

Measurement and Analysis of Phosphor Conversion Efficiency for Color-Matching LCDs

Hwa Jun Jeon, Gyo Sung Lim, Dae Gil Na, and Jin Hyuk Kwon[†]

Department of Physics, Yeungnam University, 214-1 Daedong, Gyeongsan 712-749, Korea

(Received July 2, 2013; Revised manuscript September 6, 2013; Accepted October 2 2013)

Power conversion efficiency of the red and green phosphors was measured and analyzed. Two different samples of phosphors of thickness 50 μm were prepared: one was the phosphor layer coated on the transparent substrate and the other was prepared on the reflective substrate. The 445 nm blue laser diode beam was used as the exciting beam. The conversion efficiencies of the red and green phosphor layers were 41.4% and 46%, respectively. The quantum efficiencies of the red and green phosphors were 60.4% and 53.5%, respectively.

Keywords: Phosphor, Conversion efficiency, Quantum efficiency

OCIS codes: (160.2540) Fluorescence and luminescent materials; (230.7405) Wavelength conversion devices; (220.4000) Microstructure fabrication; (230.3720) Liquid-crystal devices

Color-Matching LCD를 위한 형광체 전환효율의 측정과 분석

전화준 · 임교성 · 나대길 · 권진혁[†]

영남대학교 물리학과

☎ 712-749 경북 경산시 대동 214-1

(2013년 7월 2일 받음, 2013년 9월 6일 수정본 받음, 2013년 10월 2일 게재 확정)

고효율 color-matching LCD (liquid crystal display)에 적용하기 위하여, 445 nm의 청색 여기광을 사용하여 적색 및 녹색 형광체의 전환효율과 양자효율을 측정 분석하였다. 투명한 기판 및 표면이 반사처리된 기판에 각각 두께 50 μm 의 적색, 녹색 형광체를 코팅하고, 적분구를 사용하여 형광의 세기를 측정하였다. 적색 형광체 및 녹색 형광체에 대해서 전환효율은 각각 41.4%과 46%였으며, 양자효율은 각각 60.4%와 53.5%였다. 제조사의 제원과의 차이점에 대해서 검토되었다.

Keywords: 형광체, 전환효율, 양자효율

OCIS codes: (160.2540) Fluorescence and luminescent materials; (230.7405) Wavelength conversion devices; (220.4000) Microstructure fabrication; (230.3720) Liquid-crystal devices

I. 서 론

형광체는 디스플레이에서 색을 구현하는 재료로 널리 사용되어 왔으며, 특히 CRT와 PDP에서 전자나 자외선의 에너지를 가시광선으로 전환하는데 주로 사용되어 왔다. 최근에는 GaN 기반의 청색광을 내는 LED chip의 전면에 황색 형광체를 일체형으로 배치하여 청색과 황색의 혼합으로 백색 LED 광을 발생함으로써 LCD(Liquid Crystal Display)의 백색광원으로 폭넓게 활용되고 있다. 백색 LED를 디스플레이에 적용하고자 할 경우에는 높은 에너지 효율과 높은 연색지수가 요

구된다.

특히 고출력 LED의 경우, 형광체 층을 LED와 적정 거리만큼 떨어지게 배치함으로써 형광체의 열적 저하를 줄일 뿐 아니라 후방 산란된 형광이 LED 칩에서 흡수되어 광량이 감소하는 것을 방지하는 이격 형광체(remote phosphor) 기술도 소개되었다^{1), 2)}. 이격 형광체 기술의 경우 LED 광원의 크기가 커져서 LCD 백라이트와 같이 소형의 LED를 요구하는 장치에는 적합하지 않은 단점이 있는데, Oh 등은 청색 LED 칩과 황색 형광체 사이에 청색을 투과하고 황색을 반사하는 high pass filter를 설치하여 후방으로 방출되는 형광을 전방

[†]E-mail: jhkwon@ynu.ac.kr

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

으로 되돌림으로써 형광효율을 1.95배까지 향상시킬 수 있음을 보여주었다¹³⁾. 그러나 이러한 필터사용기술은 필터를 소형으로 제작하여 수백 마이크론크기의 LED 칩 전면에 부착하여야 하는 기술적 어려움뿐 아니라 유전체 다층박막으로 제작되는 필터가 LCD 칩에서 나오는 강한 광선과 열을 수만 시간 견디기 어렵다는 문제가 발생한다.

황색형광체만 사용할 경우 연색지수가 낮아서 고화질의 구현에 한계가 있으므로 최근에는 황색 형광체에 적색 형광체를 일정 비율 혼합하거나 황색형광체와 적색형광체를 이중층으로 설치하여 높은 연색지수를 갖는 백색광을 발생하는 연구결과도 많이 보고되고 있다^{4,6)}.

백색광 LED를 백라이트 광원으로 사용하는 LCD의 경우, 백색광을 적색, 녹색, 청색의 컬러필터로 균일하게 입사시키기 때문에 기본적으로 컬러필터 광 투과효율이 20~33% 이하로 제한되었다. 그 외에도 편광자의 흡수율 50~60%, 픽셀 개구율 약 50%를 고려하면 총 광투과효율이 5~7% 수준에 머물고 있어서 광에너지 활용효율이 상당히 낮은 문제점이 있었다. 최근 청색광 LED에서 나오는 청색광을 직접 적색 및 녹색 형광체를 이용하여 적색광 및 녹색광으로 전환한 후, 각각의 적색, 녹색, 청색 하위픽셀 및 컬러필터 속으로 color-matching되도록 입사함으로써 컬러필터 광투과율을 80% 이상으로 향상시키는 color-matching LCD에 대한 연구가 보고되고 있다^{7, 8)}. Color-matching LCD의 경우, 청색 LED에서 나온 청색광이 도광판을 진행하면서 균일한 평면 광원으로 전환되게 한 후에, LCD의 적색, 녹색, 청색 컬러필터와 일대일 대응되도록 패턴화된 적색, 녹색 형광체에서 파장변환을 유도하여 컬러필터와 color-matching이 되게 함으로써 200~300%의 투과효율 향상을 구현할 수 있다는 점 때문에 많은 관심을 끌고 있다. 청색광은 파장전환 없이 그대로 청색 컬러필터로 입사하게 함으로써 역시 높은 투과율을 달성할 수 있다.

본 연구에서는 color-matching LCD에서 광원으로 사용되는 450 nm의 청색 LED와 유사한 파장을 갖는 445 nm의 청색 레이저 다이오드로부터 나오는 광을 이용하여 중심 파장이 670 nm, 반치폭(Full-Width at Half Maximum, FWHM)이 90 nm인 적색 형광체와 중심파장이 517 nm, 반치폭이 60 nm인 녹색 형광체에서의 광파워 전환효율(conversion efficiency) 및 양자효율(quantum efficiency)을 측정 분석하였다. 일반적으로 형광체의 양자효율(quantum efficiency)은 입사 여기 광자수에 대한 형광 광자수의 비로 정의되며, 약 70~90% 으로 보고되고 있지만, 두꺼운 형광체 구조물의 경우 형광체와 레진의 혼합물에서 산란으로 발생하는 산란광과 형광의 재흡수로 인한 손실 등으로 인하여 실제 양자효율은 이보다 떨어진다. 또한 입사 여기광의 파워와 형광 파워 사이의 비율 즉 전환효율은 wavelength down conversion 효과로 인해서 이보다 더 떨어지며, 또한 형광체 밀도와 소자 구조 등의 영향을 많이 받는 것으로 알려지고 있다. 따라서 고효율 color-matching LCD의 기구 속에 배치되는 조건 속에서 여기광으로부터 형광으로의 광파워 전환효율과 양자효

율을 정밀하게 측정 및 분석하는 것이 우선적으로 중요하다고 볼 수 있다.

II. 형광체의 광 전환효율 측정 방법

형광체에서 방사되는 형광은 자발광으로써 그림 1에 나타난 바와 같이 모든 방향으로 균등하게 방출된다. 방출된 형광 가운데 일부는 재흡수되고, 일부는 측면으로 진행해서 소실되어 color-matching LCD의 광효율 향상에 기여하지 못하게 된다. 따라서 color matching LCD의 광투과효율 향상에 기여하는 광은 형광체 표면의 앞으로 방출되는 형광이다. 따라서 본 측정에서는 입사한 청색광의 파워가 형광으로 전환된 이후 대부분의 형광이 형광체의 전면으로 나오도록 형광체를 고반사율 처리된 기판 위에 형성하였다. 전면으로 나오는 형광의 양을 증대시키기 위해서 기판의 표면을 고반사처리하여 그 위에 형광체를 코팅하였으며, 비교의 기준으로 삼기 위하여 표면을 고반사처리하지 않은 투명기판 위에 동일한 두께의 형광체를 코팅하여 함께 측정하였다. 그림 1(a)는 반사면이 없는 경우로써 입사광의 광출력을 P_i 로 두었으며, P_1 은 입사광이 형광체를 통과하면서 형광으로 전환되지 못하고 입사광의 일부가 다시 나온 것을 의미한다. 그림 1(b)는 반사면이 있는 경우이다. 각각의 여기광에 대한 광파워에 관한 식은

$$P_1(t) = P_i e^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$P_2(t) = P_i R e^{-2\alpha t} \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있으며, α 는 형광체 입자가 분산된 레진 속에서의 감쇠상수이고, t 는 형광체의 두께를 나타낸다. 여기광의 감쇠는 흡수 뿐 아니라 형광체 입자들의 산란에 의한 손실도 포함한다. R 은 반사면의 반사율을 나타낸다. 식 (1) 및 (2)를 이용하면 청색 레이저 광의 투과율은

$$T_1 = \frac{P_1}{P_i} = e^{-\alpha t} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{P_2}{P_i} = R e^{-2\alpha t} \quad (4)$$

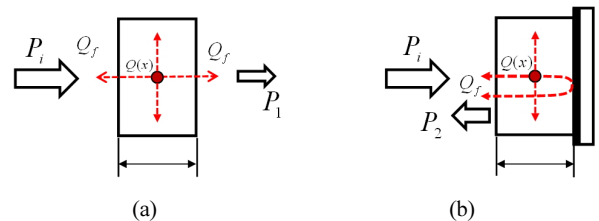


FIG. 1. The schematic cross-sectional view of phosphor layer on the glass substrate (a) without the reflector and (b) with the reflector.

으로 나타낼 수 있으며, T_1 은 반사면이 없는 경우, T_2 는 반사면이 있는 경우의 반사되어 되돌아 오는 투과율이다.

이 때, 형광으로 발광되는 광파워를 반사면이 없는 경우를 Q_F , 반사면이 있는 경우를 Q'_F 라 할 때,

$$Q_F = \frac{1}{2} \int_0^l \beta P(x) dx = \frac{\beta P_i}{2\alpha} (1 - e^{-\alpha l}) \quad (5)$$

$$Q'_F = \int_0^{2l} \beta P(x) dx = \frac{\beta R P_i}{\alpha} (1 - e^{-2\alpha l}) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (5)에서 β 는 형광체에 흡수된 여기광이 형광으로 전환된 후에 전면으로 방출되는 비율을 나타낸다. 1/2이 들어가는 이유는 형광은 자발방출 광으로써 앞면과 뒷면으로 동일하게 방사되기 때문이다. 이를 이용하여 반사면이 있을 때 대비 광출력이 얼마나 증가하는지 계산할 수 있게 된다. 형광체 후면에 반사면을 설치함으로써 얻어지는 형광 증가율을 γ 라하면

$$\gamma = Q'_F / Q_F = 2R \frac{1 - e^{-2\alpha l}}{1 - e^{-\alpha l}} = 2R(1 + T_1) \quad (7)$$

으로 나타낼 수 있으며, 여기서 R 은 반사면의 반사율을 나타낸다. 형광체의 농도가 낮아서 여기광의 감쇠가 거의 무시되어 $T_1 \approx 1$, $R \approx 0.98$ 이면, 반사면에 의한 형광증가율은 $\gamma \approx 3.92$ 가 최대값이 될 것이다. 이로써 반사면을 활용함으로써 더욱 높은 형광전환효율을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

형광 전환효율은 형광체 속으로 흡수된 청색광의 세기와 전면으로 방출되는 형광의 세기의 비율로 주어지며,

$$\eta = \frac{Q_F}{P_i(blue) - P_t(blue)} = \frac{Q_F}{\Delta P_b} \quad (8)$$

로 표시된다. 여기서 Q_F 는 형광의 세기이고, $P_i(blue)$ 는 입사하는 청색광의 세기이며, $P_t(blue)$ 는 형광체에 흡수되지 않고 밖으로 빠져나오는 청색광의 세기이다. 즉, $\Delta P_b = P_i(blue) - P_t(blue)$ 는 흡수된 청색광의 세기이다. 형광 전환효율은 다시 여기광자에 대한 형광 광자의 비율, 즉 양자효율 η_q 와 여기광과 형광의 파장비율 $\eta_d = \lambda_e / \lambda_f$, 그리고 발생한 형광 광자가 외부로 추출되는 추출효율 η_{ex} 의 곱으로 주어진다. 추출효율은 크게 재흡수와 산란에 의한 손실로 인하여 유효성을 상실하는 경우가 있다.

$$\eta = \eta_q \eta_d \eta_{ex} \quad (9)$$

비록 양자효율이 높더라도 형광 전환효율은 여기광과 형광의 파장 차이가 크거나 형광체 소자의 두께 등의 효과에 의하여 발생하는 손실로 인하여 많이 낮아지게 된다. Zhu 등이 백색 LED에 활용되는 YAG:Ce 계열의 형광체에 대하여 적

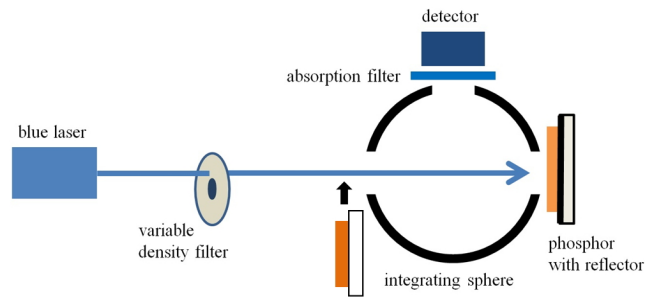


FIG. 2. The experimental schematic of measuring the light power conversion efficiency by using the integrating sphere.

색, 녹색, 청색 형광체를 470 nm의 청색광으로 여기하여 이중 적분구를 사용한 정밀한 측정결과에 의하면 각각 손실로 나타난 비율은 13%, 18%, 36 %로써 평균 23%에 달하였다⁹⁾.

본 연구에서는 양자효율의 측정보다는 여기광의 파워와 형광의 파워의 비, 즉 형광 전환효율을 측정하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 6인치 적분구(integrating sphere)를 이용하여 측정을 하였으며, 형광체 농도에 따른 광 전환 효율과 광 세기에 따른 효율 변화를 측정하였다. 형광체의 두께는 30 μm , 50 μm , 70 μm 에 대한 여기광과 형광의 스펙트럼을 측정된 결과, 형광체의 두께가 50 μm 보다 작을 경우 형광으로 전환되지 않고 그대로 투과 또는 반사하는 여기광이 많았기 때문에, 본 연구의 응용목적인 컬러매칭 LCD에 가장 적합하다고 보이는 50 μm 으로 두께를 일정하게 유지하였다. 형광체의 두께가 50 μm 보다 두꺼울 경우, 여기광은 거의 사라졌지만, 재흡수와 산란에 의한 형광의 손실이 커지는 문제점이 있었다. 즉, 여기광이 모두 흡수되는 최소의 두께가 곧 형광의 재흡수를 최소화하고, 형광체의 소모를 최소화하기 때문에 50 μm 이 최적의 두께에 가장 접근한다고 볼 수 있다.

출력 1W, 파장 445 nm의 청색 레이저 다이오드에서 나오는 청색광을 가변흡수필터를 거쳐 광의 세기를 조절한 후에 적분구 속으로 입사하였다. 반사면이 없는 형광체의 경우 적분구의 입구에 형광체 시료를 설치하였으며, 반사면이 있는 형광체의 경우 적분구의 후면에 형광체 시료를 설치하였다. 광측정기는 Newport 1918-C를 사용하였다. 형광의 광세기를 측정하기 위해 형광파장을 투과하고 청색파장을 반사하는 저대역 투과필터(lowpass filter)를 이용하여 청색 영역의 파장을 제거하고 측정하였다. 형광체 반사면은 슬라이드 글라스 표면에 반사율 98%의 반사물질을 50 μm 로 균일하게 코팅하여 제작하였다. 사용한 형광체는 Intimatix 사의 적색 형광체(R6931, 중심파장 670 nm, FWHM 90 nm)와 녹색 형광체(G2262, 중심파장 517 nm, FWHM 60 nm)이다. 그리고 광 세기에 따른 형광전환 효율의 변화를 측정하기 위하여 가변투과 필터를 사용하여 형광체에 입사하는 광의 세기를 조정하였다. 형광체 농도에 따른 형광전환 효율은 투명 레진(SU-8 photoresist)에 평균 직경 15 μm 의 형광체 입사를 골고루 분산하여 형광체 무게비(wt %)에 따라 측정하였다. 투명 레진으로 SU-8 photoresist를 사용한 것은 형광체를 분산한

후에 리소그래피 공정을 이용하여 패턴링을 하기 위하여서 이다.

III. 측정 결과

그림 3은 파장 445 nm의 청색 레이저광이 형광체에 조사 되었을 때 방출되는 형광 파장의 스펙트럼을 보여준다. 입사하는 레이저 광의 일부가 형광으로 전환되지 못하고 남아 있으며, 적색형광은 그 중심파장이 670 nm, 반치폭(FWHM)이 약 90 nm이고, 녹색형광은 중심파장이 517 nm, 반치폭이 60 nm 임을 알 수 있다.

그림 4는 적색 형광체의 농도에 따른 광 전환 효율을 보여 준다. 형광체와 레진의 농도는 10 wt%, 20 wt%, 40 wt%로 혼합하여 측정하였으며, 레진의 높은 점도로 인해 40 wt% 이상에서는 혼합이 잘 되지 않았다.

형광체의 농도가 10 wt%에서 반사면이 없을 때의 전환 효율은 12.3%, 반사면이 있을 때의 효율은 35%로 약 $\gamma=2.92$ 배 정도 차이를 보였으며, 이는 식 (7)을 이용하여 계산된 값과

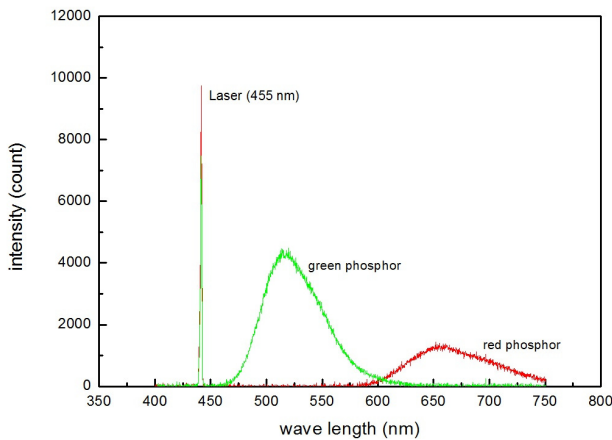


FIG. 3. The wavelength spectra of laser, green phosphor, and red phosphor.

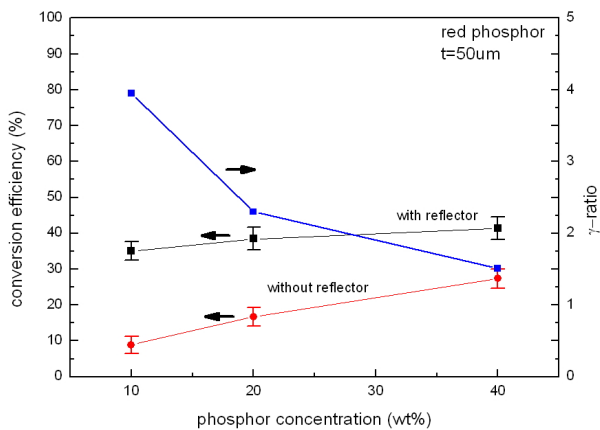


FIG. 4. The blue light power conversion efficiency of the red phosphor in terms of the phosphor concentration.

거의 유사함을 알 수 있다. 농도가 높아질수록 반사면에 따른 증가율이 줄어 들었으며, 이는 효율이 일정하게 증가하지 않고 포화상태가 됨을 알 수 있다. 40 wt%의 농도에서는 반사면을 설치한 경우 전환효율이 41.4%이고 반사면이 없을 경우 26.4%로써 약 $\gamma=1.57$ 로 떨어졌다. 반사면이 설치된 경우 형광체 농도가 20 wt% 이상에서는 광 전환 효율이 포화 됨을 알 수 있다.

양자효율만을 고려하였을 때, 적색과 청색의 파장 비율 1.46을 곱하면 양자효율은 반사면이 있을 경우 형광체 농도 40 wt%의 경우 약 60.4%였다.

그림 5는 녹색 형광체의 농도에 따른 광 전환 효율이다. 녹색 형광체는 적색 형광체보다 밀도가 낮기 때문에 농도를 높여 혼합하였다. 형광체의 농도는 20 wt%, 40 wt%, 60 wt%로 두었으며, 60 wt% 이상에서는 적색 형광체와 같은 이유로 인해 혼합할 수 없었다.

농도가 20 wt%에서는 형광체의 밀도가 너무 낮아 반사면이 없는 경우 적색광으로 전환되는 광보다 그대로 통과하는 광이 더 많기 때문에 거의 0에 가까운 효율이 나타났다. 녹색 형광체의 경우 농도가 40 wt%일 때 반사면에 따른 효율 증가율이 적색 형광체보다 컸으며, 반사면이 없는 경우의 효율이 10.5%, 있는 경우는 40.7%로 약 3.9배 정도 증가하였다. 이는 형광체의 낮은 농도로 인하여 청색 여기광의 감소가 적어서 이론상 최대값인 4배에 근접하는 것으로 보인다. 그러나 녹색 형광체 농도가 60 wt%에서는 반사면이 없는 경우의 효율이 21.5%, 있는 경우는 46.04%로 약 2.1배 정도 증가하였으며, 이는 형광체 농도가 높아짐에 따라 청색 여기광이 흡수로 인하여 많이 감소하여 일어나는 포화현상으로 볼 수 있다.

녹색 형광체의 양자효율은 앞에서 측정된 형광효율에 형광 청색광의 파장 445 nm와 녹색형광의 파장 517 nm의 비율 1.16을 곱함으로써 얻어진다. 반사면이 있는 60 wt%의 양자 효율은 약 53.5%로써 적색형광체에 비해서 떨어짐을 알 수 있다.

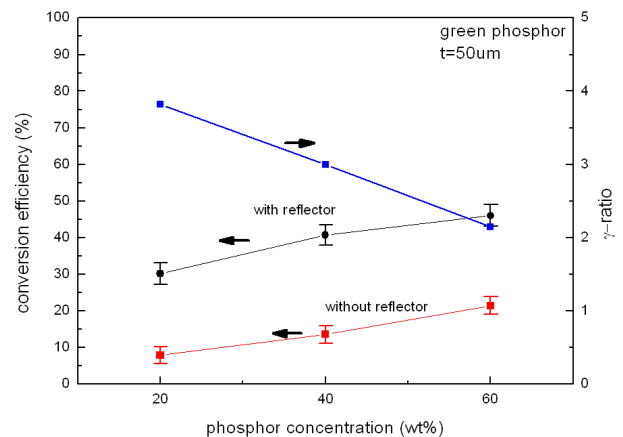


FIG. 5. The blue light power conversion efficiency of the green phosphor in terms of the phosphor concentration.

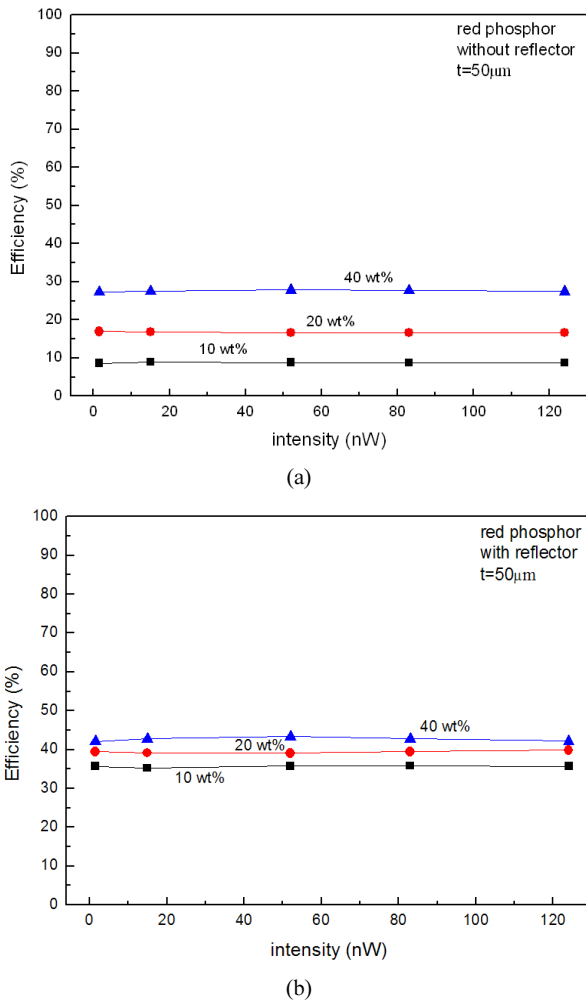


FIG. 6. The light power conversion efficiency in terms of the light power (a) without the reflector and (b) with the reflector.

그림 6은 청색 입사광 세기에 따른 적색 형광 효율의 변화를 나타낸다. 그림 6(a)는 반사면이 없이 측정된 값이고, 그림 6(b)는 반사면을 갖는 형광체에 대해서 측정된 값을 나타낸다. 그림 4와 마찬가지로 10 wt%에서 반사면에 따른 효율 증가율이 3배 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 농도가 높아질수록 효율 증가율은 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 광량에 따른 광 전환 효율에 차이는 없으며, 동일한 형광체 농도에서 효율은 광량에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

IV. 결론 및 토의

형광체와 투명레진(SU-8)을 혼합하여 형광체의 농도에 따른 형광효율과 양자효율 및 입사하는 청색 레이저 광량에 따른 형광효율을 측정하였다. 적색 형광체의 경우 반사면이 있을 경우 형광 양자효율이 약 60.4%였으며 전환효율은 약 41.4%였다. 또한 형광체 후면에 반사면의 유무에 따른 효율 증가율이 이론적인 계산된 증가율과 일치함을 확인하였고, 형광체 농도가 높아질수록 청색 여기광의 세기가 포화됨에

따라 반사면의 유무에 따른 효율 증가율이 낮아지는 것을 확인하였다. 형광체의 농도가 높을수록 전환 효율은 높아지지만, 선형적으로 증가하지 않으며 증가율은 감소된다. 이는 어느 정도의 농도 이상에서는 형광으로 전환되는 광량이 한정되어 있음을 알 수 있다. 또한 전환 효율은 조사되는 광량에 무관하며, 농도가 같으면 광량이 달라지더라도 전환 효율은 일정함을 확인하였다.

녹색 형광체에서 청색 여기광이 녹색 형광으로 바뀌는 양자 효율은 약 53.5%였으며, 형광 전환효율은 46.0%였다. 적색 및 녹색 형광체 모두에서 양자효율은 Intematix 사의 형광체 데이터 시트의 90%보다 많이 떨어진다. 그 이유는 본 실험의 특성상, 형광체가 코팅된 유리 기판을 따라 내부 전반사에 의해서 소실되는 형광과 내부에서 재흡수로 인한 형광 손실로부터 발생하는 것으로 생각된다. 90%의 형광 양자효율은 매우 얇은 형광체 두께와 유리 기판 전반사로 빠지는 광을 모두 고려한 이상적인 값이며, 실제 color matching LCD에서 응용되는 높은 형광체 밀도 및 큰 기판과는 상이한 조건을 갖는다. 본 연구에서는 실제 color-matching LCD 백라이트 조건에서 얻어지는 양자효율과 형광전환효율을 측정하였기 때문에 형광체 공급자의 데이터와 차이를 갖는 것으로 보인다.

본 연구를 바탕으로 하여 적색 및 녹색 형광체를 고투과율 LCD를 구현하기 위한 적색, 녹색, 청색 컬러필터와 color matching 되는 형광체 패터닝 기술에 대한 연구가 필요하다. 이러한 연구를 통하여 기존 LCD보다 약 200~300% 높은 고투과율을 갖는 LCD 기술에 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0022826).

References

1. J. K. Kim, H. Luo, E. F. Schubert, J. Cho, C. Sone, and Y. Park, "Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup," *Jap. J. Appl. Phys.* **44**, L649-L651 (2005).
2. N. Narendran, Y. Gu, J. P. Freyssonier-Nova, and Y. Zhu, "Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency," *Phys. Stat. Sol. (a)* **202**, R60-R62 (2005).
3. J. R. Oh, S. W. Cho, Y. H. Lee, and Y. R. Do, "Enhanced forward efficiency of $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ phosphor from white light-emitting diodes using blue-pass yellow-reflection filter," *Opt. Express* **17**, 7450-7457 (2009).
4. Y. H. Won, H. S. Jang, K. W. Cho, Y. S. Song, D. Y. Jeon, and H. K. Kwon, "Effect of phosphor geometry on the luminous efficiency of high-power white light-emitting

- diodes with excellent color rendering property,” *Opt. Lett.* **34**, 1-3 (2009).
5. Y. Hu, W. Zhuang, H. Ye, D. Wang, S. Zhang, and Z. Huang, “A novel red phosphor for white light emitting diodes,” *J. Alloys and Compounds* **390**, 226-229 (2005).
 6. J. P. You, N. T. Tran, and F. G. Shi, “Light extraction enhanced white light-emitting diodes with multi-layered phosphor configuration,” *Opt. Express* **18**, 5050-5060 (2010).
 7. Y. Taira, “Color filterless display device, optical element, and manufacture,” *SID Tech. Dig.*, 1250 (2003).
 8. J. Kwon, “A Color-filterless LCD with RGB LED and lenticular-lens arrays,” *J. Inf. Disp.* **11**, 45-48 (2010).
 9. Y. Zhu, N. Narendran, and Y. Gu, “Investigation of the optical properties of YAG:Ce phosphor,” *Proc. SPIE* **6337**, Sixth International Conference on Solid State Lighting, 63370S (2006).