

방열 조건에 따른 5W급 고출력 백색 LED 모듈의 광 특성 평가

(Evaluation of the Lighting Characteristics in High Power White LED Module with Cooling Condition)

윤장희* · 엄정덕**

(Janghee Yun · Jeongduk Ryeom)

Abstract

The performance and lighting characteristics of the LED depend on cooling condition because the power LED generates lots of heat. In this paper, the effect of the generated heat from power LED module on lighting characteristics and performance is measured and evaluated. For experiments, the transient temperature of a power LED module with cooling condition is measured. In addition, the temperature and lighting characteristics of the LED module are measured during the steady state. As a result, the cooling condition is less effective on the lighting characteristics of the LED module at rated current but the cooling condition extremely affects those of the LED module over the rated current. Because high temperature of the power LED module causes the low phosphor conversion, luminance efficiency becomes low and color temperature becomes high. When power LED module are driven over the rated condition, higher temperature is directly related to lighting characteristics and performance of the LED module rather than higher current.

Key Words : LED, Temperature, Luminance, Spectral Distribution, Performance

1. 서 론

화석연료의 고갈과 급격한 기후 변화는 인류가 당면

- * 주저자 : 송실대학교 대학원 전기공학과 박사과정
 - ** 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 부교수
 - * Main author : Doctor's course, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
 - ** Corresponding author : Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
- Tel : 02-828-7267, Fax : 02-826-5125
E-mail : cosmos01@ssu.ac.kr
접수일자 : 2012년 10월 6일
1차심사 : 2012년 10월 11일, 2차심사 : 2012년 12월 10일
심사완료 : 2012년 12월 14일

한 심각한 문제가 되고 있다. 그에 따라 세계 각국은 환경 문제를 해결하고 에너지를 절약하기 위한 연구에 많은 투자와 노력을 기울이고 있다. 최근에는 고출력 LED가 친환경 에너지와 함께 주목을 받으면서 백열전구와 형광램프 같은 기존의 조명을 교체하고 있다[1,2]. 국내 조명의 약 30%를 고출력 LED로 교체한다면 매년 160억kW/h의 전력절감과 약 680만 톤의 이산화탄소를 절감할 수 있다고 알려져 있다[3]. 이 외에도 고출력 LED는 LCD의 백라이트, 교통 신호등, 실내외 디스플레이 등 그 사용범위가 날로 넓어지고 있다[4].

LED에 전류가 흐르면 누설전류에 의한 전자와 정

공의 비 발광 재결합이 일어나게 된다. 이때 재결합 에너지가 열에너지로 소모됨에 따라 높아진 LED 칩의 접합온도는 LED의 발광 효율을 저하시킨다[5,6]. 이러한 이유로 고출력 LED는 발열이 심하고 동작온도에 의해 LED의 수명과 성능이 좌우된다[7,8].

그러므로 기존의 조명을 대체하기 위해서는 고출력 LED의 온도와 광 특성과의 관계를 잘 파악할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 상용화된 5W 백색 LED 모듈을 사용하여 방열구조의 영향이 없는 동일 환경에서 방열조건에 따른 백색 LED 모듈의 광 특성을 측정 평가 하였다. 냉각팬이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 방열조건을 변화시켰고 DC 전류를 정격 전류 범위 이상 증가시키면서 백색 LED 모듈의 온도, 휘도, 상대 광 효율, 분광 분포 및 연색지수를 측정하고 비교분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 백색 LED의 온도 및 광 특성을 측정하는 측정 장치의 구성도이다. 실험을 위해 OSRAM社의 PAR16 5W 백색 LED를 사용하였다. 이 LED의 정격 동작전압은 3.2V이고 동작전류는 350mA이다. 또한 정격 최대접합온도는 125°C이다[9]. 이것은 원형 MCPCB(Metal Core PCB)의 금속판 위에 직렬로 연결된 3개의 LED로 구성되어 있다. 그리고 LED와 직렬로 저항을 연결하여 LED 전류를 결정하였다.

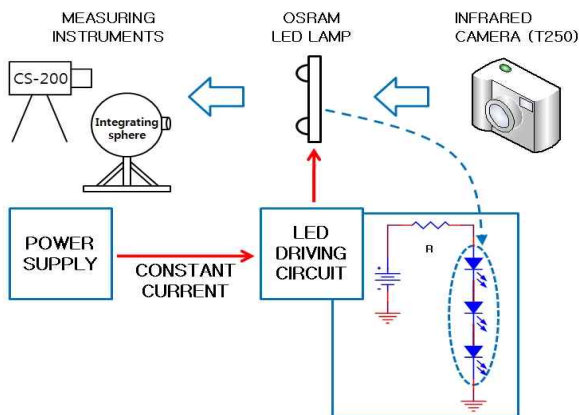


그림 1. 실험 장치 구성도
Fig. 1. Block diagram of the experiment system

본 연구에서는 하나의 백색 LED가 부착된 지점의 금속판 후면 온도를 측정하여 이 온도가 접합 온도와 상대적으로 비례한다는 가정 하에 측정 온도를 백색 LED 온도로 추정하였다. 또한, 실내용 LED 등기구의 경우, 천장에 매립하면 공기의 순환이 원활하지 않은 반면에 옥외용 LED 등기구는 공기의 순환이 잘 일어나는 환경이므로 실험에서는 냉각팬의 동작 여부로 위 두 조건을 모의하였다.

FLIR社의 T250 적외선 열화상 카메라를 사용하여 LED가 부착된 금속판의 후면 온도를 측정하였으며, Konica Minolta社의 CS-200 색채 휘도계를 사용하여 색온도, 휘도를 측정하였다. 분광분포 측정을 위하여 직경 500mm의 적분구와 Gigahertz-Optik社의 측광 장비 BTS256-LED를 사용하였다.

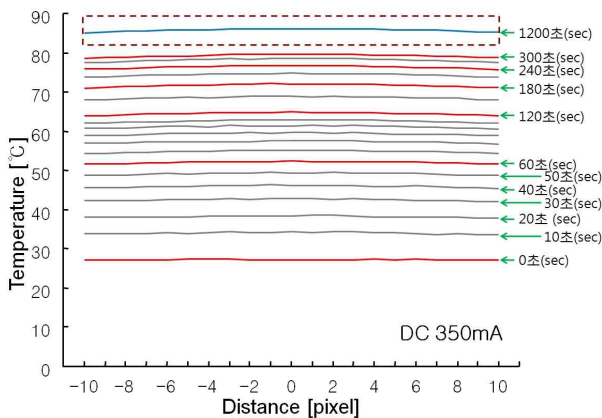
3. 실험 결과

3.1 백색 LED 후면의 온도 분포

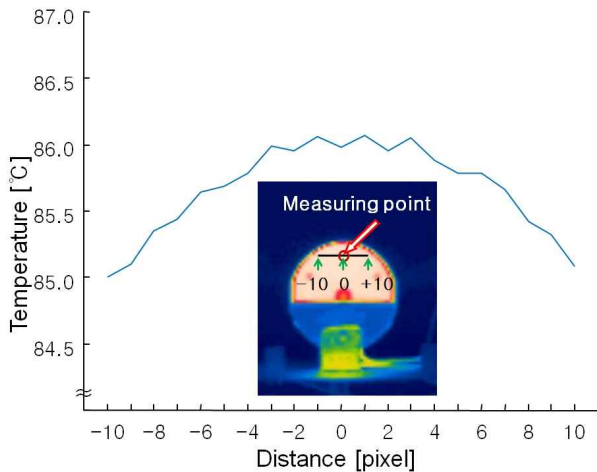
열화상 카메라를 사용하여 백색 LED가 부착된 금속판 후면의 온도 분포를 시간에 따라 측정하고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2 (a)는 백색 LED의 DC 전류를 350mA로 일정하게 유지시키고 백색 LED를 점등시킨 직후 과도 상태의 온도 분포를 나타낸 그래프이다. 그림 2 (b)는 백색 LED를 점등시키고 20분 후의 정상상태 온도분포를 확대하여 나타낸 그래프이다. 그림 2 (b)의 안에 있는 사진에서 보인 것과 같이 백색 LED가 부착된 지점을 온도 측정의 기준점으로 정하고 좌우로 10pixel 안에 있는 직선상의 온도를 시간 경과에 따라 측정하였다. 측정 시간은 백색 LED를 켜기 전 최초의 온도부터 10초 단위로 2분까지, 그 이후는 30초 단위로 5분까지 측정하였고 마지막 20분 후의 정상상태의 온도를 측정하였다. 분 단위로 측정된 온도의 간격을 보면 백색 LED가 켜지기 시작한 후부터 1분간 온도는 약 27°C부터 약 52°C지 급격하게 올라갔지만, 그 이후부터 백색 LED 후면의 온도 증가율은 감소하였다.

그림 3은 백색 LED가 점등되고 20분이 지난 후인 정상상태에서 백색 LED가 부착된 금속판의 후면 온

도 분포를 85.0°C부터 86.2°C까지 0.4°C 간격으로 4구간으로 나누어 측정된 그림이다. 그림의 회색 점들로 구성된 영역이 동일 온도를 나타낸다. 금속판 후면의 온도 분포는 측정지점을 중심으로 거의 좌우 대칭을 이루고 있으며 백색 LED가 부착된 지점의 온도가 가장 높고 주변부로 갈수록 온도가 낮아지지만, 그 차이는 1°C 정도에 지나지 않음을 알 수 있다. 그러므로 점등 후 20분이 지나면 백색 LED 온도가 정상상태로 되며 이때 백색 LED가 부착되어 있는 지점의 금속판 후



(a)



(b)

그림 2. DC 350mA 구동 시 백색 LED 후면 금속판의 온도 분포 (a) 과도상태와 (b) 정상상태
Fig. 2. Measured temperature of white LED at DC 350mA (a) transient state, (b) steady state

면 부 온도를 백색 LED 온도로 보아도 무리가 없다고 사료된다. 단 금속판 후면의 온도 분포는 백색 LED 패키지와 히트싱크 및 MCPCB 등의 방열구조에 따라 달라질 수 있다.

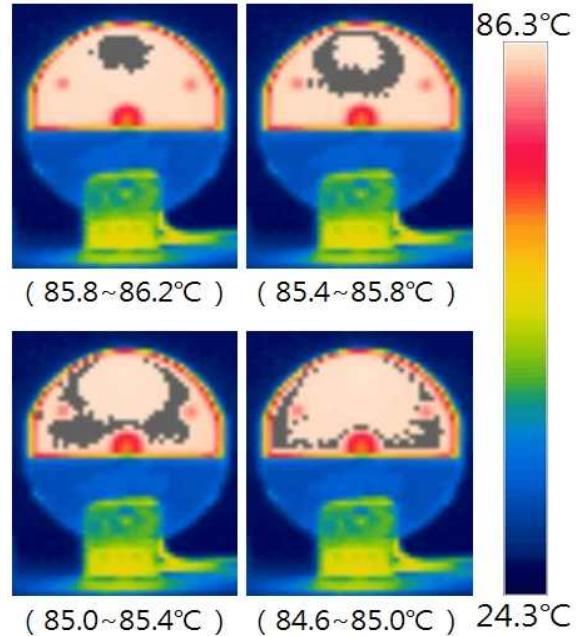


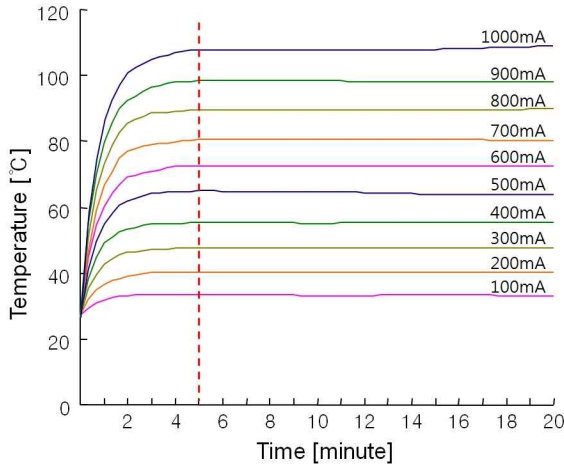
그림 3. 백색 LED 후면 금속판의 온도 분포 화상
Fig. 3. Temperature distribution on back side of white LED

3.2 방열조건과 LED의 온도 변화

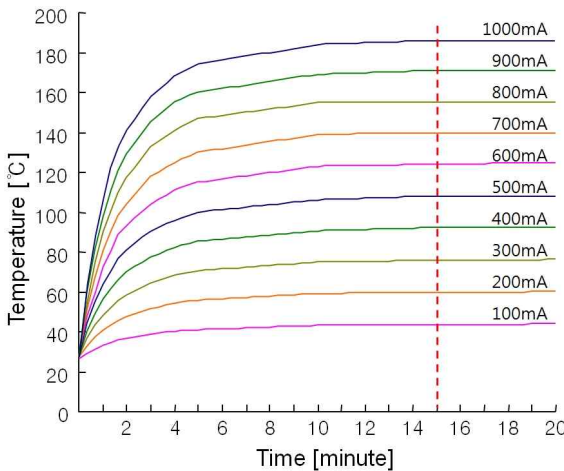
그림 4는 백색 LED의 구동 전류를 증가시키면서 시간에 따른 백색 LED의 온도변화를 나타낸 그래프이다. 이 실험에서는 100mA부터 1000mA까지 DC 전류를 일정하게 유지 시키면서 냉각팬이 있는 경우와 없는 경우의 시간에 따른 백색 LED 온도를 측정하였다. 백색 LED를 켜기 전 최초의 온도부터 20초 단위로 2분까지, 1분 단위로 5분까지, 5분 단위로 20분까지 백색 LED가 부착된 금속판의 후면 온도를 측정하였다.

냉각팬의 유무와 상관없이 백색 LED에 흐르는 전류가 많을수록 백색 LED 온도는 급격하게 증가하였다. 하지만 냉각팬이 있는 경우 백색 LED 온도는 5분 안에 정상상태로 도달하였지만, 냉각팬이 없는 경우에는 계속 온도가 상승하면서 15분이 넘어서야 정상상

태에 도달하였다. 정상상태 도달 시간은 20초당 온도 증가가 0.3°C 이하가 되는 시점으로 간주하였다. 즉 이 실험에서는 백색 LED를 점등하고 20분이 지난 시점을 백색 LED 온도의 정상상태로 정의하였다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 냉각팬이 있는 경우와 (b) 냉각팬이 없는 경우의 DC 전류 증가에 따른 백색 LED 온도변화
Fig. 4. Transient temperature of white LED (a) with cooling fan, (b) without cooling fan

3.3 백색 LED의 온도와 광 특성과의 관계

이 실험에서는 DC 전류를 100mA부터 900mA까지 변화시키면서 백색 LED의 온도, 색온도, 휘도를 측정

하고 상대 광 효율을 계산하였다. 상대 광 효율은 온도 증가에 따른 상대적인 휘도 값을 보기 위하여 백색 LED의 평균전력을 사용하여 단위 전력W당 휘도로 나타내었다. 이전 실험과 마찬가지로 냉각팬 유무로 방열조건을 변화시키면서 온도에 따른 백색 LED의 광 특성을 비교하였다. 각 측정조건은 다음과 같다.

- ① 100mA부터 400mA까지 100mA씩 증가
- ② 500mA부터 400mA까지 100mA씩 감소
- ③ 600mA부터 400mA까지 100mA씩 감소
- ④ 700mA부터 400mA까지 100mA씩 감소
- ⑤ 800mA부터 400mA까지 100mA씩 감소
- ⑥ 900mA부터 400mA까지 100mA씩 감소

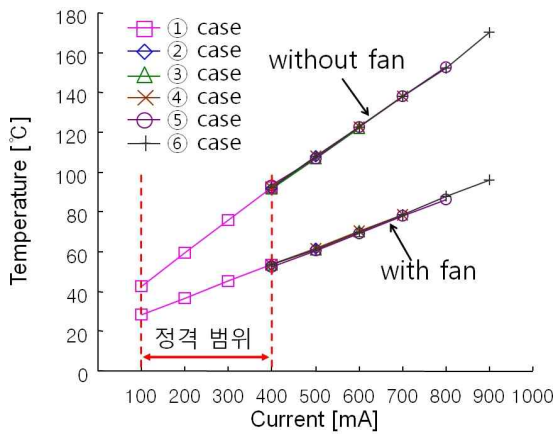
백색 LED의 정격전류 범위인 100mA부터 400mA까지는 위의 ①과 같이 100mA씩 전류를 증가시키면서 백색 LED 온도, 색온도, 휘도를 측정하였다. 500mA부터는 반대로 400mA까지 100mA씩 전류를 감소시키면서 측정하여 ①의 400mA에서 측정한 값과 비교하였다. 실험에서 사용된 백색 LED의 정격 전류 범위는 100mA~400mA로 명시되어 있기 때문에 정격전류의 최대값인 400mA를 기준으로 정하였다. 이렇게 400mA에서의 두 측정값을 비교함으로써 백색 LED의 열화 정도를 알 수 있다. 백색 LED가 열화 될수록 두 측정값의 차이가 벌어진다.

그림 5는 냉각팬 유무에 따른 방열 조건과 DC 전류에 따른 ①~⑥의 경우에서 온도와 색온도를 측정한 것이다. 그림에서 보면 냉각팬이 있는 경우와 없는 경우 모두 400mA에서의 측정값이 거의 일치하므로 온도와 색온도는 방열조건에 따라 거의 열화되지 않는다.

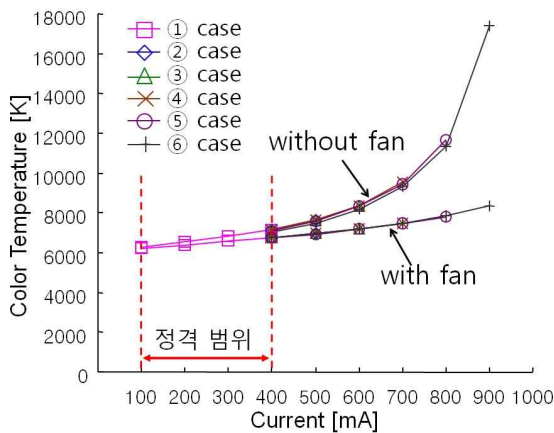
그림 6은 냉각팬 유무에 따른 방열 조건과 DC 전류에 따른 ①~⑥의 경우에서 휘도와 상대 광 효율을 측정한 것이다. 냉각팬이 있는 경우 400mA에서 이들의 측정값이 거의 일치한다. 하지만 냉각팬이 없는 경우 400mA에서의 측정값들이 차이가 난다. 그러므로 냉각 조건이 우수할 경우에는 일시적으로 정격 전류를 초과하여 구동하여도 발광 특성은 그다지 열화하지 않는다.

냉각팬이 있는 경우 백색 LED 온도는 전류에 비례해서 증가하지만 휘도는 큰 전류에서 포화 특성을 보

이므로 열로 소모되는 전력이 급격히 증가한다고 할 수 있다. 전류가 증가함에 따라 색온도 역시 증가하므로 색온도는 백색 LED 온도와 관련이 크다. 상대 광 효율은 100mA일 때에 비하여 900mA일 때 약 55.2% 감소하였다.



(a)



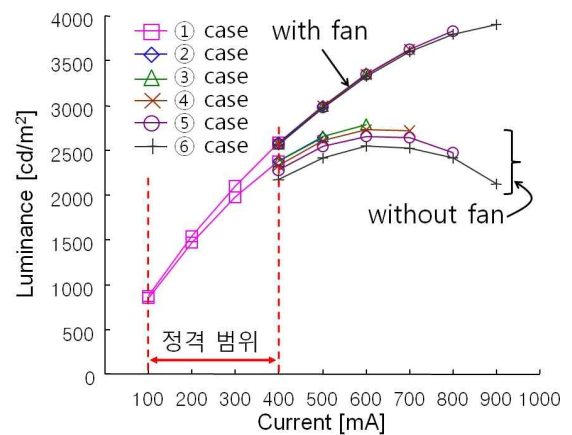
(b)

그림 5. 방열 조건과 DC 전류 증가에 따른 (a) 백색 LED 온도 (b) 색온도

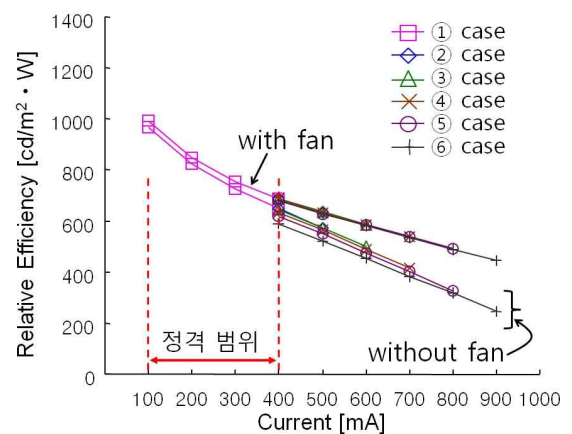
Fig. 5. (a) Device temperature, (b) color temperature with DC current and cooling condition

냉각팬이 없는 경우 백색 LED 온도와 색온도는 냉각팬이 있는 경우에 비하여 증가율이 높다. 특히 휘도는 600mA까지 증가하다가 700mA 이상부터 감소한다. 그러므로 상대 광 효율은 더욱 감소한다. 데이터

시트에 명시된 백색 LED의 최대 접합온도는 125°C이며[9], 700mA 이상에서 금속판의 후면 온도는 이를 넘어 선다고 볼 수 있다. 접합 온도의 증가는 LED 칩을 열화 시키므로 광 출력이 저하되어 전류를 증가시킬 때마다 휘도 값이 ①번 경우의 400mA에서 측정된 값에 비해 점차 낮아졌다. 백색 LED가 열화 되면서 휘도와 효율은 감소하지만, 온도와 색온도의 재현성은 유지되었다.



(a)



(b)

그림 6. 방열 조건과 DC 전류 증가에 따른 (a) 휘도 (b) 상대 광 효율

Fig. 6. (a) luminance, (b) relative efficiency with DC current and cooling condition

실험결과로부터 전류를 증가시키면 열로 변환되는 에너지가 증가하므로 백색 LED의 광 출력이 감소하

여 광 효율도 따라서 감소한다. 정격전류를 넘는 범위에서 백색 LED를 구동할 경우 방열이 제대로 되면, 온도에 의한 열화 정도가 작다. 그러나 방열이 불충분한 경우는 온도가 정격 온도 이상으로 상승하므로 쉽게 백색 LED의 광 특성 변화를 가지고 온다. 그러므로 백색 LED의 광 특성은 전류 증가에 따른 영향보다 온도에 따른 영향을 상대적으로 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

표 1은 100mA, 400mA, 900mA일 때, 냉각팬이 있는 경우에 대한 냉각팬이 없는 경우의 백색 LED 온도, 색온도, 휘도 및 상대 광 효율의 증감률을 나타낸 것이다. 정격전류 범위 안에서 방열 조건이 온도를 제외한 백색 LED의 광 특성에 미치는 영향은 10% 미만으로 미미하였다. 하지만 정격전류 범위를 벗어나면 방열조건이 백색 LED의 광 특성에 미치는 영향은 급격하게 증가하며 특히 색온도에 미치는 영향은 대단히 크다.

표 1. 방열 조건에 따른 백색 LED 온도와 광 특성 증감률

Table 1. Variation of temperature and lighting characteristics of white LED with cooling condition

	100mA	400mA	900mA
온도	49.8% ▲	72.8% ▲	76.9% ▲
색온도	0.8% ▲	5.8% ▲	108.3% ▲
휘도	2.9% ▼	7.9% ▼	45.5% ▼
상대 광 효율	2.5% ▼	5.9% ▼	44.1% ▼

그림 7은 백색 LED 전류가 100mA, 400mA, 600mA, 900mA일 때, 방열 조건에 따른 백색 LED의 분광분포를 측정된 것이고, 표 2는 이때의 광속과 연색지수를 측정된 것이다. 각각의 LED 전류에서 방열 조건에 따른 분광분포를 비교하면 냉각팬이 있는 경우 청색광은 전류가 증가함에 따라 점차 증가하지만 황색광은 어느 정도 증가하다가 포화하는 경향을 보인다. 또한 냉각팬이 없는 경우는 반대로 전류가 증가함에 따라 황색광이 급격히 감소한다. 청색광은 LED 칩의 발광에 기인하고 황색광은 형광체의 발광에 기인한다는 사실을 고려하면 방열조건이 나쁜 경우 전류가 증가

함에 따라 백색 LED 온도가 급격히 상승하여 형광체의 특성 및 효율을 감소시킨다고 볼 수 있다. 형광체로부터 나오는 황색광이 LED 칩으로부터 나오는 청색광보다 크게 감소하여 색온도는 급격히 상승하는데 반하여 오히려 연색지수는 개선되었다. 연색지수의 개선 원인에 대해서는 추후 실험을 통한 정량적인 분석이 필요하다.

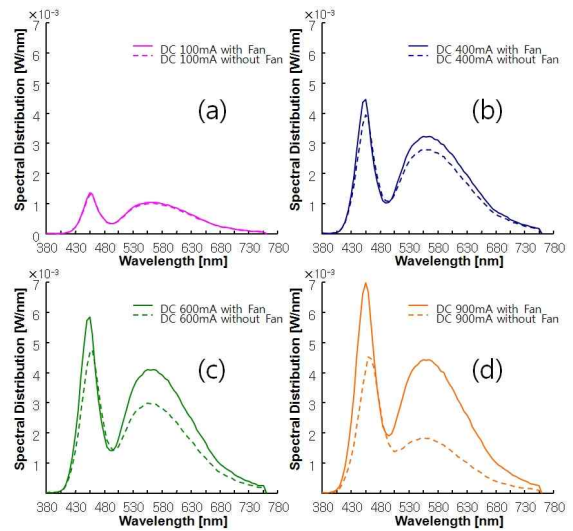


그림 7. 방열 조건과 DC 전류 증가에 따른 백색 LED의 분광 분포

Fig. 7. Spectral Distribution of white LED with DC current and cooling condition

표 2. 방열조건과 DC전류에 따른 백색 LED 광속과 연색지수

Table 2. Luminous flux and color rendering index of whit LED with cooling condition and DC current

	Fan이 있는 경우		Fan이 없는 경우	
	광속 lm	연색지수	광속 lm	연색지수
100mA	62.65	76.9	60.75	77.4
400mA	193.3	77.8	169.3	79.9
600mA	247.3	78.9	182.9	83
900mA	270.3	82	120.5	86.2

그림 8은 백색 LED의 분광분포에서 방열 조건에 따라 변화하는 청색광의 최대값과 황색광의 최대값을 나타낸 것이다. 팬이 없는 경우 백색 LED의 온도가

더욱 증가하기 때문에 청색광과 황색광의 최대값은 900mA에서 오히려 작아진다. 900mA일 때 방열 조건에 따른 청색광 최대값의 감소 비율은 35.2%이지만 황색광의 최대값의 감소 비율은 58.6%로 황색광의 감소 비율이 더욱 크다.

이로부터 온도가 급격히 상승하면 형광체의 광 변환 효율이 크게 저하된다고 추론할 수 있으며, 이때 LED 칩과 황색 형광체의 발광 비는 크게 변하여 백색 LED의 광색은 푸른색을 띠고 색온도가 크게 증가한다. 그러나 그림 5 (b)에서 보면 색온도의 열화 정도가 미미한 것으로 보아, 온도 증가에 따른 백색 LED의 열화가 분광특성에 주는 영향은 상대적으로 낮다.

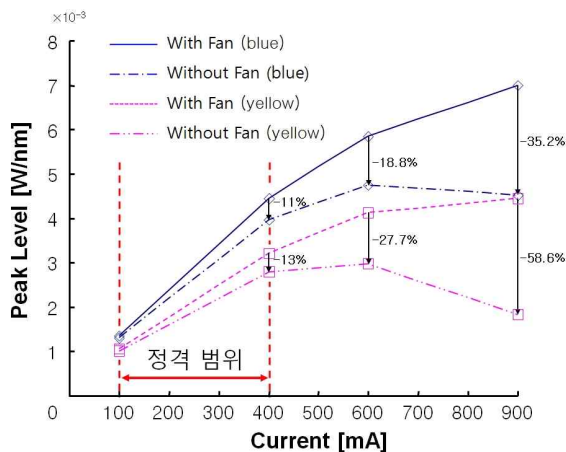


그림 8. 방열 조건과 DC 전류 증가에 따른 청색광과 황색광의 분광분포 최대값

Fig. 8. Peak level of blue and yellow in spectral distribution with DC current and cooling condition

4. 결 론

본 연구에서는 고출력 백색 LED를 사용하여 방열 조건과 DC 전류 증가에 따른 백색 LED 온도와 광 특성 변화를 측정 평가하였다. 백색 LED가 부착된 금속판 후면의 온도분포를 측정한 결과로부터 백색 LED가 부착된 지점의 금속판 후면 온도를 백색 LED 접합 온도로 상대적 비교 추정하였다.

실험결과 일반적으로 알려진 바와 같이 백색 LED는 전류가 증가하면 광 효율이 저하한다. 이와 더불어

백색 LED를 정격전류 범위 내에서 구동할 경우 팬이 있는 경우(강제 대류)와 팬이 없는 경우(자연 대류)의 광 출력 차이는 작았다. 그러나 정격전류 이상에서 구동할 경우에는 방열조건에 따라 백색 LED의 광 특성이 상당한 영향을 받았다. 또한 온도의 과다한 상승은 형광체의 광 변환 효율을 저하시켜 광 효율이 더욱 저하되고 색온도가 증가하는 경향으로 나타났다. 하지만 백색 LED의 분광특성은 온도에 따른 열화 정도가 미미하다. 그러므로 정격범위를 벗어나서 백색 LED를 구동하는 경우 백색 LED의 광 특성에 대해서 상대적으로 영향을 주는 요소는 전류조건보다는 방열조건으로 추론된다.

옥외용 LED 등기구는 공기의 순환이 잘 일어나므로 냉각조건이 양호하여 밝기 조절에 따라 일정 범위까지는 일시적으로 정격전류를 초과하여 사용할 수 있지만, 천장에 매입하는 실내용 LED 등기구의 경우 상대적으로 공기의 순환이 원활하지 않으므로 정격전류 범위 내에서만 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

백색 LED 모듈의 배열상태나 방열구조에 따라 광 특성이 다르므로 추후 다양한 LED 모듈에 대한 광 특성을 측정, 평가하는 실험이 필요하다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2012-H0401-12-1002)

References

- [1] Ji-Hyun Chung, Sung-Geun Song, Sung-Jun Park, Young-Hak Chang and Chae-Joo Moon, "The Operating System of High-power LED module with Back-Boost Mode", Journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.11, No.3, pp.201-208, 2006. [Korean].
- [2] Eung-Seok Kim, Cheol-Jin Kim, "A Constant Current Controller Design for Power LED Drive", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.59, No.3, pp.555-561, 2010. [Korean].
- [3] Eung-Seok Kim, Young-Tae Kim, "A Study on the Mathematical Modeling and Constant Current Adaptive Controller Design for Power LEDs", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.25, No.9, pp.8-13, September. 2011. [Korean].

- [4] Xiaobing Luo, Sheng Liu, "A Microjet Array Cooling System for Thermal Management of High-Brightness LEDs", IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol.30, No.3, pp.475-484, August. 2007.
- [5] Arturas Zukauskas, Michael S. Shur, and Remis Gaska, "Introduction to Solid-State Lighting", Wiley-Interscience Publication, pp.79-82, 2002.
- [6] M. F. Schubert, S. Chhajed, J. K. Kim, E. F. Schubert, D. D. Koleske, M. H. Crawford, S. R. Lee, A.J. Fischer, G. Thaler, M. A. Banas, "Effect of dislocation density on efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes" Appl. Phys. Lett., Vol.91, pp.231114, December. 2007.
- [7] Jeong Park, Moowhan Shin, Chin C. Lee, "Measurement of temperature profiles on visible light-emitting diodes by use of a nematic liquid crystal and an infrared laser" Optical Society of America, Vol.29, No.22, pp.2656-2658, November. 2004.
- [8] Sheng Liu, Jianghui Yang, Zhiyin Gan, Xiaobing Luo, "Structural optimization of a microjet based cooling system for high power LEDs" International Journal of Thermal Sciences, Vol.47, pp.1086-1095, October. 2007.
- [9] LW W51M Osram LED data sheet.

◇ 저자소개 ◇



윤장희 (尹長熙)

1984년 2월 26일생. 2010년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



염정덕 (廉正德)

1960년 5월 14일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~1995년 LG전자(주) 영상미디어(연). 1996년 일본 전기·통신대학 외국인 연구자. 1997~1999년 삼성SDI(주) 기술본부. 2000~2005년 경주대학교 컴퓨터전자공학부 조교수. 2006년~현재 숭실대학교 전기공학부 부교수.