 (54.5%)	<0.001*
	부정 0 (0.00%)	7 (21.2%)	
	중립 17 (22.7%)	6 (18.2%)	
	해당 없음 22 (29.3%)	2 (6.06%)	
터널 에 대한 심리	긍정 23 (30.7%)	13 (39.4%)	0.008*
	부정 24 (32.0%)	18 (54.5%)	
	중립 6 (8.00%)	0 (0.00%)	
	해당 없음 22 (29.3%)	2 (6.06%)	

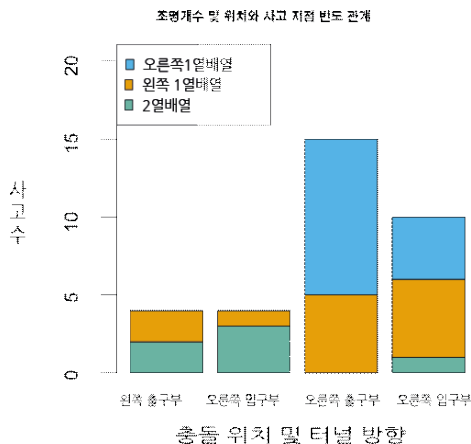
30) 배재한, 김재진, 노기영, 가상현실 운전 시뮬레이션 게임의 사용자 경험과 운전 태도에 대한 실험연구, 한국게임학회 논문지, 2015, 15.3

31) *p < 0.05를 기준으로 연관성이 유의미함

결과에 따르면 조명개수 및 배치가 2배열일 때 충돌률 차이가 크게 난 것을 알 수 있었으며 (40%대 18.2%) 사고 지점이 터널의 사중점인지와 충돌 위치가 우측 및 좌측인지에는 상관없이 충돌률 분포가 비슷했음을 알 수 있었다. 따라서 사고 지점이나 충돌 위치보다 조명개수 및 배치가 충돌률과 상관성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 도로 주행에 대한 심리와 터널에 대한 심리의 경우, 심리가 부정적일 경우 사고가 난 그룹과 사고가 나지 않은 그룹 간의 분포차이가 크게 나는 것을 관찰할 수 있었다(0%대 21.2%와 32%대 54.5%). 구체적으로, 부정적인 심리가 존재할 때 충돌률이 더 높다는 것을 알 수 있었다.

5-2. 측면 조명개수 및 위치와 충돌 위치 관계

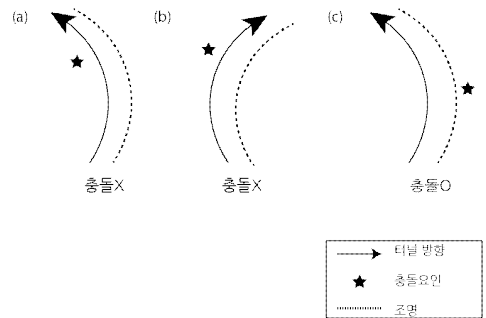
주행 시뮬레이션 실험 전 다중회귀분석 결과에 따르면 터널의 최소곡선률과 조명배치는 실제 사고데이터와 상관성이 있다고 나왔다. 따라서 본 실험에서는 1배열 조명을 터널별로 우측과 좌측으로 배치하여 터널의 곡선 구간에서 조명이 운전자에게 어떤 영향을 미치는지 알아보려 하였다. 모든 터널의 입구부는 오른쪽으로 실제 터널의 최소곡률값의 곡선을 이루는 반면, 모든 터널의 출구부는 왼쪽으로 곡선을 이루도록 하였다. 이때 1배열 조명이 좌측에 있는지, 우측에 있는지에 따라, 그리고 충돌 위치가 어디에 있는지에 따라 충돌률이 어떻게 변화하는지 알아보았다 [그림 5].



[그림 5] 측면 조명개수 및 위치와 사고 지점 빈도 관계

빈도 관계를 해석하자면 아래 [그림 6(a)]에서 볼

수 있듯 왼쪽으로 터널이 굽어 있을 때, 1배열 조명이 우측에 배치되고 충돌 요인의 위치가 좌측에 있을 경우에는 충돌이 일어나지 않는 것을 알 수 있었으며 [그림 6(b)]에서 나타난 듯이 오른쪽으로 터널이 굽어 있을 때, 1배열 조명이 우측에 배치되고 충돌 요인의 위치가 좌측에 있을 경우에도 충돌이 일어나지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 반대로 [그림 6(c)]와 같이 터널이 좌측으로 굽어 있고, 1배열 조명이 우측에 배치되고 충돌 요인이 위치가 우측에 있을 때 충돌이 빈번하게 일어나는 것을 알 수 있었다.



[그림 6] 빈도 관계 해석 다이어그램

여기서 알 수 있는 점은 운전자는 조명이 배치된 쪽의 차선을 무의식적으로 활용한다는 점이다. 카이제곱 독립성 검정 결과 또한 18.661 ($p\text{-value}=0.004777$)로 유의미한 관계로 나타났다. 실제로 실험참여자 중 한 명은 “조명이 설치되지 않은 차선 쪽으로 주행하기 꺼려져서 의도적으로 조명이 설치된 차선으로 주행하게 됐다” (P10) 라고 언급하기도 하였다.

5-3. 운전자의 부정적 심리상태와 조명개수 및 위치별 충돌률 관계

본 연구에서는 운전자의 도로 및 터널에 대한 심리에 따라 조명개수 및 위치별로 충돌률과 관계가 있을 것으로 예상하고 이 관계를 분석해보았다. 아래 [표 9]에서 정리하였듯 도로 및 터널에 대한 부정적인 심리를 가진 운전자는 조명배치가 2배열일 때 충돌이 일어날 가능성이 일어나지 않을 가능성보다 약 4배로 상당히 높다는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 왼쪽 1배열과 오른쪽 1배열은 유사한 양상을 보였는데 충돌 여부가 비교적 비슷하다는 것을 알 수 있었다. 카이제곱 독립성 검정 결과 또한 4.5($p\text{-value}=0.105$)로 $p <$

0.05를 기준으로 유의미하게 나오지는 않았지만, 전반적으로 부정적 심리상태의 운전자는 의외로 2배열일 때 어떤 이유에서인지 충돌을 더 많이 일으킨다는 것을 알 수 있었다. 예측 가능한 이유는 2배열일 때 공간에 대한 압박감 내지는 긴장감이 증폭될 수 있기 때문이다.

[표 9] 도로·터널 주행에 부정적인 감정을 느낀 운전자와 충돌여부의 상관관계

충돌여부	2배열 (n=5)	오른쪽 1배열 (n=17)	왼쪽 1배열 (n=27)
0	20%	53%	57%
1	80%	47%	43%

5-4. 터널 조명에 대한 인지도와 집중도 관계

실험절차 마지막에 심층 인터뷰를 진행하였는데, 이때 인터뷰 질문 하나가 조명배열에 따라 본인의 집중도에 변화를 느꼈는지에 대한 질문이었다. 이때 ‘예’라고 답한 실험참여자는 13명, 그리고 ‘아니요’라고 답한 실험참여자는 5명으로 운전자 대부분이 터널 조명변화에 따라 집중도가 바뀌는 것을 인지하고 있었다. 한 실험자는 “조명배열에 따라 운전하기가 편하거나 힘들었어요.”(P2)라고 언급을 하였으며, 또 다른 실험자는 “조명배열에 따라 장애물이 인식되는 속도가 달라졌다.”(P5)라고 피드백을 주기도 하였다.

또한, 조명배열에 따라 인지도 및 집중도에도 영향을 주는 것으로 관찰되었는데, 2배열일 때 편안함과 집중도가 높아지고, 시야가 확보되어 집중도가 상승했다는 피드백을 받은 반면, 의외로 1배열이 집중이 더 잘 된다고 언급한 실험 참가자들이 다수 있었다. 어떤 실험자는 “양쪽 조명이 다 켜져 있을 때 눈에 피로도가 느껴졌다.”(P1)라고 언급한 실험자도 있었다.

이러한 인터뷰 결과로 인해 터널 조명의 배치는 집중도에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 하지만 조명배치 별로 운전 주행에 미치는 영향이 실험자마다 달랐지만, 조명배치가 1배열일 때 집중도가 높아졌다는 피드백과 상반되는 2배열일 때 충돌률이 줄어드는 수치적 결과는 오히려 조명 디자인이 너무 한곳에 집중되어 있으면 시각적 장애물 역할을 한다는 것을 유추할 수 있었으며, 조명이 전체적으로 너무 과할 경우, 눈에 피로도

또한 운전 주행에 방해가 될 수도 있다는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

일반도로를 주행하는 것보다 터널 구간에서 주행할 때 운전자는 심리적 영향을 많이 받는다. 국내에서 장대 터널이 점점 보편화함에 따라 터널의 문제(시각적 부담 및 한계 등)가 운전자의 집중력에 영향을 주기도 한다.

이에 본 연구는 터널 디자인 요소와 안전성 간에 대한 문헌 조사를 하였고, 이를 바탕으로 터널 디자인 요소를 외부와 내부 디자인 요소로 분류할 수 있었다. 국내 1km 이상 터널을 디자인 요소별로 정량화하며 사고데이터와 관계를 분석하였다. 이로 인해 터널의 어떤 디자인 요소가 실제 사고량과 가장 연관성이 있는지 규명할 수 있었으며 미미한 관계성을 보인 디자인 요인에 대해서 심층적 연구를 진행하였다. 이를 위해서는 운전 주행 시뮬레이션 실험하였고 충돌률과 인터뷰를 통해 정확하게 어떤 연관 관계가 있는지 파악하였다.

데이터 기반 사전연구에서 분석 결과에 따르면 외부 물리적 요소와 내부 물리적 요소 둘 다 사고율과 유의미한 관계가 존재한다는 것을 알 수 있었다. 그중에서도 조명 디자인에 대한 관계가 비교적 미미하게 나와 그 이유를 알기 위해 심층적 운전 주행 시뮬레이션 실험을 추가로 진행하였다.

그 결과, 조명배치 별로 운전 주행에 미치는 영향이 실험자마다 다름을 알 수 있었다. 하지만 통합적인 결과로 보면, 조명배치가 1배열일 때 집중도가 높아졌다는 피드백과 상반되는 2배열일 때 충돌률이 줄어드는 수치적 결과는 오히려 조명 디자인이 너무 한곳에 집중되어 있으면 시각적 장애물 역할을 한다는 것을 유추할 수 있었으며, 조명이 전체적으로 너무 과할 경우, 눈에 피로도 또한 운전 주행에 방해가 될 수도 있다는 것을 알 수 있었다.

실험자마다 다른 이유를 알아보기 위해 운전자의 평소 도로 및 터널에 대한 심리도 실험에 고려하였는데 그 결과, 예상외로 2배열 조명이 부정적 감정을 느끼는 운전자에게서 충돌률이 높다는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 부정적 감정을 느끼는 운전자들은 규칙적으로 배치된 조명으로 압박감이나 부담감 등을 느

켜 운전 주행에 영향을 끼칠 수 있다는 가능성이 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 조명 디자인과 운전자 심리 및 인지 간의 관계는 다소 복잡하여 터널 구간 간의 안전을 보장할 수 있는 조명 디자인을 위해서는 다양한 조명을 심도 있게 실험해볼 필요가 있음을 강조할 수 있었다. 따라서 향후 연구에서는 터널 조명을 다양화하여 실험을 진행하고 어느 정도의 조명이 시각적으로 부담이 되지 않으면서 집중력을 향상시켜 반응 속도를 높여주는지에 대해 진행할 예정이다. 특히 데이터 기반 사전연구에서 미미한 관계가 나타난 조명 색의 다양성에 대한 시뮬레이션 실험을 다음의 연구 주제로 계획하고 있다.

참고문헌

1. 박원희, 터널 화재시 연기발생량 및 온도 예측 프로그램 개발, 한국철도학회논문집, 2007, 제10권, 5호
2. 박일동, 지길음, 임성빈, 금기정, LISREL 모형을 이용한 조명색채별 감성공학적 터널 내부경관 연구, 대한교통학회지, 2004, 22권, 4호
3. 박철휘, 장대터널내 사고감소 방안과 공공디자인으로서의 벽화조성에 관한 연구, 한국도로학회지: 도로, 2017, 19권, 2호
4. 배재한, 김재진, 노기영, 가상현실 운전 시뮬레이션 게임의 사용자 경험과 운전 태도에 대한 실험연구, 한국게임학회 논문지, 2015, 15.3
5. 서임기, 박제진, 안병호, 이준영, 로짓모형을 이용한 고속도로 장대터널 교통사고특성분석에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 2012. 제32권, 제6D호
6. 왕이완, 금기정, 손승녀, 유재상, 감성공학을 고려한 터널 내부경관 평가 모형개발에 관한 연구, 한국도로학회논문집, 2010. 제12권, 제1호
7. 이중현, 이동욱, 터널 입구에서의 블랙홀 현상 완화를 위한 카메라 기반의 전면유리 투과율 제어 방법, 전기학회논문지, 2016, 65권, 8호
8. 이해령, 금기정, 정현정, 컨조인트 분석에 의한 터널 내 조명시설 설치조합별 경관 선호도 분석, 한국도로학회논문집, 2012, 14권, 6호
9. 한승희, 박억철, 운전자 선호도를 고려한 고속도로 터널 내 조명디자인의 조형특성 연구, 한국기초조형학회, 2014, Vol.15, No.2, 62호
10. 한완모, 장우진, 이인환, 도로터널에서 최적의 조명기구 위치 연구, 조명·전기설비학회논문지, 2004, 18권, 4호
11. 통계청, 도로 교량 및 터널 현황조사, 2020
12. 한국도로공사, 도로설계요령: 제4권 터널 9-3편, 2020
13. Caliendo, C., De Guglielmo, M. L., & Guida, M., A crash-prediction model for road tunnels, Accident Analysis & Prevention, 2013, 55
14. Domenichini, L., La Torre, F., Vangi, D., Virga, A., Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: a driving simulator study, Journal of Transportation Safety & Security, 2017, Vol.9, No.2
15. He, S., Liang, B., Tähkämö, L., Maksimainen, M., The influences of tunnel lighting environment on drivers' peripheral visual performance during transient adaptation, Displays, 2020, 64
16. Jiao, F., Du, Z., Wang, S., Yang, L., Ni, Y., Research on drivers' visual characteristics in different curvatures and turning conditions of the extra-long urban underwater tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99
17. Kircher, K., Ahlstrom, C., The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers, Accident Analysis & Prevention, 2012, 47
18. Manser, M. P., Hancock, P. A., The influence of perceptual speed regulation on speed perception, choice, and control: Tunnel wall characteristics and influences, Accident Analysis & Prevention, 2007, Vol. 39, No. 1

19. Robatsch, K., Nussbaumer, C., Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr tunnels with uni-and bi-directional traffic, Im Auftrag des Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr, Straßenforschung, 2004, 539
20. Thiffault, P., Bergeron, J., Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study, Accident Analysis & Prevention, 2003, 35.3
21. Zhou, Z., Meng, F., Song, C., Sze, N. N., Guo, Z., Ouyang, N., Investigating the uniqueness of crash injury severity in freeway tunnels: A comparative study in Guizhou, China, Journal of safety research, 2021.06, Vol.77
22. <http://data.ex.co.kr/>
23. <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=3335156&ref=A>
24. <http://taas.koroad.or.kr>
25. <https://www.google.com/maps/>