

LED 조명의 광원별 최소 분광분포를 사용하여 자연광 색온도를 재현하는 방법[☆]

A Method of Reproducing the CCT of Natural Light using the Minimum Spectral Power Distribution for each Light Source of LED Lighting

김 양 수¹ 오 승 태² 임 재 현^{3*}
Yang-Soo Kim Seung-Taek Oh Jae-Hyun Lim

요 약

인간은 자연 빛에 적응하고 진화해왔으나 현재는 실내 생활의 비중이 높아짐에 따라 생체리듬 교란의 문제가 유발되었다. 이의 해결을 위해 일출~일몰간 다채롭게 변화하는 자연광의 색온도를 재현하는 조명이 연구되고 있다. 자연광 색온도의 재현을 위해서는 색온도가 다른 다수의 LED 광원을 사용하여 조명을 제작한 후 수백에서 수천 단계의 광원별 인가전류의 조합에 대한 광특성을 측정 및 수집하여 제어지표 DB를 구성하고 광특성 매칭 방법을 통해 조명을 제어하였다. 이러한 제어 방법은 인가전류의 조합 단계를 세밀하게 할수록 많은 시간 및 경제적 비용이 발생한다는 문제가 있다. 이에 본 논문에서는 LED 광원별 최소 분광분포로 보간 및 조합 연산을 수행하여 자연광 색온도를 재현하는 방법을 제안한다. 먼저 색온도가 다른 광원 채널로 구성되고 각 채널별 256단계의 인가 전류 제어 기능을 구현한 LED 조명을 대상으로 채널별 5개의 최소 분광분포(Spectral Power Distribution, SPD)를 실측·수집한다. 이후 수집한 SPD를 대상으로 각 채널별 256단계의 SPD를 생성하는 보간 연산을 수행하고, 채널별 SPD의 조합 연산을 통해 LED 조명의 모든 제어 조합에 대한 SPD를 생성한다. 생성된 SPD를 통해 조도와 색온도를 산출하여 제어지표 DB를 구축한 후 매칭 기법을 통해 자연광의 색온도를 재현한다. 성능 평가에서는 실내 권장 조도 기준을 충족하면서도 평균 오차를 0.18%의 범위 내에서 자연광의 시간별 색온도를 제공하였다.

☞ 주제어 : 분광분포, 자연광 재현, LED 색온도 제어

ABSTRACT

Humans have adapted and evolved to natural light. However, as humans stay in indoor longer in modern times, the problem of biorhythm disturbance has been induced. To solve this problem, research is being conducted on lighting that reproduces the correlated color temperature(CCT) of natural light that varies from sunrise to sunset. In order to reproduce the CCT of natural light, multiple LED light sources with different CCTs are used to produce lighting, and then a control index DB is constructed by measuring and collecting the light characteristics of the combination of input currents for each light source in hundreds to thousands of steps, and then using it to control the lighting through the light characteristic matching method. The problem with this control method is that the more detailed the steps of the combination of input currents, the more time and economic costs are incurred. In this paper, an LED lighting control method that applies interpolation and combination calculation based on the minimum spectral power distribution information for each light source is proposed to reproduce the CCT of natural light. First, five minimum SPD information for each channel was measured and collected for the LED lighting, which consisted of light source channels with different CCTs and implemented input current control function of a 256-steps for each channel. Interpolation calculation was performed to generate SPD of 256 steps for each channel for the minimum SPD information, and SPD for all control combinations of LED lighting was generated through combination calculation of SPD for each channel. Illuminance and CCT were calculated through the generated SPD, a control index DB was constructed, and the CCT of natural light was reproduced through a matching technique. In the performance evaluation, the CCT for natural light was provided within the range of an average error rate of 0.18% while meeting the recommended indoor illumination standard.

☞ keyword : Spectral Power Distribution(SPD), Natural Light Reproduction, LED CCT Control

1,3 Dept. of Computer Science & Engineering, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea.

2 Smart Natural Space Research Center, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea.

* Corresponding author (defacto@kongju.ac.kr)

[Received 31 January 2023, Reviewed 3 February 2023(R2 13 March 2023), Accepted 15 March 2023]

☆ 이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2019R1A6A1A03032988)
이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2020R111A3073320)

☆ 본 논문은 2022년도 한국인터넷정보학회 추계학술대회 우수 논문 추천에 따라 확장 및 수정된 논문임.

1. 서 론

일출부터 일몰까지 시시각각 변화하는 자연 빛은 인간의 생체리듬 유지에 밀접한 관련이 있으며 인체 건강에 도움을 준다[1, 2]. 그러나 현대인들은 불규칙한 생활 패턴 및 장시간의 실내 업무로 인해 자연광 환경의 활동이 줄어들게 되면서 생체리듬 장애의 위험에 노출되어 있다 [3]. 이에 자연광 특성을 제공하는 조명 기술이 다수 시도 되었으며 최근에는 2,700K에서 8,200K까지 다채롭게 변화하는 자연광의 시간별 색온도를 재현하기 위한 조명 연구가 수행되고 있다[4, 5]. 관련 연구에서는 색온도가 다른 다수의 광원을 적용한 LED 조명을 대상으로 광원 간의 인가전류 조합에 따른 제어지표 DB를 미리 구축한 후 필요한 광특성을 탐색 및 매칭하는 방법으로 조명을 제어하였다[6]. 이때 제어지표 DB는 LED 광원별 인가전류의 세기를 단계적으로 제어해가며 계측 장비를 통해 광특성을 실측 및 수집하여 구축하였다[7]. 이때 인가전류의 제어 폭을 넓게 설정하면 수집할 데이터의 수량이 적어 제어지표의 구축은 수월하나 제어 가능한 조도와 색온도의 범위와 개수가 한정적이어서 다채롭게 변화하는 자연광의 특성을 재현하기에 한계가 있다[8]. 반면 인가전류의 제어 폭을 좁게 설정하면 수집할 데이터의 수량이 기하급수적으로 증가하여 자연광 특성의 재현을 위한 조도와 색온도의 제어 조합을 도출할 수 있지만 제어 지표의 구축에 많은 시간 및 경제적 비용이 소요된다. 또한 최근에는 자연광의 재현을 위해 Warm White, Cool White 두 채널의 단순한 조합을 넘어 다수의 광원으로 구성된 조명 기술들이 제시되고 있다. 그러나 예전과 같은 방법의 제어지표 구축은 실측 시간이 기하급수적으로 증가하는 문제가 있다.

빛은 전자기파로써 분광을 통해 단위 면적당 특정 파장 범위의 복사에너지($W/m^2/nm$)로 나타낼 수 있다[9]. 또한 조도, 색온도, 삼자극치 등 대부분의 광특성은 분광 분포를 이용한 연산을 통해 도출할 수 있다[10, 11]. 따라서 분광 기반의 연산을 통해서도 특정 조도와 색온도의 도출이 가능하다. 그러나 분광은 조도와 색온도에 비해 상대적으로 계측과 해석이 어려워 이를 이용한 조명 제어에 대한 연구는 매우 부족하다.

본 논문에서는 LED 조명의 광원별 최소 분광분포를 사용하여 자연광의 색온도를 재현하는 방법을 제안한다. 먼저 Warm White과 Cool White의 색온도를 갖는 두 개의 LED 광원 채널로 LED 조명을 구성한다. 이후 분광복사 계를 통해 각 채널별 5단계의 최소 분광분포를 실측·수집

한다. 이후 최소 분광분포를 대상으로 보간 연산을 적용하여 채널별 모든 제어단계의 분광분포를 생성한 후 조합 연산을 통해 LED 조명의 모든 제어조합에 대한 분광 분포를 생성한다. 이후 생성한 분광분포로부터 조도와 색온도를 산출하여 제어지표 DB를 구축하고 자연광 색온도 매칭을 실현한다. 이를 통해 분광분포의 조합 연산을 통해 혼합빛의 광특성을 시뮬레이션하는 조명 제어 기술의 응용 방법을 제시한다. 또한 다채널 LED 조명의 광원별 최소 분광 정보를 이용한 자연광 색온도의 제공 방법을 제안하여 자연광 조명의 개발에 기여하고자 한다.

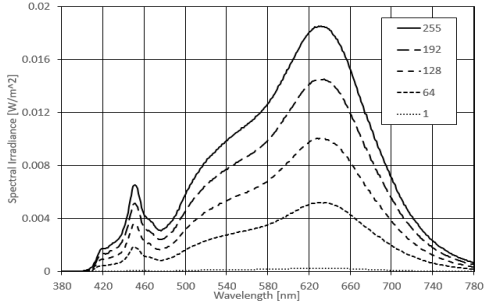
2. 최소 분광분포 기반 조명 제어 기법

최소 분광분포는 다수의 광원으로 구성된 다채널 조합의 LED 조명에서 채널별 인가전류의 세기에 따른 분광분포(Spectral Power Distribution, SPD)이다. 본 연구를 위해 Warm White LED 광원과 Cool White LED 광원으로 구성된 2채널 LED 조명 3종(조명 A, B, C)을 제작하였다. 조명 A는 2,700K과 6,800K, 조명 B는 2,600K과 7,200K, 조명 C는 3,100K과 8,600K의 LED 광원으로 구성하였다. Warm White LED 광원(2,700K, 2,600K, 3,100K)은 각 조명의 1채널에 해당하고 Cool White LED 광원(6,800K, 7,200K, 8,600K)은 각 조명의 2채널에 해당한다. 채널별 제어단계는 인가전류에 따라 256(0~255)단계로 제어될 수 있도록 구현하였다. 이때 0은 off 상태를 의미하며 두 채널의 조합을 통해 점등되는 모든 조합광의 수는 총 $65,536(=256^2)$ 개가 되도록 설정하였다. 이후 제작한 조명을 대상으로 LED 채널별 인가전류에 따른 SPD를 계측하여 최소 분광분포를 수집한 후 Grassmann의 색상 혼합 법칙에 의거하여 모든 제어 조합에 대한 SPD를 생성한다 [12]. 생성된 SPD로부터 광특성 산출을 위한 연산을 통해 자연광 색온도 재현을 위한 제어지표 DB를 구축하였다.

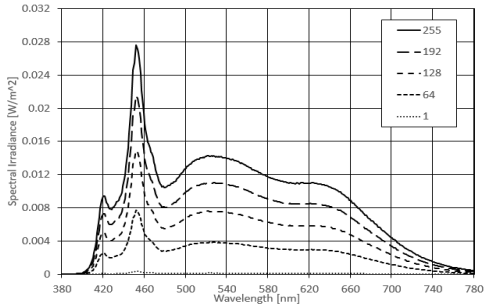
2.1 LED 채널별 분광분포의 실측 분석

다채널 LED 조명을 통해 조도와 색온도를 제어하기 위해서는 각 LED 채널별 광특성 정보가 필요하였다. 이를 파악하기 위해 각 채널별 최소 제어단계를 1, 64, 128, 192, 255의 5단계로 설정하고 LED 채널에 대해 다섯 단계의 제어에 따른 SPD를 실측·수집하였다. SPD의 실측은 외부 미광의 유입이 제한된 암실(라이팅박스)에서 진행하였다. LED 조명과 분광계측기(CAS-140CT) 수광부 간의 거리는 조명의 안전성(IEC 62471) 평가 시 General

Lighting의 측정기준을 참고하여 1,500mm로 설정하였고 조명을 점등한 후 약 10초의 안정화 시간을 두고 측정하였다. 아래 그림 1은 실측을 통해 수집한 조명 A의 채널별 최소 분광분포를 나타낸 것이다.



(a) Channel 1 : 2,700K LED



(b) Channel 2 : 6,800K LED

(그림 1) LED 채널별 최소 분광분포 : 조명 A
(Figure 1) Minimum SPD by LED channels : A

그림 1의 (a)는 2,700K의 Warm White LED 광원에 대한 최소 분광분포를 실측한 결과이다. 피크파장은 630 nm였고 상대적으로 약 580~680nm 대역의 Irradiance가 높았다. 또한 인가전류를 1에서 255까지 점진적으로 증가시킬 경우 SPD 또한 유사한 분포를 유지해가며 인가전류의 세기에 비례하는 형태로 증가하였다. (b)는 6,800K의 Cool White LED 광원에 대한 실측 결과로 피크파장은 452nm 였으며 450~470nm 대역의 Irradiance가 높게 형성되었다. SPD는 (a)와 같이 인가전류의 세기에 따라 함께 증감하는 양상을 보였다. 또한 조명 B, C에 대한 실측 결과에서는 피크파장과 그에 따른 SPD의 모양만 상이하였고 인가전류의 세기에 따라 SPD도 비례하는 형태로 증감을 확인하였다. 따라서 각 최소 분광분포 사이의 SPD와 해당 SPD의 생성을 위한 인가전류의 세기를 연산을 통해 생성할 수 있음을 확인하였다.

2.2 분광분포 기반 보간 및 조합 연산

다채널 LED 조명의 제어를 위해서는 각 인가전류 별 조도와 색온도의 특성이 필요하다. 이때 조도와 색온도는 SPD 기반의 연산을 통해 산출하므로 자연광 재현과 같이 정교한 색온도의 제어를 위해서는 보다 세밀한 인가전류 별 SPD가 필요하였다. 이를 위해 실측을 통해 수집한 최소 분광분포에 선형보간법을 적용하여 제어단계 2~63, 65~127, 129~191, 193~254(실측하지 않은 제어단계)에 대한 SPD를 산출함으로써 모든 제어단계에서의 SPD를 확보하였다. 식 1은 선형보간에 기반한 최소 분광분포 사이 구간에 대한 SPD 생성 수식이다.

$$S(\lambda, i) = S(\lambda, i_1) + (S(\lambda, i_2) - S(\lambda, i_1)) * \frac{i - i_1}{i_2 - i_1} \quad (\text{수식 1})$$

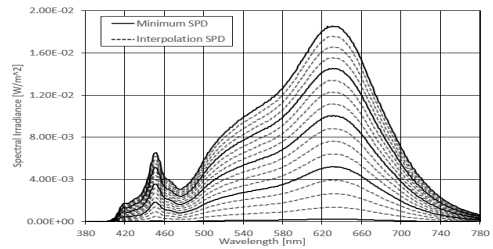
($i_1 < i < i_2, 380 \leq \lambda \leq 780$)

λ : Wavelength (nm)

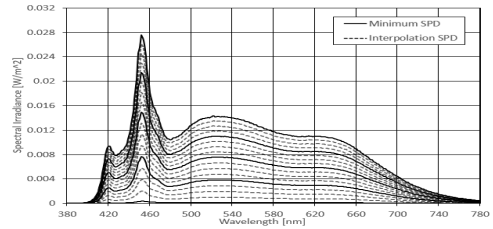
i : Interpolation Index

i_1, i_2 : Reference Index

식 1의 $S(\lambda, i)$ 는 제어단계 i 의 SPD λ nm 파장 복사에너지를 의미한다. $S(\lambda, i_1)$ 와 $S(\lambda, i_2)$ 사이의 $S(\lambda, i)$ 를 추정하기 위한 보간 수식이다. 이때 (i_1, i_2)는 수집한 최소 분광분포에 대한 인가전류 값 i 에 따라 (1, 64), (64, 128), (128, 192), (192, 255)을 대입하였다. 그림 2는 조명 A의 채널별 실측한 최소 분광분포와 보간 수식을 통해 생성한 SPD를 나타낸 것이다.



(a) Channel 1 : 2,700K LED



(b) Channel 2 : 6,800K LED

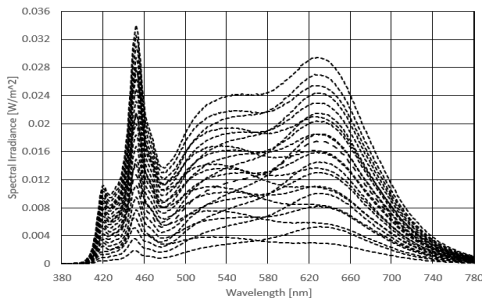
(그림 2) LED 채널별 보간 분광분포 : 조명 A
(Figure 2) Interpolated SPD by LED channels : A

그림 2에서의 실선과 점선은 각각 최소 분광분포와 식 1을 통해 산출한 SPD를 나타낸다. 그림 2의 (a)와 (b)에는 산출된 SPD의 일부를 나타낸 것이며 실제로는 각 LED 채널별 모든 제어단계(256개)에 대한 SPD를 산출하여 생성하였다. 이후 LED 채널별 256단계의 SPD를 대상으로 조합 연산을 수행함으로써 채널별 모든 제어조합에 따른 SPD를 생성하였다. 빛의 조합은 피사체에 조사되는 빛의 양이 가산되어 형성된다. 따라서 채널별 모든 제어조합에 대한 SPD는 식 2를 적용하여 산출하였다.

$$S(\lambda, i_{(1,2)}) = S(\lambda, i_1) + S(\lambda, i_2) \quad (\text{수식 2})$$

λ : Wavelength (nm), ($380 \leq \lambda \leq 780$)
 $i_{(1,2)}$: Combination Index
 i_1, i_2 : Reference Index

식 2에서 $S(\lambda, i)$ 는 제어단계 i 의 SPD λ nm 파장 복사 에너지를 의미하며 제어단계 i_1 과 i_2 의 SPD를 조합하여 $i_{(1,2)}$ 의 SPD를 산출하였다. Grassmann의 색상 혼합 법칙에 의거하여 빛의 조합은 복사에너지의 합산으로 계산되므로[12], $S(\lambda, i_{(1,2)})$ 는 $S(\lambda, i_1)$ 와 $S(\lambda, i_2)$ 의 합이다. 그림 3은 조명 A의 채널별 SPD에 식 2를 적용한 결과의 일부 예를 표시한 것이며 실제로는 모든 LED 채널별 제어 조합(65,536개)에 대한 SPD를 산출하였다.



(그림 3) 모든 제어조합에 대한 SPD : 조명 A
 (Figure 3) SPD for All Controlling Combination : A

그림 3을 통해 각 채널의 조합 비율에 따라 2,700K LED의 SPD와 6,800K LED의 SPD가 가산되어 다양한 형태의 SPD가 생성됨을 확인하였다. 이를 토대로 조도 및 색온도를 정확하게 산출할 수 있다.

2.3 조명의 제어지표 구축 및 제어

특정 조도와 색온도를 제공하기 위해서는 다채널 LED 조명의 제어지표가 필요하다. 본 연구에서는 제어지표의 구축을 위해 최소 분광분포를 대상으로 보간 및 조합 연

산을 통해 산출한 65,536개의 SPD로부터 광특성(조도, 색온도)을 산출하였다. 식 3은 조도와 색온도 등의 광특성을 계산하기 위해 필요한 삼자극치 XYZ의 산출식이다.

$$X = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (\text{수식 3})$$

$$Y = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

식 3과 같이 삼자극치 XYZ는 380~780nm 대역의 파장 구간에서 산출한다. $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 은 CIE1931에서 정의한 인간의 시각에 대응하는 세 가지 등색함수(Color Matching Function)이고 K_m 은 최대 분광 시감효능(683ml/W)을 의미한다. 또한 식 4는 삼자극치를 기반으로 색도좌표 x, y 를 계산하는 수식이며 식 5는 조명의 제어 시 필요한 조도와 상관색온도(CCT)의 산출식이다.

$$x = X / (X + Y + Z) \quad (\text{수식 4})$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$Illuminance [lux] = Y \quad (\text{수식 5})$$

$$CCT [K] = -437n^3 + 3607n^2 - 6861n + 5514.31$$

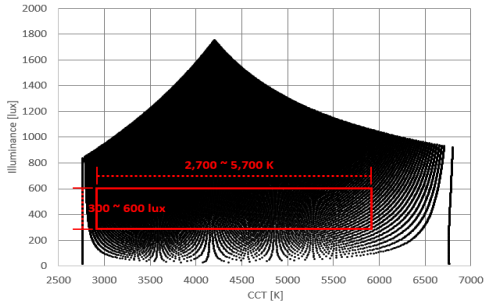
$$n = \frac{x - 0.332}{y - 0.1858}$$

식 4를 통해 삼자극치 XYZ를 이용하여 색도좌표 x, y 를 구한 후 식 5와 같이 삼자극치 Y를 이용하여 조도(Illuminance)를 McCamy의 계산식을 적용하여 상관색온도(CCT)를 산출하였다. 이러한 과정을 통해 LED 조명의 모든 제어조합인 65,536개의 SPD에 대한 조도, 색온도를 산출하여 제어지표 DB를 구축하였다. 표 1은 조명 A에 대한 제어지표의 산출 결과를 간략하게 나타낸 것이다.

(표 1) 제어지표 DB : 조명 A
 (Table 1) Control Index DB : A

Index	제어단계		산출 광특성	
	1채널	2채널	조도(lux)	색온도(K)
0	0	0	0	0
1	1	0	6.44	2764.8
2	2	0	11.63	2764.7
3	3	0	15.21	2764.8
4	4	0	18.79	2764.9
...				
32867	100	128	845.24	4417.0
32868	101	128	848.60	4407.4
32869	102	128	852.05	4397.9
32870	103	128	855.60	4388.5
...				
65532	252	255	1743.09	4215.4
65533	253	255	1745.96	4212.0
65534	254	255	1748.84	4208.7
65535	255	255	1751.72	4205.3

표 1의 상단부(Index 0~4)의 제어지표에서는 1채널 제어단계는 1씩 증가, 2채널 제어단계는 0으로 고정되고 조도는 증가, 색온도는 유지됨을 알 수 있다. 또한 표의 중간(Index 32,867~32,870)과 하단부(Index 65,532~65,535)를 보면 1채널 제어단계는 1씩 증가, 2채널 제어단계는 128, 255로 고정되는 경우 조도는 증가하며 색온도는 미세하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 조도는 인가전류가 높아짐에 따라 증가하며 색온도는 채널 간 조합 비율에 따라 변화함을 확인하였다. 그림 4는 색온도를 x축, 조도를 y축으로 구성한 좌표에 표 1의 제어지표를 통해 생성 가능한 모든 조도와 색온도를 시각화한 것이다.



(그림 4) 조도 및 색온도의 분포형태 : 조명 A
(Figure 4) Distribution of Illuminance and CCT : A

그림 4와 같이 조명 A는 약 200~850lux의 조도 구간에서 약 2,700~6,800K의 색온도의 제어가 가능함을 알 수 있었다. 추가적으로 제작한 조명 B는 약 200~650lux의 조도 구간에서 약 2,700~7,000K의 색온도를, 조명 C는 약 200~700lux의 조도 구간에서 약 3,200~8,000K의 색온도를 제어할 수 있음을 확인하였다. 자연광의 색온도를 재현하기 위해서는 실내 권장 조도(KS A 3011)인 300~600lux를 준수하면서도 맑은 날을 기준으로 3,000~5,700K의 색온도를 제공해야 한다. 따라서 그림 4의 붉은색 사각형 범위 안에 해당하는 자연광 색온도의 제공이 가능하였다. 표 1에서 적정 조도 범위에서 자연광의 시간별 색온도를 제공할 수 있는 제어지표 DB를 탐색 및 매칭하여 이를 다채널 LED 조명의 제어에 적용하였다.

3. 실험 및 평가

제안 방법을 통해 자연광의 색온도를 얼마나 정확하게 재현할 수 있는지 확인하기 위한 성능 평가 실험을 수행하였다. 먼저 각 조명의 최소 분광분포를 수집한 후 보간

및 조합 연산을 적용하고 광특성을 산출하여 제어지표 DB를 구축하였다. 성능 평가는 제어지표의 신뢰도를 확인하기 위한 실험과 실측 자연광 색온도의 재현 결과를 확인하기 위한 실험을 구분하여 수행하였다.

3.1 제어지표의 신뢰도 평가

2장에서 최소 분광분포를 이용하여 구축한 제어지표 DB에서 무작위로 추출한 100개의 채널별 제어단계를 각 조명에 실제 적용하여 점등한 후 조도 및 색온도를 실측하였다. 제어지표의 예상 조도 및 색온도와 해당 제어지표의 실제 적용 시 조명의 광특성을 실측 비교하여 계산한 평균 오차 및 오차율은 표 2와 같다.

(표 2) 조도 및 색온도의 평균 오차 및 오차율
(Table 2) Error in Illuminance and CCT

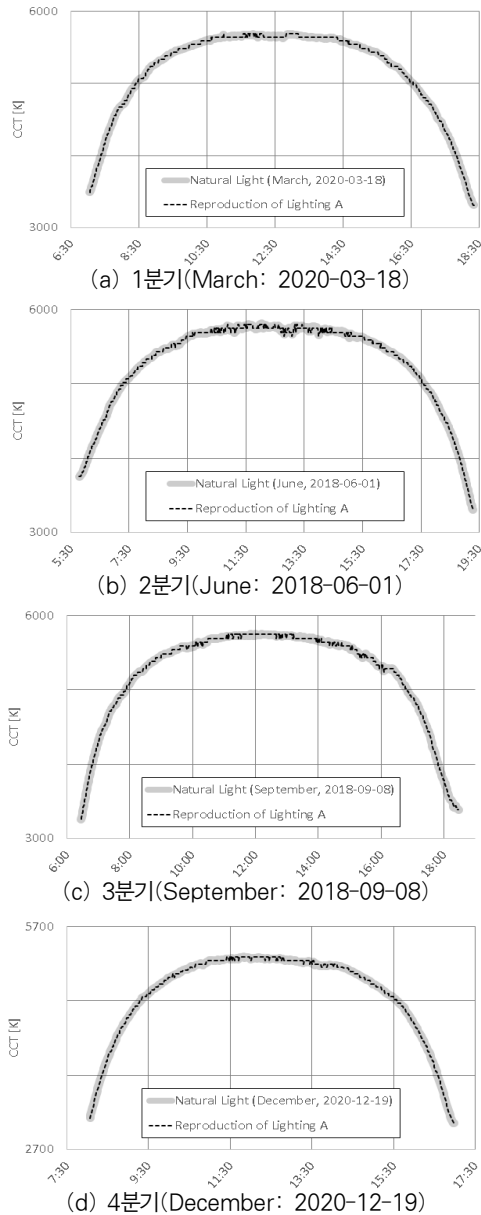
구분		평균 오차 (Abs)	평균 오차율 (%)
조명 A	조도(lux)	4.09	0.55
	색온도(K)	11.35	0.24
조명 B	조도(lux)	3.33	0.74
	색온도(K)	14.15	0.30
조명 C	조도(lux)	3.43	0.73
	색온도(K)	16.55	0.30

표 2의 오차율은 실측데이터 대비 오차의 비율을 백분율로 표현한 것이다. 조명별 평균 오차율은 조도의 경우 각각 0.55, 0.74, 0.73%이고 색온도의 경우 각각 0.24, 0.30, 0.30%의 수치를 보였다. 이를 통해 최소 분광분포를 이용하여 모든 채널별 제어 조합에 대한 제어지표를 산출할 수 있으며 다채널 LED 조명을 통해 평균 오차율 1% 이내에서 정확한 색온도의 제공이 가능하였다.

3.2 자연광 색온도 재현 평가

제안 방법을 통해 실제 자연광의 일별 시간별 색온도를 정확하게 재현할 수 있는지를 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 먼저 실측을 통해 수집한 분기별 맑은 날 자연광의 시간별 색온도를 추출하였다. 1분기(3월)는 2020-03-18 07:03~18:20, 2분기(6월)는 2018-06-01 05:47~19:16, 3분기(9월)는 2018-09-08 06:27~18:27, 4분기(12월)는 2020-12-19 08:04~16:58 시간대에 분당 1회씩 실측한 데이터이다. 실험 대상 조명 3종에 대한 제어지표 DB로부터 자연광의 시간별 색온도와 대응하는 채널별 제어단계를 탐색한 후 실제 조명에 적용하고 그 결과를

실측하여 비교하였다. 이때 조도는 실내 권장 조도 기준 (KS A 3011, 300~600lux)을 준수하도록 400lux로 설정하였다. 그림 5는 자연광의 실제 색온도(회색 실선)와 조명 A을 통해 재현한 색온도(검은색 점선)를 시각화한 그래프이며 분기별로 나누어 나타낸 것이다.



(그림 5) 자연광 색온도와 재현된 색온도 : 조명 A
(Figure 5) Natural Light CCT and Reproduced CCT : A

3월은 3,300~5,700K, 6월은 3,700~5,800K, 9월은 3,200~5,800K, 12월은 3,000~5,300K의 범위에서 세밀하게 변화하는 자연광의 일별 색온도 주기와 조명 A의 재현 결과 색온도는 거의 일치함을 확인하였다. 표 3은 각 조명별 자연광 색온도 재현 실험의 평균 오차 및 오차율을 확인할 수 있도록 정리한 것이다.

(표 3) 분기별 자연광 재현 오차 및 오차율
(Table 3) Error during reproduction of Natural Light for each Quarter

구분		평균 오차 (Abs)		평균 오차율	
		조도 (lux)	색온도 (K)	조도 (%)	색온도 (%)
조명A	3월	0.59	11.75	0.15%	0.22%
	6월	0.63	12.62	0.16%	0.24%
	9월	0.61	11.70	0.15%	0.22%
	12월	1.19	10.67	0.30%	0.22%
	Avg	0.75	11.69	0.19%	0.23%
조명B	3월	0.58	8.05	0.15%	0.15%
	6월	0.81	7.43	0.20%	0.14%
	9월	0.78	7.30	0.19%	0.14%
	12월	0.66	7.21	0.17%	0.15%
	Avg	0.71	7.50	0.18%	0.15%
조명C	3월	0.73	8.13	0.18%	0.15%
	6월	0.54	8.15	0.14%	0.15%
	9월	0.62	8.06	0.15%	0.15%
	12월	0.52	8.01	0.13%	0.17%
	Avg	0.60	8.09	0.15%	0.16%
Total Avg		0.69	9.09	0.17%	0.18%

조명 A의 경우 조도는 $400 \pm 0.75 \text{lux}$ 를 유지하면서 11.69K(0.23%)의 평균 오차 범위 내에서 자연광의 색온도를 재현하였다. 또한 조명 B, C도 기준 조도를 유지하면서 각각 7.5K(0.15%), 8.1K(0.16%)의 평균 오차 범위 내에서 자연광의 색온도를 재현하였다. 이를 통해 최소 분광분포에 기반하여 제어지표를 추출하여 적용할 경우 평균 0.18%의 오차 범위 내에서 자연광의 색온도를 제공할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

자연광의 광특성을 적용한 조명의 필요성이 강조되면서 색온도 및 조도의 제어가 용이한 LED 광원을 활용한 자연광 재현 조명 기술이 발전하고 있다. 기존의 자연광 재현 LED 조명의 경우 자연광의 다채로운 빛의 변화를 나타내기 위해 장시간 실험을 통해 제어지표 DB를 구축했다. 자연광 재현 조명에서 요구하는 세밀한 색온도의

변화를 제공하기 위한 제어지표를 구축하려면 인가전류의 폭을 짧게 설정하여 세밀한 광원간 조합을 실측해야 하는데 이는 많은 시간 및 경제적 비용이 소요되어 한계가 있었다. 또한 장시간 실험으로 인해 조명 및 계측기의 오류가 발생할 수 있어서 데이터의 신뢰성에도 문제가 될 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 LED 조명의 광원별 최소 분광분포를 사용하여 자연광 색온도를 재현하는 방법을 제안하였다. Warm White, Cool White의 색온도를 갖는 두 개의 LED 광원으로 구성된 조명 3종을 제작하였고 제안한 방법을 조명별로 각각 적용하였다. 성능 평가를 위해 분기별 맑은 날 자연광의 색온도를 재현하기 위한 실험을 진행한 결과 평균 0.18%의 오차 범위 내에서 재현함을 확인하였다.

향후에는 자연광의 일주기 특성과 다채널 LED 조명의 광특성 간의 상관관계를 분석함으로써 자연광 재현 조명에 최적화된 알고리즘 기반의 조명 제어연구를 수행할 계획이다.

참고문헌(Reference)

- [1] G. Kim, "Healthy Light in the Era of Well-being" Architectural Institute of Korea, Vol. 49, No. 5, pp. 51-55, 2005.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00595270>
- [2] Takeshi Morita, Hiromi Tokura, "The Influence of Different Wavelengths of Light of Human Biological Rhythms", Applied Human Science, Vol. 17, No. 3, pp. 91-96, 1998.
<http://doi.org/10.2114/jpa.17.91>
- [3] S. J. Han, E. Y. Joo, "Circadian Rhythm Sleep Disorders", J Kor Sleep Soc, Vol. 5, No. 5, 2008.
<https://kmbase.medric.or.kr/KMID/1002120080050020074>
- [4] K. M. Kim, Y. W. Kim, S. T. Oh, J. H. Lim, "Development of a natural light reproduction system for maintaining the circadian rhythm", Indoor and Built Environment, Vol. 29, No. 1, pp. 132-144, 2019.
<https://doi.org/10.1177/1420326X1985542>
- [5] G. W. Jeon, S. T. Oh, J. H. Lim, "Algorithm for Judging Anomalies Using Sliding Window to Reproduce the Color Temperature Cycle of Natural Light", Journal of Korea Multimedia Society, Vol. 24, No. 1, 2021.
<https://doi.org/10.9717/kmms.2020.24.1.030>
- [6] S. T. Oh, J. H. Lim, "Development and effect analysis of circadian rhythm-assisted LED lighting for reproducing short-wavelength ratio characteristics of natural light", The International Journal of Electrical Engineering & Education, 2021.
<https://doi.org/10.1177/00207209209884>
- [7] Y. S. Kim, S. Y. Kwon, J. H. Lim, "Implementation of a Natural Light Chromaticity Coordinates-based Healthy Lighting System", International Information Institute(Tokyo). Information, Vol. 20, No. 2A, pp. 985-992, 2017.
<https://www.proquest.com/openview/bd5b2a702d3c615a60ce1c7f020dda50/1?cbl=936334&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=NPSnnNp9sNegPoUwYXgTsrh80r8FDpVc%2FVPh0XmdlGY%3D>
- [8] Y. S. Kim, S. Y. Kwon, J. Hwang, J. H. Lim, "Smartphone-based Wavelength Control LED Lighting System according to the Sleep-Wake Cycle of Occupants", Journal of Internet Computing and Services, Vol. 17, No. 1, pp. 35-45, 2016.
<http://dx.doi.org/10.7472/jksii.2016.17.1.35>
- [9] K. S. Kim, "Duality of Light", Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 4, No. 1, pp. 120-131, 1993.
<https://koreascience.kr/article/JAKO199311919752821.page>
- [10] F. W. Billmeyer, H. S. Fairman, "CIE method for calculating tristimulus values", Color Research & Application, Vol. 12, No. 1, pp. 27-36, 1987.
<https://doi.org/10.1002/col.5080120106>
- [11] C. S. McCamy, "Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates", Color Research&Application, Vol. 17, No. 2, 1992.
<http://dx.doi.org/10.1002/col.5080170211>
- [12] D. H. Krantz, "Color measurement and color theory: I. Representation theorem for Grassmann structures.", Journal of Mathematical Psychology, Vol. 12, No. 3, pp. 283-303, 1975.
[https://doi.org/10.1016/0022-2496\(75\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0022-2496(75)90026-7)

◎ 저 자 소 개 ◎



김 양 수(Yang-Soo Kim)

2015년 공주대학교 컴퓨터공학부 소프트웨어전공(공학사)
2017년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
2022년 공주대학교 스마트자연공간연구센터 연구원
2023년~현재 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정
관심분야 : 자연광 서비스, 시스템 프로그램, 비전 프로그램, IoT, etc.
E-mail : kys@kongju.ac.kr



오 승 택(Seung-Taek Oh)

2000년 공주대학교 전자계산학과(이학사)
2002년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과(이학석사)
2015년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
2016년~현재 공주대학교 스마트자연공간연구센터 계약교수
관심분야 : 컴퓨터 비전, 머신 비전 검사 시스템, IoT, 웨어러블 컴퓨팅, etc.
E-mail : ost73@kongju.ac.kr



임 재 현(Jae-Hyun Lim)

1986년 중앙대학교 전자계산학과(이학사)
1988년 중앙대학교 대학원 전자계산학과(이학석사)
1998년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
1998년~현재 공주대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 상황인식, 건물에너지관리, 상황조명, 식물공장, 모바일서비스, USN Service, etc.
E-mail : defacto@kongju.ac.kr