

백색 발광다이오드에서의 혼합 형광체 모델링

김도우^{1,a}, 공다영², 공명국³

¹ 한국폴리텍대학 반도체CAD과

² 수지고등학교

³ (주)루멘스

Modeling of Mixed Phosphors in White Light Emitting Diode

Kim Dowoo^{1,a}, Gong Dayeong², and Gong Myeongkook³

¹ Department of Semiconductor CAD, Korea Polytechnics, Anseong 456-719, Korea

² Suji High School, Yongin 448-170, Korea

³ Lumens Co., Ltd., Yongin 446-901, Korea

(Received June 21, 2013; Revised June 24, 2013; Accepted June 24, 2013)

Abstract: An optical model is proposed in the white LED using phosphor and LED chip. In this paper a new model that describes the absorption rate and quantum efficiency with increasing the mixing ratio of phosphor in silicone, and the allotment of the phosphor absorption optical power in the several phosphor mixing in the silicone. Single phosphor in silicone from the optical measurement data before and after molding, the solution to get the blue optical power and the phosphor emission optical power is proposed. By these solution the absorption rate and the quantum efficiency was obtained. The model with single phosphor mixing in the silicone the validity was confirmed.

Keywords: Phosphor, Absorption rate, Quantum efficiency, Absorption optical power, Emission optical power

1. 서론

백색 발광다이오드(LED)는 초기 비용이 높으나 수은과 같은 유해물질이 없어서 환경 친화적이며, 고효율이면서도 장수명 특성을 가지고 있어서 장시간 사용 시 전기료 절감에 의해 기존의 조명보다 경제적이기 때문에 점점 사용량이 증가하고 있다. 백색 LED는 청색 LED 칩에서 발생하는 빛을 황색이나 녹

색 및 적색 형광체와 조합하여 제작된다. 백색광은 주광색, 전구색과 같이 다양한 색이 있으며, 밝기나 색을 잘 나타낼 수 있는 정도를 표시하는 연색지수와 같은 광학적 특성이 복잡하다. 이렇게 요구되는 특성을 맞추기 위해서 많은 시행착오 실험을 하게 된다. 이러한 과정을 효율적으로 하기 위해서는 형광체의 모델이 필요하다 [1]. 그리고 정밀해석을 위해서는 형광체 외에도 기구 및 광학적 원리의 적용이 필요하다. 여기에서는 형광체의 흡수 및 발광에 대한 모델식과 혼합형광체 백색 LED의 광 특성을 나타낼 수 있는 새로운 모델을 제시하고, 형광체의 특성변수를 추출하는 결과를 고찰하였다.

a. Corresponding author; dwkim@kopo.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 실험 방법

2.1 형광체 모델링 및 변수 추출

백색 LED는 칩 부착, 금속선본딩, 형광체 형성, 개별화, 측정 분류, 테이핑의 공정 순서로 제작된다. 칩 부착은 리드프레임에 페이스트나 유테틱 (eutectic) 금속으로 칩을 안착하고 열을 가하여 부착하는 공정이다. 금속선본딩은 금속선을 칩 위의 본딩패드와 리드프레임의 금속면에 가열, 압력, 초음파에너지 인가로 용접하여 붙이는 공정이다. 형광체 형성은 금속선본딩된 청색 LED 칩에서 나온 빛의 일부가 형광체에 흡수되어 형광색광으로 전환되도록 형광체와 투명 물딩재를 혼합하여 주입, 스프레이 등의 방법으로 칩 위에 형성하여 주는 공정이다 [2,3]. 개별화는 이와 같이 공정이 완료된 배열프레임 형태의 LED를 절단이나 소잉 (sawing) 등의 방법으로 개별화하는 공정이다. 측정 분류는 원하는 색의 빛과 밝기에 맞게 선택하여 사용할 수 있도록 개별화된 LED를 밝기, 전압 등 전기광 특성이 넓게 분포된 LED를 측정하여 등급 (rank) 별로 분류하는 공정이다. 테이핑은 이후 PCB에 마운팅 및 솔더링을 자동으로 할 수 있도록 릴 포켓 (reel pocket)에 포장하여 주는 공정이다.

본 절에서는 형광체 형성공정에서 원하는 색을 구현하기 위해 칩의 파장, 광 출력과 형광체의 파장, 흡수계수, 양자효율에 대한 특성을 파악하고 백색의 특성인 색좌표, 광속을 계산하는 모델식을 제시한다.

LED 패키지는 [그림 1]과 같이 외부 구조물인 리드프레임과 그 위에 실장되어 금속선 본딩된 LED 칩, 그 위에 투명봉지재에 혼합된 형광체로 구성되어 있다. 칩에서 방사된 청색광이 형광체에 흡수되어 형광색광이 방사되면 이들이 합해져 백색광이 된다.

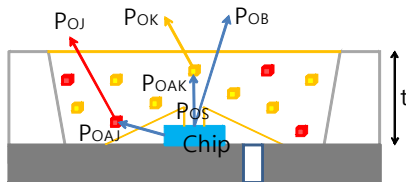


Fig. 1. Schematics of the flat molded LED.

[그림 1]에서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

P_{OS} : 칩에서 방사된 청색광출력

P_{OB} : 패키지 밖으로 투과된 청색광출력

P_{OAK}, P_{OAJ} : K, J 형광체에 흡수된 청색광출력

P_{OA} : $P_{OAK} + P_{OAJ}$, 형광체에 흡수된 전체 청색광출력

P_{OK}, P_{OJ} : K, J 형광체에서 발광된 K, J 색의 광출력

P_O : $P_{OB} + P_{OK} + P_{OJ}$, 패키지에서 발광된 전체 광출력

t : 봉지재 전체 두께(빛의 총 투과 경로)

2.2 1차원 형광체의 동작 모델링

[그림 1]에서와 같이 백색 LED 패키지는 청색 LED 칩에서 발생된 빛이 그 주변에 투명봉지재와 혼합된 형광체에 흡수된 후 형광체에서 그의 파장에 해당되는 빛이 재발광되는 원리로 동작한다. 이것을 해석적으로 모델링하기 위해 1차원적으로 근사를 하였다. 다음 [그림 2]와 같이 평면광과 1차 광선에 대해서 고려한다.

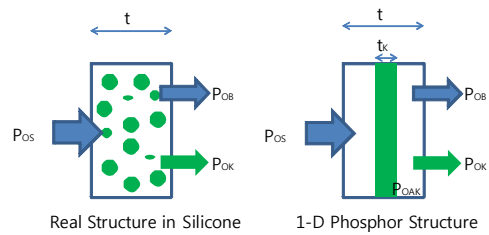


Fig. 2. 1-D modeling of 1 phosphor in silicone.

[그림 2]에서 기호의 의미는 다음과 같다.

t_K : 1차원 판형으로 근사한 K 형광체의 두께

또한, 위 [그림 2]에서 각 변수에 대한 모델식은 다음과 같다.

$$r_K^V = (r_K/d_K) / \sum_J (r_J/d_J) \tag{1}$$

$$P_{OB} = P_{OS} \exp\left(-\sum_{K \neq S} \alpha_K r_K^V t\right) \tag{2}$$

$$P_{OA} = P_{OS} \left\{1 - \exp\left(-\sum_{K \neq S} \alpha_K r_K^V t\right)\right\} \tag{3}$$

$$P_{OK} = P_{OAK} (\lambda_B/\lambda_K) \eta_{qK} \tag{4}$$

위의 식에서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

r_K, r_J : K, J 형광체의 전체 봉지재에 대한 무계비

r_K^V : K, J 형광체의 전체 봉지재에 대한 부피비

d_K, d_J : K, J 형광체의 밀도
 α_K : K 형광체의 청색광에 대한 흡수계수
 λ_K, λ_B : K 형광색광, 청색광의 평균 파장
 η_{qK} : K 형광체의 청색광에 대한 양자효율

식 (1)은 형광체부피비는 형광체 무게비를 밀도로 나누어 준 비율임을 나타낸다. 식 (2)는 칩에서 방사된 청색광출력 P_{OS} 가 흡수계수 α_K 이고, 두께가 $t_K = r_K^V t$ 인 형광체를 투과한 빛의 광출력이 P_{OB} 임을 의미한다. 식 (3)은 형광체 전체 흡수광출력 P_{OA} 는 칩 청색광출력 P_{OS} 에서 투과한 청색광출력 P_{OB} 를 뺀 것을 의미한다. 식 (4)는 양자효율의 정의로 K 형광체에 흡수된 청색광 P_{OAK} 의 광자수가 양자효율의 비율만큼만 K 형광색광의 광출력 P_{OK} 로 발생됨을 의미한다.

그런데, 위와 같은 가정을 통하여 얻은 모델식이 [그림 1]의 그림과 같이 편평구조로 봉지된 LED의 경우나 그림 3과 같이 반구형으로 봉지된 LED의 경우에도 동일하다.

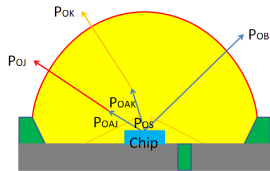


Fig. 3. Hemispherical molded LED Schematic.

[그림 1]과 같은 편평구조 LED 패키지에서 분산형광체의 광출력밀도를 고려한 유효면적은 [그림 4]와 같이 광경로와 균일 분포된 형광체와의 작용을 미소 크기로 분해하여 [그림 5]와 같이 해석하면 다음 식 (5)와 같다.

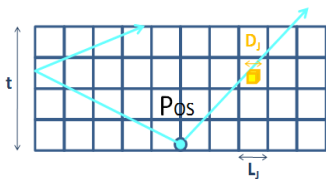


Fig. 4. Optical path in flat mold LED.

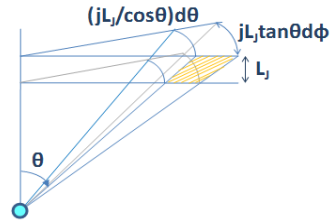


Fig. 5. Differential analysis of optical action in flat mold LED.

$$\sum_{j=1}^{t/L_K} L_K \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} (jL_K \tan \theta d\phi) \left(\frac{jL_K}{\cos \theta} d\theta \right) \left(\frac{D_K^2}{2\pi (jL_K / \cos \theta)^2} \right) \quad (5)$$

위 식 (5)에서 앞의 괄호 두 개 항의 적분 및 합은 형광체의 개수를 의미하여, 세 번째의 괄호 항은 칩에서 발광된 빛의 거리를 고려하여 형광체에 도달되어 흡수되는 양을 고려한 단위 형광체 유효 면적이다. 단위형광체 유효면적의 식에서 LED의 광출력은 반구로만 방사되므로 분모의 인수가 4가 아니라 2로 고려한다. 식 (5)를 간단히 하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{t/L_K} \frac{D_K^2}{L_K^2} = \frac{D_K^2}{L_K^2} \frac{t}{L_K} = \frac{r_K^V}{D_K} \quad (6)$$

[그림 5]와 같은 반구형구조 LED 패키지에서 분산형광체의 광출력 밀도를 고려한 유효면적은 그림 [그림 6]와 같이 광경로와 균일 분포된 형광체와의 작용을 미소 크기로 분해하여 [그림 7]과 같이 해석하면 다음 식 (6)과 같다.

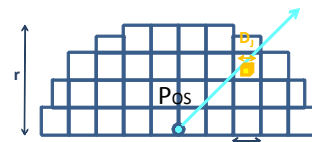


Fig. 6. Optical path in hemispherical mold LED.

$$\int_0^r \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{(r \sin \theta d\theta)(rd\theta)(dr)}{L_K^3} \frac{D_K^2}{2\pi r^2} \quad (7)$$

식 (7)을 간단히 하면 다음과 같다.

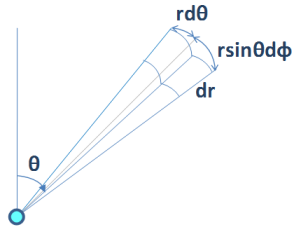


Fig. 7. Differential analysis of optical action in hemispherical mold LED.

$$\frac{D_K^2}{L_K^2} \frac{t}{L_K} = \frac{r_K^V t}{D_K} \tag{8}$$

따라서, 각 경우 투과 광출력은 앞의 유효면적이 반구를 덮은 형광체의 두께 D_K 에 해당되므로 다음 식 (8)과 같다.

$$P_{OB} = P_{OS} \exp\left(-\sum_K \frac{r_K^V t}{D_K} \alpha_K D_K\right) \tag{9}$$

이를 간단히 하면 다음 식 (10)과 같다.

$$P_{OB} = P_{OS} \exp\left(-\sum_K \alpha_K r_K^V t\right) \tag{10}$$

따라서 앞의 1차원 근사 모델식은 편평구조 봉지 LED 패키지 및 반구형 봉지 LED 패키지 구조에서도 동일하게 적용됨을 알 수 있다.

2.3 외부양자효율과 외부흡수계수

식 (4)에서 K 형광체의 양자효율 η_{qK} 는 봉지재에서 형광체 무게비 (또는 부피비)에 따라 변하는 외부 영향의 (extrinsic) 값이다. [그림 8]에서 형광색광이 방출되어 퍼져나가는 모습을 도식화하였다.

[그림 8]에서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

- D_K, D_J : K, J 형광체의 정육면체 크기
- L_K : 균일분산된 형광체 하나가 차지하는 정육면체 크기
- α_J^K : K 형광색광에 대한 J 형광체의 흡수계수

[그림 8]에서 앞에서와 마찬가지로 방법으로 분산형 광체의 광출력 밀도를 고려한 유효면적을 계산하면 다음 식 (11)과 같다.

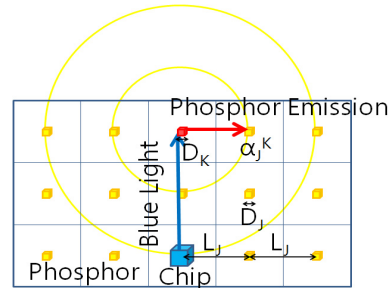


Fig. 8. Schematic radiation diagram of the uniformly distributed phosphor.

$$\sum_{j=1}^{t/L_j} L_j \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} (jL_j \tan\theta d\phi) \left(\frac{jL_j}{\cos\theta} d\theta\right) \left(\frac{D_j^2}{4\pi(jL_j/\cos\theta)^2}\right) \tag{11}$$

단위 형광체 유효면적에서 형광체의 광출력은 구로 방사되므로 factor를 4로 고려한다. 위 식을 간단히 하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{t/L_j} \frac{D_j^2}{2L_j^2} = \frac{D_j^2}{2L_j^2} \frac{t}{L_j} = \frac{r_j^V t}{2D_j} \tag{12}$$

따라서 형광체 투과광출력은 다음 식(13)과 같다.

$$P_{OK} = P_{OAK} \frac{\lambda_B}{\lambda_K} \eta_{qK}(0) \exp\left(-\sum_J \frac{r_j^V t}{2D_j} \alpha_J^K D_j\right) \tag{13}$$

이를 간단히 하면 다음 식(14)와 같다.

$$P_{OK} = P_{OAK} \frac{\lambda_B}{\lambda_K} \eta_{qK}(0) \exp\left(-\frac{\alpha_J^K r_j^V t}{2}\right) \tag{14}$$

따라서 양자효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{qK} = \eta_{qK}(0) \exp\left(-\frac{\alpha_J^K r_j^V t}{2}\right) \tag{15}$$

따라서 외부양자효율은 형광체 무게비 r_j^V 에 따라 감소한다. 무게비가 0일 때가 내부양자효율이다.

이것을 연속적인 적분형태로 해석하지 않고 이산적인 형태로 해석하면 다음 식 (16)과 같이 얻을 수 있다.

$$\eta_{qK} = \eta_{qK}(0) \left[1 - \sum_J r_j^V t \{1 - \exp(-\alpha_J^K D_j)\} / D_j\right] \approx \eta_{qK}(0) \exp\{-\beta_K(r_K^V)t/D_K\} \tag{16}$$

따라서 외부흡수계수의 경우는 다음과 같이 지수함

수로 근사하였다.

$$\alpha_K = \alpha_K(0)\exp\{-\beta_K(r_K^V)^\gamma t/D_K\} \quad (17)$$

2.4 양자효율과 흡수계수의 추출

실험 결과로부터 흡수계수와 양자효율을 위의 식으로부터 얻기 위해서는 다음과 같이 청색광 P_{OB} 와 형광색광 P_{OK} 를 구분하여야 한다. 관련 식은 다음과 같다.

$$\Phi_V = \Phi_{VB} + \Phi_{VK} \quad (18)$$

$$P_O = P_{OB} + P_{OK} \quad (19)$$

$$\Phi_{VB} = K_m V(\lambda_B)P_{OB} \quad (20)$$

$$\Phi_{VK} = K_m V(\lambda_K)P_{OK} \quad (21)$$

$$\eta_{qK} = (P_{OB}\lambda_B)/(P_{OK}\lambda_K) \quad (22)$$

위의 식에서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

Φ_V : 혼합형광체 LED의 총광속

Φ_{VB} : 혼합형광체 LED의 청색광의 광속

Φ_{VK} : K 형광색광의 광속

K_m : 시감도 정수, 683 lm/W

$V(\lambda)$: 파장 λ 에 따른 시감도 함수

개별 광속과 P_{OK} 를 소거하면 다음과 같이 P_{OB} 가 얻어지며, 이로부터 P_{OK} 도 얻어진다.

$$P_{OB} = \{\Phi_V - K_m V(\lambda_K)P_O\}/[K_m\{V(\lambda_B) - V(\lambda_K)\}] \quad (23)$$

$$P_{OK} = \{K_m V(\lambda_B)P_O - \Phi_V\}/[K_m\{V(\lambda_B) - V(\lambda_K)\}] \quad (24)$$

흡수계수는 식 (2)에서 단일형광체라고 하면 다음과 같다.

$$\alpha_K = -\ln(P_{OB}/P_{OS})/(r_K^V t) \quad (25)$$

양자효율은 다음과 같다.

$$\eta_{qK} = (P_{OK}\lambda_K)/\{(P_{OS} - P_{OB})\lambda_B\} \quad (26)$$

2.5 혼합 형광체의 동작 모델링

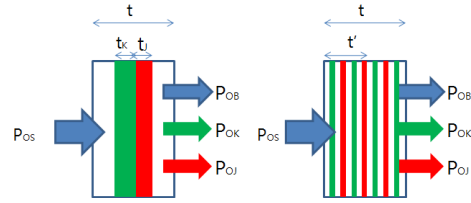


Fig. 9. 1-D modeling of multi-phosphors in silicone.

위의 [그림 9]에서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

t_K, t_j : 1차원 판형으로 근사한 K, J 형광체의 두께

t' : 입사광 P_{OS} 의 경로, $0 \leq t' \leq t$

혼합형광체에 대해서는 위 [그림 9]와 같이 나타내어진다. 실제로 형광체는 수 내지 수십 마이크로미터의 크기로 많이 사용된다. 그래서 점점 작은 영역을 선택하면 형광체의 분포가 불균일한 영역이 생기게 된다. 여기에서는 [그림 9]의 오른쪽 그림과 같이 어떤 작은 영역을 선택하여도 형광체가 고르게 분포되었다고 가정을 한다. 이렇게 절대적으로 균일분포에 대한 가정을 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P_{OB}(t') = P_{OS}\exp\left\{-\sum_{K \neq S} \alpha_K r_K^V t'\right\} \quad (27)$$

$$P_{OA}(t') = P_{OS}\left\{1 - \exp\left(-\sum_{K \neq S} \alpha_K r_K^V t'\right)\right\} \quad (28)$$

$$dP_{OA}(t') = P_{OB}(t')\left\{1 - \exp\left(-\sum_{J \neq S} \alpha_J r_J^V dt'\right)\right\} \quad (29)$$

$$= P_{OB}(t')\sum_{J \neq S} \alpha_J r_J^V dt' + O(dt'^2)$$

$$dP_{OAK}(t') = P_{OB}(t')\left\{1 - \exp\left(-\alpha_K r_K^V dt'\right)\right\} \quad (30)$$

$$= P_{OB}(t')\alpha_K r_K^V dt' + O(dt'^2)$$

따라서 위에서 두 식을 (29)/(30)과 같이 좌변, 우변끼리 나누어 주면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dP_{OAK}(t)}{dP_{OA}(t)} = \frac{\alpha_K r_K^V}{\sum_{J \neq S} \alpha_J r_J^V} \quad (31)$$

위의 좌변 식의 분모를 곱하여 적분하면 다음 식이 얻어진다.

$$\int dP_{OAK} = \int \frac{\alpha_K r_K^V}{\sum_{J \neq S} \alpha_J r_J^V} dP_{OA} \quad (32)$$

위에서 흡수계수가 광출력의 크기에 따라 변하지 않는 일정한 값이라면 해당 흡수계수 항과 전체 흡수계수 항의 비율이 적분 밖으로 나와 다음과 같은 전체 흡수청색광에서 각 형광체로 흡수되는 청색광의 식을 간단히 얻을 수 있다.

$$P_{OAK} = \frac{\alpha_K r_K^V}{\sum_{J \neq S} \alpha_J r_J^V} P_{OA} \quad (33)$$

2.6 편평구조 LED 모델

앞에서 얻어진 1차원 형광체 모델로부터 발광다이오드의 구조에 따라 광학적 해석을 통하여 좀 더 정확한 모델로 실제 발광다이오드의 특성을 표현할 수 있다.

[그림 1]의 편평 구조 발광다이오드의 경우 각 내부면의 반사율과 투과율이 100%라고 하면 다음 적분식으로 광출력 변수들을 나타낼 수 있다. 만일 반사율과 투과율을 고려하려면 프레넬 (Fresnel)의 반사와 투과 계수에 대한 결과식을 사용하면 된다.

$$P_{OB} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} p_{OB}(\theta) \exp\left\{-\sum_K \alpha_K r_K^V t'(\theta)\right\} \sin\theta d\theta d\phi \quad (34)$$

$$= 2\pi \int_0^{\pi/2} p_{OB}(\theta) \exp\left\{-\sum_K \alpha_K r_K^V t'(\theta)\right\} \sin\theta d\theta$$

여기에서 p_{OB} 는 칩의 각에 따른 방사특성을 나타내는 함수이며, [그림 1]의 편평구조에서는 광경로는 $t'(\theta) = t/\cos\theta$ 로 나타내어진다. 실제로 칩의 근접방사에 대한 특성을 다 고려하려면 LED 칩의 발광면에 무한히 작은 점광원이 있는 것으로 놓아 칩의 점광원을 발광면 전체에서 적분을 하여 얻어야 정확한 결과가 얻어진다.

2.7 렌즈구조 LED 모델

[그림 3]과 같이 반구형 렌즈구조 발광다이오드에서는 광경로 t 가 모두 일정하나 방사특성 p_{OB} 가 다르므로 다음과 같이 표현된다.

$$P_{OB} = 2\pi \exp\left\{-\sum_K \alpha_K r_K^V t\right\} \int_0^{\pi/2} p_{OB}(\theta) \sin\theta d\theta \quad (35)$$

[그림 1, 3]과 같이 대표적인 구조의 발광다이오드에 대해서 칩의 투과광출력을 표현하였으며, 다른 구

조에서도 위와 같은 방법으로 나타낼 수 있다. 그리고 다른 광출력인 형광체의 광출력도 마찬가지로 방법으로 나타낼 수 있다.

2.8 백색 LED 광특성 예측

앞에서 얻어진 단일형광체 몰딩의 봉지 전후 측정결과에서 여러 개의 형광체를 몰딩하여 백색 LED 패키지를 만들었을 때 특성 예측 모델은 다음 식과 같다.

청색칩의 특성은 색좌표 $(x_b, y_b) = (x_B, y_B)$, 광출력은 P_{Ob} , 파장은 λ_B 라고 하면 광속은 $\phi_{vb} = K_m V(\lambda_b) P_{Ob}$ 와 같다. 형광체 특성은 흡수율 α_K , 양자효율 η_{qK} , 색좌표 (x_K, y_K) , 파장 λ_K 와 같다. 그러면, 봉지 후 혼합형광체 LED 패키지에서의 광특성은 다음과 같다.

$$P_{OB} = P_{Oa} \exp(-\alpha_K r_K^V t) \quad (36)$$

$$\phi_{vB} = K_m V(\lambda_B) P_{OB} \quad (37)$$

$$P_{OA} = P_{Oa} - P_{OB} \quad (38)$$

$$P_{OAK} = \frac{\alpha_K r_K^V}{\sum_J \alpha_J r_J^V} P_{OA} \quad (39)$$

$$\phi_{vK} = P_{OAK} \frac{\lambda_B}{\lambda_K} \eta_{qK} e^{-\frac{\alpha_J r_J^V t}{2}} \quad (40)$$

$$x = \frac{\sum x_K \phi_{vK} / y_K}{\sum \phi_{vK} / y_K} \quad (41)$$

$$\phi_v = \sum \phi_{vK} \quad (42)$$

$$y = \frac{\phi_v}{\sum \phi_{vK} / y_K} \quad (43)$$

따라서 측정되거나 사양자료로부터 얻은 청색칩의 특성, 또한 사양서나 앞의 방법으로 측정에 의해 얻어진 형광체의 특성으로부터 혼합형광체 백색 LED의 광특성을 얻을 수 있게 된다.

3. 결과 및 고찰

흡수계수와 양자효율을 얻기 위하여 단일 형광체로 형광체공정, 개별화공정을 하여 얻어진 발광다이오드의 광특성을 다음 [표 1]과 같이 얻었다.

유도한 모델링 식 (25), (26)을 이용하여 추출된 모델변수로부터 구하여진 흡수계수와 양자효율 및 모델변수 값을 구하여 [표 2]에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of white LED using 1 phosphor.

Phosphor weight ratio r_K		1%	5%	10%	15%
Blue Chip Char.	CIE u	0.155	0.153	0.155	0.153
	CIE v	0.023	0.025	0.023	0.025
	Optical Power[W]	0.346	0.338	0.351	0.339
	Optical Flux[lm]	10.63	10.41	10.73	10.39
	Peak Wavelength[nm]	446.4	446.5	446.3	446.4
	Dominant Wavelength[nm]	452.4	452.5	452.2	452.4
	Voltage[V]	3.551	3.4	3.587	3.397
	Mixing Char.	CIE u	0.208	0.343	0.458
CIE v		0.083	0.233	0.353	0.399
Optical Power[W]		0.316	0.26	0.222	0.192
Optical Flux[lm]		33.02	64.5	74.1	68.84
Peak Wavelength[nm]		446.5	446.8	593.5	594.1
Dominant Wavelength[nm]		426.9	549.5	598.8	590
CCT[K]		0	3846	2255	2069
Voltage[V]		3.378	3.39	3.407	3.414
CRI		0	68.02	49.14	45.03

Table 2. Measured absorption coefficient, quantum efficiency, extracted model parameters.

Phosphor weight ratio r_K		1%	5%	10%	15%
Absorption Coefficient α_K		1772	1277	1180	983
Quantum Efficiency η_{qK}		0.897	0.885	0.784	0.719
x_K		0.541			
y_K		0.446			
λ_B		454.7			
λ_K		603			
Quantum Efficiency	$\eta_{qK}(0)$	0.911			
	α_K^K	0.0074			
Absorption Coefficient	$\alpha_K(0)$	2730			
	β_K	0.0012			
	γ	0.3			

위의 [표 2]에서 기호의 의미와 사용된 값은 다음과 같다.

$$d_S : \text{LED패키지를 채우는 실리콘의 밀도}$$

$$d_K = 4g/cm^3, d_S = 1.02g/cm^3,$$

$$D_K = 15\mu m, t = 0.07cm$$

다음 [그림 10, 11]은 흡수계수 및 양자효율 측정값을 [표 2]의 모델변수와 모델식 (15), (17)로부터 추

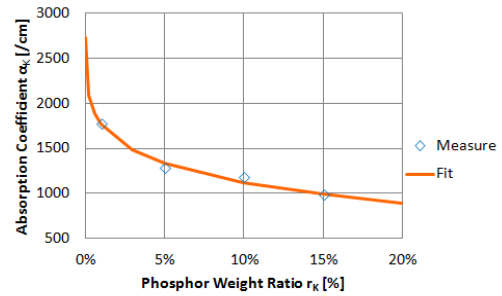


Fig. 10. Measured and model parameter fit absorption coefficient α_K .

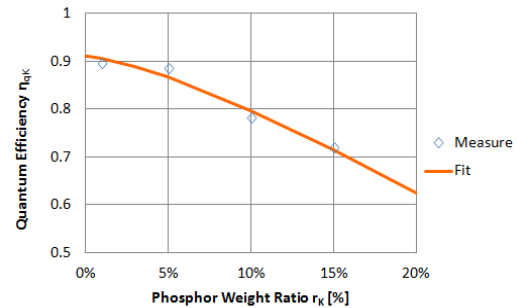


Fig. 11. Measured and model parameter fit quantum efficiency η_{qK} .

선을 구하여 비교한 그래프이다.

[표 3]에서는 [표 2]의 모델변수와 모델식 (36)~(43)으로 구한 특성값들과 [표 1]의 측정값과의 편차비를 나타내었다.

Table 3. Major characteristics data and difference from [Table 2].

Phosphor weight ratio r_K	1%	5%	10%	15%
P_{OB}	0.2522	0.0978	0.0404	0.0173
Φ_{VB}	7.9976	3.1005	1.2813	0.5484
P_{OK}	0.0643	0.1566	0.1868	0.1733
Φ_{VK}	25.19	61.336	73.16	67.856
P_O	0.3166	0.2544	0.2272	0.1906
Φ_V	33.188	64.437	74.441	68.404
$\Delta P_O/P_O$	-0.2%	2.0%	-2.2%	0.7%
$\Delta \Phi_V/\Phi_V$	-0.5%	0.1%	-0.5%	0.6%
$\Delta x/x$	-0.7%	-4.5%	3.0%	3.1%
$\Delta y/y$	0.2%	-6.5%	3.5%	1.4%

형광체 혼합 특성 측정값과 모델변수 및 모델식으로부터 구한 특성값과의 편차비는 형광체 혼합비 r_K 의 실험 범위 내에서 광출력의 경우 2.2% 이하, 광속의 경우 0.6% 이하였고, 색좌표 (x, y)의 경우는 6.5% 이하였다.

4. 결론

형광체와 칩을 사용한 백색 LED에서 광특성 모델식을 제시하였다. 본고에서 새롭게 제시된 모델식으로 봉지재 내의 형광체의 양이 증가함에 따라 흡수율과 양자효율이 감소하는 모델식, 다수의 형광체 혼합 시 흡수광의 분배 모델식을 제시하였다. 또한, 단일 형광체 사용 시 봉지재 주입 전후 측정된 광특성으로부터 청색광과 형광색광의 광출력을 구분하는 해를 제시하여 형광체의 특성인 흡수계수, 양자효율을 계산하는 모델식도 제시하였다. 단일 형광체의 백색 발광 다이오드의 실험 결과를 사용하여 모델식의 유효성을 확인하였다.

형광체 혼합 특성 측정값과 모델변수 및 모델식으로부터 구한 특성값과의 편차비는 형광체 혼합비 r 의 실험 범위 내에서 광출력의 경우 2.2% 이하, 광속의 경우 0.6% 이하였고, 색좌표 (x, y)의 경우는 6.5% 이하였다. 좀 더 정확한 모델식에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되나 실제 측정에서도 오차가 포함되므로 모델은 유효할 것으로 생각된다. 즉, 단일 형광체 모델링은 위의 식들로 표현될 수 있으며 그 결과물들의 신뢰성은 비교적 높은 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] D. Y. Kang, E. Wu, and D. M. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 231102 (2006).
- [2] H. Bin, R. Haibo, and L. Junfei, *Proc. of SPIE*, **6841**, 684106 (2007).
- [3] H. T. Huang, C. C. Tsai, and Y. P. Huang, *Opt. Express*, **18**, S2 (2010).