LED MR16의 광효율 향상을 위한 비구면 광학계 연구

유숙철^{a*}, 유경선^b, 현동훈^b

A Study on Aspheric Optics Research for Improving the Luminous Efficiency of the LED MR16

Sook-Chul Yoo^{a*}, Kyung-Sun Yoo^b, Dong-Hoon Hyun^b^a Mechanics Standards Center, Korea Testing Laboratory, 723, Haeon-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 426-910, Republic of Korea^b Nano-Optical Engineering, Korea Polytechnic University, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	March	2013
Revised	19	April	2013
Accepted	8	May	2013

Keywords:

MR16
LED illumination
Luminous efficiency
Light uniformity
Aspheric optics
Pattern reflector

ABSTRACT

In this study, we researched the LED source MR16, which maintains the strong points of an ordinary MR16 while compensating for its weak points. The optical system composition of the LED MR16 includes four aspherical lens per sheet and a patterned reflector. The aspherical optical system and reflector were designed using optical software, and the performance was estimated using a lighting simulation program. Finally, a prototype was manufactured after analyzing the simulation data, and the reliability of the simulation results was estimated using a comparative analysis of the designed data and measured data.

1. 서 론

최근 친환경적인 조명용 광원으로 LED가 주목받고 있다. LED는 소비전력이 적고 장수명 광원으로 일반조명 및 자동차, 할로겐 전구 등의 조명시장에 적용되면서 가격 저감과 제품 개량이 급속하게 진행되고 있다^[1]. 그러나 LED에서 나오는 광은 직진성이 강하여 LED 조명으로 발전하였을 경우 대부분이 글레어(Glare)^[2] 현상을 초래하기 때문에 빛 공해를 일으키는 원인이 되고 있다.

이러한 LED 조명의 배광을 제어하기 위해 통상적으로 렌즈(Lens) 및 반사체(Reflector) 등의 조명기구물이 이용되는데, 이 과정에서 LED Chip의 고질적인 문제인 황색 패턴(Yellow ring)

가 발생함에 따라 빛품질이 떨어지는 결과를 낳게 된다^[3]. 이를 해결하기 위해서는 조명용 렌즈와 반사체에 대한 광학적인 연구가 지속되어야 한다.

본 논문에서는 실내조명 중 MR16^[3] 조명의 광원을 LED로 대체하고자 한다. MR의 의미는 “다면체 반사판”을 나타내는데, 이는 다면체 구조를 가지는 압축 유리의 반사판 표면의 각면에 대해서 균일하게 반사물질이 코팅되어 있는 형태로, 이러한 각면들은 광학적으로 필라멘트에서 나오는 빛을 모아 집광시키는 특성을 가지고 있다. 어떤 MR램프 반사판은 다면체가 아닌 매끄러운 구조로 되어 있지만, 아직까지 이를 통칭해서 MR램프라고 부른다.

MR 램프는 크기가 다양하며, 이는 램프의 최대 지름에 따라 중

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-1784

Fax: +82-31-8041-1786

E-mail address: scyoo@ktl.re.kr (Sook-Chul Yoo).

류가 나뉜다. 대부분 MR 램프는 MR16을 이야기하는데 여기서 숫자 16은 MR 램프 바깥면 최대 지름 치수를 나타낸다. 숫자 16의 의미는 16/8인치(inches) 즉 2인치가 되며 이는 램프의 외곽지름이 5 cm정도인 것을 의미한다.

본 논문에서는 기존 MR16에서 사용하던 할로겐 광원을 LED로 교체한 후 LED MR16의 광균제도와 황색 패턴 현상 제거에 대해 연구하였다. MR16의 광학계는 4매의 비구면 렌즈를 1 시트(Sheet)로 한 광학계와 패턴(Pattern)을 가진 반사체 광학계를 적용하여 각각 개발하였다. 광학 소프트웨어를 통해 비구면 렌즈와 반사체를 설계하였고, 조명 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 설계 데이터의 조명 성능을 예측하였다. 시뮬레이션 데이터를 토대로 광학 시제품을 제작한 후 최종적으로 LED MR16 시제품을 제작하고 시제품 성능 측정 데이터와 조명 시뮬레이션 데이터를 비교 분석하여 시뮬레이션의 신뢰도를 확인하였다.

2. 비구면 렌즈 광학 설계 및 시뮬레이션

2.1 광학계 설계

MR16에 적용할 2개의 광학계 중 먼저 렌즈 타입의 광학계를 설계하였다. 본 개발 광학계는 LED에서 발생하는 광을 확산시키면서, 광균제도가 우수하게 설계하였다. 또한 렌즈의 형상은 회전대칭형 구조로 렌즈의 외부면은 연속 비구면을 사용하여 사용거리에 상관없이 광분포 변화가 없으며, Unit의 광분포 패턴이 중첩한 다중형태에서도 변화가 없다. 렌즈의 재질은 PMMA로 적용하였고, LED 소스(Source) 부분은 2 W Cool White LED 데이터를 2 × 2로 배열하여 적용하였다. Fig. 1은 광학설계 프로그램인 OSLO^[4]를 통해 설계한 비구면 렌즈의 모습이다.

비구면 설계 시 특정항이나 차수가 독립적으로 영향을 주기 보다는 각각의 항들에 대한 상호보완적인 영향이 크므로 이에 대해 고려할 필요가 있다. 비구면 설계식에서 구면곡률반경이 가장 영향이 크지만 구면과 비구면을 동일한 곡률반경에서 비교하기 위하여 곡

률반경을 고정된 설계를 수행하였다. 아래의 식은 렌즈 설계 시 사용한 비구면 설계식^[5]이다.

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

cv : Curvature (1/Radius)

k : Conic constant

as₂, as₃, as₄, as₅... : Aspheric coefficients

비구면 렌즈의 광학면은 비구면 곡률값(Radius)과 코닉상수(Conic constant) 및 비구면 표면계수(Aspheric coefficient)를 가지고 있다. 이는 LED 광원의 발산광에 대해 방사경로 및 광분포를 임의대로 자유롭게 조절할 수 있음을 나타내는 것이며, 비구면에 의한 자유도를 높일 수 있다.

2.2 조명 시뮬레이션

조명 시뮬레이션은 미국의 ORA (Optical Research Association)사의 라이트툴스(Light Tools)^[6]를 사용하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같고, 설계 비구면 렌즈는 MR16의 크기에 맞추어 4매의 비구면 렌즈를 1 시트로 사출성을 고려하여 재설계하였다. Fig. 2는 라이트툴스를 사용하여 조명의 광선을 추적한 그림이다.

Fig. 3은 3 m × 3 m 크기의 일정 조사면에 비친 조도분포도로,

Table 1 Simulation conditions

Condition	Value
Lens material	PMMA
LED flux	lumen
Lens transmittance	100%
Receiver distance	1.2 m
Receiver size	3 m × 3 m

Fig. 1 Optics design (OSLO)

Fig. 2 Lighting simulation

Fig. 3 Illuminance chart

Fig. 4 Light distribution graph

Fig. 5 RGB chart

방사되는 광선 경로를 직교좌표 형태로 나타내었다. 그림과 같이 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 의 면적에 면적당 동일한 에너지가 분포되면서 평균 200 Lux 이상으로 광균제도가 우수한 것을 확인하였다.

Fig. 4는 비구면 렌즈의 배광곡선을 나타낸 방사패턴 그래프로서 광이 확산되면서 중심광이 약해진 것을 알 수 있다. 방사각은 $50^\circ \sim 55^\circ$ 이다.

Fig. 5는 비구면 렌즈에서 발생하는 광 분포의 RGB chart를 나타낸 것으로 실제 조사면의 광원의 형태를 예측할 수 있다. Chart와 같이 고루 빛이 퍼지면서 황색 패턴이 제거 된 것을 확인하였다.

3. 비구면 반사체 설계 및 시뮬레이션

3.1 비구면 반사체 설계

앞서 비구면 렌즈 타입과 다르게 비구면 반사체를 이용하여 MR16의 광균제도를 향상시키기 위한 연구를 진행하였다. 반사체 설계는 라이트툴스의 Ray-Tracing을 이용하여 시뮬레이션 결과를 검토하면서 형상을 찾아 나갔다.

시뮬레이션은 Table 2의 조건으로 실시하였으며, 반사체의 재질은 알루미늄으로 설정하였다.

초기에 Fig. 6(a)와 같이 비구면 반사체를 설계하여 시뮬레이션한 결과, Fig. 6(b)와 같이 황색 패턴이 발생하고, 이에 광효율이 저하하였다.

반사체의 황색 패턴을 개선하기 위하여 반사체 면에 패턴을 넣어 보기로 했다. Fig 7과 같이 반사표면에 3가지의 패턴을 구성하여

Table 2 Simulation conditions

Condition	Value
LED flux	lumen
Lens transmittance	100%
Reflector reflectance	87%
Receiver distance	1.2 m
Receiver size	$3\text{ m} \times 3\text{ m}$
Ray quantity	50,000,000

(a) Optics design

(b) RGB chart

Fig. 6 Lighting simulation & RGB chart

패턴에 따른 RGB chart를 비교하였다. (a)는 깊이 0.5 mm의 교차형 패턴이고, (b)는 중심점을 기준으로 대칭의 Dot 무늬 패턴, (c)는 기준축이 Y축인 원형 회전컷 패턴이다. 시뮬레이션 결과 (b)와 (c)는 각각 황색 띠와 황색 패턴이 발생하였고, (a)와 같은 교차형 패턴만이 중앙부의 암부부위에 광이 확산되며 황색 패턴이 제거되었다.

3.2 비구면 반사체 시뮬레이션

Fig. 7의 (a)의 패턴은 내벽에는 산과 골의 굴곡을 갖는 사인파형의 파동이 전체면적에 걸쳐 일정 간격을 두고 수평방향과 수직방향으로 교차되게 배열되도록 패턴화시킨 삼각함수형의 교차 파동 패턴부(Trigonometric cross-wave pattern part)로 이러한 패턴은 LED 패키지가 기본적으로 갖는 불연속의 칩 배열구조에 따른 자체 불완전한 조명 특성을 보완하도록 빛을 제어하므로써 빛의 조사면에 미치는 조명효율을 개선하여 주어 빛의 조사면에 발생하는 황색 패턴을 제거하여 준다.

이러한 개발은 MR16만이 아닌 그 외에 고전력에 사용되고 있는 반사체 모델에도 적용이 가능하며 COB LED chip을 사용했을 경

(a) Pattern 1 (b) Pattern 2 (c) Pattern 3

Fig. 7 SolidWorks 3D pattern modeling & RGB chart

Fig. 8 Pattern reflector design & Simulation

Fig. 9 Light distribution graph (reflector type)

Fig. 10 Light distribution graph (reflector type)

우에는 기존 모델보다 훨씬 Compact한 상품을 제작할 수 있어 기존의 LED 조명기구의 문제점들을 보완할 수 있다. Fig. 8은 교차형 패턴 비구면 반사체 조명의 광선을 추적한 그림이다.

Fig. 9는 3 m × 3 m Receiver에 대한 조도분포도로 Fig. 4와 비교 시 전체면에 고르게 광이 확산되었다.

Fig. 10은 패턴 반사체의 배광곡선으로 Fig. 4와 비교 시 중심의 광이 상승하여 중심부의 암부가 사라졌으며 광이 고르게 확산되고 있음을 알 수 있다. 광이 확산된 만큼 방사각 또한 55°~60°로 비구면 렌즈 타입의 MR16보다 약 5°정도 넓어졌다.

4. 실험 방법

앞서 설계한 광학계는 조명 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인한 후에 시제품을 제작하여 조명 시뮬레이션 데이터와 시제품 측정 데이터를 비교해야 한다. 이러한 과정을 통해 조명 시뮬레이션 데이터의 신뢰성을 확보하면 향후 Mock-up 및 금형 제작 시 오류를 줄임으로써 Cost 낭비를 방지할 수 있다.

Fig. 11 Integrating sphere system

Fig. 12 Goniophotometer (OPI 330)

4.1 총광속 및 광효율 측정 장비

MR16 조명 시제품의 총광속 및 광효율 측정은 Fig. 11의 적분구(Integrating sphere system, PSI LF-10)^[7]를 사용하여 측정하였다. 적분구는 LED 단품이나 모듈 상태에서 구동전류, 온도, 구동방식(Pulse Width Modulation)을 가변하여 이에 따른 전기광학적 특성을 평가하여 광특성, 열특성 분석, 방열효율 평가 및 광학계 설계에 응용할 수 있다.

4.2 배광 분석 장비

MR16 조명 시제품의 배광그래프는 Fig. 12의 고니오포토미터(Goniophotometer, 광전자정밀, OPI 330)^[7]를 사용하여 측정하였다. 고니오포토미터는 조명기구의 배광측정 및 전광선속 측정을 위한 배광시험기로 정밀한 각도 제어를 위해 고성능 모터와 감속기를 적용한 장비이다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 LED 선정

앞선 광학 설계 및 시뮬레이션 조건에 맞추어 LED를 선정하였다. 본 실험에 사용한 LED는 Nichia의 2 W 모델인 NCSW119T로, Fig. 13(a)는 LED 단품 사진이다. 본 연구에서는 Nichia

(a) Nichia NCSW119T

(b) 2×2 LED array

Fig. 13 Test sample LED module (NCSW119T)

Fig. 14 Making a heatsink

(a) Aspherical lens

(b) Pattern reflector

Fig. 15 Making a optics

NCSW119T를 PCB 위에 광학시뮬레이션 데이터와 같이 2 × 2 배열로 올려 Fig. 13(b)와 같은 실험용 Sample LED Module을 제작하였다.

5.2 히트싱크 선정

본 연구에서는 MR16용 히트싱크 시제품으로 알루미늄 다이캐스팅(Diecasting) 방식으로 제작한 Fig. 14를 사용하였다.

5.3 시제품 제작

Fig. 15(a)는 LED MR16 비구면 렌즈 시제품이고, Fig. 15(b)는 패턴 반사체 시제품이다. 렌즈와 반사체는 Mock-up 금형을 제작하여 사출성형으로 제작하였고, 반사체 표면에는 알루미늄 증착 코팅을 하여 표면 반사율을 높였다.

(a) Aspherical lens type (b) Pattern reflector type

Fig. 16 Prototype of LED MR16

(a) Aspherical lens type MR16

(b) Pattern reflector type MR16

Fig. 17 Comparison of light source shape

제작한 비구면 광학계와 패턴 반사체를 각각 LED Module 그리고 히트싱크와 결합하여 Fig. 16(a), Fig. 16(b)와 같이 성능 테스트용 LED MR16 시제품을 제작하였다.

5.4 LED MR16 조명 성능 측정

Fig. 17은 시제품 MR16에 전원을 넣은 후 천장에 광원을 비추본 사진이다. Fig. 17(a)와 같이 비구면 렌즈 타입의 MR16은 LED Chip 간의 빛 간섭으로 인해 시뮬레이션과는 다르게 황색

Table 3 Measurement data of LED module

TotalLum (lm)	Light Efficiency [lm/W]	Source Volt [V]	Source Current [A]	Source Watt [W]
468	105.7	12.645	0.3502	4.4278

Table 4 Measurement data of aspherical lens type MR16

TotalLum (lm)	Light Efficiency [lm/W]	Source Volt [V]	Source Current [A]	Source Watt [W]
330	77.2	12.061	0.4048	4.2770

Table 5 Measurement data of pattern reflector type MR16

TotalLum (lm)	Light Efficiency [lm/W]	Source Volt [V]	Source Current [A]	Source Watt [W]
344	79.8	12.046	0.4087	4.3086

(a) Aspherical lens type type MR16

(b) Pattern reflector type MR16

Fig. 18 Light distribution graph (Prototype of LED MR16)

패턴이 발생하였고, Fig. 17(b)와 같은 패턴 반사체 타입의 MR16은 반사체의 사인과 패턴에 의해 황색 패턴이 사라졌다.

Table 3, 4, 5는 Fig. 11의 적분구를 통해 측정된 LED Module과 MR16 조명 시제품들의 총광량 측정 Data이다.

Data에서 광효율만을 비교했을 때 비구면 광학계의 효율은 73%, 반사 패턴체의 효율은 75.5%이었다.

Fig. 18은 Fig. 12의 고니오포토미터를 사용하여 측정한 배광그래프로 측정결과로 MR16 배광 그래프는 조명 시뮬레이션 데이터인 Fig. 4, Fig. 10과 유사한 형태를 나타내었다. 방사각 또한 비구면 광학계 타입은 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$, 패턴 반사체 타입은 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 이었다.

5.5 고찰

비구면 렌즈 타입 MR16에 황색 패턴이 발생한 것은 Fig. 19와 같이 LED 광원이 렌즈를 통과시 렌즈 최외곽 부분에서 발생하는 내부 전반사 현상에 의해 최외곽의 CCT가 떨어져 황색 패턴이 육안으로 보이는 것이다.

Fig. 19 Internal reflection

Fig. 20 Aspherical lens type MR16 + pattern sheet

Fig. 21 Light source shape of aspherical lens type MR16 + pattern sheet

이러한 최외곽의 황색 패턴을 제거하기 위해 Fig. 20(a)와 같이 비구면 렌즈 LED MR16 위에 패턴 반사체에 적용하였던 교차 파동 패턴의 시트를 올려 놓고 다시 측정해 보았다. 그 결과 Fig. 19(b)와 같이 황색띠가 완전히 사라지는 것을 확인하였다. 향후 교차 파동 패턴 형태의 MR16 케이스를 제작하면 황색 패턴 문제를 해결 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 4매의 비구면 렌즈를 1 시트로 한 광학계와 패턴을 가진 반사체를 적용한 LED MR16을 개발하였다. 광학 소프트웨어를 통해 비구면 광학계를 설계하였고, 조명 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 설계 데이터의 조명성능을 예측하였다. 최종적으로 시뮬레이션 분석 데이터를 토대로 광학 시제품을 제작하고, 직접 성능을 측정하여 설계데이터와 비교 분석하였다.

그 결과 4매의 비구면 렌즈를 1 시트로 한 광학계와 패턴을 가진 반사체를 사용하고 그에 맞는 LED Module을 선정하여 실용적인 LED MR16을 제작하였다.

개발한 LED MR16 광학계의 효율을 적분구를 통해 측정한 결과 비구면 광학계의 효율이 73%, 반사 패턴체의 효율이 75.5%이었다.

개발 광학계는 비구면을 통해 효율적으로 광원을 확산시켰으나, LED 조명의 문제점인 황색 패턴을 해결하지는 못하였다. 그러나 교차 파동 패턴 시트를 이용하여 황색 패턴이 제거되는 것을 확인한 후, 교차 파동 패턴을 가진 반사체를 제작하여 효율적으로 광원을 확산시켰으며, LED 조명의 문제점인 황색 패턴 문제도 해결하였다.

본 LED MR16의 배광곡선은 시뮬레이션 분석 결과와 시제품 제작 측정 결과가 유사한 모양을 띄는 것을 확인하였다. 또한 방사각 역시 비구면 광학계 타입은 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$, 패턴 반사체 타입은 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 로 시뮬레이션 분석결과와 시제품 제작 측정 결과가 동일한 것을 확인하였다.

References

- [1] Tusty, J., Smith, S., Zamudia. C., 1990, Operation Planning Based on Cutting Process Model, Annals of the CIRP, 39 517-521.
- [2] Lee, J. S., Kim, B. S., Han, W. T., 2011, The Evaluation on Discomfort Glare according to the Area, Color Temperature and Luminance of LED Luminaires, Journal of the Architectural Institute of Korea, 27:8 271-278.

- [3] Kim, J. H., Moon, B. K., Ryu, I. H., 2012, Design of Optical System for LED Lamp using MR16, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 13:10 4725-4732.
- [4] Jeong, J. H., 2006, About OSLO, Optical Science and Technology, Korea. <http://lambdare.com/software_products/oslo>
- [5] Kim, D. J., Yoo, K. S., Hyun, D. H., 2010, An Research on Ultra Precise Polishing Manufacturing Technology of Glass for Micromini and Super Wide-Angle Aspherics Glasses Lens, *Journal of the KSMTE*, 19:2 275-281.
- [6] Synopsys, 2012, n.d, viewed 2 March 2012, <<http://www.opticalres.com/lt>>
- [7] Noh, M. J., 2012, The Study of LED Indoor Light with ID-Function, Master Thesis, Korea Polytechnic University, Republic of Korea.