

광색가변 및 색온도 제어용 100W급 투광기 개발

(Development of 100W LED flood lighting with tunable colors and color temperatures)

송상빈* · 김기훈* · 김진홍* · 천우영*

한국광기술원

(Sang-Bin Song* · Gi-Hoon Kim* · Jin-Hong Kim* · Woo-Young Cheon*)

Abstract

이 논문에서는 100W급 Discrete LED 투광기 조명 제품 개발에 관한 것으로, 3W RGBA LED를 이용하여 광색 및 색온도 제어가 가능하도록 광학/방열/회로/시스템 설계를 통한 시제품을 제작하였다. 그 결과, 색온도 2,000~10,000K 범위에서 흑체궤적에 정확히 일치하면서 연색지수가 71~91까지 고연색성을 실현하였으며, 동작전압 90~250VAC, 효율 87%, 역률 93이상의 양호한 전기적 특성을 나타냈다. 또한 투광기의 협각/중각/광각 배광을 만족하기 위하여 LED 렌즈를 설계하였으며, 신뢰성 확보 및 주위온도에 따른 광출력 변화를 최소화할 수 있는 방열설계를 실시하였다.

1. 서 론

고출력 LED는 단파장의 다양한 광색의 LED를 각각 제어하여 다양한 광색 및 색온도를 창출할 수 있으며, 현재의 기술로 가장 효과 있는 LED 조명분야는 가격적인 부분에서 고부가가치를 창출할 수 있고 고온동작에서 자유로운 건축물이나 조형물 등에 사용하는 실내외 고광도 투광기이다. 그러나 현재 LED 투광기는 방열 및 신뢰성 문제 때문에 50W이하로 보조조명으로 주로 활용되고 있으며 거대 조명시장의 침투를 위해서는 100W급 이상의 조명제품이 개발되어야 하고, 특히 기존 조명제품과의 차별성을 위한 LED 가능성을 부각하기 위하여 다양한 광색과 색온도, 고연색성 구현을 실현해야 한다.

따라서 본 논문에서는 고연색성을 실현하고 색온도 및 광색을 정확히 실현하기 위한 LED 투광기를 개발하는데 목적이 있다. 이를 실현하기 위하여 최소 발광면적 실현을 위한 LED Array 구성과 신뢰성 확보를 위한 방열 구조설계, 투광면적을 효율적으로 조절하기 위하여 협각/중각 배광 렌즈 설계, 고연색성 실현과 광색 및 색온도 조절을 위한 제어회로 설계, 고효율과 온도보상을 실현하는 전원회로를 설계하였다.

제작된 LED 투광기 시작품에 대한 전기적·광학적 특성을 측정하여, 그 타당성을 증명하였다.

2. LED Array 설계 및 구성

2.1 LED의 특성 측정 및 선정

100W급 투광기를 제작하기 위하여 통상의 고출력 LED 1W를 사용할 경우에는 LED의 동작개수 약 100개 이상을 사용하기 때문에 투광기의 면적(약 L800mm×W350mm)이 넓어지게 된다. 최소한 광원의 면적을 축소하기 위하여 3W LED를 채용하여 LED 투광기를 제작하였다. 따라서 이 연구에 사용한 LED는 3W Lumileds Luxeon K2 LED를 사용하였다.

또한 통상 RGB LED를 사용하여 광색 및 색온도 제어를 실시하는데, 백색 구현 색온도 제어시 연색지수 R9가 매우 낮아서 평균연색지수가 70이하로 매우 낮게 나타난다. 이것은 RGB LED를 사용할 경우에는 호박색을 나타내는 560~600 nm의 파장에서 빛이 발생하지 않기 때문이다.

따라서 이 연구에서는 색온도 제어시 연색성을 해결하기 위해서 580~590 nm 피크파장을 갖고 있는 Amber LED를 추가하여 연색성을 개선하였다.

표 1. 사용된 3W RGBA LED의 특성

광색	동작전압 [V]	광속 [lm]	지향각 [°]	발광효율 [lm/W]	색좌표	
					x	y
Red	4.08	62	142	22	0.703	0.297
Green	4.68	48	133	15	0.215	0.707
Blue	4.42	18	128	6	0.137	0.051
Amber	4.17	33	142	9	0.605	0.394

표 1은 이 연구에서 사용한 3W RGBA LED (Luminleds사)의 정격전류 700mA 공급시 특성을 나타내고 있다.

2.2 RGBA LED Array 구성

3W RGBA LED의 패키지 특성과 R, G, B 광색 혼합이론, 그리고 R, G, B, A LED 색도 좌표값에 의한 색온도 무게중심점 원리를 이용하여 LED 투광기 모듈의 요구 광속과 색온도를 만족시키기 위한 LED 최적 개수를 선정하였다. 선정된 LED의 동작개수는 총 58개이며, Red 11개, Green 22개, Blue 14개, Amber 11개이다.

그림 1은 RGBA LED의 스펙트럼 측정값과 광색혼합 관련 이론을 적용하여, 각각의 RGBA LED Array에 Duty Ratio를 변화시켰을 경우의 색온도 변화를 나타내고 있다. 그러나 이러한 LED 모듈의 동작개수는 색온도에 따른 Duty Ratio를 보면 Red는 최대 59.1% 이하이고 Blue는 149.2% 이하로 효율적 측면에서 문제가 있다. 따라서 Red 동작 개수를 40%정도 축소시키고 Blue의 개수는 50%정도 증가시켜야 LED 동작전류에 대한 효율을 극대화시킬 수 있어서 RGBA LED 동작개수를 재선정해야만 한다. 따라서 이러한 실험 결과를 바탕으로 Red는 8개로 축소하고 Amber는 10개로 축소하였으며, Blue는 18개로 증가시켜서 LED Array를 구성하였다.

전체 모듈 사이즈는 340.00×130.63mm이며, 최적의 색온도 및 광색혼합을 위하여 각각의 RGBA LED를 좌우상하로 대칭 배치하였다.

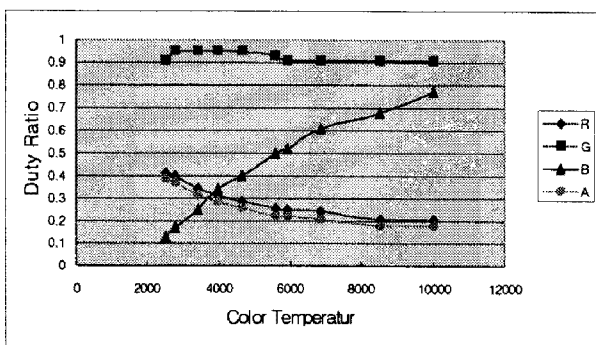


그림 1. RGBA LED 계산에 의한 Duty Ratio

3. 100W급 LED 구동회로 개발

3.1 전원회로 설계

경관 조명에 사용되는 100W LED 투광기용 전원 공급장치(SMPS)를 개발하기 위해서는 LED 구동 전압에 맞는 출력 전압 및 전류를 제어하고, 외부에서 발생하는 이상 동작 및 이상 전압·전류가 발생할 경우 전원회로를 보호 할 수 있는 보호회로가 구성되어야 한다. 또한 에너지 효율을 위하여 100W 이상의 전원 공급장치(SMPS)에 높은 역률을 구현하고자 Two Stage 방식을 적용하고, DC-DC 부분은 제품의 양산시 가격과 전원회로의 크기를 작게 하기 위하여 Flyback 방식을 이용하여 설계하였다.

100W 전원회로 설계는 그림 2의 100W 전원회로 Block Diagram에서 볼 수 있듯이 역률(PF) 회로를 가지고 있는 Two Stage 방식으로 구성하였다. 제일 앞단에는 역률보상회로 구동부분으로 구성되어 있으며, 이는 Voltage mode로 회로를 제어하여 과전압과 과전류에 대하여 PFC 구동부분을 보호 할 수 있도록 하고 안정적으로 일정한 전압을 DC-DC 구동부(Two-Stage)에 전달 할 수 있게 설계하였다. DC-DC 구동부는 PWM 제어를 통한 Current mode 방식을 채용하여 일정한 출력을 발생하도록 설계하였고, 과전압과 과전류, 온도 보상 회로가 포함되어 전원회로 및 LED 모듈을 보호할 수 있도록 설계하였다.

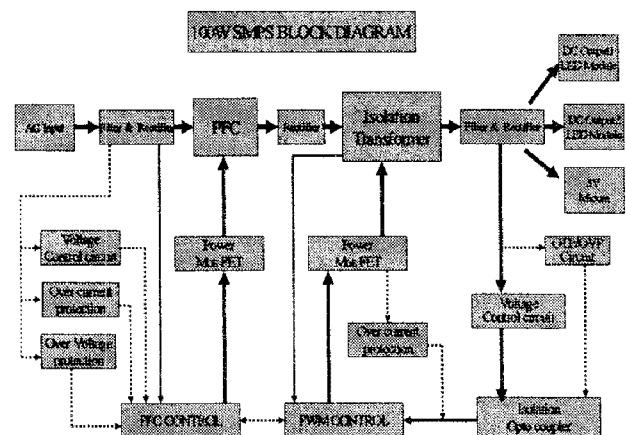


그림 2. 100W 전원회로 Block Diagram

3.2 제어회로 설계

DMX 512 신호 체계를 이용하여 RGBA LED의 색온도를 조정 하는데 목적이 있다. SMPS로부터 24V의 전원을 DC CONVERTER 1,2가 각각 5V와 12V로 전원을 변환 시켜 PWM DRIVER와 MCU에 전원을 인가해준다.

MCU에서는 외부 컨트롤러로부터 DATA를 받으면 그 DATA를 PWM DRIVER로 보낸다. PWM DRIVER는 MCU의 신호를 받아서 전압, 전류를 증폭해주고 이를 S/W DECVICE 로 보내 LED의 색온도 및 광색 가변을 컨트롤한다.(그림 3 참조)

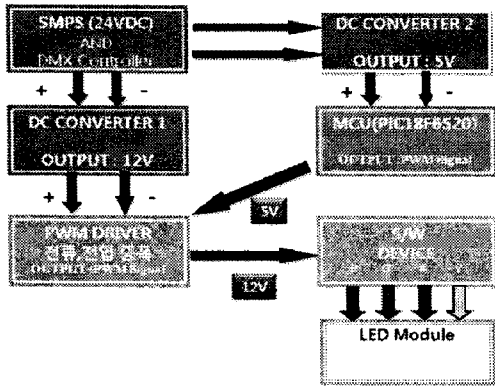


그림 3. 색온도/광색가변 제어회로 Block Diagram

4. 렌즈 및 방열 설계

4.1 협각 렌즈 설계

투광기에 사용되는 3개의 렌즈군은 협각용, 중각용, 그리고 광각용으로 구분되며, 이 연구에서는 협각과 중각용 LED 렌즈를 설계하였다.

렌즈 초기 설계는 전반사 면을 기준으로 주어진 배광에 맞도록 LightTools 프로그램을 사용하여 최적화 하였다. 그림 4에 설계된 협각용 렌즈를 나타내었다.

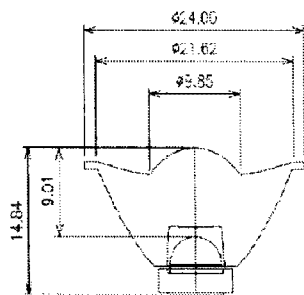


그림 4. 협각용 렌즈 레이아웃

설계된 렌즈를 이용하여 투광기에 적용할 경우 배광분포를 계산하기 위하여 LightTools를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 투광기 1m 전면에 발산각 15도인 detector를 가정하여 광량 및 광도분포를 계산하기 위하여 각 LED의 광량을 11m 을 가정하여 각 파장별 ray의 분포를 추적하였다. 그 결과, 조사면에서의 광속은 입사광속의 90%가 15도내에 집광됨을 알 수 있다.

4.2 중각 렌즈 설계

중각용 렌즈는 협각렌즈의 첫 번째면(LED로부터)의 파워를 감소하기 위하여 오목면으로 변경한 후 전면의 굴곡면의 파워를 역시 감소하게 하고 중심부에서 떨어진 주변부의 곡률을 없애서 주어진 중각 조건을 만족하는 렌즈를 최적화하였다. 최적화된 중각용 렌즈의 도면은 그림 5와 같다.

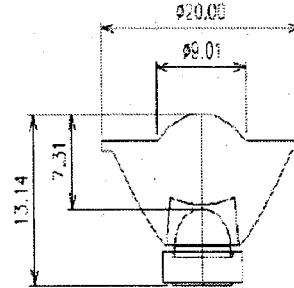


그림 5. 중각용 렌즈 레이아웃

설계된 렌즈를 이용하여 투광기에 적용할 경우 배광분포를 계산하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 협각용 렌즈의 경우와 같은 방법으로 RGBY 각 광원으로 출사한 광선의 위치를 추적하여 광량 및 광도의 분포를 계산하였다. 조사면에서의 광량은 입사광속의 93%가 발산각 30도내에 집광되는 것을 확인 할 수 있었다.

4.3 방열 구조 설계

투광기는 주로 옥외용으로 사용되므로 실내에서 사용되는 일반조명 제품의 방열 및 기구 설계와는 다소 다른 제한 요소가 있다. 즉 빗물 혹은 습도로부터 안정적인 제품을 구성하여야 하며, 대형 제품으로서 무게를 최소화하고 fan을 사용할 수 없는 방열구조를 필요로 한다. 따라서 기본적인 방열 설계 최적화는 LED가 설치된 메탈 PCB와 heat sink의 구조를 최적화 하여 주어진 방열 조건을 만족하는 구조를 개발하였다.

투광기의 방열판의 최적화는 LED가 설치된 메탈 PCB에 부착될 heat sink의 head와 방열판의 핀의 구조 및 개수를 선정하는 것이다. 방열판의 물질은 가공성과 열전도성을 고려하여 열전도도 (thermal conductivity) k 는 $171 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, 비열 (specific heat) $C_p = 798 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ 인 aluminum 6061계열을 사용 하였다.

기본모델은 LED가 위치한 메탈 PCB와 heat sink의 head가 겹쳐져 전도에 의한 열전달이 이루어지며 대류면이 최대화 하는 조건에서 시제품 제작이 용이한 구조로 초기화 하였다. 방열핀의 배열은 가로방향 2mm의 두께로 10개의 핀으로 구

성되어 있으며 핀의 길이는 head 포함 40mm 이다. 방열 해석은 LED가 배열된 위치에서 전달된 열이 방열 시스템 (heat sink 와 연동된 외부구조)에 의하여 전달되는 량을 해석하기 위한 글로벌 모델링을 수행하였다. 모델링을 통한 최적화는 최대 온도변화를 기준으로 하였다.

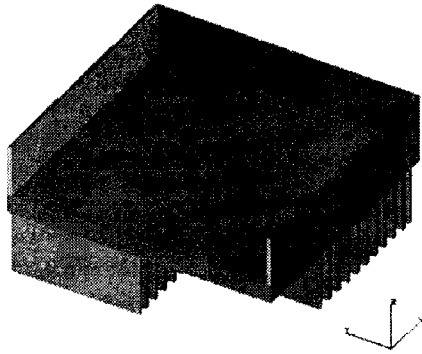


그림 6. 최적화된 방열구조와 투광기 모델

투광기의 열전달을 해석하기 위하여 1/2 symmetric 모델의 유한요소 시뮬레이션 모델을 3D solid element를 사용하여 작성하였으며 3D layout과 FE model을 그림 6에 나타내었다.

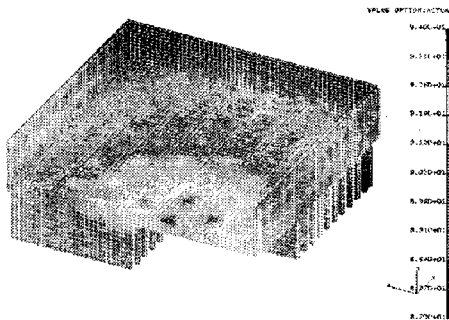


그림 7. 투광기 방열구조의 열분포
(주위온도=20°C, h=5W/m²K, Max. T=94°C)

투광기가 사용되는 야외에서 조건을 고려하여 heat convection coefficient를 5W/m²K와 10W/m²K의 두 경우를 비교하였으며 외부온도에 의한 영향을 검토하기 위하여 ambient temperature를 0°C와 20°C의 두 가지 경우에 온도변화를 계산하여 정리하였다.

그림 7은 외부온도 20°C에서의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 외부온도 20°C에서의 최대 온도는 약 94°C정도가 됨을 알 수 있었으며 외부 온도 변화에 의한 투광기의 온도변화는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 외부에서 바람 혹은 대류조건에 따라서는 아주 민감한 온도 변화가 생김을 알 수 있다. 계산된 결과 최대의 온도차이 (temperature gradient)는 약 7°C정도가

생김을 알 수 있으며, 투광기 지지를 위한 중간 구조물 부분의 온도를 전파하기 위한 장치가 필요함을 알 수 있다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 시제품 제작

LED 투광기를 시제품의 제작하기 위해서 광학/방열/회로/제어시스템 설계를 통하여 각 부품 (Collimator 렌즈, LED Array, 외함, 구동회로, 제어회로, 히트싱크)에 대한 시제품을 제작하였다. 그림 8은 이러한 각 부품을 조립한 LED 투광기 시제품을 나타내고 있다.

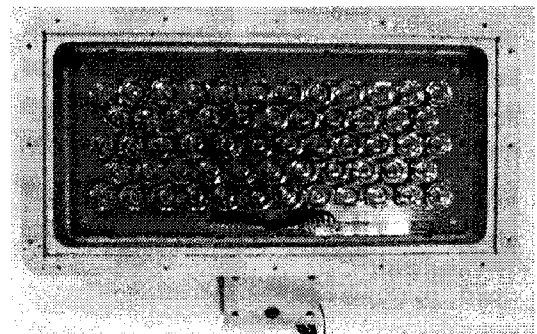


그림 8. 제작된 100W LED 투광기 시제품

5.2 전기적특성

100W 전원회로 시제품의 입력 전압 사양은 90Vac~264Vac, 50/60Hz에서 동작되며 최대 입력 전류는 Max 1.5A이다. 출력 전압은 25Vdc, 3.75A, Peak 12A의 출력을 특성을 가지고 있다. 그리고 전체 입력범위에서 86% 이상의 효율을 나타내고 있으며, PFC는 90VAC 0.99를 나타내며 전체 입력 범위에서는 0.9이상으로 매우 우수한 특성을 가지고 있다. 또한 각 전압에 대한 THD는 220VAC 50Hz에서 24.20%로 나타났으며, 입력에 대해 약 30%이내의 양호한 특성을 나타내고 있다.

표 2는 이러한 LED 투광기 시제품의 전기적 특성을 나타내고 있다.

표 2. LED 투광기 시제품의 전기적 특성 측정 결과

Vin [Vac]	Iout [A]	Pout [W]	Pinput [W]	Effi [%]	PFC
90(60Hz)	3.75	91.01	105.4	86.35	0.99
110(60Hz)	3.75	91.01	104.12	87.41	0.99
132(60Hz)	3.75	91.01	103.28	88.12	0.99
180(50Hz)	3.75	91.01	104.78	86.86	0.97
230(50Hz)	3.75	91.01	104.32	87.24	0.93
264(50Hz)	3.75	91.01	104.01	87.50	0.9

5.3 온도 보상 특성

LED 투광기는 주로 실외용으로 사용하기 때문에 주위온도 변화가 크게 나타나므로 주위온도에 따른 LED Array의 광출력 감소를 보상해야 한다.

본 연구에서 사용된 3W LED의 신뢰성 확보를 위하여 최적 방열설계에 의해서 외부온도가 20℃ 일 때 LED 최대 온도를 100℃ 이내로 설계하여 LED 투광기의 온도 변화에 따른 광출력 특성을 안정화시켰다. 또한 전원회로에서도 LED 초기 시동시와 정상동작시 LED 동작 온도의 변화에 따른 임피던스 변화에 안정적으로 광출력을 나타내기 위하여, 25VDC 정전압 구동 방식을 채택하고 각각의 RGBA LED Array String의 LED 동작개수를 적절히 구성하여 온도보상을 실시하였다.

그림 9는 주위온도에 따른 LED 투광기 시제품(색온도 6,000K)의 광출력 변화를 나타내고 있으며, 주위온도 -30℃ ~ 70℃ 변화에 대해 25℃ 광도값의 기준으로 -5.28% ~ 12.27%로 매우 양호한 특성을 나타내고 있다.

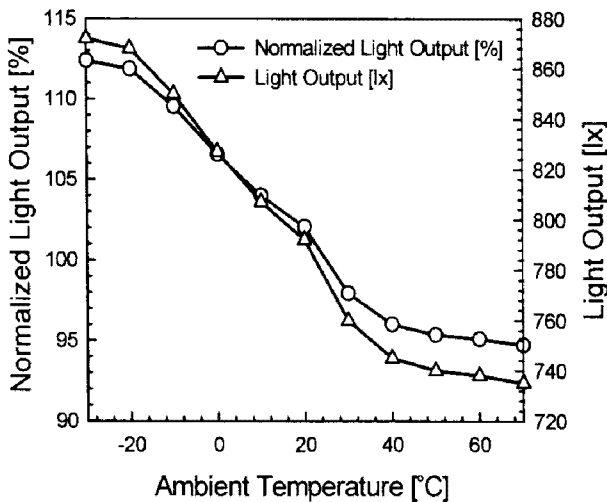


그림 9. 주위온도에 따른 광출력변화

5.4 광학적 특성

5.4.1 색온도 제어 및 연색성

제작된 LED 투광기의 색온도 변화에 대한 광학적 특성을 분석한 결과(표 3), 연색지수(C.R.I)가 색온도 2,500K~10,000K까지 최소 71~91까지 변화함으로써 고연색성을 실현하였다. 이는 RGB LED에 Amber LED를 추가함으로써 가시광선 영역의 모든 파장에서 발광하고 있음을 알 수 있다.

또한 LED 투광기의 RGBA LED를 정확한 색온도 알고리즘에 의해 제어할 경우, 표 3의 색좌

표값의 변화가 CIE 색좌표상 흑체궤적과 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.

표 3. LED 투광기의 색온도 측정결과

Meas. C.T	x	y	Ra
2519	0.4756	0.415	71
2755	0.4584	0.4135	
2998	0.4372	0.4058	
3525	0.4057	0.3963	89
3983	0.3833	0.3864	
4471	0.3628	0.3718	91
4975	0.3464	0.3596	
5466	0.333	0.3432	89
5995	0.3221	0.3287	
6926	0.3066	0.3211	
8542	0.2894	0.3023	
10020	0.2824	0.2842	78
19980	0.2502	0.2641	

5.4.2 LED 투광기의 배광성능

협각렌즈를 채용한 100W LED 투광기를 한국 광기술원에 있는 Goniometer를 이용하여 측정할 결과, 그림 10과 같이 중심광도는 60,000 cd를 나타내어 높은 광도를 나타내었다. 또한 협각렌즈에 의한 LED 투광기 시제품의 빔각은 약 15°를 나타내어 만족하고, 광학설계 시뮬레이션과 일치됨을 알 수 있다. 또한 중각렌즈를 채용한 경우에도 시제품의 빔각이 약 30°를 나타내어 만족하였다.

그리고 광각 투광기의 빔각은 70~150°로 매우 넓은 배광을 나타내고 있으며, 따라서 사용된 LED 패키지의 비빔각이 150°이므로 특별한 렌즈를 채용하지 않으면 광각을 나타낼 수 있다.

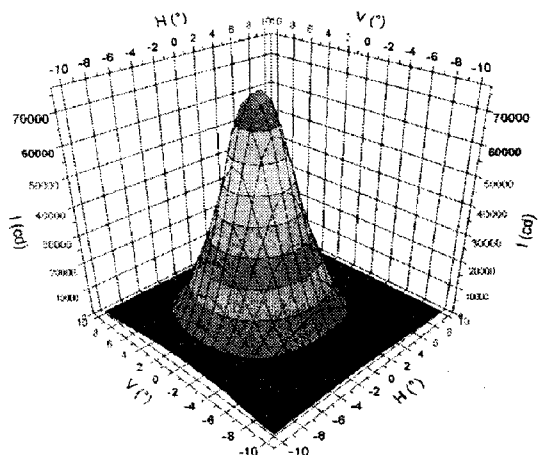


그림 10. 협각렌즈를 채용한 LED투광기의 배광곡선

5.4.3 LED 투광기의 광색혼합특성 및 거리

개발된 LED 투광기는 RGBY 4가지 광색을 나타내는 LED를 사용하기 때문에, 이에 대한 광색 혼합 특성이 매우 중요하다. 특히 백색의 경우, 색온도의 변화가 500이상 변화하면 사람의 눈에 광색 분리가 감지되어 문제가 발생된다.

암실에서 LED 투광기와 피조면과의 거리를 1m로 하여 KONICA MINOLTA CL-200을 이용하여 색온도와 색도좌표 값 9 Point를 측정하였다. 표 4는 피조면의 각 9 Point에 대한 색온도와 색도좌표값을 나타내고 있으며, 색온도의 편차는 300K이내이고, 색도좌표 x, y값의 편차가 0.005이내로 매우 양호한 특성을 나타내고 있다.

표 4. 피조면 9 Point 측정점의 색온도 및 색도좌표

point	CCT[K]	x	y
1	6,157	0.317	0.362
2	6,147	0.317	0.362
3	6,080	0.319	0.363
4	6,253	0.315	0.359
5	6,280	0.314	0.359
6	6,170	0.316	0.361
7	6,270	0.314	0.359
8	6,315	0.314	0.539
9	6,201	0.316	0.360

6. 결론

이 연구는 100W급 Discrete LED 투광기 조명 제품 개발에 관한 것으로, 3W RGBA LED를 이용하여 최적의 LED Array를 구성하고 이러한 LED Array를 이용하여 광색 및 색온도 제어가 가능하도록 광학/방열/회로/시스템 설계를 통한 LED 투광기를 제작하였다. 제작된 100W급 Discrete LED 투광기를 시험 및 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 기존 RGB LED에 Amber LED(피크파장 590nm)를 이용하여 광색혼합이론과 CIE 색좌표상 무게중심점 이론을 채용하여 각 색온도에 대한 RGBA LED의 동작개수와 듀티비를 결정하여 제어를 실시하였다. 그 결과 색온도 2,000 ~ 10,000K의 흑체궤적에 정확히 일치하고, 연색지수 71~91까지 고연색성을 구현하였다.
2. 100W급 LED 투광기 모듈 구동을 위한 고효율

전원회로를 설계하였으며, 그 결과 동작전압 90~250VAC, 효율 87%, 역률 93이상으로 목표에 충분히 도달하였다. 또한 색온도 2,000~10,000을 조절할 수 있고 16.7백만 Color를 광색가변할 수 있는 색온도/광색가변 제어회로를 개발하였다.

4. 3W Discrete LED에 적합한 Collimator 렌즈를 광학설계프로그램 LightTools를 이용하여 10~30°(협각), 30~70°(중각)용으로 최적 설계하였으며, 제작된 협각 렌즈를 적용하여 측정된 결과 중심광도가 약 6,000cd, 빔각이 15°로 매우 양호한 특성을 나타냈다. 또한 최적 방열설계를 통한 기구설계를 실시하여 주위온도 20°C에 LED 최대온도가 100°C 이내로 매우 양호한 특성을 나타내어 제품의 신뢰성을 확보하였다.
5. 이렇게 개발된 LED 모듈, 렌즈, 방열기구를 제작하여 LED 투광기 시제품을 제작하였으며, 제작된 LED 투광기는 색도좌표상 흑체궤적에 일치하면서 고연색성(CRI 71~91)을 실현하였다. 주위온도에 따른 광출력 변화율 12.37%로 매우 양호한 특성을 나타냈으며, 광색분리 현상 없이 백색을 구현하기 위한 광색혼합 거리도 1m 이내로 기존 LED 조명제품보다 차별화되었다.
6. 신뢰성 있는 100W급 색온도/광색조절용 LED 투광기를 개발함으로써 관련 광학/방열/회로 설계 기술과 고연색성 색온도 제어 기술을 확보하였으며, 이후 200W급 이상의 LED 조명제품 개발에 활용할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Ingo Speier and Marc Salsbury, "Color Temperature Tunable White Light LED System," Sixth International Conference on Solid State Lighting, proceeding of SPIE, Vol. 4445, 2006.
- [2] Philips Lighting, "Color Rendering Properties of LED Light Source," Proceedings of SPIE, 2002.
- [3] Nadarajah Narendran and Lei Deng, "Color tunable LED spot lighting," Proceedings of SPIE, 2007.
- [4] Lumileds, Power Light Source LUXEON K2, Technical Datasheet DS51.