

## Study on the Design of Asymmetric Lighting with Uniform Illumination Over a Large Area at Short Distance

Dong-Hwa Kang and Mee-Suk Jung<sup>†</sup>

*Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic University, 237, Sangidaehak-ro, Siheung 15073, Korea*

(Received April 20, 2020; Revised May 26, 2020; Accepted May 26, 2020)

In this paper, the illuminating optics of asymmetric light distribution was studied, which allowed the light distribution to be uniform even for short-range irradiation on a wide illumination area. In the case of a light installed at a short distance, the light is not diffused enough because of the short irradiation distance. For this reason, it is difficult to satisfy uniformity of illumination. In addition, lighting design for asymmetric distribution is required because the lighting device is installed tilted, for visibility. Therefore, the design of lighting systems with asymmetric light distribution could achieve uniform illumination of the target surface even under short-distance irradiation. This was then applied to the license lamp, a lighting system featuring short light irradiation distance, to confirm that it satisfies the legal standards.

Keywords: Short-range illumination, Illumination uniformity, Asymmetric lighting

OCIS codes: (220.2945) Illumination design; (220.3620) Lens system design

## 단거리 조사 시 넓은 면적에 균일한 조명도를 가지는 비대칭 조명 광학계 설계 연구

강동화 · 정미숙<sup>†</sup>

한국산업기술대학교 나노광공학과  
☎ 15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2020년 4월 20일 받음, 2020년 5월 26일 수정본 받음, 2020년 5월 26일 게재 확정)

본 논문에서는 넓은 조사 면적에 단거리 조사시에도 균일한 조명도 분포를 가지도록 하는 비대칭 배광의 조명 광학계에 대한 연구를 진행하였다. 단거리에 설치되는 조명의 경우 조사 거리가 짧기 때문에 충분한 배광 분포 형성이 되지 못해 조명의 균일도를 만족하기 어렵다. 또한 시인성을 위해 조명기기가 기울어져 설치되기 때문에 비대칭 배광의 조명 설계가 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 비대칭 배광을 가지는 조명 광학계 설계를 통해 단거리 조사 시에도 대상 표면에 균일한 조명도를 얻을 수 있었으며, 이를 단거리 조명 중 하나인 라이선스 램프에 적용하여 법규 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

Keywords: 단거리 조사, 조명도 균일도, 비대칭 조명

OCIS codes: (220.2945) Illumination design; (220.3620) Lens system design

### I. 서 론

조명 기기는 대상을 비추어 야간 혹은 실내 차단막 등에 의해 시야 확보가 원활하지 못한 상황에서 사용자의 대상 식별에 도움을 주는 장치이다. 특히 그림 1과 같이 칠판, 야립 광고용 판넬, 자동차 번호판 등의 대상 표면을 비춰주는 장치의 경우 시인성을 위해 사용자에게 직접광이 가지 않도록 조명 기기를 기울여 설치하기 때문에 이를 위한 비대칭 배광의 조명 설계가 요구되며, 단거리에 설치되어 넓은 조사 면적에

균일한 조명도를 가지도록 하는 광학계 설계가 필수적이다. 하지만 이에 대한 어려움으로 인해 단거리 조사 시 다수의 조명 기기를 사용하여 배광 및 균일도를 만족하고 있다.

이러한 이유로 짧은 조사거리에도 대상 면적에 균일한 조명도를 가지는 비대칭 배광의 조명 광학계에 대한 연구가 요구되며 이를 통해 사용되는 조명 기기의 감소로 보다 효율적인 사용이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 넓은 조사 면적에 단거리 조사 시에도 균일한 조명도 분포를 가지도록 하는 비대칭 배광의 조명

<sup>†</sup>E-mail: [msoptic@kpu.ac.kr](mailto:msoptic@kpu.ac.kr), ORCID: 0000-0003-3430-876X

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.



Fig. 1. Short-range lighting image.

광학계를 설계하고, 다양한 단거리 조명 중 하나인 라이선스 램프에 적용하여 1개의 조명 기기만으로도 유럽 법규 기준을 만족하는 것을 목표로 하였다.

## II. 본 론

### 2.1. 광원

야립 광고용 판넬 혹은 자동차 번호판 등 단거리 조명이 사용되는 경우, 제품의 사용 기간이 매우 길기 때문에 긴 수명의 조명 기기가 요구된다. 따라서 긴 사용 시간과 높은 효율을 가지는 LED를 광원으로 선정하였다<sup>[1]</sup>.

선정한 광원은 power 124.21 lm, size 2.45 mm (H) × 2.45 mm (W), 발광각 120°의 특성을 가지는 LED이다.

### 2.2. 라이선스 램프

라이선스 램프는 단거리 조사 시에도 넓은 면적에 조명도 균일도를 나타내야 하는 대표적인 조명 장치이다. 기존 라이선스 램프의 경우 대칭 배광 형태를 가지고 있어 기울어진 각도로 배치되어 있는 자동차 번호판의 조명 균일도를 높이기 위해 광각의 폭을 넓힘으로써 광량 손실이 발생한다. 또한 그림 2와 같이 하나의 라이선스 plate를 조사하기 위해 2개의 조명 모듈이 사용되며, 각 모듈에는 2~20개의 LED가 포함되어 불필요한 공간 사용 및 유지 보수 비용이 발생한다. 따라서 1개의 LED 광원과 조명 모듈만으로 기존의 라이선스 램프와 같은 법규를 만족할 수 있도록 비대칭 배광의 조명 광학계를 설계하고자 한다.

라이선스 램프 광학계의 조사 면적인 번호판과 대략적인 설치 구도를 그림 3에 나타내었다. 조사 면적은 자동차 번호판의 표준 크기인 520 mm × 120 mm이며, 13.3° ( $\theta$ )로 기울어져 장착된다. 또한 번호판 윗면의 공간에 장착되는 라이선스 램프 특성으로 인해 번호판에서 후면 거리( $l$ ) 40 mm 이

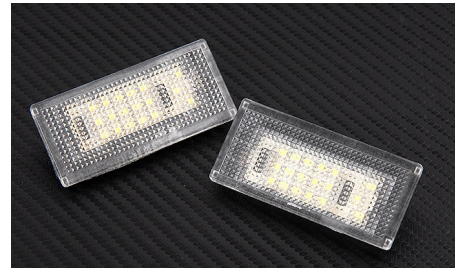


Fig. 2. Lighting module of licensed lamp.

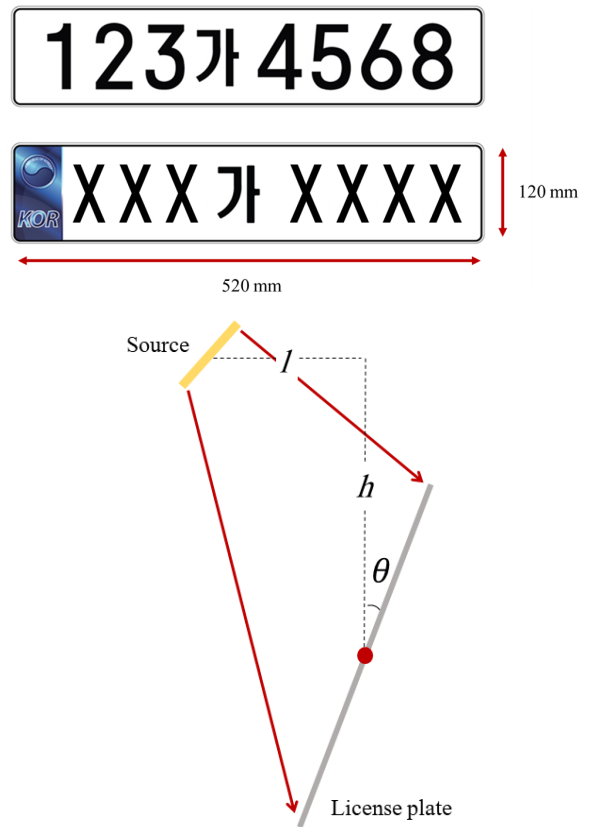


Fig. 3. License plate and license lamp layout.

내, 높이( $h$ ) 130 mm 이내에서 37.8° 기울어진 광학계가 장착되도록 한다. 기존 라이선스 램프에서 2개의 조명 모듈과 다수의 LED 광원을 사용하는 것과 달리 1개의 조명 모듈과 LED를 사용하면서 ECE R-4 유럽 법규를 만족하는 것을 목표로 하였다.

### 2.3. 광학계 설계

#### 2.3.1. 수평 배광 조절

라이선스 램프의 receiver 영역인 번호판은 세로 길이에 비해 가로 길이가 매우 긴 특성을 가지고 있기 때문에 균일한 조명도를 가져가기 위해 수평 배광을 넓게 퍼트려야 한다. 광학계는 번호판의 가로 영역 중앙에 위치하기 때문에 수평 배광의 형태는 대칭이어야 하며, 이에 따라 X-Z plane에서 바라본 렌즈의 형상은 Z축을 중심으로 대칭이 되어야 한다<sup>[2]</sup>.

$$Z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + as_2x^4 + as_3x^6 + as_4x^8 + as_5x^{10} + \dots \quad (1)$$

( $k$ : Conic constant,  $c$ : Curvature,  $as_n$ : Aspheric coefficients)

식 (1)은 광축(Z축)을 중심으로 회전 대칭형 렌즈 형상을 나타내는 비구면 방정식이다. 수평 방향으로 넓은 광 분포를 보이기 위한 설계 방안으로, 식 (1)의 비구면 방정식을 따르는 돔 형상의 렌즈를 설계하였다. 이 식을 통해 설계된 렌즈의 형상은 그림 4와 같으며, 표 1을 통해 해당 렌즈의 비구면 계수를 나타내었다.

설계된 광학계의 배광 분포인 그림 5를 통해 가로 방향으로 훨씬 넓은 번호판의 조명도 균일도를 향상을 위하여 가로등과 비슷한 배광 모양 형성으로 수평 방향의 빛을 넓게 분포시킨 것을 확인할 수 있다<sup>[3]</sup>. 번호판 receiver 영역에서 확인한 조명도 분포 형태는 그림 6으로, 수평 방향으로 빛이 넓게 퍼져있으나 수직 방향으로의 빛 조사량이 떨어져 번호판 전체 조사 영역에 대한 조명도 및 휘도 범규는 만족하기 어려운 것을 확인할 수 있다.

Simulation 결과, 최대 조명도 649.10 lux, 최소 조명도 26.606 lux로 약 4%의 균일도를 보인다. 따라서 수직 배광 조절을 통해 전체 영역의 균일도를 향상시켜야 한다.

Table 1. Lens specification (aspheric coefficients)

Coefficient	Value
X	0
Y	0
X2	0.312745269
XY	0.005278365
Y2	-0.106750507
X2	0.001369114
X2Y	0.001037524
XY2	0.001176468
Y2	0.002734575
X4	0.002264656
X3Y	0.000285566
X2Y2	0.000200713
XY3	0.000185320
Y4	-0.005017535

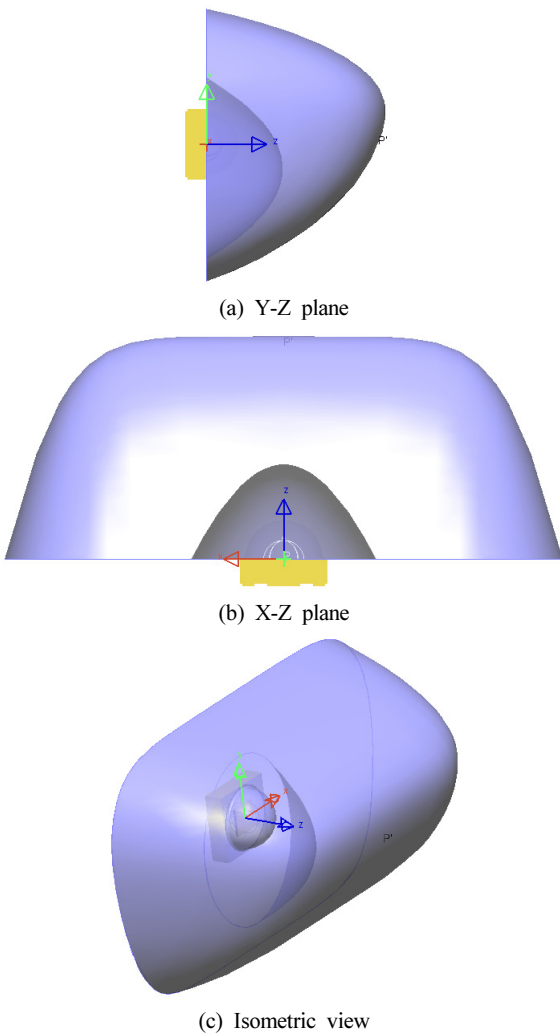


Fig. 4. Lens design.

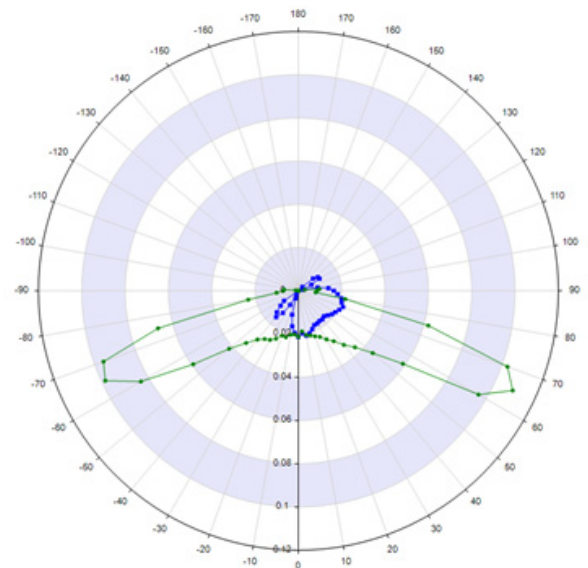


Fig. 5. Intensity slice chart.

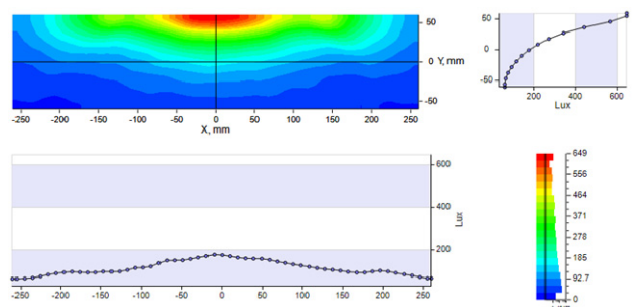


Fig. 6. Illumination distribution chart.

2.3.2. 수직 배광 조절

단거리에 설치되어 모든 조사 영역을 비춰야 하는 조명기기의 특성상 광원 및 광학계와 가까운 조사 영역의 빛이 더 밝게 나타나는 문제점이 발생한다. 실제로 그림 7을 통해 라이선스 램프의 전체 광학계를 살펴보면 광원과 가까이 위치한 번호판 윗부분은 상대적으로 밝고, 광원과 멀리 위치한 아래 부분은 어두운 모습을 보인다. 이는 앞서 수평 배광 조절 설계를 통한 조명도 분포 결과인 그림 6을 통해서도 확인할 수 있다.

때문에 이를 해결하기 위해서는 빛의 진행 방향에 따라 렌즈 형상을 조절하여 조사 영역에 균일한 조명도가 형성되도록 하는 방안이 필요하다<sup>4)</sup>.

그림 8의 경우, target plane 왼쪽에 광이 집중됨으로써 불균일한 광 분포를 보인다. 하지만 그림 9의 경우, 렌즈 형상을 조절하여 target plane에 균일한 광 분포가 형성되도록 한 것을 확인할 수 있다<sup>5)</sup>.

이처럼 번호판에 균일한 수직 배광을 가져가기 위한 렌즈 형상을 도출하여 설계하고자 한다.

각각의 광선을 조절하기 위해서는 자유 곡면 형상의 렌즈 설계가 필요하다. 때문에 자유 곡면 형상의 렌즈 제작을 고려하여 사용되는 매질은 polycarbonate로 설정하였고, 이때의 굴절률은 1.59이다. 매질의 굴절률이 정해져 있기 때문에 빛의 경로를 설정하고, 스넬의 법칙을 응용하여 해당 경로로 빛이 진행하도록 하는 렌즈 형상의 좌표값을 도출할 수 있다<sup>6)</sup>.

그림 10은 이러한 빛의 경로를 2차원 형태로 나타낸 것이다<sup>7)</sup>. 먼저 source에서 렌즈의 rear surface로 입사하는 빛의 각도와 출사하는 빛의 각도를 설정하여, 해당 출사광이 target plane의 한 위치에 도달한다고 가정한다. 이 경우 렌즈의 입사광선과 출사광선은 각각 source 및 target plane을 통한 한 점과 각도를 통한 기울기가 존재하므로 둘 사이의 교점을 구할 수 있다<sup>8)</sup>. 때문에 이들 교점을 좌표값으로 가지는 렌즈 형상을 도출할 수 있다. 하지만 이는 point source라는 가정 하에

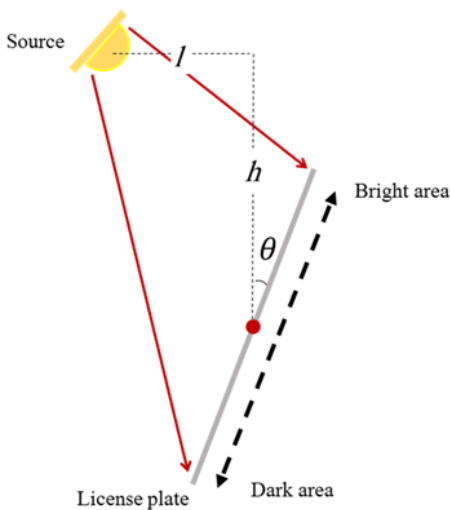


Fig. 7. Detail of the license lamp layout.

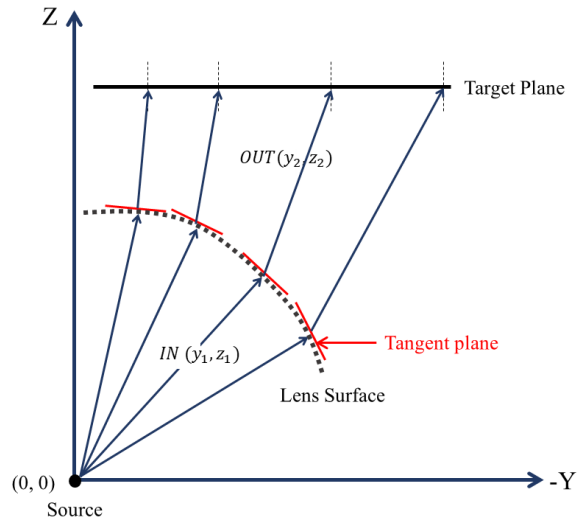


Fig. 8. Example of uneven distribution.

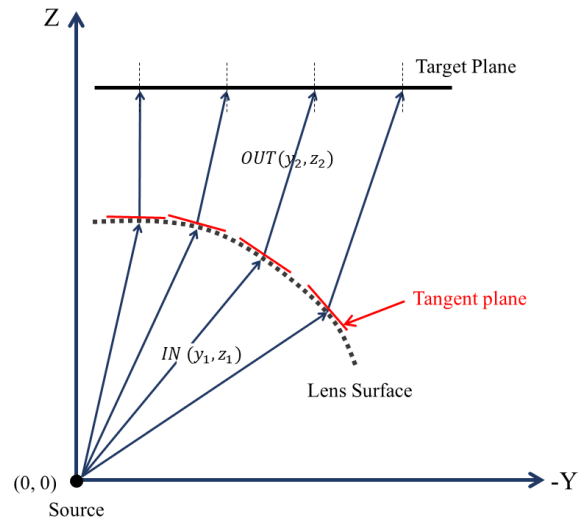


Fig. 9. Uniform light distribution.

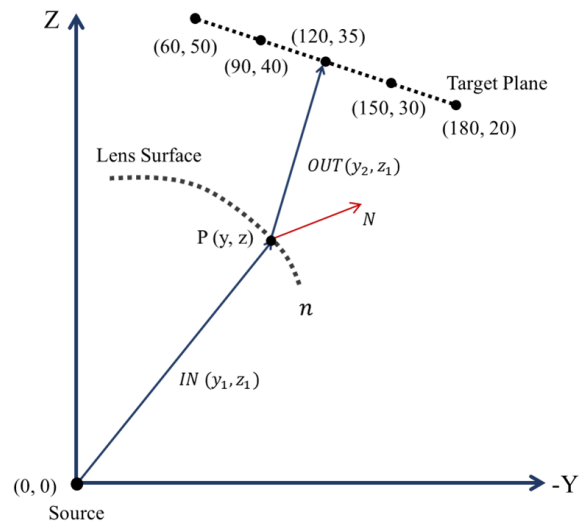


Fig. 10. Ray tracing to the receiver.

Table 2. Grid coordinates

X	-4	-2	0	2	4
(Z, Y)	(2.23, 2.12)	(2.10, 2.91)	(3.19, 1.98)	(2.10, 2.91)	(2.23, 2.12)
(Z, Y)	(2.85, 1.22)	(3.13, 1.56)	(3.08, 1.89)	(3.13, 1.56)	(2.85, 1.22)
(Z, Y)	(3.19, 0)	(3.52, 0)	(3.58, 0)	(3.52, 0)	(3.19, 0)
(Z, Y)	(3.00, -1.28)	(3.29, -1.36)	(3.25, -1.55)	(3.29, -1.36)	(3.00, -1.28)
(Z, Y)	(2.49, -2.16)	(2.68, -2.41)	(2.49, -2.70)	(2.68, -2.41)	(2.49, -2.16)

계산이 이루어졌으며, 렌즈의 rear surface 형상만을 기준으로 좌표를 도출했기 때문에 약간의 오차가 발생할 수 있다.

2차원 평면에서의 교점 계산을 위해 렌즈의 X 값을 각각 -4, -2, 0, 2, 4 총 다섯 파트로 나누었다. 이후 정해진 X 값의 평면에서 렌즈 형상을 나타내는 (Z, Y) grid 좌표를 추출하였다. 해당 grid 좌표는 표 2로 나타내었다.

표로 나타난 grid 좌표계를 Solidworks를 통해 형상화하고, 이를 이용해 해당 좌표점을 가지는 자유 곡면 형상을 LightTools로 구현하였다. 이 곡면을 앞서 설계한 렌즈의 rear surface로 적용하여 grid 좌표계를 따르는 형상의 렌즈 설계 후, LightTools를 통한 추가적인 최적화를 진행하였다.

그림 11은 이렇게 설계된 렌즈의 모습이다. 설계된 렌즈는 11.6 mm × 4.5 mm × 10.5 mm (L × W × D)의 크기를 가지며,

수평면 형상(X-Z plane)의 경우 앞서 설계한 것과 유사한 돔 형상을 띄므로써 넓은 수평 배광을 나타낸다. 또한 Y-Z plane에서 바라본 렌즈의 수직면 형상은 추출한 grid 좌표를 따르며, 이러한 형상을 통해 단거리 plate 조사 영역에 수직 방향으로 개선된 조명도 균일도를 보일 것이다.

설계된 렌즈를 통한 simulation 결과, 그림 12에서 보듯이 grid 좌표가 적용된 광학계 구성을 통해 수직 방향으로 비대칭 배광이 형성된 것을 알 수 있다. 또한 그림 13의 조명도 분포를 확인해보면 license plate의 아래 부분까지 빛이 진행하는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 라이선스 램프의 성능을 확인하기 위한 조명도값은 simulation을 통해 직접적으로 측

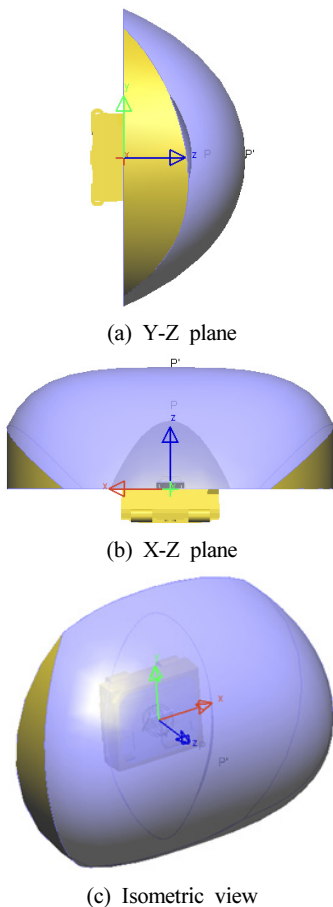


Fig. 11. Lens design.

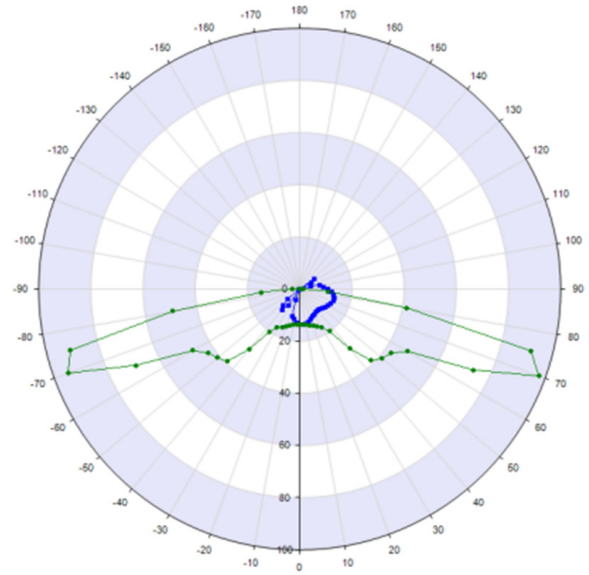


Fig. 12. Intensity slice chart.

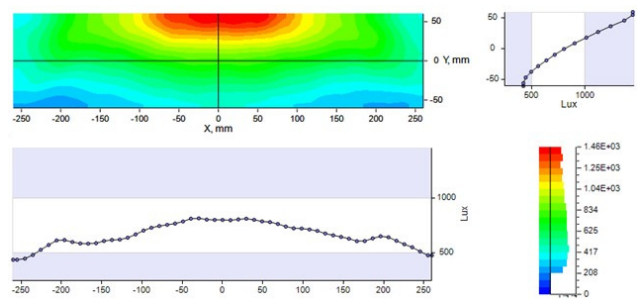


Fig. 13. Illumination distribution chart.

정된 값이 아닌, 휘도를 통해 계산하여 도출하기 때문에 이를 위한 휘도 분석이 필요하다.

**2.4. 광학계 분석**

표 3을 통해 비구면 방정식을 따르는 돔 형상을 이용한 설계로 라이선스 램프의 수평 배광만 조절했을 때와 grid 좌표 추출로 수직 배광까지 함께 조절했을 때의 detector 영역 조명도 분포 및 광효율을 비교하였다. 수평 배광만 조절 시의 균일도는 4.1%, 광효율은 17.4%의 값을 보였고, 수평 및 수직 배광 모두 조절 시 균일도 36.9%, 광효율 33.6%로 수평 배광만 조절했을 때에 비해 향상된 값을 보인다.

특히 조명도 균일도의 경우 8배 이상 향상된 것을 보이는데, 이를 통해 앞서 제시한 원하는 방향으로의 ray 진행을 위

한 grid 좌표 추출 후 해당 형상을 따르도록 하는 설계 방안이 단거리 조명의 조명도 균일도를 높이는 방법임을 확인할 수 있다.

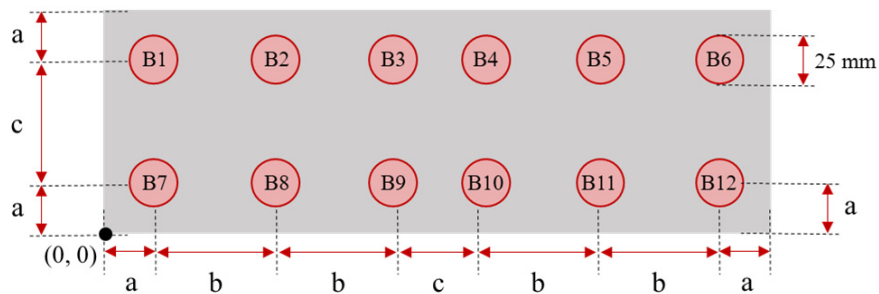
**2.4.1. 휘도 분석**

ECE R-4에 따르면 라이선스 램프의 휘도는 조사 면적에서 12개의 측정점을 가지며, 각각의 측정점으로부터 3 m 이상 떨어진 곳에서 aperture 25 mm의 휘도계를 통해 확인해야 한다. 법규에서 기준한 측정영역의 자세한 위치와 배열을 그림 14와 표 4를 통해 나타내었다. 휘도 측정 전, 조사 면적인 번호판의 반사율은 70%로 설정하였다.

12개의 각 측정영역에서 측정된 휘도값을 표 5를 통해 정리하였다. ECE R-4 법규를 만족하기 위해서는 12개의 각 측

**Table 3.** Results of illumination simulation

Only horizontal		Efficiency	Horizontal and vertical		Efficiency
		17.4%			33.6%
Min	26.606 lux		Min	111.09 lux	
Max	649.10 lux		Max	656.51 lux	
Avg	155.60 lux		Avg	300.92 lux	
Uniformity	4.1%		Uniformity	36.9%	



**Fig. 14.** Position of the license plate.

**Table 4.** Measuring points on the license plate

B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
(95, 25)	(95, 125)	(95, 225)	(95, 295)	(95, 395)	(95, 495)	(25, 25)	(25, 125)	(25, 225)	(25, 295)	(25, 395)	(25, 495)

**Table 5.** Luminance values at the measuring area

Average luminance at 3 m measuring point (cd/cm <sup>2</sup> )											
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	<b>B9 (B<sub>0</sub>)</b>	B10	B11	B12
73.936	104.02	148.84	96.889	134.09	52.998	25.215	23.183	<b>18.434</b>	41.665	19.549	18.921

**Table 6.** Illuminance values at the measuring area

Illuminance calculated from luminance values (lux)											
B1	B2	B3 (max 1)	B4	B5 (max 2)	B6	B7	B8	B9 (min 1)	B10	B11	B12 (min 2)
331.6	466.6	<b>667.6</b>	434.6	<b>601.4</b>	237.7	113.1	103.9	<b>82.6</b>	186.9	87.6	<b>84.8</b>

정영역에서 평균 2.5 cd/cm<sup>2</sup> 이상의 휘도값을 가져야 하며, 식 (2)에 따라 측정된 최소 휘도값(B<sub>0</sub>)은 인접한 1영역과 2영역에서 측정된 휘도 차의 절반 이하여야 한다<sup>9)</sup>.

$$\frac{B_2 - B_1}{distance\ 1-2\ in\ cm} \leq 2 \times B_0/cm \quad (2)$$

측정된 최소 휘도값은 18.434 cd/cm<sup>2</sup>로 모든 측정영역에서 2.5 cd/cm<sup>2</sup> 이상의 값을 가진다. 또한 인접한 영역 간의 휘도차가 가장 큰 지점인 B3~B9 구간에서의 식 (2)를 통해 구한 값은 18.329 cd/cm<sup>2</sup>로 최소 휘도값보다도 작은 값을 보이며 모든 휘도 법규를 만족함을 확인할 수 있다.

**2.4.2. 조명도 분석**

라이선스 램프의 조명도 분석을 위한 값은 측정값이 아닌, 휘도를 통해 계산된 계산값이어야 한다. 측정된 휘도값을 통한 조명도값 도출 방법은 식 (3)을 따른다.

$$E = \pi / \rho \times L \quad (3)$$

(E: illumination, ρ: reflectivity, L: luminance)

이 때 ρ는 측정면의 반사율이며, 본 설계에서는 0.7의 반사율 값을 이용해 계산하였다. 식 (3)을 통해 계산된 각 영역의 조명도값은 표 6으로 나타내었다. 조명도 값이 어느 부분에서도 80 lux 이상이어야 하며, 최고 조명도영역 2개의 평균 조명도는 최소 조명도영역 2개의 평균 조명도의 20배 이하여야 함을 기준으로 조명도 분석을 진행하였다.

계산된 조명도의 최소값은 82.6 lux로, 첫번째 조건을 만족했으며, 최고 조명도영역 2개(B3, B5)의 평균값은 634.5 lux, 최소 조명도영역 2개(B9, B12)의 평균값은 83.7 lux로 약 8 배 가량의 차이를 보임으로써 두번째 조건도 만족한 것을 알 수 있다.

**III. 결 론**

본 논문에서는 단거리 조명 설계 시 짧은 조사거리로 인해 광 조절이 어려워 조명도 균일도가 떨어지는 문제를 해결하기 위해 수평, 수직 방향의 렌즈 형상을 나누어 설계하는 방법을 제시하였다.

수평 방향의 배광을 넓게 가져가기 위해서는 비구면 방정식을 따르는 넓은 돔 형상을, 수직 방향의 비대칭 배광과 조명도 균일도를 만족하기 위해서는 원하는 방향으로의 ray 진

행을 위한 grid 좌표 추출 후 해당 형상을 따르도록 하는 설계 방법을 연구하였다.

설계 후 진행한 simulation 결과, 균일도 향상을 위해 수직 방향의 배광을 조절함으로써 기존 4.1%의 균일도가 36.9%로 향상되었으며 광 효율 또한 17.45%에서 33.6%로 향상된 것을 확인하였다.

또한 해당 설계 방법을 대표적인 단거리 조명 중 하나인 라이선스 램프에 적용하여 2개의 조명 모듈을 사용하는 것이 보편화되어 있는 기존의 것과 달리 단일 광학계 구성만으로 조명도 균일도 향상과 ECE R-4 유럽 법규를 만족하는 것을 확인하였다.

연구 내용을 통하여 짧은 조사 거리로 인해 광 균일도를 확보하기 어려워 다수의 조명 및 광원 모듈이 사용되는 다양한 단거리 조명 광학계의 불필요한 공간 사용 및 유지보수 비용을 절감할 수 있을 것이라 기대한다.

**References**

1. M.-W. Lee, H.-Y. Oh, and H. Kim, "Optical design of secondary lens considering a shape of LED dome," in *Proc. KIIEE Annual Conference* (The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Korea, 2009), pp. 190-192.
2. S.-W. Jang and B.-J. Jung, "Design of the lens structure for COB type LED safety luminaires," *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.* **27**, 1-8 (2013).
3. S.-G. Jung, C.-M. Lee, D.-I. Seok, S.-J. Lee, and H. Kim, "Optical design of LED line lens for street lighting," in *Proc. KIIEE Annual Conference* (The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Korea, 2011), pp. 85-88.
4. M.-W. Lee and H. Kim, "LED optical design for asymmetrical light distribution realization," in *Proc. KIIEE Annual Conference* (The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Korea, 2009), pp. 27-30.
5. R. Hu, Z. Gan, and X. Luo, "Design of double freeform-surface lens by distributing the deviation angle for light-emitting diode uniform illumination," in *2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology* (Dalian, China, Aug. 2013), pp. 1150-1153.
6. Y. Ding, X. Liu, Z.-R. Zheng, and P.-F. Gu, "Freeform LED lens for uniform illumination," *Opt. Express* **16**, 12958-12966 (2008).
7. Y. Luo, Z. Feng, Y. Han, and H. Li, "Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance

- for LED source,” *Opt. Express* **18**, 9055-9063 (2010).
8. K. Wang, S. Liu, F. Chen, Z. Qin, Z. Liu, and X. Luo, “Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11**, 105501 (2009).
  9. United Nations, “Agreement addendum 3: Regulation No. 4 - unece,” (UN Vehicle Regulations - 1958 Agreement, 2013), <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R004r3e.pdf>