

Temperature Effect on the Optical Properties of YAG and Silicate Phosphor-based White Light Emitting Diodes

Hyun-Woo Choi and Jae-Hyeon Ko[†]

Department of Physics, Hallym University, Hallydaehakgil 1, Chuncheon 200-702, Korea

(Received May 20, 2013; Revised manuscript June 12, 2013; Accepted June 14 2013)

Two white light emitting diodes(LEDs) were fabricated by using two kinds of yellow phosphor, YAG:Ce and (Sr,Ba)₂SiO₄:Eu, and their spectroscopic properties were analyzed as a function of temperature from room temperature to 80°C. The asymmetric double sigmoidal function was applied to both blue and yellow peaks of the emitting spectrum to obtain the center wavelength, the amplitude, the half width, and the skewness parameters. According to this analysis, the center wavelength of the blue peak shifted to longer wavelength while that of the yellow peak shifted to shorter wavelength. In addition, some of the skewness parameters were found to increase upon heating, which indicates that spectrum asymmetry becomes enhanced at higher temperatures. The changes in the color coordinates and the luminous efficacy were larger for the case of silicate-based white LED. These results suggest that the silicate-based white LED is inferior to the YAG-based white LED from the viewpoint of color stability, efficacy and color rendering index.

Keywords: White LED, Yellow phosphor, Luminous characteristics, Temperature stability

OCIS codes: (110.2945) Illumination design; (120.5240) Photometry; (230.3670) Light-emitting diodes

온도 변화에 따른 YAG 및 Silicate형광체 기반 백색 LED의 광특성 변화에 대한 연구

최현우 · 고재현[†]

한림대학교 전자물리학과

☉ 200-702 강원도 춘천시 옥천동 한림대학길 1

(2013년 5월 20일 받음, 2013년 6월 12일 수정본 받음, 2013년 6월 14일 게재 확정)

본 논문에서는 YAG:Ce와 (Sr, Ba)₂SiO₄:Eu 등 두 종류의 형광체를 사용하여 백색 LED를 제작하고 온도변화에 따라 각각의 백색 LED의 발광 특성이 어떻게 변하는지 조사하였다. 상온에서 80°C 사이의 구간에서 측정된 두 백색 LED의 발광 스펙트럼을 분석하기 위해 asymmetric double sigmoidal 함수를 활용하였다. 이 함수를 백색 LED의 청색 발광 및 황색 발광 피크에 적용해서 각 피크의 중심파장과 진폭, 반치폭 및 비대칭성을 온도의 함수로 구하였다. 그 결과 온도가 증가할수록 청색 피크의 중심파장이 장파장 쪽으로 천이되고 황색피크의 중심파장이 단파장 쪽으로 천이되며 비대칭성 또한 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 두 백색 LED의 색도변화에 반영되었는데, 실리콘계 형광체 기반 LED의 색도 변화가 더 크음을 알 수 있었다. 발광 효율 역시 온도가 증가할수록 크게 떨어지는 것을 볼 수 있었는데 YAG 형광체 기반 LED의 발광효율 저하 폭이 더 적음을 확인하였다. 이상의 결과는 YAG 형광체 기반 백색 LED가 실리콘계 형광체 기반 LED에 비해 색도안정성, 발광효율, 연색지수 측면에서 더 뛰어나다는 것을 의미한다.

Keywords: 백색 LED, 황색 형광체, 발광 특성, 온도안정성

OCIS codes: (110.2945) Illumination design; (120.5240) Photometry; (230.3670) Light-emitting diodes

I. 서 론

고체발광다이오드(Light Emitting Diode, LED)의 응용 분야는 최근 단순한 표시등이나 디스플레이용 광원을 넘어 일

반 조명으로 확대되고 있다. LED는 형광등을 포함한 기존 광원에 비해 환경친화적이고 소비전력이 적으며 크기가 작아 다양한 디자인 요소를 적용해 새로운 가치를 가지는 조명을 개발할 수 있다는 장점을 가진다. 백색 LED는 보통 단파

[†]E-mail: hwangko@hallym.ac.kr

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

장의 LED 칩 위에 파장변환물질인 형광체를 도포하는 형태로 백색광을 구현한다^[1]. 그림 1(a)는 일반적인 백색 LED의 구조를 나타내는 개략도이다. 단파장 LED로는 주로 청색 계열의 빛을 방출하는 InGaN계 LED 칩이 사용되고 이 경우 파장변환물질로는 청색을 노랑색으로 바꾸어주는 황색 형광체나 청색을 빨강과 녹색으로 변환시켜주는 두 종류의 형광체가 혼합되어 사용되기도 한다^[2]. 반면에 높은 연색지수를 요구하는 응용분야에서는 근자외선 LED 칩 위에 삼파장 형광체를 도포한 백색 LED가 사용된다^[3]. 이처럼 형광체는 백색 LED의 발광특성 및 성능에 직접적인 영향을 끼치는 구성요소라고 볼 수 있다. 백색 LED에 주로 사용되고 있는 황색 형광체는 Ce이 활성화제로 첨가된 YAG(Yttrium Aluminium Garnet)계 형광체지만, 최근 실리케이트(Silicate) 계열 형광체가 YAG 형광체를 부분적으로 대체해 사용되기도 한다^[4, 5]. LED 조명이 가지는 문제점 중 하나는 접합부의 온도가 변화하면 그에 따라 발광효율뿐만 아니라 스펙트럼의 형태까지 변하면서 색도변화가 발생한다는 것이다^[1, 6]. 형광체 역시 온도에 의한 영향을 받는데, 일반적으로 온도가 올라갈수록 형광체 효율이 저하하는 것으로 알려져 있다^[7]. 따라서 형광체가 적용된 백색 LED의 온도에 따른 특성 변화는 백색 LED 조명을 개발하는데 있어서 매우 중요한 요소라고 볼 수

있다. 특히 백색 LED의 발광스펙트럼이 온도 등의 외부 변수에 어떻게 의존하는지를 정확히 분석하는 것은 백색 LED의 광학적 성능을 개선하는데 있어서 매우 중요한 부분이다. 이러한 분석을 위해 다양한 수학적 함수들이 도입되었고 적절한 함수의 적용을 통해 스펙트럼의 특징들, 즉 중심파장, 폭 및 비대칭성 등을 성공적으로 분석할 수 있음이 알려져 있다^[8-10].

우리는 이전 연구에서 YAG 및 실리케이트 계 형광체가 적용된 두 종류의 백색 LED의 상온에서의 발광특성이 구동 전류에 따라 어떻게 변하는지를 보고한 바 있다^[11]. 그런데 백색 LED 조명의 일반적인 구동 환경은 상온보다 높은 온도로 유지되기 때문에 온도 상승에 따른 특성 변화의 정밀한 분석이 백색 LED 성능의 향상성을 유지하는 측면에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 종류가 다른 두 황색 형광체(YAG 및 실리케이트계 형광체)를 적용해 백색 LED를 제작한 후 이 두 백색 LED의 발광특성이 온도에 따라 어떻게 바뀌는지를 체계적으로 조사하였다. 특히 스펙트럼의 형태를 포함한 발광특성의 변화를 분석해 두 형광체가 LED의 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 비교하고 논의하였다.

II. 백색 LED 제작 및 평가 방법

본 실험에서는 청색 LED(Chimei, 대만) 3 개가 포함된 지름 4mm의 표면실장형 패키지를 사용하였고 청색 LED의 중심 파장은 457.5~460 nm였다. 그림 2는 사용된 청색 LED 패키지의 구조를 보여준다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼

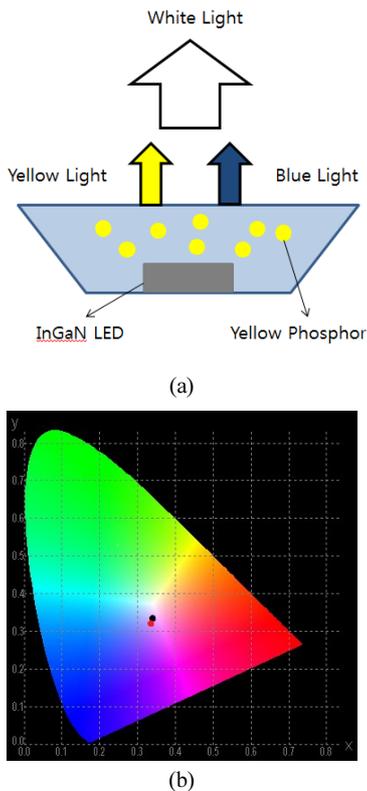


FIG. 1. (a) A schematic figure of a white LED where phosphor particles are coated over a chip. (b) The comparison of white points of two LEDs on the chromaticity diagram measured at room temperature. The black dot and the red dot correspond to the YAG-based and silicate-based white LEDs, respectively.

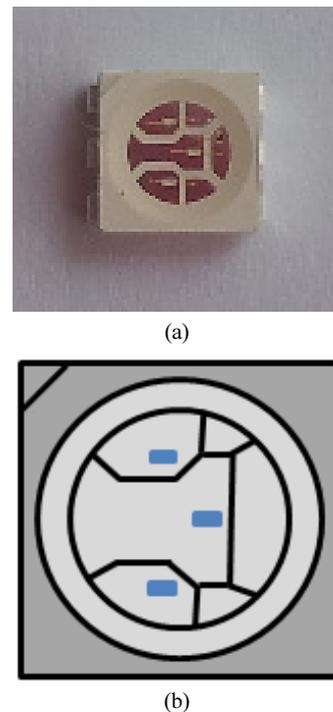


FIG. 2. (a) Photo of the surface-mount LED package used in this study and (b) its schematic drawing.

세 개의 청색 LED 칩이 표면실장형으로 패키지 위에 배치되어 있다. 황색 형광체로는 YAG($Y_3Al_5O_{12}:Ce$)계 형광체(Nemoto사, Y-4-3-2)와 실리케이트($(Sr,Ba)_2SiO_4:Eu$)계 형광체(Intermatrix사, EY4453)를 사용하였다. YAG 형광체의 입자 크기는 8.0~8.9 μm 이고 방출스펙트럼의 피크 파장은 569 nm였다. 실리케이트계 형광체의 평균 입경은 15.5 μm 이고 방출스펙트럼의 피크 파장은 565 nm였다. 청색 LED에 도포하기 전 YAG계 형광체는 실리콘(다우코닝사, 0E-6630A, B)과 4:96으로 배합을 하였고 실리케이트계 형광체는 8:92로 배합을 하였다. 이렇게 형광체 종류에 따라 실리콘과의 배합비율을 달리 설정한 것은 형광체 분말의 입자 크기가 다르기 때문이다. 형광체가 포함된 실리콘으로 LED 칩을 도포하기 위해서는 실리콘을 단단하게 경화시켜야 하는데, 이를 위해 실리콘의 약 1/4 정도에 해당하는 경화제를 함께 넣어 형광체와 배합하였다. 균일하게 섞은 형광체와 실리콘을 LED 패키지 위에 도포하고 이를 오븐 내에서 한 시간 ~ 두 시간 정도 가열해서 경화시켰다. 위에 언급한 배합비를 통해 두 백색 LED가 CIE(Commission International de l'Eclairage) 기준 등에너지(equal energy) 조건인 $x=0.333, y=0.333$ 에 가까운 색좌표를 가지도록 제작되었다. 보다 구체적으로 제작된 YAG계 형광체의 백색 LED는 $x=0.328, y=0.352$, 실리케이트계 형광체의 백색 LED는 $x=0.320, y=0.336$ 의 색좌표를 나타냈다.

그림 1(b)는 두 종류의 형광체를 이용하여 제작된 백색 LED의 CIE 색좌표를 보여주고 있는데 검정색과 빨강색 점은 각각 YAG 형광체 및 실리케이트계 형광체가 적용된 백색 LED의 색좌표를 나타낸다. 두 색좌표 모두 $x=0.333, y=0.333$ 근처에 있음을 확인할 수 있다.

이렇게 준비한 백색 LED를 투명유리창이 있는 가열로에 넣고 상온에서부터 온도를 증가시키면서 발광 특성을 측정하였다. 온도는 K-타입(chromel-alumel) 열전대(thermocouple)를 이용해 측정하였다. 측정 과정 중 온도 변화는 ± 0.05 도 이내로 조절되었다. 백색 LED의 휘도와 스펙트럼, 색좌표를 측정하기 위한 측정장비로는 분광휘도계인 PR-670 (Photo Research)을 사용하였다. 분광휘도계와 측정할 백색 LED의 거리는 1m로 설정하였다. YAG계 형광체기반 백색 LED의 초기 구동 전압과 전류는 3.0053 V와 60 mA, 실리케이트계 형광체기반 백색 LED의 초기 구동 전압과 전류는 3.1397 V 및 60 mA로 설정해서 거의 동일한 소비전력으로 구동되도록 하였다. 가열로의 온도를 25도부터 80도까지 5도 간격으로 변화시키며 각 백색 LED의 발광스펙트럼, 휘도, 색좌표를 측정하였다. 총 열 번의 측정을 수행하였고 이를 이용해 발광스펙트럼의 중심파장, 폭, 비대칭성 및 세기와 관련된 각 변수들의 평균값 및 표준편차를 계산하였다.

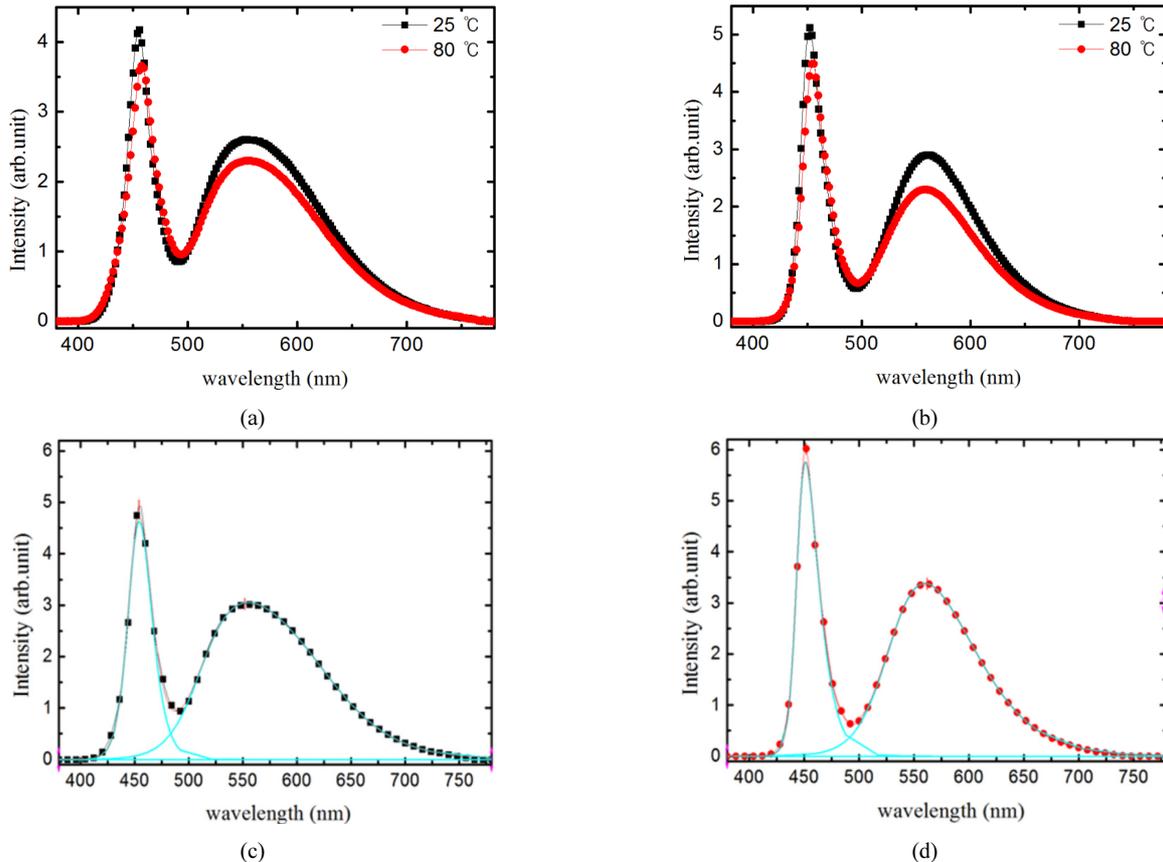


FIG. 3. The comparison of an emitting spectrum of (a) a YAG-based and (b) a silicate-based white LED at two temperatures. The emitting spectrum of (a) a YAG-based and (b) a silicate-based white LED along with best-fit results (solid lines) obtained by using Eq. (1).

III. 결과 및 논의

그림 3(a)와 (b)는 각각 YAG계 형광체와 실리케이트계 형광체로 만든 백색 LED의 발광스펙트럼을 상온(25°C)과 80°C에서 비교한 것이다. 450 nm 부근의 날카로운 피크는 청색 LED의 발광 스펙트럼이고 560 nm 부근에 위치한 넓은 비대칭 피크는 황색 형광체에 의해 형성되는 발광스펙트럼이다. 두 백색 LED 모두 온도 변화에 따라 스펙트럼의 세기뿐 아니라 각 피크의 중심파장 및 형태도 변화되었음을 알 수 있다. 아울러 두 종류의 형광체가 방출하는 스펙트럼의 폭과 형태가 상당히 다를 수 있다. 황색 파장대역의 폭을 보

면 실리케이트계 형광체 기반 백색 LED보다 YAG계 형광체 기반 백색 LED가 더 넓고, 이것이 연색지수나 색재현성 등 다양한 특성에 영향을 끼치게 된다.

그림 3에서 제시된 스펙트럼을 보다 정밀하게 분석하기 위해 수학적 함수를 넣어 스펙트럼을 곡선맞춤(curve-fitting)하고자 하였다. 분광 분석 분야에서 사용되는 여러 종류의 함수를 사용해 곡선맞춤을 시도한 결과 이전 연구 결과^[11]와 동일하게 청색 파장대역과 황색 파장대역 모두 Asymmetric double sigmoidal function(ADSF)를 사용하는 것이 가장 적합하다는 결과가 나왔다. 식의 형태는 다음 식 (1)로 주어진다.

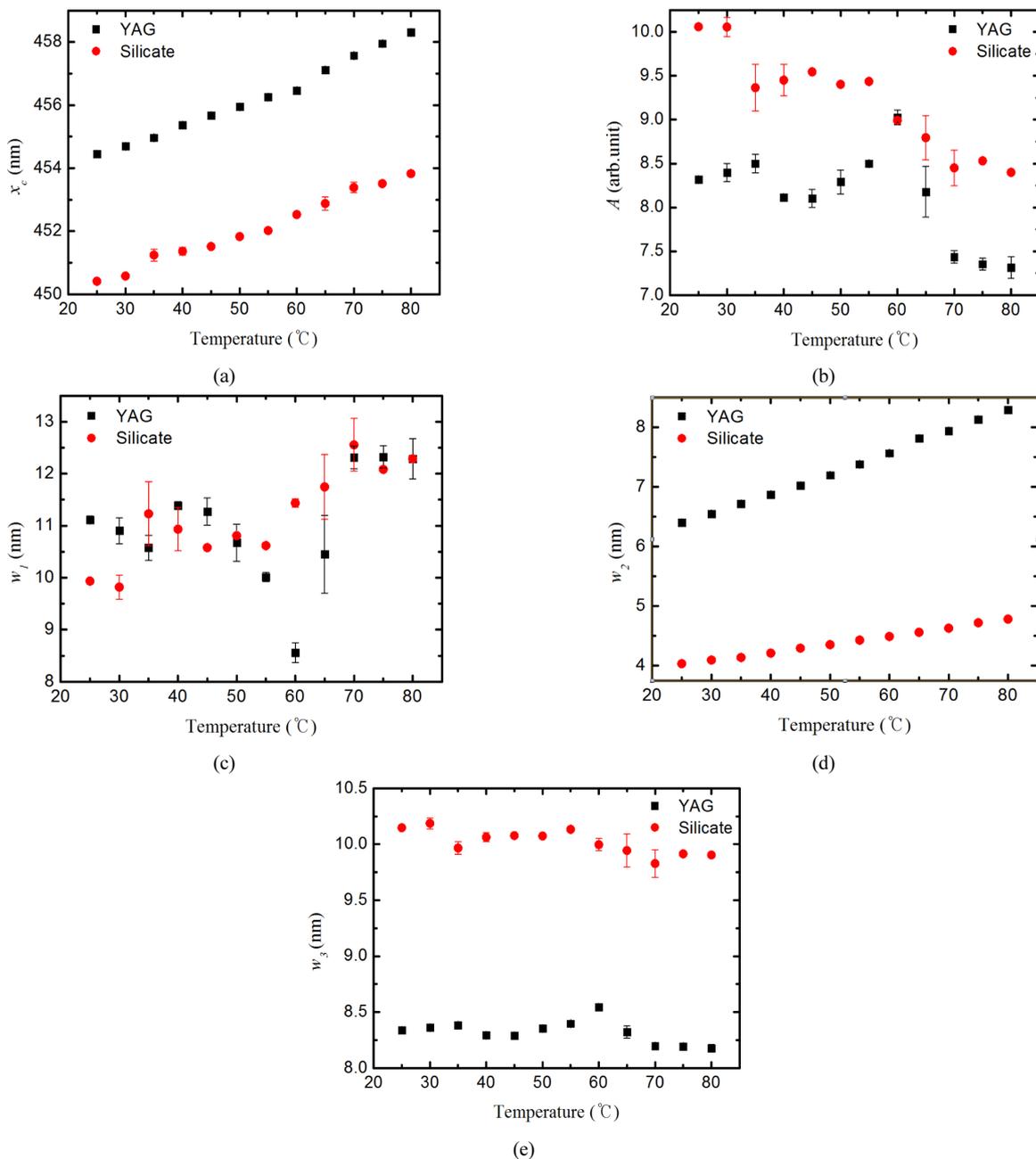


FIG. 4. The temperature dependence of x_c , w_1 , w_2 and w_3 of the spectra of blue LED chips.

$$y = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + \exp[-(x - x_c + w_1/2)/w_2]} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + \exp[-(x - x_c - w_1/2)/w_3]} \right\} \quad (1)$$

이 식에서 y 는 파장별 세기, y_0 는 배경 신호, x 는 파장, A 는 스펙트럼의 세기와 관련이 있는 진폭 매개변수이다. 또한, x_c 는 중심파장이고 w_1 는 반치폭(full width at half maximum)을 반영하는 매개변수이며, w_2 와 w_3 는 각각 스펙트럼의 좌우에서 비대칭의 정도(skewness)를 나타내는 매개변수이다. 이 식과 최소제곱법(least square method)을 이용해 각 스펙트럼에 대한 곡선맞춤 매개변수들을 얻었고, 한 조건에 대해 10번 측정된 결과의 평균값과 표준편차를 구하였다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 두 백색 LED의 스펙트럼에 대한 곡선맞춤의 결과를 실선으로 보여주고 있다.

백색 LED의 온도를 25도에서 80도까지 5도씩 변화시키며 측정된 백색 LED의 발광 스펙트럼에 대한 곡선맞춤의 결과가 그림 4와 그림 5에 제시되어 있다. 그림 4는 청색 LED의 발광피크, 그림 5는 황색 형광체의 발광피크에 대한 분석 결과로써, 모두 다섯 개의 곡선맞춤 매개변수의 온도 의존성을 보여주고 있다. 실험 오차는 표준편차로 표현되어 있다. 그림 4(a)는 온도에 따라 변하는 청색 스펙트럼의 중심파장을 나타낸 그래프이다. 이론적으로 온도 접합부의 온도가 증가

하면 식 (2)로 주어지는 Varshini 식에 의해 온도 T 에서의 밴드갭 $E_g(T)$ 이 줄어들고 파장이 길어지게 된다.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T - \beta} \quad (2)$$

이 식에서 $E_g(0)$ 는 절대온도 0도에서의 밴드갭이고 α , β 는 Varshini 매개변수라 불리는 곡선맞춤 변수들이다. 이 식에 의하면 상온 이상의 온도에서는 밴드갭이 온도에 대해 선형으로 감소하게 되고 이에 따라 파장도 근사적으로 선형으로 증가한다. 그림 4(a)는 청색 발광 피크의 중심파장이 온도에 대해 거의 선형으로 변화하고 있음을 보여주고 있다. 그림 4(b)가 나타내는 청색광 스펙트럼의 세기는 온도에 따라 점차적으로 감소하는 경향성을 보여주고 있고 이를 통해 두 백색 LED의 발광효율이 온도 상승에 따라 저하될 것으로 예상된다. 청색 발광 피크의 반치폭 및 비대칭성은 LED 내 이동자(carrier)의 온도와 관련이 있는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 전하 이동자의 온도 변화는 접합부의 온도와 선형의 관계를 가지고 있으므로 w_1 , w_2 및 w_3 모두 온도에 따라 선형으로 변할 것으로 예상된다. 그렇지만 그림 4의 결과는 w_1 및 w_3 는 온도에 무관하게 비슷한 값을 나타내고 있고 w_2 는 온

TABLE 1. Curve-fitting parameters of the emitting spectrum of the YAG-based white LED at six temperatures

Temperature (°C)		25	35	45	55	65	75
Blue Peak	x_c (nm)	454.5	455.0	455.7	456.3	457.1	458.0
	A (arb.unit)	8.3	8.5	8.1	8.5	8.2	7.4
	w_1 (nm)	11.1	10.6	11.3	10.0	10.4	12.3
	w_2 (nm)	6.4	6.7	7.0	7.4	7.8	8.1
	w_3 (nm)	8.3	8.4	8.3	8.4	8.3	8.2
Yellow Peak	x_c (nm)	566.3	566.1	565.8	565.5	565.3	565.1
	A (arb.unit)	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	2.9
	w_1 (nm)	109.1	108.7	108.2	107.6	107.4	107.8
	w_2 (nm)	15.7	16.0	16.4	16.6	17.1	17.3
	w_3 (nm)	33.5	33.8	34.0	34.4	34.5	34.6

TABLE 2. Curve-fitting parameters of the emitting spectrum of the silicate-based white LED at six temperatures

Temperature (°C)		25	35	45	55	65	75
Blue Peak	x_c (nm)	450.4	451.2	451.5	452.0	452.9	453.5
	A (arb.unit)	10.1	9.4	9.5	9.4	8.8	8.5
	w_1 (nm)	9.9	11.2	10.6	10.6	11.7	12.1
	w_2 (nm)	4.0	4.1	4.3	4.4	4.6	4.7
	w_3 (nm)	10.1	10.0	10.1	10.1	9.9	9.9
Yellow Peak	x_c (nm)	561.8	561.2	560.1	560.1	558.9	558.1
	A (arb.unit)	4.4	4.4	4.4	4.2	4.2	4.0
	w_1 (nm)	64.3	63.2	60.2	61.8	58.5	57.0
	w_2 (nm)	15.4	15.8	16.2	16.3	16.9	17.3
	w_3 (nm)	31.2	31.6	32.3	32.2	32.9	33.3

도에 대해 선형으로 변하는 양상을 보여주고 있음을 나타낸다. 스펙트럼의 반치폭과 비대칭성과 관련된 이러한 결과는 청색 LED의 스펙트럼이 고온으로 갈수록 왼쪽으로 더 큰 비대칭성을 나타낸다는 것을 의미한다.

그림 5(a)는 황색형광체 발광피크가 나타내는 중심파장의 온도의존성을 보여준다. 두 형광체 모두 중심파장이 온도증가에 따라 감소하지만 실리케이트 형광체의 변화폭이 더 크음을 알 수 있다. 이러한 결과는 실리케이트계 백색 LED의 색도안정성에 좋지 않은 영향을 끼칠 것으로 예상할 수 있다. 동일 구동 조건에서 스펙트럼의 세기는 그림 5(b)에서 볼 수 있는 것처럼 서서히 감소하고 있다. 이는 형광체의 발광효율

이 온도상승에 따라 줄어들음을 반영한다. 고온에서는 형광체를 구성하는 모체(host)의 열적 진동이 더 심해지면서 여기된 활성체(activator)의 에너지가 복사의 형태로 방출되지 않고 양자화된 격자진동(phonon)의 형태로 변할 확률이 높아지게 된다. 반치폭 및 비대칭성을 나타낸 그림 5(c)~(e)를 보면 왼쪽과 오른쪽의 비대칭성을 나타내는 w_2 와 w_3 가 온도상승에 따라 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 형광체의 피크 자체가 고온에서 더 넓어진다는 것을 의미하고 이러한 결과는 그림 3(a)와 (b)의 스펙트럼 현상에서도 확인될 수 있다.

그림 4와 그림 5에 제시된 매개변수들의 자세한 수치는 표 1과 2에 정리되어 있다. 표 1은 YAG 형광체 기반 LED의 발

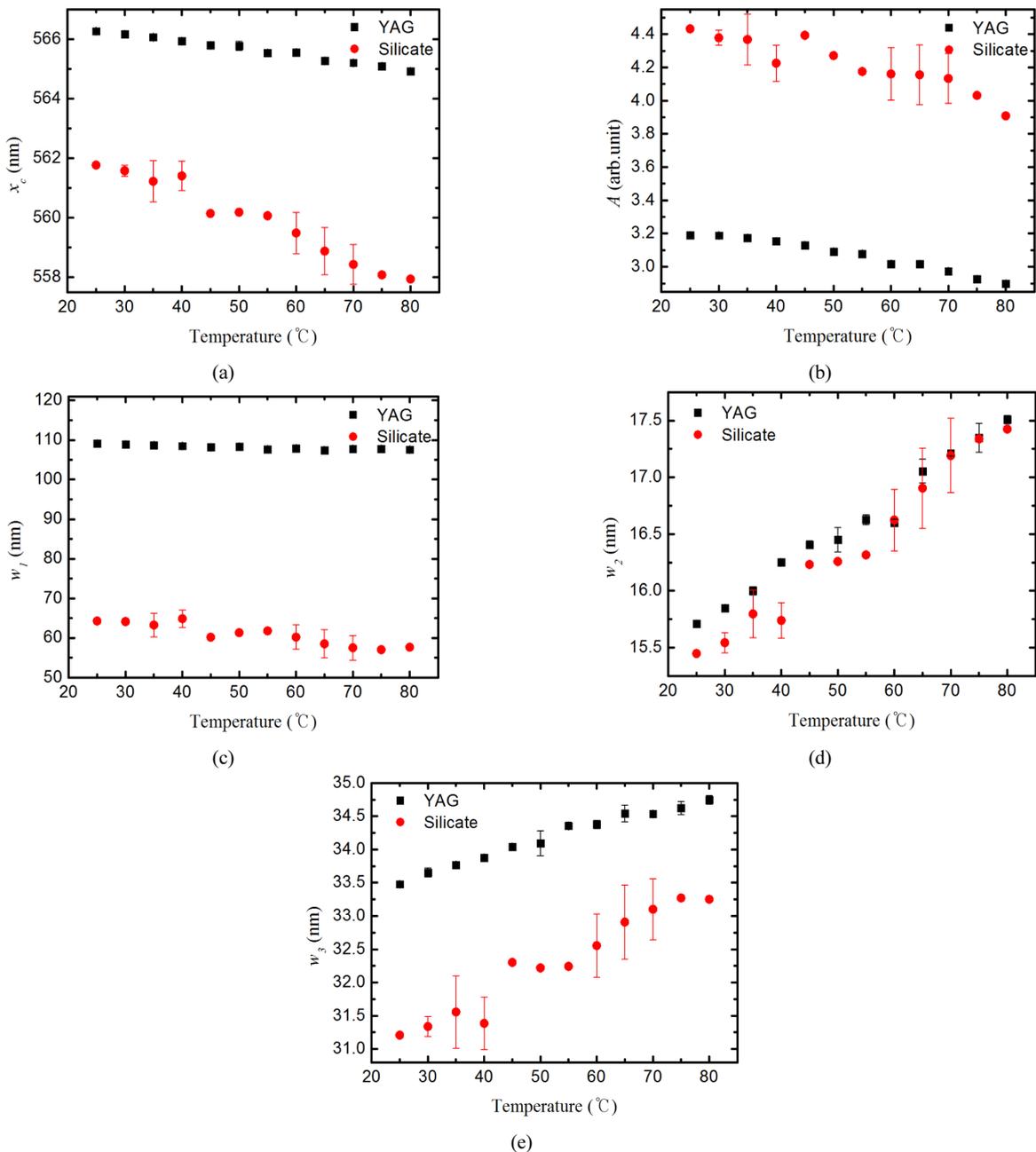
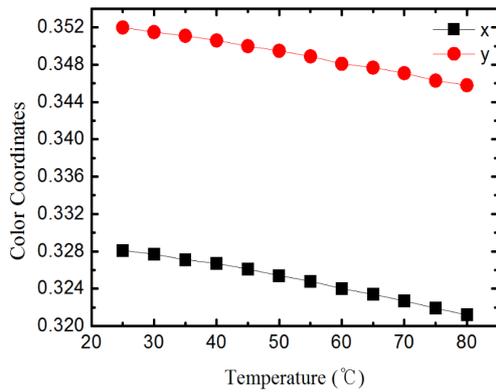
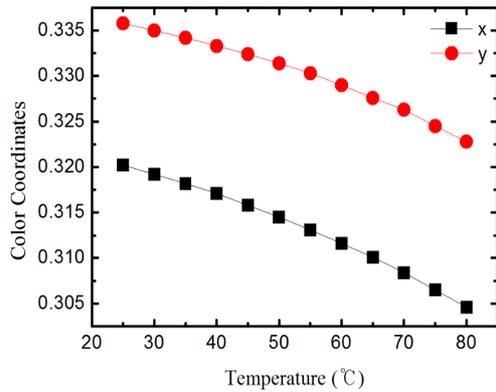


FIG. 5. The temperature dependence of x_c , w_1 , w_2 and w_3 of the spectra of yellow phosphors.

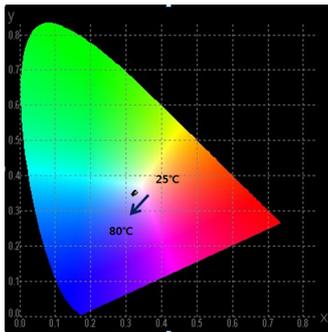


(a)

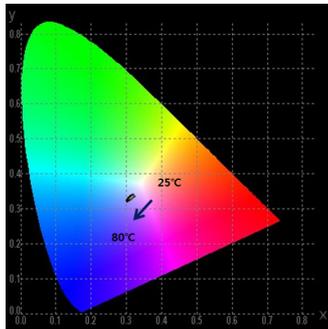


(b)

FIG. 6. The dependence of the color coordinates on temperature of (a) a YAG-based and (b) a silicate-based white LED.



(a)

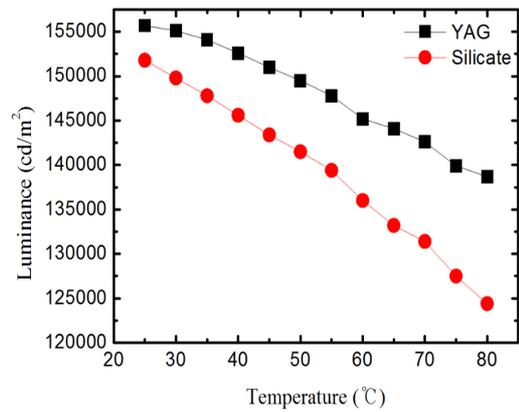


(b)

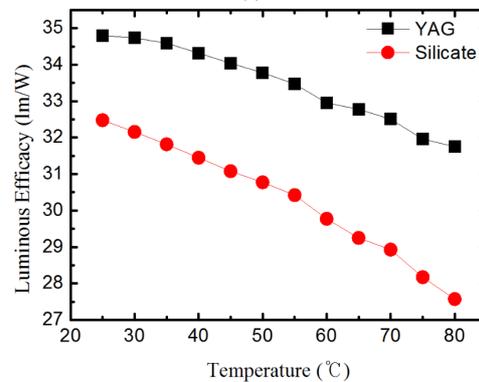
FIG. 7. The dependence of the color coordinates on temperature of (a) a YAG-based and (b) a silicate-based white LED shown on the chromaticity diagram.

광스펙트럼에 대한 매개변수들이고 표 2는 실리케이트 형광체 기반 LED의 발광스펙트럼에 대한 매개변수들이다.

이상 스펙트럼의 형상에 대한 분석 결과는 두 백색 LED가 온도 변화에 따라 뚜렷한 색도 변화를 보이리라는 점을 시사한다. 그림 6(a)와 (b)는 각각 YAG 형광체와 실리케이트 형광체 기반 백색 LED의 색좌표의 온도의존성을 보여준다. 온도 상승에 따라 두 색좌표 x, y 모두 단조감소하는 경향성을 보여주고 있다. 그런데 YAG 형광체 기반 LED의 색좌표 변화량이 $\Delta x \sim 0.004$, $\Delta y \sim 0.007$ 에 불과한 데 반해, 실리케이트계 형광체 기반 LED의 경우는 $\Delta x \sim 0.013$, $\Delta y \sim 0.015$ 로 YAG 형광체 기반 LED의 색도 변화에 비해 두 배 이상임을 알 수 있다. 이러한 변화는 그림 7에 표시된 색도도 (chromaticity diagram) 상에서도 확인이 가능하다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 YAG 형광체와 실리케이트 형광체 기반 백색 LED의 색좌표의 온도의존성을 색도도 상에 표시한 것이다. 두 백색 LED 모두 온도 증가에 따라 동일한 방향으로 색좌표가 변화하지만 실리케이트 형광체 기반 LED의 변화폭이 훨씬 큼을 알 수 있다. 이러한 결과는 온도를 고정하고 전류를 변화시킨 기존 결과^[11]와는 상반된 것이다. 상온에서 전류를 변화시킨 기존 결과는 전류 변화에 따른 색도 변화가 YAG 형광체 기반 LED에서 더 크게 측정되었다.



(a)



(b)

FIG. 8. The dependence of (a) the luminance and (b) the luminous efficacy on the driving current of two white LED's.

그림 8(a)는 동일 구동조건에서 온도변화에 따라 변화하는 휘도를 보여준다. 두 백색 LED 모두 온도가 올라갈수록 휘도가 단조감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 모든 온도에서 YAG계 형광체기반 백색 LED가 실리케이트계 형광체 기반 백색 LED보다 더 높은 휘도를 나타내었고, 두 LED 사이의 휘도 차이는 온도가 올라갈수록 더 벌어지고 있음을 알 수 있다. 그림 8(b)는 두 백색 LED의 발광효율의 온도의존성을 나타낸 것이다. 이전 연구^[11]에서 사용한 방법과 동일하게 본 연구에서도 -50도부터 50도까지 10도의 각도 단위로 측정된 LED의 휘도분포로부터 광속을 구한 후 소비전력으로 나눠서 발광효율을 계산을 하였다. 그 결과 YAG계 형광체 기반 백색 LED가 실리케이트계 형광체 기반 백색 LED보다 상온에서는 2 lm/W 이상, 가장 높은 온도에서는 4 lm/W 이상 더 높은 발광효율을 나타내고 있음을 확인하였다.

이상의 결과는, 이전에 보고된 전류의존성 결과^[11]와 더불어, 적절한 수학적 함수를 도입함으로써 온도나 구동전류와 같은 외부 변수의 변화에 대해 백색 LED의 발광스펙트럼을 정량적으로 해석할 수 있음을 보여준다. 이러한 정보는 LED 구동회로 내에 저장되어 외부 조건의 변화에 대한 LED 조명 장치의 항상성을 유지하는 피드백(feedback) 기능에 활용될 수 있을 것이다. 최적의 성능에 더해 장기신뢰성을 가진 LED 조명을 개발하기 위해서는 최근 다양한 측면에서 연구되고 있는 광학 설계^[12, 13]뿐 아니라 LED의 열적 특성, 분광 특성에 대한 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 연구에서는 YAG 및 실리케이트계 형광체를 가지고 백색 LED를 제작한 후 온도변화에 따라 백색 LED의 발광특성이 어떻게 변하는지 비교, 분석하였다. 동일한 백색광을 구현하기 위해 CIE 색좌표 등에너지 조건인 $x=0.333$, $y=0.333$ 에 가까운 백색 LED를 제작하였고 온도 상승에 따른 발광 스펙트럼의 변화를 정량적으로 분석하기 위해 Asymmetric double sigmoidal function를 채택하였다. 이를 청색 발광 및 황색 발광 피크에 적용함으로써 각 피크의 중심파장과 진폭, 그리고 피크의 너비 및 비대칭성을 조사하였다. 온도가 증가됨에 따라 청색 피크의 중심파장은 증가하지만 황색 형광체 피크의 파장은 감소함을 확인하였다. 또한 실리케이트계 형광체 기반의 백색 LED가 YAG 기반 LED에 비해 동일한 온도 변화에 대해서 더 큰 색도 변화를 보임을 확인하였다. 두 백색 LED 모두 온도가 올라감에 따라 발광효율의 저하를 나타냈는데, 실리케이트계 형광체 기반 백색 LED가 YAG계 형광체 기반 백색 LED보다 더 작은 발광효율을 보였고 발광효율의 저하 폭도 더 컸다. 이상의 결과는 YAG 형광체 기반 백색 LED가 실리케이트계 형광체 기반 LED에 비해 색도안정성, 발광효율, 연색지수 측면에서 더 뛰어나다는 것을 의미한다.

References

1. E. F. Schubert, *Light-emitting Diodes* (Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2006).
2. Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, and T. Mukai, "White light emitting diodes with super-high luminous efficacy," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 354002 (2010).
3. Y. Narukawa, I. Niki, K. Izuno, M. Yamada, Y. Murazaki, and T. Mukai, "Phosphor-conversion white light emitting diode using InGaN near-ultraviolet chip," *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L371-L373 (2002).
4. K. J. Choi, J. K. Park, K. N. Kim, C. H. Kim, and H. K. Kim, "Luminescence characteristics of Ba²⁺ co-doped Sr₂SiO₄: Eu yellow phosphor for light emitting diodes," *J. Korean Ceram. Soc.* **43**, 169-172 (2006) and references therein.
5. B. Chen, J. Jeong, M. Jayasimhadri, K. Jang, H. S. Lee, E. Cho, S. S. Yi, and J. H. Jeong, "Excitation-dependent emissive properties of silicate phosphor for light converted LEDs," *J. Korean Phys. Soc.* **55**, 1587-1590 (2009).
6. A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, and P. Hanselaer, "High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics," *J. Appl. Phys.* **104**, 093104 (2008).
7. M. Zachau, D. Becker, D. Berben, T. Fiedler, F. Jermann, and F. Zwaschka, "Phosphors for solid state lighting," *Proc. SPIE* **6910**, 691010 (2008).
8. F. Reifegerste and J. Lienig, "Modelling of the temperature and current dependence of LED spectra," *J. Light Vis. Environ.* **32**, 18-24 (2008).
9. A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, and P. Hanselaer, "Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature," *J. Appl. Phys.* **108**, 043104 (2010) and references therein.
10. S. S. Jeong and J.-H. Ko, "Analysis of the spectral characteristics of white light-emitting diodes under various thermal environments," *J. Inf. Disp.* **13**, 37-42 (2012).
11. H. W. Choi and J.-H. Ko, "Analysis of luminous characteristics of white LEDs depending on yellow phosphors," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **24**, 64-70 (2013).
12. J. H. Youk, D. W. Hong, and S. J. Lee, "Basic design guidelines for LED lamp packages," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **22**, 141-150 (2011).
13. H.-D. Yim, D.-J. Lee, Y. G. Kim, and B.-H. O, "Beam pattern analysis of LED reflector design and simplification of the functional design," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **23**, 222-226 (2012).