

논문 22-12-7

비구면 광학계를 적용한 LED 조명의 광학성능 향상에 관한 연구(I)

A Study on Optical Efficiency Improvement of LED-lighting Adopting Aspherical Optical System(I)

이학석¹, 박종락¹, 김민재², 김혜정³, 김정호^{3a}

(Hak-Suk Lee¹, Jong-Rak Park¹, Min-Jae Kim², Hye-Jeong Kim³, Jeong-Ho Kim^{3a})

Abstract

Recently, Light Emitting Diode(LED) has many advantages in comparison with conventional light sources; low power consumption, long lifetime, and less environmental pollution. Therefore, the use of LED is increasing rapidly. In general, however, spherical lens is used in LED-lighting which cause many problems induces by optical aberration of spherical lens; low illumination, yellow belt, unpleasant feeling in human eye. As a solution of these problem, aspherical lens can be employed. This study reported the improvement of LED-lighting performance by adopting aspherical lens. From the commercial program, LightTools™, the optical problem were ensured. And then, to improve these problem, optimum aspheric form was designed using Code V™.

Key Words : Light emitting diode(LED), Aspherical lens, Aberration, Optical design

1. 서론

최근 반도체 기술의 발전으로 인해 단순표사용 소자로만 사용되던 LED(Light Emitting Diode)가 차세대 대체 조명으로 급부상하고 있다[1-3]. 이러한 배경에는 LED가 기존 조명보다 고효율, 저전력 소비, 환경친화성, 그리고 뛰어난 내구성 및 견고성 뿐만 아니라 다양한 집적화는 물론 정교한 디자인이 가능하여 빛이 필요한 다양한 분야에서 응용이 가능하기 때문이다. 또한 광색이 뚜렷하여 시인성, 색재현성이 높고 사이즈가 작아 조명을 소형화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 교도의정서 협약과 더불어 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가하면서 LED는 에너지 절감효과와 환경보전이라는 측면에서 더욱더 주목받고 있으며 미

국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 국가적인 수행과제로서 차세대 조명용 LED 광원 개발을 하고 있는 실정이다[4-6]. 이와 같이 일반 조명광원과 특수조명 등에 다목적으로 이용되는 LED 광원을 개발하기 위해서는 제품개발 전에 충분한 광학적 현상분석을 통한 개선된 광학설계가 선행되어야 한다. 특히, LED에 광학렌즈와 같은 부품을 채용할 경우 다양한 응용제품에 사용가능할 뿐 아니라 광학적 성능도 향상될 수 있다. 그러나 기존에는 구면렌즈를 사용하는 경우가 대부분으로 구면렌즈로 인한 광학수차가 발생하여 조명용 광원으로서의 광학적 성능이 저하되는 단점을 가지고 있다[7,8]. 따라서 이러한 광학수차를 개선하기 위해 비구면렌즈의 설계 및 적용이 제안되고 있다. 또한 종래의 광학렌즈를 채용한 조명용 LED의 경우 백색광 주변에 황색 띠 무늬가 생기는 현상이 발생하는데 이는 사람의 눈에 불쾌감을 주고 나아가 명확한 시인성 확보에 어려움이 발생하는 단점을 가지고 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 비구면 광학렌즈를 채용함으로써 광학렌즈의 수차로 인해 발생하는 황색 띠 무늬를 감소시키기 위한 연구 또한 활발히 진행 중에 있다.

1. 조선대학교 광기술공학과 (광주시 동구 서석동 375)
2. 전남대학교 광공학협동과정
3. 한국광기술원 초정밀광학팀
a. Corresponding Author : kimjh@kopti.re.kr
접수일자 : 2009. 10. 7
1차 심사 : 2009. 11. 4
심사완료 : 2009. 11. 18

본 연구에서는 조명용 LED 광원에 기존 구면렌즈를 사용하여 광학수차에 의해 황색 띠 무늬가 발생하는 현상을 상용 조명설계 프로그램인 LightTools™(ORA사)를 이용하여 모델링하고 광학현상을 분석한 후 상용 결상설계 프로그램인 Code V™(ORA사)로 비구면렌즈 설계를 실시하여 조명광학계에서의 비구면렌즈 설계기술 적용 및 성능개선을 위한 광학설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 조명용 백색 LED 렌즈 문제점

본 연구에서는 FAWOO TECHNOLOGY사의 조명용 백색 LED Lamp(Lumidas-H 5W)를 사용하였다. 사용된 조명용 백색 LED는 청색 LED에 황색 형광체를 첨가하여 백색광이 구현되지만 그림 1에 나타난 것과 같이 백색광 주변에 황색 띠 무늬가 나타나는 현상으로 인하여 사람의 눈에 불편감을 주고 시인성에 문제를 야기한다. 본 연구에서는 이러한 황색 띠 무늬를 감소시키기 위한 목적으로 LightTools™(ORA사)를 사용하여 황색 띠 무늬 현상을 분석하였으며, 조명용 LED 광학렌즈를 Code V™(ORA사)로 비구면 광학렌즈 설계를 수행하였다.

2.2 조명용 백색 LED 모델링

본 연구에서는 청색 LED에 황색 형광체를 첨가시켜 구현한 백색 LED 광학설계를 수행하였

다. LED 모델링은 정확한 데이터에 근거하여 설계하여야 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 각 제조 회사에서 제공하는 설계 데이터를 바탕으로 실제 제품의 구조와 크기에 유사한 조명용 LED를 설계할 수 있으나 이 설계 데이터에는 LED에 사용된 물질의 재질 특성에 대한 정보는 제공하지 않기 때문에 입력한 물질의 재질 종류, 반사율, 투과율 및 형광물질의 파장에 따라 전혀 다른 성능을 가진 LED가 모델링 될 가능성이 높아 본 연구에서는 더욱 정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서 적분구를 이용한 측정데이터를 바탕으로 조명용 LED 모델링을 실시하였다. 적분구 측정 결과를 광학 시뮬레이션에 사용하였으며 측정 광원으로 부터 중심파장이 455 nm, 선폭 (FWHM)이 29 nm인 청색파장을 선택하였다[9-11]. 황색 YAG 형광체는 실리콘 물질(굴절률 N=1.5)에 형광체 특성을 입력하였으며 여기스펙트럼, 방출스펙트럼, 흡수스펙트럼 및 Mie 이론을 기초로 한 각각의 특성을 사용하였다[12]. 형광체(굴절률 N=1.8)는 입자 밀도 $1.00 \times 10^6 \text{ 1/mm}^3$, 인광 평균 자유 경로 0.03 mm, 입자크기 반경 500 nm를 적용하였으며 LightTools™(ORA사)에서 기본적으로 제공하는 특성치를 입력하였다. 본 연구에서 기존 구면렌즈를 채용한 조명용 LED의 휘도를 적분구를 사용하여 측정한 결과 261 lm으로 나타났으며, LightTools™(ORA사) 모델링을 통한 시뮬레이션 상에서 휘도를 측정한 결과 260.98 lm으로 나타났다.

그림 2는 조명용 LED 휘도 측정을 위한 적분구와 시뮬레이션 상에서 적분구 역할을 하는 Far Field Receiver를 각각 나타내며, 그림 3은 시뮬레이션에 사용된 LED의 스펙트럼을 나타낸다. 이러한 결과는 실제 샘플에 대해 측정된 적분구 휘도 값과 LightTools™(ORA사) 모델링 실시 후 시뮬

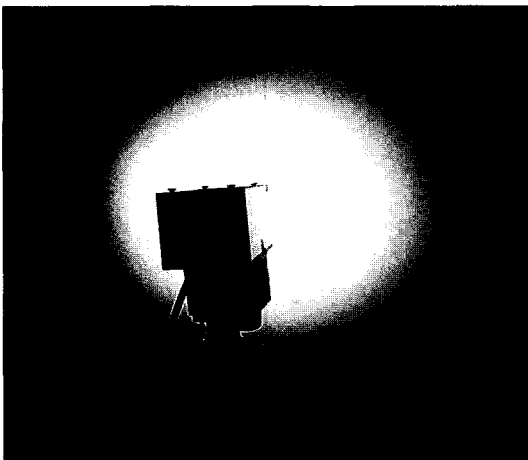


그림 1. LED 조명의 황색 띠 무늬.
Fig. 1. Yellow belt of LED-lighting.

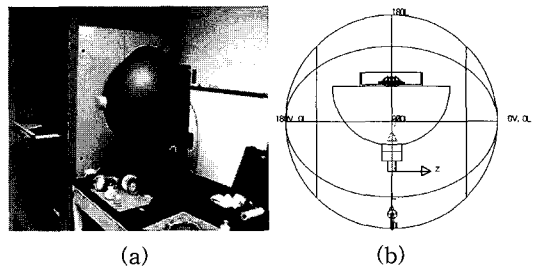


그림 2. (a) 적분구 (b) Far field receiver.
Fig. 2. (a) Integrating sphere system
(b) Far field receiver.

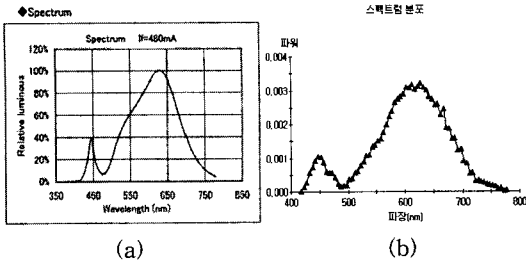


그림 3. LED 스펙트럼 (a) Citizen electronics 스펙트럼 (b) LightTools™의 스펙트럼.

Fig. 3. LED spectrum (a) Spectrum of citizen electronics (b) Spectrum of LightTools™

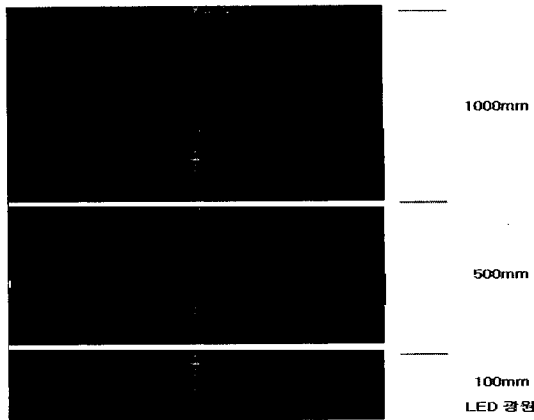


그림 4. 스크린 위치.

Fig. 4. Position of screen.

레이션 휘도값의 일치됨을 확인할 수 있었으며, 본 연구를 수행함에 있어 시뮬레이션 신뢰성을 확인할 수 있는 결과로 생각된다.

또한 그림 4는 조명용 LED의 분석을 위한 스크린의 위치를 나타내며 각 위치별로 LED 조명의 특성을 광학적으로 분석하기 위해 광원으로부터 100 mm, 500 mm, 1000 mm 거리를 두고 시뮬레이션을 실시하였으며 각각의 위치별 Receiver의 비교 분석을 통해 황색 띠 무늬에 대한 개선 정도와 조도값의 변화를 확인할 수 있었다.

2.3 조명용 LED 렌즈 비구면설계

본 연구에서 조명용 LED에 사용된 광학렌즈는 플라스틱 소재중 하나인 광학용 Polycarbonate를 사용하였다. 광학용 Polycarbonate는 일반 플라스틱 소재보다 광확산성이 뛰어나며 열에 강한 특성을

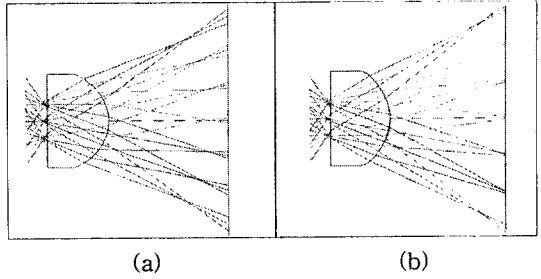


그림 5. 광학설계 (a) 구면렌즈 (b) 비구면렌즈.

Fig. 5. Optical design

(a) Spherical lens (b) Aspherical lens.

가지고 있어서 일반적으로 조명용 광학렌즈 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서도 광학용 Polycarbonate 소재를 적용하여 비구면 광학설계를 수행하였다. 한편, 비구면 광학설계 시 고려할 사항으로 광학렌즈 크기에 대한 검토가 필요한 바, 본 연구에서는 조명용 LED 광학렌즈 치구의 전체 지름이 $\Phi 28$ mm 인 조명용 LED Lamp를 사용하였으며 기존 곡률반경 7 mm인 구면렌즈를 곡률반경 11 mm까지 0.5 mm단위로 증가시키며 시뮬레이션을 각각 수행하였다. 시뮬레이션 결과 곡률반경 8.5 mm의 광학렌즈를 채용한 경우에서 조명용 LED 조도가 가장 높은 값을 가짐을 알 수 있었고, 이러한 결과를 토대로 구면렌즈 곡률반경과 동일한 곡률반경 8.5 mm의 비구면렌즈 설계를 수행하였다. 비구면렌즈 설계는 결상용 광학설계 프로그램인 Code V™(ORA사)를 이용하였다. 본 연구에서의 파장은 기본적으로 사용되는 450 nm, 550 nm, 650 nm를 각각 사용하였고 화각은 0°에서 $\pm 60^\circ$ 까지 15°간격으로 입력하였다. 대부분의 LED는 $\pm 90^\circ$ 전방으로 모두 방출되며 대부분 편측 60°이상의 광량이 전체 광량에서 차지하는 비율은 2~3%에 불과하므로 실제의 용이성을 위해 전체화각은 $\pm 60^\circ$ 까지만 고려하여 설계하였다. 그림 5는 결상용 광학설계 프로그램인 Code V™ (ORA사)를 이용하여 곡률반경 8.5 mm인 구면렌즈와 비구면렌즈에 관한 광학설계를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기존 구면렌즈의 곡률반경 값을 변경하여 시뮬레이션을 수행 후 높은 조도를 가지는 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm를 구하고 이와 동일한 곡률반경을 갖는 비구면렌즈를 적용하여 조도향상 및 황색 띠 무늬 현상을 동시에 개선하고자 하였다.

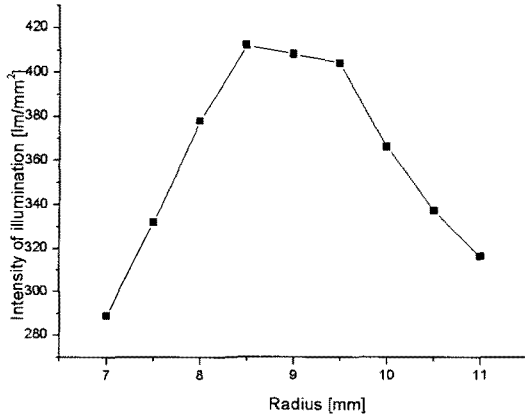


그림 6. 구면렌즈 반지름 변화에 따른 조도.

Fig. 6. Illumination of spherical lens radius change.

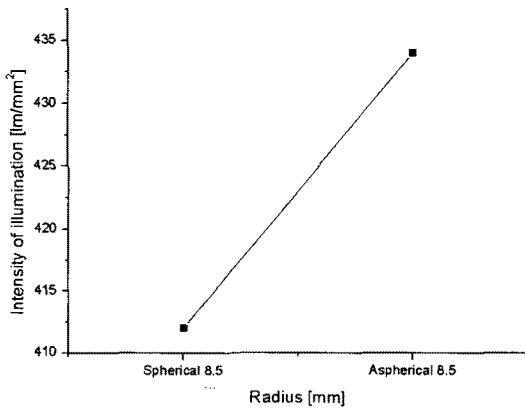


그림 7. 구면렌즈와 비구면렌즈의 조도 비교.

Fig. 7. Illumination comparison of spherical lens and aspherical lens.

그림 6은 구면렌즈의 경우 곡률반경 7 mm에서 곡률반경 11 mm까지 0.5 mm단위로 증가시키면서 시뮬레이션을 수행한 후의 조도 값을 나타낸다. 그림 6에 나타난 것과 같이 1000 mm위치에서 시뮬레이션을 통해 조도를 측정할 결과 렌즈의 곡률반경 변화에 따라 조도 변화가 크게 나타났으며 곡률반경 8.5 mm에서 최대조도 412 lm/m²를 가짐을 알 수 있었다.

그림 7은 1000 mm에서 시뮬레이션을 통한 동일한 곡률반경에서의 구면렌즈와 비구면렌즈의 조도를 비교 측정할 결과로써 구면렌즈 412 lm/m², 비구면

표 1. 비구면 설계 및 계수식.

Table 1. Aspherical design and a coefficient form.

비구면렌즈	Radius 8.5 mm
Conic Constant	-7.86e-005
4차	-0.0004
6차	+1.0691e-005
8차	-2.3616e-007
10차	+2.4186e-009

렌즈 434 lm/m²로 비구면렌즈 적용을 통해 조도가 향상됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 비구면렌즈 적용시 렌즈의 주변부에 퍼져나가는 광보다 중심부에 집중되는 광이 많기 때문으로 사료되며 따라서 단위면적에 들어오는 광의 전체적인 균일도가 향상되기 때문으로 생각된다.

한편, 본 연구에서 비구면렌즈 광학설계에 사용된 비구면설계식과 각 차수 별로의 비구면계수를 표 1에 나타낸다. 비구면설계시 특정항이나 차수가 독립적으로 영향을 주기 보다는 각각의 항들에 대한 상호보완적인 영향이 크므로 이에 대한 고려가 필요하다. 비구면설계식에서 구면곡률반경이 가장 영향이 크지만 구면과 비구면을 동일한 곡률반경에서 비교하기 위하여 곡률반경은 고정하여 설계를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 비구면에 영향을 주는 계수들을 고려하여 설계를 실시하였으며, Conic constant가 렌즈의 형태를 결정하고 비구면 계수가 수차 개선에 영향을 주기 때문에 이를 고려한 설계를 수행하였다.

$$Z = \frac{C \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot C^2 \cdot x^2}} + \sum_{i=1}^n A_i \cdot x^i$$

여기서 Z은 x축에 수직인 면의 새그(sag) 값, K는 코닉상수(conic constant), C는 1/R의 기본곡률 값을 나타내며, R은 기본반경, A_i는 비구면 계수이다.

한편, 그림 8에 구면렌즈와 비구면렌즈의 수차에 의해 황색 띠 무늬가 나타나는 현상을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하여 나타낸다. 구면렌즈에서는 빛이 균일하게 분포하지 못하여 중심의 백색 광 주변에 황색 띠 무늬가 나타남을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 현상을 개선하고자 비구면 광학설계를 실시 하였으며 그 결과, 비구면렌즈에서 주변부의 황색 띠 무늬가 구면렌즈에 비해 적게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 시뮬레

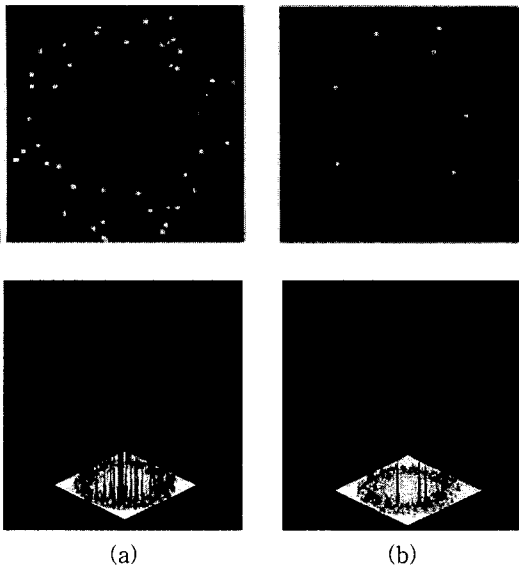


그림 8. 색온도 (a) 구면렌즈 (b) 비구면렌즈.
 Fig. 8. Correlated color temperature (a) Spherical lens (b) Aspherical lens.

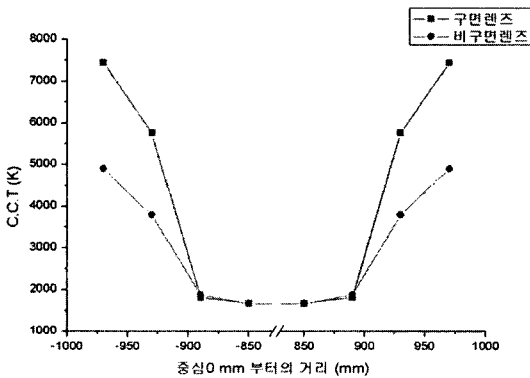


그림 9. 중심으로부터 변화된 CCT 값.
 Fig. 9. CCT value of Aspheric Lens.

이선 결과로부터 주변부에 황색 띠 무늬가 나타나는 현상은 중심부보다 주변부 광량이 부족하기 때문에 나타난다고 보여지며 비구면렌즈의 적용으로 인해 구면렌즈의 경우에 비하여 Focusing 면적이 더욱더 좁아지게 되어 각각의 각도별로 빛이 균일하게 분포하기 때문에 황색 띠 무늬가 개선되었던 것으로 이해된다.

그림 9는 중심부 0 mm를 기준으로 좌우 ±1000 mm의 황색 띠 무늬 값을 나타낸다. 구면렌즈의

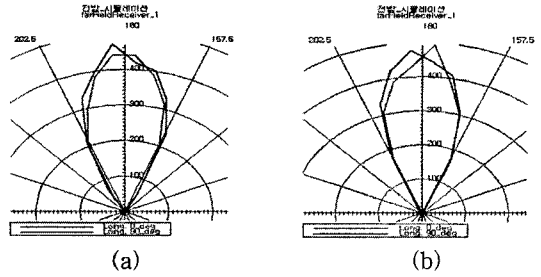


그림 10. 배광분포 (a) 구면렌즈 (b) 비구면렌즈.
 Fig. 10. Radiation pattern. (a) Spherical lens (b) Aspherical lens.

경우 ±950 mm에서 CCT가 약 7800 K 비구면렌즈의 경우 ±950 mm에서 약 4900 K 정도가 나왔으며 CCT값을 비교해 볼 때 비구면렌즈 적용시 주변부와 중심부의 CCT 값 균일도가 향상됨을 알 수 있었다.

그림 10은 조명용 LED 광학렌즈 배광분포 (Radiation Pattern)를 보여 주고 있으며 배광분포는 약 45°정도임을 알 수 있다. 이는 다운 라이트, 스포트 라이트, 투광등의 확산 조명용으로 실제 적용되어지고 있는 배광분포로서 쓰이고 있으며 LED 조명 광학계에 비구면렌즈를 대체 적용할 수 있는 분야에 본 연구 결과의 응용이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 FAWOO TECHNOLOGY사의 조명용 백색 LED Lamp(Lumidas-H 5W)와 동일한 광학적 특성을 갖는 모델을 제조회사의 설계데이터에 기초하여 광학설계를 수행하였으며 조명용 LED에 사용되는 구면렌즈와 비구면렌즈가 조명계에 미치는 영향을 비교 분석하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 선행 연구를 위하여 기존 구면렌즈 곡률반경 7 mm에서 곡률반경 11 mm까지 0.5 mm단위로 증가시켜 가면서 조도를 비교 분석하였고, 그 중 가장 조도가 상대적으로 높게 나온 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm를 이용하여 황색 띠 무늬 현상을 확인한 후 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm와 동일한 곡률반경을 갖는 비구면렌즈 광학설계를 실시하여 비구면렌즈가 조도 및 황색 띠 무늬에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

시뮬레이션을 통하여 설계한 조명용 LED 렌즈의 광학적 특성을 분석한 결과 기존 구면렌즈 곡률반경 7 mm에서 289 lm/m²에 비해 시뮬레이션을 통한

구면렌즈 곡률반경 8.5 mm에서 412 lm/m²로 렌즈의 곡률반경에 의해 조명계 조도가 향상됨을 알 수 있었다. 또한 곡률반경 8.5 mm와 동일한 조건에서의 구면렌즈와 비구면 렌즈를 비교한 결과 412 lm/m², 434 lm/m²인 결과로부터 구면렌즈보다 비구면렌즈를 채용시 LED 조명이 더 향상된 조도값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 광학수차에 의한 황색 띠 무늬 현상은 구면렌즈에서 많이 발생하였으며 이는 구면렌즈에 백색광 투과시 렌즈 중심부보다 주변부의 빛의 분포가 고르지 못해 발생하는 것으로 사료된다. 이러한 황색 띠 무늬를 개선하기 위하여 비구면 광학설계를 적용함으로써 실제 시뮬레이션 결과 황색 띠 무늬가 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

이상의 연구 결과를 통하여 광학렌즈의 곡률반경과 형태가 조명용 LED에 중요한 영향을 미침을 알 수 있었으며 조명용 LED에 구면렌즈 대신 비구면렌즈를 제작하여 적용할 시 조명용 LED Lamp의 광학적 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] 김덕규, 유인성, 박춘배, "In-situ SiN 박막을 이용하여 성장한 GaN 박막 및 LED 소자 특성 연구", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 945, 2005.
[2] S. J. Lee and J. C. Lee, "Design and evaluation of LCD backlight unit by LED array modules", Trans. Electr. Electron. Mater., Vol. 9, No. 3, p. 110, 2008.
[3] 공명국, 김도우, "저항 네트워크 모델을 통한

LED 설계", 전기전자재료학회논문지, 21권, 1호, p. 73, 2008.

[4] D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, and M. J. Ludowise, Member, IEEE, P. S. Martin, and S. L. Rudaz, "Illumination with solid state lighting technology", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No. 2, p. 310, 2002.
[5] G. Harbers and C. Hoelen, "LP.2: High Performance LCD Backlighting using High Intensity Red, Green and Blue LED", Society for Information Display (SID) International Symposium 2001: Digest of Technology Paper, 2001.
[6] 한정아, 김종태, "고출력 LED 모델링 및 광학적 분석", 한국광학회지, 18권, 2호, p. 111, 2007.
[7] 박재덕, 김수용, 한민식, 전언찬, "LED 균일면광원 비구면렌즈 설계", 한국광학회학회논문집, p. 299, 2007.
[8] 김주환, 정미숙, 김성우, "비구면 설계를 위한 자동설계프로그램 활용", 한국기계가공학회지, 6권, 3호, p. 3, 2007.
[9] LightTools Seminar Notes, "LED Modeling Pros and Cons of Various Approaches", ORA, 2001.
[10] LightTools Seminar Notes, "Illumination Module Seminar", ORA, 2000.
[11] A. Davis, "Microstructured Optics for LED Applications", Reflexite Display Optics, Technical Paper, p. 18, 2002.
[12] W. Brown, "Dynamic Light Scattering :The Methods and Some Application", Clarendon Press, Oxford, p. 177, 1993.