

악천후 시 낮은 도로조명을 이용한 도로 시인성 향상에 대한 연구

남기호¹, 김충혁² , 최운식³

¹ 테크룩스(주)

² 광운대학교 인제니움학부대학

³ 세한대학교 기술교육과

A Research on the Improvement of Visibility Using Low Deck Lighting in Bad Weather

Ki Ho Nam¹, Chung Hyeok Kim², and Ki Ho Nam³

¹ Teklux, Bucheon 14448, Korea

² Department of Ingenium, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

³ Department of Technical Education, Sehan University, Yeongam 31746, Korea

(Received November 29, 2019; Revised December 27, 2019; Accepted January 13, 2020)

Abstract: We investigate a fog-detection CCT control system using low deck lighting as a solution to the forward visibility of pole-type street lamps employed on existing roads. The lighting standards were met with a light source that has less compared with those of pole-type street lamps. The results show that the transmission rate was increased by changing the color temperature by automatically recognizing fog in bad weather and minimizing the phenomenon of lighting. In addition, it was allowed to create a safer and more comfortable driving environment for drivers owing to flicker or light pollution of existing pole-type street lamps. As a result, if lighting is used at a lower level than pole-type street lamps, the accident rate caused by securing the driver's forward visibility can be reduced sharply and existing problems can be resolved.

Keywords: Low deck lighting, Sight distance, CCT, Light carpet, Flicker, Glare

1. 서론

1.1 역사적 배경

지난 수십 년간 가장 대중적인 가로등으로 사용되는 방전램프인 메탈램프는 높은 전력량과 수은 공해라는 단점이 있다. 반면 LED는 전기에너지를 빛에너지로 전환하는 소자로 에너지를 절약할 수 있다. 또한, 중금속

과 수은도 사용하지 않아 중요한 녹색기술로 각광받고 있다. LED 광원은 기존의 형광등, 백열등과 비교하면 효율이 높아 빠르게 시장이 형성되었다.

최근 LED 기술은 LED 조명과 IT 기술의 결합을 통해 효율적 에너지 절감이 가능하고 친환경적이며 인간 중심 그리고 사용자 요구사항에 부합되는 기능이 내장되어 있다. 다양한 기능의 솔루션을 사용자 요구사항에 맞춰 실시간으로 제공하는 시스템화가 되고 있다. 이를 바탕으로 다양한 분야에서 LED 조명에 적용 가능한 신기술들이 개발 중이며 도로조명에서도 마찬가지이다.

기존의 플대형 조명은 whitening 현상으로 인해 악천후 시 도로조명에 있어서 전방 시거(sight distance)를 확보하기 어렵다는 문제점이 제기되어 왔다. 또한, 운전자에게 눈부심과 같은 빛 공해를 유발하며, 설치비

✉ Chung Hyeok Kim; hyeokkim@kw.ac.kr

용 및 고가의 유지비용이 단점이다 [1]. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해 낮은 도로조명에 대한 연구가 이루어지고 있다.

낮은 도로조명은 야간 운전자의 전방 시인성을 확보해 주어 안전 운전이 가능하며, 노면에 집중하는 배광 방식을 통해 소비전력을 기존 풀대형 조명 대비 15% 이상 절감이 가능하다. 하지만 광원 중심에서 좌우 대칭 배광의 형태를 가지며, 상하 배광의 경우 도로 갓길 부근에 음영이 발생하여 도로 갓길이 협소한 교량구간 등에서는 차로 측면에 음영이 발생한다는 단점이 있다.

도로 시인성 향상, 빛 공해 저감, 젖은 노면의 글레어 최소화, 안개 시 대응능력 강화, 에너지 절약, 안개 감지 자동인식, peer to peer 또는 중앙제어를 통한 CCT 제어, 안개감지시스템 오염도 체크 기능 등 다양한 기능을 제공하는 데 낮은 도로조명이 장점을 가지고 있다.

운전자 전방의 시인성을 향상해 주행 시 안전을 도모함에 있으며, 기존 풀대형 조명은 우천 시, 안개 시 최적 시인성을 확보하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 야간 및 악천후 시 전방 시야를 확보함으로써 안전한 도로 주행환경을 제공할 필요성이 있다 [2].

현재의 풀대형 조명으로는 도로조명의 한계가 있다. 이런 문제로 사고율이 올라가는 등등의 문제로 가시거리 확보와 조도 개선을 통해 도로 시인성 개선에 관해 연구하는 데 그 배경이 있다.

본 논문은 지정된 구간의 안개감지시스템을 이용하여, 악천후 시 CCT를 조절하는 기능을 낮은 도로조명에 탑재하고, 안개감지를 통해 CCT를 자동 조절하는 지능형 낮은 도로조명 시스템을 구현하여 악천후 시 도로의 시인성 향상을 이루어 안전 운전에 도움을 주고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 낮은 도로조명의 특징

낮은 도로조명의 특징은 빛을 조사하는 방식이 기존의 풀대형 조명과 완전히 다르다. 그림 1은 낮은 도로조명을 구현한 라이트카펫 형태의 조사방식이다. 이러한 조명방식은 운전자가 전방 시거 확보가 쉽고, 도로의 시인성을 향상하는 데 도움을 줄 수 있다. 이러한 형태에 대해 낮은 도로조명으로 배광 형태를 제공하여 구현할 수 있다.



Fig. 1. Character of low-deck lighting road.

2.2 풀대형 조명의 도로 시인성 문제

일반 풀대형 조명은 야간도로, 악천후 주행 시 전방 시거 제약의 문제로 위험한 주행환경이 단점이다. 전체 교통사고 사망자의 70%가 야간에 발생하고 있으며 빛 공해 및 젖은 노면, 안개 시 글레어와 전방 시거 확보에 대한 문제점이 지속해서 대두되고 있다 [3].

2.3 야간 도로주행 환경 시 가시거리

그림 2는 야간도로 주행환경 시 필요 정지시거에 대한 그림으로 야간 주행환경에서는 전조등 시거거리의 제한으로 낮은 도로조명이 가장 효과적임을 알 수 있다. 풀대형 조명에 비하여 설치비용과 유지보수 비용도 낮으며 그림 2와 같이 넓은 전방 가시거리를 확보할 수 있다.

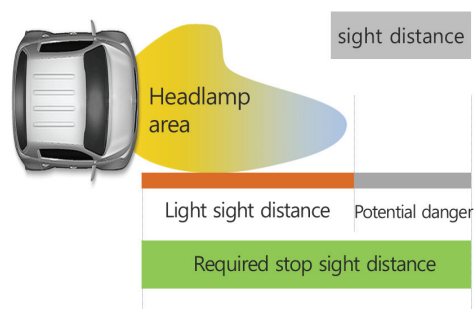


Fig. 2. Understanding of headlamp irradiation area.

2.4 빛 공해 문제

일반적인 풀대형 조명과 낮은 도로조명의 배광곡선을 참조하여 조사방식의 차이를 그림 3에 나타내었다. 낮은 도로조명은 낮은 위치에서 노면에 빛을 집중하여

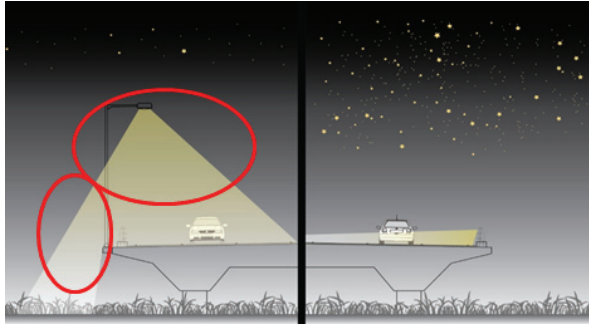


Fig. 3. Differences between pole and low deck lighting.

조사하는 방식으로, 상향 광 및 누설 광을 제어함으로써 인공 광에 의한 빛 공해를 최소화할 수 있다.

빛 공해가 심한 지역에 거주할 시 유방암 발생률이 24.4%나 높고, 야간조명에 의한 빛 공해는 생체 리듬을 교란시켜 우울증, 분노 조절 장애, 조울증 등을 유발한다는 조사 결과가 있다 [4,5]. 또한, 서울시에서 풀대형 조명의 빛 공해 실태조사 결과 2017년에만 2,043건의 민원이 접수되었으며 환경부에서 2019년부터 2023년까지 2차 빛 공해 방지 종합계획을 수립 중에 있다 [6].

2.5 야간주행 및 우천 시 시인성

그림 4는 야간주행 및 우천 시 낮은 도로조명과 풀대형 조명의 노면 차이를 나타내었다. 풀대형 조명의 노면은 차선 및 도로 선형 식별이 어렵다 [7]. 하지만 낮은 도로조명은 건조노면과 같은 노면을 보인다 [그림 4(d)].

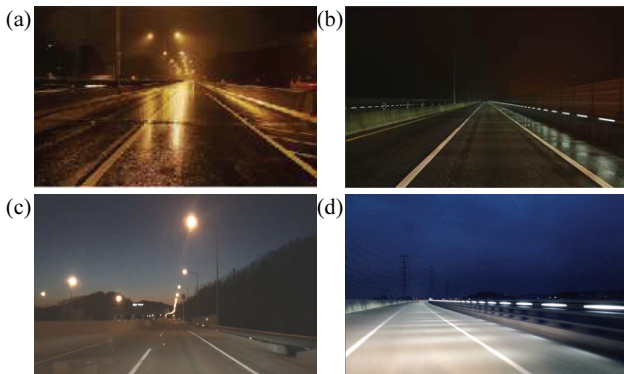


Fig. 4. Road surface difference between low deck and pole lights in rainwater. (a) Pole lighting, (b) low-deck lighting, (c) pole lighting, and (d) low-deck lighting.

2.6 안개 발생 시 시인성

낮은 도로조명은 운전자 눈높이에 빛이 없어 whitening 현상을 최소화하고, 안개 발생 시 amber 계열로 색온도를 변경 후 투과율을 강화하여 노면이 잘 보이도록 설계할 수 있다. 풀대형 조명과 낮은 도로조명의 안개 발생 시 색온도 변화의 차이점을 그림 5와 같이 나타내었다.

굵은 파장이 물방울을 투과하기엔 짧은 파장보다 포텐셜이 크다. 이는 직진성과 결부지어 보면 그림 5와 같이 물방울을 투과하는 데 훨씬 효과적이며 산란되지 않고 직진성을 유지하여 운전자가 시야를 확보할 수 있도록 밝기를 유지하여 안개 발생 시 시인성을 향상시킬 수 있다.

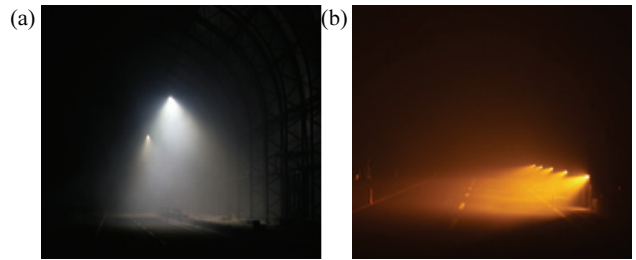


Fig. 5. Amber series of road lighting changes color temperature. (a) Pole lighting and (b) low-deck lighting.

2.7 우천 시 글레어(glare)

낮은 도로조명은 그림 6과 같이 우천 시 풀대형 조명에서 젖은 노면 때문에 운전자의 운전 방해가 가장

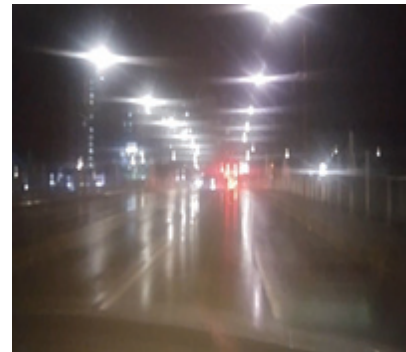


Fig. 6. Glare caused by water reflection in rainwater.

심하게 일으키는 글레어(glare effect)로 인한 운전 방해가 거의 발생하지 않는 장점을 얻을 수 있다 [8]. 이는 직하형 조광 방향을 가지고 있는 폴대형 조명은 반사되는 지향각이 운전자를 비추게 되어 있어 수면 반사 현상을 일으키는 원인이다. 그러나 낮은 도로조명의 경우 운전자의 진행 방향에 수직 방향으로 비추기 때문에 반사되는 지향각이 운전자의 시야에 방해되지 않아 글레어 최소화에 효과적이다.

2.8 도로조명의 flicker 현상

폴대형 조명은 차량의 전조등 시거거리와 폴대형 조명의 간격으로 인해 flicker 현상이 발생한다. 따라서 운전자의 눈 피로를 유발하게 되는데 낮은 도로조명에서는 이러한 flicker 현상을 최소화하기 위하여 도로조명 레벨 M1부터 M4까지 연속된 높은 균제도를 유지할 수 있으며, 주행 시 폴대형 조명과 낮은 도로조명의 운전석 내부 조도 변화를 그래프로 나타내면 그림 7과 같다.

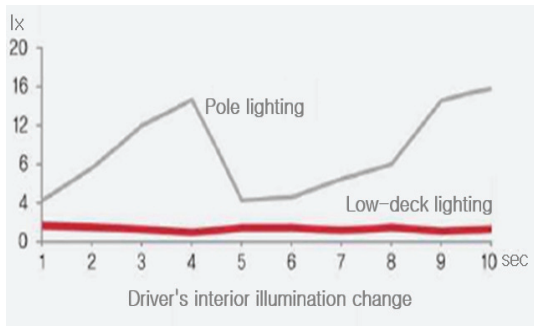


Fig. 7. Driver's interior illumination change graph.

2.9 에너지 절감 효과

노면에 조명을 집중하는 낮은 도로조명은 폴대형 조명에 비해 상대적으로 적은 광원으로 동급의 조명기준을 충족한다. 노면 외의 불필요한 광원을 제거하여 50% 이상의 소비전력 절감 효과를 얻을 수 있다. 표 1은 낮은 도로조명의 소비전력 비교이다.

낮은 도로조명은 폴대형 조명보다 단위 미터당 절반 이상의 작은 소비전력으로 동일한 도로조명 레벨을 유지할 수 있으며, 이것이 경제성에 있어서 월등한 효과를 나타내는 지표가 될 수 있다.

Table 1. Comparison of consumption power for low-deck and pole-road lighting.

Article	Low deck lighting	Expressway corporation	Seoul
Installation interval (m)	8	54	30
Power consumption (W)	22	200	100
M distance (W)	1.5	3.7	3.3
Comparison (%)	100.0	246.7	220.0

2.10 낮은 도로조명 장치의 설계

그림 8, 9는 앞의 내용을 토대로 설계한 낮은 도로조명의 시제품 및 설계도이다. 그림 8과 같이 본체는 옆을 향하여 빛을 조사하게 되어 있으며, 고정 장치를 통해 난간에 부착하도록 설계되어 있다. 따라서 연속하여 설치하게 되면 도로조명 레벨을 향상시키거나 낮출 수 있으며 현재까지로는 편도 2차선까지만 밝기를 유지할 수 있다.

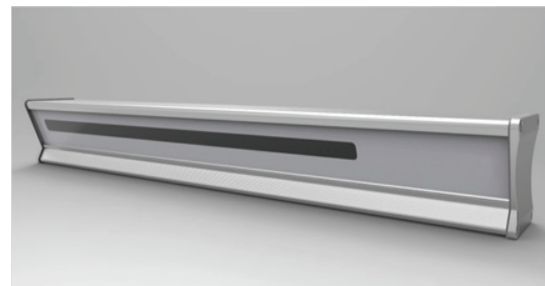


Fig. 8. Front view of low deck illumination.

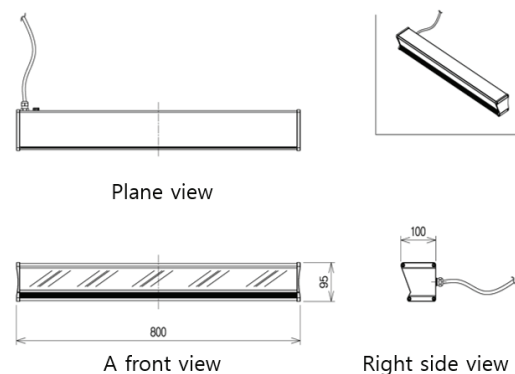


Fig. 9. Blueprint of low-deck lighting.

낮은 도로조명의 크기는 800 (L) × 100 (W) × 95 (H), watt 22 W, CCT는 5,700 K, IP LEVEL은 IP66 으로 악천후 시 조명에 비, 먼지가 들어가지 않도록 IP66으로 설계 중이다 [9]. 세부적인 사양은 표 2에 나타내었다. 그림 10은 linear lens의 실제 시제품이다.

그림 11은 linear lens의 배광곡선을 나타내었다. 아래와 같은 배광곡선으로 도로 노면에만 빛을 집중 조사하여 빛 공해 및 우천 시 글레어를 최소화할 수 있도록 설계하였다. 이 배광곡선은 빛이 도로의 노면만 비추도록 되어 있는 설계의 반영이며 낮은 도로조명에 최적화된 도로조명이다.

Table 2. Specification for low-deck lighting.

Low deck lighting specifications	
Size (mm)	800 (L) × 100 (W) × 95 (H)
Watt	22 W
Color	5,700 K (Selectable color, 6,500 K, 5,000 K)
IP LEVEL	IP66
Weight	6 Kg
Input voltage	AC 100~277/50~60 Hz
Body	AL, glass



Fig. 10. Linear lens.

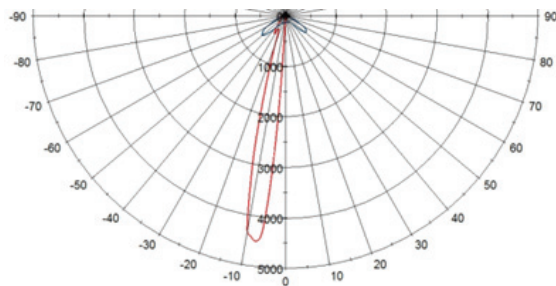


Fig. 11. Low-deck light distribution curve.

3. 결과 및 고찰

3.1 다양한 CCT 구현의 실효성 검증

이상과 같이 낮은 도로조명은 풀대형 조명에 비해 다양한 기능과 차별화된 성능으로 도로조명을 밝힐 수 있다. 따라서 이러한 기능 중 우천 시 또는 안개 발생 시의 대응능력을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 색 온도(CCT)와 휘도 분포의 변화에 따른 광학적 특성을 파악해 악천후 시 도로 시인성 향상을 이룰 수 있는지 고찰하였다 [10].

안개 발생 시 대응능력 강화를 위한 기능실험을 위해 그림 12와 같은 장치를 구성하여 실험하였다. 안개 발생 시 amber color 조명을 조광 시 CCT 변화에 따른 조도 분석을 하였으며, dry ice로 안개 효과를 구현하였고 시험에 사용된 LED 조명은 2,700 K와 6,500 K 두 가지로 실험하였다.

그림 13과 같이 길이 1 M 지름 10 cm 실린더에 dry ice 40 g을 1초간 투입하여 안개 환경을 구현한 후 LED를 비춰 미놀타 CL-200 조도계를 사용하여 조도를 측정하였다. 실험에 사용된 LED 조명은 소비 전력 9.8 W, 광속 270 lm, 2,700 K LED 조명과 소비전력 8.8 W, 광속 333 lm, 5,700 K LED 조명으로 시험하였다.

실험으로부터 2,700 K의 붉은 파장인 LED 광원이 안개 시 투과 조도가 75.4% 감소된 반면 5,700 K의 짧은 파장의 광원에서는 92% 정도가 감소된 것을 표 3에서 알 수 있으며, 시거 확보에 필요한 조도가 2,700 K

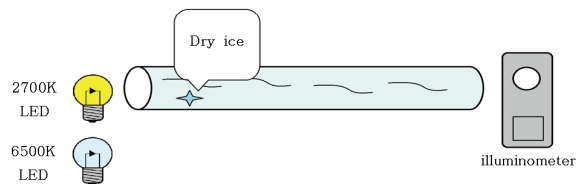


Fig. 12. Test diagram.



Fig. 13. Real test prototype.

Table 3. The result of an experiment.

Article	Null	Fog	Note
2,700 K	165 lx	40.7 lx	75.4% decrease
5,700 K	200 lx	16.24 lx	91.88% decrease

Table 4. Transmittance test results.

Article	Penetration ratio	Penetration lux
2,700 K	24.6%	40.7 lx
5,700 K	8.12%	16.24 lx

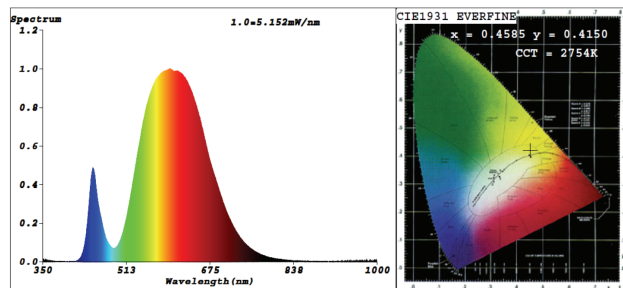


Fig. 14. 2,700 K CCT data used for testing.

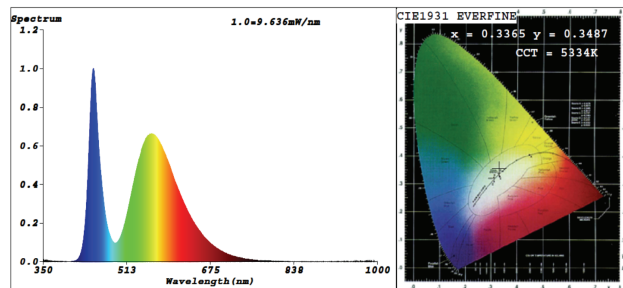


Fig. 15. 5,700 K CCT data used for testing.

LED 조명이 5,700 K LED 조명보다 3배가량 높은 조도 투과율을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 악천후 시 큰 파장의 광원인 2,700 K의 색상이 짧은 파장인 5,700 K보다 시인성 확보가 뛰어나다는 것을 시험 결과로부터 확인하였다.

이처럼 색온도의 변화에 따른 투과 조도의 차이가 나타나기 때문에 다양한 CCT 변화는 운전자가 도로를 인지하기에 적합하도록 환경을 만들어 줄 수 있을 것이며, 도로조명의 환경 개선으로 안전성 향상에 도움을 줄 것이다.

폴대형 조명과 낮은 도로조명의 휘도치를 검출하기

Table 5. Results of pole and low deck lighting.

Article	Pole lighting	Low deck lighting
Power consumption (W)	200	22
Lamp type	Metal lamp	LED
Luminous flux (lm)	20,000	3,000
Installation interval (m)	54	8
Test section (m)	108	108
Quantity (ea)	3	13
Total power consumption (W)	600	297

위해 실제 도로에 설치된 폴대형 조명과 낮은 도로조명을 표 5와 같이 비교하였다. 표 5에서 보는 바와 같이 폴대형 조명 대비 낮은 도로조명의 휘도 레벨이 월등히 높으며, 설치한 낮은 도로조명의 개수가 폴대형 조명보다 4배 이상 많지만, 소비전력은 오히려 2배 이상 낮다. 표 5 결과와 같이 폴대형 조명보다 낮은 도로조명의 소비전력 효율이 월등히 높다고 할 수 있다.

실험 결과로부터 낮은 도로조명은 폴대형 조명에 비해 높은 균제도를 구현할 수 있으며 소비전력이 낮고 경제성이 높아 효과적이라고 할 수 있다. 아직은 2차선의 너비에서만 운용할 수 있지만, LED 조명의 개발과 차후 제품 개발을 통해 충분히 3~4차선까지 확장이 가능할 것으로 기대된다.

3.2 휘도 분포 특성을 통한 실효성 검증

3.2.1 우천 시 휘도 분포 특성 분석

그림 16은 우천 시 폴대형 조명과 낮은 도로조명의 휘도 분포에 대한 참고 자료이다 [11]. 폴대형 조명[그림 16(a)]과는 다르게 낮은 도로조명[그림 16(b)]은 도로 노면에만 빛을 집중하여 조사하는 것을 확인할 수 있다.

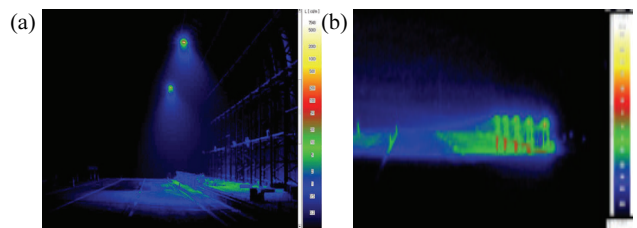


Fig. 16. Luminance distribution of pole and low deck lighting in rain. (a) Pole lighting and (b) low-deck lighting.

Table 6. LED luminaires for road standard, KS A 3701.

Road lighting grade	Average road brightness (minimum allowable value) L_{avg} (cd/m ²)	Road conditions				TI (%) maximum allowable value
		Ordinary		Rainy		
		Synthesis illumination (Uo) L_{min}/L_{avg}	Lane illumination (UI) L_{min}/L_{max}	Synthesis illumination (UO) L_{min}/L_{avg}		
M1	2.0	0.4	0.7		10	
M2	1.5	0.4	0.7		10	
M3	1.0	0.4	0.6	0.15	15	
M4	0.75	0.4	0.6		15	
M5	0.5	0.35	0.4		15	

Table 7. Measurement result of illumination in low deck lighting.

Lighting fixture	Condition	Synthesis illumination	Lane illumination
Low deck white led	Ordinary	0.45	0.81
	Rainy	0.56	0.84

KS A 3701(도로조명 기준) M3 등급에 만족하려면 종합균제도는 0.4 이상, 차선축 균제도는 0.6 이상 되어야 한다. 본 논문에서 제안하는 낮은 도로조명은 최소 종합균제도 값 0.45, 차선축 균제도값 0.81로 KS A 3701 M3등급의 기준에 적합하였다 [12,13]. 표 7은 낮은 도로조명의 균제도 설계치를 시뮬레이션에 반영한 결과이다.

3.2.2 안개 시 휘도 분포 특성 분석

그림 17은 안개 시 폴대형 조명과 낮은 도로조명의 휘도 분포의 시뮬레이션 결과를 나타내었다 [11]. 그림 17과 같이 안개 시 폴대형 조명은 도로 노면의 휘도가 낮은 반면 낮은 도로조명은 도로 노면의 휘도가 높은 것을 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다.

안개 상황에서는 휘도계 촬영 시 도로 노면을 촬영하는 것이 아닌 대기 중의 안개를 촬영하게 되어, 노면 휘도, 균제도 등의 측정이 힘들며 일반적으로 안개 상황에서는 조명의 빛이 안개를 투과하지 못하고 안개의 산란작용으로 인해 빛이 퍼지게 된다. 따라서 별도로 측정된 glare 값의 변화 정도로 조명 성능을 평가하는 것이 적절하다고 판단된다.

표 8은 폴대형 조명과 낮은 도로조명의 글레어 변화율 차이를 시뮬레이션에 반영한 결과이다.

건조 상황에서 폴대형 조명의 경우 글레어 값에 비

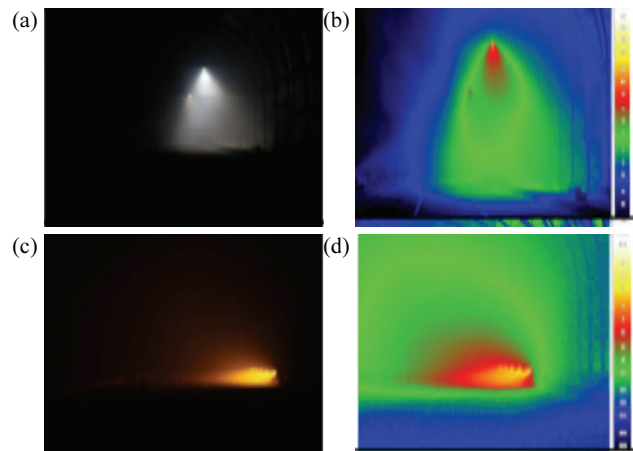


Fig. 17. Luminance distribution of pole and low deck lights in fog. (a) Pole lighting, (b) brightness distribution, (c) low-deck lighting, and (d) brightness distribution.

Table 8. Difference in glare change rate of pole and low deck lights.

Lighting fixture	Condition	Glare figure	Rate of change
Pole lighting	Ordinary	13.79	-13%
	Foggy	11.96	
Low deck amber led	Ordinary	-3.41	-205%
	Foggy	-10.39	

해 낮은 도로조명의 경우 글레어 값이 상대적으로 상당히 낮은 것을 확인할 수 있다. 또한, 안개 상황에서 폴대형 조명은 경우에 따라 글레어가 높아지는데, 낮은 도로조명은 글레어 값이 안개 시 많이 감소하는 것을 확인하였다.

따라서 안개 시 CCT 변환이 불가능한 폴대형 조명에 비해 안개 상황에 따라 낮은 도로조명에서 CCT 조절이 가능하도록 설계하여 글레어 값의 변화를 통해 안개 시 시인성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 야간주행이나 악천후 시 주행환경을 어떻게 하면 안전하고 편안하게 할 수 있을까 하는 생각에서 시작되었다. 일반 풀대형 조명은 야간도로 주행 시 전방 시거 제약의 문제로 위험한 주행환경이 단점이다. 또한, 전체 교통사고 사망자의 70%가 야간에 발생하고 있으며, 안개와 같은 악천후 시 도로주행은 운전자의 피로를 과중하게 된다. 풀대형 조명과 달리 낮은 도로 조명은 도로 노면에만 빛이 조사되도록 설계하여 빛 공해를 최소화하고, 운전자의 시야를 안전하게 유지할 수 있다 [14].

본 실험에 사용된 낮은 도로조명의 설계는 풀대형 조명에 비해 높은 균제도를 구현할 수 있어 운전자가 시거를 확보하는 데 효과적임을 알 수 있다. 또한, 색온도의 변화에 따른 투과 조도의 차이가 나타나기 때문에 도로에 안개 발생 시 amber 계열로 색온도를 변경하여 투과율을 강화하여 시인성을 향상시켜 줄 수 있을 것이다.

배광 측면에서는 도로 노면에만 빛을 조사하는 배광 형태로 flicker 현상을 최소화하고, 우천 시에 젖은 노면의 글레어로 인한 운전 방해를 줄이며, whitening 현상을 최소화할 수 있다.

그 밖에 에너지 절감 관점에서 낮은 도로조명은 풀대형 조명에 비해 상대적으로 적은 광원으로 동급의 조명기준을 충족했으며, 노면 외의 불필요한 광원을 제거하여 50% 이상의 소비전력 절감 효과를 얻을 수 있었다.

현재 도로에 설치되어 있는 풀대형 조명을 대신하여 본 연구에서 제안한 낮은 도로조명을 설치 시, 도로면의 휘도는 일반 풀대형 조명보다 높으며, 운전자의 전방 시거 확보로 인한 교통사고율을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Lighting device는 시대가 갈수록 진화하고 있으나, 도로조명은 근본적인 조광 방법이 개선되지 않는 한 혁신적인 방법이 나올 수 없다고 생각된다. 그러므로 낮은 도로조명은 도로조명을 근본적으로 개선하는 혁신적인 조광 방식이 될 것으로 판단된다.

ORCID

Chung Hyeok Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2694-0431>

감사의 글

이 논문은 2018년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

REFERENCES

- [1] W. B. Cho, *Proc. Annual Autumn Conference & General Meeting 2018* (KIIEE, Incheon, 2018).
- [2] Annual Report on Highway Safety Improvement Programs, Visual Performance During Nighttime Driving in Fog, FHWA-HRT-04-137 (2005).
- [3] W. B. Cho, *Proc. Annual Autumn Conference & General Meeting 2018* (KIIEE, Incheon, 2018).
- [4] Seoulsimicon, *Light Pollution, Biorhythmic Disturbance and Modern Human Health*, <http://www.seoulsimicon.com/kr/> (2018).
- [5] S. W. Kwak, J. H. Song, W. J. Jang, *Proc. KIIEE Annual Autumn Conference 2012* (KIIEE, Jecheon, 2012).
- [6] Department of Environment, *Prevention of Light Pollution by Artificial Lighting* (2018).
- [7] Annual Report on Highway Safety Improvement Programs, Visual Performance During Nighttime Driving in Rain, FHWA-HRT-04-135 (2005).
- [8] W. I. Park, S. K. Lee, M. S. Jin, and Y. S. Kim, *J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.*, **17**, 6 (2018).
- [9] Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code), KS C IEC 60529 (2017).
- [10] J. S. Lee, H. J. Park, J. H. Seo, Y. J. Jeong, S. Y. Kim, H. W. Ra, and M. S. Jung, *Korean J. Opt. Photon.*, **6**, 273 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.6.273>]
- [11] Magicmicro, *Final Report on the Development of Low-Rise Lighting System with Energy Self-Reliance that Can Secure Visibility During Night Bad Weather* (2019).
- [12] *Methods of Luminance Measurements in Lighting Fields*, KS C 7613 (2014).
- [13] *LED Luminaires for Road Standard*, KS A 3701 (2007).
- [14] Y. P. Lee and I. S. Yeo, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **32**, 36 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2018.32.3.036>]