

# LED 2차 광학 시스템의 설계법 개발

(The Development of Secondary Optics Design Method for LED)

정승균\* · 석대일 · 신화영 · 이창모 · 김 훈

(Seung-Gyun Jung · Dae-II Seok · Hwa-Young Shin · Chang-Mo Lee · Hoon Kim)

## 요 약

기존의 LED 광학계의 설계법은 크게 점광원 가정법과 가초점 설계법이 있으나, 이 설계법들은 LED와 광학계간의 거리가 매우 좁아지게 될 경우 큰 오차가 발생하는 단점이 존재하였다. 본 논문에서는 LED를 등간적으로 분할하여 각부분의 배광을 예측하고, 광선의 역추적 기법을 활용하여 이에 대한 결과를 확인한 후 분할된 각 구간에 대하여 세그먼트의 개별적인 설계를 통하여 오차를 감소시키는 새로운 설계법을 제시한다. 설계법의 설명이후에 2종의 예시 광학계를 설계하고 광학 성능 예측 프로그램을 통하여 배광과 광학 효율을 평가하였다.

## Abstract

Design methods of LED optic system includes point source assumption and imaginary focus approaches. However, these methods make significant error if the position of LED approaches that of optic system. This paper suggests a new design approach that LED is equally divided, light distribution of each division is predicted and confirmed through reverse tracing of light wave, and then each divided segment is separately designed, Using new design method, two kinds of example optic system were designed and light distribution and efficiency of the systems were evaluated.

Key Words : LED, Optics, Lens, Prism, Focal smear

## 1. 서 론

LED에 대한 광학설계는 LED가 가지는 소형의 광원이라는 특성에 의해 LED를 점광원으로 가정하고 점광원에서 발산되는 각각의 광선에 대해 설계가 시행되는 점광원 가정법과 칩의 중심을 광학계의 초점

으로 잡지 않고 LED에서 나타나는 FOCAL SMEAR의 중심점을 기준점으로 택하여 설계하는 이른바 가초점법이 일반적으로 널리 사용되고 있다.

이러한 기존 설계법에 의한 설계는 LED가 점광원으로 가정할 수 있도록 LED와 광학계간의 거리가 충분히 멀어져 있을 경우에만 적용이 가능하며, 만약 이러한 충분한 거리의 조건을 무시하고 짧은 초점거리를 가지도록 광학계 설계가 이루어질 경우에는 큰 오차가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 LED 배광의 세밀한 분석을 통한

\* 주저자 : 강원대학교 전기전자공학과 박사과정  
Tel : 033-250-6290, Fax : 033-241-3775  
E-mail : sdi101@kangwon.ac.kr  
접수일자 : 2007년 3월 12일  
1차심사 : 2007년 3월 16일  
심사완료 : 2007년 4월 12일

광학계 설계법을 제안한다. LED의 1차 광학계를 등간격으로 세분화하여 나누고, LED의 각 세그먼트에서 발산하는 광선에 대한 배광 시뮬레이션을 통하여 각 부분의 배광을 예측, 분석 한 후 각각에 대해 최대 효율을 가질 수 있도록 광학계의 입사면을 결정하는 방식으로 설계를 진행하였다. 하지만 배광곡선의 광도만을 고려하는 설계법에서는 실제 최대 효율이 나오지 않을 수 있기 때문에 광도를 광속으로 변환하여 설계를 보완하고 결과에 대해 재분석하여 설계에 적용하였다. 논문의 결과로서 제시되는 예시 광학계들은 광학 성능 예측 프로그램인 PHOTOPIA와 ASAP을 이용하여 그 성능을 예측하고 배광곡선, 효율, 광선추적 등의 다양한 결과를 기존에 시판되고 있는 렌즈와 비교 분석하였다.

## 2. LED 광학계의 기본적 설계방법

### 2.1 기존 LED 광학계의 설계법

점광원 가정법은 광학계의 초점거리를 LED DIE 표면의 중심점으로 설정하고 LED 패키지의 발산형태는 이상적인 점광원으로 가정하여 설계하는 방법이며, 가초점 설계법은 focal smear라고 불리우는 초점영역의 중심점을 기준점으로 잡아 설계를 시행하는 방법이다.

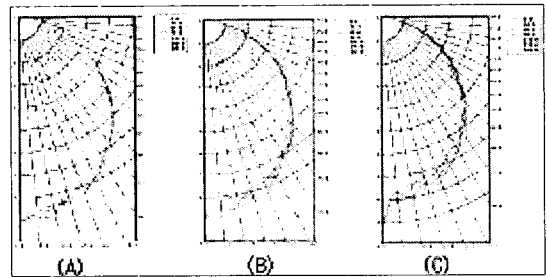
LumiLEDs사에서 제공하고 있는 몇 가지 LED 패키지 형태에 대한 최적의 focal smear의 중심점 즉, 가초점 값은 표 1과 같다[1].

표 1. 가초점 영역의 대표적인 예시  
Table 1. Example of the LED's focal smear

POSITION OF POINT SOURCE FOR SUPERFLUX LEDs	
SUPERFLUX LED PART NUMBER	Position of Point Source "Z" (mm)
HPWA-Mx00	1.03
HPWA-Dx00	1.13
HPWT-Mx00	0.99
HPWT-Dx00	1.17

이상과 같은 이론을 바탕으로 LED 패키지 전용의 광학계를 설계하게 된다. 하지만 가초점법이나 기존의 점광원으로서 설계를 진행할 경우 렌즈와 LED

간의 초점거리가 짧아질수록 반사된 광선과 굴절된 광선간의 겹침 현상이 크게 발생하게 되고 어느 한 쪽만을 고려해서 설계를 진행하게 되면 오차가 발생하게 된다.



(A) LED 자체의 배광  
(B) LED를 점광원으로 가정 후 반구형 굴절체를 적용한 후의 배광  
(C) LED에 대해 적절한 가초점 거리에 반구형 굴절체를 적용한 후의 배광

그림 1. 기존 LED 광학계 설계법에 의한 오차의 발생  
Fig. 1. Errors by the existing LED optic system design

### 2.2 기존 설계법의 문제점

실제 LED 패키지의 발산형태는 점광원이 아니므로 점광원으로 가정 시 오차가 발생하게 되는데 이를 보이기 위하여 간단한 예를 제시한다. 점광원의 경우 원점에 광원을 배치시킨 후 반구형의 굴절체를 광원의 주위에 위치시키게 되면 배광이나 효율에 대하여 아무런 영향이 없이 빔이 외부로 출사할 수 있어야 한다.

하지만 실제 LED 패키지의 경우 점광원이라고 가정하기는 어려우며 LED 패키지에 매우 근접한 위치에 굴절체를 적용할 경우 오차가 발생한다.

그림 1에서 (A)의 배광 형태는 램버시안 배광의 LED가 가지는 자체의 배광형태이며 (B)는 LED를 점광원으로 가정한 후 반구형 굴절체를 거의 밀착시켜 적용하였을 경우의 배광형태이며, (C)의 경우는 정해진 가초점 거리에 따라 LED에 반구형 굴절체를 적용한 후의 배광 시뮬레이션 결과이다.

(A)와 같은 경우 배광이 완전확산의 형태에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있으나, (B)와 (C)는 배광의

## LED 2차 광학 시스템의 설계법 개발

일그러짐이 심하게 나타나는 것을 알 수가 있었다. 또한 LED DIE로부터 발산하여 EPOXY DOME을 통과한 LED 패키지의 광적출 효율이 거의 99.8[%]에 육박하는데 비해 가초점과 점광원으로 가정하여 적용한 굴절체의 경우 각각 약 94[%], 93[%] 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 결국 가초점 설계법과 점광원 가정 시 광학계가 LED에 근접하게 될 경우 오차가 발생하게 된다는 것을 의미한다.

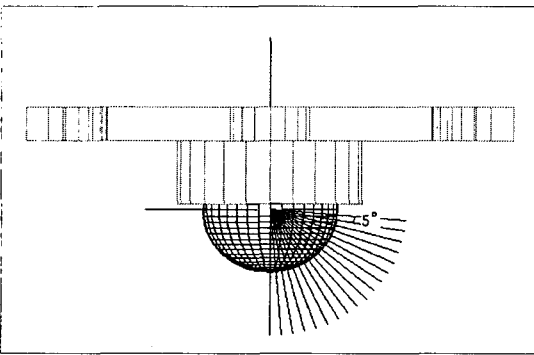


그림 2. LED의 등간격 분할 예시  
Fig. 2. Example of the LED's equal interval division

### 3. 광학계의 설계

#### 3.1 배광의 분할

가초점이나 점광원과 같이 하나의 초점을 가질 경우 발생하는 오차를 방지하기 위하여 LED 패키지의 분할 배광을 사용하여 설계를 시행하도록 한다.

예시 설계에 사용한 분할 배광은 등간격 5[°]로 설정하였다. 또한 분할된 간격의 시뮬레이션에 있어서 80[°] 이상의 영역에서는 LED DIE에 의한 광속이 거의 존재하지 않아 광학계 설계에 있어서 영향을 거의 미치지 못하기 때문에 그림 2와 이하의 표에서는 값을 생략하였다.

이 때 측정된 광도만을 기준으로 설계를 진행하는 것이 아니라 각 각도에 따른 최종적인 광속을 고려하고, 각각의 결과에 대한 역 광선추적 후에 최대 발산 광선을 찾아내어 설계를 시행한다. 광도가 아닌 광속을 고려하는 이유는 광도는 빛 에너지양인 광속

을 입체각으로 나눈 값으로서 고려되기 때문에 발산되는 빛의 각도에 따라 동일한 광도일 경우에도 최종적인 빛 에너지인 광속은 다르게 나타나기 때문이다.

광도를 광속으로 변환하기 위해서 분할 배광 시물레이션을 거친 후 얻은 광도 데이터에 구대계수를 곱하여 광속을 산출해낸다.

구대계수(ZF)는 다음의 수식으로 정의된다[2].

$$ZF = 4\pi \sin\left(\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\gamma_2 + \gamma_1}{2}\right) \quad (1)$$

$$= 4\pi \sin 5^\circ \sin \gamma_{AV}$$

$\gamma_1$  = 고려할 zone의 low angle

$\gamma_2$  = 고려할 zone의 upper angle

$\gamma_{AV}$  = 고려할 zone의 중간 각의 광도 값

식을 사용하여 산출한 LED 패키지의 각 구간에 대한 최대 광속과 각도는 다음의 표 2와 같다. 분할된 각도에 따라 광속이 존재하지 않는 영역도 있으므로 표 2에는 광속이 존재하는 부분만을 표기하였다. 또한 표 2는 광도를 광속으로 변환한 값이기 때문에 구대계수에 의해 각도에 따라 광도는 증가하지만 광속은 감소하는 구간이 존재한다.

이러한 far-field geometry 상의 결과는 LED 패키지 와 같이 매우 작은 형태의 광원에 그대로 적용하는 것에는 실제 결과와 부합되지 않을 수가 있기 때문에 역 광선추적을 통하여 LED 패키지로부터 발산하는 광선들을 조사하고 실제로 가장 많이 분포하는 각도의 광선을 골라내어 광속 값에 의한 결과와 얼마나 부합되는지를 비교하여 보았고, 그 결과 미세한 차이 이외에는 큰 오차가 없다는 결과를 얻어낼 수 있었다.

#### 3.2 세그먼트의 설계

##### 3.2.1 굴절부의 설계

광학계의 세그먼트는 크게 두 가지 성질을 가지고 있으며 첫번째 성질은 굴절의 성질이다. 빔이 어떠한 경계로 입사된 입사빔 i와 빔을 보내고자

하는 목표 수직각을 알고 있을 때 출사면의  $i$ 를 구할 수가 있다. 굴절부는 다음의 수식으로서 설계되어진다.

$$i = \tan^{-1} \frac{\mu_2 \times \sin(\alpha - 180)}{\mu_1 - \mu_2 \times \cos(180 - \alpha)} \quad (2)$$

- $i$  : 출사면에 대한 입사각
- $\alpha$  :  $180 - i$  + 보내고자하는 수직각
- $\mu_1$  : 매질1의 굴절률
- $\mu_2$  : 매질2의 굴절률

표 2. 등간격 분할된 구간의 광속값과 그에 대한 지향각  
Table 2. Luminous Flux and angle of the each interval

분할된 구간	광속[lm]	광속의 각도
0~5[°]	0.094803	10[°]
5~10[°]	0.227527	10[°]
10~15[°]	0.395645	15[°]
15~20[°]	0.227527	10[°]
20~25[°]	0.553746	25[°]
25~30[°]	0.600543	30[°]
30~35[°]	0.688914	35[°]
35~40[°]	0.772043	40[°]
40~45[°]	0.772087	45[°]
45~50[°]	0.836441	50[°]
50~55[°]	0.973978	60[°]
55~60[°]	0.822874	55[°]
65~70[°]	0.880738	65[°]
70~75[°]	0.779795	70[°]
75~80[°]	0.61172	75[°]

출사면에 대한  $i$ 를 알아냄으로써 출사면의 세그먼트 기울기를 알아낼 수가 있다. 하지만 굴절은 입사각이 임계각을 넘을 경우 전반사가 일어나게 되며, 위의 식은 구하여진  $i$ 가 임계각 이하일 경우에만 적용이 가능하다. 따라서  $i$ 가 임계각 이상이 될 경우 전반사에 관련된 식을 적용하여야 하며, 임계각에 대한 식은 다음과 같다.

$$CA = \sin^{-1} \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (3)$$

- CA = 출사면에 대한 임계각
- $\mu_1$  = 매질 내부의 굴절률
- $\mu_2$  = 매질 외부의 굴절률  
(일반적으로 공기의 굴절률)

### 3.2.2 전반사부의 설계

전반사는 (2)의 식을 사용하였을 때 출사면에 대한 입사각  $i$ 가 임계각을 넘어가게 될 경우 사용이 가능하며 다음의 식으로 적용할 수 있다.

$$A = \frac{i+r}{2} \quad (4)$$

- A : 수직선에 대한 세그먼트의 기울기
- $i$  : LED에서 발산된 광선이 수직면에 입사할 때의 입사각
- $r$  : 목표로 하는 수직각 + 90

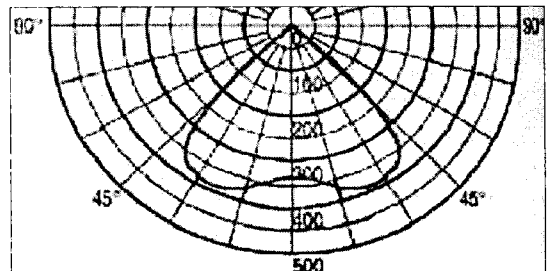


그림 3. 예시설계에 사용된 배광분포 그래프  
Fig. 3. Light distribution of the example design

## 4. 광학계의 예시 설계

### 4.1 분산 광학계의 예시 설계

#### 4.1.1 설계의 목표

분산 광학계와 같은 경우 고효율을 만족시켜야 하며, 넓은 지역 즉, 현재 옥외 조명이나 실내조명에서 일반적으로 사용하는 것과 같은 가로등, 터널등, 다운라이트, 고천장등과 같이 넓게 퍼진 배광을 제공하는 기구를 실현 할 수 있다. 예시 설계에서는 현재

## LED 2차 광학 시스템의 설계법 개발

사용되고 있는 실내조명용의 다운라이트의 배광을 만족시키며 기구효율이 80~90[%] 이상을 유지할 수 있도록 설계를 시행하였다.

### 4.1.2 목표 배광의 설정

기준으로 한 배광곡선이 그림 3에 나타나 있으며, 배광곡선을 기준으로 하여 LED 패키지의 광속을 재분배하고 등간격으로 나뉘어진 영역의 담당 구간의 설정이 표 3에 나타나 있다.

B항은 광학계 목표배광에 대한 각 구간에서의 상대적인 광도 값이며, C항은 B항에 대한 상대적인 광속값이다. D항은 실제 LED 패키지에서 발산되는 광속값이며, E항은 C항의 총합과 D항의 총합의 비에서 발생하는 계수를 D항의 각항에 곱한 값이다. F항의 경우 E항의 광속값을 누적한 값이며, G항은 F항의 값에 따라 LED 패키지의 광속을 목표배광에 맞도록 재분배하여 각 세그먼트의 담당구역을 정한 것이다.

표 3을 바탕으로 제시된 수식을 적용하여 세그먼트의 기울기를 설정하고 각 세그먼트를 결합하여 완성한 광학계의 형상을 그림 4에 보이고 있다.

표 3. LED 광속의 재분배  
Table 3. Redistribution of luminous flux from LED

A	B	C	D	E	F	G
수직각	경도(unscaled)	각도(unscaled)	LED의 광속	계수를 곱한 광속값	LED의 누적 광속값	세그먼트의 담당구역
0-5	27	0.84595426	0.22831	0.407238547	0.407238547	0-5
5-10	27	1.931748722	0.74878	1.33609688	1.74284195	0-10
10-15	30	3.593158337	0.74878	1.33609688	3.07893883	5-10
15-20	34	5.804195107	1.917195	3.418700722	6.498166445	5-15
20-25	38	7.970937882	2.105711	3.758965711	10.25411316	10-20
25-30	40	10.12406714	2.651588	4.72895353	14.98318851	15-20
30-35	38	11.19153214	2.875032	5.128194578	20.11198306	15-25
35-40	30	10.01054698	3.089444	5.510841283	25.62260495	20-25
40-45	25	9.257896287	3.148895	5.616840112	31.23928836	25-30
45-50	0	0	3.057385	5.471284825	36.71059288	25-40
50-55	0	0	3.230393	5.78261894	42.47263498	30-40
55-60	0	0	2.638089	4.812589186	47.28523417	35-40
60-65	0	0	2.542126	4.53430146	51.81962431	35-40
65-70	0	0	2.050531	3.67532145	55.47175846	35-45
70-75	0	0	1.618471	2.898865723	58.36402318	40-45
75-80	0	0	1.031407	1.928905686	60.29292885	40-45
80-85	0	0	0	0	-	-
85-90	0	0	0	0	-	-
총합	-	30.23696365	33.802169	60.29292885	60.29292885	-

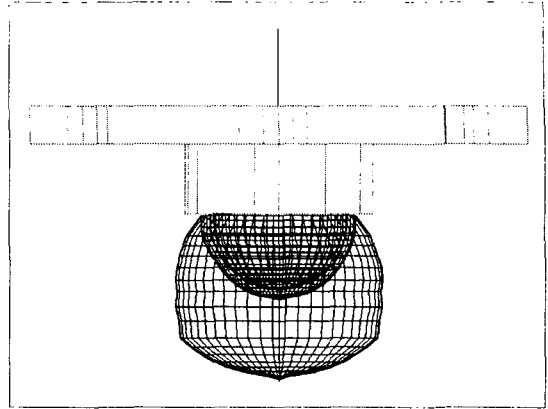


그림 4. 완성된 광학계의 형상  
Fig. 4. Optical system for light distribution of fig. 3

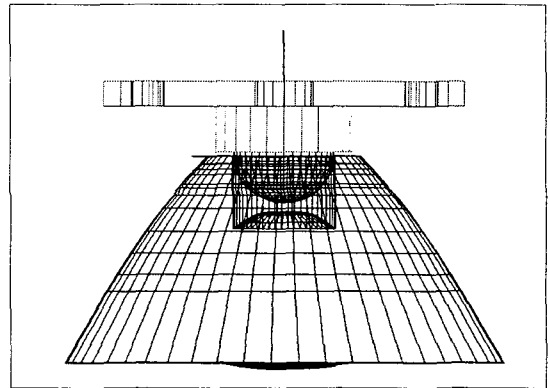


그림 5. 완성된 집광 광학계의 형상  
Fig. 5. Designed optical system for spot light

## 4.2 집광 광학계의 예시 설계

### 4.2.1 설계의 목표

집광 광학계는 실제 시판되고 있는 제품들도 많이 존재하며 예시설계에서는 이와 같은 현재 시판 렌즈와 성능을 비교 분석하기 위해서 렌즈 형태와 부피를 기존 시판렌즈와 거의 동일하게 유지하면서 각 세그먼트의 기울기를 새로운 설계법을 적용하여 성능을 향상시키는 것을 목적으로 하였다.

설계에 사용한 LED 패키지의 배광과 종류는 앞에서 분할배광을 실시한 LED 패키지를 다시 활용하여 설계를 진행하였다.

완성된 광학계의 형상을 그림 5에 보이고 있다.

## 5. 설계 결과와 검증

### 5.1 분산배광 광학계의 설계결과

광학계 전체에 대한 실제적인 성능을 분석하기 위하여 광학성능 예측 프로그램인 PHOTOPA를 사용하여 광학계의 전체적인 배광과 효율 등을 분석한 결과 목표로 했던 효율 80[%]이상을 만족하며, 배광의 형상 또한 만족스럽게 나타났다. 그림 6에 설계한 광학계의 성능을 나타내었다.

### 5.2 시판 렌즈의 구현

비교를 위해 사용되는 시판 렌즈는 현재 유럽에서 설계 및 제작되어 국내로 수입되는 제품으로 설계도면이 기본 제공 되고 있었기 때문에 도면을 3차원 측정기로 측정 하여 CAD로 실현하였다.

분할배광을 시행한 광학계와 시판렌즈 간의 성능을 비교분석하였다.

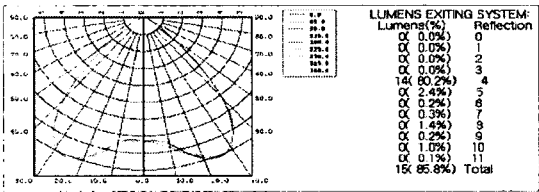


그림 6. 분산 배광 광학계의 배광분포그래프와 효율  
Fig. 6. Light distribution diagram and efficiency of the optical system for completion

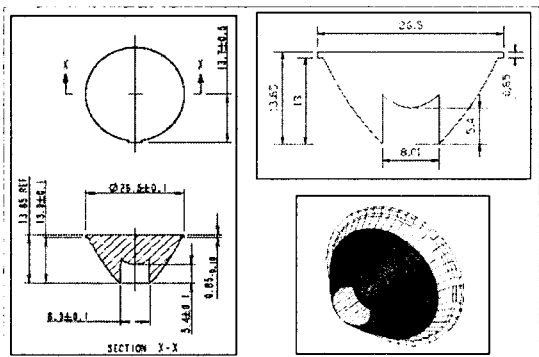
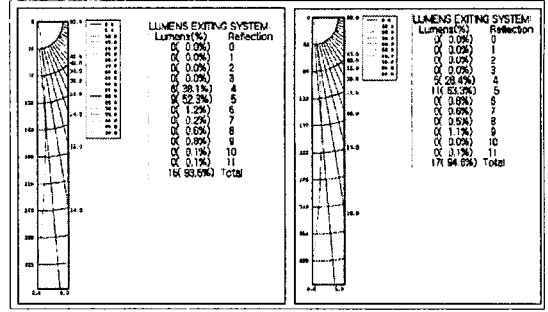


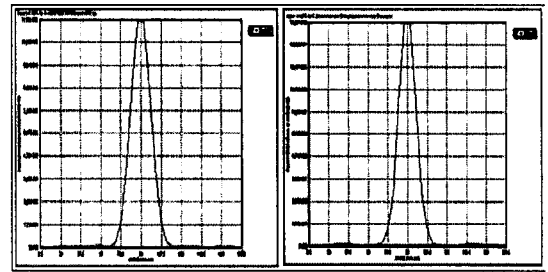
그림 7. 시판 중인 렌즈의 치수와 형상  
Fig. 7. Dimensions of the lens on the market



(a) (b)

그림 8. PHOTOPA 시뮬레이션 결과  
(a) 시판렌즈, (b) 새로운 설계가 적용된 렌즈

Fig. 8. Simulation results for PHOTOPA  
(a) lens on the market  
(b) new design lens



(a) (b)

그림 9. ASAP 시뮬레이션 결과  
(a) 시판렌즈, (b) 새로운 설계가 적용된 렌즈

Fig. 9. Simulation results for ASAP  
(a) lens on the market  
(b) new design lens

PHOTOPA와 ASAP을 이용하여 성능을 시뮬레이션 한 결과 0° 방향에서의 최대광도에서 시판 광학계의 최대광도는 325cd, 분할배광을 적용한 광학계의 최대광도는 399cd로 분할배광을 적용하여 설계를 시행한 광학계가 22[%] 정도 큰 광도값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 광학계의 효율도 약 1[%] 정도 향상되었다. 따라서 부피와 형상이 유사한 상태에서 빔각을 동일하게 유지시키면서 성능을 상당히 개선시켰음을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

LED는 소형의 광원이면서 개발의 여지가 많기 때문에 큰 장점을 가지는 광원이지만 그에 따라 광학계의 설계에 있어서 광원과 거리가 줄어들기 때문에 빔의 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 현재 LED에 적용 가능한 광학계의 설계법이 명확히 개발된 것이 없기 때문에 점광원을 이용하여 설계를 진행해 나가는 것이 일반적인 경우가 되고 있으며, 이에 따라 광학계에서 발생하는 많은 오차들이 예상치 못했던 결과들을 보이는 경우가 많았다. 따라서 본 논문에서는 부피를 가지는 광원으로서 LED 패키지를 보고 분할된 배광과 광선추적의 기법을 사용하여 LED 패키지 각 면의 세그먼트를 분리 설계하여 효율과 배광의 제어를 용이하게 하고 정밀한 제어가 이루어지도록 하였다. 또한 본 설계법을 이용할 경우 몇 개의 세그먼트로 나뉘어진 광학계가 광선추적법을 이용하여 결과물을 구성하기 때문에 광학계의 1차 설계 후 결과물에 대한 수정이 필요할 때 각 세그먼트가 담당하는 각도에 대한 광속의 파악이 용이하고 각 세그먼트면에 대한 수정이 간단하게 이루어질 수 있는 장점을 가지고 있는 것으로 사료된다.

예시로 설계한 광학계들을 평가해본 결과 설계법에 대한 성능은 상당히 만족할만한 결과를 얻어낼 수 있었음을 알 수 있었고, 이를 바탕으로 하여 앞으로 개발될 고효율 LED에 대한 광학설계를 통하여 보다 나은 조명환경을 구축할 수 있을 것으로 보인다.

## References

- [1] "Secondary Optics Design Considerations for SuperFlux LEDs", Lumileds사의 기술 자료, <http://lumileds.com>
- [2] R. H. Simons and A. R. Bean, "Light Engineering Applied Calculations", Plant a Tree, 2001.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 정승균 (鄭承均)

1981년 1월 10일생. 2007년 강원대학교 일반대학원 전기전자공학과 박사과정.

#### 석대일 (石大鎔)

1981년 1월 6일생. 2007년 강원대학교 일반대학원 전기전자공학과 박사과정.

#### 신화영 (辛華詠)

1950년 8월 17일생. 2005년 서울시립대학교 전자전기공학과 졸업(석사). 2007년 서울시립대학교 전자전기공학과 박사과정. 현재 한국전력기술인협회 회원지원처 처장.

#### 이창모 (李昌模)

1975년 2월 12일생. 2003년 강원대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 강원대학교 일반대학원 전기공학과 박사과정 수료.

#### 김 훈 (金 燾)

1958년 8월 6일생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년 호주 국립 대학 방문 교수. 현재 강원대학교 공과대학 전기전자 정보통신 공학부 교수.