

Optimal Design of Secondary Optics for Narrowing the Beam Angle of an LED Lamp with a Large-Area COB-type LED Package

Bongjun Kim¹, Dae-Chan Kim¹, Beom-Hwan O¹, Se-Geun Park¹, Bongho Kim², and Seung Gol Lee^{1†}

¹INHA University, Incheon 402-751, Korea

²LG Electronics Materials & Components R&D Lab, Seoul 137-724, Korea

(Received November 5, 2013; Revised manuscript February 10, 2014; Accepted February 11, 2014)

In this paper secondary optics for an LED lamp with a narrow beam angle of 15° were optimized by using a two-reflector system, to reduce both its size and the occurrence of satellite rings. The conic constant and the curvature of the primary reflector were determined by considering the relation of the source size to the beam angle, and the optimal position and radius of the secondary reflector were found for reducing the occurrence of satellite rings. Luminous flux efficiency was about 80%.

Keywords: Secondary optics, COB-type LED, Reflector

OCIS codes: (080.4295) Nonimaging optical systems; (080.4298) Nonimaging optics; (120.1680) Collimation; (350.4600) Optical engineering

대면적 COB-type LED 패키지를 포함한 LED 램프의 좁은 광속각 구현을 위한 2차 광학계 최적 설계

김봉준¹ · 김대찬¹ · 오범환¹ · 박세근¹ · 김봉호² · 이승걸^{1†}

¹인하대학교 정보통신공학과, 광전자 연구실
Ⓞ 402-751 인천광역시 남구 용현 4동

²LG전자 소재부품연구소
Ⓞ 137-724 서울특별시 서초구 우면동 16

(2013년 11월 5일 받음, 2014년 2월 10일 수정본 받음, 2014년 2월 11일 게재 확정)

본 논문에서는 직경이 14.5 mm인 대면적 COB-type LED 패키지를 사용하면서도 15도 이내의 좁은 광속각을 구현하기 위해, 광학계 크기를 축소하고 동시에 satellite ring 발생을 억제할 수 있는 이중 반사경 구조를 고안하여 조명광학계용 2차 광학계를 최적 설계하였다. 최적 설계를 위해 광원 크기와 제 1 반사경의 광속각 관계를 이용하였고, satellite ring 발생을 억제하기 위한 제 2 반사경의 최적 위치 및 크기를 고려하였다. 그 결과 대체 상용 제품의 크기 제한을 만족하며 80%의 광속 효율을 달성할 수 있었다.

Keywords: 2차 광학계, 비결상 광학계, 시준

OCIS codes: (080.4295) Nonimaging optical systems; (080.4298) Nonimaging optics; (120.1680) Collimation; (350.4600) Optical engineering

I. 서 론

LED 광원의 여러 가지 장점을 활용하여 할로젠 램프나 백열전구를 대체하는 다양한 LED 램프 제품이 출시되고 있으며, 저가격화 및 고성능화를 위해 조명 광학계 성능을 향상

하는 연구가 활발히 진행되고 있다^{1, 2}. 최근에는 좁은 광속각 (beam angle) 특성을 필요로 하는 산업용 또는 전사용 특수 램프 제품을 LED로 대체하려는 시도도 진행되고 있다. 좁은 광속각을 가진 LED 램프는 수송기기용 조명과 같은 산업적 활용뿐만 아니라 실내 조명용으로도 그 활용이 크게 증

[†]E-mail: sglee@inha.ac.kr

가할 것으로 기대된다. 한편 조명 제품의 고출력화 및 경량화 요구가 높아짐에 따라 LED 칩 배열을 포함하는 고출력 대면적 COB-type LED 패키지로 좁은 광속각을 가진 LED 램프를 구현하려는 연구가 중요한 의미를 가지게 되었다³⁾.

좁은 광속각을 가진 LED 램프는 크게 두 가지 방식으로 구현되어 왔다. 첫째는 내부전반사(total internal reflection, TIR)를 활용하는 TIR형 복합렌즈 방식의 2차 광학계(secondary optics)와 좁은 발광면을 가진 LED 광원을 사용하여 구현된다⁴⁾. 두 번째는 반사 광학계 방식의 2차 광학계를 활용하는 것이다. 그러나 고출력 대면적 COB-type LED 패키지에 이들 방식을 적용할 경우, 방출면이 커짐에 따라 TIR형 복합렌즈도 동시에 커져야 하므로 렌즈 매질에 의한 흡수 손실이 크게 증가하게 되거나, 반사경 높이를 무작정 크게 할 수 없으므로 광속 효율(luminous flux efficiency) 저하와 satellite ring 발생을 억제할 수 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 좁은 광속각을 갖는 기존 2차 광학계의 문제점들을 살펴보고, 이들 문제를 해결하기 위해 2개의 반사경으로 구성된 2차 광학계 구조를 활용하는 방안을 제시하였다. 제안된 구조를 통해 광학계의 실제 크기(높이)를 축소하였으며, 광원 크기와 광속각의 관계를 고려하여 제 1 반사경의 규격을 결정하고 두 가지 반사경의 상대적 배치 및 크기를 조정함으로써 satellite ring 발생을 억제할 수 있었다. 이하 2장에서는 좁은 광속각 구현의 문제점, 3장과 4장에서는 각각 2차 광학계의 설계 과정 및 설계 결과를 다루었다.

II. 좁은 광속각 구현의 문제점

좁은 광속각 구현을 위한 2차 광학계 구조를 제안하기에 앞서 넓은 방출면을 가진 LED 패키지를 사용하여 좁은 광속각을 갖는 2차 광학계 구현이 용의하지 않은 이유를 그림 1을 통해 살펴볼 필요가 있다. 그림 1은 유한한 방출면을 가지는 광원과 하나의 렌즈로 구성된 2차 광학계에 있어서 광원 크기와 광속각이 가지는 개략적인 관계를 보이는 그림이다. 평행 광속을 만들기 위해 초점거리 f 인 렌즈의 초평면에

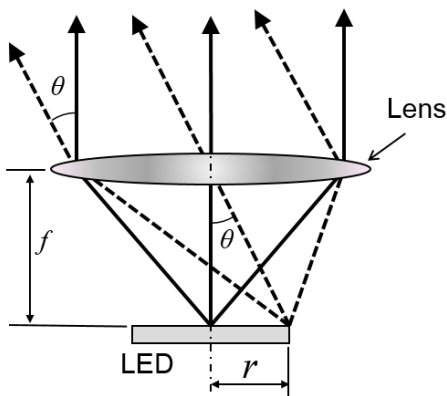


FIG. 1. Divergence of output beam emitted from a finite LED source.

반경 r 인 LED 광원이 놓여 있다고 가정하자. 만일 광원 테두리에서 방출되어 렌즈 중심부를 통과하는 광선이 광축과 θ 의 각도를 이룬다면, 2차 광학계를 지나 외부로 방출된 광선들은 최대 2θ 의 각 범위로 발산하게 될 것이다. 조명 광학계에서 광속각 θ_{beam} 은 각도별 광도 분포에서 최대 광도의 50% 광도를 갖는 각 범위로 정의되지만, 근사적으로 그림 1에서 2차 광학계를 투과한 광속이 이루는 방출각 범위를 광속각 ($\theta_{\text{beam}} = 2\theta$)으로 놓을 수 있다. 이때 광속각과 광원 크기 및 초점거리의 관계는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tan\theta &= r/f \\ \theta_{\text{beam}} &= 2 \tan^{-1}(r/f) \end{aligned} \quad (1)$$

위 식으로부터 요구된 광속각을 만족하기 위해서는 광원 면적이 증가함에 따라 2차 광학계의 초점거리도 길어져야 함을 알 수 있다. 예를 들어 직경 15 mm인 발광면을 가진 COB-type LED 패키지를 광원으로 사용하여 15도의 광속각을 구현하려면, 2차 광학계의 초점거리는 약 57 mm가 되어야 한다. 같은 방법으로 광속각 10도를 구현하려면, 초점거리가 약 86 mm인 2차 광학계가 요구된다. 물론 광속각의 엄밀한 정의를 고려한다면, 식 (1)에서 예측된 값보다 초점거리가 짧아질 수 있지만 광원 크기에 따라 요구되는 2차 광학계 크기(특히 길이)가 커져야 한다는 사실은 그대로 적용될 것이다.

위와 같은 관계로부터 설계 과정 상의 두 가지 문제가 예상된다. 먼저, 개발된 LED 램프 제품이 기존 조명장치를 대체해야 하는 경우 즉, 광학계 크기에 일정한 제한이 있는 경우에는 제한된 크기로 인해 광속각을 어떤 이하로 낮출 수 없게 될 것이다. 다음으로 2차 광학계 구경이 일정한 경우 초점거리가 길어질 수록 2차 광학계로 입사되는 광속이 줄어들게 되므로 광속 효율이 급격히 낮아지게 될 것이다.

이러한 문제는 기존 접근 방식인 TIR형 복합렌즈 또는 반사 광학계를 사용함으로써 일부 개선될 수 있다⁵⁾. TIR형 복합렌즈는 내부 전반사를 일으키는 포물면 형태의 전반사면과 자유 형상의 굴절면을 포함하는 구조로서 10도 이내의 광속각에서도 비교적 높은 광속 효율을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 렌즈는 광원의 크기가 전체 렌즈 직경의 약 15% 이상이 되면 광속 효율이 50% 이하로 급격히 낮아지는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 또한 TIR형 복합렌즈는 부피가 증가함에 따라 렌즈 매질에 의한 흡수 손실이 급격히 증가하기 때문에 대면적 COB-type LED 패키지를 광원으로 하는 2차 광학계에는 적용하기 어렵다. 한편 반사 광학계를 사용하여 흡수 손실의 영향을 받지 않고 광속 효율을 높일 수 있지만, 단일 반사경을 사용하는 경우에는 반사경에 의해 반사되지 않고 광원에서 조명면으로 바로 진행하는 광선들이 발생할 수 있다. 이로 인해 소위 satellite ring이라고 하는 동심원 형태의 누설광이 발생하여 조명 품질을 나쁘게 한다. 따라서 반사 광학계를 사용하는 경우에도 반사경 외에 비구면 렌즈 등을

삽입하는 방법이 사용되지만^[7] 대면적 광원에 대해서는 satellite ring이 발생하지 않는 최적 렌즈를 설계하는 것이 쉽지 않다.

한편, LED 램프를 위한 2차 광학계는 높은 광속 효율 외에도 요구되는 광속각을 만족해야 하며, Gaussian 함수 형태의 광도(luminous intensity) 분포를 가져야 한다^[8]. 또한, 설계 과정에서 대면적 COB-type LED 패키지를 점광원으로 취급할 수 없으므로, LED 램프의 일반적인 조건을 만족하면서 동시에 좁은 광속각을 구현하는 것에 많은 어려움이 따른다.

III. 좁은 광속각 구현을 위한 2차 광학계 설계

전술한 좁은 광속각 구현의 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 2개의 반사경으로 구성된 반사 광학계를 사용함으로써 렌즈 매질에 의한 흡수 손실을 줄이고, 유효 초점거리를 길게 확보하면서도 광학계 크기(특히 높이)를 축소하고 동시에 satellite ring를 최소화하는 2차 광학계를 제안한다. 포물면 거울인 제 1 반사경에 의해 LED 패키지로부터 큰 각도로 방출되는 광속을 제어하고, 제 1 반사경 내부에 놓이는 제 2 반사경으로 LED 패키지로부터 작은 각도로 방출되는 광속을 제어하는 개념이다. 본 연구에서는 PAR30 램프 대체 목적의 LED 조명광학계 설계에 제안된 2차 광학계 구현 개념을 적용함으로써 그 타당성을 검증하고자 한다. 이러한 목적에 따라 2차 광학계의 크기를 지름물 등이 삽입될 것을 고려하여 지름 80 mm 이하, 높이 40 mm 이하로 제한하였으며, 제한된 크기는 단일 광학계에 적용되는 식(1)의 이론적 한계보다 작은 크기에 해당한다. LED 조명광학계는 지름이 14.5 mm인 COB-type LED 패키지를 사용한다고 가정하였으며, 조명 성능으로 15도 이내의 광속각과 80% 이상의 광속 효율을 설정하였다.

광속 효율의 목표치는 대략적인 étendue 계산을 통해 설정되었으며, 이를 위해 3차원 étendue에 대한 단순한 정의식인 $\pi n^2 \sin^2(\theta) A$ 를 활용하였다^[9]. 여기서 n 은 굴절률, θ 는 방출 광속의 half angle, A 는 광속 단면적을 의미한다. 광원 측 étendue는 광원 직경 14.5 mm와 광원의 half angle 60도로부터, 2차 광학계 방출면 étendue는 방출면의 최대 허용직경 90 mm와 방출 광속의 광속각 15도로부터 각각 계산된다. 굴절률 n 과 π 를 제외한 광원 측 étendue와 2차 광학계 방출면 étendue는 대략 34와 39.4 정도가 된다. 큰 차이는 아니지만 étendue 증가로 인해 약간의 손실이 발생할 수 밖에 없으며, 반사경의 반사 손실로 인해 최소한 10% 이상의 손실이 추가로 발생하게 되므로 80%의 광속 효율을 목표로 설정하였다.

그림 2(a)는 초점에 놓인 점광원에서 방출된 광속을 평행 광속으로 변환하는 포물면 거울의 기본 구조이며, 설계될 2차 광학계의 제 1 반사경에 해당된다. 광학계의 크기 제한을 따르기 위해 포물면 거울은 초점을 기준으로 높이 40 mm인 지점 이상이 절단된 구조이다. 점광원과 달리 COB-type LED 패키지를 해당 포물면 거울의 초점에 위치시킨다면, 포물면 거울로부터 방출된 최종 광속은 더 이상 평행 광속이

되지 못하고 확산될 것이다. 이때 포물면 거울로부터 방출된 최종 광속의 광속각이 15도가 되도록 하기 위해 그림 2(a)에 나타난 개념에 따라 포물면의 곡률을 결정하였다. 그림 2(a)에서 각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 는 제 1 반사경 표면의 4가지 대표적인 점(P_1, P_2, P_3, P_4)에 입사된 LED 방출 광속의 입사각 범위를 의미한다. LED 광원은 크기를 가지므로, 전체 방출면으로부터 방출되어 반사경 표면의 동일 지점에 입사된 광선들은 유한한 입사각 범위를 가지게 된다. 또한 이들 광선들은 해당 입사점에서 반사된 후 같은 각 범위를 가지고 방출될 것이다. 이 점에 착안하여, 상기 4가지 각이 15도 이내를 유지하도록 포물면의 곡률을 결정하게 된다면, 각 점으로 입사된 광속들은 포물면 거울에 의해 반사된 이후 15도 이내의 광속각을 가지고 제 1 반사경을 빠져나가게 될 것이다.

다음으로 LED 패키지에서 방출된 후 제 1 반사경에 의해 반사되지 않고 바로 조명면으로 향하는 광선들을 제어하기 위한 제 2 반사경의 설계 개념을 그림 2(b)에 나타내었다. 전술한 바와 같이 제 2 반사경은 제 1 반사경 내부 중앙에 배치되며, LED 패키지에서 작은 각(광축 기준)으로 방출된 광속을 제어하게 된다. 그림 2(b)에 표시된 점선 A는 제 2 반사경의 위치에 따른 최적 반경의 변화를 나타낸 그래프이다. 즉, 광축으로부터 점선 A까지의 거리(반경)는 LED 광원으로부터 방출된 광속이 제 1 반사경이나 제 2 반사경에 의해 완벽하게 제어될 수 있는 제 2 반사경의 각 위치별 최소 반경을 의미한다. 만일 제 2 반사경의 반경이 점선 A로 표시된 반경보다 크다면, 두 가지 반사경에 의해 반복 반사되는 광선들이 증가하므로, 반사 손실이 증가하여 광속 효율이 낮아

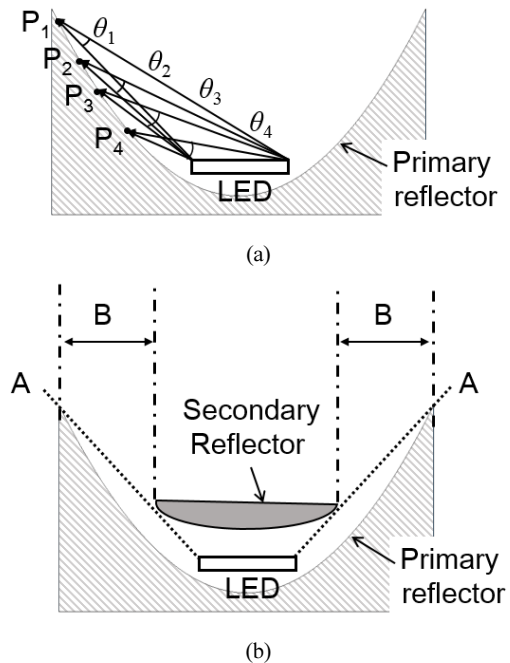


FIG. 2. The optimizing concept of the primary and the secondary reflectors for a LED secondary optics: (a) primary reflector and (b) secondary reflector.

질 수 있다. 반대로 제 2 반사경의 반경이 점선 A로 표시된 반경보다 작다면, LED 광원으로부터 방출된 광속의 일부가 두 가지 반사경에 의해 제어되지 않고 그대로 2차 광학계를 빠져 나가게 될 것이다. 이러한 광속들이 satellite ring 발생 원인이 되므로, 제 2 반사경은 그 배치 위치에 적합한 최적 반경을 가져야만 할 것이다.

제 2 반사경의 배치 위치에 따른 최적 반경 조건 외에도 광속 효율을 극대화하기 위한 제 2 반사경의 최적 배치가 고려되어야 한다. 예를 들어 제 2 반사경이 그림 2(b)에서 표시된 것과 같은 크기 및 위치를 갖는다면, 최종적으로 2차 광학계를 통해 광선이 빠져나갈 수 있는 영역은 그림 2(b)의 영역 B로 한정될 것이다. 그런데 제 2 반사경을 좀 더 높은 위치(높이)에 이동 배치할 경우, 제 2 반사경의 반경이 커져야 하므로 2차 광학계를 통해 광선이 빠져나갈 수 있는 영역은 상대적으로 좁아지며, 이로 인해 광속 효율이 저하될 수 있다. 또한, 제 2 반사경에 입사된 광선들은 반사된 후 다시 제 1 반사경에서 반사되어 2차 광학계를 빠져 나가게 되므로, 마치 광원의 허상이 초점을 벗어난 위치에 존재하는 상황이 된다. 따라서 제 2 반사경의 높이가 LED 방출면으로부터 높아질수록 최종 방출 광속의 광속각은 점차 커지게 될 것이다. 반대로 제 2 반사경이 LED 광원에 근접시킬 경우, 2차 광학계를 통해 광선이 빠져나갈 수 있는 영역은 더 넓어지지만, 제 2 반사경에서 반사된 많은 광선들이 LED 방출면으로 되돌아가 흡수되므로, 오히려 광속 효율이 낮아질 수 있을 것이다. 따라서 제 2 반사경의 위치에 따른 광속 효율, center beam candle power(CBCP), 조명 분포의 Gaussian 분포 유사도 등의 변화를 비교함으로써 제 2 반사경의 최적 위치를 결정해야 한다.

이상과 같은 조건을 만족하는 1차 및 2차 반사경의 설계 순서는 다음과 같다. 먼저 1차반사경은 광학계의 제한 조건을 고려하여 포물면 거울을 정의하였다. 포물면의 정의를 위한 외형적 설계 제한 조건은 빛이 방출되는 상단의 직경이 80 mm 이내, 반사경의 높이는 40 mm이내, LED가 놓이는 반사경 하단 부의 직경은 20 mm 이상이 되도록 하였다. 이 같은 조건을 모두 만족하는 포물면경의 초점거리는 5 mm에서 8.28 mm 범위 안에 있어야 한다. 식(1)의 관계로부터 광속각은 광학계의 초점거리가 길수록 좁아지므로 1차 반사경의 초점거리는 8 mm로 설정하였다. 다음은 실제 광원을 측정된 ray-set file로 정의된 광원모델의 중심이 이전 단계의 점광원 위치에 놓이도록 설정하여 포물면 형상을 최적화 하였다. 최적화는 방출광속이 최대한 평행광이 되는 조건으로 상용 소프트웨어인 LightTools의 최적화 기능을 이용하였으며 최적화 변수는 포물면의 원뿔상수(conic constant)이다.

설계된 1차 반사경의 형상을 기준으로 2차 반사경의 직경을 결정한다. 2차 반사경의 직경은 satellite ring이 발생하지 않을 조건으로 정의하였으며 1차 반사경의 상단 구경 및 광원의 크기와 관련하여 광원의 높이에 비례하여 증가한다. 2차 반사경의 높이와 면 형상을 결정하기 위해 반사경의 높이를 변화시키면서 각 높이에 대응하는 2차 반사경의 직경을

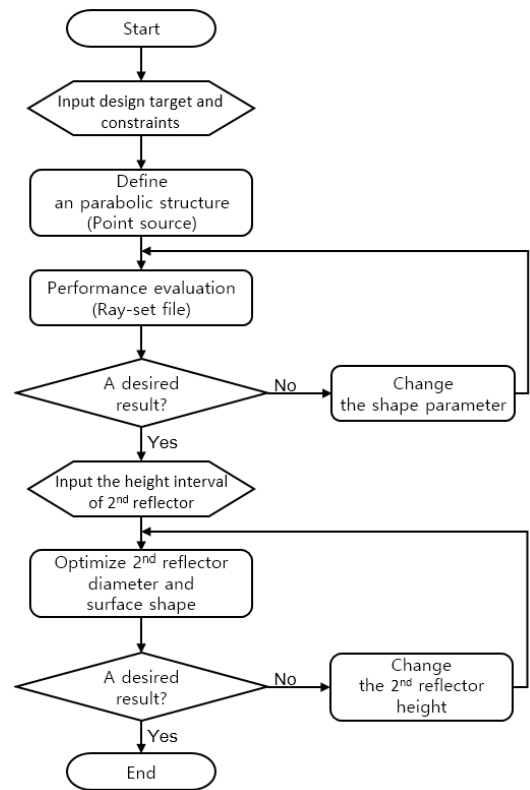


FIG. 3. Flow chart for optimizing a LED secondary optics composed of two reflectors.

결정하고, 다시 각각의 직경에 대한 곡률과 원뿔상수를 변화시키면서 광속각 및 광속효율을 평가한다. 이 과정 역시 LightTools의 최적화 기능을 이용하였다. 최적화 조건은 광속효율 및 평행광속이며 최적화 변수는 2차 반사경의 곡률과 원뿔상수이다. 설계된 광학계의 방출각도에 따른 광도분포를 평가하여 satellite ring이 존재하는 경우에는 2차 반사경의 직경을 미세하게 변경한 후 면 형상의 최적화 과정을 반복한다. 이상의 설계 과정을 그림 3의 흐름도에 나타내었다.

IV. 설계결과 및 고찰

2중 반사경 구조의 2차 광학계를 설계하기에 앞서, 제 1 반사경만을 사용한 광학계의 특성을 살펴 보았다. 제 1 반사경은 포물면에 가까운 타원면으로서 원뿔 상수는 -0.912, 곡률은 0.0625이다. 크기 제한 때문에 초점의 아래 부분과 초점으로부터 높이 40 mm 이상인 부분은 절단되었으며, 최고점에서의 구경은 71 mm, 최저점에서의 구경은 25 mm이다. 제 1 반사경 바닥 중심에 직경 14.5 mm의 LED 광원이 놓여 있다. 설계에 필요한 LED 광원의 방출 특성은 Source Image Goniometer(SIG-400, Radiant Zemax사)를 사용하여 측정하였다. LED 광원 구동을 위해 정격 조건보다 약간 낮은 32 V 전압과 400 mA 전류를 인가하였으며, Source Image Goniometer의 센서와 LED 광원 사이의 거리는 약 500mm 이었다. 이렇

게 측정된 광선데이터로 LED 광원을 모델링 하였으며, 반사경의 표면재질은 알루미늄으로 정의 하였다. 이때 사용한 COB-type LED 패키지 광원의 광도 그래프는 그림 4과 같다. 그림 5(a)는 광속각 조건의 만족 여부를 확인하기 위하여 높이 40mm, 31mm, 22mm 및 13mm인 점에 대해 광원의 테두리에서 방출된 광속의 입사각 범위를 계산한 결과이다. 각각 8.80, 9.28, 9.63 및 8.37도를 얻음으로써 10도 이내의 각 범위를 가짐을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)는 설계된 제 1 반사경의 3차원 형상 및 LightTools를 이용하여 계산된 광도 분포이다. 광속각은 약 13도이며 광속효율은 94.4% 였다. 그러나 제 1 반사경에 의해 제어되지 않는 광선으로 인하여 20~50도 범위에 넓은 satellite ring이 관찰됨을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 광선을 제어하기 위한 제 2 반사경, 또는 렌즈를 제 1 반사경 내부에 도입할 필요가 있다.

앞서 논의한 제 2 반사경의 최적 반경 조건을 무시하고 광속각이 최소가 되도록 설계한 결과를 그림 6(a)에 보였다. 그림 6(b)는 이렇게 설계된 2차 광학계의 광도 분포로서 광속

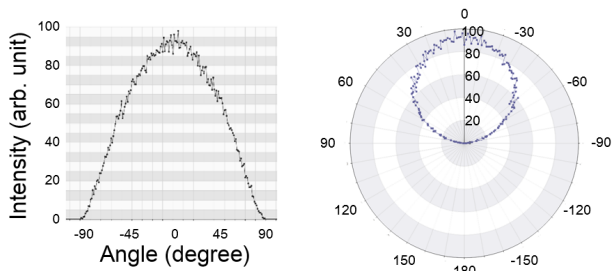


FIG. 4. Measured luminous intensity distributions of a COB-type LED package used for simulation.

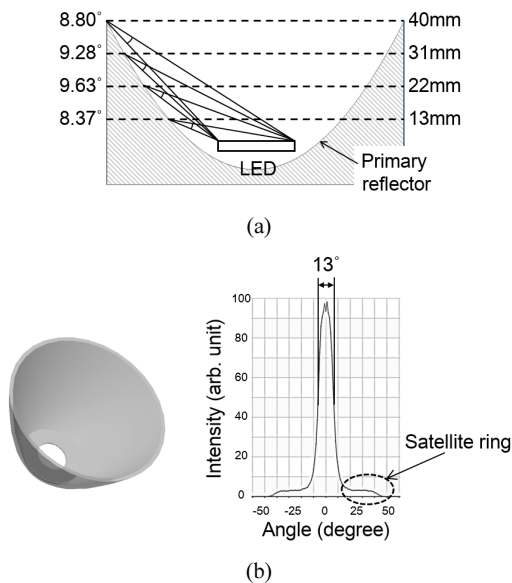


FIG. 5. Optimal design of the primary reflector (a) the incident angle differences of rays incident at four points on the primary reflector, (b) schematic diagram and luminous intensity distribution of the primary reflector.

각 9도, 광속효율 85.2%, Gaussian 분포와의 유사도 94.6%를 얻었다. 매우 좁은 협각 조명을 구현할 수 있었지만 제 2 반사경의 최적 반경 조건을 만족하지 못함에 따라 2차 광학계에 의해 제어되지 않고 방출되는 광선으로 인하여 25~50도 범위에 무시할 수 없는 satellite ring이 발생됨을 알 수 있다. 또한 중심부분이 매우 좁은 광도 분포를 가지는데, 이러한 결과는 관찰자에게 피로감을 느끼게 할 수 있다. 따라서 광속각이 다소 증가하고 효율이 낮아지더라도 앞서 논의한 제 2 반사경의 최적 반경 조건을 만족하는 제 2 반사경을 도입하여 조명 성능을 살펴 보았다. 그림 6(c)는 최적 반경 조건

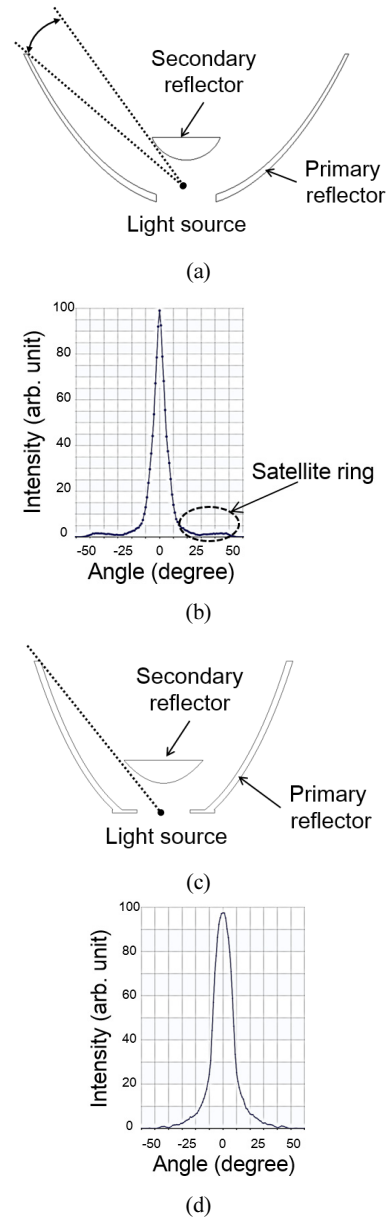


FIG. 6. (a) Two-reflector system with a small-sized secondary reflector and (b) its luminous intensity distribution, and (c) two-reflector system with an optimized secondary reflector and (d) its luminous intensity distribution.

을 만족하는 제 2 반사경을 가진 2차 광학계의 단면 형상이며, 그림 6(d)는 조도 분포이다. 광속각은 15.4도로 증가하였고, 광속 효율은 79.9%를 얻을 수 있었지만 satellite ring이 대부분 억제된 결과를 확인할 수 있었다. 광도 분포의 Gaussian 분포에 대한 유사도는 98.5%였다. 최적화에 따른 satellite ring의 억제 정도를 확인하기 위하여 방출각 20~60도 범위의 광도 분포를 확대하여 그림 7에 보였다. 최적화하기 전에는 45도 부근에서 195cd 정도의 피크를 가진 satellite ring이 관찰되지만 최적화한 이후에는 65cd 정도로 크게 억제됨을 확인할 수 있었다.

다음은 제 2 반사경의 최적 반경 조건을 만족하면서 제 2 반사경의 높이를 변화시켰을 때의 특성을 살펴보았다. 그림 8(a), (b) 및 (c)는 제 2 반사경의 중심 부분과 LED 광원의 중심이 각각 4mm, 8mm 및 13mm 일 때의 설계 결과와 이

에 따른 광경로를 표시하였다. 설계된 2차 광학계의 조명 결과는 각각 그림 8(d), (e) 및 (f)에 보였다. 제 2 반사경이 광원에 근접한 경우인 그림 8(a) 및 그림 8(d)를 고찰하면 다중 반사가 일어나지 않을 조건의 제 2 반사경 곡률은 0.2로서 제 2 반사경의 최적 반경 조건을 만족할 수 없었다. 따라서 2차 광학계에 의해 제어되지 않고 방출되는 광선이 발생함에 따라 30~40도 부근에서 satellite ring이 관찰되었다. 이러한 광선의 예를 점선으로 표시하였다. 광속각은 17.7도였으며, 광속 효율은 81.6%였다. 제 2 반사경의 곡률을 작게 함으로써 반사경의 직경을 크게 할 수 있지만, 이 경우에는 LED 광원의 방출면으로 재 흡수되는 광선으로 인한 효율의 저하가 심각하게 발생하였다.

제 2 반사경이 광원에서 멀리 떨어진 그림 8(c)와 그림 8(f)의 경우를 보면, 제 2 반사경의 위치가 높아짐에 따라 최적 반경이 증가하여 광속 효율은 66.7%까지 크게 낮아졌다. 광속각은 15.6도였지만 제 2 반사경의 직경이 증가함에 따라 25도 부근에 불규칙한 satellite ring이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 2차 및 1차 반사경에 다중 반사된 광선들이 만드는 것으로 판단할 수 있으며, 다중 반사되는 광선의 예를 점선으로 표시하였다. 그림 8(b) 및 (e)의 결과는 제 2 반사경이 최적 위치에 놓인 결과로서 대부분의 광선들이 평행하게 방출됨을 알 수 있다. 그림 9에 최적 설계된 1차 및 2차 반사경의 3차원 형상과 자세한 2차원 단면 형상을 보였다.

최적 설계된 제 1 반사경의 원뿔 상수와 곡률, 높이 및 구경은 앞서 반사경만의 특성을 논의하기 위해 제시되었던 값

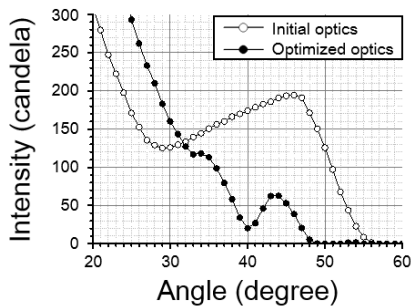


FIG. 7. Comparison of two luminous intensity distributions shown in Fig. 6(b) and (d).

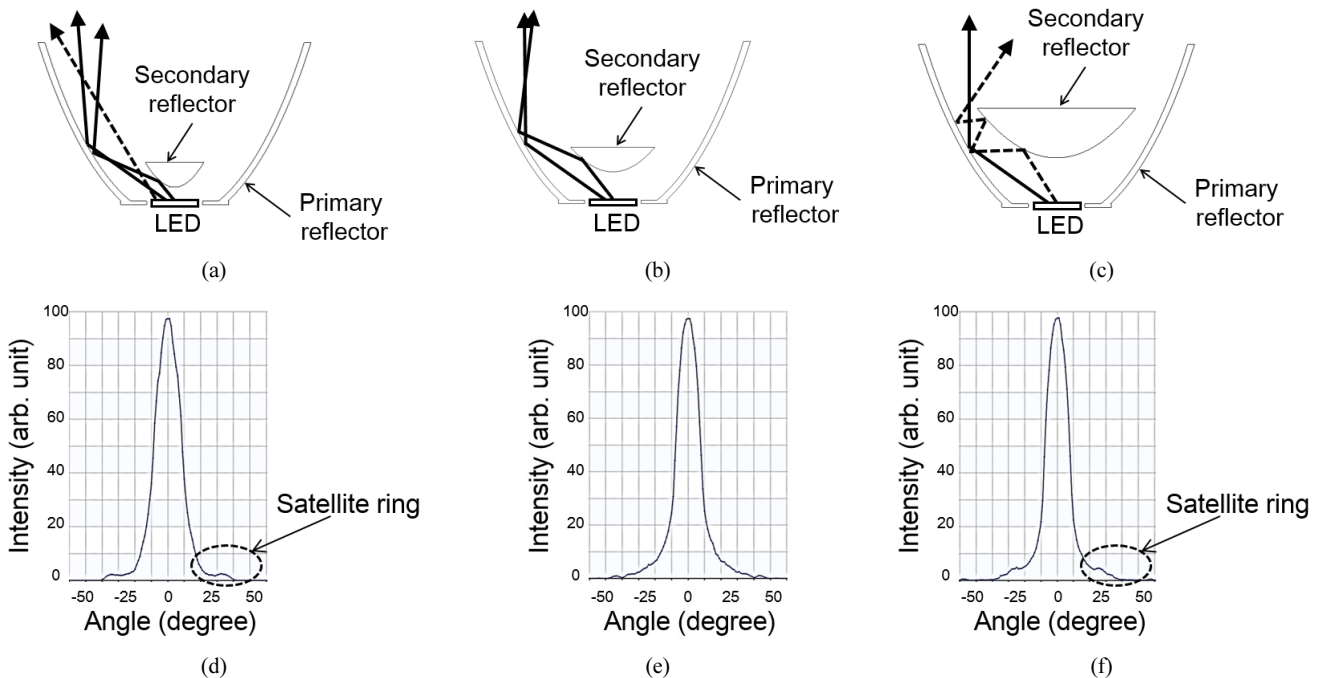


FIG. 8. Variation of luminous intensity distribution according to the position of the secondary reflector. (a), (b), (c) three different configurations and (d), (e), (f) their luminous intensity distributions.

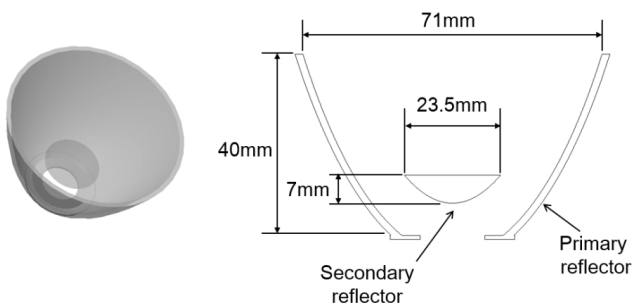
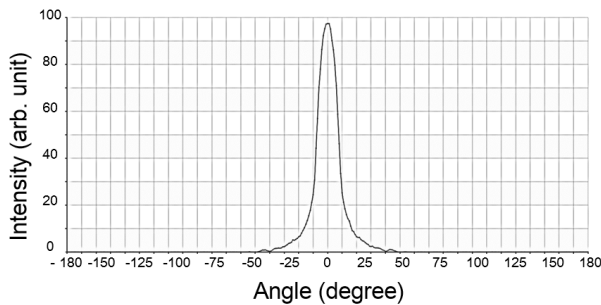
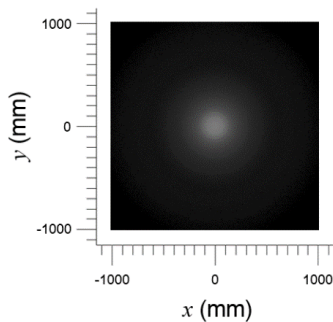


FIG. 9. The schematic diagram of the optimized LED secondary optics.



(a)



(b)

FIG. 10. (a) The luminous intensity distribution and (b) the true color raster chart at the illumination plane of the optimized LED secondary optics.

과 같으며 제 2 반사경의 직경은 23.5 mm이고 곡률 0.0973 인 포물면이다. 그림 10에 계산된 조명 성능을 보였으며, 그림 10(a)는 far-field receiver에서 예측한 광도 분포이고 그림 10(b)는 광학계로부터 1000 mm에 위치한 2000×2000 mm² 크기의 조명면에 대한 조도 분포이다. 광학계의 효율은 79.6%이며, 광 방출 분포의 광속각은 15.4도로 목표 설계치를 근접한 설계 결과를 이루었다. 반사면의 흡수 손실이 10%인 것을 감안한다면 이론적인 최대치에 가깝게 설계 되었다고 판단된다.

V. 결 론

직경 14.5 mm의 대면적 COB-type LED 패키지를 사용하

여, 좁은 광속각을 갖는 2차 광학계를 최적 설계하였다. 설계 목표로 설정된 광속각과 광학계 크기 사이의 관계 및 satellite ring이 발생하지 않을 설계 기준을 도입하였으며, 다양한 설계 조건에 대하여 조명 결과를 예측하였다. 최적 설계된 2차 광학계의 경우 15.4도의 광속각에서 79.6%의 광속 효율을 얻을 수 있었으며 조도 분포의 Gaussian 분포 유사도는 98.5%로서 대부분의 satellite ring을 억제할 수 있었다. 제안된 2차 광학계에 비하여 더욱 좁은 10도 이내의 협각 조명을 구현하는 것도 가능하지만 이러한 경우에는 광속 효율 및 조도 분포 등의 특성이 나빠지는 경향을 확인하였고, 이러한 상충관계는 특정한 조명 목적을 구현하기 위해 응용될 수 있을 것이다. 향후 2중 반사경 구조뿐만 아니라 반사경 및 렌즈로 구성된 반사 굴절 복합 광학계 등 다양한 구성의 2차 광학계에 대한 연구가 진행될 것이다.

감사의 글

“본 연구는 LG전자 산학지원사업과 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구 결과로 수행되었음” (NIPA-2013-H0301-13-1010).

References

1. A. Mills, “Solid state lighting—a world of expanding opportunities at LED 2002,” *III-Vs Rev.* **16**, 30-33 (2003).
2. W.-S. Sun, C.-L. Tien, J.-W. Pan, T.-H. Yang, C.-H. Tsuei, and Y.-H. Huang, “Simulation and comparison of the lighting efficiency for household illumination with LEDs and fluorescent lamps,” *J. Opt. Soc. Korea* **17**, 376-383 (2013).
3. D. Vázquez-Moliní, M. González-Montes, A. Álvarez, and E. Bernabéu, “High-efficiency light-emitting diode collimator,” *Opt. Eng.* **49**, 123001 (2010).
4. S. Kudaev and P. Schreiber, “Optimization of symmetrical free-shape non-imaging concentrators for LED light source applications,” *Proc. SPIE* **5942**, 594209 (2005).
5. S. Kudaev and P. Schreiber, “Scaling of the LED collimators with folded multiple reflections,” *Proc. SPIE* **8170**, 70590C (2008).
6. T. Kari, J. Gadegaard, T. Søndergaard, T. G. Pedersen, and K. Pedersen, “Reliability of point source approximations in compact LED lens designs,” *Opt. Express* **19**, A1190-A1195 (2011).
7. C.-Y. Tsai, “Design and analysis of reflector for uniform light-emitting diode illuminance,” *J. Opt. Soc. Am. A* **30**, 993-1001 (2013).
8. J.-J. Chen, T.-Y. Wang, K.-L. Huang, T.-S. Liu, M.-D. Tsai, and C.-T. Lin, “Freeform lens design for LED collimating illumination,” *Opt. Express* **20**, 10984-10995 (2012).
9. J. Chaves, *Introduction to Nonimaging Optics* (CRC Press, 2008).