Check for updates

Design and Validation of a HUD Lane-Width Guide to Improve Driving Stability on Narrow Roads

Huhn Kim[1*], Seohyun Cho[2], Suyoung Lee[2], Hongin Park[3]

[1]Department of Mechanical Engineering, Professor, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

[2]Department of Mechanical System Design Engineering, Student, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

[3]Department of Mechanical Engineering, Student, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

Abstract

Background A driver's emotional state directly influences driving performance. Spatial anxiety experienced in narrow road environments tends to induce excessive braking and repeated steering corrections, thereby increasing the risk of accidents. Novice drivers are particularly vulnerable, as their limited perception of vehicle width often exacerbates this anxiety. This study proposes a head-up display (HUD)-based "Lane-width Guide" user interface (UI) that provides real-time vehicle width information, and aims to quantitatively verify its impact on the psychological stability and driving performance of novice drivers.

Methods Four HUD UI types were designed based on display position and visual form (line vs. area): Fixed Type, vehicle width displayed at a fixed screen position; Path Type, width projected onto the predicted driving path; Mixed Type A, combination of line-based fixed guides and area-based path guides, and Mixed Type B, combination of area-based fixed guides and line-based path guides. A driving simulator experiment was conducted with 30 novice drivers (driving experience under one year) across seven narrow-road scenarios. The effectiveness of each type was verified through driving data (average speed, standard deviation (SD) of the steering wheel angle, and accident count), biometric data (galvanic skin response (GSR), skin conductance response (SCR), and inter-beat interval (IBI)), eye-opening ratio, and subjective stability ratings.

Results HUD lane-width guidance improved driving stability in several conditions when compared to the no-guidance condition. Fixed and mixed type (A, B) designs yielded significantly higher average speeds and lower steering variability than the no-guidance condition, while the Path Type did not differ significantly from any other condition. In biometric measures, the Path Type recorded the lowest GSR values, suggesting reduced overall physiological tension, and Mixed Type B showed significantly higher IBI than the no-guidance condition. However, the Path Type's effects on instantaneous anxiety suppression and operational stability were relatively limited. Considering multiple key indicators including accident count and subjective stability ratings, Mixed Type A, which provides width reference information via lines while highlighting the traversable zone via areas, demonstrated the most consistently favorable pattern across measures, suggesting it as a promising design alternative for HUD lane-width guidance.

Conclusions This study empirically demonstrates that HUD-based visual guidance effectively alleviates the psychological burden of narrow-road driving and enhances operational stability. These findings are expected to serve as practical guidelines for applying lane-width guides in future real-vehicle HUD system design.

Keywords Driving Comfort, Lane-width Guide, Head-up Display (HUD), Biometric Data, Narrow-road Driving, Novice Driver

Received : May. 14. 2026 ; **Reviewed :** Oct. 04. 2026 ; **Accepted :** Oct. 08. 2026
pISSN 1226-8046
eISSN 2288-2987

Copyright : This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.

This research was supported by Seoul National University of Science and Technology.

*Corresponding author: Huhn Kim (huhnkim@seoultech.ac.kr)

Citation: Kim, H., Cho, S., Lee, S., & Park, H. (2026). Design and Validation of a HUD Lane-Width Guide to Improve Driving Stability on Narrow Roads. *Archives of Design Research, 39*(4), 329-346.

http://dx.doi.org/10.15187/adr.2026.11.39.4.329

1. 서론

1. 1. 연구의 배경 및 목적

운전자의 감정 상태는 주행 행동 및 운전 수행도에 직접적인 영향을 미친다. 특히 불안(Anxiety)과 같은 부정적 정서는 집중력을 저하시키고 주행 판단 및 반응 속도를 둔화시켜 사고 위험을 높이는 주요 요인으로 작용한다(Steinhauser et al., 2018; Zhang et al., 2020; Braun et al., 2021). 이러한 불안감은 공사 구간, 좁은 골목길, 또는 협소한 도로에서 마주 오는 차량과 조우하는 상황처럼 주행 공간이 제한된 환경에서 더욱 두드러지게 나타난다.

협소 도로 주행 시 운전자는 차량이 안전하게 통과할 수 있는지 확신하기 어렵다. 다테야마 등(Tateyama et al., 2010)에 따르면, 운전자는 좁은 도로에서 과도한 감속과 반복적인 조향 수정을 보이는 경향이 있으며, 이는 주행 조작의 불안정성으로 이어진다. 특히 운전 경력이 짧은 초보 운전자는 차량의 물리적 폭에 대한 인지 능력이 부족하여, Figure 1과 같이 유리나 대시보드에 스티커를 직접 부착해 차폭 기준을 가시화하기도 하며, 이와 관련된 상품이 시중에 판매될 만큼 실질적인 수요가 존재한다. 그러나 이러한 아날로그 방식은 주행 상황 변화에 따른 유연한 정보 제공이 불가능하다는 근본적인 한계가 있다.

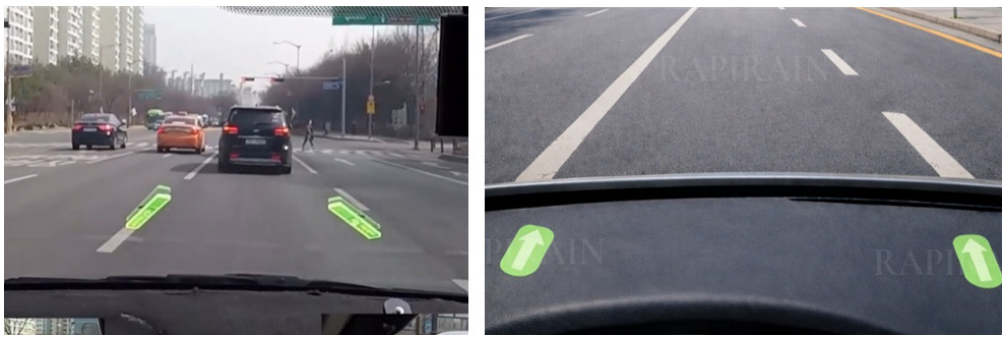


Figure 1 An example of sticker-type lane-width guide

헤드업 디스플레이(head-up display, HUD)는 전방 시야를 방해하지 않으면서 핵심 운전 정보를 운전자의 시계 내에 실시간으로 투사할 수 있어 시각적 주의 분산을 줄이고 전방 도로에 대한 집중도를 높이는 데 효과적이다(Liu & Wen, 2004; Cho, 2015; Jing et al., 2022). 특히 최신 디스플레이 연구에서는 차량용 HUD가 운전자의 시선 이동과 재초점 시간을 최소화하여 인지 부하를 경감시키고, 도로 장애물 인지 및 주행 상황 파악 능력을 대폭 높여 안전성과 사용자 경험을 모두 향상시키는 핵심 보조 장치로 인식되고 있다(Winkler & Soleimani, 2025). 이에 본 연구는 협소 도로 주행 시 운전자가 경험하는 심리적 불안을 완화하고 주행 안정성을 높이기 위한 HUD 기반의 차폭감 가이드 디자인을 제안하고자 한다. 나아가, 드라이빙 시뮬레이터 실험을 통해 주관적 안정감, 객관적 주행 지표 및 생체 신호에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써 최적의 차폭감 가이드 디자인을 도출하는 것을 목적으로 한다.

1. 2. 연구 범위 및 방법

본 연구는 협소 도로 주행 상황에 적합한 차폭감 가이드 디자인을 도출하기 위해 다음의 3단계로 수행되었다.

첫째, 차폭감 가이드의 개념을 정의하고 4가지 디자인 유형을 고안하였다. 운전자가 주행 가능 폭을 직관적으로 인지할 수 있도록 시각적 요소를 구성하였으며, 가이드의 표시 위치와 형태(선/면)에 따라 고정형, 경로형, 혼합형 A, 혼합형 B로 유형화하였다.

둘째, 실험 시나리오 및 환경을 구축하였다. 일상에서 흔히 접하는 협소 도로 상황을 대형 트럭 주차, 좁은 골목길, 대향차 대응, 도로 공사 구간 등 7가지로 분류하여 주행 코스를 설계하였으며, 실제 차량 내장재를 적용한 드라이빙 시뮬레이터를 실험 환경으로 구성하였다.

셋째, 다각적 데이터 분석을 통해 가이드 유형별 효과를 검증하였다. 초보 운전자 30명을 대상으로 평균 속도 및 조향 변동성 등의 주행 데이터, GSR·SCR·IBI 등의 생체 데이터, 눈 개방 비율 데이터를 수집하였으며, 선형 혼합모형(linear mixed model, LMM), Cochran's Q 검정, Friedman 검정 및 Bonferroni 사후 검정을 통해 가이드 유형 간 통계적 유의성을 확인하였다.

2. 차폭감 가이드 정의 및 디자인

본 연구는 운전자가 협소 도로 주행 시 느끼는 공간 불안을 해소하기 위해 차폭 인지 능력을 보조하는 HUD 기반의 차폭감 가이드 디자인을 제안하였다.

2. 1. 차폭감 가이드의 정의

본 연구에서는 차량의 가로 폭에 대해 운전자가 체감하는 인지적 감각을 차폭감으로, 이를 보조하기 위해 HUD에 표시되는 시각적 UI를 차폭감 가이드로 정의하였다. 차폭감 가이드는 상시 노출되는 정보가 아니라, 협소한 도로나 공사 구간 등 차폭 인지에 어려움이 있는 상황에서만 활성화되는 기능이다. 가이드의 시각 표현 요소는 운전자가 자신의 차량 폭을 직관적으로 파악하거나, 전방 도로에서의 통과 가능성을 즉각적으로 인지할 수 있도록 하는 것을 핵심 기준으로 선정하였다.

HUD를 활용해 협소 도로에서 운전자의 시각 인지를 보조하고자 하는 시도는 초기 지능형 교통 시스템 연구에서부터 꾸준히 탐색되어 왔다. 사토 등(Sato et al., 2003)은 HUD 상에 차폭 정보와 정렬 유도선을 표출하는 기초적인 차폭감 가이드 개념을 제안하였으며, 사토 등(Sato et al., 2004)은 주행 시뮬레이터를 이용하여 이러한 협소 도로 지원 시스템이 청년층과 고령 운전자의 주행 조작 성능 및 주시 행동에 미치는 영향과 연령별 편차를 비교 검증한 바 있다. 또한 신 등(Shin et al., 2025)은 좁은 공간에서 차폭 판단이 어려운 운전자를 위해 단일 형태의 HUD 기반 차폭감 가이드(통과 가능 시 초록색 라인, 어려울 시 빨간색 라인)를 제안하고, GSR, SCR 및 주관적 안정감을 평가하였다. 이는 본 연구의 문제의식 및 가이드 개념과 직접적으로 관련된다. 그러나 선행 연구들은 단순히 특정 가이드의 표출 여부나 운전자 연령에 따른 제어 성능 비교에 머물렀다는 한계가 있었다. 반면, 본 연구는 가이드의 표시 위치(fixed vs. path)와 시각적 형태(line vs. area)를 체계적으로 교차 설계한 네 가지 유형(고정형, 경로형, 혼합형 A, 혼합형 B)을 제시하고, 공간 불안을 크게 느끼는 초보 운전자 집단에 특화하여 다중 생체·행동·주관적 지표를 통해 비교 검증함으로써, 최적의 디자인 설계 원칙을 도출했다는 점에서 학술적 차별성을 지닌다. 한편, 본 연구는 신 등(Shin et al., 2025)과 동일한 주행 시뮬레이터 플랫폼을 사용하였으나, 참여자·시나리오·실험 조건은 독립적으로 새롭게 설계·수집되었으며 두 연구 간 데이터 중복은 없었다.

2. 2. 디자인 설계 원칙

HUD를 활용한 차폭감 가이드의 시각적 구성요소는 운전자의 인지 부담을 최소화하면서도 정보의 명확한 전달을 목표로 설계되어야 한다(Cho, 2015).

- 색상 및 피드백: 주행 가능 영역은 초록색(고정형) 또는 파란색(경로형)으로 표시하며, 폭이 좁거나 주행 방향이 맞지 않아 가이드 영역 내에 장애물이 감지되어 통과할 수 없는 경우에는 빨간색으로 가이드 색상을 변경하여 위험 정보를 직관적으로 전달하였다. 색상 선택은 기존 표준 및 관례를 따랐다. 초록색(통과

가능)과 빨간색(통과 어려움)은 ISO 3864 및 자동차 HMI 표준에서 정립된 안전 의미론적 색상 체계(green = safe/proceed, red = danger/stop)를 따른 것이며, 경로형에 적용된 파란색은 차량 내비게이션 및 AR HUD 경로 안내 분야에서 광범위하게 사용되는 색상 관례(예: 구글 맵, 차량 내비게이션의 경로 표시)를 따름으로써 운전자에게 이미 익숙한 의미론적 연관성을 활용하였다. 고정형과 경로형에 서로 다른 색상을 적용한 것은 두 가이드 유형이 동시에 표시되는 혼합형 조건에서 각 요소를 시각적으로 구분하기 위한 설계상의 선택이었다. 다만, 실차 윈드실드 환경에서 투사되는 HUD 그래픽은 주간 도로 배경과의 색상 혼색(color blending) 현상으로 인해 인지하기 어려운 오류가 빈번히 발생하므로, 단순 색상 지정 외에도 가시성과 인지 효율을 보장하기 위한 섬세한 설계가 향후 수반되어야 한다(Winkler & Soleimani, 2025).

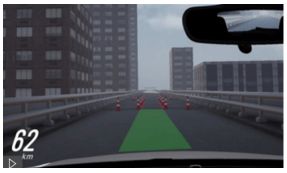
- 크기 및 거리: 차폭의 가로 폭은 실제 차량 폭과 1:1 비율로 일치시켰다. 세로 길이는 운전자의 시계를 크게 방해하지 않으면서도 전방 장애물에 충분히 대응할 수 있도록 약 20m로 설정하였다. 실제 차량에 적용 시에는 운전자 본인에게 맞게 차폭 시각표시의 설정을 변경하는 기능이 필요할 것이다.

- 투명도: 도로 위의 노면 정보와 가이드가 겹쳐 보이더라도 운전자가 실제 노면 상황을 지속적으로 인지할 수 있도록 신 & 이(Shin & Lee, 2023)의 연구를 참고하여 50%의 투명도를 채택하였다.

2. 3. 차폭감 가이드 디자인

가이드의 표시 위치와 시각적 형태(선 또는 면)에 따라 Table 1과 같이 4가지의 디자인 유형을 고안하였다.

Table 1 Proposed four types of HUD lane-width guide

유형	통과 가능	통과 불가능	
고정형			
경로형			
혼합형 A			
혼합형 B			

- 고정형(fixed type): 차량의 폭 정보를 HUD 화면상의 일정한 위치에 고정 표시하여 차량이 점유하는 물리적 공간을 직관적으로 예측할 수 있게 하였다. 차폭감 가이드의 위치가 차에 고정되어 있어 운전자의 시선 분산을 방지하고 인지 부하를 완화하는 특성을 가진다.

- 경로형(path type): 경로형은 차량의 예상 주행 경로인 전방 도로 위에 차폭 영역을 지면에 투사하는 방식으로, HUD를 활용한 종·횡방향 주행 보조 연구(Tonnis et al., 2007)에서 제안된 경로 시각화 개념을 차폭 인지에 적용하였다. 고정형과는 달리 가이드가 차에 고정된 형태가 아니라 도로 위 경로에 고정되어 표시되는 개념이다.

- 혼합형 A(mixed type A): 선(line) 형태의 고정형 가이드와 면(area) 형태의 경로형 가이드를 결합한 방식이다. 경고 대상에 직접 오버레이되는 면 기반 AR-HUD 표현이 선 기반 방식보다 운전자의 위험 인지 및 반응 효율 향상에 유리하다는 선행연구(Jing et al., 2022)를 근거로, 예상 주행 경로 위 차폭은 면으로 강조하여 공간적 여유 여부를 직관적으로 시각화하였다. 반면, 고정형 차폭 가이드는 단순한 선으로 제공하여 전방 시야 방해를 최소화하면서 다가갈수록 면 위에 선이 겹치는 느낌을 제공하고자 하였다.

- 혼합형 B(mixed type B): 면(area) 형태의 고정형 가이드와 선(line) 형태의 경로형 가이드를 결합한 방식으로, 혼합형 A와 선/면의 적용 위치를 반전시킨 대조적 시각 구성이다. 이를 통해 고정형과 경로형 요소의 형태 조합 방식이 운전자 반응에 미치는 영향을 혼합형 A와 비교 검증하고자 하였다.

3. 실험 방법 및 설계

3. 1. 실험 시스템 및 가상 환경 구성

본 실험은 Unity 엔진 기반의 가상 주행 시뮬레이터 환경에서 수행되었다. Figure 2와 같이 실제 차량의 내장재(대시보드 등)를 시뮬레이터에 적용하여 몰입도와 현실감을 높였으며, Logitech G29 스티어링 휠과 페달 세트를 조작 장치로 사용하여 실제 차량 조작과 유사한 운전 경험을 구현하였다.



Figure 2 Experimental driving simulator setup equipped with a webcam and Shimmer3 GSR+ sensors

3. 2. 협소 도로 시나리오 정의

운전자가 공간적 불안을 경험하고 차폭 인지에 어려움을 겪는 상황을 Table 2와 같이 7가지의 협소 도로 이벤트로 분류하였다. 7가지 이벤트(E1~E7)는 국내 협소 도로 환경에서 초보 운전자가 빈번하게 접하는 상황 유형을 연구팀 내부의 브레인스토밍을 통해 도출하고 구현한 것으로, 각 구간의 도로 조건 및 장애물 유형은 현실 대표성을 기준으로 설계하였다. 각 이벤트 구간의 도로 폭은 선행 연구나 공식 기준을 직접 적용하기보다, 도로–차량 폭 비율의 상대적 조건을 설계 기준으로 삼아 통과가 가능하되 심리적 긴장이 유발되는 수준으로 설정하였다. 이는 연구팀 내 전문가 논의를 통해 도출한 것이며, 본 실험 전 파일럿 테스트를 통해 각 이벤트 구간의 난이도 적절성을 확인하고 시나리오를 보완하였다.

Table 2 Seven types of narrow road events

No	이름	도로 상황 특징	구현 이미지
E1	대형 트럭 주차 구간	도로변에 큰 트럭이 주차되어 있어 통과 폭이 좁아진 상황	
E2	협소 골목길	차 한 대만 겨우 지나갈 수 있는 좁은 이면 도로 주행	
E3	대향차 대응 (정차 필요)	마주 오는 차량으로 인해 일시 정차 후 공간을 확보해야 하는 상황	
E4	대향차 대응 (서행 통과)	마주 오는 차량 옆을 서행하며 근접 통과해야 하는 상황	
E5	불법주차 차량 구간	왕복 2차선 도로에 무단 주차된 차량을 피해 반대 차선으로 넘어가야 하는 상황	
E6	도로 공사 구간	공사 표지판 및 라바콘 등으로 주행 영역이 일시적으로 제한된 도로를 지나는 상황	
E7	하이패스 톨게이트	고속 주행 상태에서 좁은 폭의 톨게이트 게이트를 통과해야 하는 상황	

3. 3. 주행 코스 설계

학습 효과로 인한 실험 신뢰도 저하를 방지하기 위해, Table 2의 7가지 협소도로 이벤트를 모두 포함하되 구간의 출현 순서를 달리한 두 종류의 주행 코스(코스 1, 코스 2)를 Figure 3과 같이 제작하였다. 이를 통해 실험 참여자가 다음에 나타날 도로 상황을 쉽게 예측하지 못하게 하였다.

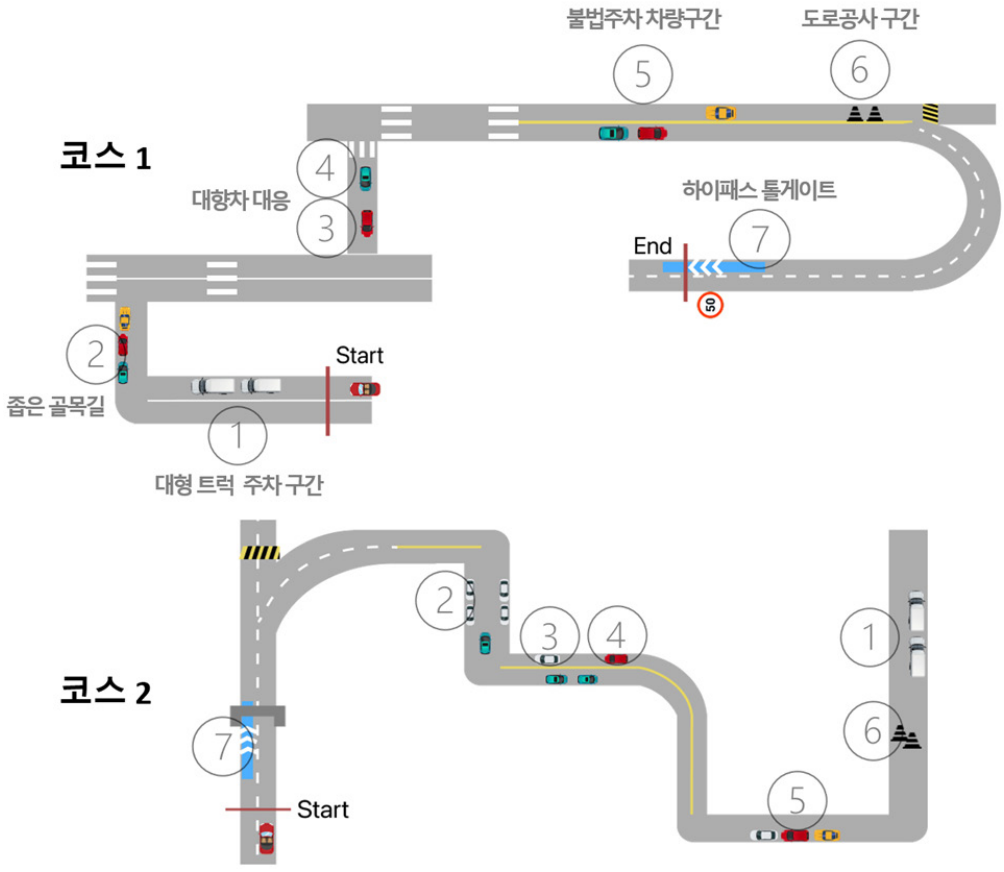


Figure 3 Two experimental driving courses. The numbers in the course correspond to seven types of narrow road events in Table 2

3. 4. 실험 참여자 및 실험 설계

실험에는 2종 보통 운전면허를 소지한 성인 30명(남성 25명, 여성 5명; 평균 연령 25.2세)이 참여하였으며, 모두 운전 경력 1년 미만의 초보 운전자였다.

본 실험에 앞서 참여자는 별도 코스에서 약 5분간의 연습 주행을 수행하였다. 정해진 시간 내에 사고 없이 목표 지점에 도달하는 것을 완료 조건으로 하였으며, 조건을 충족하지 못한 경우 반복 시행하도록 하였다. 실험은 하나의 통제 조건(가이드 없음)과 4가지의 차폭감 가이드(고정형, 경로형, 혼합형 A, 혼합형 B)로 구성된 5수준의 가이드 유형과 7 수준의 협소도로 이벤트 구간으로 구성된 2인자의 피험자 내 반복측정 설계(within-subject repeated-measures design)로 진행되었다. 각 참여자는 코스 1-2-1-2-1 또는 2-1-2-1-2 순서로 두 코스를 교번하여 총 5회 주행하였으며, 각 회차마다 하나의 가이드 유형을 배정하였다. 순서 효과(order effect) 및 이월 효과(carry-over effect)를 통제하기 위해 차폭감 가이드 유형의 제시 순서는 참여자 간 무선화(randomization)하였다. 각 주행이 끝날 때마다 주행 안정감을 5점 척도로 평가하였으며, 약 2분의 휴식을 취한 후 다음 주행을 시작하였다.

3. 5. 수행 척도 및 데이터 수집

차폭감 가이드의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 주행 데이터, 생체 데이터, 눈 개방 데이터, 주관적 설문의 네 가지 영역에서 데이터를 수집하였다. 모든 데이터는 각 이벤트 구간마다 미리 정해진 차폭감 가이드의 활성화 및 비활성화 시점을 기준으로 전후 1초의 여유 구간을 포함하여 수집하였다.

3. 5. 1. 주행 수행도(driving performance)

운전자의 조작 안정성과 주행 부담감을 다각적으로 평가하기 위해 주행 중 차량의 평균 속도(average speed)와 핸들 각도 표준편차(steering wheel angle SD)를 60Hz로 수집하였다. 협소 도로 맥락에서 속도 저하는 통과 여부에 대한 불확실성과 조작적 주저(hesitation)를 반영하는 행동적 지표로 해석될 수 있으나(Tateyama et al., 2010; Garach et al., 2022), 속도 증가가 곧 주행 부담 감소를 직접적으로 의미하지는 않으므로 본 연구에서는 사고 건수·조향 표준편차·생체신호와 함께 수렴적으로 해석하였다. 핸들 각도 표준편차는 횡방향 제어의 불안정성을 반영하는 검증된 지표로서 운전 수행 평가 연구에서 널리 활용된다(Xu et al., 2024). 모든 참여자가 동일한 코스를 모든 가이드 유형에서 반복 주행하는 반복 측도 설계를 채택하였으므로, 도로 곡률 및 구간 특성은 조건 간 비교에서 일정하게 유지된다.

아울러 사전 정의된 시작·종료 지점을 기준으로 각 이벤트 구간별 사고 발생 여부를 기록하였으며(사고 발생 시 1, 아니면 0), 사고 발생 이벤트 구간의 모든 데이터는 분석에서 제외하였다.

3. 5. 2. 생체 데이터(biometric data)

운전자의 긴장도와 스트레스 반응을 객관적으로 측정하기 위해 Shimmer3 GSR+ 장비를 사용하여 갈바닉 피부 반응(galvanic skin response, GSR)과 광혈류측정(photoplethysmography, PPG) 신호를 5Hz로 수집하였다(Figure 2 좌측 참고). GSR과 PPG는 인간의 감정 및 각성 상태를 반영하는 대표적인 생리 지표로 널리 활용되고 있으며(Dzedzickis et al., 2020), 측정 시 손가락 움직임에 의한 신호 오염을 방지하기 위해 비우세손에 센서를 부착하였다. 생체신호 데이터는 본 실험에 앞서 진행된 연습 주행 구간부터 수집을 시작하여, 본 실험 개시 전 참여자의 생리적 상태가 충분히 안정화될 수 있도록 하였다. 수집된 원시 신호에는 EMD(empirical mode decomposition; Huang et al., 1998) 기법을 적용하여 핸들 조작 등 신체 움직임에 의한 모션 아티팩트를 제거하였다.

전반적인 긴장 수준을 반영하는 GSR은 피부전도의 완만한 변화를 반영하는 긴장성(tonic) 성분으로, 전처리된 원시 값을 그대로 활용하였다. 특정 자극에 대한 순간적 피부 전도도 반응(skin conductance response, SCR)은 GSR의 급격한 변화를 반영하는 위상성(phasic) 성분으로, 5Hz 샘플링 간격에서의 단위 시간당 변화량(SCR[t] = GSR[t] − GSR[t−1])으로 산출하였다. 사고 발생이나 신호 품질이 저하되어 결측된 구간의 데이터는 분석에서 제외하였으며, LMM 분석은 결측치가 있는 경우에도 가용 데이터를 최대한 활용하는 REML(restricted maximum likelihood) 추정을 통해 편향 없는 추정을 제공한다.

PPG 데이터로부터 산출되는 심박 간격(inter-beat interval, IBI)은 중앙값이 높을수록 자율신경계가 안정된 상태를 반영하며(Shaffer & Ginsberg, 2017), 운전자의 긴장 완화 정도를 간접적으로 나타내는 지표로 활용된다. 본 연구에서는 5Hz로 수집된 PPG 신호의 노이즈를 제거하기 위해 0.4–1.5Hz 대역의 2차 버터워스 대역통과 필터(butterworth bandpass filter)를 적용하였다. 이후 HeartPy 라이브러리의 적응형 임곗값(adaptive threshold) 기반 피크 검출 알고리즘을 수행하여 PPG 파형의 수축기 피크(systolic peak) 타임스탬프를 추출하였다. 그 후, 추출된 피크 간의 시간 차이를 통해 IBI를 계산하였으며, 생리학적으로 유효한 범위(300ms ≤ IBI ≤ 2000ms)를 벗어나는 데이터는 노이즈 및 이상치로 간주하여 필터링하였다.

3. 5. 3. 눈 개방 비율(eye-opening ratio)

시뮬레이터 대시보드 상단에 장착된 웹캠(APC720, 30fps)을 이용하여 눈 개방 비율을 산출하기 위해 후세인 & 알 발루시(Hussain & Al Balushi, 2020)의 연구에서 검증된 VGG-16 기반 얼굴 랜드마크 검출 모델을 적용하여, 입력 이미지로부터 눈 주변 6개 랜드마크 좌표(p_1 ~p_6)를 5Hz로 추출하였다. 추출된 좌표에 EAR(eye aspect ratio) 알고리즘(Čech & Soukupová, 2016)을 적용하여 눈 개폐 여부를 판단하였다. EAR은 눈 주변 6개 랜드마크 좌표를 기반으로 두 수직 거리의 합을 수평 거리의 두 배로 나누어 산출된다($EAR = (\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|) / (2 \cdot \|p_1 - p_4\|)$). EAR 값이 임곗값 0.23 미만인 프레임은 눈이 감긴 것으로 분류하였으며, 임곗값은

선행 연구에서 보고된 일반적인 범위(0.20–0.25)의 중간값을 적용하였다. 시뮬레이터 내부는 밀폐 환경으로 유지되어 조명 변화에 의한 신호 오염 가능성은 최소화되었다.

각 이벤트 구간 내에서 눈을 뜬 프레임의 비율을 눈 개방 비율로 산출하였으며, 분석 구간은 생체 데이터와 동일하게 차폭감 가이드 활성화·비활성화 시점 전후 1초의 여유 구간을 포함하였다. 눈 개방 비율은 눈 감김 비율(PERCLOS)과 역의 관계에 있으며, 운전자의 각성 수준을 반영하는 검증된 지표로서 운전자 상태 모니터링 연구에서 널리 활용된다(Sahayadhas et al., 2012).

3. 5. 4. 주관적 주행 안정감

각 주행이 끝날 때마다 5점 리커트 척도(Likert scale)로 운전자가 체감한 주행 안정감을 평가하였다.

4. 실험 결과 및 분석

주행 행동 데이터(평균 주행 속도, 조향 표준편차) 및 생체신호(GSR, SCR, IBI), 눈 개방 데이터는 참가자를 변량 인자, 차폭감 가이드 유형(guide type, 5수준)과 이벤트 구간(event segment, 7수준) 및 두 인자 간의 교호작용(가이드 × 이벤트)을 고정 인자로 설정한 선형 혼합모형(linear mixed model, LMM)으로 분석하였다. 반복 측도의 공분산 구조로는 복합 대칭(compound symmetry, CS)을 적용하였으며, 유의한 주 효과에 대해서는 Bonferroni 사후 검정을 하였다.

사고 건수는 각 참여자의 가이드 유형별·이벤트 구간별 이분형(0: 무사고, 1: 사고) 반복 측도 자료에 대해 Cochran's Q 검정을 두 차례 적용하였다. 가이드 유형 주 효과 검정 시에는 참여자 × 이벤트 구간 조합(30 × 7 = 210)을 블록으로, 5가지 가이드 유형을 처치 수준으로 설정하였으며, 이벤트 구간 주 효과 검정 시에는 참여자 × 가이드 유형 조합(30 × 5 = 150)을 블록으로, 7개 이벤트 구간을 처치 수준으로 설정하였다. 이 구조에서 동일 참여자 내 반복 관측의 의존성은 블록 설계를 통해 통제하였다. 유의한 주 효과에 대해서는 Bonferroni 보정에 의한 대응별 비교를 수행하였다. 주행 안정감 점수는 Friedman 비모수 검정을 적용하였으며, 유의한 경우 Bonferroni 사후 검정을 하였다. 각 종속변수에 대한 주 효과 검정 결과는 Table 3에 요약 정리하였다.

Table 3 Linear Mixed Model (LMM) and nonparametric test results for performance measures across guide and event types (*p 〈 .05, **p 〈 .01, ***p 〈 .001). Speed, steering angle, GSR, SCR, IBI, and eye-opening ratio were analyzed using LMM with Compound Symmetry covariance structure; denominator degrees of freedom (df_2) vary by model (approximately 915–972). Accident occurrence was analyzed using Cochran's Q test, and subjective driving stability was analyzed using the Friedman test

인자 / 수행 척도	가이드 유형			이벤트 구간			가이드 × 이벤트		
	LMM F(4, df2)	p	Effect sizes*	LMM F(6, df2)	p	Effect sizes	LMM F(24, df2)	p	Effect sizes
평균 주행 속도	4.760	〈.001***	.019	373.845	〈.001***	.699	0.614	.927	.015
조향 표준편차	4.031	.003**	.016	69.245	〈.001***	.300	0.971	.503	.024
GSR 평균	8.607	〈.001***	.034	0.921	.479	.006	0.247	1.000	.006
SCR 평균	2.504	.041*	.010	1.399	.212	.009	1.197	.234	.028
IBI 중간값	3.604	.006**	.015	7.047	〈.001***	.043	1.068	.375	.026
눈 개방 비율	3.158	.014*	.014	1.489	.179	.010	0.955	.525	.024
사고 건수	Cochran's Q = 13.342	.01**	.111	Cochran's Q = 51.416	〈.001***	.286			
주행 안정감	Friedman S = 71.93	〈.001***	.619						

*Effect sizes: partial η^2 for LMM; Kendall's W for Cochran's Q and Friedman tests; 효과 크기의 해석은 Cohen(1988)의 기준을 따랐다. Partial η^2의 경우 .01 미만은 무시 가능(negligible), .01 이상은 소(small), .06 이상은 중간(medium), .14 이상은 대(large) 수준으로 분류하였으며, Kendall's W의 경우 .1 미만은 소, .3 이상은 중간, .5 이상은 대 수준으로 해석하였다.

4. 1. 주행 수행도

4. 1. 1. 사고 건수

사고 건수는 이분형(0: 무사고, 1: 사고 발생) 반복 측도 데이터에 적합한 Cochran's Q 검정으로 분석하였다. 차폭감 가이드 유형의 주 효과가 유의하게 나타났으며(Q = 13.342, p = .010), Bonferroni 사후 검정 결과 지원없음 조건과 혼합형 A 조건 간에 유의한 차이를 보였다(p = .027; Figure 4 좌측). 지원없음 조건에서 사고 발생 빈도가 29건으로 가장 높았으며, 혼합형 A 조건에서 12건으로 가장 낮게 나타났다.

이벤트 구간의 주 효과도 유의하였다(Q = 51.416, p 〈 .001). Bonferroni 사후 검정 결과 (Figure 4 우측), 대향차대응-정차필요 구간(E3)은 대형트럭 주차구간(E1; p = .032), 협소골목길(E2; p 〈 .001), 대향차대응-서행통과(E4; p 〈 .001), 불법주차 차량구간(E5; p 〈 .001), 하이패스 톨게이트(E7; p 〈 .001)에 비해 유의하게 높은 사고 발생 비율을 나타냈다. 또한 도로공사구간(E6)은 하이패스 톨게이트(E7)에 비해 유의하게 높은 사고 발생 비율을 보였다(p = .002).

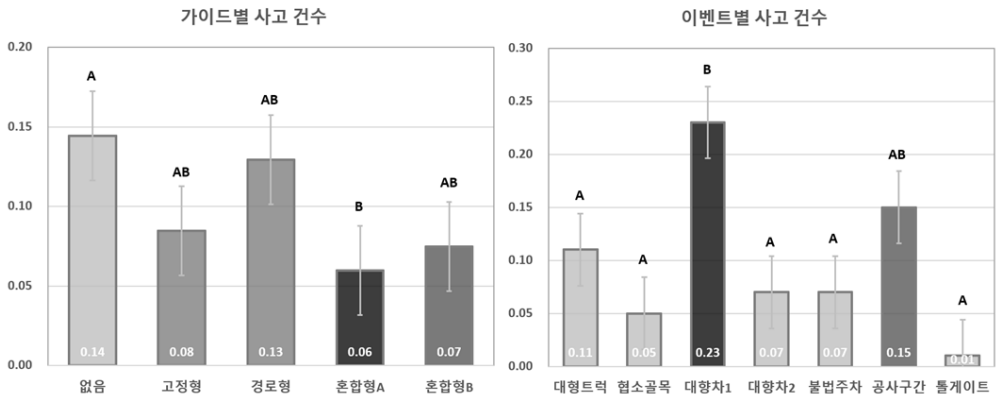


Figure 4 Number of accidents across lane-width guide types (left) and event segments (right). Error bars represent within-subject standard errors. The same letters indicate no significant difference at α = .05 according to Cochran's Q test with Bonferroni-adjusted pairwise comparisons

4. 1. 2. 평균 주행 속도

평균 주행 속도에 대한 선형 혼합모형 분석 결과, 차폭감 가이드 유형의 주 효과($F(4, 968.734) = 4.760$, $p < .001$)와 이벤트 구간의 주 효과($F(6, 968.270) = 373.845$, $p < .001$)가 모두 유의하였으며, 상호작용 효과는 유의하지 않았다($F(24, 968.270) = 0.614$, $p = .927$). 이벤트 구간의 효과 크기는 대 수준($\eta^2 = .699$)으로, 도로 유형이 주행 속도를 결정하는 지배적 요인임을 나타냈다. 반면 가이드 유형의 효과 크기는 소 수준($\eta^2 = .019$)으로, 통계적으로 유의하나 실질적 효과의 크기는 상대적으로 제한적이었다.

차폭감 가이드 유형에 대한 Bonferroni 사후 검정 결과 (Figure 5 좌측), 지원없음 조건(M = 51.9 km/h)이 고정형(M = 56.5 km/h; p = .010), 혼합형 A(M = 56.8 km/h; p = .005), 혼합형 B(M = 56.2 km/h; p = .024) 조건에 비해 유의하게 낮은 주행 속도를 보였다. 경로형(M = 53.6 km/h)은 다른 조건과 유의한 차이를 나타내지 않았다.

이벤트 구간에 대한 Bonferroni 사후 검정에서는 대향차대응-정차필요 구간(E3, M = 25.2 km/h)에서 가장 낮은 속도가, 하이패스 톨게이트(E7, M = 91.6 km/h)에서 가장 높은 속도가 관찰되었으며, 두 구간은 대부분의 다른 구간과 유의한 차이를 보였다. 대형트럭 주차구간(E1, M = 66.7 km/h)과 불법주차 차량구간(E5, M = 67.5 km/h) 간에는 유의한 차이가 없었다(p = 1.000).

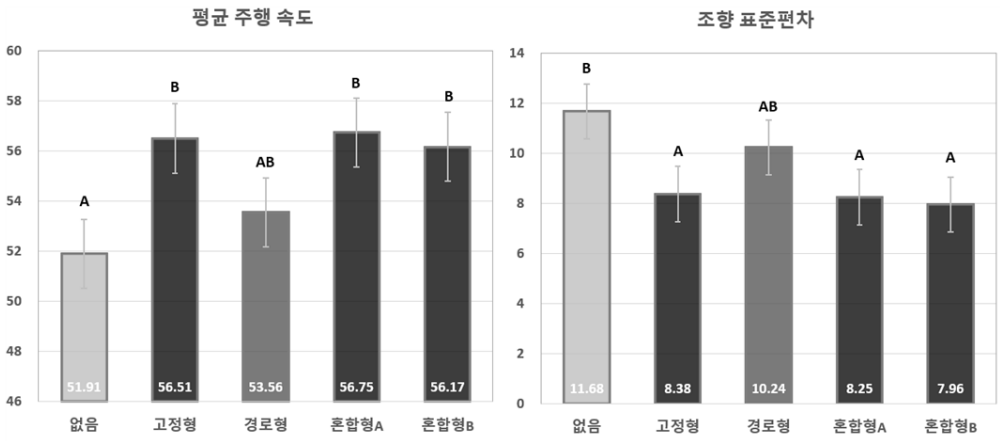


Figure 5 Average driving speed (left) and standard deviation of steering wheel angle (right) across lane-width guide types. Error bars represent within-subject standard errors. The same letters indicate no significant difference at α = .05 according to Bonferroni post-hoc comparisons based on the Linear Mixed Model (LMM)

4. 1. 3. 조향 표준편차

조향 표준편차에 대한 선형 혼합모형 분석 결과, 차폭감 가이드 유형의 주 효과($F(4, 972.730) = 4.031$, $p = .003$)와 이벤트 구간의 주 효과($F(6, 968.484) = 69.245$, $p < .001$)가 모두 유의하였으며, 상호작용 효과는 유의하지 않았다($F(24, 968.488) = 0.971$, $p = .503$). Table 3에서 보여주듯이 평균 주행 속도와 마찬가지로 이벤트 구간의 효과 크기는 대 수준, 가이드 유형의 효과 크기는 소 수준이었다.

차폭감 가이드 유형에 대한 Bonferroni 사후 검정 결과 (Figure 5 우측), 지원없음 조건(M = 11.68)이 고정형(M = 8.38; p = .035), 혼합형 A(M = 8.25; p = .023), 혼합형 B(M = 7.96; p = .011) 조건에 비해 유의하게 높은 조향 표준편차를 나타냈다. 이는 차폭감 가이드가 없는 경우 운전자의 조향 안정성이 상대적으로 낮았음을 의미한다. 경로형(M = 10.24)은 다른 조건과 유의한 차이를 보이지 않았다.

이벤트 구간에 대한 Bonferroni 사후 검정에서는 대향차대응-정차필요 구간(E3, M = 25.20)에서 가장 높은 조향 변동성이 관찰되었으며, 하이패스 톨게이트(E7, M = 1.98)에서 가장 낮은 값을 나타냈다. E3는 나머지 모든 구간과 유의한 차이를 보였으며, E7 역시 대부분의 구간과 유의하게 구별되었다.

4. 2. 생체 신호

4. 2. 1. GSR 및 SCR 평균

GSR 평균에 대한 선형 혼합모형 분석 결과, 차폭감 가이드 유형의 주 효과는 유의하게 나타났으나(F(4, 968.020) = 8.607, p 〈 .001), 이벤트 구간의 주 효과(F(6, 968.005) = 0.921, p = .479)와 상호작용 효과(F(24, 968.005) = 0.247, p = 1.000)는 유의하지 않았다. 가이드 유형의 효과 크기(η^2 = .034)는 소 수준이지만 주행 행동 지표(η^2 = .016~.019)에 비해 상대적으로 큰 값이었다. 이는 가이드가 생리적 각성 수준에 미치는 영향이 행동 지표보다 다소 뚜렷함을 시사한다.

Bonferroni 사후 검정 결과 (Figure 6 좌측), 경로형 조건(M = 3.027)이 지원없음(M = 3.304; p = .001), 고정형(M = 3.417; p 〈 .001), 혼합형 B(M = 3.240; p = .028) 조건에 비해 유의하게 낮은 GSR 값을 나타냈으며, 고정형 조건이 혼합형 A 조건(M = 3.166)에 비해 유의하게 높은 GSR 값을 보였다(p = .004). 이는 경로형 가이드 사용 시 운전자의 생리적 각성 수준이 상대적으로 낮았음을 시사한다.

SCR 평균에 대한 선형 혼합모형 분석 결과, 차폭감 가이드 유형의 주 효과는 통계적으로 유의하였으나(F(4, 971.263) = 2.504, p = .041), 이벤트 구간의 주 효과와 상호작용 효과는 유의하지 않았다(Table 3). 효과 크기도 작고 가이드 유형에 대한 Bonferroni 사후 검정에서 유의한 쌍별 차이가 확인되지 않아, 차폭감 가이드 유형 간 SCR의 차이는 통계적으로 입증되지 않았다.

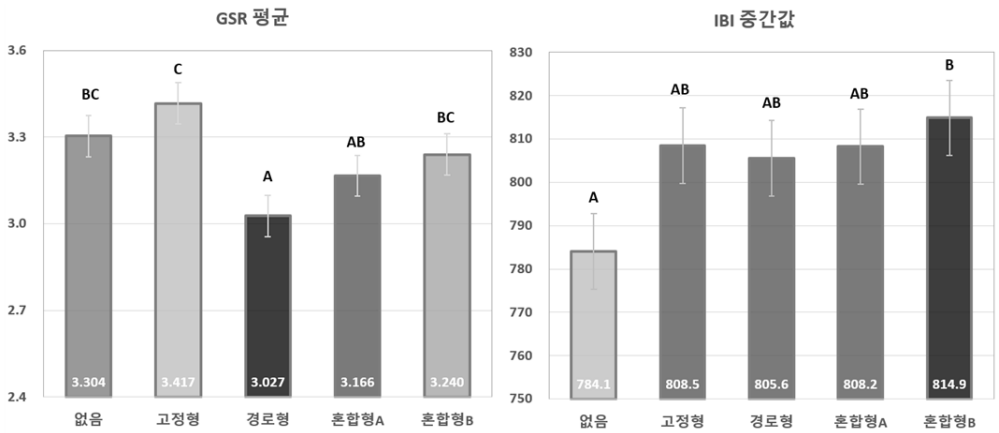


Figure 6 Average GSR (left) and median IBI (right) across lane-width guide types. Error bars represent within-subject standard errors. The same letters indicate no significant difference at α = .05 according to Bonferroni post-hoc comparisons based on the Linear Mixed Model (LMM)

4. 2. 2. IBI 중간값

IBI 중간값에 대한 선형 혼합모형 분석 결과, 차폭감 가이드 유형의 주 효과(F(4, 949.291) = 3.604, p = .006)와 이벤트 구간의 주 효과(F(6, 949.127) = 7.047, p 〈 .001)가 모두 유의하였으며, 상호작용 효과는 유의하지 않았다(F(24, 949.129) = 1.068, p = .375). 두 주 효과 모두 소 수준의 효과 크기를 나타냈다.

차폭감 가이드 유형에 대한 Bonferroni 사후 검정 결과 (Figure 6 우측), 지원없음 조건(M = 784.1 ms)이 혼합형 B 조건(M = 814.9 ms)에 비해 유의하게 낮은 IBI 중간값을 보였다(p = .005). IBI가 낮을수록 심박수가 높음을 의미하므로, 차폭감 가이드 지원이 없을 때 운전자의 각성 수준이 상대적으로 높았음을 시사한다.

이벤트 구간에 대한 Bonferroni 사후 검정에서는 대형트럭 주차구간(E1, M = 827.0 ms)과 협소골목길(E2, M = 774.3 ms) 간(p 〈 .001), 대형트럭 주차구간(E1)과 대향차대응-정차필요(E3) 간(p = .001), 협소골목길(E2)과

하이패스 톨게이트(E7) 간(p 〈 .001), 대향차대응-정차필요(E3)와 하이패스 톨게이트(E7) 간(p = .027)에 유의한 차이가 나타났다.

4. 3. 눈 개방 비율

눈 개방 비율에 대한 선형 혼합모형 분석 결과, 차폭감 가이드 유형의 주 효과가 유의하게 나타났으나(F(4, 915.470) = 3.158, p = .014), 이벤트 구간의 주 효과(F(6, 915.360) = 1.489, p = .179)와 상호작용 효과(F(24, 915.415) = 0.955, p = .525)는 유의하지 않았다. 추정 주변 평균은 지원없음 조건(M = 0.927)에서 가장 낮고 고정형 조건(M = 0.951) 및 혼합형 A 조건(M = 0.951)에서 가장 높게 나타났다. 그러나 효과 크기는 소 수준이었으며, Bonferroni 사후 검정에서도 유의한 쌍별 차이가 확인되지 않아 눈 개방 비율에 대한 가이드 유형의 효과는 제한적인 것으로 보인다.

4. 4. 주행 안정감

주관적 주행 안정감 평가에 대한 Friedman 검정 결과, 차폭감 가이드 유형 간에 유의한 차이가 나타났다(S = 71.93, p 〈 .001, Kendall's W = .619). 효과 크기는 대 수준으로, 본 연구에서 가이드 유형 간 차이가 가장 뚜렷하게 나타난 지표였다. Bonferroni 사후 검정을 통한 쌍별 비교 결과는 Figure 7에 제시하였다. 가이드가 적용된 모든 조건은 가이드 없음보다 유의하게 높은 안정감을 기록하였다. 가이드 유형 간 비교에서는 혼합형 A와 혼합형 B가 가장 높은 안정감을 기록하였다.

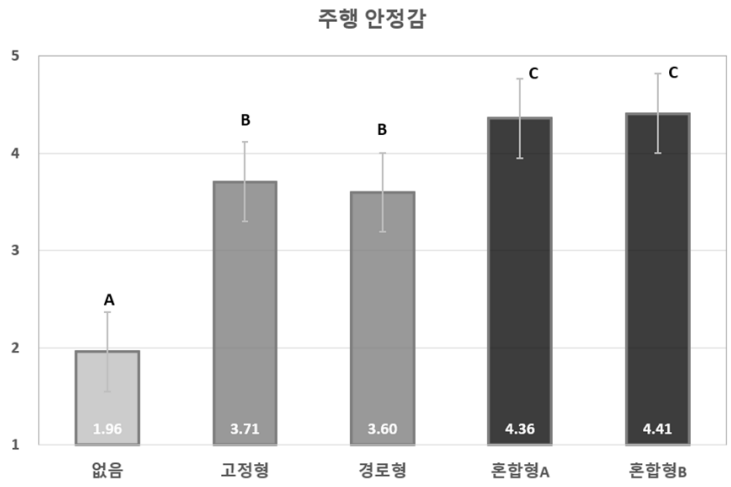


Figure 7 Subjective driving stability across lane-width guide types. Error bars represent within-subject standard errors. The same letters indicate no significant difference at α = .05 according to Bonferroni-adjusted pairwise comparisons based on the Friedman test

5. 논의 및 결론

5. 1. 연구 결과 요약

본 연구는 협소 도로 주행 환경에서 HUD 기반 시각적 가이드가 초보 운전자의 심리적 안정감과 주행 수행도에 미치는 영향을 다각적 지표를 통해 검증하였다. 실험 결과, 혼합형 A에서 사고 건수가 가장 낮았으며, 고정형과 혼합형(A, B) 조건이 지원없음 조건에 비해 유의하게 높은 주행 속도와 낮은 조향 표준편차를 나타내어 주행 안정성 향상 효과가 확인되었다. 반면 경로형 가이드는 다른 조건과 유의한 주행 행동 차이를 보이지 않았다.

생체 데이터에서는 GSR 기준으로 경로형 가이드가, IBI 기준으로 혼합형 B 가이드가 지원없음 조건에 비해 유의하게 낮은 생리적 각성 수준을 보이는 등 일부 지표에서 가이드 유형별 효과가 확인되었다. 주행 안정감에 대한 주관적 평가에서는 모든 가이드 유형이 지원없음 조건보다 유의하게 높은 평가를 받았으며, 혼합형 A와 혼합형 B가 가장 높은 점수를 기록하였다.

5. 2. 차폭감 가이드 유형별 효과 차이

실험 데이터에 기반하여 도출된 가이드 유형별 효과에 대한 논의는 다음과 같다.

첫째, 고정형 요소의 인지 부하 완화 효과이다. 주행 데이터 분석에서 고정형과 혼합형(A, B) 가이드는 지원없음 조건에 비해 유의하게 높은 평균 속도와 낮은 조향 표준편차를 기록하였다. 반면 경로형 가이드는 지원없음을 포함한 어떤 조건과도 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 가이드 위치가 화면상에 일관되게 고정되어 있을 때 운전자가 안정적인 시각적 기준점을 확보하여 조작 안정성이 향상될 수 있음을 의미한다.

표면적으로는 시각적 가이드의 추가 제공이 주의를 특정 영역에 고착시켜 시각적 터널링(visual tunneling)을 유도할 것처럼 보일 수 있으나, 본 연구에서 나타난 고정형 가이드의 효과는 인지적 자원 분배 관점에서 인지적 앵커링(cognitive anchoring)으로 해석될 수 있다. 협소 도로 주행 중 운전자는 차폭에 대한 불확실성으로 인해 노면 전체를 불안하게 탐색하는 인지적 과부하 상태에 놓이는데, 이때 고정형 가이드는 안정적인 기준점을 제공함으로써 운전자의 시선이 불필요한 영역으로 분산되는 것을 방지한다. 즉, 박 등(Park et al., 2012)이 언급한 시각적 터널링이 과도한 정보 처리와 불안으로 인한 주의 고착 현상이라면, 본 연구의 고정형 가이드는 오히려 이러한 정보 탐색의 비효율성을 억제하고 운전자가 주행에 필요한 핵심 정보에 선택적으로 주의를 집중하도록 유도하는 디자인 전략으로 볼 수 있다.

한편, 경로형 가이드가 주행 안정성 향상에 유의한 효과를 보이지 못한 것은 별도의 기제로 설명된다. 경로형 가이드는 도로 위에 고정된 방식(conformal)으로 표시되기 때문에, 운전자가 핸들을 조작할 때도 화면상 위치가 변하지 않는다. 반면 고정형 및 혼합형 가이드는 차량의 조향에 연동하여 위치가 갱신되므로, 운전자가 자신의 조작이 차폭 기준선과 어떤 관계에 있는지를 실시간으로 인지할 수 있다. 즉, 경로형의 한계는 정보의 유무보다 정보의 동적 반응성(dynamic responsiveness) 부재에서 기인한다고 볼 수 있다.

둘째, 경로형 요소의 생리적 긴장 완화 효과이다. 생체 데이터 분석 결과, 전반적인 긴장 수준을 반영하는 GSR 평균값은 경로형 가이드에서 가장 낮게 나타났다($p < .001$). 이는 차량이 실제 이동할 도로 위에 차폭 정보를 직접 투사해 운전자로 하여금 통과 가능성에 대한 확신을 즉각적으로 갖게 하여 전반적인 생리적 긴장 수준을 낮추는 데 기여한 것으로 해석된다. 이는 경고 대상에 직접 오버레이 되는 면 기반 시각 정보가 운전자의 위험 인지 효율을 높인다는 선행연구(Jing et al., 2022)와도 맥락을 같이한다. 다만 SCR, IBI 등 다른 생체 지표에서는 경로형이 고정형 또는 혼합형보다 우수하지 않았으며, 주행 속도와 조향 안정성 측면에서도 유의한 차이를 나타내지 않았다. 이는 경로형 가이드가 전반적 긴장 수준 완화에는 효과적이나, 순간적인 불안 반응 억제와 주행 안정성 향상에는 상대적으로 효과가 제한적임을 시사한다.

한편, 이벤트 구간별 IBI 분석 결과는 주행 수행도 지표(속도·조향 표준편차·사고 건수)에서 가장 어려운 구간으로 나타난 대향차 정차 대응(E3)이 아닌 협소 골목길(E2)에서 생리적 긴장이 가장 높았음을 보여주었다. 협소 골목길은 정차 없이 좁은 공간을 지속적으로 통과해야 하는 구간으로, 짧은 순간의 강한 조작보다 지속적인 긴장 유지가 자율신경계에 더 큰 부담을 주기 때문이다. 이는 생리적 긴장 반응이 단순히 조작 난이도에 의해서만 결정되지 않으며, 긴장의 지속 시간과 특성 역시 중요한 요인임을 보여준다.

셋째, 혼합형 A 디자인의 우수성이다. 개별 지표별로는 GSR에서 경로형이, 주행 속도 및 조향 안정성에서 고정형이 부분적으로 우수한 결과를 보였으나, 사고 건수와 주행 안정감을 포함한 다수의 핵심 지표를

종합적으로 고려할 때 혼합형 A가 전반적으로 가장 균형 잡힌 성과를 나타냈다. 사고 건수에서 혼합형 A는 지원없음 조건과의 Bonferroni 사후 비교에서 유일하게 유의한 차이를 기록하였으며($p = .027$), 주행 안정감 평가에서도 혼합형 A와 혼합형 B가 가장 높은 점수를 나타냈다. 특히 참여자들은 일관된 위치에 시각적인 차폭 기준이 제시되면서도 통과 가능 여부가 도로 위에 직관적으로 표시되는 방식을 더 유용하다고 판단하였다. 이는 고정된 위치에 단순한 선 형태의 차폭 기준을 제시하여 전방 시야 방해를 최소화하면서도, 면 형태의 경로 안내를 통해 주행 가능 영역을 직관적으로 전달하는 방식이 주행 안정성과 심리적 안정감을 동시에 충족시킨 결과로 풀이된다. 이는 신 등(Shin et al., 2025)에서 단일 형태로 제안되었던 차폭감 가이드의 효과를 시각적 구성 방식의 체계적 유형화를 통해 한층 발전시킨 것으로, 선과 면의 역할 분담이 HUD 기반 주행 보조 인터페이스 설계의 핵심 원칙이 될 수 있음을 시사한다.

넷째, 본 연구에서 관찰된 효과 크기의 패턴은 가이드의 역할과 한계의 이해에 중요한 시사점을 제공한다. 차폭감 가이드 유형이 주행 행동 및 생체 지표에 미치는 효과 크기는 대부분 소 수준(partial η^2 = .010~.034)에 머물렀으며, 이는 가이드가 통계적으로 유의한 영향을 미치면서도 실질적 효과의 크기는 제한적임을 의미한다. 이는 협소 도로에서의 주행 수행도가 가이드 유형보다 도로 상황(이벤트 구간)에 의해 더 강하게 규정됨을 뒷받침하는데, 실제로 이벤트 구간의 효과 크기는 평균 주행 속도(η^2 = .699)와 조향 표준편차(η^2 = .300)에서 각각 대 수준으로 나타나 도로 맥락이 운전 행동을 지배하는 일차적 요인임을 확인할 수 있다.

반면, 주행 안정감 평가에서의 효과 크기는 Kendall's W = .619로 대 수준에 해당하여, 가이드 유형 간 차이가 객관적 수행 지표보다 운전자의 주관적 경험에서 훨씬 두드러지게 나타났다. 이는 HUD 기반 차폭감 가이드의 효과가 측정 가능한 운전 행동의 변화뿐만 아니라, 운전자가 체감하는 심리적 안정감과 인지적 지원의 질 측면에서 더 유의미하게 발현될 수 있음을 시사한다. 또한 GSR에서의 효과 크기(η^2 = .034)가 다른 생체 지표 및 주행 행동 지표에 비해 상대적으로 컸다는 점은 가이드 유형이 순간적인 행동 조작보다 전반적인 생리적 각성 수준에 더 민감하게 작용할 수 있음을 시사한다.

5. 3. 연구의 한계점 및 결론

본 연구는 초보 운전자의 차폭 인지 보조를 위한 실증적 근거를 마련하였으나, 다음과 같은 한계점이 존재한다.

첫째, 생체 데이터는 EMD 기법을 적용하여 모션 아티팩트를 제거하였으나 운전 환경의 특성상 급격한 조향 조작 시 발생하는 강한 신체 움직임이 신호 정제 후에도 일부 잔류 노이즈로 작용했을 가능성을 완전히 배제하기는 어렵다. 향후 연구에서는 동작 센서(IMU)를 병행 수집하여 움직임 성분을 더욱 정밀하게 분리하거나 실험 구간 설계 시 급격한 조향이 집중되는 구간을 생체 분석에서 별도 처리하는 방안을 고려할 수 있다.

둘째, 본 연구에서 색상은 두 가지 방식으로 설계에 관여하였으며, 이와 관련된 두 가지 한계가 존재한다. 먼저, 충돌 경고 피드백으로 사용된 색상 변화(빨간색)가 일부 참여자에게는 안내보다 압박감으로 작용했다는 의견이 있었으며, 이는 경고 피드백 설계의 개선 필요성을 시사한다. 경고 색상 자체가 생리적 각성 반응을 유발할 수 있어서 가이드 유형에 따른 생체신호 차이의 일부가 가이드의 형태보다 경고 피드백의 특성에 기인했을 가능성을 배제하기 어렵다. 또한 고정형 가이드는 초록색, 경로형 가이드는 파란색으로 제시되어, 가이드의 위치·형태에 따른 효과와 색상에 따른 효과를 완전히 분리하기 어렵다는 한계가 있다. 향후 연구에서는 색상 변수를 통제한 조건 설계를 통해 가이드 형태의 순수한 효과를 검증하고, 색상 외에 진동·사운드 등 다양한 감각 채널을 활용한 경고 피드백 설계의 대안도 함께 탐색할 필요가 있다.

셋째, 실험 참여자가 운전 경력 1년 미만의 초보 운전자로 한정되어 있어 숙련 운전자에 대한 효과는 확인되지 않았다. 또한 참여자의 성별 구성이 남성 25명, 여성 5명으로 편중되어 있어 성별에 따른 차폭 인지 반응의

차이를 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있다. 참여자의 연령 역시 20대 초중반에 집중되어 있어, 본 연구의 결과는 초보 운전자 전체보다 젊은 초보 운전자에 국한될 수 있다. 고령 운전자는 시력, 대비 민감도, 정보 처리 속도, 분산주의 능력 등에서 젊은 운전자와 차이가 있으며(Swain et al., 2022), HUD의 동적 시각 정보가 주의를 효과적으로 유도하는 동시에 과도한 인지 부하를 유발할 가능성도 있다(Wolffsohn et al., 1998). 따라서 향후 연구에서는 다양한 연령대 및 성별을 포함한 비교 검증이 필요하다.

넷째, 본 연구는 드라이빙 시뮬레이터 기반의 단기 실험으로 수행되었다. 시뮬레이터 환경은 실제 도로의 노면 진동, 주변 소음, 돌발 상황 등을 완전히 재현하지 못하므로, 본 결과를 실차 환경에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 또한 단일 세션 실험 특성상 HUD 가이드에 대한 학습 효과나 장기적 사용에 따른 의존성 변화를 확인할 수 없었다. 향후 연구에서는 실제 도로 환경에서의 검증과 함께 반복 사용에 따른 효과의 지속성 및 변화 양상을 추적하는 종단 연구가 필요하다.

아울러 향후 연구에서는 조향각에 따라 차폭감 가이드의 곡률이 실시간으로 변하는 반응형 가이드 설계를 탐색함으로써, 보다 정밀하고 상황 적응적인 HUD 인터페이스 개발로 연구를 확장할 필요가 있다.

결론적으로, 본 연구에서 HUD 기반의 차폭감 가이드가 협소 도로 상황에서 초보 운전자의 심리적 불안을 완화하고 주행 안전성을 높이는 유효한 접근임을 실험적으로 확인하였다. 특히 선(line) 형태의 고정 가이드와 면(area) 형태의 경로 가이드의 결합이 초보 운전자의 주행 안정성과 심리적 안정감을 지원하는 유망한 디자인 대안이 될 수 있음을 보였다. 이는 향후 자동차의 HUD 설계 시에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. Braun, M., Weber, F., & Alt, F. (2021). Affective automotive user interfaces–reviewing the state of driver affect research and emotion regulation in the car. *ACM Computing Surveys (CSUR), 54*(7), 1–26. [https://doi.org/10.1145/3460938]
2. Cho, Y. (2015). Augmented reality (AR) head-up display (HUD) design study for prevention of car accident based on graphical design, sensitivity and conveyance of meaning. *Archives of Design Research, 28*(3), 103–117. [https://doi.org/10.15187/adr.2015.08.28.3.103]
3. Čech, J., & Soukupová, T. (2016). Real-time eye blink detection using facial landmarks. *Proceedings of the 21st Computer Vision Winter Workshop (CVWW 2016)*, 1–8.
4. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
5. Dzedzickis, A., Kaklauskas, A., & Bucinskas, V. (2020). Human emotion recognition: Review of sensors and methods. *Sensors, 20*(3), 592. [https://doi.org/10.3390/s20030592]
6. Garach, L., Calvo, F., & De Oña, J. (2022). The effect of widening longitudinal road markings on driving speed perception. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 88*, 141–154. [https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.05.021]
7. Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 454*(1971), 903–995. [https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193]
8. Hussain, S. A., & Salim Abdallah Al Balushi, A. (2020, January). A real time face emotion classification and recognition using deep learning model. In *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1432, No. 1, p. 012087). IOP Publishing. [https://doi.org/10.1088/1742-6596/1432/1/012087]
9. Jing, C., Shang, C., Yu, D., Chen, Y., & Zhi, J. (2022). The impact of different AR-HUD virtual warning interfaces on the takeover performance and visual characteristics of autonomous vehicles. *Traffic injury prevention, 23*(5), 277–282. [https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2055752]

10. Liu, Y. C., & Wen, M. H. (2004). Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *International Journal of Human-Computer Studies, 61*(5), 679-697. [https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.06.002]
11. Park, M., Lee, T., & Son, J. (2012). An on-road assessment of cognitive demand: DriversGaze Dispersion on Highway Driving: DriversGaze Dispersion on Highway Driving. *Conference Ergonomics Society of Korea*, 237-241.
12. Sahayadhas, A., Sundaraj, K., & Murugappan, M. (2012). Detecting driver drowsiness based on sensors: a review. *Sensors, 12*(12), 16937-16953. [https://doi.org/10.3390/s121216937]
13. Sato, T., Daimon, T., Kawashima, H., Kinoshita, M., & Ikeda, A. (2003). Fundamental study on human interface of narrow road drive assist system based on drivers' cognitive process. *JSAE review, 24*(2), 189-196. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00300-4]
14. Sato, T., Kawashima, H., & Daimon, T. (2004, June). Age differences in behavioral and visual characteristics while driving with narrow road driving assistance system. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2004 (pp. 477-482). IEEE. [https://doi.org/10.1109/IVS.2004.1336430]
15. Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in public health, 5*, 258. [https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258]
16. Shin, J., Kim, T., Lee, J., Lee, D., Choi, M., Park, H., Seo, H. & Kim, H. (2025). Design and Validation of Vehicle UX for Driving Comfort Enhancement. *Archives of Design Research, 38*(4), 191-211. [https://doi.org/10.15187/adr.2025.11.38.4.191]
17. Shin, Y., & Lee, H. (2023). 증강현실 헤드업 디스플레이 (AR HUD) 네비게이션 방향지시의 형태와 투명도가 사용자의 주관적 평가에 미치는 영향 [The Effects of the Concept and Transparency of AR HUD Navigation Style on Subjective Assessments of Users]. *Journal of Korea Design Forum, 28*(2), 89-104. [https://doi.org/10.21326/ksdt.2023.28.2.008]
18. Steinhauser, K., Leist, F., Maier, K., Michel, V., Pärsch, N., Rigley, P., Wurm, F., & Steinhauser, M. (2018). Effects of emotions on driving behavior. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 59*, 150-163. [https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.08.012]
19. Swain, T. A., McGwin Jr, G., & Owsley, C. (2022). Visual functions associated with on-road performance by older drivers evaluated by a certified driving rehabilitation specialist. *Ophthalmic and physiological optics, 42*(4), 879-886. [https://doi.org/10.1111/opo.12985]
20. Tateyama, Y., Yamada, H., Noyori, J., Mori, Y., Yamamoto, K., Ogi, T., Nishimura, H., Kitamura, N., & Yashiro, H. (2010, December). Observation of drivers' behavior at narrow roads using immersive car driving simulator. In *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry* (pp. 391-396). [https://doi.org/10.1145/1900179.1900263]
21. Tonnis, M., Lange, C., & Klinker, G. (2007, November). Visual longitudinal and lateral driving assistance in the head-up display of cars. In *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 91-94). IEEE. [https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538831]
22. Winkler, M., & Soleimani, M. (2025). A review of augmented reality heads up display in vehicles: Effectiveness, application, and safety. *International Journal of Human-Computer Interaction, 41*(18), 11405-11420. [https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2443252]
23. Wolffsohn, J. S., McBrien, N. A., Edgar, G. K., & Stout, T. (1998). The influence of cognition and age on accommodation, detection rate and response times when using a car head-up display (HUD). *Ophthalmic and physiological optics, 18*(3), 243-253. [https://doi.org/10.1046/j.1475-1313.1998.00350.x]
24. Xu, J., Fard, M., Zhang, N., Davy, J. L., & Robinson, S. R. (2024). Interrelatedness of steering and lateral position parameters: recommendations for the assessment of driving performance. *Journal of safety research, 88*, 275-284. [https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.11.014]
25. Zhang, Q., Qu, W., Ge, Y., Sun, X., & Zhang, K. (2020). The effect of the emotional state on driving performance in a simulated car-following task. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 69*, 349-361. [https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.02.004]

협소 도로 주행 안정감 향상을 위한 HUD 차폭감 가이드 디자인 및 효과 검증

김헌[1*], 조서현[2], 이수영[2], 박홍인[3]

[1]서울과학기술대학교 기계공학과, 교수, 서울, 대한민국

[2]서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 학생, 서울, 대한민국

[3]서울과학기술대학교 기계공학과, 학생, 서울, 대한민국

초록

연구배경 운전자의 부정적 감정은 주행 수행도에 직접적인 영향을 미치며, 특히 협소 도로 환경에서 발생하는 공간적 불안은 과도한 제동과 반복적인 조향 수정을 유발하여 사고 위험을 높이는 주요 요인이 된다. 초보 운전자는 차량의 물리적 폭에 대한 인지 능력이 부족하여 이러한 불안을 더욱 크게 경험하는 경향이 있다. 본 연구는 헤드업 디스플레이(HUD)를 통해 실시간 차폭 정보를 제공하는 차폭감 가이드 디자인을 제안하고, 초보 운전자의 심리적 안정감과 주행 수행도 향상에 미치는 영향을 정량적으로 검증하는 것을 목적으로 한다.

연구방법 가이드의 표시 위치와 시각적 형태(선/면)에 따라 네 가지의 HUD UI 유형을 설계하였다: (1) 고정형 — 차량 폭 정보를 화면 고정 위치에 표시, (2) 경로형 — 예상 주행 경로를 따라 차폭 영역을 지면에 투사, (3) 혼합형 A — 선 형태의 고정 가이드와 면 형태의 경로 가이드 결합, (4) 혼합형 B — 면 형태의 고정 가이드와 선 형태의 경로 가이드 결합. 운전 경력 1년 미만의 초보 운전자 30명을 대상으로 7가지 협소 도로 시나리오가 포함된 드라이빙 시뮬레이터 실험을 수행하였으며, 주행 데이터(평균 속도, 조향 표준편차, 사고 건수), 생체 데이터(GSR, SCR, IBI), 눈 개방 데이터(eye-opening ratio) 및 주관적 주행 안정감 평가를 통해 가이드 유형별 효과를 검증하였다.

연구결과 HUD 차폭감 가이드는 일부 조건에서 지원없음 조건에 비해 주행 안정성을 유의하게 향상시켰다. 고정형과 혼합형(A, B) 디자인은 지원없음 조건에 비해 유의하게 높은 주행 속도와 낮은 조향 변동성을 보였으며, 경로형은 다른 조건과 유의한 차이를 나타내지 않았다. 생체 지표에서는 경로형이 GSR에서 가장 낮은 값을 기록하여 전반적인 생리적 긴장 완화 효과를 보였으며, 혼합형 B는 지원없음 조건에 비해 유의하게 높은 IBI를 나타냈다. 경로형은 전반적 긴장 수준 완화에는 효과적이었으나, 조작 안정성 및 순간적 불안 반응 억제 측면에서는 상대적으로 제한적이었다. 사고 건수, 주행 안정감 등 핵심 지표를 종합적으로 고려할 때, 선으로 차폭 기준을 제시하고 면으로 주행 가능 영역을 강조하는 혼합형 A가 다수의 핵심 지표에서 가장 균형 잡힌 결과 패턴을 보여, 차폭감 가이드의 유망한 디자인 대안으로 제안될 수 있음을 시사하였다.

결론 본 연구는 HUD 기반 차폭감 가이드가 협소 도로에서의 심리적 주행 부담을 완화하고 조작 안정성을 높이는 데 효과적임을 입증하였다. 이러한 결과는 향후 실차 HUD에 차폭감 가이드 적용 시 가이드라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 심리적 주행 안정감, 차폭감 가이드, 헤드업 디스플레이(HUD), 생체 데이터, 협소 도로 주행, 초보 운전자

*교신저자 : 김헌 (huhnkim@seoultech.ac.kr)