

색온도와 조도 제어가능한 LED 조명 시스템

(A Color Temperature and Illuminance Controllable LED Lighting System)

김 훈* · 엄재경 · 정원섭 · 김희준**

(Hoon Kim · Jea-Kyoung Youm · Won-Sup Chung · Hee-Jun Kim)

요 약

본 논문은 독립적으로 LED의 색온도와 조도를 제어하는 알고리즘과 이를 이용한 LED 조명 시스템을 제안한다. 제안된 알고리즘이 항상 해를 가지는 것을 증명해 제안된 알고리즘이 유효함을 보여주었다. 적색, 녹색, 청색, 백색 (RGBW) LED를 사용한 LED 모듈 제어에 제안된 알고리즘을 적용하였다. 이 모듈의 색온도는 3,500~7,500[°K], 조도는 500~1,500[lux] 범위에서 변화했다. LED의 접합온도가 40[°C]로 유지될 때, 이 범위 내에서 색온도와 조도의 편차는 0.8[%] 이하였다. 30~70[°C]의 범위에서는 목표 조도와 색온도가 각각 1,000[lux]와 6,500[°K] 일 때 조도와 색온도의 편차가 2.1[%]와 3.1[%] 이하이고, 온도 보상된 경우에는 편차가 1[%]와 0.49[%] 이하였다.

Abstract

This paper presents an LED lighting system with an LED color control algorithm that can independently change its color temperature and illuminance. To show the validity of the proposed algorithm, it is proven that its solution always exists. The proposed algorithm was applied to the control of an LED module that is composed of red, green, blue, and white (RGBW) LEDs. Its color temperature variation ranged from 3,500~7,500[°K], and its illuminance ranges from 500~1,500[lux]. Within these range, the color temperature and illuminance deviations are as low as $\pm 0.8\%$ when the junction temperature of LEDs are maintained at 40[°C]. In the range of 30~70[°C], the measured illuminance and color temperature deviations are as low as 2.1[%] and 3.6[%], and the compensated ones are as low as 1[%] and 0.49[%], when the desired illuminance and color temperature are 1,000[lux] and 6,500[°K], respectively. nyang.ac.kr).

Key Words : Lighting, Lighting Control, LED Lighting, LED

1. 서 론

최근 조명 산업은 발광다이오드(LED)의 높은 광 효율, 장수명, 저전력 소비, 작은 패키지 크기 등과 같은 장점으로 차세대 광원으로 LED에 주목하기 시작했다[1-3]. LED의 수명이 잦은 스위칭에 영향을 받지 않으므로, 펄스폭 변조(PWM) 디밍 방식을 일

* 주저자 : 청주대학교 전자정보공학부 박사 후 연구원

** 교신저자 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-400-5164, Fax : 031-400-3799

E-mail : hjkim@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2009년 6월 26일

1차심사 : 2009년 7월 1일, 2차심사 : 2009년 9월 28일

심사완료 : 2009년 10월 15일

반적으로 LED 모듈의 빛의 세기를 제어하는데 사용하고 있다[4-6]. LED 모듈의 빛의 세기는 PWM 디밍 신호의 시비율에 선형적으로 비례한다. 적색, 녹색, 청색 (RGB) LED로 구성된 LED 조명은 넓은 범위의 색상을 나타낼 수 있으며, 원하는 색을 얻기 위해서는 각 RGB LED의 빛의 세기를 색 혼합 원리에 따라 조정해야 한다[2].

적절한 색상 제어 알고리즘 없이, 혼합된 빛의 색좌표를 얻기 위해 광센서를 이용한 피드백 제어회로를 사용한 연구가 있다. 이 연구는 혼합된 색상의 측정되는 색좌표가 기준 색좌표를 따라가도록 조절하는 방법이다[7]. 그러나 광센서의 위치에 따라 관찰되는 색상의 오차가 눈에 보일 정도로 측정된 색좌표의 값이 부정확하다. 색상 필터 또한 삼자극치(tri-stimulus)를 감지할 때 오차를 초래한다. 게다가, 삼자극치와 빛의 세기가 간접적인 관계이기 때문에 LED 빛의 세기를 독립적으로 제어하기 어렵다.

본 논문은 독립적으로 조도 변화 가능한 색상 제어 알고리즘을 이용한 감성적이고 실용적인 LED 조명 시스템을 제안한다. 제안된 LED 조명 시스템을 다음 장에서 설명한다. 3장에서는 제안된 색상 제어 알고리즘과 이 알고리즘의 유효성을 증명한다. 제안된 알고리즘 검증을 위한 시험용 LED 조명 시스템의 실험 결과가 5장에 제시된다.

2. LED 조명

RGB LED를 조합한 조명은 넓은 범위의 색상을 만들어낼 수 있다[2]. 혼합된 색은 LED 광원에서 방출되는 각 빛의 세기의 비로 결정되고, 이 빛의 세기는 LED 구동 전류에 선형적으로 비례한다. 따라서 원하는 색상은 전류 레벨을 제어하는 방법 혹은 PWM 디밍 방식으로 얻을 수 있다[8]. 충분한 휘도 제공을 위해 보통 적색과 청색 LED 소자의 수 보다 두 배의 녹색 LED 소자를 사용해 RGB LED 모듈을 제작한다. 본 논문에서는 같은 목적으로 충분한 휘도를 제공하기 위해 백색 LED를 사용한 RGBW LED 모듈을 이용하였다.

그림 1은 제안된 시스템의 블록도이다. 입력되는

교류 전원의 역률을 높이기 위해 역률 개선 회로(PFC)를 통해 LED 조명 시스템에 직류전원을 공급한다. 디지털 제어기는 목표 색좌표와 조도에 해당하는 PWM 디밍 신호 행렬 **D**를 만든다. 각 LED 구동 회로는 최대치가 일정한 구동 전류를 공급하고, 디밍 신호 행렬 **D**에 의해 구동 전류의 온-오프 시간 비율이 제어된다.

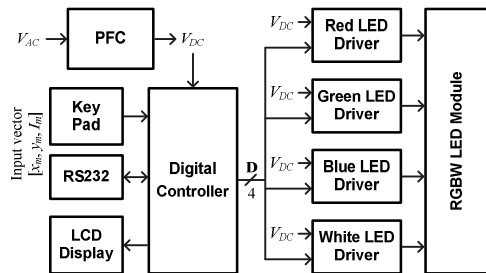


그림 1. 색 제어가능한 LED 조명의 블록도
Fig. 1. Block diagram of a color controllable LED lighting

2.1 시스템 제어기

LED 조명의 디지털 제어기는 혼합된 빛의 색좌표와 조도를 가진 입력 벡터 $[x_m, y_m, I_m]$ 를 입력 받아 색 제어 알고리즘을 수행하고, 색좌표, 색온도, 조도 정보를 표시한다. 유효 색역 (color gamut) 범위 내에서 입력 벡터 $[x_m, y_m, I_m]$ 는 제어 알고리즘에 의해서 각 LED를 위한 4개의 PWM 디밍 시비율로 변환된다. 이 디밍 시비율 값들은 원하는 색좌표와 조도를 실현하기 위해 필요하다.

2.2 LED 구동 회로

그림 2 (a)는 빠른 동특성과 구현이 용이한 특징을 지닌 이력(hysteretic) 전류-모드 제어 정전류 강압형 LED 구동 회로의 회로도이다[9-10]. 그림 2 (a)에서, V_F 는 각 LED의 순방향 전압 강하, I_F 는 직렬로 연결된 LED를 통해 흐르는 전류를 나타낸다. 그림 2 (b)는 이 구동 회로의 동작 파형을 보여준다. RGBW LED 모듈을 구동하기 위해 별도의 4 개 구동 회로가 필요하고, 이 구동 회로들의 출력 전류 온

색온도와 조도 제어가능한 LED 조명 시스템

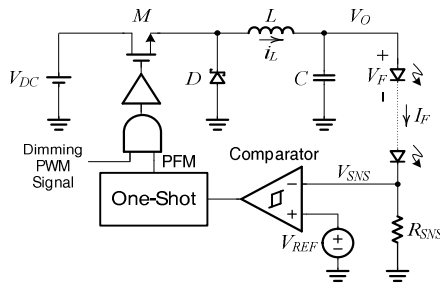
-오프는 색온도 알고리즘에 의해 결정되는 PWM 디밍신호에 의해 제어된다. 각각의 구동 회로는 출력 전류를 일정하게 유지하기 위한 정전류 피드백 루프를 포함하고 있다. 따라서 출력 전류와 LED들의 접합온도 T_j 가 고정되어 있다면, LED모듈의 특성은 항상 일정할 것이다.

조도를 향상시키기 위해서 구동 회로의 동작 주파수는 플리커(flicker) 주파수 보다 높아야 한다. 입력 전압 V_{DC} 와 가능한 최대 출력 전압 $V_{O(max)}$ 에 따라, 구동 회로의 최대 스위칭 주파수 $f_{sw(max)}$ 가 다음과 같이 결정 된다[11].

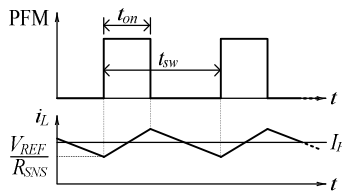
$$f_{sw(max)} = \frac{1 - V_{O(max)}/V_{DC}}{t_{off(min)}} \quad (1)$$

여기서 $t_{off(min)}$ 은 인덕터 코어의 포화를 막기 위한 최소 스위치 개방 시간이다. 리플 전류 Δi_L 을 고려해 인덕턴스 L 은 다음 식으로 선정될 수 있다[11].

$$L \geq \frac{V_{DC} - V_O}{\Delta i_L} \cdot t_{on} \quad (2)$$



(a)



(b)

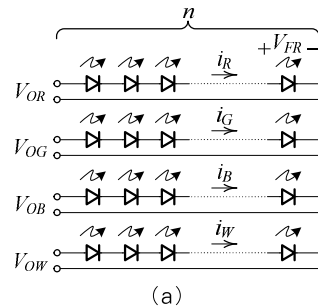
그림 2. (a) LED 구동 회로의 회로도, (b) 구동 회로의 동작 파형
Fig. 2. (a) Circuit diagram of the LED driver, and (b) its operation waveforms

2.3 RGBW LED 모듈

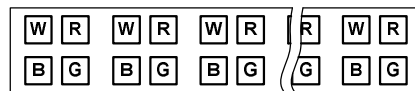
그림 3은 시스템에서 사용되는 RGBW LED 모듈의 연결도와 외형을 보여준다. 이 그림에서 n 은 직렬로 연결된 LED의 개수이고, V_{OR} , V_{OG} , V_{OB} , V_{OW} 는 각각 적색, 녹색, 청색, 백색 LED 구동 회로의 출력 전압이며, i_R , i_G , i_B , i_W 는 직렬 연결된 각 LED들을 통해 흐르는 전류이다. LED 구동 회로의 출력 전압 V_O 는 다음과 같이 직렬로 연결된 LED 숫자로 결정된다.

$$V_{O(max)} = n \cdot V_{F(max)} + V_{REF} \quad (3)$$

여기서 $V_{F(max)}$ 는 임의의 LED 최대 순방향 전압 강하이다. 빛이 잘 혼합되도록 그림 3 (b)와 같이 4가지 색상 LED들을 서로 가깝게 배치했다.



(a)



(b)

그림 3. (a) RGBW LED 모듈의 연결도와 (b) 외형
Fig. 3. (a) Connection diagram, and (b) Outline of the RGBW LED module

3. LED 조명 색상제어 알고리즘

3.1 제안된 LED 조명의 시스템 행렬

국제조명위원회(CIE)가 CIE 1931 색 대응 함수(color matching function)와 CIE 1931 색도좌표로 색상을 측정하는 CIE 1931 색공간 표준을 제정했다.

이 표준을 이용해 임의의 광원의 색상을 3개의 변수만으로 기술할 수 있다. 즉, 임의의 색상을 추상체의 자극 값에 해당하는 3가지 색 대응 함수의 가중 합으로 표현할 수 있다. 색좌표 값 x 와 y 는 각 자극치와 자극치 전체를 합한 값과의 상대적인 비율로 계산된다[2].

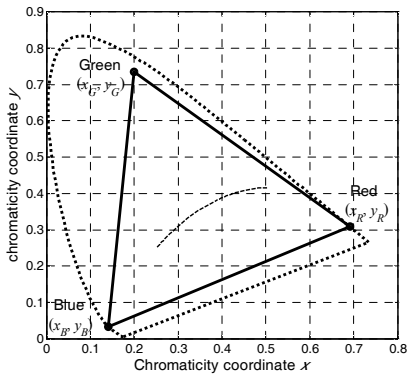


그림 4. CIE 1931 x, y 색도좌표
Fig. 4. CIE 1931 x, y chromaticity diagram

그림 4는 제안된 LED 색상 제어 알고리즘에서 LED 조명의 목표 색상을 기술하기 위해 사용한 CIE 1931 (x, y) 색도좌표이다. 그림 4에서 절선은 백색 광원의 색온도와 동일한 플랑크의 흑체복사의 궤적을 나타낸다[2]. 어떤 색상도 조도(혹은 휘도) 파라미터 E 와 색도좌표상의 한 점인 2개의 색좌표값 x, y 로 특성화할 수 있다. 이 색 정보 변수들을 벡터 [x, y, E]로 표현할 수 있다.

LED 조명 전체의 조도와 색상을 제어하기 위해 광원의 혼합된 색상과 개별 색상간의 관계를 구해야만 한다. 색 조합 이론에 따르면 혼합된 빛의 색도좌표는 개별 색상의 색도좌표들의 가중된 선형 결합이다. 따라서 삼자극치로부터 계산된 혼합된 색상의 색좌표는 다음과 같다[2].

$$x = \frac{\sum_{n=1}^3 x_n L_n}{\sum_{n=1}^3 L_n}, \quad y = \frac{\sum_{n=1}^3 y_n L_n}{\sum_{n=1}^3 L_n} \quad (4)$$

여기서 첨자 n 은 차례대로 적색, 녹색, 청색 광원, 상수 x_n 과 y_n 은 각 LED 광원들의 색도좌표를 표시한다. 가중치 L_n 은 다음과 같이 정의된다[2].

$$L_n = (\bar{x}(\lambda_n) + \bar{y}(\lambda_n) + \bar{z}(\lambda_n)) \cdot P_n \quad (5)$$

여기서 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 는 색 대응 함수, λ_n 은 n 번째 LED의 파장, P_n 는 n 번째 광원에서 방출되는 광 전력(optical power) 이고, L_n 은 n 번째 LED에서 방출되는 빛의 삼자극치 합을 의미한다. CIE 1931의 정의에 따라 조도 E 는 다음과 같이 표현된다[2].

$$E = k \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

여기서 상수 k 는 683[lux/W], $V(\lambda)$ 는 눈의 감도 함수(eye sensitivity function)이다. 녹색 대응 함수 $\bar{y}(\lambda)$ 는 $V(\lambda)$ 와 동일하다. 단색 LED의 $P(\lambda)$ 가 매우 협소한 대역폭을 가진다고 가정하면, n 번째 LED에서 방출되는 빛의 조도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_n = k V(\lambda) P_n = k \bar{y}(\lambda) P_n \quad (7)$$

식 (5)와 (7)로부터,

$$L_n = \frac{\bar{x}(\lambda_n) + \bar{y}(\lambda_n) + \bar{z}(\lambda_n)}{\bar{y}(\lambda_n)} \cdot \frac{E_n}{k} = \frac{E_n}{k y_n} \quad (8)$$

식 (4)와 (8)을 결합해 RGB LED 모듈에서 방출되는 혼합된 색상의 색좌표를 다음처럼 계산할 수 있다.

$$x = \frac{\sum_{n=1}^3 x_n E_n / y_n}{\sum_{n=1}^3 E_n / y_n}, \quad y = \frac{\sum_{n=1}^3 y_n E_n / y_n}{\sum_{n=1}^3 E_n / y_n} \quad (9)$$

같은 방식을 3가지 색상 이상의 LED를 사용한 조명에도 적용할 수 있다. RGBW LED 모듈의 혼합된 색상의 색좌표 (x_m, y_m)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

색온도와 조도 제어가능한 LED 조명 시스템

$$x_m = \frac{x_R E_r / y_R + x_G E_g / y_G + x_B E_b / y_B + x_W E_w / y_W}{E_r / y_R + E_g / y_G + E_b / y_B + E_w / y_W} \quad (10a)$$

$$y_m = \frac{y_R I_r / y_R + y_G I_g / y_G + y_B I_b / y_B + y_W I_w / y_W}{I_r / y_R + I_g / y_G + I_b / y_B + I_w / y_W} \quad (10b)$$

여기서 상수 $x_R, y_R, x_G, y_G, x_B, y_B, x_W, y_W$ 는 각 LED들의 색좌표를 나타내고, E_r, E_g, E_b, E_w 는 원하는 빛의 색을 만들기 위해 필요한 각 LED들의 조도이다. 혼합된 색의 조도 E_m 은 $E_r + E_g + E_b + E_w$ 이다. 따라서 RGBW LED 모듈의 시스템 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R - x_m}{y_R} & \frac{x_G - x_m}{y_G} & \frac{x_B - x_m}{y_B} & \frac{x_W - x_m}{y_W} \\ \frac{y_R - y_m}{y_R} & \frac{y_G - y_m}{y_G} & \frac{y_B - y_m}{y_B} & \frac{y_W - y_m}{y_W} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_g \\ E_b \\ E_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

이 식은 다음과 같이 간단하게 행렬로 표현가능하다.

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{E}_0 \quad (12)$$

여기서 \mathbf{B}_0 는 LED 모듈의 전체 조도를, 시스템 행렬 \mathbf{A}_0 는 각 LED의 색과 혼합된 색 사이의 관계를, \mathbf{E}_0 는 접합 온도가 T_{j0} 일 때 각 LED의 조도를 나타낸다. \mathbf{A}_0 의 역행렬이 존재한다면, \mathbf{E}_0 는

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{A}_0^{-1} \cdot \mathbf{B}_0 \quad (13)$$

이 된다. 따라서 \mathbf{E}_0 는 x_m, y_m, E_m 의 함수가 되며, 색좌표와 조도가 주어진다면 각 LED의 조도는 (13)으로부터 구할 수 있다.

3.2 색온도와 조도 제어 알고리즘

PWM 디밍 방식을 이용하면 LED의 조도 행렬 \mathbf{E}_0 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{D}_0 + \mathbf{C}_0 \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{14} \end{bmatrix}, \mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} D_r \\ D_g \\ D_b \\ D_w \end{bmatrix}, \mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \\ C_{04} \end{bmatrix}$$

여기서 \mathbf{C}_1 과 \mathbf{C}_0 는 LED의 특성에 의해 결정되는 계수 행렬, \mathbf{D}_0 는 LED 디밍 정보 행렬이다. \mathbf{C}_1^{-1} 가 존재 한다면, \mathbf{D}_0 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{D}_0 = \mathbf{C}_1^{-1}(\mathbf{E}_0 - \mathbf{C}_0) \quad (15)$$

따라서 $[x_m, y_m, E_m]$ 이 주어지면 식 (13)으로 계산된 \mathbf{E}_0 로 각 LED 디밍 신호의 시비율을 구할 수 있다.

플랑크 흑체복사의 온도로 정의되는 백색 광원의 색온도가 항상 플랑크의 흑체 복사 궤적에 정확히 일치할 수는 없어, 흑체 복사 궤적에 가장 가까운 좌표로 정의되는 상관 색온도(CCT)가 일반적으로 대신 사용된다. CCT가 2,222[°K]에서 4,000[°K]일 때,

$$\begin{aligned} x &= -0.2661239 \frac{10^9}{T_C^3} - 0.2343580 \frac{10^6}{T_C^2} + 0.8776956 \frac{10^3}{T_C} \\ &\quad + 0.179910 \\ y &= -0.9549476x^3 - 1.37418593x^2 + 2.09137015x \\ &\quad - 0.16748867 \end{aligned} \quad (16)$$

이고, CCT가 4,000[°K]에서 25,000[°K]일 때,

$$\begin{aligned} x &= -3.0258469 \frac{10^9}{T_C^3} + 2.1070379 \frac{10^6}{T_C^2} + 0.2226347 \frac{10^3}{T_C} \\ &\quad + 0.24039 \\ y &= +3.0817580x^3 - 5.87338670x^2 + 3.75112997x \\ &\quad - 0.37001483 \end{aligned} \quad (17)$$

이다[12]. 식 (16)과 (17)로 주어진 CCT의 값에 대한 x, y 의 색좌표를 얻을 수 있다.

그림 5는 제안된 알고리즘을 구현한 LED 조명 제어 프로그램의 순서도이다. 이 순서도에서, 주어진 CCT에 해당하는 색좌표 (x, y)를 계산하는 루틴은 식 (16)과 (17)을 이용하고, (x, y)와 주어진 조도에 따라 디밍 시비율을 계산하는 루틴은 식 (13)과 (15)를 사용한다.

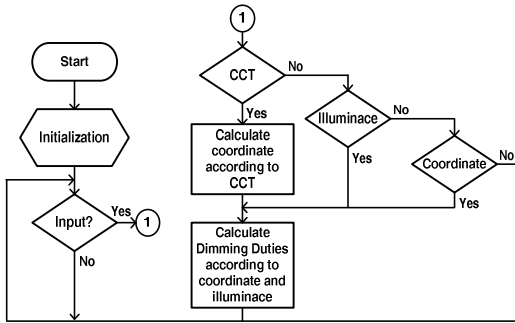


그림 5. 구현된 LED 조명 제어 프로그램의 순서도
Fig. 5. Flowchart of the implemented LED lighting control program

3.3 A⁻¹의 존재성 증명

만일 식 (15)에서 특정한 입력 벡터에 대해 A_0^{-1} 가 존재하지 않는다면, 제안된 알고리즘을 실제 조명 시스템에 적용할 수 없을 것이다. 따라서 A_0 가 정방 행렬이 아닌 경우에도 항상 역행렬을 가진다는 것이 증명되어야 한다.

A_0 가 m 행 n 열 행렬이라고 가정하자. 이러한 행렬은 계수(rank)가 m 과 n 보다 클 수 없다. 만약 A_0 의 계수가 m 으로 완전 행계수(full row rank)라면, A_0 는 $A_0C=I_m$ (m 행 m 열)를 만족하는 우역행렬(right-inverse) C 를 갖는다. 이것은 $m \leq n$ 일 때만 가능하다. 식 (18)로 최상의 우역행렬을 찾을 수 있다[13].

$$C = A_0^T(A_0A_0^T)^{-1} \quad (18)$$

편리함을 위해, A_0^{-1} 표기를 식 (18)의 C 대신 사용할 수 있다. 만약 RGBW LED 조명의 A_0 가 완전 행계수라면 그것의 우역행렬이 존재하며, 제안된 알고리즘이 어떠한 입력 벡터 $[x_m, y_m, E_m]$ 에 대해서도 유효할 것이다.

A_0 가 항상 완전 행계수를 가진다는 것을 증명하기 위해 m 행 m 열인 A_0 의 부분 행렬을 정의하고, 그것이 완전 계수(full rank)를 갖는지 판별하자. A_0 의 아무 열이나 제거할 수 있으며, 가능한 부분 행렬의 하나인 S 를 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$S = \begin{bmatrix} x_R - x_m & x_G - x_m & x_B - x_m \\ y_R & y_G & y_B \\ \frac{y_R - x_m}{y_R} & \frac{y_G - x_m}{y_G} & \frac{y_B - x_m}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 S 가 RGB LED 조명의 시스템 행렬과 동일하므로, S 가 완전 계수를 갖는다면 제안하는 알고리즘은 RGB와 RGBW LED 조명에 모두 적용가능하다.

S 가 완전 계수를 가지려면 행렬식이 영이 아니어야만 한다. 행렬식의 일반적인 특성을 이용해 S 의 행렬식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \det(S) &= -\frac{y_m}{y_R y_G y_B} \begin{vmatrix} x_R - x_B & x_G - x_B & x_B - x_m \\ 0 & 0 & 1 \\ y_R - y_B & y_G - y_B & y_B \end{vmatrix} \\ &= -\frac{y_m}{y_R y_G y_B} (x_R - x_B)(y_G - y_B) \\ &\quad + \frac{y_m}{y_R y_G y_B} (x_G - x_B)(y_R - y_B) \end{aligned} \quad (20)$$

$\det(S) = 0$ 이라고 가정하자, 그림 4에 나타낸 것처럼 x 와 y 좌표는 0이 아니기 때문에 증괄호 내의 항들이 영이 되어야 한다. 이에 따라 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\frac{y_G - y_B}{x_G - x_B} = \frac{y_R - y_B}{x_R - x_B} \quad (21)$$

식 (21)의 양변은 두 점 (x_B, y_B) 와 (x_G, y_G) 를 잇는 선분의 기울기와 (x_G, y_G) 와 (x_R, y_R) 를 잇는 선분의 기울기와 같다. 그림 4로부터 알 수 있듯이, 식 (21)은 항상 영이 아니다. 따라서 A_0 는 완전 행계수를 갖고, A_0 의 우역행렬이 항상 존재한다.

4. 접합온도 변화의 효과

4.1 조도 편차

LED 방출광의 세기는 접합온도를 증가시킴에 따라 감소한다[2,15]. 접합온도 변화에 따른 각 LED의 조도 편차를 고려하면, 접합온도 T_j 에서의 조도 행

색온도와 조도 제어가능한 LED 조명 시스템

렬 \mathbf{E} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{E}_0 (T_j - T_{j0}) \quad (22)$$

여기서 $\boldsymbol{\alpha}$ 는

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \partial E_r / \partial T_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \partial E_g / \partial T_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \partial E_b / \partial T_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \partial E_w / \partial T_j \end{bmatrix}$$

이며, LED 데이터 시트에서 값을 찾을 수 있다[15]. 식 (22)의 두 번째 항은 각 LED의 조도 편차를 나타낸다. 접합온도 변화에 의한 이러한 편차를 보상한 시비율 행렬은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_0 + \mathbf{C}_1^{-1} (\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{E}_0) (T_j - T_{j0}) \quad (23)$$

접합온도 T_j 는 LED의 순방향 전압 강하에 비례하므로, T_j 는 다음과 같이 구해진다[2].

$$T_j = \frac{\partial T_j}{\partial V_F} (V_F - V_{F0}) + T_{j0} \quad (24)$$

따라서 조도 편차의 영향을 식 (23)과 (24)를 이용해 보상할 수 있다.

총 조도의 상대 편차를 추정하기 위해, 시스템 행렬 \mathbf{A}_0 가 \mathbf{E} 의 변화에 영향을 받지 않는다고 가정하면, 접합온도 T_j 에서 조도 행렬 \mathbf{B} 는 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 - \mathbf{A}_0 (\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{E}_0) (T_j - T_{j0}) \quad (25)$$

따라서 접합온도 변화에 의한 조도합의 상대 편차의 관계는 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\Delta E_m}{E_m} = - \left(E_r \frac{\partial E}{\partial T_j} + E_g \frac{\partial E}{\partial T_j} + E_b \frac{\partial E}{\partial T_j} + E_w \frac{\partial E}{\partial T_j} \right) \frac{T_j - T_{j0}}{E_m} \quad (26)$$

4.2 주 파장 편차

단색 LED와 같은 협대역 광원은 인간의 눈이 단색으로 받아들이기 때문에 주 파장으로 특징지어질

수 있다. 주파장은 광원의 색상에 가장 근접한 색도 좌표의 순수한 색상 돌레곡선 상의 파장으로 정의된다. LED 데이터 시트를 참고하면, 주파장은 접합온도가 증가함에 따라 함께 증가한다[15]. 임의의 LED 파장 변화 $\Delta \lambda_n$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \lambda_n = \frac{\partial \lambda_n}{\partial T_j} (T_j - T_{j0}) \quad (27)$$

여기서 주파장의 온도 계수 $\partial \lambda_n / \partial T_j$ 는 데이터 시트로부터 얻을 수 있다. 임의의 LED 색좌표 (x_n, y_n) 은[2],

$$x_n(\lambda_n) = \frac{\bar{x}(\lambda_n)}{\bar{x}(\lambda_n) + \bar{y}(\lambda_n) + \bar{z}(\lambda_n)} \quad (28)$$

$$y_n(\lambda_n) = \frac{\bar{y}(\lambda_n)}{\bar{x}(\lambda_n) + \bar{y}(\lambda_n) + \bar{z}(\lambda_n)}$$

로 정의되며, (x_n, y_n) 은 식 (28)과 CIE 1931 표준 측색계를 이용해 특정 주파장에서 값을 계산할 수 있다. 따라서 접합온도 변화에 대한 색좌표의 편차는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta x_n = x_n(\lambda_n + \Delta \lambda_n) - x_n(\lambda_n) \quad (29)$$

$$\Delta y_n = y_n(\lambda_n + \Delta \lambda_n) - y_n(\lambda_n)$$

접합온도가 T_{j0} 일 때의 시스템 행렬 \mathbf{A}_0 는 각 LED의 색좌표와 목표 색좌표로 구성되어 있으므로, \mathbf{A}_0 는 결국 접합온도 변화에 영향을 받는다. 이러한 영향을 고려하면 임의의 접합온도에서의 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\Delta x_R}{a_{11} y_R} & 1 + \frac{\Delta x_G}{a_{12} y_G} & 1 + \frac{\Delta x_B}{a_{13} y_B} & 1 + \frac{\Delta x_W}{a_{14} y_W} \\ a_{11} \frac{\Delta x_R}{a_{11} y_R} & a_{12} \frac{\Delta x_G}{a_{12} y_G} & a_{13} \frac{\Delta x_B}{a_{13} y_B} & a_{14} \frac{\Delta x_W}{a_{14} y_W} \\ 1 + \frac{\Delta y_R}{a_{21} y_R} & 1 + \frac{\Delta y_G}{a_{22} y_G} & 1 + \frac{\Delta y_B}{a_{23} y_B} & 1 + \frac{\Delta y_W}{a_{24} y_W} \\ a_{21} \frac{\Delta y_R}{a_{21} y_R} & a_{22} \frac{\Delta y_G}{a_{22} y_G} & a_{23} \frac{\Delta y_B}{a_{23} y_B} & a_{24} \frac{\Delta y_W}{a_{24} y_W} \\ 1 + \frac{\Delta y_R}{a_{21} y_R} & 1 + \frac{\Delta y_G}{a_{22} y_G} & 1 + \frac{\Delta y_B}{a_{23} y_B} & 1 + \frac{\Delta y_W}{a_{24} y_W} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 a_{ij} 는 i 번째 행과 j 번째 열의 원소이다. 색좌표의 변화가 매우 작다고 가정하면, \mathbf{A} 는 다음과

같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{A} \approx \mathbf{A}_0 + \Delta \mathbf{A}_\lambda \quad (30)$$

여기서

$$\Delta \mathbf{A}_\lambda = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_R}{y_R} - a_{11} \frac{\Delta y_R}{y_R} & \frac{\Delta x_G}{y_G} - a_{12} \frac{\Delta y_G}{y_G} & \frac{\Delta x_B}{y_B} - a_{13} \frac{\Delta y_B}{y_B} & \frac{\Delta x_W}{y_W} - a_{14} \frac{\Delta y_W}{y_W} \\ (1-a_{21}) \frac{\Delta y_R}{y_R} & (1-a_{22}) \frac{\Delta y_G}{y_G} & (1-a_{23}) \frac{\Delta y_B}{y_B} & (1-a_{24}) \frac{\Delta y_W}{y_W} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

따라서 시스템 행렬의 변화를 고려한 조도 행렬 \mathbf{E} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \Delta \mathbf{A}_\lambda^{-1} \cdot \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{E}_0 \quad (31)$$

앞 절에서와 같이, 접합온도 변화에 의한 주파장 편차를 보상한 시비율 행렬 \mathbf{D} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_0 - \mathbf{C}_1^{-1} (\Delta \mathbf{A}_\lambda^{-1} \cdot \mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{E}_0) \quad (32)$$

4.3 오차 추정

실험에 사용된 LED의 특성을 표 1에 나타냈다. 이 값을 이용해 편차를 추정할 수 있다. 식 (26)으로부터 추정된 접합온도 변화에 대한 총 조도의 상대 편차는 7.7[%]이다. 식 (29)로부터 추정된 주 파장 변화에 의한 색좌표의 상대 편차는 6.2[%]이다.

표 1. 오차 추정을 위한 LED의 특성
Table 1. Characteristics of the LEDs for the error estimation

색상	λ_n / TC	(x_n, y_n)	$\partial E_n / \partial T_j$	$\partial \lambda_n / \partial T_j$
적색	627[nm]	(0.7006, 0.2993)	0.63[%]	0.05[nm/°C]
녹색	530[nm]	(0.1547, 0.8083)	0.14[%]	0.04[nm/°C]
청색	470[nm]	(0.1241, 0.0578)	0.21[%]	0.04[nm/°C]
백색	6,500[°K]	(0.312779, 0.329183)	0.22[%]	-

이러한 조도와 주 파장 편차의 영향은 (23)과 식 (32)로 각각 보상할 수 있다. 이러한 절차는 각각 별도로 적용될 것이며, 각 보상의 결과는 5장에서 측정치와 추정치를 비교해 알아볼 것이다. 다음의 식을 사용해 두 가지 영향을 동시에 고려해 보상할 수 있

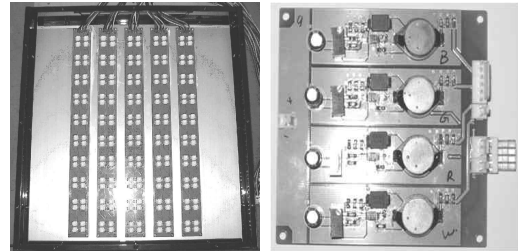
을 것이다.

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_0 + \mathbf{C}_1^{-1} (\alpha \mathbf{E}_0) (T_j - T_{j0}) - \mathbf{C}_1^{-1} (\Delta \mathbf{A}_\lambda^{-1} \mathbf{A}_0 \mathbf{E}_0) \quad (33)$$

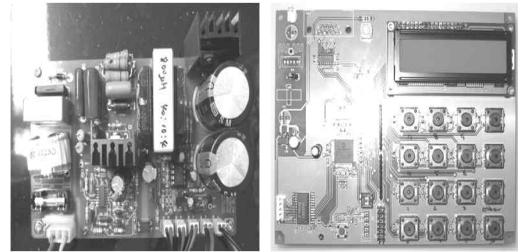
식 (33)을 이용한 보상의 결과도 5장 제시될 것이다.

5. 실험 결과

그림 6에 실제 실험을 위해서 제작된 RGBW LED 모듈, PFC 회로, LED 구동회로, LED 색온도 및 조도를 제어하는 디지털 제어회로의 사진을 나타냈다.



(a) RGBW LED 모듈 (b) LED 구동회로



(c) PFC 회로 (d) 디지털 제어회로

그림 6. 제작된 RGBW LED 조명 시스템의 사진
Fig. 6. Photographs of the prototype RGBW LED lighting system

RGBW LED 모듈은 필립스사의 Luxeon K2 LED 를 사용해 제작되었다. 각 LED 모듈은 10개의 적색 LED, 10개의 녹색 LED, 10개의 청색 LED, 10개의 백색 LED를 사용했다. 이들 각각의 구동 전류는 300[mA], 230[mA], 188[mA], 155[mA]였다. 이 LED 모듈의 접합 온도가 40[°C]일 때, 실험을 통해 식 (15) 계수 행렬의 각 요소들이 다음과 같이 얻어졌다.

색온도와 조도 제어가능한 LED 조명 시스템

$$C_1 = \begin{bmatrix} 600.1333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 874.1556 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 175.05450 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 960.8202 \end{bmatrix}$$

$$C_0^T = [5.326667 \ 2.377778 \ -1.44 \ 0.342222]$$

이 계수 행렬들은 식 (14)에 기초해, 임의의 시비율 입력 값에 해당하는 시비율을 가지는 펄스 파형을 출력하도록 프로그램된 디지털 제어회로를 가지고, 다양한 값의 LED 디밍 시비율을 선형적으로 가변하면서 각 점에서 LED의 조도를 측정했다. 측정된 결과를 선형 최소자승오차 법으로 회귀분석하고, 시비율 대 조도의 함수를 구해 이 계수들을 얻었다. 이 함수를 측정하기 위해 LED 모듈을 열풍기와 냉풍기에 의해서 내부 온도가 일정하게 유지되는 암실 (130×70×50[cm]) 내부에 설치하였으며, LED 모듈의 방열판에 열전쌍을 부착하였다(방열판의 온도를 접합 온도로 간주하였다). 그리고 코니카 미놀타 CL-200 색도계의 수광부를 LED 모듈에서 1[m] 지점에 설치하였다. 조도를 측정하는 동안 방열판의 온도는 40[°C]로 유지되었다.

디지털 제어회로는 Microchip사의 dsPIC33F 계열 다용도 16비트 디지털 시그널 컨트롤러(DSC) 중에서 256[kByte]의 프로그램 메모리, ADC 32 채널, 16비트 타이머 9개를 가지는 dsPIC33FJ256GP710을 사용해 구현되었다. 이 디지털 제어회로에 LED의 색온도와 조도를 조절하기 위해 제안된 알고리즘을 프로그래밍했다. 그림 6 (b)에 나타난 디지털 제어회로에 부착된 스위치를 이용해 원하는 색온도와 조도를 입력하고, LED 조명 시스템의 제어상태를 LCD를 통해 관찰할 수 있도록 회로를 구성하였다.

National Semiconductor사의 LED용 정전류 강압형 컨버터 제어 IC인 LM3402를 LED 구동회로 제작에 사용했다. 그림 7은 이 드라이버를 이용해 제작된 LED 구동회로의 측정된 효율이다. 이 결과로부터 LED 구동회로의 최대 효율이 90[%]인 것을 알 수 있다.

LED에서 방출되는 혼합된 빛의 상관 색온도(CCT)와 조도 측정에도 코니카 미놀타 CL-200 색도계를 사용했다. 그림 8은 접합 온도가 40[°C]일 때 조도를 일정하게 유지하면서 측정된 CCT 특성을 보

여준다. 그림 8에 나타난 설정된 조도에서의 CCT 가변된 따른 특성은 CCT를 3,500[°K]에서 7,500[°K]까지 바꾸면서 측정하였다. 이 범위에서 CCT 변화에 따른 설정된 조도의 상대 편차는 ±0.44[%] 이하였다.

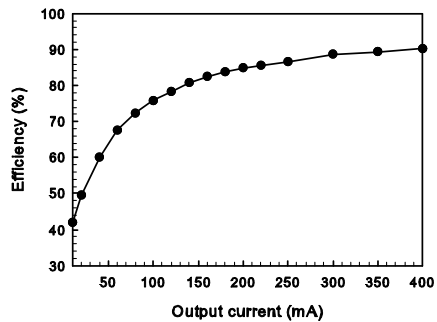


그림 7. 측정된 LED 구동회로의 효율
Fig. 7. Measured efficiency of the LED driver

그림 9는 접합 온도가 40[°C]로 유지된 상태에서, CCT를 고정하고 조도 변화에 따른 특성을 측정할 것을 보여준다. 이 조도 특성은 그림 9에 표시된 각 CCT 값에서, 조도를 500~1,500[lux] 범위에서 가변하면서 측정하였다. 이 범위에서 조도 특성의 상대 편차는 ±0.71[%] 이하였다.

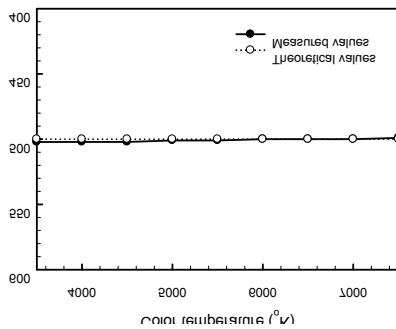
그림 8과 9는 어떠한 광학적인 피드백 없이 제안된 알고리즘이 LED 조명의 색온도와 조도를 1[%] 미만의 상대 오차 범위 내에서 제어하는 것을 보여준다.

보상된 LED 색온도 및 조도 제어 알고리즘을 이용 시에 LED 접합온도 변화에 따른 LED 모듈의 특성을 관찰하기 위해서, 목표 조도와 색온도를 각각 1,000[lux]와 6,500[°K]으로 설정하고 LED 모듈을 설치한 항온 암실 내부의 온도를 조절해 LED 접합온도를 30~70[°C] 범위로 변화시켰다. 접합온도 변화에 따라서 측정된 특성, 추정된 특성, 보상된 특성을 그림 10에서 12에 나타냈다. 그림 10은 시비율 보상을 위해 식 (23)을 사용했을 때의 특성을 보여준다. 그림 11은 식 (32)가 사용될 때, 그리고 그림 12는 식 (33)이 사용될 때의 특성이다.

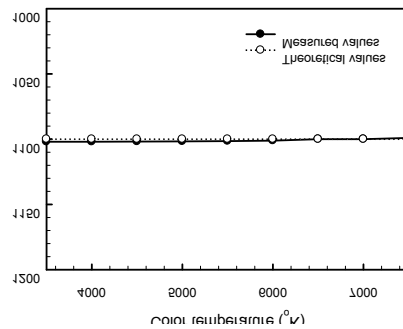
접합 온도 변화에 따른 각 보상 방법의 성능 비교

결과로 표 2에 나타났다. 이 표를 통해 접합온도 변화의 영향이 보상에 의해 개선되는 것을 볼 수 있다. 흥미롭게도 추정된 최대 편차보다 측정된 최대 편차가 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 본 논문에서 LED 접합온도 변화의 영향을 간단히 고찰하기 위해 각

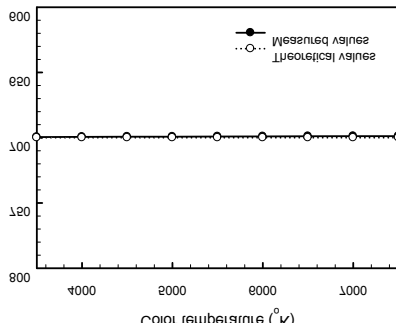
LED의 조도 편차가 전체 조도 편차에, 주파장 편차가 시스템 행렬 **A**에 영향을 주는 것으로 가정하였기 때문이다. 식 (23)으로 보상하는 경우를 제외하고 어떤 보상방법을 사용해도, 조도 편차는 1[%] 이하, 색 온도 편차는 0.49[%] 이하임을 관찰할 수 있다.



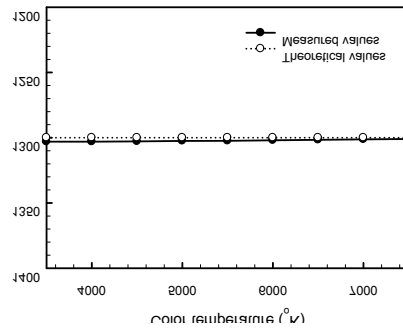
(a) 조도가 500(lux) 일 때



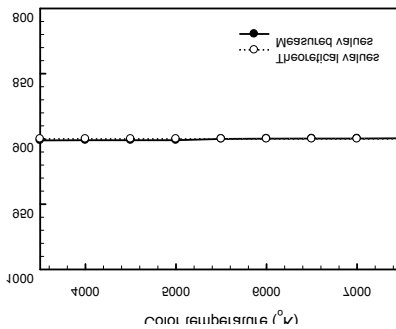
(d) 조도가 1100(lux) 일 때



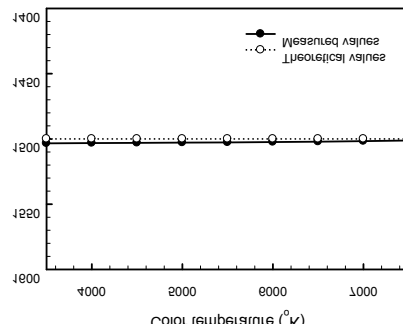
(b) 조도가 700(lux) 일 때



(e) 조도가 1300(lux) 일 때



(c) 조도가 900(lux) 일 때



(f) 조도가 1500(lux) 일 때

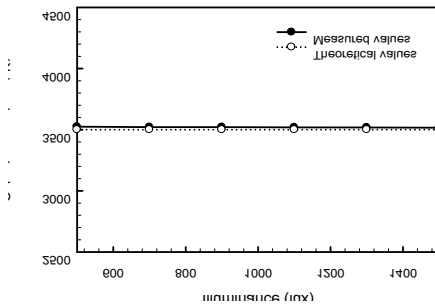
그림 8. 조도를 유지하면서 측정된 CCT 특성
Fig. 8. Measured CCT characteristics under steady illuminances

색온도와 조도 제어가능한 LED 조명 시스템

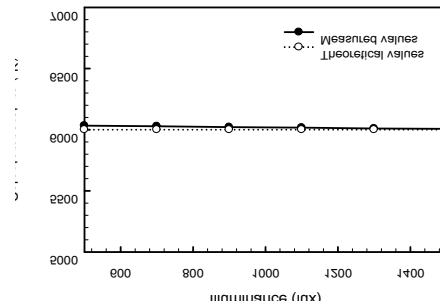
표 2. T_j 변화에 따른 최대 편차값

Table 2. The maximum deviation values according to T_j variation

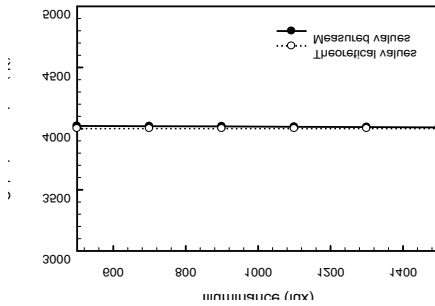
	조도	CCT
측정치	2.1[%]	3.6[%]
추정치	7.7[%]	6.2[%]
식 (23)으로 보상	1[%]	4.1[%]
식 (31)으로 보상	0.9[%]	0.49[%]
식 (32)으로 보상	1[%]	0.49[%]



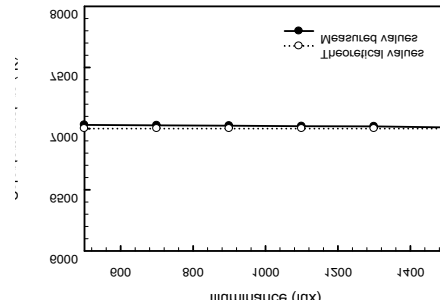
(a) CCT가 3,500[°K] 일 때



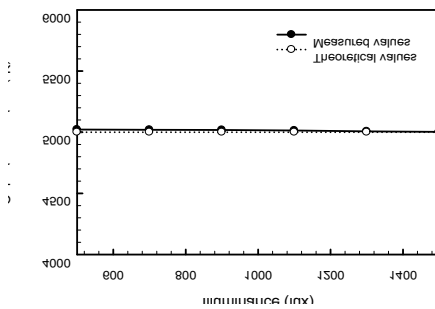
(d) CCT가 6000[°K] 일 때



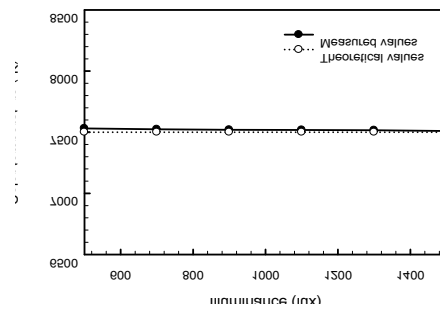
(b) CCT가 4,000[°K] 일 때



(e) CCT가 7000[°K] 일 때



(c) CCT가 5,000[°K] 일 때



(f) CCT가 7,500[°K] 일 때

그림 9. 일정한 CCT에서 측정된 조도 특성

Fig. 9. Measured illuminance characteristics under steady CCTs

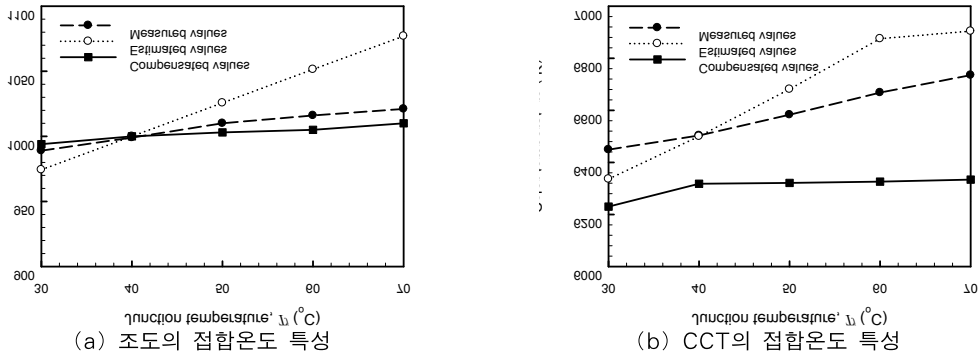


그림 10. 보상을 위해 식 (23)이 사용된 경우에 접합 온도 변화에 대한 특성 비교
 Fig. 10. Comparison of characteristics according to the junction temperature variation when (23) is used for compensation

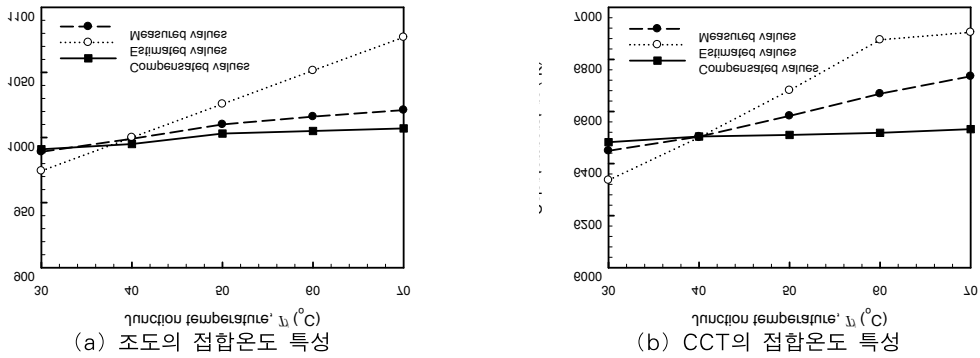


그림 11. 보상을 위해 식 (31)이 사용된 경우에 접합 온도에 변화에 대한 특성 비교
 Fig. 11. Comparison of characteristics according to the junction temperature variation when (31) is used for compensation

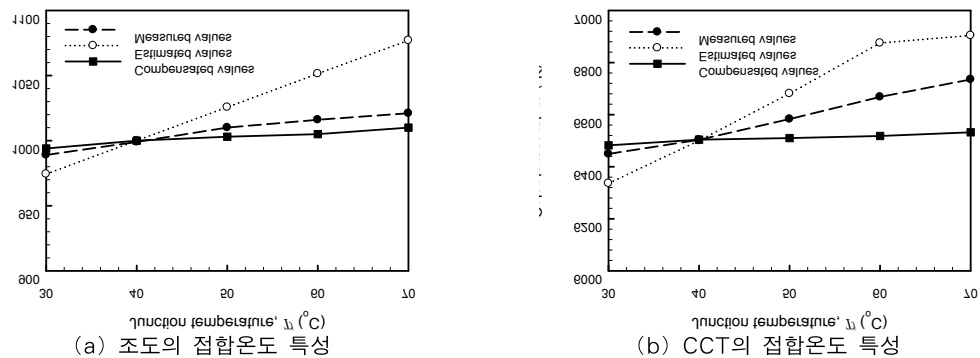


그림 12. 보상을 위해 식 (32)이 사용된 경우에 접합 온도 변화에 대한 특성 비교
 Fig. 12. Comparison of characteristics according to the junction temperature variation when (32) is used for compensation

6. 결 론

본 논문은 조도와 색온도를 독립적으로 제어할 수 있는 RGBW LED 조명용 색온도 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘이 실제 시스템에 사용될 수 있다는 것을 보여주기 위해 항상 해를 가진다는 것을 증명하였다. 실험용 RGBW LED 조명의 실험 결과는 제안된 알고리즘이 색온도와 조도를 각각 제어 할 수 있는 것과, 접합 온도가 40[°C]로 유지될 때 색온도와 조도의 상대 편차가 0.8[%] 이하인 것을 보여주었다. LED의 접합 온도가 30~70[°C] 범위에서는, 목표 조도와 색온도가 1,000[lux]와 6,500 [°K] 일 때 보상된 조도와 색온도의 편차가 각각 1[%] 이하와 0.49[%] 이하를 유지하였다. 제안된 LED 조명은 감성 조명 시스템을 구축하는데 적용될 수 있을 것이다.

References

- [1] S. Muthu, F. J. P. Schuurmans, and M. D. Pashley, "Red, green, and blue LED based white light generation: Issues and control", Proc. IEEE Industry Application Conf., Vol. 1, pp. 327-333, Oct. 13-18, 2002.
- [2] E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, Cambridge University Press, 2006.
- [3] X. Qu, S.-C. Wong, and C. K. Tse, "Color control system for RGB LED light sources using junction temperature measurement", Proc. IEEE Industrial Electronics Society, Nov. 5-8, 2007, pp. 1361-1368.
- [4] P. Narra, and D. S. Zinger, "An effective LED dimming approach", Proc. IEEE IAS2004, Vol. 3, pp. 1671-1676, Oct. 3-7, 2004.
- [5] X. Xu, and X. Wu, "High dimming ratio LED driver with fast transient boost converter", Proc. IEEE Power Electronics Specialists conf., pp. 4192-4195, Jun. 15-19, 2008.
- [6] L. Svilainis, "LED PWM dimming linearity investigation", Displays, Vol. 29, No. 3, pp. 243-249, Jul. 2008.
- [7] K. Lim, J.-C. Lee, G. Pantopoulos, and R. Helbing, "Illumination and color management in solid state lighting", Proc. IEEE Industry Applications Conf., pp. 2616-2620, Oct. 8-12, 2006.
- [8] P. Deurenberg, C. Hoelen, J. V. Meurs, and J. Ansems, "Achieving color point stability in RGB multi-chip LED modules using various color control loops", Proc. International Conference on Solid State Lighting, pp. 63-74, Aug. 1, 2005.

- [9] L. E. Gallagher, "Current regulator with AC and DC feedback", U.S. Patent 3,350,628, 1967.
- [10] R. Munzert, and P. T. Krein, "Issues in boundary control", Proc. Power Electronics Specialists Conf., Vol. 1, pp. 810-816, Jun 1996.
- [11] National Semiconductor, Co., "0.5A constant current buck regulator for driving high power LEDs", LM3402/LM3402HV datasheet, Dec. 2008.
- [12] Kim et al., "Color temperature conversion system and method using the same", U.S. Patent 7,024,034, 2006.
- [13] G. Strang, Linear Algebra and Its Applications, MIT Press, 2006.
- [14] E. Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, John Wiley & Sons, 1999.
- [15] Philips Lumileds Lighting, "Power light source Luxeon K2", Luxeon K2 technical datasheet DS51, Jun. 2008.
- [16] G. Wyszecki, and W. S. Stiles, Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1982.

◇ 저자소개 ◇

김 훈 (金 熏)

1976년 3월 14일생. 2003년 청주대학교 정보통신공학부 졸업. 2005년 청주대학교 전자공학과 졸업(석사). 2009년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 졸업(박사).

염재경 (廉在京)

1980년 1월 25일생. 2009년 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업. 2009년~현재 한양대학교 대학원 전기전자 제어계측 공학과 석사과정 재학중.

정원섭 (鄭元燮)

1955년 11월 3일생. 1977년 한양대학교 전자통신공학과 졸업. 1979년 한양대학교 전자통신공학과 졸업(석사). 1987년 일본 정강대학교 전자과학연구과 졸업(박사). 1986년~현재 청주대학교 전자정보공학부 교수.

김희준 (金熙峻)

1954년 11월 16일생. 1976년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1978년 한양대학교 전자공학과 졸업(석사). 1986년 일본 큐슈대학교 전자공학과 졸업(박사). 1991~1992년 Virginia공대 방문교수. 1987년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수.