

## 경사렌즈를 사용한 RGB LED전구 색혼합 향상

(Improvement of color mixing in an RGB lamp using tilted lenses)

강석훈\* · 임성무 · 송상빈 · 여인선

(Seok-Hoon Kang · Sung-Moo Lim · Sang-Bin Song · In-Seon Yeo)

### 요 약

본 논문은 RGB LED를 이용한 백색 전구의 색혼합 향상에 관한 것이다. RGB LED를 이용하여 전구를 설계하였을 경우, LED의 위치에 따라 광선의 진행 경로가 틀려 색혼합이 잘 되는 않는다. 따라서 각각의 LED에 경사렌즈를 씌워서 광선의 진행경로를 전구의 중심축으로 향하게 하여 주었다. 색혼합 정도는 MacAdam ellipse 이론을 이용하여 평가하였다.

### Abstract

This paper presents a method of improvement of color mixing in an RGB LED white lamp. The deviation from white light after RGB color mixing results mainly from the difference in the ray direction among LEDs. The authors propose a method using tilted lenses covered over each LED to deflect the overall direction of the ray generated from far-sited LEDs toward the center axis of the lamp. The degree of improvement is evaluated using a color discrimination method based on MacAdam ellipse.

Key Words : RGB LED white lamp, color mixing, tilted lens, MacAdam ellipse

## I. 서 론

최근 LED의 한계였던 휘도 문제가 크게 개선되면서 일반 조명용으로 이용되고 있다. LED를 이용하여 백색을 내는 방법에는 형광체를 사용하는 LED와 RGB LED를 이용하는 방법이 있다. 전자의 방법을 이용하는 방법은 청색, 자외선 LED에 YAG와 같은 형광체를 이용하는 것인데 형광체에 의한 광출력의 손실이 생기는 단점이 있다. 이에 반해 RGB LED는 형광체를 쓰지 않기 때문에 형광체에서의 광출력

손실이 없는 장점이 있다. 그렇지만 RGB LED를 이용하여 전구를 설계하였을 경우, LED의 위치에 따라 광선의 진행 경로가 틀려 색혼합이 잘 되는 않는 단점이 있다. 따라서 이 논문에서는 LED에서 나오는 광선들의 진행경로를 바꾸어서 광색 혼합을 시켜 주기 위하여 경사 렌즈를 이용하였다. 실험은 광학 설계프로그램인 LightTools를 이용하여 시뮬레이션 하였고 MacAdam ellipse이론을 이용하여 광색 혼합 정도를 살펴보았다.

## II. 본 론

### 1. 광색혼합 저해 요인

LED는 직진성이 강하며 발산 각에 따른 In-

\* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 석사과정  
Tel : 062-530-0744, Fax : 062-530-1749  
E-mail : seokhoon@moiza.chonnam.ac.kr  
접수일자 : 2003년 12월 5일  
1차심사 : 2003년 12월 8일  
심사완료 : 2004년 1월 2일

tensity의 차가 크고, 현재 개발된 청색 LED는 적색이나 녹색 LED에 비해 상대적으로 광 출력이 낮은 단점이 있어 RGB LED를 이용하여 전구를 제작하면 광색 혼합이 잘 이루어지지 않는 경우가 있다. 광색 혼합 저해 요인으로는 LED의 배치구조(간격, 개수), 발산각, 광속, 파장등 여러 가지가 있는데 이를 MacAdam ellipse이론을 통하여 알아보았다.

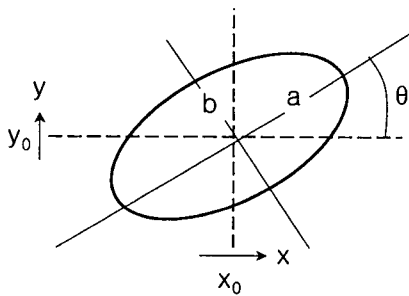


그림 1. 타원의 변수  
Fig. 1. Ellipse parameter

MacAdam 이론은 측정된 색 좌표가 인간의 눈으로 보았을 때 기준 색 좌표에 동일한 색으로 보이는지를 평가해주는 이론이다. 그림 1과 같이 중심좌표  $x_0, y_0$ 에 대해서 장축에 길이가  $a$ 이고 단축에 길이가  $b$ 이고  $x$ 축에 대한 장축의 각도가  $\theta$ 이다.  $a, b, \theta$ 는 각 측정점에서 측정된 색좌표의 중심을 구한 후, 측정점의 중심좌표에 대한 MacAdam observer PGN에 의해 구할 수 있다[1].  $a, b, \theta$ 를 이용하여  $g_{11}, g_{12}, g_{22}$ 를 구하고

$$\begin{aligned}
 g_{11} &= \frac{1}{a^2} \cos^2 \theta + \frac{1}{b^2} \sin^2 \theta \\
 g_{12} &= \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \sin \theta \cos \theta \\
 g_{22} &= \frac{1}{a^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{b^2} \cos^2 \theta
 \end{aligned} \tag{1}$$

아래 식을 이용하여 타원을 구할 수 있다.

$$g_{11}(dx)^2 + 2g_{12}dxdy + g_{22}(dy)^2 = h \tag{2}$$

(단,  $h$ 는 확률에 대한 상수 값)

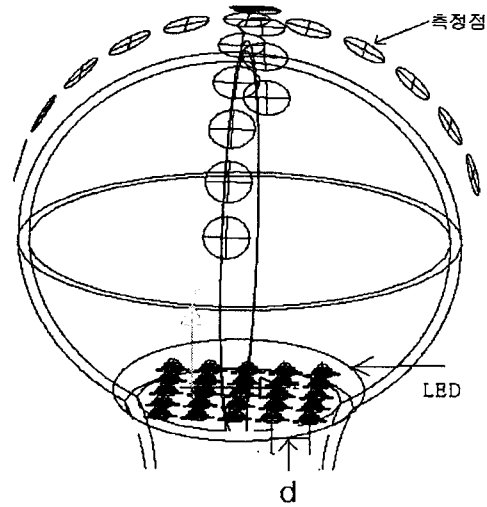


그림 2. 색좌표 측정점  
Fig. 2. Receiver of chromaticity coordinate

측정은 그림 2와 같이 LED로부터 지름100mm 원에  $x$ 축 방향으로  $15^\circ$ 간격으로  $y$ 축 방향으로  $15^\circ$ 간격으로 측정점을 배치하여 각 점에서의 색 좌표를 측정하여 중심점을 계산한 후 MacAdam ellipse이론에 의하여 3-step과 12-step의 타원을 그리고 12-step을 기준으로 각각의 측정점에서 측정된 색좌표가 타원의 내부에 위치하는지의 여부에 따라 광색 혼합 정도를 살펴보았다[2][3].

광색혼합 요인 중 대표적인 원인인 LED의 배치구조(간격, 개수), 발산각에 대해서 알아보았다.

### 1.1 LED 배치 구조에 따른 광색 혼합

RED 627[nm], GREEN 530[nm], BLUE 470[nm]의 주파장을 가지며 발산각이  $60^\circ$ 인 LED를 배치함에 있어 중심을 기준으로 RGB 각각을 그림 3과 같이 대칭형, 정사각형으로 배치를 하여 LED의 간격과 개수를 변화 시켜 주면서 광색 혼합 정도를 알아 보았다. 간격변화는 12[mm]부터 20[mm]까지 변화 시켜주면서 실험하였다. 이는 1[W] LED의 특성상 열이 많이 나기 때문에 일정간격 이상을 띄워 주어야 하기 때문이다[4][5].

경사렌즈를 사용한 RGB LED전구 색온합 향상

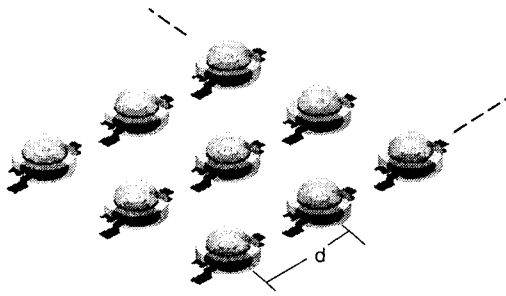
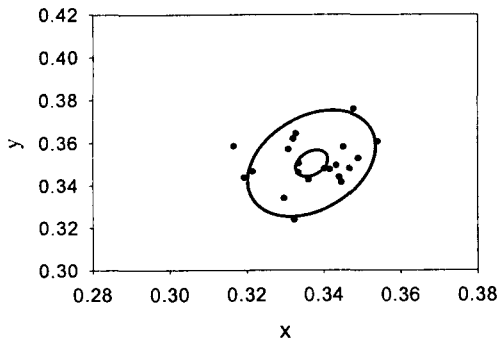
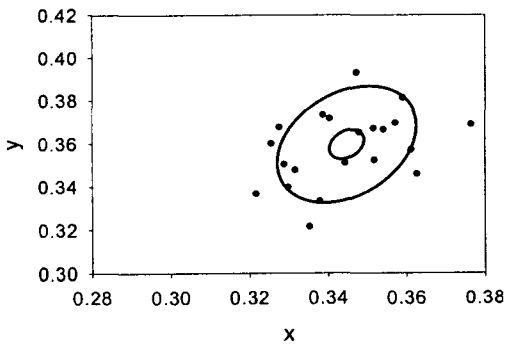


그림 3. LED 배치구조  
Fig. 3. Arrangement structure of LEDs

수집되지 않고 특정색의 광자가 더 많이 측정되기 때문이다. 특히 그림 5(a)의 경우 LED의 개수가 작아서 광자가 각각의 측정점에 균일하게 도달하기에 충분하지 않기 때문에 광색혼합이 잘 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. 즉 LED의 간격이 좁을수록 개수가 많을수록 광색 혼합이 더 잘 되는 것을 알 수 있다. 광출력 효율 면에서 보면 총 광자의 2%내외의 손실만이 발생하므로 LED배치에 따른 광출력 효율은 총 광출력 효율에 큰 영향을 미치지 않는다.



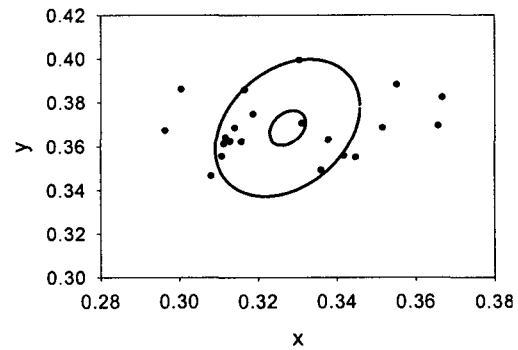
a) 12[mm]



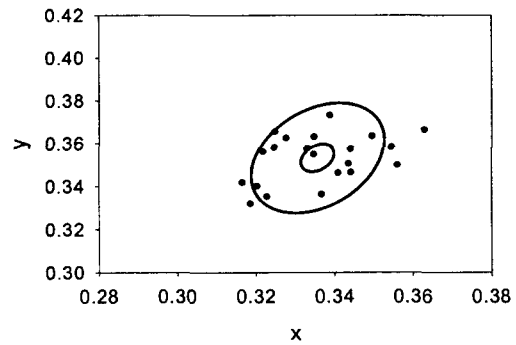
b) 20[mm]

그림 4. 간격에 따른 색좌표  
Fig. 4. Chromaticity coordinate by distance

시뮬레이션 결과 그림 4(a), 5(a)를 보면 타원의외부에서 측정되는 것은 RGB LED 각각의 진행 경로가 틀려 측정점에서 LED에서 나온 광자들이 균일하게



a) 4개



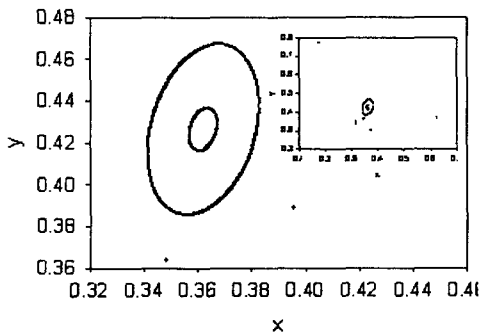
b) 25개

그림 5. 개수에 따른 색좌표  
Fig. 5. Chromaticity coordinate by number

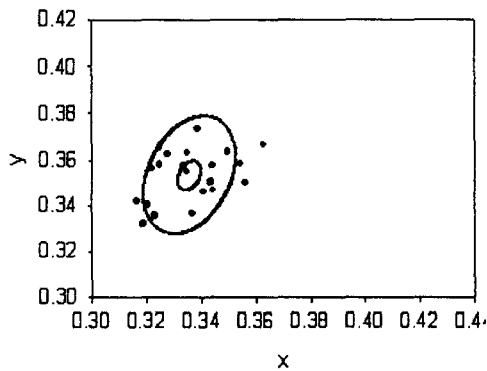
1.2 LED 발산각에 따른 광색 혼합

그림 6은 25개의 LED를 간격 16[mm]로 대칭형으로 배치하고 발산각을 변화시켜 주면서 광색 혼합 정도를 살펴본 것이다. 광색 혼합 정도는 MacAdam

ellipse이론에 의하여 3-step과 12-step의 타원을 그려 살펴보았다.



a) 발산각 15도



b) 발산각 60도

그림 6. 발산각에 따른 색좌표  
Fig. 6. Chromaticity coordinate by emission angle

시뮬레이션 결과 발산각이 좁은 LED는 직진성이 강하여 LED 고유의 색이 측정되었다. 45°까지는 타원을 훨씬 벗어나는 색 좌표가 측정되었지만 60°일 때는 측정점에서 각색의 광자들이 혼합되어 타원에 많이 근접해 있는 것을 알 수 있었다. 즉 RGB LED를 이용하여 백색광을 내기 위해서는 발산각이 넓은 것을 사용하여야 한다.

## 2. 경사를 둔 LED의 배치

LED의 간격이 좁을수록, 개수가 많을수록 발산각

이 넓을수록 광색 혼합이 잘 이루어진다. 하지만 고출력의 LED는 열 문제 때문에 간격을 좁히는데 한계가 있고 개수를 많게 하는데도 전구의 면적 때문에 한계가 있다. 또한 발산각 또한 조명용으로 쓰기에 60°이상이라는 한계가 있어서 LED의 선정에 어려움이 있다.

기존 LED전구는 평면 PCB에 LED를 90°로 배치하여 전구를 설계하였지만, 본 논문에서는 광파이버 일루미네이터의 LED배치와 같은 효과를 내주기 위하여 그림 7과 같이 평면 PCB에 LED를 중앙에 초점이 이루어지게 하는 배치, 즉 중심으로 갈수록 완만하게 경사를 두어 배치하였다. 시뮬레이션 결과 그림 8과 같이 각 측정점에서의 색좌표가 타원내에 위치하는 것을 알 수 있다.

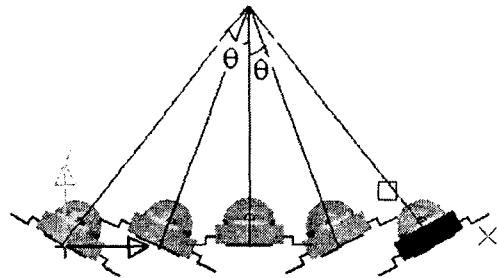


그림 7. LED 배치 모양  
Fig. 7. Arrangement shape of LEDs

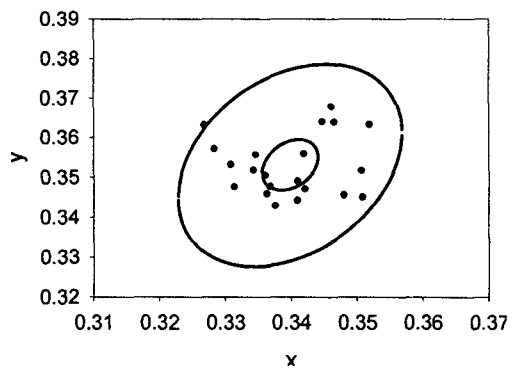


그림 8. LED배치에 따른 색좌표  
Fig. 8. Chromaticity coordinate by LED arrangement

### 3. 경사렌즈를 이용한 색혼합

경사를 둔 LED배치는 광색 혼합은 잘 이루어졌지만 중심으로 갈수록 완만하게 경사를 두어 배치하는 것은 제조상의 어려움이 있게 된다. 따라서 본 절에서는 굴절률 1.5인 경사렌즈를 이용하여 경사를 둔 LED배치와 같은 효과가 나타나도록 하였다.

#### 3.1 경사렌즈의 설계 원리

그림 9와 같이 경사렌즈를 설계하였다. 식 3과 같이 스넬의 법칙을 이용하여 경사 렌즈의 굴절률과 공기의 굴절률을 이용하여 임계각을 구한 결과 임계각은 42°로 계산되었다.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (3)$$

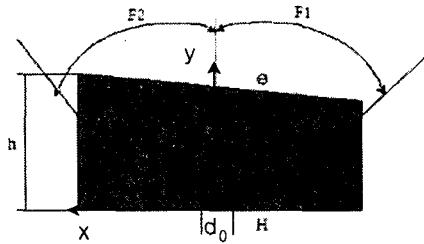


그림 9. 렌즈의 변수  
Fig. 9. Variable of tilted lens

그림 9는 렌즈의 각 변수를 나타낸 것이다. 렌즈의 좌측 높이를 h, 렌즈의 경사각을  $\theta$ , LED의 높이를 H, LED의 길이  $d_0$ , 렌즈의 중심부와 LED의 거리를 d, 렌즈의 중심을 기준으로 좌측의 총광속을 F2, 우측 총 광속을 F1으로 표시하였다.

그림 10(a)는 논문에 쓰인 발산각이 60°와 직각방향으로 광선을 진행하게 하였다. 그림에서와 같이 왼쪽 벽면에서는 임계각보다 작아 투과를 하게 된다. 그림 10(b)와 10(c)는 양방향으로 42°와 직각방향으로 광선을 진행시키고 LED의 위치를 다르게 하여 광선의 진행 방향을 보았다. 왼쪽 벽면에서는 전반사가 일어나 광선이 오른쪽으로 향하게 되고 오른쪽으로 쏘아준 광선은 위 경사진 면에서 투과되었다. 직각방향의 광선은 굴절률 차이로 왼쪽으로 7.8°가

굴절하였다. 따라서 발산각이 48°부터 LED의 위치부터 왼쪽 벽면 위쪽까지의 각도인 20°까지의 광선들은 반사를 하게 되어 오른쪽으로 향하게 된다. 즉, LED의 위치에 따라 왼쪽 벽면에서의 전반사 범위가 달라진다.

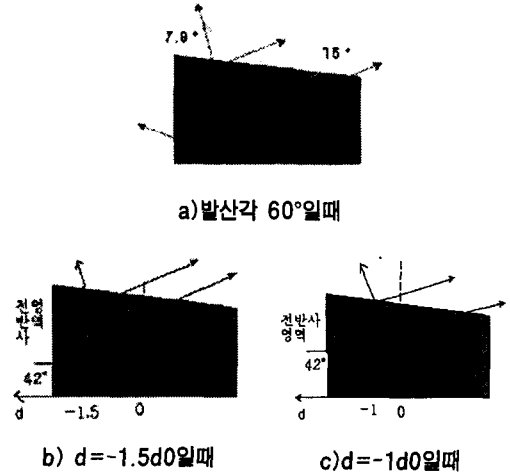


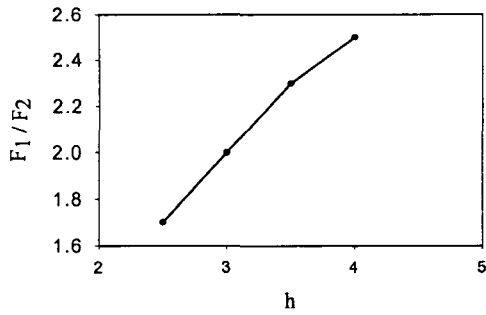
그림 10. 경사렌즈의 광선 진행 패턴  
Fig. 10. Beam progress pattern of tilted lens

이러한 원리를 이용하기 위하여 렌즈의 높이, 경사각도, LED의 위치변화에 따라 지름 100[mm]의 측정원을 달아서 LED를 중심으로 오른쪽과 왼쪽을 나누어서 광속을 측정하였다. 렌즈높이 변화에서는 경사각도 15°, LED위치  $-1.5d_0$ 로 하였고 LED의 위치변화는 렌즈의 중심을 기준으로 렌즈의 왼쪽벽면을 향하여 이동시키며 측정하였다. 렌즈의 높이는 3H, 경사각도는 15°로 고정시켰다. 렌즈의 경사각도 변화는 렌즈높이를 3H, LED의 위치를  $-1.5d_0$ 로 고정시켰다.

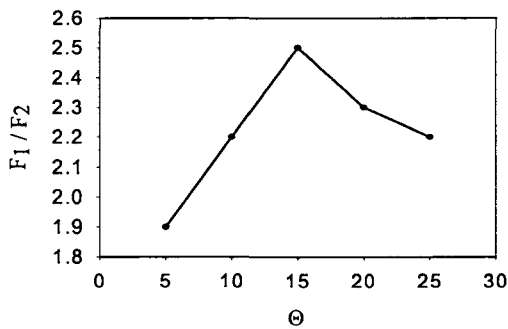
표 1. 경사렌즈 높이(h)에 따른 광속  
Table 1. Luminous flux by tilted lens height

렌즈높이(h)	우향광선의 총광속(F1)	좌향광선의 총광속(F2)	비율 (F1/F2)
2.5H	1.4	0.72	1.9
3H	1.5	0.68	2.2
3.5H	1.6	0.63	2.5
4H	1.6	0.6	2.7

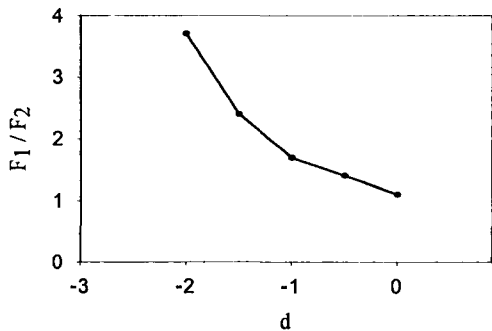
(단.  $d = -1.5d_0$ ,  $\theta = 15^\circ$ , H=LED높이)



a) h에 따른 광속 (단,  $d=-1.5d_0$ ,  $\theta=15^\circ$ )



b)  $\theta$ 에 따른 광속 (단,  $d=-1.5d_0$ ,  $h=3H$ )



c) d에 따른 광속 (단,  $h=3H$ ,  $\theta=15^\circ$ )

그림 11. 렌즈 변수에 따른 광속  
Fig. 11. Luminous flux by tilted lens variable

위 결과를 보면 렌즈의 높이가 높을수록, LED의 위치가 왼쪽 면에 가까이 갈수록 비율이 높아지지만, 렌즈 위면 경사각도 변화는 각도 $15^\circ$ 까지는 비율이 높아지다  $10^\circ$ 부터 낮아지는 것을 알 수 있다.

이는 LED의 배광분포에서 광속이 높은  $90^\circ$ 근방의 광선들이 렌즈를 통과하면서 굴절이 되어 왼쪽을 향하게 되어 감소된다.

렌즈의 경사각도, 높이, LED의 위치 변화에 따라서 오른쪽으로 향하는 광선들의 수를 조정할 수 있다. 하지만 변수들을 조정할 때 오른쪽 벽면에서 광선들이 반사되지 않는 높이나 경사각도를 정하여야 한다. 그리고 발산각이 좁은 LED를 선정한다면 렌즈의 높이를 높여주어 왼쪽 벽면에서 반사되는 광선들의 수를 늘려주어야 할 것이다.

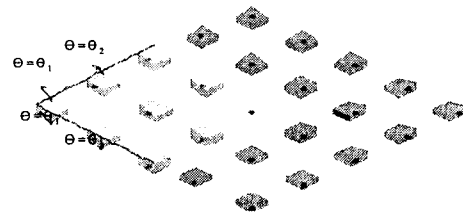


그림 12. 경사렌즈의 각도 변화(단  $d=-1.5d_0$ )  
Fig. 12. Angular variation of tilted lens ( $d=-1.5d_0$ )

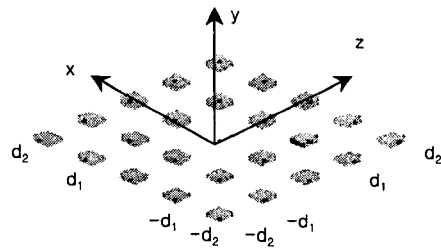


그림 13. 경사렌즈 내 LED위치 변화(단  $\theta=15^\circ$ )  
Fig. 13. LED position change in tilted lens ( $\theta=15^\circ$ )

그림 11의 결과를 바탕으로 그림 12, 13과 같이 LED 25개를  $5 \times 5$ 를 배치하여 가운데 열과 왼쪽 2열에서만 광선들이 나오게 하였고 렌즈간의 간격은  $16\text{mm}$ 로 하여 3가지 실험을 비교하였다. 첫 번째로 렌즈를 씌우지 않은 LED를 중심으로 가장자리는 렌즈의 경사각도( $\theta_1$ )  $4^\circ$ , 두 번째 자리( $\theta_2$ )는  $15^\circ$ 로 하여 실험 하였고 두 번째로 LED의 위치를 x축으로 가장 자리( $d_2$ )= $32\text{mm} \pm 1.5d_0$  두 번째 자리( $d_1$ )  $16\text{mm} \pm 1d_0$

### 경사렌즈를 사용한 RGB LED전구 색온압 향상

z축으로 가장자리( $d_2$ )= $32\text{mm} \pm 1.5d_0$  두 번째 자리( $d_1$ )  $16\text{mm} \pm 1d_0$  로 하여 실험하여 경사를 둔 LED의 배치와 배광분포, 오른쪽으로 향하는 비율을 비교하였다.

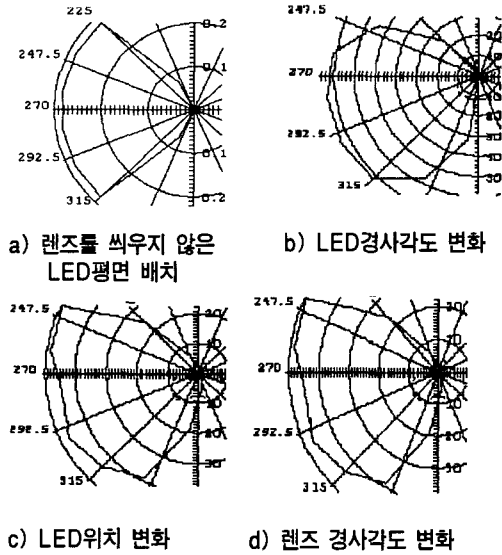


그림 14. 배광분포 비교  
Fig. 14. Comparison of emission angle

시뮬레이션 결과 세가지 모두 배광분포, 오른쪽으로 치우치는 비율이 거의 비슷한 결과를 보였다. 따라서 렌즈의 경사각도를 LED마다 달리 하는 방법과 LED의 경사 되는 각도를 달리 하는 방법은 제조 공정상의 어려움이 있기 때문에 렌즈의 경사각도를 일정하게 해주고 LED의 위치만 변화시켜주는 방법을 채택하였다.

표 2. 광속 분포 비교  
Table 2. Comparison of luminous flux distribution

	우향광선의 총광속(F1)	좌향광선의 총광속(F2)	비율 (F1/F2)
경사를 둔 LED	11	6.7	1.6
LED위치 ( $d=-1, -15$ )	9.7	6.7	1.5
렌즈경사각도 ( $\theta=15^\circ, 4^\circ$ )	10	6.4	1.6

### 3.2 경사렌즈를 씌운 LED를 이용한 전구

위 절의 LED위치 변화에 투과율 80%의 확산제가 발라져 있는 유백색 글로브를 사용하여 전구를 설계하였다. 그리고 LED의 위치는 LED에서 나오는 광선들이 모두 글로브 상에 맞힐 수 있게 소켓부분의 바로 위 부분에 위치하도록 하였다. 아래 그림에서 보듯이 측정점에서 찍히는 색 좌표는 12-step안에 모두 있을 뿐 아니라 3-step근처에 모여 있는 것을 알 수 있었다. 즉 어느 방향에서 보던지 글로브에 맺히는 광색은 거의 동일한 색으로 보임을 알 수 있다.

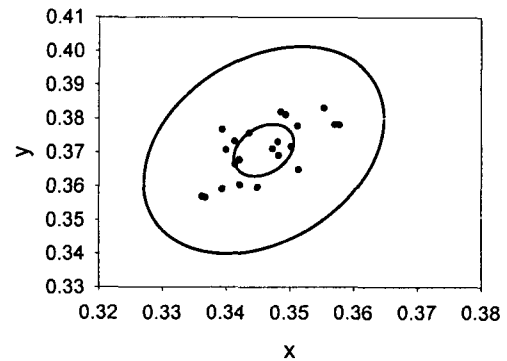


그림 15. 경사 렌즈를 씌운 LED를 이용한 전구의 색좌표  
Fig. 15. Chromaticity coordinate of light bulb that use LED that cover tilted lens

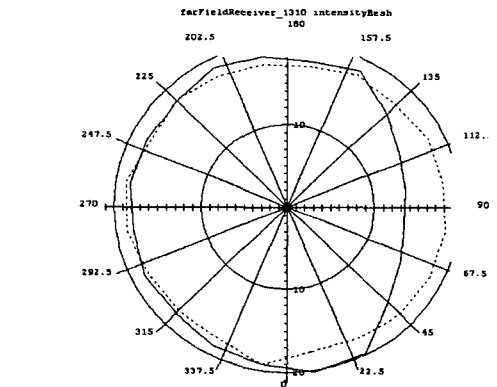


그림 16. 경사렌즈를 씌운 LED를 이용한 전구의 발산각  
Fig 16. Emission angle of light bulb that use LED that cover tilted lens

또한 광속은 310lm내외로 광 출력 효율이 총 LED광속의 75%로 측정되어 우수함을 알 수 있다. 또한 발산각은 그림 16과 같이 조명용에 적합한 발산각을 나타냄을 볼 수 있다.

### III. 결 론

RGB LED를 이용한 백색 전구의 광색 혼합 향상을 위한 방법으로 경사를 둔 LED를 이용하여 광선의 진행 방향을 바꾸어줌으로써 광색 혼합이 향상됨을 보고 렌즈를 씌어 같은 효과를 나타내도록 시뮬레이션을 한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 각 열의 LED에 렌즈의 경사각도를 다르게 하여 썬 결과 광선의 진행방향이 바뀌어 광색 혼합이 향상됨을 알 수 있었다.
2. 렌즈의 경사각도는 고정시키고 각열의 LED의 위치를 다르게 하여 렌즈를 씌운 결과 광선의 진행 방향이 바뀌어 광색 혼합이 향상됨을 할 수 있었다.
3. LED의 위치를 다르게 하는 방법을 채택하여 유백색 글로브를 씌운 결과 광색 혼합과 배광분포가 조명용에 적합한 것을 알 수 있었다.

이 연구는 한국과학재단지정 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

### References

- [1] Gunther Wyszecki, W.S.Stiles, "Color science" pp.306-327, 2000.
- [2] N.Narendran, L.Deng, R.M.Pysar, Y.Cu, and H.Yu "Performance Characteristics of High-Power Light-Emitting Diode," Third international conference on solide state lighting, proceeding of SPIE, 2003.
- [3] N.Narendran, N.Maliyagoda, L.Deng, R.Pysar, "Characterizing LEDs for General Illumination Application: Mixed-color and phosphor-based white sources," Proceedings of SPIE, Vol.4445, 2001.
- [4] 김완호, 여인선, "RGB LED를 이용한 전구의 광학설계", 한국조명·전기설비학회 2001년도 학술대회 논문집, pp.129-132.
- [5] 강석훈, 송상빈, 권용석, 여인선, "3-Component RGB chip으로 구성된 LED 전구의 광학적 설계"대한전기학회 2002년도 추계학술대회 논문집, 197-199.
- [6] Lumileds, <http://www.lumileds.com>

### ◇ 저자소개 ◇

#### 강석훈 (姜錫勳)

1976년 9월 8일생. 2002년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정 및 RRC 연구조원.

#### 임성무 (林成茂)

1977년 10월 26일생. 2003년 2월 동신대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정 및 RRC 연구조원.

#### 송상빈 (宋相彬)

1969년 10월 1일생. 1994년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 전남대 대학원 박사과정, (재)한국항로표지기술협회 부장.

#### 여인선 (呂寅善)

1957년 6월 11일생. 1979년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 8월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 및 고품질전기전자부품및시스템연구센터(RRC) 교수.