

# 형광체 종류와 조성비에 따른 고연색 백색 LED의 색품질 평가

정희석, 엄정덕<sup>a</sup>

송실대학교 전기공학부

## Color Quality Evaluation of High Color Rendering White LEDs According to Phosphor Types and Composition Ratio

Hee Suk Jeong and Jeongduk Ryeom<sup>a</sup>

School of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received April 28, 2017; Accepted May 13, 2017)

**Abstract:** Eight types of LED packages were manufactured according to the type and composition ratio of phosphors by using commercially available white LED phosphors. CRI (Ra), a conventional color quality evaluation method was evaluated by using manufactured white LED; the Rf, Rg, color vector graphic, and color distortion graphic were evaluated with a new method, IES TM-30-15. The results of the evaluation confirmed that the new method compensated for the disadvantages of CRI, which was found to be inadequate when the color was saturated. The added evaluation index identified the chroma variation and color change. Furthermore, the study showed that the changes of Rf and Rg are small when controlling phosphors based on CRI, questioning the necessity of identifying chroma variation and color change.

**Keywords:** Color quality, CRI, Color fidelity, Color gamut, Phosphor

### 1. 서론

LED 광원은 기존 광원과 달리 경제적이고 친환경적인 장점과 함께 가시광선을 포함하는 폭넓은 파장의 빛을 자유롭게 구현할 수 있다. 이러한 특징으로 IT기술과 접목하여 색과 밝기를 조절할 수 있는 제품이 출시되면서 고품질의 색을 구현하는 광원을 요구하고 있다 [1]. 현재 LED 광원의 색 품질을 향상시키기 위한 형광체 개발이 활발히 진행되고 있다. 조명용 백색 LED를 구현하는 방법 중 청색 LED에 황색 형광체를 도포하는 방법이 상용화되어 가장 보편적으로 이용되고 있다. 그러나 이러한 백색

LED의 스펙트럼은 청색과 황색의 파장간격이 넓어 고연색성(Ra 80 이상)을 구현하기 어렵다 [2,3]. 이를 해결하기 위해 고연색성을 구현할 수 있는 녹색이나 적색 형광체의 개발에 초점이 맞추어지고 있다. 현재 LED용 형광체는 실리콘계 형광체( $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ ), 알루미늄계 형광체(YAG:Ce, LuAG:Ce), 산질화물계 형광체( $\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$ ,  $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$ ), 질화물 등의 무기물계 형광체( $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$ ,  $(\text{Ca},\text{Sr})\text{AlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ )가 상용화 되어 있다 [4,5].

이와 더불어 기존 색 품질 평가 방법의 문제점과 이를 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 색 품질을 평가하는 지표 중 연색성(color rendering)은 국제 조명 위원회(CIE)에서 “기준 광원 아래에서 의식적 또는 잠재의 식적인 비교치로서 물체의 색보임(color appearance)에 대한 광원의 영향”으로 정의하고 있다 [6]. 연색성 평가 방법은 CIE에서 1948년 가시광 파장대역을 8분할하여

a. Corresponding author; [cosmos01@ssu.ac.kr](mailto:cosmos01@ssu.ac.kr)

일정한 가중치를 두어 기준광원과 얼마가 다른지를 나타내는 파장대역법(spectral band method)을 제시하였다. 그러나 파장대역법은 오차가 많고 불충분하여 1955년에 처음 시험색법(test color method)이 제안되고 1964년에 정식으로 CIE 13이 출판되었다 [7]. 이후 1974년에 14가지의 시험색을 포함한 연색지수(color rendering index)의 계산방법이 현재까지 광원의 색품질 평가에 사용되고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 연색성 평가방법은 형광램프와 같은 기체방전램프의 밴드 스펙트럼을 평가하기 위해 개발되었고, LED와 같은 연속 스펙트럼을 가지는 백색광원이 개발되면서 다음과 같은 문제점들이 지적되고 있다. CIE 평균연색지수(Ra)는 파스텔 컬러를 가지는 8개(R1~R8)의 시험색 시료를 사용하고, 기준광원을 비추었을 때 계산된 색도와 시험광원 아래에서 측정된 색도의 차를 이용하여 하나의 산술 평균값으로 나타낸다. 서로 다른 스펙트럼을 가진 광원이라도 동일한 Ra를 가질 수 있으며 특수연색지수는 Ra 값으로 알 수 없다. 특히 RGB LEDs는 포화(saturation)된 채도의 물체를 잘 나타낼 수 있는 중요한 특징을 가지지만 현재의 평균 연색 지수 평가방법에서는 오히려 낮게 평가되고 있다. 이것은 백색 LED 광원의 특수한 스펙트럼으로 인하여 다른 광원과 같은 평균연색지수를 나타내더라도 R9 (strong red)이나 R12 (strong blue)와 같은 특수연색지수에서는 색차이가 발생하는 원인이다 [8]. 이를 보완하기 위해 새로운 평가 방법에 대한 많은 연구가 진행되었으며 2015년에 북미조명학회(IESNA)에서 신규 평가방법인 IES TM-30-15를 출판하였다 [9]. 따라서 종래의 색품질 평가 방법인 CRI를 향상시키기 위해 적색 및 녹색형광체가 개발되어 적용되고 있으나 신규평가방법에 의한 색품질을 만족하는지 검증이 필요하다. 본 논문에서는 현재 상용화 된 LED용 형광체를 이용한 패키지를 제작한 후 각각의 평가방법으로 색품질을 비교함으로써 백색 LED 광원의 색품질 향상 방법에 대해 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 연색지수 평가 방법

현재 CIE 13.3에서 사용하고 있는 연색성 평가 방법은 시험색법(test color method)을 채택하여 사용하고

있다. 이때 기준광원(reference illuminant)은 색온도가 5,000 K 이하에서는 완전복사체(plankian radiator), 5,000 K 이상에서는 CIE 합성주광(CIE daylight illuminant)을 기준으로 계산한다. CIE에서 규정한 14개의 물체색을 정하고 기준광원(6,500 K, D65)에 의한 색보임과 시료광원 아래에서의 색차이를 수량화하였다. 연색지수(CRI)의 계산방법은 CIE 1964 W\*U\*V\* 색공간(uniform color space)의 색차( $\Delta E_i$ )에 의해 구해지며 식 (1)과 같다.

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (1)$$

여기서 평균연색지수(Ra)는 1에서 8까지의 물체색 시료의 평균값으로 식 (2)와 같다.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2)$$

따라서 평균연색지수 100은 기준광원 아래에서 1에서 8까지의 물체색의 색보임과 시료광원 아래에서의 색보임이 일치함을 나타낸다.

### 2.2 IES TM-30-15 평가 방법

색품질을 향상시키기 위해 다양한 스펙트럼을 가지는 LED 광원이 개발되면서 하나의 숫자로 색품질을 나타내는 CRI로만 광원의 색품질을 평가하는 것은 한계가 있다. 동일한 CRI를 갖더라도 실제 사용자가 물체를 더욱 선명하게 보이게 하는 광원을 더 선호했기 때문이다. 따라서 선명도(vividness)에 따라 광원을 구별하고 채도(chroma)의 증가 또는 감소를 나타낼 수 있는 지표가 추가적으로 필요하게 되었다. 이러한 배경으로 2013년에 구성된 IES color metrics task group을 중심으로 PNNL의 Michael Royer, Penn State Univ의 Kevin Houser, Soraa의 Aurelien David, NIST의 Yoshi Ohno 등에 의해 2015년에 IES TM-30-15가 출판되었다.

기존 CRI와 가장 큰 차이점은 표 1과 같이 Von Kries CAT (chromatic adaptation transform)를 기반으로 계산된 CIE 1964 U\*V\*W\*에서 2002년에 개정된 CIE CAM02의 색순응 변환 모델을 적용하였다. 또한 실제 존재하는 105,000개의 컬러 샘플들을 토대로 시각적으로 구분되어지는 대표적인 99개의 컬러 평가샘플(color evaluation samples, CES)을 추출하였다. 기존 CRI 평

**Table 1.** Comparison of color rendition evaluation method.

| CRI calculation engine<br>(1974)  | TM-30 calculation engine<br>(2015)   |
|---|--|
| CIE 1964 U*V*W*   | CAM02-UCS (CIECAM02)   |
| 8 color samples<br>(+6 colors samples)  | 99 color samples   |
| Ref illuminant step function<br>If<5,000 K, Planckian radiation<br>If≥5,000 K, CIE Daylight series illuminant | Ref illuminant continuous uses same reference sources, but blended between 4,500 K and 5,500 K                               |
| Fidelity metric only (Ra)   | Fidelity (Rf), Gamut (Rg), Graphical (Color distortion and saturation), Detailed (hue angle, Increase or decrease in chroma) |
| No lower limit for scores   | 0 to 100 scale (fidelity)  |

가 시 5,000 K 이하에서는 plankian radiator를 적용하고, 5,000 K 이상에서는 CIE daylight illuminant를 기준으로 계산한다. 이는 기준광원의 차이로 인하여 불연속한 특성을 보여주는 문제점이 생기는데 4,500 K와 5,500 K 사이의 연속적인 기준광원을 적용함으로써 문제점을 보완하였다. IES TM-30-15의 색차이를 나타내는 지수로는 color fidelity (Rf), color gamut (Rg), color vector graphic으로 나타낸다.

Color fidelity (Rf)는 색재현 정도(closeness to a reference)를 나타내는 지수로서 기존 CRI와 동일한 개념으로 물체색이 기준광원 대비 시료광원 아래에서 얼마나 비슷하고 충실하게 재현되는지를 평가한다. Rf는 CIE CAM02-UCS 색차(ΔE<sub>Jab,i</sub>)에 의해 식 (3)과 식 (4)와 같이 계산되며 0에서 100까지 나타낸다. Color gamut (Rg)은 색재현 영역(increase or decrease in chroma)을 나타내는 지수로서 물체색이 기준광원 대비 시료광원 아래에서 구현될 수 있는 색재현 넓이를 평가하며 계산 방법은 식 (5)와 같다. Color vector graphic은 기준광원 대비 시료광원 아래에서 구현될 수 있는 색채(hue)와 채도(chroma)의 감소 또는 증가를 그래프로 나타낸다.

$$R'_f = 100 - 7.54 \frac{1}{99} \sum_{i=1}^{99} (\Delta E_{Jab,i}) \quad (3)$$

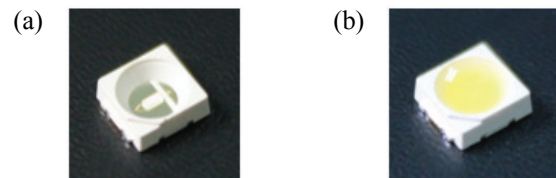
$$R_f = 10 \ln(e^{R'_f/10} + 1) \quad (4)$$

$$R_g = 100 \times \frac{A_t}{A_r} \quad (5)$$

### 2.3 LED 패키지 제작 및 측정 방법

LED 패키지는 450 nm의 피크파장을 갖는 GaN 기반의 청색 단일칩을 사용하고 그림 1과 같이 5.4×5.0 mm 크기의 표면실장형(SMD)으로 제작하였다.

청색 단일칩에 형광체 종류 및 조성비에 따라 표 2와 같이 8종의 패키지를 5개씩 각각 제작하였다. YAG:Ce 계열의 황색형광체를 사용한 패키지 3종, Silicate계 녹색형광체와 Nitride계 적색형광체를 사용한 패키지 3종, LuAG계 녹색형광체와 Nitride계 적색형광체를 사용한 패키지 2종류의 패키지를 각각 제작하였다. LED 패키지는 직류 전원장치(TOE 8952, Toellner社)로 60 mA의 정격전류를 공급하고 적분구(0.3 m, PSI社)를 이용하여 SPD (spectrum power distribution)를 측정하였다. 각각 5개씩 측정된 SPD 데이터의 평균값을 IES TM-30-15의 calculation tool에 적용하여 Rf, Rg, color vector graphic을 비교 평가 하였다.



**Fig. 1.** Fabricated LED package. (a) Mounted blue chip and (b) encapsulated with phosphor and silicone.

**Table 2.** Classification in composition ratio of phosphors.

| Sample | Emission  | Ratio (%) |                               | Total molding compound (mg) |
|--------|-----------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|
|        |           | Silicone  | Phosphors                     |                             |
| 1      | Yellow    | 90.0      | YAG 10.0                      | 7.3                         |
| 2      | Yellow    | 92.0      | YAG 8.0                       | 7.3                         |
| 3      | Yellow    | 94.0      | YAG 6.0                       | 7.3                         |
| 4      | Green+Red | 87.0      | Silicate 12.4<br>+Nitride 0.6 | 7.3                         |
| 5      | Green+Red | 89.0      | Silicate 10.4<br>+Nitride 0.6 | 7.3                         |
| 6      | Green+Red | 88.7      | Silicate 9.4<br>+Nitride 1.9  | 7.3                         |
| 7      | Green+Red | 90.0      | LuAG 9.5<br>+Nitride 0.5      | 7.3                         |
| 8      | Green+Red | 92.0      | LuAG 7.6<br>+Nitride 0.4      | 7.3                         |

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 LED 패키지 광특성 평가

형광체 종류 및 조성비에 따라 측정된 광특성 결과를 표 3에 나타내었다. 황색형광체를 사용한 패키지는 형광체가 6%에서 10%까지 증가함에 따라 광효율은 144.4 lm/W에서 158.9 lm/W로 증가하지만 연색지수는 75에서 69로 감소한다. 녹색형광체와 적색형광체를 사용한 패키지는 80 이상으로 연색지수를 향상시킬 수 있지만 광효율이 132.3 lm/W 이하로 낮아짐을 확인하였다.

Table 3. Results of optical properties.

| Classification                    | CRI (Ra) | CCT (K) | Luminous efficacy (lm/W) |
|-----------------------------------|----------|---------|--------------------------|
| 1 YAG 10%                         | 69       | 5,315   | 158.9                    |
| 2 YAG 8%                          | 72       | 5,743   | 153.2                    |
| 3 YAG 6%                          | 75       | 6,662   | 144.4                    |
| 4 Silicate 12.4%<br>+Nitride 0.6% | 70       | 8,264   | 143.1                    |
| 5 Silicate 10.4%<br>+Nitride 0.6% | 71       | 11,215  | 134.9                    |
| 6 Silicate 9.4%<br>+Nitride 1.9%  | 96       | 5,559   | 116.0                    |
| 7 LuAG 9.5%<br>+Nitride 0.5%      | 84       | 5,458   | 132.3                    |
| 8 LuAG 7.6%<br>+Nitride 0.4%      | 86       | 6,245   | 129.1                    |

#### 3.2 IES TM-30-15에 의한 평가 결과

형광체 종류 및 조성비에 따라 제작된 8종의 패키지 중에서 미국표준협회 규격(ANSI C78.377)에 따라 공칭 상관색온도(Nominal CCT)가 5,700 K ( $5,665 \pm 355$  K)인 패키지 3종을 선정하였다 [10]. 해당되는 패키지는 표 4와 같이 황색형광체(YAG)가 8%인 패키지, 녹색형광체(silicate)가 9.4%이고 적색형광체(nitride)가 1.9%인 패키지, 녹색형광체(LuAG) 9.5%이고 적색형광체(nitride) 0.5%인 패키지이다. 선정된 패키지에 대해 CRI (Ra),  $R_f$ ,  $R_g$ , color vector graphic, color distortion graphic을 비교평가 하였다.

Table 4. Results of color quality.

| Classification                     | CRI (Ra) | $R_f$ | $R_g$ | CCT (K) |
|------------------------------------|----------|-------|-------|---------|
| (a) YAG 8%                         | 72       | 74    | 90    | 5743    |
| (b) LuAG 9.5%<br>+Nitride 0.5%     | 84       | 83    | 92    | 5458    |
| (c) Silicate 9.4%<br>+Nitride 1.9% | 96       | 89    | 102   | 5559    |

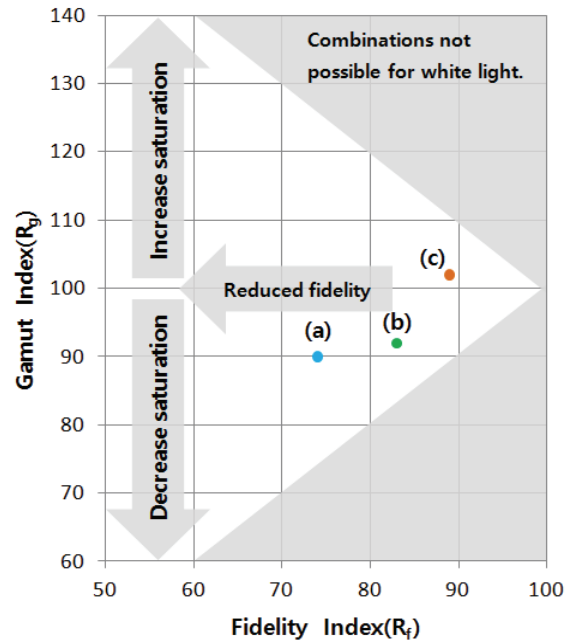
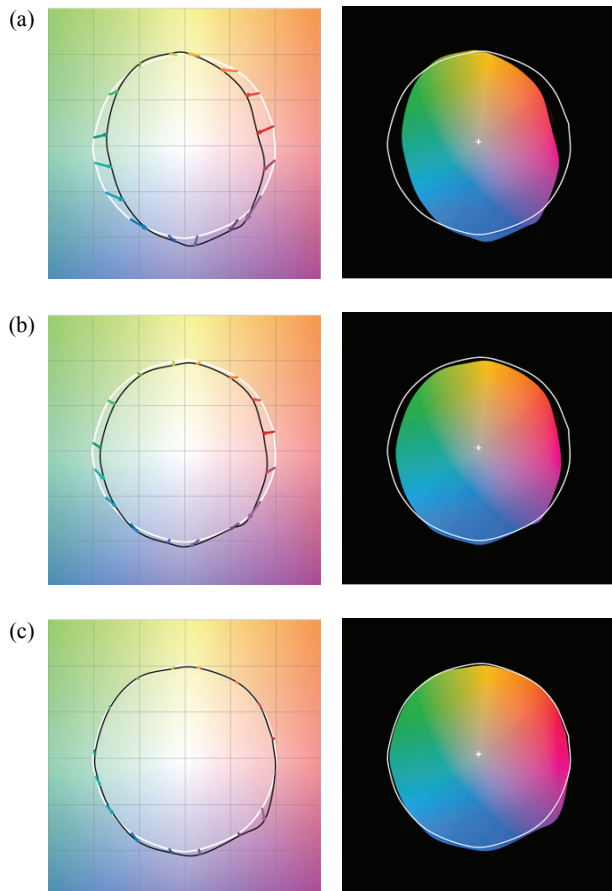


Fig. 2. Fidelity index ( $R_f$ ) and gamut index ( $R_g$ ). (a) YAG 8%, (b) LuAG 9.5%+Nitride 0.5%, and (c) Silicate 9.4%+Nitride 1.9%.

IES TM-30-15의 평가 방법에 따른  $R_f$ 와  $R_g$ 를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 가로축은  $R_f$ , 세로축은  $R_g$ 를 나타내며, 세모의 흰색영역 안쪽은 실제 존재하는 광원의  $R_f$ ,  $R_g$  값의 경계를 의미한다 [11].  $R_f$ 는 색재현 정도를 나타내는 지수로서 황색형광체를 사용한 (a)패키지는  $R_a$ 보다  $R_f$ 가 높지만 녹색형광체와 적색형광체를 사용한 (b)와 (c)패키지는  $R_a$ 보다  $R_f$ 가 낮게 평가된다. 이는  $R_f$ 의 계산을 위하여 사용된 컬러 평가 샘플의 수(99개)가 기존  $R_a$  계산에 사용된 컬러 평가 샘플의 수(8개)보다 많음에 기인한다. 따라서 기존  $R_a$ 가 높은 광원이  $R_f$ 가 낮게 평가되는 경우가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

$R_g$ 는 색재현 영역을 나타내는 지수로서  $R_g > 100$ 인 경우에는 물체색의 채도가 증가되어 보여질 것으로 예상



**Fig. 3.** Color vector graphic and Color distortion graphic. (a) YAG 8%, (b) LuAG 9.5%+Nitride 0.5%, and (c) Silicate 9.4%+Nitride 1.9%.

할 수 있으며,  $R_g < 100$ 인 경우에는 물체색의 채도가 감소되어 보여질 것으로 예상할 수 있다. 따라서 (c)패키지는  $R_g$ 가 102로 채도가 증가되어 보이므로 (a)와 (b)패키지보다 색을 더욱 분명하게 관찰할 수 있음을 나타낸다.

그림 3은 color vector graphic과 color distortion graphic을 나타낸 것으로 CIECAM02-UCS의 색좌표 (a'b') 영역을  $22.5^\circ$  간격으로 나누어서 16개 hue bins로 구성하여 각 bin에 위치한 색좌표 평균값을 연결한 다면체(polygon)를 그래프화 한 것이다. 기준광원 대비 시료 광원에서 어떤 색들의 채도가 감소 또는 증가되는지와 색채 변화(hue shift)가 얼마나 일어나는지 확인 가능하다.

황색형광체를 사용한 (a)패키지는 적색 영역과 녹색영역이 감소되어 있고 (b)패키지는 녹색형광체와 적색형광체를 사용하였으므로 (a)패키지보다 적색 및 녹색의 감

소된 영역이 작아져 있음을 확인하였다. (c)패키지는 기준광원 대비 모든 영역에서 거의 일치하므로 색품질이 우수한 광원이라 할 수 있다.

### 3.3 색품질 평가 결과 비교 분석

형광체 종류 및 조성비에 따라 제작된 8종의 패키지에 대해 종래의 색품질 평가 방법인 CRI ( $R_a$ )와 신규평가 방법인  $R_f$ 와  $R_g$ 를 비교하였다. 표 5와 같이 황색형광체의 조성비를 변화시켜  $R_a$ 가 69에서 75로 향상되었음을 알 수 있다. 또한 녹색형광체와 적색형광체의 조성비에 따라  $R_a$ 가 70에서 96로 향상되었음을 알 수 있다.

황색형광체를 사용한 패키지의 경우 연색지수를 향상시키기 위해 그림 4와 같이 형광체의 조성비를 조절하여  $R_a$ 가 69에서 75까지 향상되었으나 신규 평가 방법에 의한  $R_f$ 는 74에 75로,  $R_g$ 는 89에서 91로 큰 변화가 없음을 확인하였다. 이는 기존 CRI 평가 방법의 문제점으로 지적되었던 채도가 포화될 경우 CRI가 낮게 평가되는 문제점이 보완된 TM-30 평가 방법에서 기인된 것이라 할 수 있다. 녹색형광체와 적색형광체를 사용한 패키지의 경우에도 그림 5와 같이 70에서 96까지  $R_a$ 가 26이 향상되었으나  $R_f$ 는 72에 89로,  $R_g$ 는 81에서 102로 향상되어  $R_a$ 의 비해 상대적으로 변화가 작음을 확인하였다. 특히 고연색지수로 갈수록  $R_a$ 와  $R_f$ 의 차이가 커짐을 확인할 수 있다.

**Table 5.** Comparison of color quality.

| Classification |                                 | CRI ( $R_a$ ) | $R_f$ | $R_g$ |
|----------------|---------------------------------|---------------|-------|-------|
| Y1             | YAG 10%                         | 69            | 74    | 89    |
| Y2             | YAG 8%                          | 72            | 74    | 90    |
| Y3             | YAG 6%                          | 75            | 75    | 91    |
| GR1            | Silicate 12.4%<br>+Nitride 0.6% | 70            | 72    | 81    |
| GR2            | Silicate 10.4%<br>+Nitride 0.6% | 71            | 72    | 81    |
| GR3            | LuAG 9.5%<br>+Nitride 0.5%      | 84            | 83    | 92    |
| GR4            | LuAG 7.6%<br>+Nitride 0.4%      | 86            | 84    | 93    |
| GR5            | Silicate 9.4%<br>+Nitride 1.9%  | 96            | 89    | 102   |

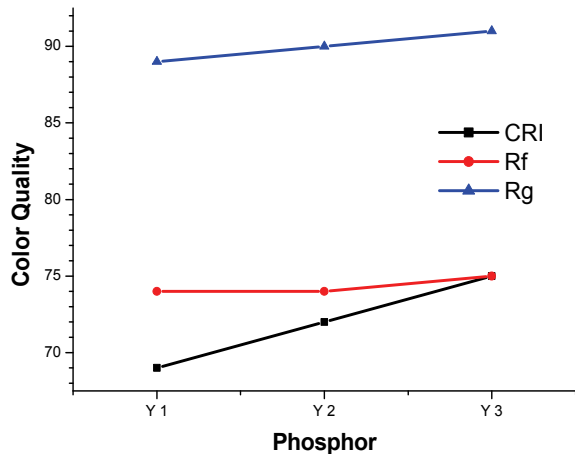


Fig. 4. Comparison of color quality in LED packages using YAG phosphor.

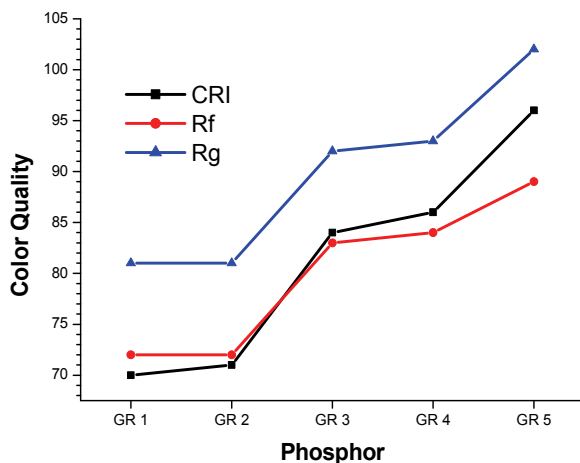


Fig. 5. Comparison of color quality in LED packages using green and red phosphor.

#### 4. 결론

현재 상용화 된 백색 LED용 형광체를 이용하여 형광체 종류 및 조성비에 따라 8종의 패키지를 각각 제작하였다. 제작된 백색 LED를 이용하여 종래의 색품질 평가 방법인 CRI (Ra)를 평가하고 신규 평가 방법인 IES TM-30-15에 의해 Rf, Rg, color vector graphic, color distortion graphic을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째로 신규 평가 방법인 IES TM-30-15에 의한 평가 결과 YAG 형광체를 사용한 패키지는 기존 평가 방법의 문제점으로 지적되었던 채도가 포화될 경우 CRI가

낮게 평가되는 점이 보완되어 CRI보다 상대적으로 Rf가 더 높은 결과를 확인하였다. 둘째로 기존 평가 방법에서 추가된 평가지수인 Rg, color vector graphic, color distortion graphic을 평가함으로써 채도의 증감과 색채 변화를 확인할 수 있었다. 마지막으로 황색형광체를 사용한 패키지의 경우 연색지수를 향상시키기 위해 형광체의 조성비를 조절하여 Ra가 69에서 75까지 향상되었으나 신규 평가 방법에 의한 Rf는 74에 75로, Rg는 89에서 91로 큰 변화가 없음을 확인하였다. 기존 평가 지수인 CRI를 기준으로 형광체를 조절하는 것은 Rf와 Rg의 변화가 작으며 채도의 증감과 색채변화를 확인할 필요가 있음을 검증하였다.

현재 기존 평가 방법인 CRI를 기준으로 인프라가 구축되어져 있으며 새로운 평가 지수를 적용하는 것은 국제적인 동의와 단계적인 전환이 필요하다. 향후 연구 과제로는 IES TM-30-15에 의해 높게 평가된 광원이 실제 사용자가 선호하고 색 차이를 구별하는데 효과적인 지에 대한 검증 실험이 진행될 필요가 있다.

#### REFERENCES

- [1] Y. S. Kwak and B. S. Koo, *J. Korean Soc. Imag. Sci. Technol.*, **19**, 19 (2013).
- [2] C. C. Yang, C. M. Lin, Y. J. Chen, Y. T. Wu, S. R. Chuang, R. S. Liu, and S. F. Hu, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 123503 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2714326>]
- [3] H. W. Choi and J. H. Ko, *Korean J. Opt. Photon.*, **24**, 64 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2013.24.2.064>]
- [4] C. H. Kim, *Ceramist*, **16**, 13 (2013).
- [5] N. Kimura, K. Sakuma, S. Hirafune, and K. Asano, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 051109 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2437090>]
- [6] *International lighting vocabulary*, **CIE 17.4** (1987).
- [7] *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*, **CIE 13.3** (1995).
- [8] *Colour Rendering of White LED Light Sources*, **CIE 177** (2007).
- [9] *IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition*, **IES TM-30-15** (2015).
- [10] *Specifications for the Chromaticity of Solid-state Lighting Products*, **ANSI NEMA ANSLG C78.377** (2015).
- [11] A. David, P. T. Fini, K. W. Houser, Y. Ohno, M. P. Royer, K.A.G. Smet, M. Wei, and L. Whitehead, *J. OSA*, **23**, 15889 (2015). [DOI: <http://doi.org/10.1364/OE.23.015888>]