J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 37, No. 3, pp. 314-321 May 2024
doi: https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.3.12
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

낮은 도로 조명의 노면 휘도 실태 분석에 대한 연구

남기호[1], 김충혁[2]

[1] 광운대학교 대학원 플라즈마바이오디스플레이학과
[2] 광운대학교 인제니움학부

The Study on the Analysis of Road Surface Brightness of Low Mounted Road Lighting System

Kiho Nam[1] and Chung Hyeok Kim[2]

[1] Department of Plasma Bio Display, Kwang-woon University, Seoul 01897, Korea
[2] Deperatment of Ingenium, Kwang-woon University, Seoul 01897, Korea

(Received April 2, 2024; Revised April 8, 2024; Accepted April 11, 2024)

Abstract : Low road lighting is a lighting device that complements the shortcomings of existing pillar-type street lights. It is a lighting device that emits light from the side of the road surface and adjusts the luminance of the road surface like a light carpet. In this paper, to achieve full commercialization, we analyzed the luminance of the installed road surface and studied whether lighting could replace existing road lighting. In this study, the LMK (Luminance Measurement Camera) LABSOFT program was used to measure and analyze the surface luminance of road lighting, and the RELUX program was used to evaluate and analyze the simulation performance to determine light-based lighting conditions. A study was conducted to determine whether replacing pillar-type road lighting with low-level road lighting in a real environment would ensure comfortable and safe night vision for drivers at night.

Keywords : Low road lighting, Surface brightness, Low mounted road lighting

1. 서 론

낮은 도로 조명 방식은 기존의 폴방식의 도로 조명을 낮은 위치에 설치하여, 쾌적한 도로 조명환경과 기존의 높은 위치에서 조사하여 발생하는 광누설을 보완하기 위해 만들어진 조명 시스템이다 [1].

✉ **Chung Hyeok Kim; hyeokkim@kw.ac.kr**

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
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.

이로 인한 효과는 빛 공해 방지, 에너지 절감, 경관 조명 디자인에 기여하는 등 기존의 등주 방식에서 구현하지 못했던 다양한 이점을 구현할 수 있게 되었다.

기존의 도로용 가로등은 헤드라이트만으로는 충분한 조명을 제공하기 어려운 상황에서 주행 중의 시야 확보뿐만 아니라 교통사고 예방 및 운전자의 주의 집중도 향상에도 기여한다. 그러나 노면의 광속 분포에 따라 심한 휘도 대비는 교통사고를 일으킬 수도 있으며 눈부심에 의한 부담으로 차량 운행 안전에 불편을 주는 요소로 작용하기도 한다 [2].

이러한 이유로 최근 도로 조명의 효과를 극대화하기 위해 다양한 형태의 도로 조명에 대한 연구를 하고 있으며, 그 가운데 하나인 낮은 도로 조명은 노면 휘도에 대한 광학

적 분석에 의한 설계가 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

본 연구에서는 LMK (luminance measuring kamera) 랩소프트(LABSOFT) 프로그램을 활용하여 낮은 도로 조명의 노면 휘도를 측정하고 분석하였으며, 리룩스(RELUX) 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 성능 평가 및 분석을 통해, 등주 방식의 도로 조명 환경을 대체할 경우 야간 운전자에게 편안하고 안전한 야간시계를 확보할 수 있는가에 대해 연구하였다.

2. 본 론

2.1 낮은 도로 조명의 이해

낮은 도로 조명은 기존의 등주 방식 가로등과는 다르게 운전자의 시야 아래의 낮은 높이에 설치되어 노면을 비추는 방식으로 새로운 개념으로 제안된 방식이다. 낮은 도로 조명은 낮은 높이에 설치되기 때문에 등주 방식의 가로등 대비 낮은 광량이 필요하며 [5] 노면의 조도, 휘도 및 균제도를 만족하기 위해서 좁은 간격으로, 연속적으로 설치되기 때문에 기존에는 라인 조명이라고도 불렸다 [4]. 지금까지의 낮은 도로 조명은 도로경계를 안내하는 라인 조명의 수준에서 출발하여 라이트 카펫(light capet)으로 구현되기까지 약 20년 정도 시간이 걸려 구현하게 되었다.

2.2 측정 방법 및 분석 절차

LMK 면 휘도계는 8 mm, 25 mm, 50 mm 등이 기본 렌즈이며 측정 도로의 상황에 맞춰 렌즈를 선택하여 장비에 장착한다. LMK 랩소프트(LMK Labsoft) 프로그램을 실행하여 최적의 렌즈를 선택하고 렌즈 포커스 및 노출 시간을 설정한다.

휘도 측정 모드는 singlepic, Multipic, HighDyn 3가지로 구분된다. Singlepic 모드는 기본 측정 모드로 지정된 노출 시간으로 1회 측정하며 측정 영역의 휘도 격차가 좁을 때 주로 사용한다. Multipic 모드는 지정된 노출 시간으로 n회 측정한 뒤 하나의 이미지로 병합하며, 데이터의 contrast를 높이고 노이즈를 제거하여 주로 안정적인 데이터를 얻고 싶을 때 사용한다. HighDyn 모드는 노출 시간을 긴 시간부터 짧은 시간까지 변경하며 측정한 뒤 하나의 이미지 데이터로 병합한다. 일반적으로 그림 3과 같은 도로 조명 휘도 분석 시 사용하며 다른 측정 방법에 비하여 넓은 휘도 범위를 측정할 수 있으며 측정 영역 내 밝고 어둠(bright and dark)의 차이가 심할 때 사용한다. 측정 횟수는 오버플로우가 발생하지 않고 적정한 포화 값을 가질 때까지 시간 비율로 감소하며 측정한다.

LMK 랩소프트(Labsoft) 프로그램을 통하여 측정된 영

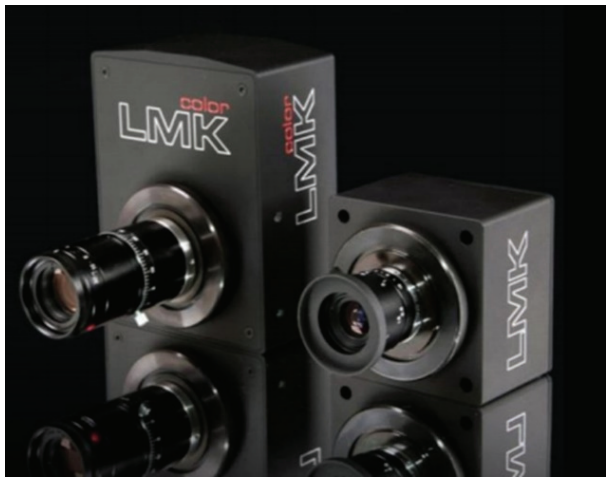


Fig. 2. Plane luminance meter (LMK).

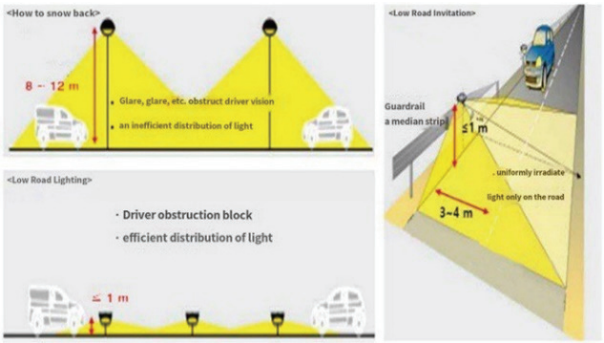


Fig. 1. Comparison of pole type road lighting and low mounted road lighting system [4].

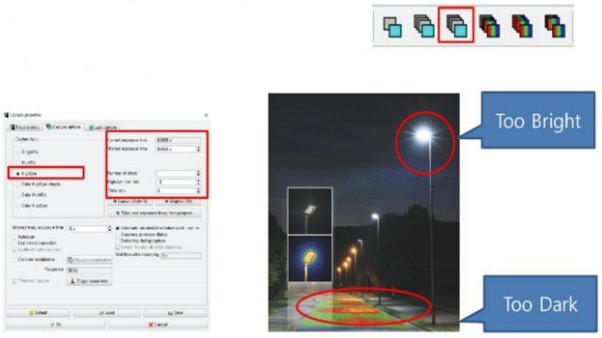


Fig. 3. Labsoft software program - HighDyn measurement mode.

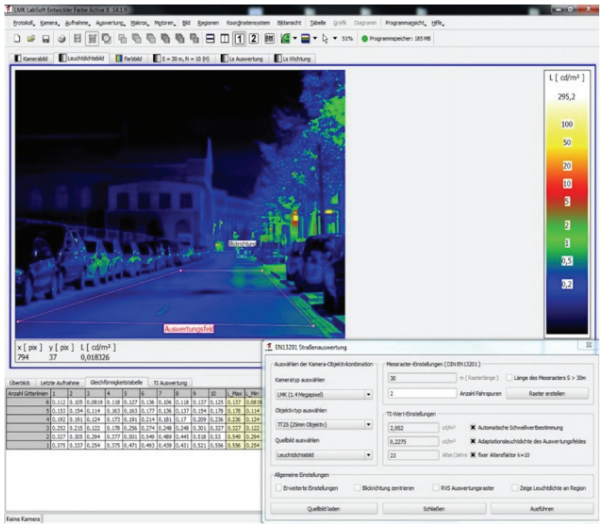


Fig. 4. LMK Labsoft software program - road surface evaluation tool.

역의 평균 노면 휘도(luminance average), 종합균제도(uniformity overall), 차선축균제도(uniformity lengthwise), 임계치증분(threshold index)의 분석이 가능하다. 그림 4는 LMK 랩소프트(Labsoft) 프로그램의 도로 노면 분석의 예이다.

2.3 낮은 도로 조명의 도로 노면 휘도 측정

낮은 도로 조명의 도로 노면 휘도 측정을 위하여 낮은 도로 조명이 설치된 인천공항2터미널 3층, 김포 태장로, 영종도다리, 시화대교 4곳을 선정하였다. 실제 도로환경의 평균 노면 휘도, 종합균제도, 차선축균제도를 측정하여 한국 산업표준(KS) 도로 조명기준(KS A 3701)에 적용하여 분석하였다. 표 1은 KS A 3701 운전자에 대한 도로 조명의 휘도 기준이다 [3]. 표 2는 측정대상 도로 조명의 사양 및 설치 조건이며 그림 5는 휘도 측정을 진행한 도로의 사진이다.

그림 6과 그림 7은 낮은 도로 조명이 설치된 4곳 가운데 김포 태장로의 휘도 분석 이미지를 대표적으로 나타냈다.

김포 태장로의 도로는 3차선 도로이며 등 간격 4.5 m, 설치 높이 0.9 m로 낮은 도로 조명이 설치되어 있다. 측정 결과는 표 3과 같다. 평균 노면 휘도 0.416 cd/m^2, 종합균제도 0.484, 차선축균제도는 1차선 0.462, 2차선 0.523, 3차선 0.490으로 나타났으며, 평균 노면 휘도는 가장 낮은 도로 조명등급인 M5 기준을 만족하지 못하였으며, 차선축균제도는 도로 조명등급 M5로 나타났다.

Table 1. Criteria for luminance of road lighting for drivers (KS A 3701) [3].

Grade	Road surface				Threshold index
	Dry			Wet	
	Luminance average Lavg (cd/m^2)	Uniformity overall Uo (Lmin/Lavg)	Uniformity lengthwise Ul (Lmin/Lmax)	Uniformity overall Uo (Lmin/Lavg)	TI (%)
M1	2.00	0.40	0.70	0.15	10
M2	1.50	0.40	0.70	0.15	10
M3	1.00	0.40	0.60	0.15	15
M4	0.75	0.40	0.60	0.15	15
M5	0.50	0.35	0.40	0.15	15

Table 2. Specifications and installation conditions of road lighting to be measured.

Area	Installation conditions		
	Lane	Height (m)	Interval (m)
Gimpo Taejang-ro	3	0.9	4.5
Sihwa bridge	2	0.9	2.5
Yeongjongdo bridge	2	0.9	4
Incheon international airport terminal 2	3	0.9	4

Fig. 5. Road photos for luminance measurement: (a) Gimpo Taejang-ro, (b) Sihwa bridge, (c) Yeongjongdo bridge, and (d) Incheon international airport terminal 2.

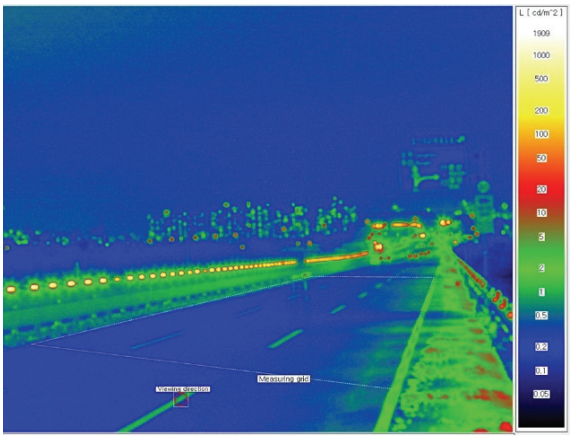


Fig. 6. Gimpo Taejang-ro road surface luminance analysis image - 1.

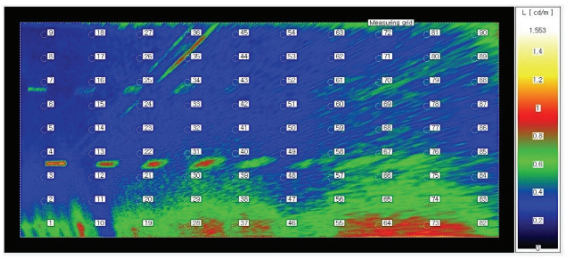


Fig. 7. Gimpo Taejang-ro road surface luminance analysis image - 2.

Table 3. Gimpo Taejang-ro road surface luminance analysis results.

Lane	Maximum luminance	Minimum luminance	Uniformity lengthwise
1 lane	0.461	0.213	0.462
2 lane	0.447	0.234	0.523
3 lane	0.638	0.313	0.490
Luminance average		Uniformity overall	
0.416		0.484	

Table 4. Sihwa bridge road surface luminance analysis results.

Lane	Maximum luminance	Minimum luminance	Uniformity lengthwise
1 lane	0.914	0.382	0.418
2 lane	1.98	0.211	0.107
Luminance average		Uniformity overall	
1.04		0.203	

Table 5. Yeongjongdo bridge road surface luminance analysis results.

Lane	Maximum luminance	Minimum luminance	Uniformity lengthwise
1 lane	3.07	2.17	0.706
2 lane	3.48	2.25	0.649
Luminance average		Uniformity overall	
2.87		0.588	

Table 6. Incheon international airport terminal 2 road surface luminance analysis results.

Lane	Maximum luminance	Minimum luminance	Uniformity lengthwise
1 lane	6.65	2.80	0.422
2 lane	4.15	3.16	0.763
Luminance average		Uniformity overall	
3.66		0.528	

시화대교의 도로는 2차선 도로이며 등 간격 2.5 m, 설치 높이 0.9 m로 낮은 도로 조명이 설치되어 있다. 측정 결과는 표 4와 같다. 평균 노면 휘도 1.04 cd/m^2, 종합균제도 0.203, 차선축균제도는 1차선 0.418, 2차선 0.107로 나타났으며, 평균 노면 휘도는 도로 조명등급인 M3 기준을 만족하였으며, 종합균제도 및 차선축균제도의 경우 M5등급을 만족하지 못하였다.

영종도다리의 도로는 2차선 도로이며 등 간격 4 m, 설치 높이 0.9 m로 낮은 도로 조명이 설치되어 있다. 측정 결과는 표 5와 같다. 평균 노면 휘도 2.87 cd/m^2, 종합균제도 0.588, 차선축균제도는 1차선 0.706, 2차선 0.649으로 나타났으며, 평균 노면 휘도는 도로 조명등급인 M1 기준을 만족하였으며, 차선축균제도의 경우 M3등급을 만족하였다.

인천공항2터미널의 도로는 2차선 도로이며 등 간격 4 m, 설치 높이 0.9 m로 낮은 도로 조명이 설치되어 있다. 측정 결과는 표 6과 같다. 평균 노면 휘도 3.66 cd/m^2, 종합균제도 0.528, 차선축균제도는 1차선 0.422, 2차선 0.763으로 나타났으며, 평균 노면 휘도는 도로 조명등급인 M1 기준을 만족하였으나 차선축균제도의 경우 M5등급을 만족하였다.

2.4 도로 노면 휘도 측정 결과

앞서 분석한 낮은 도로 조명이 설치된 4곳의 도로 휘도 측정 결과 영종도다리에서 M3 도로 조명등급을 만족하였으며, 인천공항2터미널은 M5등급, 김포 태장로, 시회대교는 최소 도로 조명등급인 M5를 만족하지 못하였다. 표 7은 도로 휘도 측정 결과를 정리한 표이다.

시험 결과에서 확인할 수 있듯이 낮은 도로 조명이 설치된 영종도다리를 제외한 3곳에서 도로 조명기준(KS A 3701)의 M3 도로 조명 등급을 만족하지 못하였다. 김포 태장로의 경우 평균 노면 휘도가 0.42로 운전자가 확보해야 할 최소 노면 휘도 기준을 만족하지 못하였고, 시화대교의 경우 종합균제도 0.203으로 도로 노면의 최소 균제도를 만족하지 못하였다. 또한, 차선축균제도의 경우 낮은 도로 조명의 배광각보다 넓은 등 간격의 설정으로 차선축의 휘도 균제도를 확보하지 못하여 영종도다리를 제외한 모든 곳에서 0.5 이하의 결과를 확인하였다.

측정 결과에서 볼 수 있듯이 실제 도로에 설치되어 있는 낮은 도로 조명은 도로 조명기준(KS A 3701)의 도로 노면 등급에 만족하게 설치되어 있지 않았다. 설치 높이 및 설치 각도 등에 민감한 낮은 도로 조명은 다양한 설치 장소의 환경과 제품의 설계 환경이 일치하지 않아 광손실, 설치 각도 등의 문제로 운전자의 야간 도로 시계 확보를 어렵게 하고 있음을 실측을 통하여 확인하였다.

Table 7. Road surface luminance analysis results.

Area	Analysis results			
	Luminance average	Uniformity overall	Uniformity lengthwise	Rating
Gimpo Taejang-ro	0.42	0.484	0.462	-
Sihwa bridge	1.04	0.203	0.107	-
Yeongjo-ngdo bridge	2.87	0.588	0.649	M3
Incheon international airport terminal 2	3.66	0.528	0.422	M5

3. 결과 분석

3.1 분석 결과를 통한 낮은 도로 조명의 설계 방향

측정 결과에서 보듯이 낮은 도로 조명으로 도로 노면의 휘도를 만족시키기 위해서는 기존의 폴방식의 도로 조명과는 달리 여러 가지 고려해야 할 사항이 있다. 먼저 운전자의 시야에서 도로 노면의 어른거림이나 조명으로부터의 눈부심(glare)을 방지하기 위한 배광 설계가 매우 중요하다 [6]. 눈부심과 어른거림을 방지하기 위해서는 균제도를 높여야 하기 때문에 렌즈를 이용한 광학계 및 LED 배열의 유연성을 높여 배광 최적화를 하여야 한다. 즉 최적의 배광 설계를 위해서는 렌즈의 설계도 중요하지만 낮은 도로 조명의 램프 설치 길이의 조절을 통한 설치비용 상승의 문제도 함께 해결해야 하는 것이다 [6,10].

3.2 운전자 높이 고려

표 8은 차량별 운전자의 눈높이이다. 낮은 도로 조명의 경우 차량의 진행 방향의 수직 방향으로 빛을 조사해야 하기 때문에 도로 주행 시 운전자에게 가까이 배열되는 조명기구들에 의해서 빛이 직접 운전자에게 비춰져 글레어를 발생시킬 수 있다. 따라서 운전자의 글레어를 최소화할 수 있는 높이 및 각도 설정이 가장 중요하다. 차량의 종류별 운전자의 높이가 다양하기 때문에 가장 낮은 높이에 맞춰 설계를 할 경우 배광각을 높이지 못하고 빛의 cut off를 심하게 하게 되어 에너지 효율이 떨어지고 노면 휘도 및 균제도 구현에 어려움이 발생할 수 있으며 설치 위치를 너무 높게 하였을 경우 빛이 직접 운전자에게 비춰져 글레어를 발생시킬 수 있다 [7].

Table 8. Height of each vehicle and driver's eye height.

Type	Vehicle height (m)	Driver's eye level (m)
Mixer, special vehicle	3.5~3.7	3~3.2
Large truck	3~3.5	2.5~3
Small and medium-sized truck	2.8~3.3	2.3~2.8
SUV	1.6~1.8	1.3~1.5
Sedan	1.3~1.5	0.9~1.2

3.3 렌즈의 형상

렌즈의 형상과 재질을 고려하여 시뮬레이션을 통해 설계하여야 한다. 투과율과 굴절률을 고려하지 않는다면, 등기구 자체의 효율도 저하될 뿐만 아니라, 가장 중요한 배광의 형상을 구현할 수 없어 낮은 도로 조명의 휘도 구현에 어려움이 있을 수 있다.

그림 8은 개발 중인 렌즈의 형상 이미지이다. 렌즈의 형태는 리니어 타입 렌즈 형태로 난간에 직접 붙이기 위해 기다란 광원을 사용하도록 하였으며, 세그먼트를 작게 중첩하여 렌즈의 각을 최소화한 후, 빛의 균제도를 자체적으로 향상 시키고자 배광을 고려한 설계를 하였다.

3.4 렌즈의 재질 및 굴절률

가장 중요한 렌즈 설계의 방안은 표 9와 같이 소재의 특성과 디자인에 따라 낮은 도로 조명의 특성을 구현하여야 하며, 이러한 특성에 따른 설계 방안에 따라 운전자의 시계를 확보할 수 있는 야간 조도를 구현할 수 있다.

PMMA (polymethyl methacrylate)의 재질은 표 9와 같이 폴리카보네이트(PC)보다 투과도가 우수하다. 기존의 LED 조명에 대체적으로 PC 재질을 사용하는 이유는 기존의 전통조명의 유리재질 대비 투과도와 LED 조명의 방열기구의 중량 부하로 인해 낙하 시 확산재의 파손에 대비하고자 PC를 썼으나, 낮은 도로 조명의 높은 투과도를 통해 광효율을 올리고, 도로환경에서 생기는 광손실 및 배광거리 손실을 최소화하기 위해서는 투과도가 5% 정도 더 높은 PMMA 재질이 PC보다 도로 조명의 렌즈로 최적화하는데 이상적인 재질로 판단된다.

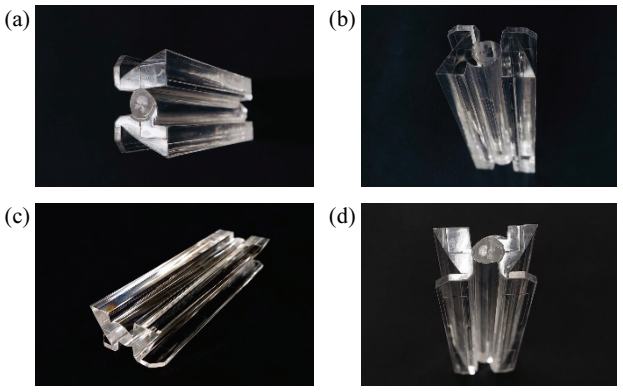


Fig. 8. Lens shape of developed low road lighting.

Table 9. Characteristics of each optical material of PC and PMMA.

Material	PC	PMMA
Light transmittance (%)	85~91	92
Refractive index (nd)	1.586	1.49
Density (g/cm^3)	1.20~1.22	1.17~1.20
Impact strength (kg-cm/cm^2)	92	5.6
Heat resistance (℃)	135~140	80~95

3.5 등기구의 배광 범위(휘도 제어)를 제어하기 위한 가리개(louver)의 적용

그림 9는 배광 범위(휘도 제어)를 제어하지 않은(non cut off type) 형태와 배광 범위를 제어한(cut off type) 형태의 배광 렌더링(rendering) 이미지이다. 그림에서 볼 수 있듯이 NON CUT OFF 타입은 상향광이 발생하여 운전자의 눈부심을 유발할 수 있으며, CUT OFF 타입의 경우 상향광을 차단하여 운전자의 눈부심을 최소화할 수 있는 것을 볼 수 있다 [9]. 이와 같이 등기구의 louver를 사용한 경우와 아닌 경우에는 확연히 운전자의 시계 방향을 조정할 수 있으며, 이러한 설계는 리룩스(RELUX) 조명 시뮬레이션 소프트웨어를 통한 시뮬레이션을 통해 도로 조명에서의 휘도 등급을 구현하여야 한다. 즉 차선의 폭을 고려한 배광거리를 인자(factor)로 하여 최적의 노면 휘도를 만들어 내야 야간 주행 시 운전자에게 눈부심 없는 노면 조도를 구현할 수 있다 [9].

3.6 균제도를 구현하기 위한 조명장치의 간격에 대한 적용

표 10은 조명장치(등기구) 사이의 폭에 따른 대표적인 시뮬레이션 예이다. 리눅스(RELUX) 프로그램을 이용하여 대표적으로 노견이 없는 2차선 도로 [11]에 적용한 예이다.

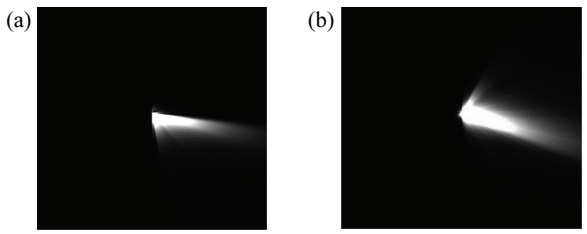
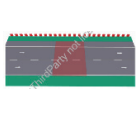
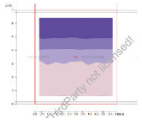
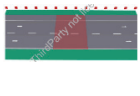
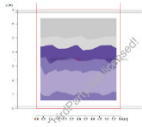
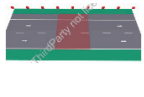
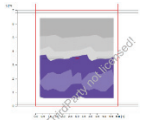
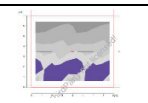
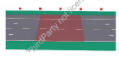
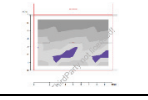


Fig. 9. Rendering image of light distribution of developed low mounted road lighting system: (a) non cut off and (b) cut off.

Table 10. Example of uniformity simulation according to lighting fixture spacing.

Road and installation conditions	1 lane luminance distribution simulation	2 lane luminance distribution simulation
2 lane, 1.0 m / shoulder enable		
2 lane, 2.0 m / shoulder enable		
2 lane, 3.0 m / shoulder enable		
2 lane, 4.0 m / shoulder enable		
2 lane, 5.0 m / shoulder enable		

이렇게 전등 간격 설치를 인지하여 시뮬레이션을 하여야만 도로 노면의 균제도가 최적화 [8]되어 야간운전 환경에 보다 효과적이며, 이 균제도를 유지하지 않으면 어른거림(envelope) 현상이 발생하기 때문에 낮은 도로 조명을 구현할 때 주의하여야 할 설계의 첫 번째 요소가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 일부 설치되어 있는 네 군데의 낮은 도로 조명의 노면 휘도를 측정 분석하여 등주 방식의 도로 조명을 어느 정도 대체할 수 있는지, 어떤 개선이 이루어져야 하는지를 분석하였다. 이를 위하여 LMK (luminance measuring kamera) 랩소프트(Labsoft) 프로그램을 활용하여 도로 조명의 노면 휘도를 측정하고 분석하였으며, 리눅스(RELUX) 조명 시뮬레이션 소프트웨어를 통한 성능평가 및 분석을 통해 실제로 등주 방식의 도로 조명을 대체하여 운전자에게 편안하고 안전한 야간시계를 확보할 수 있는 4가지 방안을 제시하였다.

첫째, 낮은 도로 조명의 경우 차량의 진행 방향과 수직 방향으로 빛을 조사해야 하기 때문에 도로 주행 시 빛이 직접 운전자에게 비춰져 눈부심(glare)을 발생시킬 수 있으므로 광학 시뮬레이션을 통해 설치 높이 및 각도 설정이 최적화되어야 한다.

둘째, 도로 조명 등급에 맞추어 노면 휘도와 조도를 구현하기 위해서는 렌즈의 소재와 배광 디자인이 매우 중요하며 표 9와 같은 특성을 고려하였을 때 투과율이 높은 PMMA 재질을 권장한다.

셋째, 상향광의 발생으로 인한 운전자의 눈부심을 방지하기 위해 상향광 휘도 부분 제어가 필요하며 등기구의 가리개(louver)를 사용하게 될 경우 노면 휘도에 효율성을 제공할 뿐만 아니라 운전자의 시계에 눈부심을 제어할 수 있음을 확인하였다. 이러한 설계는 소프트웨어를 통한 시뮬레이션을 통해 도로 조명에서의 휘도 등급을 구현하여야 하며, 차선의 폭과 배광 거리를 인자(factor)로 하여 최적의 노면 휘도를 만들어 내야 한다.

넷째, 낮은 도로 조명의 노면 휘도의 균제도를 위해서는 표 10과 같이 차선의 폭을 고려한 등기구의 간격을 리룩스(RELUX) 조명 시뮬레이션 소프트웨어를 통하여 최적화하여야 하며 기존의 등주방식의 도로 조명과는 다르게 설계되어야 한다.

이렇게 4가지의 중요 사항을 고려하여 낮은 도로 조명의 설치 시 운전자의 높이, 노면 휘도, 렌즈의 굴절률, 기구의 배광 등 좀 더 세밀한 시뮬레이션을 통해 도로의 위치, 용도, 도로 폭에 따라 특수하게 설계된다면, 기존의 등주 방식을 대체하여 친환경적이고 에너지 절감이 가능한 차세대 도로 조명으로서의 발전 가능성이 있음을 확인하였다.

ORCID

Chung Hyeok Kim https://orcid.org/0000-0003-2694-0431

감사의 글

이 논문은 2023년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

REFERENCES

[1] Road Safety Facility Installation and Management Guidelines, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021).

[2] Improving Streetlight Installation Standards to Prevent Traffic Accidents, Korea Expressway Corporation Road Traffic Research Institute (2020).

[3] KS A 3701 Road Lighting Standard, Korean Industrial Standard (2023).
[4] J. S. Lee, H. J. Park, J. H. Seo, Y. J. Jeong, S. Y. Kim, H. U. Ra, and M. S. Jeong, *J. Korean Opt. Soc.*, **28**, 273 (2017).
[5] W. I. Park, S. K. Lee, M. S. Jin, and Y. S. Kim, *J. Korean Intell. Transp. Syst. Soc.*, **17**, 185 (2018).
[6] M. A. Lee, D. H. Lee, K. M. Yoon, and J. H. Jeong, Study on Road Lighting Standards to Improve Economic Efficiency, Safety, and Environmental Performance, Korea Institute of Lighting and Electrical Equipment (2015).
[7] D. I. Seok, *Thesis, Study on Evaluating Driver's Visibility Ability in Low-Light Road Environment*, Kangwon National University Graduate School, Chuncheon (2011).
[8] E. Kim, *Thesis, Secondary Optical System Design to Improve Illuminance Uniformity of LED Street Lights*, Graduate School of Kongju University, Gongju (2011).
[9] M. A. Lee, I. T. Hwang, and H. Kim, *J. Light. Electr. Equip. Soc.* (2009).
[10] K. H. Kim, Y. S. Kim, G. H. Shin, S. H. Yoo, and S. B. Song, *Proc. Korean Lighting and Electrical Equipment Society Spring Conference Paper Collection* (2016) p.98.
[11] Road Design Tips, Kora Expressway Corporation, 2020.