

Optimization and Fabrication of Color Temperature Tunable White LED Luminaires

Da-il Kang¹, Kun-yul Kim¹, Young-moon Yu¹, and Hee-lack Choi^{2†}

¹LED-Marine Convergence Technology R&BD Center, Busan 608-739, Korea

²Department of Materials Science & Engineering, Busan 608-739, Korea

(Received December 13, 2013; Revised manuscript February 10, 2014; Accepted March 10, 2014)

In this paper the spectra of correlated color temperature (CCT) tunable white light-emitting diode (LED) luminaires, consisting of commercial red, green, blue, and amber LED chips, were optimized to increase color rendering index (CRI), and a special CRI of R9 for deep red color was obtained. To improve the design's accuracy, measured LED spectra were used instead of mathematically modeled ones. Real CCT tunable LED luminaires with CRIs of 87-90 and R9s of 34-93 were fabricated and demonstrated at CCTs of 3000-6000 K.

Keywords: Color temperature, LED, Color rendering index, Special CRI, R9

OCIS codes: (330.0330) Vision, color, and visual optics; (330.1715) Color, rendering and metamerism; (330.1730) Colorimetry

색온도 가변 LED 조명 최적화 설계 및 제작

강다일¹ · 김근율¹ · 유영문¹ · 최희락^{2†}

¹LED-해양 융합기술 연구센터 광학설계팀
☎ 608-739 부산광역시 남구 용당동 산 100

²부경대학교 재료공학과
☎ 608-739 부산광역시 남구 용당동 산 100

(2013년 12월 13일 받음, 2014년 2월 10일 수정본 받음, 2014년 3월 10일 게재 확정)

본 논문에서는 현재 양산되고 있는 Red(621 nm), Green(530 nm), Blue(453 nm), Amber(590 nm) 등 4파장의 LED 조합을 이용하여 색온도가 가변되는 동안에도 평균연색지수 및 특별연색지수 R9 값이 높게 유지될 수 있도록 조명의 스펙트럼을 최적화하였다. 최적화 시 설계의 정확도를 높이기 위하여 실제 측정된 LED 스펙트럼을 사용하였고 광선과 기구물 사이의 상호 작용을 고려한 광선 추적 기법을 활용하여 수행하였다 또한 최적화 결과를 검증하기 위하여 색온도 가변 조명 장치를 직접 제작하였으며 광 특성을 평가한 결과 색온도가 3000 K에서 6000 K까지 변하는 동안 CRI 및 R9 값이 각각 87~90, 34~93을 나타내었다.

Keywords: 색온도, 발광다이오드, 연색지수, 특별 연색지수, R9

OCIS codes: (330.0330) Vision, color, and visual optics; (330.1715) Color, rendering and metamerism; (330.1730) Colorimetry

I. 서 론

동일 장소에서 다양한 행위가 이루어지는 현대 건축공간에서는 분위기와 행위, 작업의 종류 변화에 따라 색온도를 적절하게 변화시켜 조명의 기능적인 측면과 인간의 감성적인 측면을 동시에 만족시키는 조명환경을 연출할 필요가 있다.^[1] 이러한 요구를 반영하기 위하여 색온도 가변에 대한 연구가 진행 중에 있으나 조명의 연색성과 같은 인간의 감성에 영향을 미치는 광 특성은 고려하지 않은 연구가 많았다.^[2-4]

조명의 연색성은 조명이 대상물을 비추었을 때 자연광과 비교하여 얼마나 대상물의 색을 유사하게 나타내는지를 나타내는 척도로서 일반적으로 연색지수(CRI)를 사용하여 정량화 한다.^[5] 만약 조명의 색온도가 가변되는 동안 연색지수가 낮아진다면 사물의 색을 제대로 표현하지 못하여 불쾌감을 초래하게 된다. 따라서 색온도 가변 조명을 설계함에 있어 연색성을 반드시 고려할 필요가 있다. 최근 들어 이러한 고 연색성을 유지하는 색온도 가변 조명에 대한 연구가 진행되고 있다.^[5-10] 그러나 이러한 연구들의 경우 최적화 시 대부분

†E-mail: choihr@pknu.ac.kr

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

수학적 해석 방법을 사용하기 때문에 실제 LED의 스펙트럼을 이용하기 보단 이론적인 수식을 통해 모델링된 LED의 스펙트럼을 이용하여 LED 조합을 최적화 하고 있다. 이렇게 실제 스펙트럼과 다른 이상적으로 모델링된 LED 스펙트럼을 이용하여 설계하게 되면 제품을 만들게 되었을 때 색온도, 연색성 등 광학적 특성이 설계 값과 큰 차이를 보일 것으로 예상 된다. 또한 최적화에 의해 얻어진 혹은 사용된 LED 조합들은 시중에서 쉽게 구입하기 어려운 피크파장을 가지는 경우가 많아 실제 제품으로 제작이 힘든 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 LED를 고려하였고 이상적인 스펙트럼이 아닌 실제 LED의 스펙트럼을 측정하여 최적화를 수행하였다. 이때 평균연색지수(Ra) 뿐만 아니라 진한 적색에 해당하는 특별연색지수 R9도 같이 최적화 하였다. 일반적으로 조명의 연색성을 나타낼 때 R1에서 R8 까지의 연색지수를 평균한 값인 평균연색지수(Ra)를 사용하고 있으나 통상적으로 조명의 연색성에 있어서 적색-녹색 간 대비가 중요하고 또한 적색의 연색성이 실제 조명에서 문제를 자주 일으키는 색상이기 때문에 R9 값을 고려할 필요가 있다.^[9] 마지막으로 최적화 결과를 검증하기 위하여 실제 조명 기구를 제작하여 그 광학적 특성을 설계값과 비교 분석 하였다.

II. 최적화 설계

일반적으로 서로 다른 색을 갖는 다중의 LED를 사용하여 구현된 광원의 삼자극치는 아래의 식 (1)에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_T &= C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + \dots + C_N X_N \\ Y_T &= C_1 Y_1 + C_2 Y_2 + C_3 Y_3 + \dots + C_N Y_N \\ Z_T &= C_1 Z_1 + C_2 Z_2 + C_3 Z_3 + \dots + C_N Z_N \end{aligned} \quad (1)$$

여기서(X_T, Y_T, Z_T)는 색온도 T를 갖는 목표광원의 삼자극치이고(X_N, Y_N, Z_N)은 색혼합을 위해 사용된 LED 각각의 삼자극치이다. 또한, C_N 은 각 LED의 상대 광량비이다. 따라서 N개의 서로 다른 색을 갖는 LED의 광량비를 조정함으로써 목표하는 색온도를 갖는 광원을 만들 수 있다. 그런데 만일 3개 이상의 LED를 조합하는 경우에는 해가 유일하게 존재하지 않게 된다. 일반적으로 N개의 LED를 사용하여 색혼합을 할 경우에는 N-3의 자유도를 갖게 된다.^[11] 본 논문에서는 4개의 LED를 사용하기 때문에 앞서 언급한 이유로, 특정 색온도를 만족시키는 RGBA LED의 조합 수가 다수 존재하게 된다. 따라서 색온도가 가변되는 동안에도 높은 연색성을 유지하는 스펙트럼을 찾기 위해서는 최적화 과정이 필요하다. 이와 같은 최적화를 수행하기 위해 상용 수학 해석 프로그램이나 기 제안된 최적화 알고리즘을 적용한 사례들이 있었다.^[8,11] 그러나 이러한 최적화 방법들은 단순화된 수학적 방법으로, 조명 기구 내에서 일어나는 기구물과 광선 사이의 복잡한 상호 작용 등을 고려하지 않아 실제 제

작 시 설계값과 차이를 나타낼 가능성이 크다. 따라서 본 논문에서는 이러한 상호 작용 등을 감안하기 위하여 광학 설계 프로그램인 Light Tools(Ver 8.0)를 사용하여 광선추적에 기반을 둔 최적화를 수행 하였다. 최적화를 진행하기 위해서는 먼저 단일 LED에 대한 스펙트럼이 필요하다. 기존에는 단일 LED의 피크파장과 반치폭을 변수로 하는 아래의 식 (2)를 이용하여 좌우대칭인 스펙트럼을 모델링하는 방법이 사용되었다.^[9]

$$S(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda, A) = A \cdot \frac{g(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda) + 2 \cdot g^5(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda)}{3}, \quad (2)$$

where $g(\lambda, \lambda_p, \Delta\lambda) = \exp[-(\frac{\lambda - \lambda_p}{\Delta\lambda})^2]$.

• λ : 파장, • λ_p : 피크 파장, • $\Delta\lambda_{0.5}$: 반치폭, • A : 진폭

하지만 그림 1에서 보이는 것처럼 식 (2)로 모델링한 스펙트럼의 경우 피크파장을 기준으로 좌우 대칭인데 비해 실제는 비대칭이라 스펙트럼이 다소 차이가 있는 것을 알 수 있다.

이렇게 실제와는 다른 이상적인 개별 스펙트럼을 이용하여 합성 스펙트럼을 설계한 경우에는 합성 스펙트럼의 색온도 및 연색지수가 예상한 값과 상이한 결과를 초래할 수 있다. 그림 2는 모델링 방법에 의해 생성된 RGBA 스펙트럼을 이용한 합성 스펙트럼과 동일한 광량비를 만든 후 실제 측정된 스펙트럼을 비교한 결과이다. 동일한 광량비를 적용하였지만

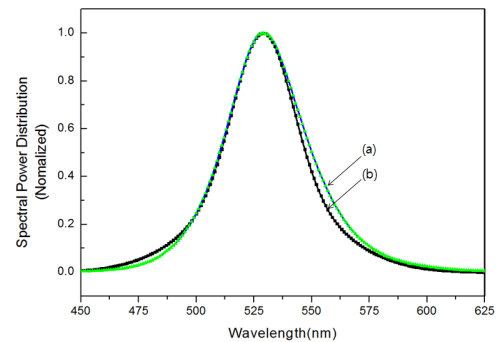


FIG. 1. Measured spectrum (a) and theoretical spectrum (b) of green LED.

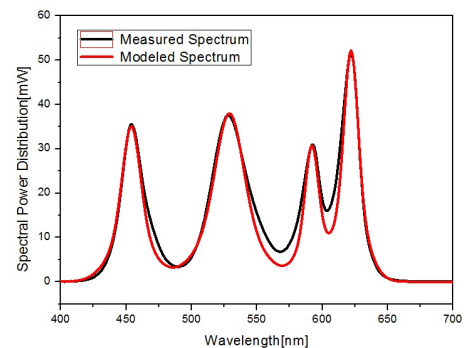


FIG. 2. Modeled spectrum and the measured spectrum.

모델링한 스펙트럼을 사용한 경우 색온도, 평균연색지수 (Ra), R9 값이 각각 4794 K, 82.4, 87.2 이었으며 측정된 스펙트럼의 경우 색온도, 평균연색지수(Ra), R9 값이 각각 4525 K, 89.7, 72.5로 설계값과 실제 측정값이 차이가 남을 확인할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 시중에서 쉽게 구매 할 수 있는 RGBA LED를 사용하여 각각의 스펙트럼을 측정하고 이를 바탕으로 색온도가 가변되는 동안에도 높은 평균연색지수 (Ra)와 R9 값이 유지되도록 각각의 LED 광량비를 최적화 하였다. RGBA LED는 Cree와 Philips Lumileds 사의 제품을 사용하였다(Red : XPE RDO-L1-0000-00A01, Green : LXML-PM01-0090, Blue : XPE ROY-L1-0000-00903, Amber : LXML-PL01-0040).

그림 3은 Red, Green, Blue, Amber LED 를 실제로 적분구를 사용하여 측정한 스펙트럼과 그때의 각각의 LED 의 피크 파장과 반치폭을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 스펙트럼은 피크파장을 기준으로 다소 비대칭적인 모양을 가졌다. Red, Green, Blue, Amber LED 의 피크 파장은 각각 621, 530, 453, 590 nm 이며 이때 반치폭은 각각 16, 32, 21, 15 nm 를 가졌다.

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 설계의 정확도를 높이기 위하여 기구물과 광선의 상호 작용을 고려한 광선 추적 기법을 사용하기 때문에 실제 제작될 등기구의 크기 및 기구물의 광학적 특성을 정확히 반영하는 것이 필요하다. 이를

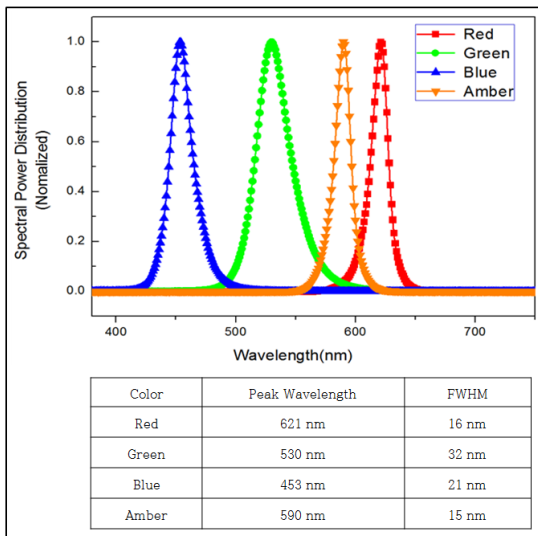


FIG. 3. Spectrum, Peak wavelength, FWHM(full with half maximum of) of each RGBA LED spectrum.

TABLE 1. Comparison of the optical properties before and after simulation optimization

Optimization		3000 K	3500 K	4000 K	4500 K	5000 K	5500 K	6000 K	average
Before	CRI (Ra)	82	76	72	69	74	73	70	74
	R9	-51	-86	-120	-152	-121	-131	-158	-117
After	CRI (Ra)	89	90	90	90	91	90	90	90
	R9	32	48	56	65	62	66	67	57

위하여 분광반사율 측정기(Konica Minolta, CM-3700d) 및 산란측정기(J&C, RT-300S)를 통하여 알루미늄 벽면, 백색 도료를 착색한 PCB 바닥면, 광확산판 등의 반사-투과율, 산란 특성을 측정하여 설계에 반영하였다. 그림 4는 모델링한 등기구의 모식도를 나타낸다. 벽면은 반지름 67 mm, 깊이는 40 mm 인 알루미늄 재질의 원형 실린더 모양으로 표면 특성은 측정 결과를 반영하여 Gaussian 산란(확산각:1°), 반사율 85%, 흡수율 15%로 하였고 바닥면은 백색의 PCB 면으로 Lambertian 산란, 반사율 85%, 흡수율 15%로 하였다. 조명 기구의 상부에는 색혼합 및 눈부심 방지를 위하여 광 확산판을 두었으며 반지름은 65 mm, 두께는 2 mm, Taper 는 1, 벽면 산란 특성은 Lambertian 으로 하였다. 검출기는 발광면 바로 3 mm 위에 설치하였다. 최적화를 위한 변수로 RGBA LED 의 광 세기(Radiometric Power)를 지정하였고 색도거리(Chromaticity Distance)를 0.005 이하가 되도록 제한 조건을 설정하였다.

표 1은 본 논문에서 사용된 4 chip LED 조합(621-530-453-590 nm)을 이용하여 3000 K 에서 6000 K 까지 500 K 단위로 총 7가지 색온도의 최적화 전후의 광특성을 나타내고 있다. 최적화 전의 스펙트럼은 식(1)를 이용하여 색온도를 만족하는 임의의 조합을 선정 한 것이다. 표 1를 통해 알 수 있는 것처럼 동일한 LED 를 사용하여 동일한 색온도를 가지는 백색광을 만들었지만 각각의 RGBA LED 의 세기를 최적화 하지 않을 경우 광 특성의 차이가 크게 나타남을 보여준다.

최적화의 효과를 좀 더 구체적으로 보이기 위하여 색온도 4500 K 에서 임의로 선정한 조합과 최적화 과정을 통하여 산출한 조합의 스펙트럼과 그 광 특성을 비교하였다. 그림 5 는 동일한 4500 K 를 갖는 스펙트럼을 나타내고 있다. 최적화 전의 스펙트럼 그림 5(a)의 경우 평균연색지수는 69, 특별 연색지수 R9은 -152였으며 최적화 이후의 스펙트럼 그림

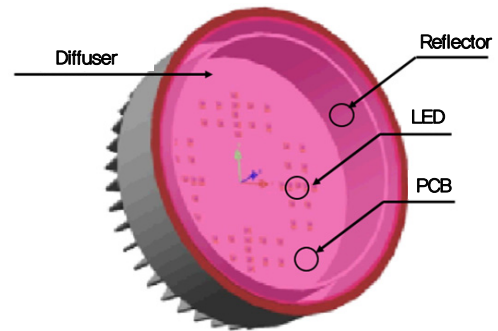


FIG. 4. Schematic diagram of down light.

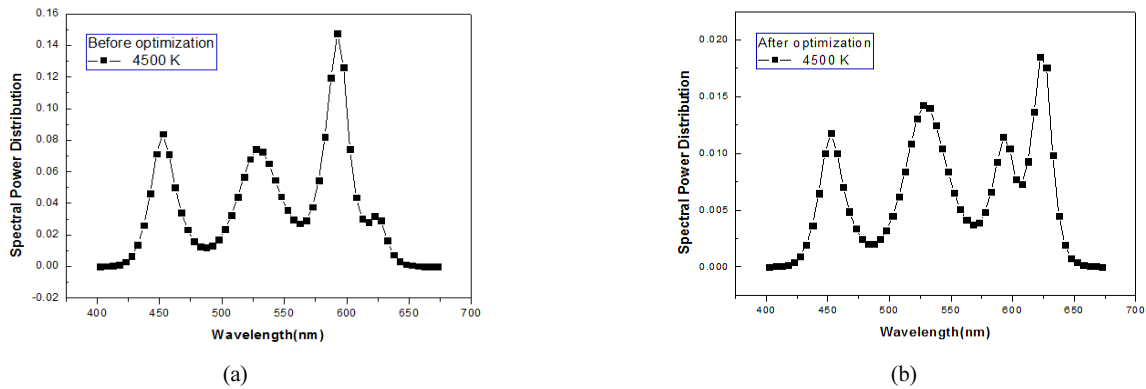


FIG. 5. Spectrum before optimization (a), spectrum after optimization (b) at 4500 K.

TABLE 2. The ratio of light intensity about each RGBA LEDs at each color temperature

	Number	3000 K	3500 K	4000 K	4500 K	5000 K	5500 K	6000 K
R	12	1.000	0.940	0.818	0.747	0.693	0.636	0.598
G	16	0.895	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B	8	0.266	0.405	0.496	0.602	0.732	0.767	0.835
A	16	0.457	0.428	0.378	0.350	0.374	0.338	0.334

5(b)는 평균연색지수 90, 특별연색지수 R9 65를 나타내었다.

본 연구에서 사용한 광학 시뮬레이션 프로그램은 최적화시 Monte-Carlo 방법에 의하여 국소적인 최적값을 찾기 때문에 시뮬레이션의 초기 조건에 의해 최적값이 달라질 수 있다. 따라서 최적화 시 초기 조건을 변경하면서 가능한 높은 연색지수를 얻도록 노력하였으나 표 1에서 산출한 연색지수가 이론적으로 얻을 수 있는 가장 높은 값이라고 말할 수는 없다. 하지만 이상적인 파장 대역을 갖는 LED 가 아닌 상용화된 LED 의 조합을 이용한 것을 감안하면 3000 K 에서 6000 K 까지 색온도가 가변되는 동안 평균연색지수가 89~91 값을 갖는 것은 비교적 높은 수준이라 할 수 있다.

표 2는 최적화가 완료된 후 색온도별 각각 LED 의 상대 광량비를 나타내고 있다.

III. 제작 및 측정결과

최적화의 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 LED 등기구를 실제 제작하였다. 다중의 컬러 LED를 혼합하여 백색 조명을 구현하는 경우 조명이 비추는 면의 색혼합도 중요하지만 조명 발광면에서의 색혼합도 중요하다. 왜냐하면 사람의 눈으로 조명을 바라봤을 때 백색이 아닌 얼룩한 컬러 색이 보일 경우 미적으로 거부감을 느낄 수 있기 때문이다. 따라서 LED 등기구 제작 시 광 확산판 표면의 색도가 균일할 수 있도록 RGBA LED 배치를 최적화 하였다.

그림 6은 세 가지 LED 배치에 따른 광 확산판 표면의 색도를 나타낸 그림이다. LED 의 배치는 그림 6(a)의 경우 LED 들이 벽면으로 배치되었을 때 시뮬레이션 상으로 나타난 그림으로서 색 혼합이 제대로 되지 않아 노란 십자가 모

양이 나타남을 알 수 있다. 그림 6(c)의 경우 Blue LED 를 안쪽으로 모을 경우에 가운데 푸른 원이 생겼다. 이를 보완하기 위해 RGBA LED 를 안쪽으로 배치하여 그림 6(b)와 같은 비교적 균일한 색을 나타내는 배치를 찾았다.

그림 7은 실제 제작한 LED 등기구를 나타내고 있다. RGBA LED의 광 효율과 각각의 색온도에서 필요한 광량을 고려하여 LED의 개수는 Red LED 12개, Green LED 16개, Blue LED 8개, Amber LED 16개로 하였다. 그림 7(a)는 PCB module를 등기구 내부에 장착한 후 광 확산판 없이 점등한 사진이고 그림 7(b)는 광 확산판을 장착한 후 점등한 사진으로서 발광면의 색혼합이 잘 이루어진 것을 확인할 수 있다.

표 3은 최적화를 통하여 구한 광량비를 맞추기 위해 필요한 색온도별 각각의 LED 에 인가되어지는 전류의 세기를 나타내고 있다(단위 : mA).

제작을 완료한 색온도 가변 조명을 적분구(OPI-1000)에서 3000~6000 K까지 500 K 단위로 7가지 색온도에 대해서 측정하였다. 그림 8은 3000 K, 4000 K, 5000 K, 6000 K에서의 RGBA LED에 필요한 전류를 인가하여 적분구를 사용하여 얻어낸 스펙트럼이다.

표 4에서 색온도 가변 조명의 광특성 설계값 과 측정값을 비교하였다. 먼저 색온도의 경우 설계값과 비교하여 약간의 차이를 나타내는 것으로 보이지만 한국산업규격(KS) LED 등기구의 색온도 범위가 3000 K에서 ±175 K, 6500 K에서 ±510 K 인 점을 감안하면 미미한 수준이라 할 수 있다. 각 색온도에서의 평균연색지수(Ra)와 특별연색지수 R9의 값도 설계값과 거의 일치함을 확인할 수 있었으며 결론적으로 색온도가 가변되는 동안 평균연색지수(Ra) 및 R9의 평균값이

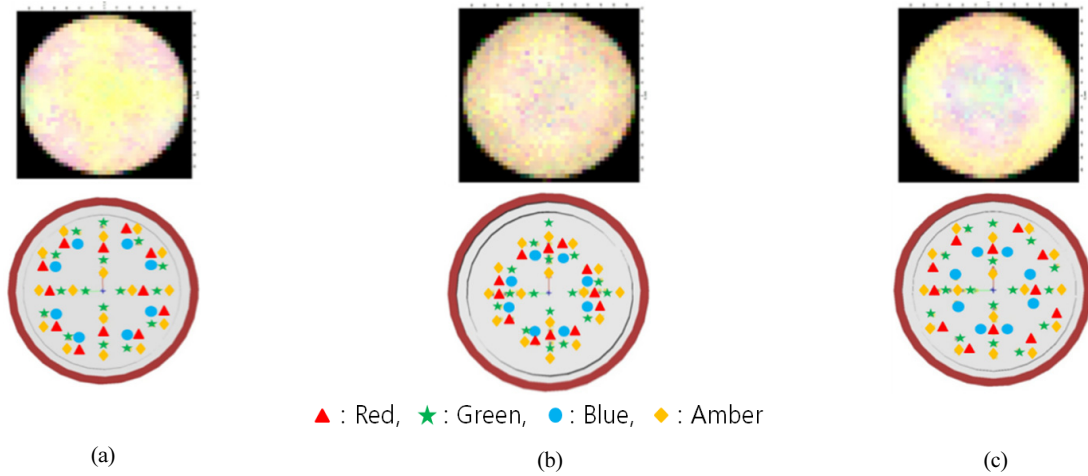


FIG. 6. The color of diffuser plate according to three kinds of LED arrangement.



FIG. 7. (a) Without the diffuser plate, (b) with the diffuser plate.

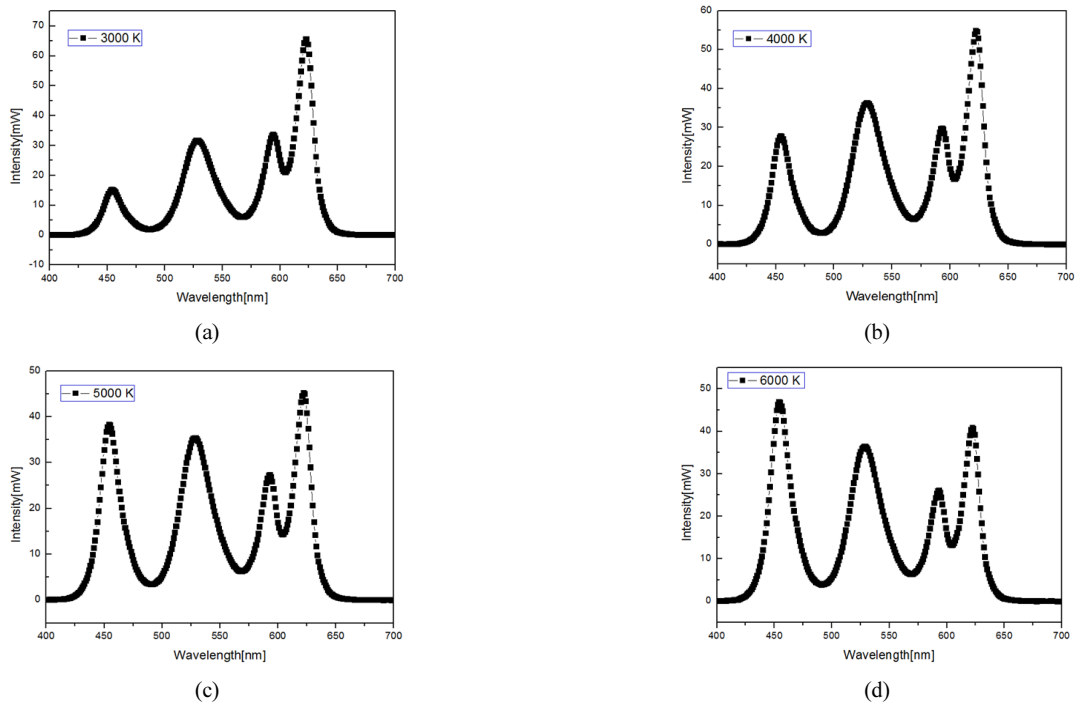


FIG. 8. Spectrum of LED luminaire at (a) 3000 K, (b) 4000 K, (c) 5000 K, (d) 6000 K.

TABLE 3. Initial current's amount of each LEDs from 3000 K to 6000 K

	Number (ea)	3000 K	3500 K	4000 K	4500 K	5000 K	5500 K	6000 K
R	12	279	253	233	218	207	192	190
G	16	636	688	712	736	791	765	778
B	8	41	75	114	141	156	185	211
A	16	690	607	587	522	474	502	495

TABLE 4. The optical properties data of designed and fabricated LED luminaire

Color temperature (K) of designed LED luminaire	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	average
Ra	89	90	90	90	91	90	90	90
R9	32	48	56	65	62	66	67	57
LER (lm/W)	393	382	373	361	349	344	338	363
Color temperature (K) of fabricated LED luminaire	2934	3447	3926	4449	4975	5579	6040	average
Ra	87	89	89	89	90	89	88	89
R9	34	52	63	76	82	93	90	70
LER (lm/W)	401	388	371	360	356	341	331	364

각각 89, 70에 달하는 조명 기구를 구현하였다.

IV. 결 론

RGBA 4-chip LED 조합을 사용하여 색온도가 가변되는 동안에도 높은 연색성을 유지하는 등기구를 설계 제작하였다. 최적화 설계는 실제 제작이 가능하도록 상용화되어 있는 LED를 이용하여 수행하였으며 또한 설계의 정확도를 높이기 위하여 실제 측정된 LED 스펙트럼을 사용하였고 광선 추적 기법을 적용하여 광선과 기구물 사이의 상호 작용이 최적화될 수 있도록 고려하였다. 최종적으로 제작된 조명기구는 색온도가 3000 K~6000 K로 가변되는 동안 평균연색지수 (Ra) 87~90, R9은 34~93을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 부경대학교 자율창의 연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

- I.-T. Kim, J.-Y. Kim, and A.-S. Choi, "A basic study of control algorithm for development of the adjustable CCT LED lighting system in architectural spaces," in *Proc. The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 2011 Spring Conference* (2011), pp. 73-74.
- J.-S. Lee, W.-D. Kim, and S.-Y. Kim, "Sensibility evaluation of LED lighting and fluorescent lamp based on color," *Proc. Architectural Institute of Korea* **25**, 04 (2009).
- Y. J. Park, J. H. Choi, and M. G. Jang, "Optimization of light source combination through the illuminance and color temperature simulation of circadian lighting apparatus," *Int. J. Contents* **9**, 248-254 (2009).
- J.-S. Yang, "A study on the autumn LED emotional lighting color through the comparative analysis of the daylighting and LED lighting color," *Journal of the Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* **25**, 1-13 (2011).
- Y. Ohno, "Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra," *Proc. SPIE* **5530**, Fourth International Conference on Solid State Lighting, 88 (October, 2004).
- G. He and L. Zheng, "Color temperature tunable white-light-emitting diode clusters with high color rendering index," *Appl. Opt.* **49**, 4670-4676 (2010).
- Z. Lei, G. Xia, L. Ting, G. Xiaoling, L. Q. Ming, and S. Guangdi, "Color rendering and luminous efficacy of trichromatic and tetrachromatic LED-based white LEDs," *Microelectronics Journal* **38**, 1-6 (2007).
- P. Zhong, G. He, and M. Zhang, "Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diphosphor conversion LED," *Opt. Express* **20**, A684-A693 (2012).
- Y. Ohno, "Spectral design considerations for white LED color rendering," *Opt. Eng.* **44**, 111302 (2005).
- G. He and L. Zheng, "White-light LED clusters with high color rendering," *Opt. Lett.* **35**, 2955-2957 (2010).
- H. Ries, I. Leike, and J. Muschaweck, "Optimized additive mixing of colored light-emitting diode sources," *Opt. Eng.* **43**, 1531-1536 (2004).