

LED 칩 표면 광량 분포 변화에 따른 2단 반사컵의 최적 설계

임해동¹ · 이동진¹ · 김양겸¹ · 정장희² · 이승걸¹ · 오범환^{1†}

¹인하대학교 정보통신공학과
고성능 LED 조명모듈 핵심기술 연구센터(LED-STAR)
☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

²이스턴테크
☎ 403-858 인천광역시 부평구 청천동 380-5

(2012년 9월 21일 받음, 2012년 12월 4일 수정본 받음, 2012년 12월 7일 게재 확정)

배광 분포 제어가 용이한 높이 분할방식 반사컵 설계를 수행함에 있어서, 배광 설계시 배광 분포의 설계오차를 줄이기 위하여, LED 칩 표면상의 광량 분포 변화에 따른 반사컵의 배광 특성 변화 경향성을 파악하여 최적 설계에 적용하였다. LED 패키지의 반사컵을 높이에 따라 2단 분할하여 최적 설계한 결과, 교차형과 비교차형의 조합 설계를 통해서 최대 광도와 균일도를 조절하거나 암흑 영역을 없애는 등 다양한 기능성 설계가 가능했다.

Optimum Designs of 2 Segment LED Reflectors for Various Light Output Distributions on the Surface of an LED Chip

Hae-Dong Yim¹, Dong-Jin Lee¹, Yang Gyeom Kim¹, Jang Hee Jeong²,
Seung-Gol Lee¹, and Beom-Hoan O^{1†}

¹*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*

²*Eastern Tech, Inc., 380-5, Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-858, Korea*

(Received September 21, 2012; Revised manuscript December 4, 2012; Accepted December 7, 2012)

It is important to control the beam pattern of an LED by the design of a reflector. The optimum conditions of the structure parameters for the 2 segment LED reflector are analyzed and compared as they vary depending on the various intensity distributions of light output on the LED chip surface. It is also interesting that combining various types of reflectors is possible to give several efficient beam patterns, such as the maximum intensity profile or relatively wide controllability of beam angle.

Keywords: Light Emitting Diode (LED), Reflector, Light intensity distribution, Functional design
OCIS codes: (230.0230) Optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes

I. 서 론

질화갈륨(GaN) 기반의 청색 LED(Light Emitting Diode)가 개발된 이후로 LED는 그 응용분야가 급격하게 확산되고 있다. 특히, 청색 LED와 황색 형광체(Phosphor)를 이용한 백색 광 LED의 광 출력이 향상됨에 따라 일반 조명산업에서도 LED를 이용한 조명제품이 판매되고 있으며, 다양한 응용분

야에 적합한 배광각 제어의 필요성이 높아지고 있다.^[2, 4] 조명 기구의 배광은 2차 광학계라고 불리는 반사컵, 렌즈, 확산 판 등을 이용하여 제어하는 것이 일반적이지만,^[3] 본 논문에서는 반사컵의 설계를 통한 배광각 제어에 국한하여 최적화하는 방안을 논의하고자 한다.

기존 LED 조명의 광학 설계에서 LED에서 방출되는 빛은 모델링의 용이성을 위해 램버시안(Lambertian) 배광을 갖는

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr

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

점 광원 또는 면 광원으로 가정하여 설계하여 왔다. 기존의 모델링 방식은 LED 표면에서 전방 확산형으로 빛이 방출되기 때문에 실제와는 차이가 있지만, LED 패키지의 광학소자 크기가 LED에 비하여 상대적으로 크기 때문에 큰 문제가 없었다. 그러나, 최근 LED 패키지는 출력이 높아짐에 따라 칩 크기는 커지고, 패키지의 크기는 점점 소형화 되고 있기 때문에 광학계 설계에 심각한 오차가 발생할 수 있다.⁶⁾ 또한, 칩이 상대적으로 커지면서 칩 표면으로 나오는 광자들의 분포에 의한 계산 결과의 오차도 발생한다.

본 논문에서는 LED 패키지의 반사컵을 이용한 배광 제어에서 배광 분포의 설계오차를 줄이기 위하여, LED 칩 표면상의 광량 분포 변화에 따른 반사컵의 배광 특성 변화 경향성을 분석하였다. 또한, 배광 분포의 조절이 용이한 2단 반사컵 설계 기법을 이용하여 다양한 배광 분포의 최적화를 도출하였다. 이와 같은 결과는 LED 조명의 모델링 및 광학계 설계에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. LED 칩 표면 광량 분포에 따른 반사컵의 배광 변화

2.1. LED 패키지 모델링 조건

LED 조명 설계에서 반사컵을 이용한 배광 조절 방법은 다수의 LED에 하나의 반사컵을 이용하는 전체형 반사컵 방법과 개별 LED 반사컵을 이용하는 개별형 반사컵 방법이 있다.^{1), 5)} 현재 개발되는 LED 조명들은 다수의 LED를 평면상에 배열하고 반사컵과 렌즈를 통해서 배광을 조절한다. 이러한 조명 구조에 전체형 반사컵을 적용하면 반사컵의 높이 제한과 배광 분포에 어둡해진 부분(Dimmed zone)이 생길 우려가 있어 개별형 반사컵을 이용하는 추세이다. 따라서 본 논문에서는 개별형 반사컵 설계를 통한 배광 분포를 확인하였다. 또한, 개별형 반사컵 설계는 크기가 소형이기 때문에 LED 칩의 모델링 방법에 따라 배광 분포 계산 결과가 달라진다. 앞에서 언급한 바와 같이 LED는 점 광원, 면 광원, 체적광원으로 모델링 할 수 있다. 점 광원, 면 광원, 체적 광원 순서로 모델링 방법이 복잡하고 계산 시간도 오래 걸리지만, 계산 정확도는 그 반대 경향성을 가진다. 개별형 반사컵의 설계에서 칩의 크기를 고려하면 LED를 점 광원으로 모델링하는 것은 무리가 있다. 본 논문에서 LED 칩은 램버시안 배광을 갖는 면 광원으로 모델링 하고, LED 칩 표면의 광량 분포를 고려하였다. LED 칩 표면의 전극 패턴에 의해 MQW (Multi-quantum well)에 흐르는 전류밀도가 위치에 따라 다를 수 있고, 이것은 MQW에서 발생하는 광자의 세기 분포에 영향을 주는 상황을 고려하여, 방사 분포는 단순한 램버시안으로, 세기 분포는 여러 경우를 비교하고자 하였다. 그림 1은 본 논문에서 시뮬레이션에 사용된 LED 패키지의 구조와 반사컵의 구조에 따른 설계 변수를 나타낸다. 패키지 구조에 의해 이미 정해진 변수를 제외한 반사컵의 설계 변수는 직선형 반사컵의 경우 경사면의 각도(θ_L)와 높이(H)이고, 포물선형 반사컵의 경우 높이(H), CPC형 반사컵의 경우 높이와 반

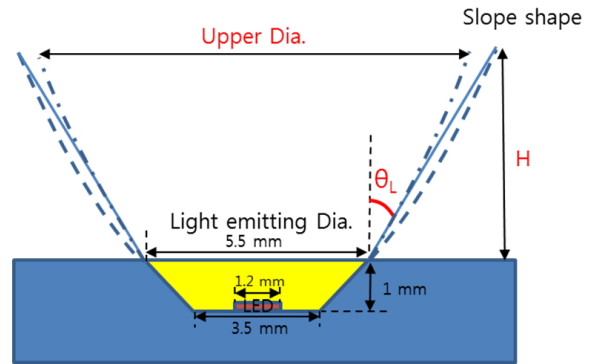


FIG. 1. The LED package and reflector structure.

사컵 상단부 직경(Upper dia.) 이다.

예로 제시하는 LED 칩의 크기는 1.2 mm × 1.2 mm 이며, 높이는 0.15 mm 이다. 패키지의 발광부 직경(Light emitting diameter)은 5.5 mm로 두고, 반사경의 코팅은 일반적으로 많이 이용되는 아노다이징(Anodizing) 알루미늄 코팅을 적용하여 무한 원시야 수신기(Far field receiver)를 이용하여 총 300만 광선을 분석 수행하였다. 아노다이징 알루미늄은 가시광선 영역에서 평균적으로 96%의 반사율을 가지고 있으므로, 본 논문에서는 기준파장 445 nm에서 알루미늄의 반사율을 고려하여 90% 로 하였다.

2.2. 반사컵을 이용한 배광 제어

이와 같이 모델링 된 LED 패키지에 반사컵을 적용하였다. 반사컵에 의한 배광 분포 변화는 반사컵의 구조에 의한 각도와 경사면의 구조를 통해서 예측 가능하다. 반사컵에 의한 반사가 한번만 일어나는 구조에 대해서, LED 패키지를 통해서 나온 빛은 그림 2(a)에 표시된 것과 같이 패키지를 나오는 각도에 따라 분류할 수 있다. 각도 α_1 보다 큰 각도로 나온 빛은 반사컵을 통해서 제어가 가능하므로, 이를 제어각도 영역이라 명칭 하였고, 각도 α_2 보다 작은 각도로 나온 빛은 반사컵을 통해서 제어가 불가능하므로, 이를 무제어 각도 영역이라 칭하였다. α_1 과 α_2 사이의 각도로 나온 빛은 그 위치에 따라 부분적으로 제어 가능하므로, 혼합 각도 영역이라 칭하였다. 혼합 각도 영역의 경우 α_1 에서 α_2 로 갈수록 제어 가능한 빛의 양은 줄어든다.

따라서 제어 각도와 혼합 각도의 반사 각도를 계산하면 배광 분포의 예측이 가능하다. LED 패키지에 반사 각도의 계산이 쉬운 직선형 반사컵을 적용하여 계산된 배광 분포를 그림 2 (b)에 나타내었다. 적용한 반사컵의 높이는 4 mm, 경사면의 각도 θ_L 은 45도이며 LED의 표면 광량 분포는 균일하게 설정하였으므로 반사컵의 설계 변수에 의하여 α_1 은 67.2도, α_2 는 45도로 계산된다. 경사면의 각도를 α_r , 패키지를 빠져 나오는 빛의 방출 각도를 α 라고 하면, 패키지 수직 방향에 대한 반사컵의 반사 각도는 $2\alpha_r - \alpha$ 이므로, 각도 α_1 으로 나온 빛은 45도 경사면에 대해 주로 22.8도로 반사된다. 본 전산모사에서는 수신기를 3도 각도로 분할 설정하여 나타냈으므로 시작

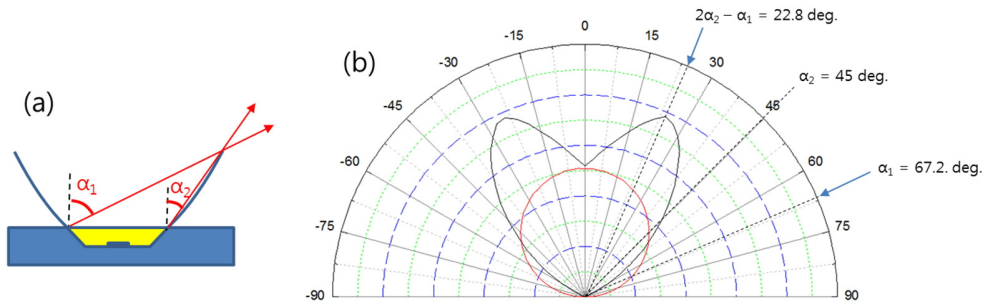


FIG. 2. (a) Specific angles depending on the structure of LED Reflector (b) Intensity profile from the linear reflector.

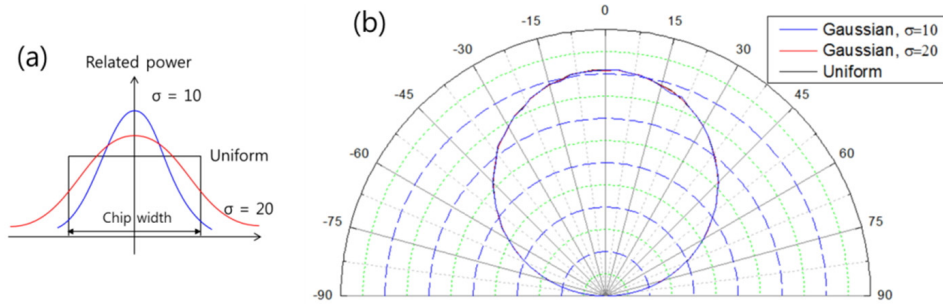


FIG. 3. (a) The light intensity distribution of the LED surface (b) Intensity profile of the light output from LED package.

부 수신각도 21도에서 최고 광도가 기록되었다. (67.2도 ~ 90도) 방향으로 방출되는 빛은 반사컵의 제어각도 영역에 해당하므로 방출 표면 위치에 무관하게 반사컵을 통해 방출각 (22.8도 ~ 0도) 이내로 제어된다. 혼합 각도 영역인 (67.2도 ~ 45도) 방향으로 방출되는 빛은 혼합 각도 영역에 해당하므로 일부는 반사 제어 되고, 일부는 단순 방사되어 (22.8도 ~ 45도) 각도 영역으로 방출된다. 혼합 각도 영역의 경우 67.2도 방출광 보다 45도 방출광의 경우가 될수록 반사컵을 통해 제어 가능한 광량이 줄어들기 때문에 배광 분포에서는 22.8도에서의 세기가 가장 크게 됨을 정성적으로도 추론할 수 있다.

2.3. 칩 표면 광량의 분포 변화에 따른 배광 특성 변화

이제 모델링 된 LED 칩 표면상의 광량 분포 변화에 따른 배광 분포 변화를 확인하기 위해 그림 3(a)와 같이 광량 분포를 균일한 분포와 가우시안 분포($\sigma = 20, 10$)로 가정하였으며, 각각의 분포에 대하여 총 광량은 동일하다. 표면 광량 분포 조절용 메쉬의 크기는 51×51 이며, 가우시안 분포에서 σ 값은 메쉬의 크기를 나타낸다. 반사컵을 적용하기 전, 표면 광량 분포에 따른 패키지의 배광 분포를 그림 3(b)에 나타내었다. LED 패키지의 봉지재가 평면형(Flat-Top) 이기 때문에 패키지의 배광은 램버시안이다. 이것은 제작된 LED 패키지의 측정 결과와 같다. 표면 광량 분포가 변화하여도 패키지의 배광 분포는 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 모델링 된 LED 패키지에 반사컵을 적용하여 배광 분포 변화를 살펴보았다. 반사면은 직선형과 포물선형, CPC(Compound Parabolic Concentrator)형 구조를 적용하였다. 직선형과 CPC형 반사컵의 방사각은 $60(\pm 30)$ 도, 포물선

형 반사컵의 방사각은 $45(\pm 22.5)$ 도로 설계하였다. 반사컵의 설계 변수 값과 그 배광 분포 변화를 그림 4에 나타내었다.

그림 4(a)의 직선형 반사컵의 경우 α_1 은 64.2도, α_2 는 34.78도이다. 제어 각도 영역(64.2도 ~ 90도)에 해당하는 반사 각도는 (-20.44도 ~ 5.34도)영역이며, 혼합 각도 영역(64.2 ~ 34.78도)에 해당하는 반사 각도는 (5.34도 ~ 34.78도) 영역이다. 따라서 (-20.44도 ~ 34.78도)와 (-34.78도 ~ 20.44도) 영역으로 반사되는 빛의 중첩으로 전체 배광 분포가 형성된다. 또한 LED 칩 표면 광량 분포가 가우시안 분포로 변해가면서 최대 세기 증가로 인해 방사각이 줄어들었다. 포물선형 반사컵은 광량 분포에 의해 초점에서 방사되는 빛이 많아지기 때문에, 배광 각도 0도 근방의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 CPC형 반사컵은 표면 광량분포가 가우시안으로 변하면서 균일도가 일부 좋아지다가 급격히 변하는 것을 볼 수 있다. 포물선의 축이 기울어져 있는 구조인 CPC형 구조는 반사되는 광선이 0도를 기준으로 반대 방향의 배광을 형성하는 교차형(Crossed) 구조이기 때문에, 그림 4(c)에서 보는 것과 같이 패키지 중심에서 나온 빛은 반사컵에 반사되어 배광 분포의 20도 근방으로 방사되며, 방출면 외각에서 나온 빛은 0도와 30도 근방의 두 각도영역으로 나뉘어 방사되므로. 전체적인 배광 분포는 균일하게 된다. 표면 광량분포가 가우시안으로 변하면서 중심부에서 나오는 빛의 양이 많아져 20도 근방으로 향하는 빛이 많아진 것을 볼 수 있다.

결론적으로 각각의 표면 광량 분포에 대하여 패키지의 배광 분포는 램버시안이더라도, 반사컵 적용 후 배광 분포가 크게 달라진 것을 확인하였다. 각각의 반사컵 구조에 대하여 배광 분포의 변화를 통해서, 최대 광도의 증가 원인은 혼합

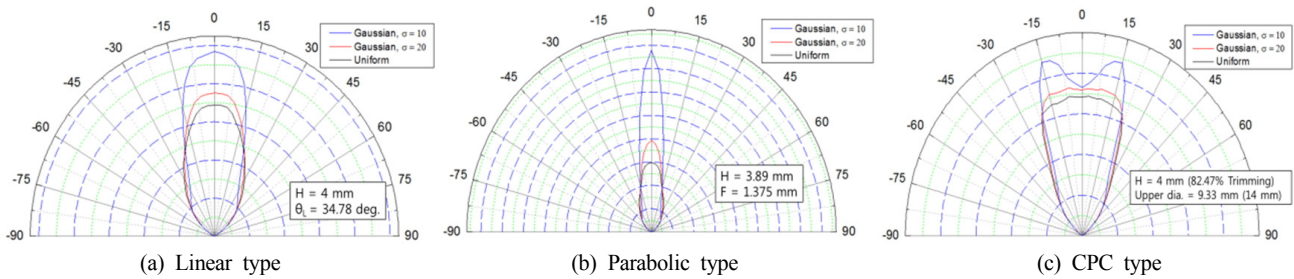


FIG. 4. The intensity profile from LED reflectors as a function of the light intensity distribution of LED chip surface for each bottom structure.

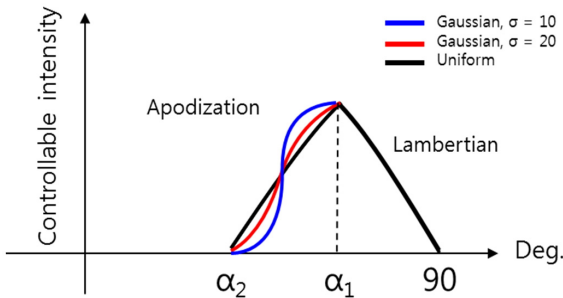


FIG. 5. Controllable intensity portion of LED reflector as a function of output ray angle from the LED package.

각도 영역에서 제어 가능 광량의 변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉, 표면 광량 분포의 변화에 의해 혼합 각도 영역에서 각도에 따라 제어 가능 광량 분포가 변화한 것이다. 각각의 표면 광량 분포에 대하여 방출 각도에 따른 제어 가능 광량을 그림 5에 나타내었다. ($\alpha_1 \sim 90^\circ$) 영역은 제어 각도 영역에 해당하며, 제어 광량은 패키지의 배광 분포에 의하여 결정된다. 따라서 ($\alpha_1 \sim 90^\circ$) 영역의 제어 광량은 램버시안인 것을 볼 수 있다. ($\alpha_2 \sim \alpha_1$) 영역은 혼합 각도 영역에 해당하며, 제어 광량은 LED의 표면 광량 분포에 영향을 받는다. 따라서 표면 광량 분포가 달라짐에 따라 혼합 각도 영역의 제어 가능한 광량이 변화하여 배광 분포에 영향을 준 것이다. 패키지 중심에서 방출된 빛이 반사컵에 의해 제어되는 각도(α_{center})는 혼합 각도 영역의 두 각도(α_1, α_2) 내에 존재한다. 표면 광량분포를 가우시안으로 설정한 경우 LED 칩의 중심부에서 더 많은 광선이 방출됨을 의미하기 때문에, ($\alpha_{center} \sim \alpha_1$) 영역의 제어 가능 광량은 상대적으로 많아지며, ($\alpha_{center} \sim \alpha_2$) 영역의 제어 가능 광량은 상대적으로 줄어든다. 제어 가능 광량이 S자가 되는 이유는 표면 광량분포를 가우시안으로 설정했기 때문이며, $\sigma = 10$ 인 경우가 상대적으로 더 많은 빛이 중심에서 나오는 것을 의미하므로, 제어 광량에서 더 큰 진폭 변화를 보인다.

III. 2단 반사컵의 최적 설계

앞에서 살펴본 바와 같이, 반사컵을 이용한 배광 분포의 제어는 반사컵의 폭과 높이, 경사면 구조 등을 통해서 조절

가능하다. 다수의 LED를 평면상에 배치 하는 LED 조명에서는 각 LED 간의 간격에 의해 반사컵의 폭이 제한된다. 또한, LED 발광부 직경 보다 반사컵 높이가 큰 경우 암흑 영역이 발생할 수 있기 때문에 반사컵 높이의 제한이 있다. 하지만, 반사컵의 높이가 낮으면 제어 가능한 빛의 양이 줄어들어 배광 분포의 조절이 어려워진다. 따라서 LED 배열에 의해 반사컵의 설계 변수가 제한되기 때문에 배광 분포의 설계를 위하여 반사컵의 구조나 크기 등을 변경하기가 쉽지 않다.^[7] 제한하는 높이 분할 방식의 반사컵 설계 기법은 기존의 설계 크기 제한에 거의 영향을 받지 않고 배광 분포 변화를 조절할 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 가장 간단한 방법으로 2단 분할 반사컵을 이용하여 배광 분포 조절을 하였다. 반사컵을 높이에 따라 2단으로 분할하여 하단부는 기존의 구조를 그대로 이용하고, 상단부를 직선형으로 설계하여 경사면의 각도를 조절함으로써 배광 분포를 조절하였다. 2단 분할 설계만으로 다양한 형태의 배광 분포 제어가 가능한 것을 보이기 위해 각 구조에 대한 상단부 직선형 반사컵의 경사면 각도 조절에 따른 배광 분포 변화를 그림 6에 나타내었다.

각 그래프에 표시된 부분은 단일 구조의 배광 분포 계산 결과로, 그림 4에서 LED 칩의 표면 광량 분포가 가우시안($\sigma=10$)인 경우를 나타낸다. 하단부 구조는 (a) 직선형, (b) 포물선형, (c) CPC형이다. 먼저 (a)의 경우 표시된 단일 경사 구조의 경사면 각도는 35도이며 배광 분포는 비교차형(Uncrossed)으로 반사컵에 의해 제어된 광선은 주로 $\pm 5^\circ$ 근방으로 반사된다. 앞에서 언급한 바와 같이 반사 각도는 $2\alpha_r - \alpha$ 이다. 상단부 경사면 각도를 작게 하여 경사면을 세우면 ($\theta_L : 26^\circ \sim 32^\circ$) 기존의 반사된 광선이 0도 근방으로 향하는 것을 볼 수 있다. 상단부 각도를 더 작게하면 반사 각도가 마이너스 방향으로 더 커지므로 반대방향으로 반사되어 교차형 구조가 되는 것을 볼 수 있다. 반대로 상단부 각도를 크게하여 경사면을 낮추면 반사 각도가 플러스 방향으로 더 커지며, 이것은 비교차형으로 반사각이 커지는 것을 의미한다. (a)에서 표시된 단일 경사면의 왼쪽 결과는 비교차형과 교차형을 혼합한 경우에 해당한다. 특히 상단부 각도 조절을 통해서 반사각도가 0도로 향하면 단일 경사의 경우보다 최대 광도가 크게 설계할 수 있다. 반면에 포물선과 직선의 혼합인 (b)의 경우 단일 포물선의 경우보다 최대 광도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 포물선의 특성상 반사면에 의해 반사된 빛은 시

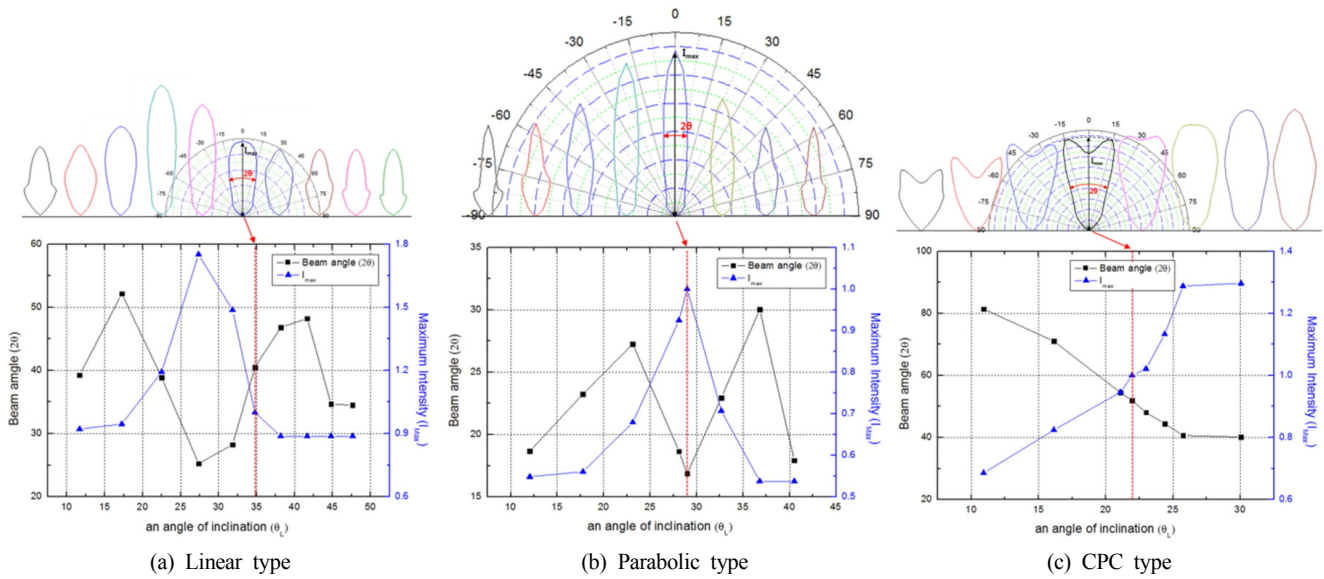


FIG. 6. The beam angle and maximum intensity as a function of the upper inclination angle for each bottom structure.

준(collimation)되기 때문에 상단부 각도를 조절하면 최대 세기는 줄어들 수 밖에 없다. CPC 경우 반사된 빛은 약 ± 20도 부분으로 반사되며 교차형 구조이다. 상단부 각도가 작아지면 빛을 마이너스 방향의 더 큰 각도로 반사하며, 상단부 각도가 커지면 반사 각도는 0도를 지나 비교차형으로 변한다. CPC의 경우 6~7번째 배광 분포와 같이 상단부 경사면의 각도를 25도보다 크게 설계하였을 때 비교차형 구조가 된다. 하단부 교차형과 상단부 비교차형의 혼합을 통해서 최대 세기를 높이거나 균일도를 향상시킬 수 있었다.

IV. 결 론

LED 칩 표면 광량 분포에 따라 LED 반사컵의 배광 분포 설계 결과가 다른 것을 확인하고, 다양한 기능성 설계가 가능한 2단 분할형 반사컵의 설계를 제안하였다. 배광 분포가 같은 LED 패키지의 칩 표면 광량 분포 변화에 대하여 반사컵의 배광 변화 경향성을 분석한 결과, 반사컵의 배광 변화는 혼합 각도 영역의 제어 광량 변화에 의한 것으로 확인되었다. 따라서 LED 조명의 광학설계에 있어서 LED 칩 표면상의 광량 분포를 고려해야 신뢰할 수 있는 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 제안된 2단 분할 반사컵은 높이에 따라 상단부와 하단부로 나누고, 상단부 직선형 구조의 경사 각도를 조절하여 배광 분포를 계산한 결과, 하단부가 직선형과 CPC형인 경우 다양한 기능성 설계가 가능했다. 특히 상단부의 각도 조절을 통해서 교차형과 비교차형의 혼합으로 설계하였을 때, 단일 경사 구조보다 최대 세기를 크게 하거나 균일도를 보정할 수 있었다. 이와 같이 제안된 2단 분할 반사컵의 경우, 단일 반사컵 보다 다양한 기능성 설계가 가능하고 설계 방법이 간단하여 LED 조명의 광학설계에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

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).
7. H.-D. Yim, D.-J. Lee, Y. G. Kim, and B.-H. O, "Beam pattern analysis of led reflector design and simplification of the functional design," *Korean J. Opt. Photon.* (Hankook Kwanghak Hoeji) **23**, (2012) (To be published).