



프로젝션 라이팅 커뮤니케이션의 정량적 성능 평가방법에 관한 연구

이 유 진 · 권 수 민* · 조 혜 영 · 정 윤 재 · 하 연 화 · 박 진 우

한국교통안전공단 자동차안전연구원

A Study on Quantitative Performance Evaluation Methods for Projection Lighting Communication

Yujin Lee · Soomin Kwon* · Hyeyeong Jo · Yunjae Jeong · Yeonhwa Ha · Jinwoo Park

Automobile System Research Office, Korea Automobile Testing & Research Institute, Korea Transportation Safety Authority,
200 Samjon-ro, Songsan-myun, Hwaseong-si, Gyeonggi 18247, Korea

(Received 6 November 2025 / Revised 13 December 2025 / Accepted 16 December 2025)

Abstract : This study proposes a quantitative evaluation method for assessing the information delivery performance of automotive projection lighting communication systems. Projection lighting projects visual information on to the road or surrounding environment to provide intuitive messages, where visibility and clarity are critical. A prototype projection module was fabricated, and luminance, sharpness, contrast, and uniformity were selected as key evaluation metrics. Experiments were conducted in a darkroom environment using the prototype, and quantitative data were obtained through image analysis and luminance measurements. The results show that the prototype achieved high luminance, contrast, and uniformity, demonstrating excellent visual performance and validating the proposed method's effectiveness. This study contributes to enhancing performance evaluation and supports the standardization of projection lighting communication systems for future automotive applications.

Key words : Projection lamp(프로젝션 램프), Quantitative performance evaluation(정량적 성능 평가), Luminance(광도), Contrast and uniformity(대비 및 균일도), V2H(Vehicle to human), Autonomous vehicle(자율주행차)

Nomenclature

I : luminance, cd
C : contrast ratio
U : uniformity, %
G : sharpness index

Subscripts

L,R : left, right
DMD : digital micro mirror device
V2H : vehicle to human
eHMI : external Human-Machine Interface
ADS : autonomous vehicle system
ROI : region of Interest

1. 서 론

자율주행차 연구가 활발히 진행됨에 따라, 도로 이용자의 안전 확보와 차량-보행자 간 상호 이해를 위한 커뮤니케이션 기술의 중요성이 대두되고 있다. 이때, 도로 이용자인 도로교통법 제27조에 따라 보행하는 사람과 자전거를 견인하고 가는 사람 등을 포함한다. 자율주행 시 운전자의 개입 비율이 감소하고 있으나, 자율주행차 기술을 완전히 신뢰하지 못하기 때문에 도로 이용자는 자율주행차의 제어권 여부 등에 대해 차량으로부터 명시적인 의사 표현을 요구한다.¹⁾

V2H(Vehicle to Human) 기술은 자율주행차와 도로 이용자 간의 양방향 소통을 통한 사고 예방 기술로, 보행하는 사람 이외에도 자전거를 견인하고 가는 사람, 유모차,

*Corresponding author, E-mail: kwonsm@kotsa.or.kr

¹⁾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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

보행 보조용 의자차, 노약자용 보행기 등의 교통 약자를 대상으로 한다. 특히 보행자 및 운전자에게 시각적 정보를 전달하는 eHMI(external Human-Machine Interface)의 형태로 활발히 연구되고 있다. HMI 정보 제공 방법에 대한 연구²⁾에 따르면 차량 운행 과정 중에서 커뮤니케이션의 주체가 인간에서 자율주행 시스템으로 변화하며, 향후 레벨 4 차량에서는 새로운 의사소통의 수단으로써 eHMI가 본격적으로 채택될 것임을 알 수 있다. V2H 기술은 크게 디스플레이 타입과 프로젝션 타입으로 구분되며, 차량의 제어권 상태나 주행 의도를 시각적으로 표현하여 도로 이용자에게 자율주행차의 주행 정보를 전달한다.^{3,4)}

자율주행차와 도로 이용자의 커뮤니케이션 시스템에 대한 도로 이용자의 반응 및 선호도 등을 검증하기 위해 온라인 설문, 가상 현실(VR), 현장 평가를 활용한 연구들이 수행되고 있다. 가상 현실 환경에서 사고 위험률이 높은 고령 보행자를 대상으로 한 연구⁵⁾에서는 차량이 후진할 때 프로젝션 기반의 정보 제공 시스템을 사용할 경우, 제동등보다 빠르게 인지된다는 결과가 도출되었다.

메시지를 심볼로 전달하는 경우 심볼과 텍스트를 조합하여 제공한 경우보다 0.37초 빠르게 인지하는 것으로 나타났으나, 메시지 자체 호감도의 경우 심볼과 텍스트가 결합된 경우가 더 높게 나타났다.

63명의 피시험자가 eHMI의 유형(디스플레이, 라이트, 프로젝션 기술)에 대한 선호도를 평가한 연구⁶⁾에서는 가독성, 신뢰성, 수용성 항목에서 프로젝션 타입의 선호도가 가장 높게 나타났다.

가상 현실에서 프로젝션 기술의 투영 디자인을 평가한 연구⁷⁾에서는 다가오는 차량에 대한 18명 피시험자의 횡단 반응을 확인하였다. 설문 결과를 통해 차량이 보행자의 존재를 인식하고 있음을 나타내는 시각적인 방법은 차량에 대한 신뢰도를 높일 수 있으며, 프로젝션 된 심볼 및 패턴의 디자인이 보행자의 횡단 결정에 중요한 역할을 하고 차량과 보행자 간의 거리 및 차량 속도와 관련하여 시각적인 요소가 필요하다는 결과를 확인할 수 있다.

이와 같이 기존 연구는 자동차와 도로 이용자 간의 시각적 커뮤니케이션의 필요성과 프로젝션 기술의 효과를 평가하였으나 대부분 가상환경이나 도로 이용자의 주관적 의견이 반영된 정성적 평가에 한정되어 있다.

현행 「자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙」⁸⁾에서는 규정된 등화 외의 등화장치 설치를 금지하고 있어, 자율주행차의 eHMI와 같은 신규 등화장치에 관한 안전성 평가 기준 또한 부재한 상태이다.

V2H 기술의 경우 자동차 외부에 디스플레이 등의 시

각적 조명장치를 통해 도로 이용자와 시각적으로 커뮤니케이션 하기 위한 기술로 다른 도로 이용자에게 미치는 영향성 정도에 대한 정량적 평가가 필요하다.

특히, 노면 투영 방식의 등화장치의 경우 도로 이용자에게 직접적으로 조명이 되는 장치에 해당되지는 않지만, 고광도의 광원을 통해 도로 노면에 빛을 조명하는 기술로 다른 운전자의 눈부심과 혼란을 유발하지 않아야 하며, 이에 대한 정량적 평가 지표가 필요하다.

본 논문은 프로젝션 램프에 대한 통일된 성능 및 안전성 평가 체계가 부재한 한계를 보완하여 안전 운전과 도로 이용자 보호를 위해 V2H 기술 중 프로젝션 기술을 정량적으로 평가하기 위한 성능 지표를 도출하고, 해당 지표에 따른 평가결과를 제시하였다.

표출 메시지의 시인성을 정량적으로 평가하기 위한 지표로 광도, 대비, 균일도, 선명도를 제시하였으며, 평가결과의 외부 요인을 통제하고자 모든 시험은 암실 환경에서 수행되었다.

기존 연구인 V2H 커뮤니케이션 시스템의 성능 평가에 관한 연구⁹⁾에서는 안전성(광도)과 시인성(대비, 선명도)에 초점을 맞추었으나, 본 연구에서는 균일도를 추가하고 심볼 개수를 5개에서 10개로 확장하였다. 균일도는 심볼의 내용이 도로 이용자에게 노면 환경에 상관없이 일관된 밝기와 명확성으로 전달되는지를 확인하는 중요한 지표이기에, 광학 시스템의 성능 특성이 모든 영역에서 일정하게 유지되는지 정밀하게 파악할 수 있다. 또한 심볼 개수를 늘림으로써 더 다양한 심볼을 평가하여 결과의 통계적 신뢰성과 일반화 가능성을 높였다.

2. 평가방법

야간 도로 환경에서 프로젝션 라이팅 커뮤니케이션은 차량의 주행 의도 및 위험 정보를 다른 도로 이용자에게 시각적으로 전달하는 핵심 수단으로 작용한다. 이러한 커뮤니케이션의 효과는 도로 이용자가 조명 신호를 얼마나 빠르고 정확하게 인지할 수 있는가에 의해 좌우되며, 이는 조명의 물리적·시각적 특성에 대한 정량적 평가를 통해 객관적으로 검증될 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 프로젝션 라이팅 커뮤니케이션의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 지표로 광도(Luminance), 대비(Contrast), 균일도(Uniformity), 선명도(Sharpness)를 주요 평가 지표로 설정하였다. 각 지표는 투사 영상의 시각적 품질을 객관적으로 정량화할 수 있는 기준으로 선정하였으며, 광학적 특성과 영상 품질 간의 상관성을 분석하였다.

광도(I)는 조명 신호가 주변 조도 환경 속에서 충분한

밝기로 인지될 수 있는지를 나타내는 지표로, 야간 환경에서 도로 이용자의 시야 확보 및 주행 안전성과 직접적으로 연관된다. 광도가 부족할 경우 조명 신호는 배경에 묻혀 인지 지연 또는 미인지가 발생할 수 있으며, 반대로 과도한 광도는 눈부심을 유발하여 다른 도로 이용자의 시각적 부담을 증가시킨다. 따라서 광도는 단순한 밝기 수준이 아니라, 다른 도로 이용자에게 미치는 시각적 영향의 적절성을 판단하는 핵심 정량 지표로서 의의를 갖는다.

대비(C)는 조명 신호와 노면 또는 주변 배경 간의 휘도 차이를 정량화한 지표로, 조명 정보의 구분 용이성과 직결된다. 높은 대비는 조명 신호의 형태 및 의미를 빠르게 식별할 수 있도록 하여 인지 시간을 단축시키며, 이는 보행자, 자전거 이용자, 인접 차량 운전자 등 다양한 도로 이용자에게 정보 전달의 명확성을 향상시킨다. 즉, 대비는 프로젝트 라이팅이 다른 도로 이용자에게 의도된 메시지를 효과적으로 전달하는 정도를 설명하는 정량적 척도로 활용될 수 있다.

균일도(U)는 조명 신호 영역 내 빛의 분포가 얼마나 균등하게 유지되는지를 나타내는 지표로, 시각적 안정성과 신뢰도에 영향을 미친다. 조명 분포가 불균일할 경우 국부적인 과도 밝기 또는 암부가 발생하여 시각적 혼란을 유발하고, 신호의 연속적 인식을 저해할 수 있다. 이는 다른 도로 이용자가 조명 신호를 단편적으로 인식하거나 오해할 가능성을 증가시키므로, 균일도는 시각적 쾌적성뿐만 아니라 정보 전달의 일관성을 평가하는 정량 지표로서 중요한 의미를 가진다.

선명도(S)는 조명 신호의 경계 및 형태의 명확성을 나타내는 지표로, 신호 인식의 정확성과 밀접한 관련이 있다. 선명도가 낮을 경우 신호의 형태가 흐릿하게 인지되어 의미 해석 오류가 발생할 수 있으며, 이는 도로 이용자 간 상호작용에서 잠재적인 위험 요인으로 작용한다. 따라서 선명도는 프로젝트 라이팅 커뮤니케이션이 다른 도로 이용자에게 명확하고 오인 가능성이 낮은 시각 정보를 제공하는지를 평가하는 정량적 지표로서의 의의를 가진다.

종합적으로, 본 연구에서 제안한 광도, 대비, 균일도, 선명도 지표는 각각 독립적인 물리적 특성을 정량화함과 동시에, 다른 도로 이용자에게 미치는 시각적 인지 영향성과 직접적으로 연계된 평가 지표이다. 이들 지표의 조화로운 확보는 프로젝트 라이팅 커뮤니케이션의 시인성 및 안전성을 객관적으로 평가할 수 있는 기반을 제공하며, 향후 다양한 도로 환경 및 교통 상황에서의 성능 비교 및 설계 기준 수립에 활용될 수 있다.

2.1 평가 지표 정의

2.1.1 광도(Luminous Intensity, I , [cd])

광도는 프로젝트 라이팅 영상이 특정 방향으로 방출하는 발광 강도를 정량적으로 나타내는 지표로, 야간 도로 환경에서 다른 도로 이용자가 조명 신호를 인지할 수 있는 밝기 수준을 평가하는 데 활용된다.

본 연구에서는 투사 영상의 밝기 특성을 객관적으로 평가하기 위하여 휘도 카메라를 사용하여 투사 영역의 휘도를 측정하고, 이를 기반으로 광도 값으로 환산하였다.

휘도(Luminance)는 특정 관측 방향에서 단위 투영 면적당 방출되는 광도의 크기를 나타내는 물리량으로, 단위는 cd/m^2 이며 인간 시각이 인지하는 밝기 특성과 밀접한 관련이 있다.

투사 영상의 평균 휘도 값 L_{avg} 는 투사 영역 내 n 개의 측정점에서 획득한 휘도 값을 산술 평균하여 다음과 같이 계산된다.

투사 영상의 절대 밝기를 나타내는 지표로, 휘도계로 측정된 단위 면적당 광속을 사용하였다. 평균 휘도 값 L_{avg} 는 투사 영역 내 n 개의 측정점에서 다음과 같이 계산된다.

$$L_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (1)$$

여기서 L_i 는 i 번째 측정점에서 측정된 휘도 값 (cd/m^2)을 의미한다. 측정된 평균 휘도 값은 투사 영상이 균일한 확산 특성을 가진다고 가정하고, 투사 면적 A 를 고려하여 다음과 같이 광도 I 로 환산하였다.

$$I = L_{avg} \cdot A \quad (2)$$

여기서 A 는 투사 영상의 유효 투사 면적(m^2)을 의미한다. 본 연구에서는 관측 방향이 투사 면의 법선 방향에 가깝고 관측 각도의 영향이 제한적인 조건에서 실험이 수행되었으므로, 각도에 따른 보정 항은 생략하였다.

이와 같이 산출된 광도 값은 프로젝트 라이팅 영상의 전반적인 발광 강도를 나타내는 정량 지표로 정의되며, 서로 다른 투사 조건 및 설계 변수에 따른 밝기 성능을 비교·분석하는 데 활용된다.

2.1.2 대비(Contrast, C)

영상의 명암 차이를 나타내는 지표로, 심볼 및 패턴과 배경 간의 휘도 차이를 배경 휘도에 대한 비율로 산출하였다. 이를 베버 대비(Weber Contrast)라고 하며, 관심 영역과 배경 영역을 구별해 인식할 수 있는 정도를 나타내

는 지표이다.¹⁰⁾

$$C = \frac{L_{symbol\ mean} - L_{background\ mean}}{L_{background\ mean}} \quad (3)$$

$L_{symbol\ mean}$ 은 심볼 영역인 관심 영역의 휘도에 해당하고 $L_{background\ mean}$ 은 심볼을 제외한 나머지 영역인 배경의 휘도에 해당한다.

본 연구에서는 투사 영상의 크기가 조건에 따라 달라질 수 있는 특성을 고려하여, 면적 변화에 따른 밝기 영향을 반영할 수 있는 광도 지표를 사용하여 대비를 산출하였다.

2.1.3 균일도(Uniformity, U, [%])

균일도는 투사 영상 내 광도 분포가 얼마나 균등하게 유지되는지를 평가하기 위한 지표로, 시각적 안정성과 신뢰도에 직접적인 영향을 미친다. 균일도가 낮을 경우 국부적인 과도 밝기 또는 어두운 영역이 발생하여 도로 이용자의 인지 혼란 및 시각적 피로를 유발할 수 있다.

본 연구에서는 심볼 및 패턴 영역 내에서 측정된 광도 값 중 최소광도 L_{min} 와 최대광도 L_{max} 의 비율을 이용하여 균일도를 다음과 같이 정의하였다.

$$U = \frac{L_{min}}{L_{max}} \times 100 \quad (4)$$

여기서 L_{min} 과 L_{max} 는 각각 해당 영역 내에서 측정된 최소 및 최대 광도 값(cd)을 의미한다. 본 지표는 투사 영상 내 광도 편차의 상대적 크기를 정량적으로 평가할 수 있으며, 프로젝션 라이팅 시스템의 광 분포 안정성을 비교·분석하는 데 활용된다.

2.1.4 선명도(Sharpness, S)

선명도는 투사된 심볼의 경계 및 형태가 얼마나 명확하게 인지되는지를 나타내는 지표로, 도로 이용자의 신호 해석 정확도와 밀접한 관련을 가진다. 선명도가 낮을 경우 심볼의 경계가 흐릿하게 인지되어 의미 해석 오류가 발생할 수 있으므로, V2H 시스템의 시각적 신뢰성을 평가하는 핵심 지표 중 하나이다.

본 연구에서는 투사 영상의 광도 분포를 기반으로 선명도 계수를 산출하였다. 측정 데이터는 광도 단위(cd)의 2차원 행렬 형태로 구성되며, 각 행렬 요소는 수평각 및 수직각 위치에서 측정된 광도 값을 의미한다.

선명도 산출은 「자동차 및 자동차부품의 성능과 기준 시험법」¹¹⁾에서 규정하는 선명도 계수 산식을 기반으로

로 심볼 영역의 V-V에서 중앙 부분의 수직 스캐닝을 통해 도출하였다. 이때 E는 광도 변화가 급격한 구간의 각도 폭을 나타낸다.

$$S = (\log E_{\beta} - \log E_{\beta+0.1^{\circ}}) \quad (5)$$

β = 각도의 수직 위치

심볼 영역의 중심을 기준으로 수직 방향(V-V) 단면에 대해 광도 분포를 추출하고, 해당 단면에서 광도 변화가 급격하게 발생하는 구간을 분석하여 선명도 계수를 도출하였다. 이때 E는 광도가 급격히 변화하는 경계 구간에서의 각도 폭을 의미하며, 경계 변화가 급격할수록 선명도 계수는 증가한다.

본 연구에서 정의한 선명도 지표는 투사 심볼의 경계 인지 성능을 정량적으로 평가할 수 있으며, DMD 기반 프로젝션 라이팅 시스템에서 광학 정렬 상태 및 심볼 형상 설계가 시각적 인지 품질에 미치는 영향을 분석하는데 활용된다.

2.1.5 ROI(Region of Interest)

본 연구에서는 투사된 DMD(Digital Micromirror Device) 모듈의 전체 ROI는 DMD 모듈의 기준축을 중심으로 좌측 6.6도, 우측 7.6도, 상측 3.6도, 하측 3.6도이며, 심볼의 ROI는 DMD 모듈의 기준축을 중심으로 좌측 6.3도, 우측 1.5도, 하측 0.1도에서 3도이다.

ROI 내에서 심볼이 표출되는 것을 판단하는 역치(Threshold)를 심볼의 경계선 부근 평균 광도 값을 산출하여 900 cd로 설정하였다.

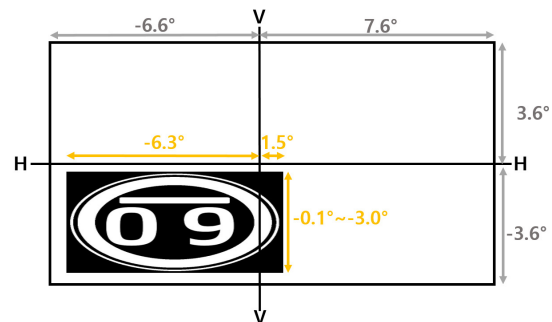


Fig. 1 Dmd module region of interest

2.2 평가 환경 및 장비 구성

평가 실험은 외부 광원의 영향을 최소화하기 위해 암실 환경에서 수행하였다. 투사 거리는 10 m로 고정하고, 노면을 대체하는 반사형 스크린을 사용하였다.

현행 「자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙 시행세칙」¹²⁾에서는 10 m 거리에서 전조등 컷오프의 품질을 측정한다. 이는 빛의 패턴과 컷오프 라인의 명확성, 대비, 시인성 등을 가장 정확하고 안정적으로 측정할 수 있는 범위이다.

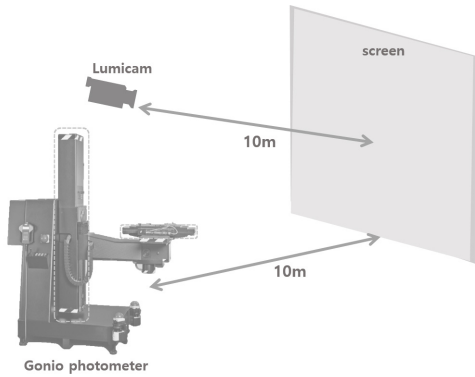


Fig. 2 Evaluation equipment

시제품 프로젝션 모듈은 차량용 전원 조건(DC 13.2 (V)) 하에서 구동하였으며, 투사된 심볼의 광도는 고정된 위치의 휘도카메라(Lumicam) 및 고니오포토미터(Gonio photometer)로 심볼별 1회 측정하였다.



Photo. 1 Evaluation environment

2.3 평가 심볼 및 패턴 구성

본 연구에서는 자율주행 차량과 도로 이용자 간의 효과적인 시각적 커뮤니케이션을 구현하기 위하여 정보 전달 단계를 정의하고, 이에 대응하는 심볼 및 패턴을 도출하였다. 심볼 선정의 객관성과 공학적 타당성을 확보하기 위해 전문가 기반 조사와 구조화된 아이디어 도출 절차를 병행하였다.

우선 Kano 모델 기반 설문조사를 2회 실시하였으며,

총 36명을 대상으로 하였다. 설문 응답자는 자율주행 관련 평균 경력 2.67년의 전문가 집단으로 구성되었으며, 이를 통해 자율주행 외부 커뮤니케이션에서 요구되는 정보가 차량 상태 인지와 주행 의도 전달의 두 단계로 구분됨을 확인하였다.

이후 등화장치 및 차량 조명 분야 전문가를 대상으로 Ideation 및 What-if 기법을 적용하여 자율주행 차량과 도로 이용자가 교착 상태에 놓이는 상황을 가정한 심볼 디자인을 도출하였다. 그 결과 총 110개의 심볼 및 패턴이 제안되었으며, 의미 중복 여부, 시각적 직관성, 광학적 구현 가능성 및 프로젝션 라이팅 적용 적합성을 기준으로 분류·선정 과정을 거쳐 최종적으로 10개의 심볼을 도출하였다.

선정된 심볼은 기능적 의미에 따라 두 범주로 구분된다. 심볼 1과 2는 차량의 제어 상태를 나타내어 자율주행 중임을 알리는 역할을 하며, 심볼 3부터 10까지는 차량의 주행 의도를 전달하는 심볼이다. 이 중 심볼 3~6은 감속 및 진행 방향 등 차량의 동적 상태를 표현하고, 심볼 7~10은 차량의 정지 또는 통과 예정 여부를 나타내어 보행자에게 횡단 가능 여부 또는 주의를 전달한다.

이와 같이 본 연구에서 사용된 심볼은 자율주행 커뮤니케이션 단계별 정보 요구를 반영하여 체계적으로 선정되었으며, 이후 수행된 정량적 성능 평가를 통해 심볼 유형에 따른 광학적 특성과 시각적 인지 성능을 비교·분석하기 위한 실험 대상으로 활용되었다.

Table 1 Symbols and patterns

	1	2		
Vehicle control				
	3	4	5	6
Deceleration / Passing				
	7	8	9	10
Vehicle stop / Warning				

3. 평가결과

3.1 광도 측정 결과

본 연구는 총 10가지 테스트 심볼에 대한 DMD 측정 데이터를 수집하였으며, ROI 영역 내에서 측정된 광도 값을 세 가지 영역을 기준으로 분석하였다.

Table 2 Luminance values (symbol area)

Test sequence (cd ≥ 900)	1	2	3	4	5
Average (cd)	24,736.3	25,169.8	20,322.6	16,885.4	22,157.7
Max (cd)	62,143	62,082	56,319	50,833	58,363
Min (cd)	900.3	902.2	902.3	903.8	900.8
Test sequence (cd ≥ 900)	6	7	8	9	10
Average (cd)	17,116.7	22,049.5	24,081.2	23,873.1	14,638.8
Max (cd)	53,573	58,473	56,104	57,831	51,649
Min (cd)	901.5	905.1	901.8	904.8	900.1

심볼 영역(900 cd 이상)의 측정 결과를 요약하여 제시하였다. 전체의 평균 광도는 최소 14,638.8 cd에서 최대 25,169.8 cd의 범위로 나타났다. 특히 2번 심볼(25,169.8 cd), 1번 심볼(24,736.3 cd), 8번 심볼(24,081.2 cd)에서 비교적 높은 평균 광도를 보였으며, 10번 심볼(14,638.8 cd)에서 가장 낮은 평균 광도를 기록했다.

Table 3 Luminance values (background area)

Test sequence (900 > cd)	1	2	3	4	5
Max (cd)	899.9	899.3	894.3	894.6	899.9
Min (cd)	105.1	155.9	101.9	91.6	91.8
Test sequence (900 > cd)	6	7	8	9	10
Max (cd)	894.3	891.0	891.1	899.2	899.7
Min (cd)	95.9	89.8	100.9	122.1	110.0

심볼 ROI 내에서 심볼(1 ≥ 900 cd)을 제외한 배경 영역 내에서 측정된 최대 광도는 891.0 cd에서 899.9 cd의 분포를 나타내, 심볼 간 최대값 차이가 약 8.9 cd임을 확인하였다.

최소광도 측정값은 89.8 cd에서 155.9 cd로, 심볼 간 최

Table 4 Luminance values (full-roi)

Test sequence	1	2	3	4	5
Average (cd)	395.4	406.9	384.8	374.9	372.4
Max (cd)	845.8	827.9	775.1	767.1	772.2
Min (cd)	32.1	36.8	33.5	25.9	26.3
Test sequence	6	7	8	9	10
Average (cd)	377.5	381.2	396.0	389.8	383.7
Max (cd)	768.7	758.2	764.8	769.1	766.3
Min (cd)	28.9	27.0	32.2	29.5	27.4

소값 차이가 약 66.1 cd임을 확인하였다.

전체 ROI 내에서 심볼 ROI를 제외한 배경 영역 내에서 측정된 최대 광도는 758.2 cd에서 845.8 cd의 분포를 나타내, 심볼 간 최대값 차이가 약 87.6 cd임을 확인하였다.

10가지 심볼의 평균 광도는 372.4 cd(심볼 5)에서 406.9 cd(심볼 2) 범위로 나타나, 심볼 영역에 비해 심볼 간의 평균값 차이가 상대적으로 작았다.

3.2 대비 측정 결과

심볼의 명암 차이를 평가하기 위해, 심볼 및 패턴 영역 내 별 최대광도와 최소광도 비율을 통해 대비를 확인하였다.

Table 5 Contrast values

No	Symbol mean (cd)	Background mean (cd)	C
1	10,267.7	2,636.7	2.9
2	17,589.6	4,308.0	3.1
3	9,059.3	2,354.2	2.8
4	5,097.3	1,447.0	2.5
5	5,285.5	1,487.8	2.6
6	6,184.0	1,695.7	2.6
7	5,511.1	1,538.3	2.6
8	10,013.0	2,569.2	2.9
9	8,318.4	2,182.4	2.8
10	6,582.4	1,786.8	2.7

10개 심볼 모두 대비 값이 2 이상이며, 최대 C 값은 3.1(심볼2), 최소 C 값은 2.5(심볼 4)로 나타났다.

3.3 균일도 측정 결과

ROI 영역 내에서 측정된 광도값의 균일성을 평가하기 위해, 심볼 및 패턴 영역 내 별 최소광도 대비 최대광도 비율을 통해 균일도를 확인하였다.

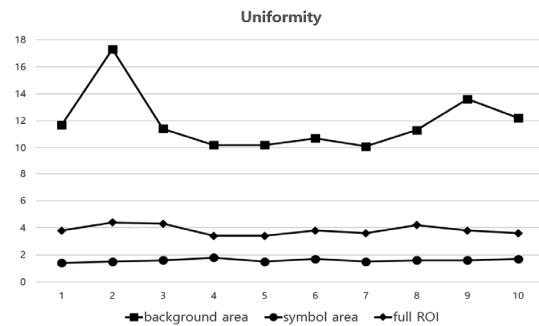


Fig. 3 Uniformity value

심볼 2의 경우 심볼 ROI 내에서 심볼($I \geq 900$ cd)을 제외한 배경 영역의 균일도는 17.3 %로 상대적으로 높지만, 심볼 영역(900 cd 이상)과 전체 ROI 내에서 심볼 ROI를 제외한 배경 영역 내에서 측정된 균일도 영역은 각각 1.5 %, 4.4 %로 균일도가 낮음을 확인하였다.

Table 6 Uniformity values (symbol area)

No	Max (cd)	Min (cd)	U (%)
1	62,143	900.3	1.4
2	62,082	902.2	1.5
3	56,319	902.3	1.6
4	50,833	903.8	1.8
5	58,363	900.8	1.5
6	53,573	901.5	1.7
7	58,473	905.1	1.5
8	56,104	901.8	1.6
9	57,831	904.8	1.6
10	51,649	900.1	1.7

심볼 영역(900 cd 이상)에서 균일도의 비율은 1.4 %에서 1.8 % 사이에 분포하여, 심볼 전체에서 매우 낮은 편차를 보였다.

Table 7 Uniformity values (background area)

No	Max (cd)	Min (cd)	U (%)
1	899.9	105.1	11.7
2	899.3	155.9	17.3
3	894.3	101.9	11.4
4	894.6	91.6	10.2
5	899.9	91.8	10.2
6	894.3	95.9	10.7
7	891.0	89.8	10.1
8	891.1	100.9	11.3
9	899.2	122.1	13.6
10	899.7	110.0	12.2

심볼 ROI 내에서 심볼($I \geq 900$ cd)을 제외한 배경 영역 내에서 균일도의 비율은 10.1 %에서 17.3 % 사이에 분포하였다.

전체 ROI 내에서 심볼 ROI를 제외한 배경 영역 내에서 측정된 균일도의 비율은 3.4 %에서 4.4 % 사이에 분포하였다.

Table 8-1 Uniformity values (full roi)

No	Max (cd)	Min (cd)	U (%)
1	845.8	32.1	3.8
2	827.9	36.8	4.4
3	775.1	33.5	4.3
4	767.1	25.9	3.4
5	772.2	26.3	3.4

Table 8-2 Uniformity values (full roi)

No	Max (cd)	Min (cd)	U (%)
6	768.7	28.9	3.8
7	758.2	27.0	3.6
8	764.8	32.2	4.2
9	769.1	29.5	3.8
10	766.3	27.4	3.6

3.4 선명도 측정 결과

특정 중심 위치(수평(H):-2.4, -6.3~1.5 중심 위치)에서의 선명도(S) 분석 결과를 제시하였다.

Table 9 Sharpness values

Test sequence	1	2	3	4	5
V (°)	-0.9	-0.3	-2.6	-1.2	-1.4
Luminous (cd)	37,995	24,954	19,314	25,784	3,083
G	1.36	1.22	1.29	1.32	0.69
Test sequence	6	7	8	9	10
V (°)	-1.0	-1.0	-1.1	-1.5	-2.8
Luminous (cd)	8,981	9,799	47,360	19,070	27,333
G	1.04	1.01	0.88	1.18	0.88

측정된 수직각은 -0.3(심볼 2)에서 -2.8(심볼 10) 범위로 나타났으며, 값 계산의 위치는 H 축의 -6.3과 1.5의 중심인 -2.4로 설정되었다.

계산된 S 값은 최소 0.69(심볼 5)에서 최대 1.36(심볼 1)의 범위로 분포하였다.

S 값이 1.3 이상으로 비교적 높은 심볼은 1(1.36)과 4(1.32)였으며, 1.0 미만으로 비교적 낮은 심볼은 5(0.69), 8(0.88), 10(0.88)이었다.

이 S 값 측정 시점의 광도는 최소 3,083 cd(심볼 5)에서 최대 47,360 cd(심볼 8)로, 심볼별 편차가 크게 나타났다.

4. 결론

본 연구는 DMD 기반 프로젝션 라이팅을 활용한 V2H (Vehicle-to-Human) 시스템의 광학적 성능을 정량적으로 평가하기 위해 광도, 대비, 균일도, 선명도 지표를 도입하고, 다양한 심볼 조건에서의 휘도 기반 측정 결과를 분석하였다. 특히 단순한 성능 수치 비교를 넘어, 각 지표가 도로 이용자의 시각적 인지와 시스템 안정성 측면에서 어떠한 의미를 갖는지를 공학적으로 해석하는 데 연구의 초점을 두었다.

첫째, 심볼 영역(900 cd 이상)에서 DMD는 심볼에 따라 최소 14,638.8 cd에서 최대 25,169.8 cd의 범위로 넓은 평균 광도 분포를 나타냈다.

전체 ROI 내에서 심볼 ROI를 제외한 영역의 평균 광도는 372.4 cd에서 406.9 cd 사이로 심볼 간 편차가 상대적으로 작았다. 이는 DMD가 고광도 출력뿐만 아니라 저광도 영역에서도 비교적 정밀한 제어가 가능함을 시사하며, 야간 환경에서 다양한 시각 조건을 가진 도로 이용자에게 일관된 시각 정보를 제공할 수 있는 기반 기술임을 의미한다. 또한 최소 하한값이 30 cd에 근접한 것은 DMD가 저광도에서도 정밀한 제어 능력을 보임을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 V2H 시스템에서 요구되는 신뢰성과 반복 재현성 측면에서 중요한 공학적 장점으로 해석될 수 있다.

둘째, 근거리 프로젝션 기술의 가시성 요구조건과 반응시간을 분석한 연구¹³⁾에서는 최소 조건을 0.4로 언급하였다. 이를 기반으로 심볼의 대비를 평가한 결과와 비교하였을 때, 최대 C 값은 3.1(심볼 2), 최소 C 값은 2.5(심볼 4)로 약 5배 이상 높은 수준으로 나타났다. 대비 분석 결과는 프로젝션 라이팅 심볼이 배경과 충분히 구분될 수 있는 시각적 여유도를 확보하고 있음을 보여주었다. 이는 기존 근거리 프로젝션 기반 커뮤니케이션의 최소 가시성 요구 조건을 상회하는 수준으로, DMD 기반 시스템이 야간 도로 환경에서 빠른 인지와 반응을 유도할 수 있는 잠재력을 가진다는 점을 시사한다. 다시 말해, 대비 지표는 본 시스템이 ‘인지 가능 여부’를 넘어 ‘인지 용이성’을 확보하고 있음을 정량적으로 설명하는 지표로 기능한다.

셋째, 심볼의 균일도를 평가한 결과 복미 조명 공학회(IESNA)¹⁴⁾에 권장되는 안전성에 관련된 척도인 거리 조명 최소 기준 25%와 비교하였을 때, 모든 영역과 심볼에서 개선이 필요하다. 특히 심볼 1, 2에서 높은 광도를 보였으나, 최소광도 대비 최대광도의 비율이 모든 심볼에서 1.4%에서 1.8% 사이로 매우 낮게 나타났다. 높은 광도 출력이 반드시 시각적 품질의 향상으로 이어지지 않

음을 보여준다. 일부 심볼에서는 높은 최대 광도를 보였음에도 불구하고, 최소광도와와의 편차가 크게 나타나 균일도 측면에서 개선이 필요함을 확인하였다. 이는 DMD 기반 프로젝션 시스템에서 광 출력 설계 시 단순한 밝기 증대보다는 광 분포 제어 및 광학계 설계 최적화가 병행되어야 함을 시사하며, 시스템 안정성 관점에서 중요한 설계 고려 요소로 해석될 수 있다.

넷째, UN Regulation R149(조명용 등화장치 기준)¹⁵⁾에서는 전조등의 컷오프 선명도를 0.13 이상일 것으로 규정하고 있다. 선명도 계수 분석 결과, S 값은 0.69에서 1.36 사이로 분포하며 심볼별로 상대적으로 큰 편차를 보였다. S 값은 DMD 미러 배열의 기하학적 정렬 및 조명 각도에 민감하게 반응하는 지표로 해석될 수 있으며, 심볼 1(1.36)과 4(1.32)에서 높은 S 값은 해당 심볼 조건에서 높은 해상도를 나타냄을 의미한다. 반면, 낮은 S 값(심볼 5, 0.69)은 해당 심볼을 표출할 때 경계 선명도가 상대적으로 다른 심볼에 비해 선명도가 낮음을 나타낸다. 선명도 지표 분석을 통해서 심볼 형상에 따라 경계 인지 성능이 달라질 수 있음을 확인하였다. 선명도는 DMD 미러 배열의 기하학적 특성, 투사 해상도, 광축 정렬 상태 등에 민감하게 반응하는 지표로, 특정 심볼 조건에서 상대적으로 낮은 선명도가 관찰된 것은 광학 정렬 및 패턴 설계가 시각 인지 성능에 직접적인 영향을 미친다는 점을 시사한다. 이는 V2H 시스템에서 단일 성능 지표만으로는 전체 시각 품질을 설명하기 어렵고, 심볼 형태와 광학 구조 간의 상호작용을 고려한 통합적 설계가 필요함을 의미한다.

종합적으로, 본 연구를 통해 DMD 기반 V2H 프로젝션 라이팅 시스템은 광도 제어 측면에서 높은 안정성과 재현성을 확보하고 있으나, 균일도 및 선명도 측면에서는 광학적 설계 변수에 따라 성능 편차가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 본 연구에서 제안한 정량적 지표들이 단순한 성능 비교 도구를 넘어, V2H 시스템의 광학적 설계 방향성과 개선 우선순위를 도출하는 공학적 분석 도구로 활용될 수 있음을 시사한다.

향후 연구에서는 선명도와 균일도 저하의 원인을 DMD 미러의 물리적 구동 특성, 광원 배치, 투사 각도 변화 등과 연계하여 보다 심층적으로 분석할 필요가 있으며, 이를 통해 도로 이용자의 인지 오류 가능성을 최소화하는 최적의 프로젝션 라이팅 설계 기준을 제시하고자 한다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원으로 수행하였습니다(RS-2021-KA162419).

References

- 1) K. de Clercq, A. Dietrich, J. P. Nunez Velasco, J. C. F. de Winter and R. Happee, "External Human-Machine Interfaces on Automated Vehicles: Effects on Pedestrian Crossing Decisions," *Human Factors*, Vol.61, No.8, pp.1353-1370, 2019.
- 2) W. Seo, B. Choi, S. Hong and J. Yang, "Comparative Study on Characteristics of HMI Information in Partially Automated Vehicles Based on UI Case Analysis," *Transactions of KSAE*, pp.255-265, 2024.
- 3) Y. Ha, S. Kwon, S. Choi, S. Ko, J. Lee, S. Lee and J. Jang, "A Study on the Efficient Placement of External Display for Autonomous Vehicles Using Gaze Tracking," *Transactions of KSAE*, pp.1039-1044, 2023.
- 4) S. Choi, S. Kwon, Y. Ha and J. Jeong, "V2H Communication Technology Enabled by Autonomous Vehicle e-HMI," *Transactions of KSAE*, Vol.45, No.6, pp.20-23, 2023.
- 5) B. S. Mason, S. Lakshmanan, P. McAuslan, M. Waung and B. Jia, "Lighting a Path for Autonomous Vehicle Communication: The Effect of Light Projection on the Detection of Reversing Vehicle by Older Adult Pedestrians," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.19, No.22, Paper No.14700, 2022.
- 6) M. Schmidt-Wolf and D. Feil-Seifer, "Vehicle-To-Pedestrian Communication Feedback Module: A Study on Increasing Legibility, Public Acceptance and Trust," *Proceedings of the International Conference on Social Robotics*, pp.14-23, Florence, Italy, 2022.
- 7) T. T. Nguyen, K. Hollander, M. Hoggenmueller, C. Oarjer and M. Tomitsch, "Designing for Projection-Based Communication Between Autonomous Vehicles and Pedestrians," *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp.284-294, 2019.
- 8) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Regulation on Performance and Standards of Motor Vehicles and Motor Vehicle Parts, Article 47 Paragraph 3 (Restrictions on Other Lamps)*, National Law Information Center, 2025.
- 9) Y. Lee, S. Kwon, H. Jo, J. Park and Y. Jeong, "A Study on Performance Evaluation of V2H Communication System in Autonomous Vehicle," *KSAE Annual Conference Proceedings*, p.885, 2025.
- 10) E. Peli, "Contrast in Complex Images," *Journal of the Optical Society of America*, Vol.7, No.10, pp.2032-2042, 1990.
- 11) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Enforcement Rule on Performance and Standards of Motor Vehicles and Motor Vehicle Parts, Annex 1 Detailed Test Standards and Methods for Motor Vehicle Safety Standards, 21-2.6.5.2 Cut-Off Quality Measurement*, 2025.
- 12) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Enforcement Rule on Performance and Standards of Motor Vehicles and Motor Vehicle Parts, Annex 1 Detailed Test Standards and Methods for Motor Vehicle Safety Standards, 21-2.6.5.2 Cut-Off Sharpness*, 2025.
- 13) T. Schlurscheid, A. Stuckert, A. Erkan and T. Q. Khanh, "An Analysis of Visibility Requirements and Reaction Times of Near-Field Projections," *Displays*, Vol.81, Paper No.102558, 2024.
- 14) IESNA, *ANSI/IES RP-8-21 Recommended Practice for Design and Maintenance of Roadway and Parking Facility Lighting*, IESNA, 2021.
- 15) UN R149, *Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicles, Systems, Components and Separate Technical Units Related to the Lighting and Light-Signaling Devices*, United Nations ECE, 2020.