

고출력 LED를 이용한 스포트라이트용 렌즈설계

(The Design of Lens for Power LEDs SpotLight)

신경호* · 송상빈** · 여인선***

(Kyung-Ho Shin · Snag-Bin Song · In-Seon Yeo)

전남대학교 전기공학과*, 한국향로표지기술협회**, 전남대학교 · HECS-RRC · POTRI***

Abstract

The LED lighting used spot-light illuminate the limited surface. So it is a key-point to condense wide emission angle of high power light emitting diodes (LEDs) to narrow that angle.

In this paper, the secondary optics was designed by lens-makers formula for concentration rays of LED into specific region. So, it simulated the optics that designed by lens makers-formula in the optical design program, LightTools. And then, show the propriety of lens design utilizing simulation result, luminous intensity, emission angle.

1. 서론

현재의 백색 LED의 조명 효율이 약 20-30 lm/W로 일반 조명으로 사용하기에 필요한 100 lm/W 이상에는 부족하지만 우선 Task Lighting, Back Lighting, Decoration Lighting 등과 같은 낮은 Wattage급의 특수 조명용으로는 충분히 그 활용 가치가 높다. 하지만 고출력 LED가 이러한 좁은 면적을 조명하는 것이 목적인 국부조명으로 이용되기 위해서는 고출력 LED가 갖는 넓은 발산각을 렌즈에 의해 좁혀줄 필요가 있다.

따라서 본 논문에서 일반적인 고휘도 LED에 비해 넓은 배광 특성을 갖는 고출력 LED를 독서용 조명, 액센트/업라이트/다운라이트 조명, 무대 및 극장용 조명 등 특수 조명용으로 적합하도록 렌즈를 이용하여 10°내외의 좁은 배광을 갖는 고출력 LED 유닛을 설계하였다.

이를 위해 고출력 LED의 광학적 특성과 발산각을 좁혀주기 위한 이미 개발된 2차 렌즈의 구조를 분석하고, 기존의 렌즈보다 더 좁은 배광을 갖도록 그 특성이 보완된 렌즈를 설계하였다. 이를 위해 기본적으로 널리 사용되는 렌즈설계이론을 이용하였고, 렌즈설계이론에 의해 도출된 계산값의 오차를 보정하기 위해 광학설계 프로그램인 LightTools를 이용하여 시뮬레이션하고, 이를 통해 산출된 결과값(배광분포, 중심부 최대 광속 등)을 분석하여 렌즈를 설계하여 렌즈 측면부에 의한 광 손실을 최소화하는 모델을 제시하였다.

2. 본론

2.1 고출력 LED의 광학특성

본 논문에서 스포트라이트용 LED로 사용될 기준 광

원으로 Lumileds(社)의 Lambertian 타입의 Luxieon Emitter를 사용하였다. 그림 1과 그림 2 및 표 1은 선정된 1W급 고출력 LED의 스펙과 배광분포 및 스펙트럼분포 그리고 광학적 특성이다.

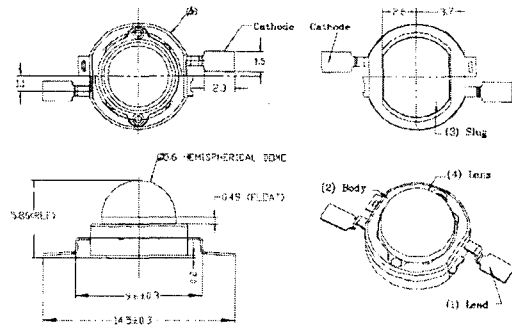


그림 1. 고출력 LED의 외형 (Lumileds co.)

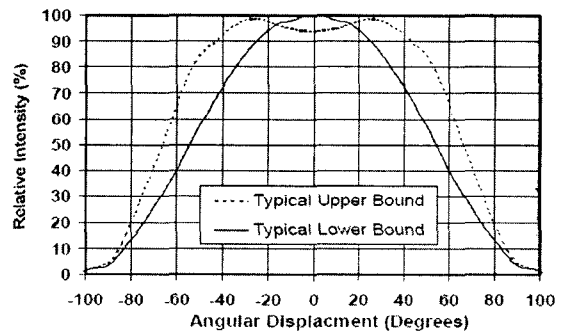


그림 2. 고출력 LED의 배광특성

표 1. 본 실험에 사용된 고휘력 LED의 광학특성

	CCT [K]			Luminous Flux [lm]	Angular distribution [degree]
	Min.	Typ.	Max.		
LXHL - PW01	4,500	5,500	10,000	25	160

2.1.1 고휘력 LED 모델링

그림. 3은 Lumileds(社)의 고휘력 LED를 광학설계 프로그램에서 Modeling한 것이다. LED의 Chip은 1[mm]×1[mm]의 Flip-Chip 형태이다. 그림. 4는 실제 고휘력 LED가 갖는 배광분포와 광학설계 프로그램에서 Modeling한 고휘력 LED의 배광분포를 비교한 것이다. Modeling한 LED의 배광분포는 본 논문에서의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 요소이므로 배광 및 광속, 색온도 등이 실제 LED 모델과 최대한 근사한 값을 갖도록 해야 한다.

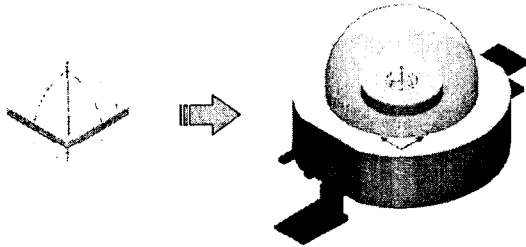


그림 3. 고휘력 LED의 Modeling (LightTools)

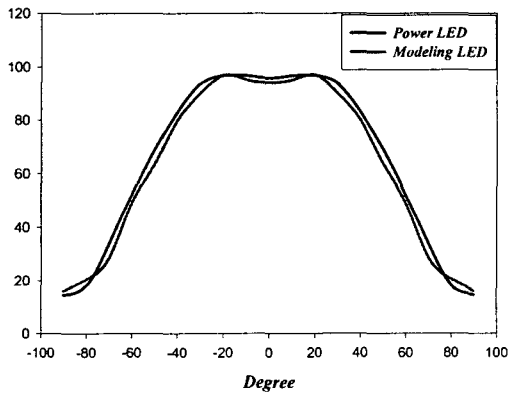


그림 4. 실제 LED와 모델링한 LED의 배광 비교

2.2 광학부 설계

2.2.1 Lens

얇은 렌즈의 경우, 즉 렌즈가 얇아 두께를 무시할 수

있을 때 두 구면의 곡률반경을 입사하는 쪽으로부터 r_1 , r_2 라 하고 굴절률을 n 이라 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

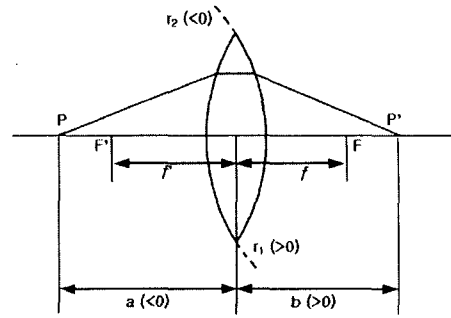


그림 5. Thin Lens

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (1-1)$$

(단, f : 렌즈로부터 상측 초점까지의 거리)

두꺼운 렌즈에서는 렌즈 내에 그림에서 H, H'로 나타낸 것과 같은 점을 생각하여, 이것을 각각 제 1 주점(물본측주점), 제 2 주점(예측주점)이라 한다. H, H'간의 간격은 무시한다. 렌즈의 두께를 $d(>0)$ 라 하면, 제 1면, 제 2면으로부터 H, H'까지의 간격 a_H, b_H 는 각각

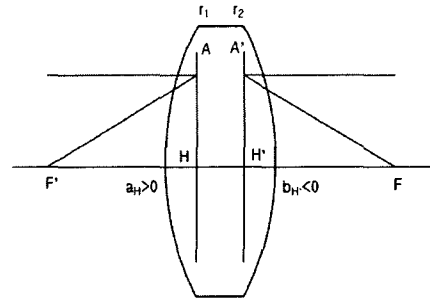


그림 6. Thick Lens

$$a_H = \frac{-r_1 \cdot d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \quad (2-1)$$

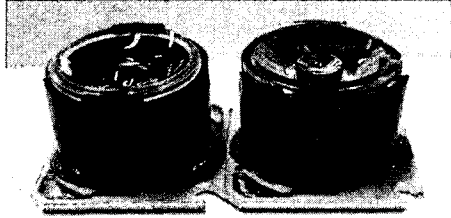
$$b_H = \frac{-r_2 \cdot d}{n(r_1 - r_2) + (n-1)d} \quad (2-2)$$

로 주어지며, 이때 렌즈의 공식은 얇은 렌즈와 같이 다음과 같이 주어진다.

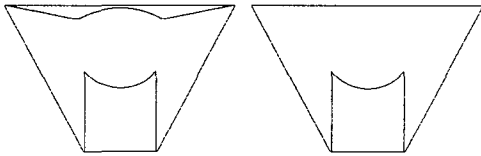
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (2-3)$$

2.2.2 기존 2차 렌즈에 의한 배광 분석

Lumileds(社)의 고휒력 LED의 2차 렌즈는 2가지 아래 그림에서 보는 바와 같은 2가지 타입이 있다. 2가지 렌즈 모두 측면의 경사면에서 전반사가 이루어지도록 하고, 중심부는 볼록렌즈에 의해 집광이 되도록 한 형태이며, 2가지 타입 모두 Half Angle 약 15° 내외의 배광특성을 보였다.



(a) 2차 렌즈 형태



(b) 2차 렌즈의 단면

그림 7. 2차 렌즈 (Lumileds co.)

위 그림 7의 2차 렌즈에 의한 배광특성은 아래 그림 8에서 보는 바와 같다. 각각의 최대 광도는 107.6 [cd]와 96.2 [cd]로 첫 번째 타입의 렌즈가 중심부 최대 광도가 두 번째 타입의 렌즈보다 우수한 특성을 나타내는데, 이는 중심부 렌즈에 의해 빛의 집광이 좀더 효과적으로 이루어졌으며, 렌즈 상부면에 경사를 줘서 중심부에 기여하는 Ray의 수를 늘려줬기 때문이다.

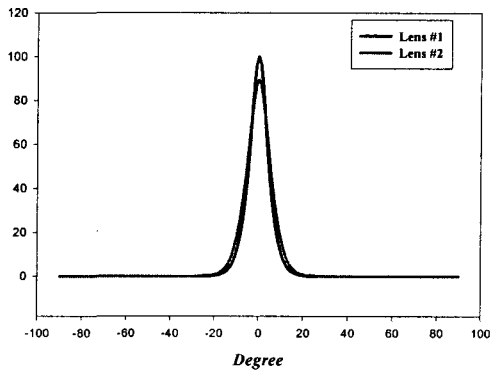


그림 8. 2차 렌즈에 의한 고휒력 LED의 배광

2.3 2차 렌즈의 설계

그림 3에서 Modeling한 고휒력 LED를 기준 광원으로 하여 2차 렌즈를 설계하기 위해 Ray의 진행 방향을 알아보기 위해서 Ray Tracing을 하였다. 고휒력 LED의 지향반각(Half angle)이 80°라고 했을 때, 고휒력 LED에 2차 렌즈를 씌워 Ray의 진행방향을 알아보면 그림 9와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 2차 렌즈를 설계함에 있어서 옆면의 경사도, I·II·III 영역을 지나는 Ray를 집광할 수 있는 설계 등 크게 4가지를 고려하여야 한다.

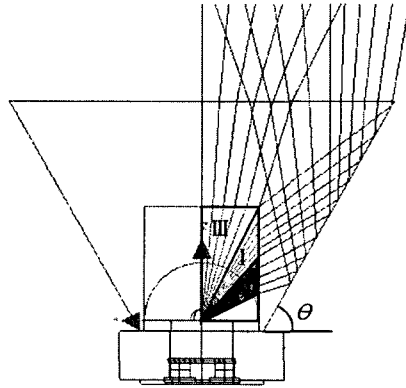


그림 9. 렌즈설계시 고려사항

측면 경사도는 약 30°에서 80°사이의 Ray를 전반사에 의해 상부로 보내주는 역할을 한다. 영역 I·II를 지나는 렌즈 형태의 변화를 주어 평행광이 되도록 해야 하며, 영역 III을 지나는 Rays는 볼록렌즈를 이용하여 집광을 해야 한다.

2차 렌즈의 재질은 투과율이 우수하고 가공이 용이한 PMMA를 채택하였으며, PMMA의 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 2. 아크릴의 광학특성

투과율(%)	흡수율(%)	반사율(%)	굴절률(n)
92	0.3	7.7	1.49

3. 광학부 시뮬레이션 및 평가

본 논문에서는 고휒력 LED의 2차 렌즈에 대한 기존 설계의 문제점을 찾고, 보다 효율적인 설계를 위하여 광학설계프로그램을 이용한 시뮬레이션의 결과로 중심부 최대 광도(I_{max}), 배광특성 등을 분석하고 평가하는 방법을 이용하였다.

3.1 측면 경사도

2차 렌즈에서 렌즈 측면의 경사도(θ)는 고휒력 LED

측면에서 방출되는 빛을 전반사 (Total Internal Reflection) 법칙에 의해 상부로 반사시키는데 중요한 요소이다. 측면의 경사도를 결정하기 위해서 기존의 렌즈의 측면각도인 60°를 기준으로 ±5°의 범위에서 시뮬레이션하고 중심부 최대 광도와 리시버에서 검출되는 총 광도를 비교하였다.

아래 그림 10에서 보면 중심부 최대광도(I_{max})는 측면 경사도(θ)가 60°일 때보다 61°일 때 최대임을 알 수 있다. 그러나 전체 광속은 측면 경사도가 61°일 때보다 60°일 때 더 나은 특성을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 렌즈의 측면 경사도(θ)를 60°로 채택하였다.

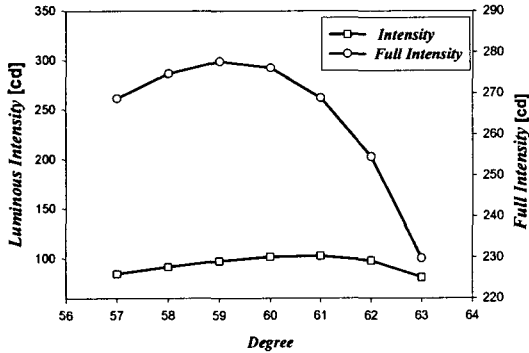


그림 10. 측면 경사도에 의한 광도 특성

3.2 상부면 경사도(1)

본 연구에서 2차 렌즈를 설계함에 있어 주안점으로 둔 것 중 하나가 기존의 2차 렌즈보다 좁은 배광을 얻을 수 있어야 한다는 것이다. 그림 9에서 영역 I을 통과하는 Ray들은 결과적으로 Ray의 집광을 목적으로 하는 2차 렌즈의 역할에 반하는 것들이다. 영역 I을 통과하는 Ray를 중심축을 향해 모아주기 위해 렌즈 상부면의 각도를 10°를 기준으로 하여 변화시켜가며 시뮬레이션 하여 그 결과값을 분석하였다.

시뮬레이션 결과는 아래 그림 11과 같다. 그림 11에서 보는 바와 같이 중심부 최대 광도는 12°에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있었지만, 전체 광도는 10°일 때 가장 좋게 나타남을 알 수 있었다. 최대 광도가 높게 나왔음에도 불구하고 전체광도가 비교적 낮게 나왔다는 것은 그만큼의 Ray 손실이 존재한다는 것을 의미하므로 적당한 값이라 할 수 없다. 따라서 렌즈 상부면 경사도는 10°로 하였다.

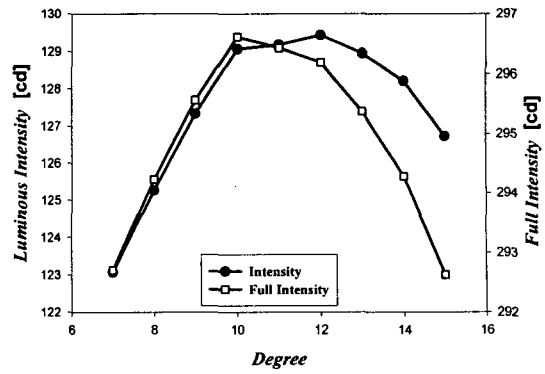


그림 11. 렌즈 상부면 경사도(1)에 의한 광도 특성

3.3 상부면 경사도(2)

그림 9에서 영역 II를 통과하는 Ray들은 중심축 쪽으로 너무 모아져 결과적으로 원거리에서는 작업면에 기여하지 못하는 광의 손실로 작용한다. 따라서 영역 II를 통과하는 Ray들의 진행 방향을 바꿔주기 상부면의 각도에 변화를 주었다. 렌즈 측면의 경사도는 60°, 상부 경사도(1)는 10°로 고정하고, 렌즈 상부면의 경사도(2)를 15°를 중심으로 ±5° 내에서 각도를 변경해가며 광학설계 프로그램에서 시뮬레이션하고 그 결과값을 분석하였다.

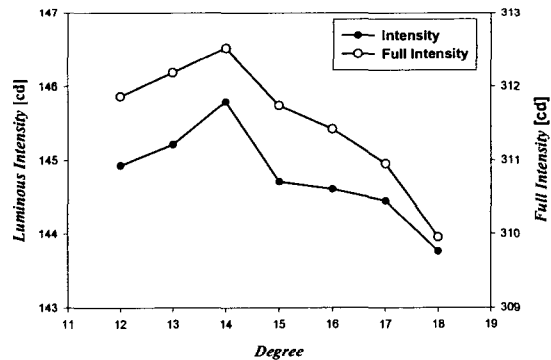


그림 12. 렌즈 상부면 경사도(2)에 의한 광도 특성

3.3 렌즈 중심부 렌즈

그림 9에서 영역 III를 통과하는 Ray들은 집광하기 위하여, 렌즈 설계이론을 이용하여 볼록렌즈를 설계하였다. 먼저 렌즈의 양쪽 곡률(r_1, r_2)이 같다고 할 때

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} \right) = (n-1) \frac{2}{r_1}$$

$$r_1 = r_2 = 7.4088$$

(단, $f = 7.56, n=1.49$)

위에서 계산된 곡률을 이용하여 렌즈를 설계하고 시뮬레이션을 한 결과는 그림 13과 같다. 아래 그림에서 보면 계산된 곡률인 7.4에서보다 곡률반경이 줄어들 때 오히려 최대광도와 전체 광도가 모두 증가함을 알 수 있다.

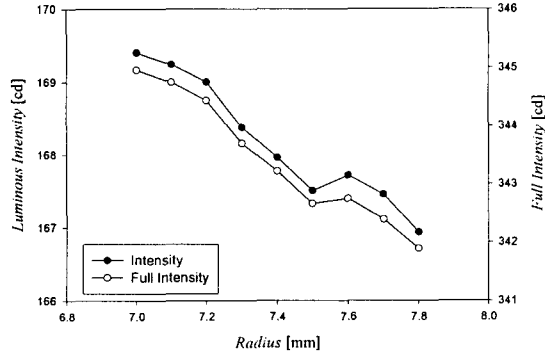


그림 13. 중심부 렌즈 곡률에 의한 배광 특성(1)

광학 설계 프로그램을 이용하여 위의 곡률 반경을 갖는 렌즈를 설계하여 Ray tracing하여보았다. 그 결과 Ray들이 렌즈의 첫 번째 곡면을 통과한 후, 굴절된 각이 좁지 않아 결과적으로 Ray들 중 일부가 집광되지 못하고 Ray 손실로 작용했기 때문이었다. 또한 렌즈의 직경이 작아 렌즈의 두께를 무시하고 계산했기 때문에 오차가 생겼을 수 있다. 따라서 렌즈 곡률 반경 r_1 을 5[mm]로 고정하고, r_2 의 값을 계산하였다.

$$a_H = \frac{-r_1 \cdot d}{n(r_2 - r_1) + (n - 1)d}$$

$a_H = 1.5$ 로 가정하면,

$$1.5 = \frac{-5 \times 5.54}{1.49(r_2 - 5) + (1.49 - 1) \times 5.54}$$

$$r_2 = -9.21$$

(단, $d=5.54, r_1=5, n=1.49$)

위에서 계산된 값을 이용하여 중심부 렌즈를 설계하고 시뮬레이션 하여 그림 14, 그림 15와 같은 결과를 얻었다.

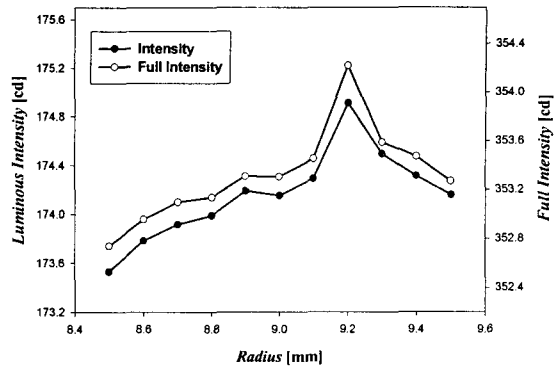


그림 14. 중심부 렌즈 곡률에 의한 배광 특성(2)

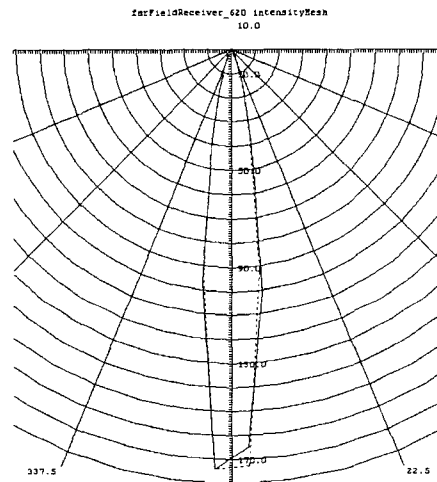


그림 15. 배광분포

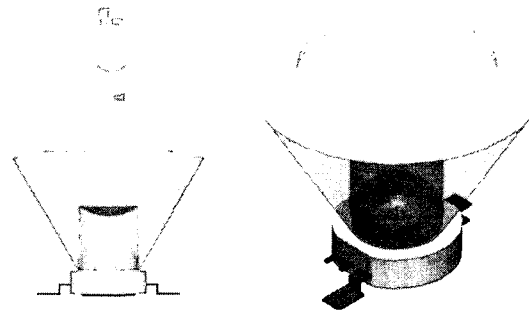


그림 16. 제안된 2차 렌즈

4. 결 론

본 연구에서는 특수조명용으로 사용될 고효율 LED의 2차 렌즈에 의한 집광에 관계된 요소를 분석하고 이를 보완해주기 위해 2차 렌즈의 측면 경사도, 상부 경사도 (1), 상부 경사도(2), 중앙부 렌즈 곡률 등을 바꾸어가면서 시뮬레이션 한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 렌즈의 측면 경사도를 60°로 했을 때 최대 광도는 경사도 61°일 때보다 비교적 낮은 값이 나타났지만, 전체 광도가 높아 전체적으로 Ray 손실이 적어 집광에 더 유리함을 알 수 있었다.
2. 렌즈의 측면 경사도는 고정시키고 렌즈 상부의 경사도(1)를 변화시켜 시뮬레이션 한 결과, 경사각이 10°일 때, 전체 광도와 최대 광도 모두 비교적 높음을 알 수 있었다.
3. 렌즈의 측면 경사도, 렌즈 상부의 경사도를 고정하고 렌즈 중앙부 경사도를 변화시킨 결과 렌즈 중심부 경사도가 14°일 때, 전체 광도 및 최대 광도가 최대임을 알 수 있었다.
4. 렌즈의 측면 경사도, 렌즈 상부의 경사도, 렌즈 중앙부 경사도를 고정하였을 때, 곡률반경 r1을 5[mm], r2를 9.2[mm]에서 최대 광도를 얻을 수 있었다.
5. 특수 조명용 고효율 LED에 적합한 렌즈를 제안하고, 최대 최대 약 175[cd]의 중심 광도를 얻을 수 있는 렌즈의 설계가 가능하였다.

이 연구는 한국과학재단지정 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구비의 일부 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Michael J. Kidger, "Fundamental Optical Design", SPIE PRESS, 2002
- [2] 이원진 외 11인, "기하광학", 수문사, 2000
- [3] N.Narendran, L.Deng, R.M.Pysar, Y.Gu, and H.Yu "Performance Characteristics of High-Power Light-Emitting Diode," Third international conference on solid state lighting, proceeding of SPIE, 2003.
- [4] N.Narendran, N.Maliyagoda, L.Deng, R.Pysar, "Characterizing LEDs for General Illumination Application" Proceedings of SPIE, Vol.4445, 2001
- [5] 해양수산부, "항로표지기초이론"
- [6] Lumileds, <http://www.lumileds.com>
- [7] Robert E. Fischer, "Optical System Design", McGraw-Hill, 2002
- [8] Vaughn D. Martin, "Optoelectronics vol.1", Prompt publications, 1997
- [9] E. Fred Schubert, "LIGHT-EMITTING DIODES" pp. 89-98, 2003