조명용 LED 반사컵의 설계변수 의존도 분석 및 기능성 설계의 단순화 기법

임해동 · 이동진 · 김양겸 · 오범환[†]

인하대학교 정보통신공학과
고성능 LED 조명모듈 핵심기술 연구센터(LED-STAR)
☎ 403-751 인천광역시 남구 용현동 253

(2012년 7월 3일 받음, 2012년 8월 2일 수정본 받음, 2012년 8월 6일 게재 확정)

본 논문에서는, LED 조명의 배광 특성의 조절이 용이한 반사컵 설계 방법을 제안하였다. 먼저 개별 반사컵의 구조와 높이에 대한 방사각의 변화 경향성을 파악하여, 높이에 따른 반사 특성을 확인하였다. 그 결과, 높이에 따라 반사 각도를 조절하여 설계함으로써 배광 분포의 세밀한 조절이 가능했다. 가장 간단한 2단 분할 방식의 경우 방사각의 제어나 균일도 개선을 할 수 있었다.

Beam Pattern Analysis of LED Reflector Design and Simplification of the Functional Design

Hae-Dong Yim, Dong-Jin Lee, Yang Gyeom Kim, and Beom-Hoan O[†]

[†]*School of Information and Communication Engineering, Inha University,
LED-Smart Technology Advanced Research Center (LED-STAR)
253 Younghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea*

(Received July 3, 2012; Revised manuscript August 2, 2012; Accepted August 6, 2012)

The design methods of the reflecting cup employed in an LED lamp are presented. The beam patterns of an LED lamp can be adjusted by functional segmentation of the reflector height. Thus, the reflecting angle of slope was designed according to the height. The analysis of the designed reflecting cup shows that precise adjustable beam patterns can be achieved.

Keywords: Light emitting diode (LED), Reflector, Functional design

OCIS codes: (230.0230) Optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes

I. 서 론

1990년대 초에 청색 LED (light emitting diode)가 상업화에 성공된 이후 가시광 LED의 시장은 지속적으로 성장해 왔다. 초기 LED는 단순 인디케이터 용도로 이용되었으나, 현재는 전광판, 교통신호등, LCD backlight, 경관장식 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 또한, 광 출력이 더욱 증대된 LED들이 개발됨에 따라 자동차는 물론 일반조명 분야에서도 더 많은 LED가 이용되고 있다.

LED 패키지의 광 출력이 향상됨에 따라 기존의 조명을 대체하기 위하여 다양한 형태의 LED 조명이 개발되고 있다. LED 조명 제품들은 친환경적이며, 소비 전력이 작고 수명

길다는 장점들로 기존의 조명을 빠르게 대체하고 있다. 대표적인 LED 조명 제품은 백열등을 대체하기 위한 전구형, 할로겐 램프를 대체하기 위한 Multifaceted Reflector (MR) 램프, Parabolic Aluminized Reflector (PAR) 전구를 대체하기 위한 PAR 램프가 있다. 그 외에 LED 형광등, 다운라이트, 평판조명, 가로등, 보안등 등 다양한 LED 조명들이 개발되고 있다. 하지만 대부분의 제품에는 LED 조명의 방열을 위한 구조 설계 위주로 이루어 지고 있어 LED 조명의 광학 설계가 필요한 실정이다.

일반 조명에서는 용도에 맞는 발광 효율과 조명기구의 배광이 매우 중요하다. LED 조명의 배광을 결정하는 광학 설계는 크게 반사경 설계와 2차 렌즈 설계로 나뉜다. 반사경

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr

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

은 렌즈보다 오래 사용되어 왔으며, 쉽게 제작이 가능하고 가격이 싸다. 또한 특정 경우에 렌즈를 사용했을 경우보다 빛을 더 집중 시킬 수 있다. 하지만 LED 에서 방출된 대부분의 빛은 반사경에 반사되지 않기 때문에 Hot Spot Area가 발생할 수 있다. 렌즈의 경우에는 LED에서 방출된 대부분의 빛이 렌즈를 통과하기 때문에 LED 조명의 배광을 조절하는데 있어서 반사경보다 효과적이지만 제작이 어렵거나 단가 측면에서 비용이 상승할 우려가 있다.

본 논문에서는 Light Tool을 이용하여 LED 칩 패키지의 반사컵 설계를 위한 기본 지침을 마련하고자 한다. 이와 같이 마련된 설계 지침은 LED 조명모듈의 광학계를 설계하는데 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 반사경 설계 기법

현재 개발되는 LED 조명들은 다수의 LED를 평면상에 배열하고 2차 렌즈를 통해서 배광을 제어한다. 방열 성능을 향상시키기 위해서 반사경이 거의 없고 대부분이 방열판으로 구성되어 있다. 이 경우 하나의 반사경으로 배광을 제어하는 것은 대부분 램버시안 (Lambertian) 배광을 보이는 LED의 특성으로 인하여 제약이 있다. 또한 LED 배열 면적이 넓을수록 반사경을 이용한 제어가 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 각각의 LED에 적용 가능한 소형 반사경을 이용한 배광 설계를 목표로 하였다. 그림 1은 본 논문에서 시뮬레이션에 사용된 LED칩과 패키지의 구조를 나타낸다. LED 칩의 크기는 $1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ 이며, 높이는 0.15 mm 이다. 칩의 배광 분포는 램버시안이다. 시뮬레이션에서 LED 칩은 면 광원으로 설정하였고, 광원 표면의 광선 분포는 균일하게 설정 하였다. LED 칩 표면 광도 분포에 따라 광학 설계에 따른 배광 분포가 달라지지만, 제어된 배광 분포 변화 경향성은 유사하기 때문에 상기 조건으로 설정하였다. 최종 LED 패키지의 배광 분포는 램버시안으로 측정 되었으며, 시뮬레이션 결과도 램버시안으로 나온 것을 확인하였다. 수신기는 무한원시야 수신기로 설정하였으며 300만 광선을 분석수행 하였다. 반사경의 코팅은 일반적으로 많이 이용되는 아노다이징 (Anodizing) 알루미늄 코팅을 적용하였다. 아노다이징 알루미늄은 가시광선 영역에서 평균적으로 96%의 반사율을 가지고 있다. 본 논문에

서는 기준파장 445 nm 에서 알루미늄의 반사율을 고려하여 90% 로 하였다.

2.1. 직선형 반사경

가장 간단한 형태인 직선형 반사컵의 높이와 경사면 각도에 따른 배광 특성과 효율을 확인하였다. 그림 2는 반사컵의 높이와 각도에 따른 결과를 나타낸다. 높이는 2 mm 에서 10 mm 이며, 각도는 LED가 배열된 평면에 수직한 방향을 기준 (0도)으로 45도 까지 계산하였다. 높이가 4 mm 일 때 각도에 따른 배광 특성의 변화를 그림 3에 나타냈다. 특정 각도를

FIG. 2. Calculation result according to the reflector angle and height. (a) Beam angle and (b) efficiency.

FIG. 1. The LED package and reflector structure.

FIG. 3. Beam angle and intensity profile according to the slope angle ($H = 4\text{ mm}$).

기준으로 경사면의 경사가 급해질수록 다중반사가 많이 일어나 효율이 떨어지고 방사각이 커진다. 반대로 경사면의 경사가 완만해지면 다중반사는 줄어들어 효율은 증가하고 방사각이 커진다.

2.2. 포물선 (Parabolic)형 반사경

포물선형 반사경은 집광성을 높인 형태의 램프에 이용되는 구조로 빔 각도가 30도 이내의 조명에 주로 사용된다. 초점에서 방사된 빛은 반사경에 반사되어 collimation 되기 때문에 집광용도의 램프에 이용된다. 그림 4는 본 논문에서 이용한 LED 패키지에 맞는 포물선을 도식하였다. LED 발광부의 직경이 5.5 mm 이므로 초점 $P = 5.5/4 = 1.375$ mm 이다. 그림 5는 포물선 반사컵의 높이 (H)에 따른 배광 특성 및 방사각을 나타냈다. 형태에 따른 반사경의 배광 특성 비교를 위하여 유효 방사각 (effective beam angle, θ_{eff})을 정의 하였다. 방사각은 최대 세기의 1/2지점이 되는 각도를 말한다. 유효 방사각은 각도에 따른 세기가 급격하게 변하는 지점의 각도

FIG. 4. Parabola and the LED package structure.

FIG. 5. Calculation result according to the parabolic reflector height.

를 나타내며, $\theta_{eff} = \frac{d^2 I}{d\theta^2}$ 로 정의 하였다. 포물선의 경우 유효 방사각은 구조에 따라 결정되며 높이와는 관계가 없었다. 또한, 유효 방사각과 방사각의 비율을 유효 각도비 (effective angle ratio)로 정의하여 나타내었다. 유효 각도비가 높은 것은 방사각내 빛의 세기가 균일함을 나타낸다.

2.3. Compound Parabolic Concentrator (CPC)형 반사경

그림 6에 CPC의 구조를 나타내었다. CPC는 포물선의 축이 기울어져 있는 구조이며, Light Tool에서 설계 파라미터는 네가지로, 입력크기와 출력크기, 입력각도, 출력각도가 있다. 네가지 파라미터 중에 세가지를 결정하면 나머지는 계산된다. CPC는 태양전지에서 빛을 모으기 위하여 이용되는 구조이다. CPC반사컵은 방사각까지 각도에 따른 빛의 세기가 거의 일정한 것이 특징이다. 하지만 CPC는 설계상 높이가 매우 높아 반사컵의 효율이 떨어질 뿐만 아니라 비용이 증가할 수 있고, 앞서 언급한 바와 같이 평명상에 배치된 다수의 LED에 적용하기엔 공간적 제약이 따른다. 설계상 높이를 줄이는 방법으로 트리밍 (Trimming)이 있다. 트리밍이란 전체 높이에 대하여 CPC 구조는 변함없이 높이만 줄이는 것을 말한다. CPC의 높이에 대한 적절한 트리밍은 그 배광 특성이 거의 변하지 않으면서 낮은 높이로 제작할 수 있다. 그림 7은 트리밍에 따른 배광 특성의 예시를 나타내었다. 설계상 높이는 15.6 mm이며 10 mm (36%) 에서 2 mm (87%) 까지 트리밍한 결과를 나타내었다. 트리밍을 할수록(높이가 낮아질수록) 방사각은 점점 커지지만 곡면 구조는 변함이 없기 때문에 유효 방사각은 그대로이며, 이에 따라 유효 각도비는 점점 떨어진다.

CPC의 경우 설계 파라미터가 다양하고 트리밍이 가능하기 때문에 반사경의 높이에 따른 경향성을 파악하기 어렵다. 본 논문에서는 입력크기를 5.5 mm, 입력 각도는 90도로 고정하였으며, 출력 크기와 트리밍을 이용하여 CPC의 높이를 조절하였다. 최종적으로 CPC의 높이는 2 mm에서 10 mm 까지

FIG. 6. CPC structure and design parameters.

FIG. 7. Beam angle and intensity profile according to the height trimming.

FIG. 8. Beam angle and intensity profile according to the size of the upper initial design (H = 4 mm trimming).

계산하였다. 그림 8은 높이가 4 mm일 때 출력 크기에 따른 배광 특성을 보여준다. 출력부 크기에 따라 CPC 구조가 달라지기 때문에 유효 빔각도가 달라지는 것을 볼 수 있다. 출력부 크기가 작으면 유효 각도비가 높지만 방사각도 크다.

FIG. 9. Beam angle according to the height of reflector structure.

반면에 출력부 크기가 커지면 방사각은 줄어들고 유효 각도 비도 줄어든다.

2.4. 반사경 구조에 따른 비교

앞서 계산한 결과들을 토대로 높이에 따른 방사각을 그림 9에 나타내었다. 직선형 반사컵은 각 높이에 따라 방사각이 제일 작은 경우를 표시하였다. CPC의 경우 같은 높이라도 출력부 크기에 따라 방사각이 달라진다. 비교용으로 추출한 데이터는 포물선형 반사컵의 유효 각도비에 해당하는 방사각을 표시 하였으며, 에러바는 유효 각도비의 $\pm 20\%$ 에 해당하는 방사각을 나타낸다. 비교 결과 높이가 높아질수록 최대 줄일 수 있는 방사각은 줄어든다. 또한, CPC와 포물선형 반사경이 직선형보다 방사각이 작고, CPC는 설계에 따라 방사각의 조절이 가능한 장점이 있다.

III. 기능성 높이 분할방식 반사컵 설계

높이에 따른 배광 특성을 보면 반사면의 각도에 따라서 반사컵이 LED에서 방출된 빛을 반사하는 특성이 다르다. 따라서 높이에 따라 서로 다른 각도의 반사컵을 이용하여 배광 특성과 배광 균일도의 조절이 가능하다. 가장 간단한 방법으로 2단분할 방식의 반사컵의 설계하였다. 먼저 하단부의 경사를 최적화 한다. 하단부 경사는 이전의 높이에 따른 결과에서 방사각이 가장 작은 경우로 설계하면 반사된 빛이 가운데로 향하게 할 수 있다. 상단부의 경사는 하단부보다 세워서 설계하여 반사된 빛이 반대 방향으로 향하도록 하였으며, 이는 균일도를 조절하는 역할을 한다. 단일 반사컵과 2단 분할방식 반사컵의 배광 특성을 그림 10에 비교하였다. 그림 10(a)의 결과로 직선형 반사컵의 경우 단일경사보다 2단분할 방식이 중심부 빛의 세기와 균일도가 더 좋은 것을 확인하였다. 포물선과 직선의 혼합형 반사컵의 결과를 그림 10(b)에 비교하였다. 포물선과 직선의 혼합형인 경우, 중심부 세기는 변화가 없으나 각도에 따라 급격하게 감소하던 것을 보완하는 결과를 얻을 수 있었다.

FIG. 10. Intensity profile of single and split slope design. The bottom and upper structure is (a) linear and linear, (b) parabola and linear.

IV. 결 론

기존 반사컵의 설계 변수에 대하여 방사각의 분포 변화 경향성을 파악하였다. 반사컵의 경사에 따라 방사각 분포 부위별 근원 및 반사컵 구조 변수조절 특성이 다른 것을 확인하여, 높이에 따라 반사컵을 분할 설계하는 방법을 제안하였다. 그 결과 반사컵의 배광 특성을 향상시켰고, 균일도 조절이 용이한 설계 기법이 될 수 있음을 보였다. 가장 간단한 설계 방법으로 경사면을 2단으로 분할하여 배광 특성의 변화를 확인 하였다. 하단부는 빛을 집광시키는 기능을 하도록 설계

하였으며, 상단부의 각도 조절을 통해서 방사각 제어나 배광 분포의 균일도를 개선하는 효과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT연구센터 육성지원 사업(NIPA-2012-H0301-12-1010)의 연구결과로 수행되었음.

References

1. S. W. Kim, B. K. Song, and S. J. Lee, "Fundamentals of light-emitting diode lamp design," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **13**, 324-331 (2002).
2. J.-D. Kim, G.-S. Choi, and J.-C. Lee, "Simulation and optical characteristics for high efficiency secondary optics," *Journal of the Lighting Emitting Diodes* **1**, 79-86 (2009).
3. J. Jiang, S. To, W. B. Lee, and B. Cheung, "Optical design of a free form TIR lens for LED street light," *International Journal for Light and Electron Optics* **19**, 1761-1765 (2010).
4. F. R. Fournier, W. J. Cassarly, and J. P. Rolland, "Fast freeform reflector generation using source-target maps," *Opt. Express* **18**, 5295-5304 (2010).
5. J. H. Youk, D. W. Hong, and S. J. Lee, "Basic design guidelines for LED lamp packages," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **22**, 141-150 (2011).
6. G.-D. Hong, P. Kim, D.-G. Lee, and G. Park, "Review of near-field illumination optics in LED lighting," *Journal of the Lighting Emitting Diodes* **3**, 32-39 (2011).