

중첩모델을 이용한 조명용 LED 렌즈설계 및 분석

유일현*

The design and the analysis of a LED illumination lens using the overlapped model

Ilhyun You*

Department of Information Communication Technology, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

요 약

본 연구는 균일한 조명을 얻기 위해 중첩 조명 모델(overlapped illumination model)을 사용하여 자유 형상 렌즈(freeform lens)를 제작하였으며, 제작한 LED 렌즈들의 특성을 비교 분석하였다. 제작한 렌즈는 LED 광원의 위치 변화, 두께 및 기울임을 이용해 성능을 평가하였다. 아울러 조명영역은 평균 조도(average illuminance)와 조도 균일도(illuminance uniformity) 변화 값으로 측정하였다. 광도 분포의 Z축 방향변화에 대해서는 중첩 모델과 발산 모델이 대체로 비슷한 공차 특성을 보였으나, 렌즈두께 변화에 대해서는 중첩모델이 발산모델에 비해 조도 균일도 공차 특성은 현저히 개선됨을 확인하였다. 또한, 발산 조명 모델로 설계된 렌즈가 전반적으로 좋은 성능을 나타냈으나, LED 방출에 대한 성능은 중첩 모델에서 그 편차의 폭이 상대적으로 적게 나타났다.

ABSTRACT

In this research, the overlapped illumination model was used for designing a freeform LED lens with a uniform illuminance distribution on its illuminating plane, and their performances and tolerances were compared. And, the illuminations on a illumination plane was measures for change with average illuminance and illuminance uniformity. As a result of the tolerance analysis about z-axis direction change, thickness change in lens and tilt change of light emission and characteristic change in LED source, overlapped model and divergent illumination model are similar to the performance about Z-axis direction change of light emission in LED source. but the uniformity illumination value in this overlapped model is more remarkably value than it in divergent illumination model about thickness change in LED lens. Also, even though the lens based on a divergent illumination model showed good performance compare to the lens based on an overlapped illumination model, the latter was less the deviation to variation of LED beam radiation ability.

키워드 : 중첩모델, 자유 형상 렌즈, LED 렌즈, 균일조도, 반치각

Key word : Overlapped illumination model, Freeform Lens, LED lens, Uniform illuminance, half angle

Received 07 July 2016, Revised 19 July 2016, Accepted 05 August 2016

* Corresponding Author Ilhyun You(E-mail:ihyou@semyung.ac.kr, Tel+82-43-649-1292)

Department of Information Communication Technology, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2017.21.1.157>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

광학 소자의 성능 향상과 함께 LED(Light emitting diode)소자는 정보기기 분야뿐만 아니라 일반 조명 분야에도 그 활용되고 있으며, 특히 LED의 에너지 절감 효과와 친환경적인 특징으로 인해 기존 조명 대체에 대한 기대가 매우 높다[1].

그러나 LED 소자의 광분포는 지향성을 갖고 있기 때문에 LED소자를 이용한 조명 제품들이 원하는 조명 성능을 얻기 위해서는 광학 소자 사용이 필요하다. 이에 더불어 LED 조명제품 들의 낮은 가격에 부응하여 광학 소자의 단순화 및 고성능화에 대한 요구 수준이 점차 높아지고 있다. 따라서 광학 소자의 단순화는 복잡한 광학 소자 사용으로 인한 광효율 저하와 정렬문제를 극복하는데 매우 중요한 요소이기도 하다[2].

이런 문제점을 극복하고자 단일 광학 소자인 자유 형상 렌즈(Freeform lens)를 2차 광학 소자로 활용하는 방안이 제안되었으며[3], 설계법 연구도 활발히 진행되고 있다[4,5].

자유 형상 렌즈 설계에서는 광원의 방출 특성과 조명 면에서의 조도를 고려하여, 렌즈 입사면 또는 출사면 상의 표면 기울기(혹은 법선 벡터)를 굴절 혹은 반사 법칙에 따라 직접 결정한 후, 해당 표면 기울기를 갖는 면 요소를 연결하여 렌즈의 최종 형상을 결정하게 된다. 그러므로, 자유 형상렌즈는 구면 혹은 비구면 형태를 갖는다. 대부분의 경우, 광학 소자는 조명면에 균일 조도(illuminance) 분포를 이루기 위해 사용되므로, 균일 조도 분포를 이루기 위한 설계 조건은 수렴 조명 모델(Convergent illumination model)이나 발산 조명 모델(Divergent illumination model)에 의해 규정된다[6]. 그러나, 자유 형상 렌즈는 광원 특성에 맞춰 형상이 최적화되기 때문에, LED 광원의 방출 특성이나 위치 등이 설계 조건으로부터 벗어날 경우에는 일반 렌즈에 비해 성능 저하가 더욱 클 수 있다.

본 연구는 중첩 조명 모델을 이용하여, 세 종류 자유 형상 렌즈를 설계하고, 그 렌즈의 성능과 특성을 분석하였다. 특히 광원의 기울기와 렌즈의 위치변화와 렌즈의 두께변화에 대한 조도값과 평균 조도값을 수치 해석적으로 각각 계산하였다.

II. 자유 형상 렌즈 설계 이론

본 연구에서 채택한 자유 형상 렌즈 외관은 평탄한 입사면과 비구면 형태의 곡선 모양을 갖는 출사면으로 구성되도록 제작한 광학 소자이며, 출사면이 자유 형상면(freeform surface) 형태를 갖고 있으며, 이는 미리 계산에 의해 계획된 형태이며, 그림 1에 개략적인 형상을 나타내었다.

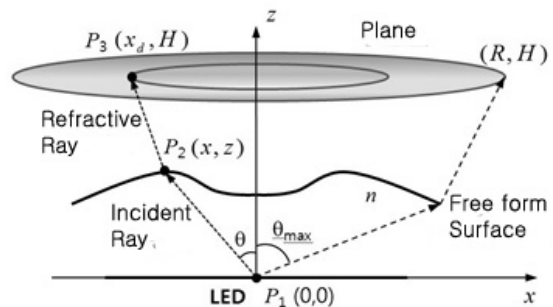


Fig. 1 Conceptual diagram of a freeform lens

그림 1에 보인 것처럼 입사면은 평면이며 LED광원이 입사면 상의 한 점 P_1 에 위치한다면, 수직축 (z 축)에 대해 각도 θ 방향으로 LED로부터 방출된 빛은 렌즈 내부를 진행한 후 출사면의 점 $P_2(x, z)$ 에 도달한다. 이때 출사면에 도달한 광선은 굴절에 의해 위치한 조명면의 한 점 $P_3(x_d, H)$ 에 최종적으로 도달하게 된다.

그림 1과 같은 경우에 있어서 자유 형상 렌즈 설계 절차는 여러 방향의 방출 광선에 대해 점 $P_2(x, z)$ 의 좌표를 찾는 과정을 거친 후, 방출된 광선들이 굴절 후 조명면 상에 도달시킬 임의 지점을 결정하면, 자유 형상 면을 구성할 수 있게 된다. 아울러 방출 광선과 도달점의 관계로부터 점 P_2 에 대한 입사 및 굴절이 정의되며, 이들 입사와 굴절된 광선은 굴절 법칙(Snell's law)을 만족해야 하므로, 출사면 위의 점 P_2 를 포함하는 면 요소(surface element)의 곡면 기울기(dz/dx)를 결정할 수 있다.

이때, LED광원이 놓인 위치(P_1)를 좌표계 원점이라고 하고, 조명 영역이 회전 대칭성을 갖는 반경 R 인 원형이므로, 자유 형상렌즈의 설계이론 으로부터 곡면기울기는 다음과 같다[6-9].

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\left[n \frac{x}{\sqrt{x^2+z^2}} - \frac{x_d-x}{\sqrt{(x_d-x)^2+(H-z)^2}} \right]}{\left[\frac{H-z}{\sqrt{(x_d-x)^2+(H-z)^2}} - n \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}} \right]} \quad (1)$$

식(1)은 출사면 위의 점 P₂를 포함하는 면 요소의 곡면 기울기를 직교 좌표 형식으로 표현한 미분 방정식이며, H=z축 좌표, n은 렌즈 굴절률을 각각 의미한다. 만일 방출 광선과 도달점의 관계가 주어진다면, Runge-Kutta 알고리즘과 같은 수치해석적 방법을 활용하여 식(1)의 곡면 기울기로부터 출사면 형상을 결정할 수 있다[10]. 그러나, 수치 해석적 오차를 줄이기 위해 면 요소의 곡면기울기를 극 좌표 형식으로 표현하는 것이 편리하다.

식(2)은 곡면의 기울기를 나타낸다.

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r(x_d \cos\theta - H \sin\theta) / \sqrt{x_d^2 + H^2 + r^2 - 2r(x_d \sin\theta + \cos\theta)}}{n - (x_d \sin\theta + H \cos\theta - r) / \sqrt{x_d^2 + H^2 + r^2 - 2r(x_d \sin\theta + \cos\theta)}} \quad (2)$$

여기서 r은 광원으로부터 출사면 위의 점 P₂까지의 거리, θ는 방출 광선의 진행 각도, x_d는 조명영역 반지름이며,

$$x_d^2 = R^2 \frac{1 - \cos^{m+1}\theta}{1 - \cos^{m+1}\theta_s} \quad (3)$$

로 표현된다[11,12].

III. 중첩 모델

자유 형상렌즈 설계에 있어서 주된 목적은 LED에서 방출된 빛(light beam)을 적절히 조절하여 조명 조건에 정확히 맞추는 것이다. 따라서, 광원 특성이나 배치가 설계 조건으로 부터 벗어날 경우 성능이 다소 미흡한 것은 피할 수 없다. 그러므로 광원 특성이나 배치를 설계조건에 맞추면서, 균일 조도 조건을 얻을 수 있는 조명 모델을 사용하여 렌즈를 설계하였다.

그림 2는 본 연구에서 균일한 조도를 얻기 위해 이용한 중첩 모델 방법이다.

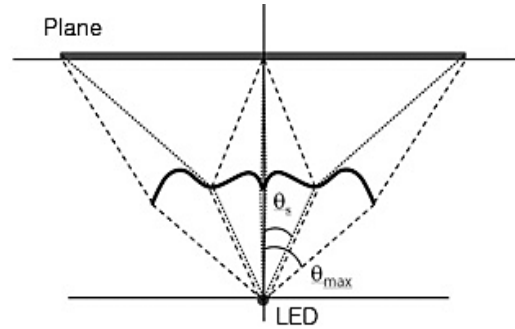


Fig. 2 Overlapped illumination model for forming a uniform illumination on an illuminating plane

그림 2에 나타냈듯이 중첩 조명 모델에 대한 균일 조도 조건은 두 가지 광선 그룹에 대해 각각 정의되며, 방출각 범위가 0~θ_S인 첫 번째 광선 그룹에 대한 균일한 조도 조건은 식(3)으로부터,

$$x_d^2 = R^2 \frac{1 - \cos^{m+1}\theta}{1 - \cos^{m+1}\theta_s} \quad (4)$$

이며, 범위가 θ_S~θ_{max}인 두 번째 광선 그룹에 대한 균일한 조도 조건은 다음과 같다[12].

$$x_d^2 = R^2 \frac{\cos^{m+1}\theta_s - \cos^{m+1}\theta}{\cos^{m+1}\theta_s - \cos^{m+1}\theta_{max}} \quad (5)$$

IV. 자유 형상렌즈 설계

본 연구에서는 균일한 조도를 얻기 위해 기존의 조명 모델을 기반으로 세 가지 자유 형상렌즈를 설계하였다. 그러나 기존 조명모델인 수렴 조명모델은 조명조건에 따라 자유형상면을 정의할 수 없는 경우가 있어서, 발산모델을 이용한 중첩모델을 사용하여 렌즈를 설계하였다.

렌즈 1과 렌즈 2는 발산 모델을 적용하여 제작했으며, 높이는 각각 7.00mm, 14.00mm이며, 반경은 각각 9.54mm 20.61mm이다. 또한, 중첩모델을 적용한 렌즈 3의 높이와 반경은 각각 7.00mm와 대략 9.08mm이다. 그리고, 자유 형상 렌즈 설계를 위해 LED 광원은 좌표

계 원점에 두고, 점광원으로 간주하였다. 또한, LED 광원의 반치각($\theta_{1/2}$)은 30o로 설정하였으며, 최대 방출각 θ_{max} 를 60o로 제한하였다. 또한, 조명면의 높이(H)는 좌표계 원점을 기준으로 40mm이며, 조명면 영역은 반경(R)이 60mm인 원으로 하였다. 이와 같은 조건들을 기준으로 계산된 자유 형상 면의 단면을 Z축에 대해 회전시켜, 설계 및 제작했으며, 자유 형상렌즈는 3차원 형상으로 제작한다. 렌즈의 개략적인 형상을 그림 3에 도시하였다.

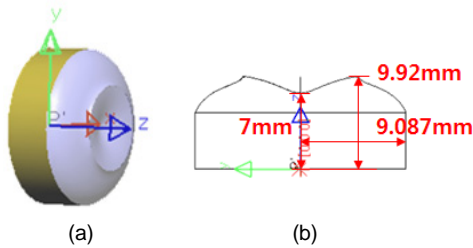


Fig. 3 The shape(a) and the schematic diagram(b) of the freeform lens

제작한 자유 형상 렌즈의 조명성능을 분석하기 위해 상용 프로그램인 LightTools™를 활용하여 조명면의 조도 분포를 계산하였으며, 이때 검출기 크기는 조명면 면적의 대략 2배정도인 $\approx 160 \times 160 \text{mm}^2$ 이고, 검출기는 50x50개 pixel이다.

아울러 광선 갯수는 100,000개, LED 광원의 선속은 679.55lm으로 설정하였다. 계산된 조도 분포로부터 조명성능을 정량화하기 위한 평균 조도(Average illuminance: E_{avg}), 평균 균일도 및 표준 균일도 (U_{av} , U_{sd})를 각각 정의한다[13,14].

$$E_{avg} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i \quad (6)$$

$$U_{av} = \frac{E_{min}}{E_{max}} \times 100\% \quad (7)$$

$$U_{sd} = \left[1 - E_{avg} \sqrt{\frac{\sum_i (E_i - E_{avg})^2}{M}} \right] \times 100\% \quad (8)$$

여기서, M은 검출기 전체 영역 중에서 조명 영역에 속하는 pixel들의 총 개수, E_i 는 이들 pixel에서의 조도

이다. E_{min} 와 E_{max} 는 조명 영역에 속하는 pixel들의 조도 중에서 최소치와 최대치를 의미하며, 식(11)와 식(12)는 조명 영역 내의 특정한 위치에서 조도 분포의 국부적인 값과 조도 분포의 표준편차로 정의된 값을 각각 나타낸다[15-17].

V. 조도 특성 및 분석

LED 패키지 공정 과정에서 개별 LED 칩의 방출 특성과 LED의 배치 조건이 달라질 수 있다. 따라서, 설계한 렌즈의 조도 특성 및 성능 분석은 LED 광원의 방출과 관련 있는 렌즈 두께, 높이 및 z축과 기울어진 각도에 따른 성능변화를 측정하였다. 측정에 사용된 변수들을 표 1에 나타내었다.

Table. 1 The parameters of tolerance characteristics for the designed free form lens

Section Item	Initial	Interval	Final
Direction (z)	-0.5 mm	0.25 mm	0.5 mm
Thickness (d)	0.0 mm	0.05 mm	0.2 mm
Tilt (deg)	0.0°	0.5°	2°

표 1에 나타낸 바와 같이 3가지 변수에 대해 렌즈 허용범위 특성을 측정하였으며, 이들 변수 중 위치변화에 대해 측정된 조도분포를 그림 4에 나타냈다.

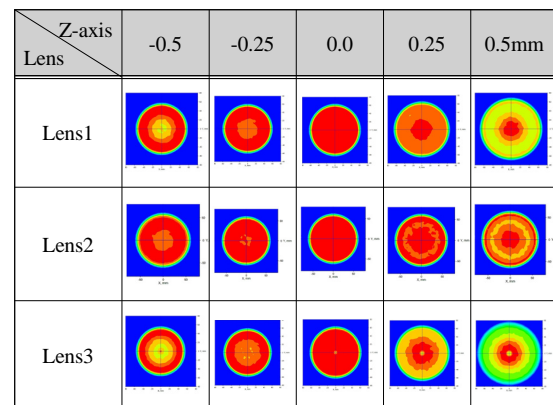
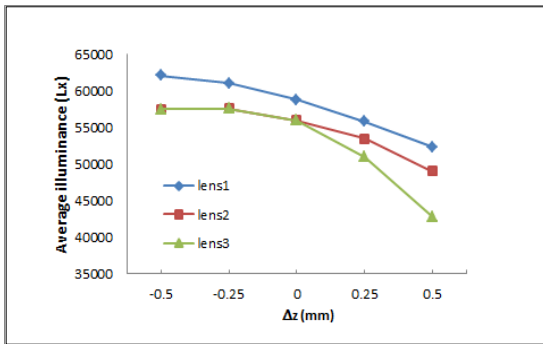
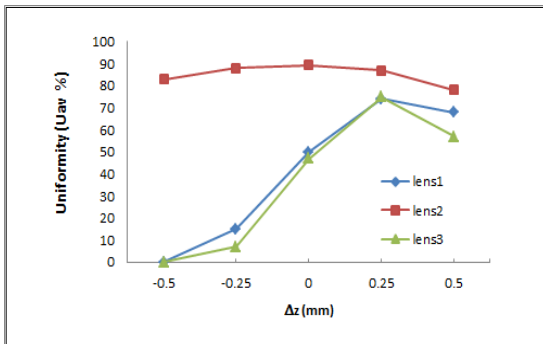


Fig. 4 The illuminance distribution for the lens depending on alignment for the Z-axis of LED source.

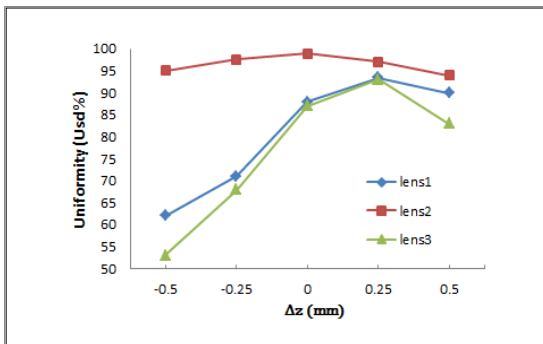
그림에서 보듯이, 3가지 렌즈 모두 광원에 대한 조도 특성은 0mm를 기준으로 명암이 교차되는 결과를 얻었다. Lens 1 경우, 0.25mm 위치에서는 조도가 중심부는 밝지만 주변부는 조금 어두운 특성을 보였으며, -0.25mm 위치에서는 조도가 주변부가 중심부보다 상대적으로 밝은 특성을 확인하였다.



(a) Average illumination



(b) Uniformity (Uavg)



(c) Uniformity (Usd)

Fig. 5 Variation of average illumination(a) and uniformity (b, c) for the lens depending on Δz of the LED source

Lens 2는, 0.25mm 위치에서는 조도가 중심부는 밝지만 주변부는 약간 어두운 특성을 보였으며, -0.25mm에서는 Lens 1에 비해 조도가 중심부가 보다 상대적으로 밝은 특성을 나타내었다. Lens 3은, 0.25mm 위치에서는 중심부에서 밝은 조명특성을 보였지만 주변테두리는 매끄럽지 않은 특성을 보였으며, -0.25mm에서는 조도가 주변부가 중심부보다 상대적으로 밝은 특성을 확인하였다. z방향 위치변화에 대한 분석 결과를 그림 5에 제시하였다.

그림 5는 z축을 기준으로 광원의 위치변화에 대한 렌즈의 성능을 측정하는 것이다. 그림에서 광원의 위치를 $Z=0.0\text{mm}$ 인 평면을 기준으로 하여 광원이 ($z>0$)인 경우, 광원의 위치를 $Z\geq 0\text{mm}$ 인 렌즈 영역의 안쪽으로부터 이동시킨 것이다.

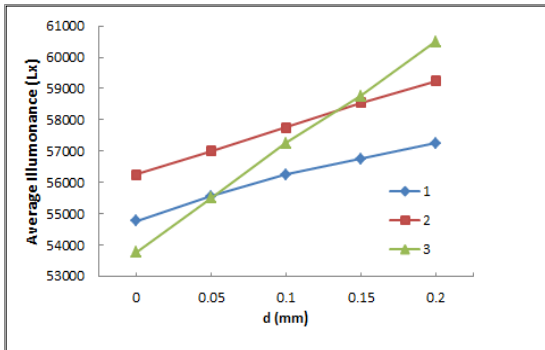
반면, 광원이 ($Z<0$)인 경우에서 광원의 위치가 마이너스(-)로 표시한 이유는, $Z=0.0\text{mm}$ 인 렌즈의 평면을 기준으로 광원의 위치를 $Z<0\text{mm}$ 인 렌즈 영역 바깥으로 이동시킨 것을 의미하며, 간격은 0.25mm이다.

그림 5에 나타냈듯이 조도 분포에서는, 광원의 +Z방향 이동하면 밝기 차가 감소하는 조도 분포임을 확인하였다. 그림 (a)의 평균 조도 그래프를 보면 렌즈1,2가 렌즈3보다 감소 폭이 적게 나타났으며, 그림 (b), (c)의 균일도 (U_{av} , U_{sd}) 그래프에서는 렌즈2는 전반적 안정적인 특성을 보였으며, 렌즈1과 렌즈3은 $z<0$ 일 때 급격한 변화는 예측 가능한 것이다. 그러나 $z>0$ 인 구간에서는 비교적 이론치에 근접함을 보여준다.

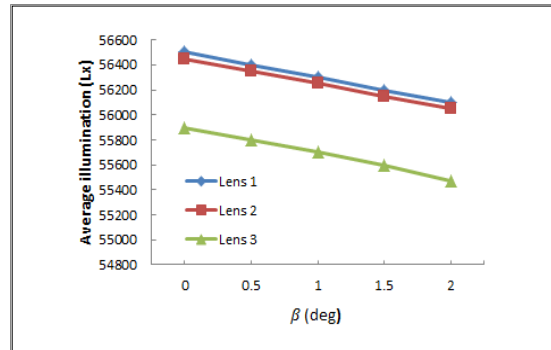
아울러, 두께변화에 대한 결과는 그림 6이다.

그림 6에 보인 바와 같이 설계한 렌즈 두께를 $d=0.0\text{mm}$ 를 초기치로 설정한 다음, 렌즈 두께를 변화시켜 가면서 성능을 측정하는 것이다. 그림에서 설계한 렌즈보다 조금 두껍게 하는 의미로 x축을 표기하였으며, 간격은 0.05mm이다.

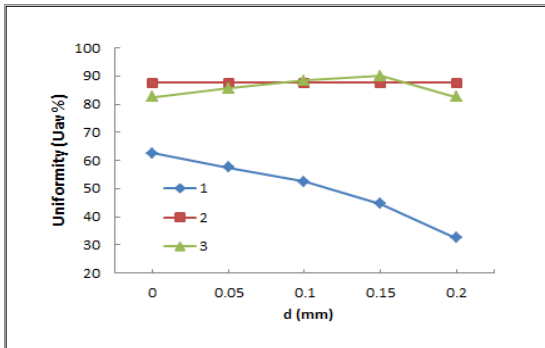
그림에 나타냈듯이 미소한 두께변화에 대해, 그림 (a)의 평균 조도 그래프를 보면 렌즈1, 2에서는 균일한 증가를 보였다. 그러나 렌즈3에서는 증가 폭이 크게 나타났다. 이는 두께 크기변화 폭을 설정하는 과정에서 오류가 날 것을 염려해 두께변화를 미세한 조정에 의해 설정했기 때문으로 사료된다. 아울러 그림 (b), (c)의 균일도 (U_{av} , U_{sd}) 그래프에서는 렌즈1은 하향 곡선을 나타냈으며, 렌즈2, 3은 이론적인 특성을 보였다.



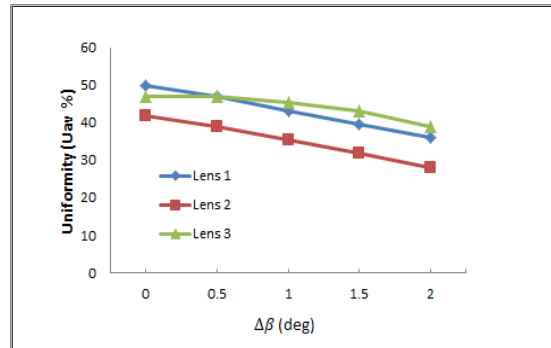
(a) Average illumination



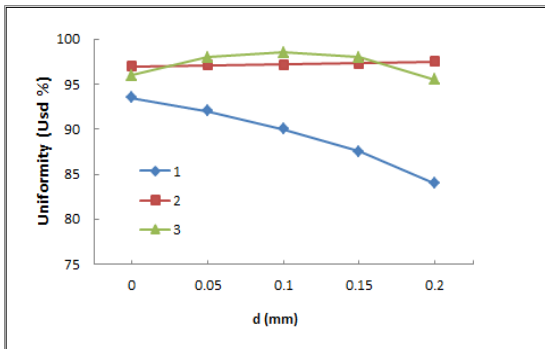
(a) Average illumination



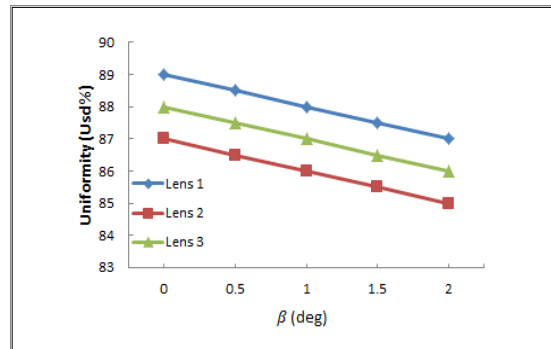
(b) Uniformity (Uavg)



(b) Uniformity (Uavg)



(c) Uniformity (Usd)



(c) Uniformity (Usd)

Fig. 6 Variation of average illumination(a) and uniformity (b, c) for the lens depending on the change to Δd

Fig. 7 Variation of average(a) and uniform illumination (b, c) for the lens depending on the tilted angle $\Delta\beta$

그림 7은 조명면에 대해 렌즈의 z축을 기준으로 기울임(Tilt)에 대해 성능을 측정하는 것이다.

그림 7은 렌즈의 기울임(Tilt)에 대한 정도가 조도 관계 및 조명면에 미치는 조명정도를 측정하고자 하였다. 실험은 z축을 회전 축으로 하여, 렌즈를 처음 위치($\beta = 0.0$)에서 0.1° 회전시킨 후, 원래 위치에서 0.5° 까지

회전시켰으며, 간격은 0.5° 이다.

그림에서 조도 분포(a)에서는, 3개 렌즈 모델은 회전 값이 커질수록 현저하게 밝기 정도의 차이를 보였으나, 렌즈 3은 전반적으로 밝기가 다른 렌즈에 비해 떨어짐을 확인하였다.

이상과 같은 결과를 종합적으로 살펴보면, 광원의 위

치 변화, 두께 변화에서 기존(발산) 조명 모델인 렌즈1 및 2가 중첩 조명 모델인 렌즈 3보다 큰 허용한계를 나타냈고, 특히 렌즈 크기가 큰 Lens2가 Lens1보다 유리한 조건을 보였다. 즉 크기가 큰 기존(발산) 조명 모델인 렌즈2가 렌즈와 광원의 위치 변화와 크기 변화에 관련된 렌즈 두께 변화, 광원의 위치 변화에 좋은 성능을 보였으나, 전반적으로 볼 때 중첩 조명 모델인 Lens3가 기존(발산) 조명 모델인 렌즈 1, 2보다 좋은 성능을 보였다. 또한 기울임 각도 변화와 광원의 특성변화에서 기존의 기존(발산) 조명 모델 렌즈보다 중첩 조명 모델 렌즈가 좋은 성능을 보였다. 중첩 조명 모델 렌즈 3는 렌즈와 광원의 위치 변화와 크기 변화에 안 좋은 성능을 발휘하는 반면 각도 변화에 좋은 성능을 발휘하는 것을 알 수 있었다.

VI. 결론

본 연구에서는 제작한 렌즈를 조명장치에 부착하여 활용할 경우 발생할 수 있는 조명용 렌즈의 성능 저하를 극복하기 위해 중첩 조명 모델을 사용하여 렌즈를 설계하였다. 이 렌즈들의 성능 비교를 위해 3가지 렌즈를 설계하였다. 그리고 렌즈의 설계 환경 변화에 대한 허용한계를 측정하기 위하여 조명면에 대한 광원 위치별(Z) 변화, 렌즈의 두께변화 그리고 렌즈 기울임 변화 등에 따른 허용치를 측정하였다. 그리고 조명 영역의 평균 조도 값과 균일도를 각 렌즈들의 성능 평가 항목으로 측정 하였다.

광원 위치(Z)변화와 렌즈의 두께 변화에서는 기존(발산) 조명 모델의 렌즈 1, 2가 중첩 조명 모델의 렌즈 3 보다 좋은 성능을 보였지만, 다른 변수들에 대한 성능들은 나쁘지 않았다.

이러한 렌즈의 성능 결과를 통해, 중첩 조명 모델의 렌즈는 광원의 각도 공차에 성능 저하 억제 특성이 좋게 유지되지만, 광원의 공간적 위치경우에 있어서 약간 낮은 특성을 보였지만, 두께 경우와 기울임 경우에는 한층 발전 가능성이 있었다. 그러므로 특성 분석을 통해, 렌즈 설계 환경 변화에 제안된 모델의 렌즈 성능의 유, 불리를 적절히 판단하여 조명 렌즈 설계시 발생할 수 있는 성능 저하 요인을 최소화 하기 위한 목적으로 조명 렌즈를 설계하고 성능을 분석하였다. 이를 통해

향후 다양한 렌즈 설계 환경 변화 요인에 적절히 대응할 수 있는 렌즈 설계의 연구가 수행되어야 함이 우선 과제라 하겠다.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by the Semyung University Research Grant of 2015.

REFERENCES

- [1] N. Zheludev, "The life and times of the LED-100-year history," *Nature Photonics*, vol. 1, pp189-192, Feb. 2007.
- [2] D. Malacara, Z. Malacara, *Handbook of optical design*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., Chapter 3,9,18, 2004.
- [3] K. Wang, F. Chen, Z. Liu, X. Luo,1,4 and S. Liu1, "Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging," *Optical. Experiment*. vol. 18, pp. 413- 425, Mar. 2010.
- [4] L. Wang, J. M. Sasián, P. Su, and R. J. Koschel, "Generation of Uniform Illumination Using Faceted Reflectors," *Proceeding of International Society for Optics and Photonics*, vol. 7423, pp1-11, 2009.
- [5] Y. Ding, X. Liu, Z. Zheng, and P. Gu, "Freeform LED Lens for uniform illumination," *Optical Experiment*, vol. 16, pp.12958-12966, Nov. 2008.
- [6] Z. Zhenrong, H. Xiang, and L. Xu, "Freeform surface Lens for LED uniform illumination," *Applied. Optics*, vol. 48, no. 35, pp. 6627-6634, Aug. 2009.
- [7] J. Jiang, S. To, W. B. Lee, and Benny Cheung, "Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight," *Optik*, 121, pp. 1761-1765, June 2010.
- [8] J. Chen, T. Wang, K. Huang, T. Liu, M. Tsai, and C. Lin., "Freeform lens design for LED collimating Illumination," *Optical Experiment*, vol. 20, pp. 10984-10995, Dec. 2012.
- [9] X. Yan, J. Yang, F. BU, and G. Zhang, "A Novel LED Lens for Rotationally Symmetric Uniform Illumination," *2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, vol. 3, pp. 82-85, 2011.
- [10] B. D. Stone and G. W. Forbes, "Optimal interpolates for Runge-Kutta ray tracing in inhomogeneous media,"

- Journal of Optical. Society. America*, vol. 7, no. 2, pp. 248-254, Feb. 1990.
- [11] H. Y. Jan, W. M. Bergmans, C. W. Tim. S., Jean-Paul, M. G. Linnartz, and R. Rietman, "An analytical model for the illuminance distribution of a power LED," *Optical Experiment* vol. 16, pp. 21641-21646, Dec. 2008.
- [12] S. Yang, D.C. Kim "Variation of illumination performance with source size and tolerance characteristics of freeform LED lenses," *Korean Journal of Optics and photonics*, vol. 24, no.1, pp. 29-38, Jan. 2013.
- [13] M. Alan, "Solid state lighting a world of expanding opportunities at LED 2002," *III-Vs Review*, vol. 16, no.1, pp. 30-33, Jan. 2003.
- [14] C. C. Sun, T. X. Lee, S. H. Ma, and S. M. Huand, "Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region," *Optical Letters*, vol. 31, no. 14, pp. 2193-2195, May 2006.
- [15] S. Zhao, K. Wang, F. Chen, D. Wu, and S. Liu, "Lens design of LED searchlight of high brightness and distant spot," *Journal of Optical. Society America*, vol. 28, pp. 815-820, Aug. 2011.
- [16] G. Wang, L. Wang, F. Li, and D. Kong, "Design of optical element combining Fresnel lens with microlens array for uniform light-emitting diode lighting," *Journal of Optical. Society America*, vol. 29, pp. 1877-1884, Dec. 2012.
- [17] K. Wang, S. Liu, F. Chen, Z. Liu, and X. Luo, "Effect of manufacturing defects on optical performance of discontinuous freeform lenses," *Optical Experiment*, vol. 17, pp. 5457-5465, Aug. 2009.



유일현(Ilhyun You)

1991년 인하대학교 응용물리학과 공학박사
1993년 ~ 현재 세명대학교 정보 통신학부
※ 관심분야: 응용광학, 스마트 의료장비, 신호처리