

# 자연광 특성 기반 고연색성 실현 전시관 조명 설계 - CRI Ra, R9, R12를 중심으로☆

## Exhibition Hall Lighting Design that Fulfill High CRI Based on Natural Light Characteristics - Focusing on CRI Ra, R9, R12

이 지 영<sup>1</sup> 오 승 태<sup>2</sup> 임 재 현<sup>1\*</sup>  
Ji-Young Lee Seung-Teak Oh Jae-Hyun Lim

### 요 약

전시 공간에서 작품의 의도를 충실하게 나타내기 위해서는 자연광처럼 높은 색상 재현 성능을 제공하는 조명이 필요하다. 이에 연색성의 향상을 위한 다수의 조명 기술이 소개되었으나 대부분 파스텔 계열의 8가지 색상을 고려하는 일반 연색지수(CRI Ra)만을 평가하였다. 자연광은 R9과 R12의 연색지수로 표현되는 빨간색과 파란색을 포함하여 모든 색상에 대해 우수한 연색 성능을 제공하지만 대부분 인공조명은 R9, R12 등의 연색 성능이 자연광에 비해 현저히 낮다는 문제가 있다. 최근 원색을 포함한 전시물의 색상을 사실적으로 표현할 수 있도록 자연광 수준의 연색성을 제공하는 조명 기술이 요구되지만 관련 연구는 매우 부족하였다. 이에 본 논문에서는 자연광의 특성에 기반하여 CRI Ra, R9, R12를 중심으로 높은 연색성을 실현하는 전시관 조명을 제안한다. 먼저 자연광과 인공조명의 실측 분광에 대한 분석을 통해 R9과 R12의 향상을 위한 보강 파장 대역을 도출한다. 이후 보강 파장 대역 내 피크 파장 특성을 가진 가상의 SPD를 생성한 후 상용 LED 광원과의 조합 시뮬레이션을 통해 CRI Ra $\geq$ 95와 R9, R12 $\geq$ 90을 충족하는 SPD의 조합 조건을 도출한다. 이를 통해 R9과 R12 향상에 가장 큰 영향을 미친 405, 630nm 피크 파장 특성의 광원 2종을 특정한 후 W/C White LED 2종을 적용한 전시관 조명을 설계하고 조명의 제어지표 DB를 구축한다. 이후 제안 방법의 실험을 통해 조도(300-1,000 Lux), 색온도(3,000-5,000K) 조건에서 평균 CRI Ra는 96.5, R9과 R12는 96.2, 94.0로 자연광 수준 고연색성의 실현이 가능함을 보였다.

☞ 주제어 : CRI, R9, R12, 전시관 조명, 자연광

### ABSTRACT

To faithfully represent the intention of the work in the exhibition space, lighting that provides high color reproduction like natural light is required. Thus, many lighting technologies have been introduced to improve CRI, but most of them only evaluated the general color rendering index (CRI Ra), which considers eight pastel colors. Natural light provides excellent color rendering performance for all colors, including red and blue, expressed by color rendering index of R9 and R12, but most artificial lighting has the problem that color rendering performance such as R9 and R12 is significantly lower than that of natural light. Recently, lighting technology that provides CRI at the level of natural light is required to realistically express the colors of works including primary colors but related research is very insufficient. Therefore this paper proposes exhibition hall lighting that fulfills CRI with a focus on CRI Ra, R9, and R12 based on the characteristics of natural light. First reinforcement wavelength bands for improving R9 and R12 are selected through analysis of the actual measurement SPD of natural and artificial lighting. Afterward virtual SPDs with a peak wavelength within the reinforcement wavelength band are created and then SPD combination conditions that satisfy CRI Ra $\geq$ 95, R9, and R12 $\geq$ 90 are derived through combination simulation with a commercial LED light source. Through this, after specifying two types of light sources with 405,630nm peak wavelength that had the greatest impact on the improvement of R9 and R12, the exhibition hall lighting applied with two W/C White LEDs is designed and a control Index DB of the lighting is constructed. Afterward experiments with the proposed method showed that it was possible to achieve high CRI at the level of natural light with average CRI Ra 96.5, R9 96.2, and R12 94.0 under the conditions of illuminance (300-1,000 Lux) and color temperature (3,000-5,000K).

☞ keyword : CRI, R9, R12, Exhibition Hall Lighting, Natural Light

<sup>1</sup> Dept. of Software, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea.

<sup>2</sup> Smart Natural Space Research Center, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea.

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

[Received 22 March 2024, Reviewed 27 March 2024(R2 17 June 2024), Accepted 10 July 2024]

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

☆ 이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2023-00245425)

☆ 본 논문은 2023년 한국인터넷정보학회 추계학술대회 우수 논문 추천에 따라 확장 및 수정된 논문임.

## 1. 서 론

전시 공간에서 빛은 시각적 정보를 전달함과 동시에 빛 환경에 따라 작품의 색채, 소재감, 입체감 등을 표현하는 역할을 한다. 따라서 전시 작품의 의도된 본질을 충실하게 나타내기 위해서는 광원의 적절한 조도, 색온도, 연색성 등이 고려되어야 한다[1]. 특히 연색성은 전시조명의 중요 광특성 요소이다. CRI(Color Rendering Index)는 기준광원과 비교하여 조명의 광원이 물체의 색상을 정확하게 재현하는지 평가하는 지표이며 값이 100에 가까워질수록 연색성이 우수함을 의미한다[2]. 이때 기준광원으로는 자연광이 적용되며 CRI 100의 빛을 제공하여 전시 작품의 고유한 색상을 잘 표현한다[1, 3]. 이러한 이유로 일부 전시 공간에서는 자연광을 이용한 빛 환경의 조성을 시도하였으나 자연광의 다양한 변화 특성으로 인해 전시 공간에 고른 빛을 제공하는 데에는 어려움이 있었다[4]. 최근에는 자연광과 유사한 연색성을 제공하는 인공조명의 개발 노력이 계속되어 CRI 95 이상을 충족하는 조명 기술이 다수 소개되었다[5]. 그러나 고연색성을 추구하는 조명인 경우에도 CIE의 테스트 색상 샘플(TCS) 중 채도가 낮은 8개 색상(R1~R8)에 대한 연색 성능인 CRI Ra를 CRI의 정보로 제공하였다[6, 7]. 자연광은 가시광 파장 대역(380~780nm)의 분광을 고르게 포함하여 빨간색과 파란색에 대한 특수 연색지수인 R9, R12 등 모든 색상에 대하여 높은 연색 성능을 보인다[8]. 반면 대부분의 LED 조명은 CRI R9, R12가 자연광에 비해 현저히 낮다는 문제가 있어 자연광 수준의 높은 연색 성능을 실현하지는 못하였다[8, 9]. 원색을 포함하여 모든 색상에 대해 자연광처럼 높은 연색 성능을 실현하는 전시조명의 개발을 위해서는 CRI Ra, R9, R12를 종합적으로 고려하여야 하지만 이를 반영한 인공조명의 개발 노력은 매우 부족하였다.

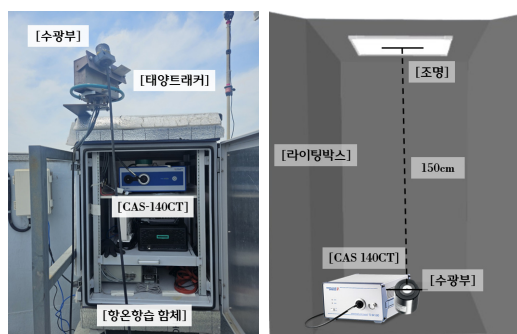
본 논문에서는 자연광의 특성을 기반으로 CRI Ra뿐만 아니라 R9, R12를 함께 고려한 고연색성 실현 전시관 조명을 제안한다. 이를 위해 먼저 분광복사계를 통해 자연광과 인공조명을 실측하여 SPD(Spectral Power Distribution) 등 광특성을 수집하고 비교·분석을 통해 R9, R12에 영향을 미치는 파장 대역을 선정한다. 이후 선정된 파장 대역을 보강할 수 있는 다양한 피크 파장 특성의 LED 광원에 대한 가상 SPD를 생성한 후 상용의 White LED 광원과의 조합 시뮬레이션을 수행한다. 이를 통해 최적의 연색 성능을 실현할 수 있는 추가 LED 파장 특성을 도출한다. 이후 상용의 W/C LED(Warm/Cool LED) 광원 2종과 추가 LED 광

원 2종을 적용한 CRI Ra $\geq$ 95와 R9, R12 $\geq$ 90을 충족하는 전시관 조명 개발 방안을 제시한다.

## 2. 고연색성 실현 전시관 조명

### 2.1 자연광과 인공조명의 광특성 분석

자연광 분광 특성 기반 전시관 조명 설계를 위해 분광복사계(CAS-140CT, Instrument)를 통해 자연광과 인공조명(일반 LED, 고연색성 LED)의 분광 및 광특성을 실측하였다. 그림 1은 자연광과 인공조명의 실측 환경이다.

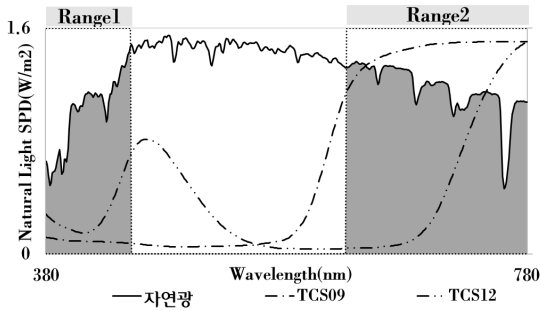


(a) 자연광(Natural Light) (b) 인공조명(Artificial Light)  
(그림 1) 자연광과 인공조명의 실측 환경

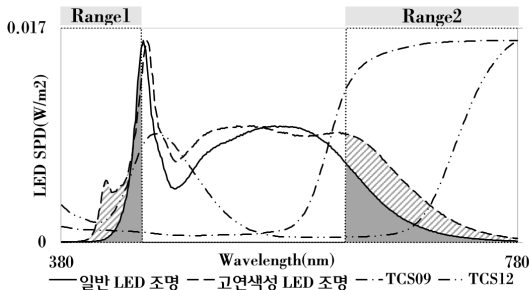
(Figure 1) Measurement environment of natural & artificial lighting

그림 1의 (a)와 같이 K대학(위도 36.8°, 경도 127.1°) 옥상층에서 태양 트래커에 수광부를 체결하여 자연광을 측정하였으며 그림 1의 (b)와 같이 외부 빛이 차단된 라이팅박스 내에서 수광부와와의 거리 150cm 조건에서 일반 LED 조명(5,200K, K사), 고연색성 LED 조명(5,510K, K사) 측정을 수행하였다[10]. 그림 2은 정오 시간의 자연광(5,493K, 2022/10/12 12:16)과 일반 LED 조명, 기존 고연색성 LED 조명의 SPD와 CRI 실측치이다.

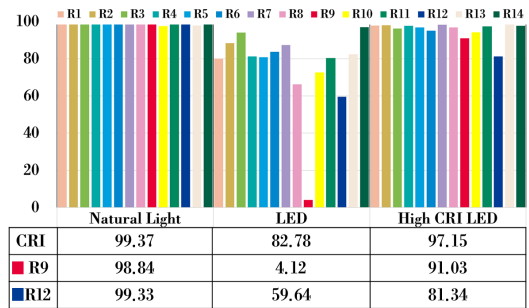
그림 2의 (a)와 (b)는 자연광과 인공조명의 SPD이며 CRI 평가 시 사용되는 CIE 색상테스트샘플(TCS) 중 TCS9와 TCS12의 반사 SPD를 함께 표시하였다. (c)는 자연광과 인공조명의 모든 연색지수를 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)와 같이 자연광은 가시광선 파장 대역에서 SPD가 넓고 연속적인 특징을 가지고 있어 CRI Ra 99.3이며 R1~R14 모두 95 이상으로 매우 높았다. 반면 그림 2의 (b)와 같이 일반 LED 조명은 자연광 대비 SPD가 협소하여 CRI Ra가 82.7으로 낮았으며 R9 4.1, R12 59.6으로 매우



(a) Natural Light SPD & TCS9, TCS12 Reflective SPD



(b) Artificial Light SPD & TCS9, TCS12 Reflective SPD



(c) CRI(R1-R14) of Natural Light and Artificial Light  
(그림 2) 자연광과 인공조명의 SPD 및 연색성  
(Figure 2) SPD, CRI of Natural Light & Artificial Light

낮았다. 고연색성 LED 조명은 일반 LED 조명 대비 SPD가 넓어 CRI Ra는 97.1로 자연광과 근접한 수준이지만 R9과 R12는 91.0과 81.3으로 자연광에 비해 낮았다. 인공조명과 자연광의 CRI 차이는 광원의 SPD에 기준 광원(자연광)이 조사될 때 반사되는 파장을 포함하지 않을 때 발생한다[1]. 그림 2와 같이 TCS9, TCS12의 반사 SPD가 큰 380~450nm(Range1)과 630~780nm(Range2) 파장 대역에서 인공조명의 SPD는 자연광의 SPD에 비해 TCS9, TCS12 반사 SPD를 충분하게 포함하지 못하므로 R9과 R12가 상

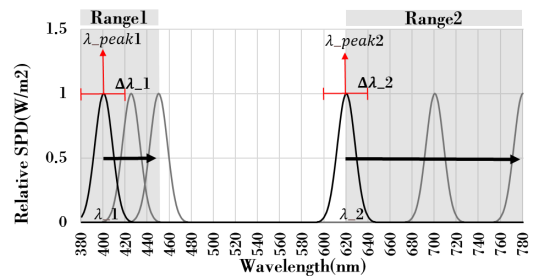
대적으로 낮으며 붉은색과 푸른색의 사실적 표현이 어려움 확인하였다.

## 2.2 자연광 특성 기반 고연색성 전시관 조명 설계

전시 환경에서 전시물이 가진 근본적 가치를 정확하게 전달하기 위해서는 적정 조도와 색온도 조건에서 CRI 95, R9과 R12를 90 이상을 제공해야 한다[8, 9]. 또한 여러 나라 및 기관(CIE, KS, ICOM, JIS, 국립중앙박물관 등)에서는 전시조명의 조도, 색온도에 대한 기준을 권고한다[11-14]. 이를 토대로 전시조명의 성능 기준은 조도 300-1,000Lux, 색온도 3,000-5,000K의 범위에서 CRI(Ra) ≥ 95와 R9, R12 ≥ 90을 충족하는 것으로 설정하였다. 이후 적용 가능한 LED의 선정 및 추가 광원의 SPD를 생성하고 SPD 기반 시뮬레이션과 광특성 연산을 통해 성능기준을 충족하는 전시조명의 SPD 및 제어지표를 도출하였다.

### 2.2.1 LED 광원의 선정 및 추가 광원의 SPD 생성

먼저 다양한 색온도/조도의 표현에 유리한 K사의 고연색성 LED 조명에 적용된 상용의 광원 중 2개의 W/C White LED(2,700K, 6,500K)를 선정하였다. 선정된 W/C White LED 광원은 그림 2의 (b)와 같이 450nm 피크 특성이 있으며 SPD가 협소하여 380~450nm(Range1)와 630~780nm(Range2) 파장 대역의 충족이 어렵다. 따라서 R9과 R12를 포함한 모든 색상에 대한 연색 성능의 향상을 위해서는 Range1, Range2 파장 대역을 보강할 수 있는 LED 광원의 추가 적용이 필요하였다. 이를 위해 가우스 분포 근사 수학적 모델을 통해 추가 광원(Add\_LED)의 피크 파장과 파장 대역폭에 따른 가상 SPD를 생성하여 특정 파장 대역을 보강하고자 하였다[3]. 그림 3은 Range1, Range2 파장 대역의 보강을 위한 가상 SPD의 생성 과정이다.

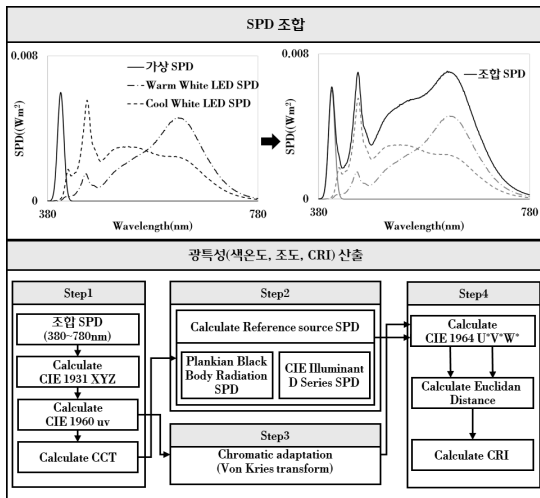


(그림 3) 보강 파장 대역별 가상 SPD 생성 과정  
(Figure 3) Virtual SPD creation process for each reinforcement wavelength band

그림 3에서 피크 파장을  $\lambda_{peak}$ , 파장 대역폭을  $\Delta\lambda$ 로 나타내었다. 최초 가상 SPD는 LED 제조사에서 제공하는 피크 파장과 파장 대역폭을 토대로  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 도출하였다 [6]. 이후  $\lambda_1, \lambda_2$ 의 피크 파장을 Range1과 Range2 파장 대역 범위에서 10nm 간격으로 이동하면서 추가 광원에 대한 22개의 가상 SPD를 생성하였다.

## 2.2.2 광원별 SPD 조합 시뮬레이션 및 광특성 산출

제안 전시조명의 성능 기준을 충족하는 SPD 조합을 도출하기 위해 앞서 선정한 W/C White LED 2종에 추가 광원에 대한 22개의 가상 SPD를 각각 조합하고 모든 조도별 조합 SPD를 생성후 광특성을 산출하였다. 그림 4는 SPD 기반 조합 및 광특성 산출 프로세스이다.



(그림 4) SPD 기반 조합 및 광특성 산출 프로세스

(Figure 4) Combination SPD based optical properties calculation Simulation process

그림 4에서 SPD는 조도에 비례하며 GRASSMANN의 법칙 중 가산성 법칙(Law of Additivity)에 따라 빛의 조합은 SPD의 합산으로 계산된다[15]. 이에 White LED 조도는 0~1,000 Lux의 범위를 50Lux 간격으로, 가상 SPD의 조도는 0~20 Lux의 범위를 1Lux 간격으로 점진적으로 증가시켜가며 SPD 기반의 조합 연산을 수행하였다. 이후 생성된 조합 SPD를 기반으로 광특성(조도, 색온도, 연색성)을 산출하였다. 그림 4의 광특성의 산출에는 NIST(미국국립표준기술연구소)에서 제공한 계산 방법을 적용하였다

[16]. 먼저 Step1에서 조합 SPD의 광특성을 산출하였다. 조합 SPD  $S(\lambda)$ 에 따른 삼자극치 CIE1931 XYZ를 수식1을 통해 산출하였으며 산출된 삼자극치 Y를 이용하여 조도(Illuminance)를 산출하였다[15].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K \int_{\lambda} S(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (\lambda \in [380, 780]) \quad (\text{수식1})$$

$$Illuminance [lux] = Y \quad (\text{수식2})$$

수식1에서  $K$ 는 정규화 정수고  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 는 CIE 1931 표준 비색 관찰자의 Color Matching Function이다. 이후 수식3을 통해 삼자극치 CIE1931 XYZ를 기반으로 CIE1960 uv를 산출하고 산출한 CIE1960 uv를 Robertson 수식에 적용하여 CCT를 산출하였다[16].

$$u = \frac{4 \times X}{X + 15 \times Y + 3 \times Z}, v = \frac{6 \times Y}{X + 15 \times Y + 3 \times Z} \quad (\text{수식3})$$

Step2에서는 조합 SPD의 CCT가 5,000K 미만이면 플랑키안 흑체 복사에서 5,000K 이상이면 CIE 광원 시리즈 D에서 기준광원(reference source)의 SPD를 산출하였다. Step3에서는 조합 SPD의 색도좌표를 기준광원의 색도좌표로 Von Kries 변환 방법을 적용하여 색채 적응(Chromatic adaptation)을 수행하였다. 마지막으로 Step4에서는 수식4를 통해 색도좌표 uv를 CIE 1964  $U^*, V^*, W^*$ 로 변환 후 색차( $\Delta E_i$ )를 계산하고 수식5를 적용하여 연색지수( $R_i$ )를 산출하였다. 이후  $R_1 \sim R_8$  평균을 계산하여 CRI Ra를 산출하였다[17].

$$W^* = 25 Y^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (\text{수식4})$$

$$U^* = 13 W^* (u'_i - u_r)$$

$$V^* = 13 W^* (v'_i - v_r)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{ri}^* - U_i^*)^2 + (V_{ri}^* - V_i^*)^2 + (W_{ri}^* - W_i^*)^2}$$

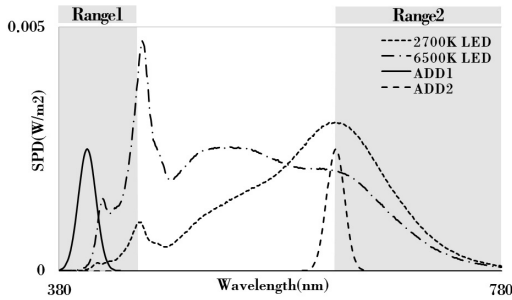
$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_i \quad (\text{수식5})$$

수식4에서  $i$ 는 연색지수의 인덱스이며  $u'_i, v'_i$ 는 색적응을 한 조합 SPD의 색도좌표  $u_i, v_i$ 이고  $u_r, v_r$ 는 기준광원의 uv 색도좌표이다.

## 2.2.3 고연색성 전시관 조명 설계 및 제어지표 구축

전시관 조명의 성능 기준을 충족하는 고연색성 조명의 설계를 위해 2.2.2에서 산출된 다수의 조합 SPD와 광특성을 분석하였다. 이를 통해 22개의 가상 SPD 중 R9와 R12를 최대 13.0, 14.5만큼 향상시킬 수 있는 것으로 확인된

405, 630nm의 피크 파장 특성의 추가 광원(Add\_LED)에 대한 가상 SPD 2종을 특정하였다. 이후 W/C White LED 광원 2종과 추가 광원 2종(Add\_LED1, Add\_LED2)을 적용한 전시관 조명을 설계하였고 그림 5는 제안 조명의 선정 광원에 대한 분광 특성이다.



(그림 5) 제안하는 전시관 조명의 광원별 SPD  
(Figure 5) SPD by the light source of proposed exhibition hall lighting

그림 5와 같이 기존의 인공조명에서 보강이 필요하였던 Range1, Range2 파장 대역에 405, 630nm의 피크 파장 특성의 추가 광원을 적용함으로써 연색 성능의 향상을 추구하였다. 선정 광원 4종의 적용에 따른 분광 조합 시뮬레이션의 결과인 194,481개의 SPD에 대한 조도, 색온도, CRI Ra, R9, R12의 특성을 추출하였고 이를 기반으로 제어지표(Control Index) DB를 구축하였다. 표 1은 제안 전시관 조명에 대한 제어지표의 일부를 나타낸 것이다.

(표 1) 제안 전시관 조명의 제어지표

(Table 1) Control Index for 4 types of selected light sources

index	White LED		ADD LED		산출된 광특성				
	2,700K (Lux)	6,500K (Lux)	ADD1 (Lux)	ADD2 (Lux)	조도 (Lux)	CCT (K)	CRI	R9	R12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	50	0	0	0	50	2,674	96.2	75.2	92.0
2	100	0	0	0	100	2,674	96.2	75.2	92.0
...									
1,346	400	100	0	10	510	2,916	95.9	97.3	90.4
...									
26,442	150	1,00	17	2	1,157	5,487	96.4	90.2	90.2
...									

표 1과 같이 제안 전시관 조명은 임의 거리(전시품과 조명 간 거리 150cm) 기준에서 색온도 2,500-5,500K, 조도 250-1,200Lux 범위의 제어가 가능하였다. 이를 통해 전시관 조명 성능 요건인 조도 300-1,000Lux, 색온도 3,000-5,000K의 범위에서 CRI(Ra)≥95 및 R9, R12≥90를 충족하는 고연색성 전시관 조명의 실현이 가능하였다.

### 3. 실험 및 평가

제안하는 전시관 조명의 성능 기준에 대한 충족 여부를 확인하기 위해 기존 고연색성 LED 조명과의 비교 실험을 진행하였다. 먼저 기존 고연색성 LED 조명의 색온도별 제어에 따른 모든 조도에서의 CRI 평균을 산출하였고 그 결과는 표 2와 같다.

(표 2) 기존 고연색성 LED 조명의 색온도 제어에 따른 CRI(Ra, R9, R12) 평균

(Table 2) CRI(Ra, R9, R12) average by the CCT control of the existing high CRI LED Lighting

CCT(K)(±5%)	CRI Ra	R9	R12
3,000K	97.25	84.92	91.65
4,000K	97.82	97.84	85.99
5,000K	97.97	96.54	82.43

표 2와 같이 기존 고연색성 LED 조명은 모든 색온도 조건에서 CRI 95 이상을 충족하였다. 그러나 3,000K에서 R9은 84.92, 4,000K, 5,000K에서 R12가 85.99, 82.43으로 일부 색온도 조건에서만 R9과 R12가 90 이상인 빛을 제공함을 확인하였다. 이후 제안 전시관 조명의 색온도 및 조도의 제어를 수행한 결과는 표 3과 같다.

표 3과 같이 3,000K 색온도 조건, 100-1,000 Lux의 조도 범위에서 평균 CRI Ra, R9, R12는 96.22, 94.48, 93.69로 높은 수치를 보였다. 또한 4,000K, 5,000K 색온도 조건에서도 평균 CRI Ra가 96.72, 96.60, R9이 97.39, 96.60, R12는 94.69, 93.71로 전시관 조명의 성능 기준을 충족하였다. 실험을 통해 White LED 2종(2,700K, 6,500K)과 Add\_LED1, Add\_LED2를 적용하여 전시관 조명을 설계하고 각 채널별 제어 기능을 구현할 경우 조도 300-1,000 Lux, 색온도 3,000-5,000K의 조건에서 CRI Ra≥95, R9&R12≥90의 고연색 성능의 실현이 가능함을 보였다.

(표 3) 제안 전시관 조명의 색온도 및 조도 제어에 따른 CRI(Ra, R9, R12)  
(Table 3) CRI(Ra, R9, R12) by the CCT and Illuminance control of the proposed exhibition hall lighting

CCT (K)(±5%)	Illuminance (Lux)(±5%)	CRI Ra	R9	R12
3,000K	300	95.93	95.88	92.64
	400	96.19	97.63	92.96
	500	96.01	94.98	93.18
	600	96.64	95.43	93.19
	700	96.20	94.10	94.20
	800	96.11	92.41	93.47
	900	96.36	93.42	94.99
	1,000	96.32	92.02	94.87
	Average	96.22	94.48	93.69
4,000K	300	96.63	96.87	94.92
	400	96.82	97.25	94.07
	500	96.41	97.59	96.05
	600	96.76	97.13	94.37
	700	96.74	97.09	94.45
	800	96.82	97.25	94.07
	900	96.65	97.89	95.45
	1,000	96.91	98.04	94.15
	Average	96.72	97.39	94.69
5,000K	300	96.18	93.09	95.21
	400	96.47	97.15	94.41
	500	96.81	94.69	92.42
	600	96.54	97.33	94.17
	700	96.85	97.90	92.59
	800	96.57	97.39	94.02
	900	96.64	97.46	93.55
	1,000	96.75	97.77	93.30
	Average	96.60	96.60	93.71
Total Average		96.51	96.16	94.03

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자연광처럼 높은 수준의 연색 성능을 실현하기 위해 CRI(Ra)≥95 및 R9, R12≥90을 충족하는 고연색성 전시관 조명을 제안하였다. 이를 위해 먼저 자연광과 인공조명에 대한 분광 특성을 실측 비교하였다. 자연광에 비해 상대적으로 부족한 인공조명의 보강 파장 대역은 Range1(380-450nm), Range2(630-780nm)임을 분석을 통해 도출하였다. 이후 다양한 색온도의 제공이 가능한 상용의 White LED 광원 2종을 선정하였고 Range1, Range2의 보강을 위해 다양한 피크 파장 특성의 추가 광원(Add\_LED)에 대한 SPD 기반 조합 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 R9, R12의 향상에 가장 영향을 미친 405nm, 630nm 피크 파장 특성의 추가 LED 광원 2종(Add\_LED1, Add\_LED2)을 특정하였다. 이후 상용의

White LED 광원과 추가 LED 광원을 적용한 4채널 구성의 전시관 조명을 설계하였다. 또한 전시관 조명의 색온도별 제어를 위해 SPD 조합 시뮬레이션을 통해 산출된 194,481개의 SPD에 대한 광특성을 기반으로 제어지표 DB를 구축하였다. 이후 제어지표를 적용한 성능 실험에서는 3,000K, 4,000K, 5,000K 조건에서 평균 CRI Ra는 96.22, 96.72, 96.60, R9은 94.48, 97.39, 96.60, R12는 93.69, 94.69, 93.71의 성능을 보였다. 이를 통해 제안 전시관 조명은 조도 300-1,000Lux, 색온도 3,000-5,000K의 조건에서 CRI Ra≥95와 R9, R12≥90의 자연광 수준 고연색성의 실현 방안을 제시하였다.

향후에는 전시관 조명 환경의 CRI 등 빛 품질의 확인을 지원하고 유입 자연광을 함께 고려하여 최적의 빛 환경을 제공하는 센싱 기술을 연계한 전시관 조명 시스템의 개발을 위한 연구를 계속할 것이다.

#### 참고문헌(Reference)

- [1] Huijiao Tan, Rui Dang, "Review of lighting deterioration, lighting quality, and lighting energy saving for paintings in museums," Building and Environment, Vol. 208, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108608>
- [2] International Commission on Illumination, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE Publication 13.2, 1974.
- [3] Ohno, Yoshihiro, "Spectral design considerations for white LED color rendering," Optical Engineering, Vol. 144, No. 11, 2005. <https://doi.org/10.1117/1.2130694>
- [4] Mihn Hyun-Jun, Kim Kwang-Hyun, "A Study on Double Diffusing Daylight System for Contemporary Art Museums," Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 28, No. 8, pp. 29-36, 2012.  
<https://scholarworks.bwise.kr/hongik/handle/2020.sw.hongik/19375>
- [5] Huang, Xiaoyong, "Cyan phosphors for full-visible-spectrum lighting: shining new light on high-CRI white pc-LEDs," Science Bulletin, Vol. 64, No. 22, pp. 1649-1651, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.09.008>
- [6] Hyeong-Seob Jo, Uh-Chan Ryu, "Study on CRI and CCT Variations of LED Lightings According to RGB

- Color Changes of Multi-chip LEDs,” Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 30, No. 12, pp. 12-19, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2016.30.12.012>
- [7] Oh Seung-Taek, Jae-Hyun Lim, “CRI-Based Smart Lighting System That Provides Characteristics of Natural Light,” Information, Vol. 14, No.12, 2023.  
<https://doi.org/10.3390/info14120628>
- [8] Cao, Lina, et al., “Realizing full-spectrum LED lighting with a bright broadband cyan-green-emitting  $\text{CaY}_2\text{ZrGaAl}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  garnet phosphor,” Journal of Luminescence, Vol. 263, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.120015>
- [9] Cao, Lina et al., “Full-Spectrum White Light-Emitting Diodes Enabled by an Efficient Broadband Green-Emitting  $\text{CaY}_2\text{ZrScAl}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  Garnet Phosphor,” ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 14, No. 4, pp. 5643-5652, 2022.  
<https://doi.org/10.1021/acsami.1c23286>
- [10] Tae-Kyoung Ko, In-Tae Kim, An-Seop Choi, “A preliminary Study and suggested Evaluation Methodology for the Improved Fashion Shop Lighting Design using Museum Lighting Design,” Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 29, No. 4, pp. 37-46, 2015.  
<https://doi.org/10.5207/JIEIE.2015.29.4.037>
- [11] International Commission on Illumination, Guide on Interior Lighting (2nded), CIE Publication 29.2, 1986.  
<https://cie.co.at/publications/guide-interior-lighting>
- [12] Korean Standards Association, Recommended Levels of Illumination, KSA3011 - 2013, 1998.
- [13] International Council of Museums., ICOM Statutes, ICOM., 2007.
- [14] Japanese Standards Association, Recommended Levels of Illumination, JIS Z 9110-1979, 1979.  
[https://www.intertekinform.com/en-us/standards/jis-z-9110-1979-626832\\_saig\\_jsa\\_jsa\\_1439046/](https://www.intertekinform.com/en-us/standards/jis-z-9110-1979-626832_saig_jsa_jsa_1439046/)
- [15] Yang-Soo Kim, Seung-Taek Oh, Jae-Hyun Lim, “A Method of Reproducing the CCT of Natural Light using the Minimum Spectral Power Distribution for each Light Source of LED Lighting,” Journal of Internet Computing and Services, Vol. 24, No. 2, pp. 19-26, 2023.  
<https://doi.org/10.7472/jksii.2023.24.2.19>
- [16] Yoshihiro Ohno, “Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra,” in Proc. of Fourth International Conference on Solid State Lighting, Vol. 5530, pp. 88-98, 2004.  
<https://doi.org/10.1117/12.565757>
- [17] International Commission on Illumination, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE Publication 13.3, 1995.  
<https://cie.co.at/publications/method-measuring-and-specifying-colour-rendering-properties-light-sources>

## ● 저 자 소 개 ●



### 이 지 영(Ji-Young Lee)

2020년 공주대학교 컴퓨터공학부 소프트웨어공학전공(공학사)

2021년~현재 공주대학교 소프트웨어학과(석사과정)

관심분야 : IoT, 데이터 분석, 인공지능, etc.

E-mail : easy1814@kongju.ac.kr



### 오 승 택(Seung-Teak Oh)

2000년 공주대학교 전자계산학과(이학사)

2002년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과(이학석사)

2015년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)

2016년~현재 공주대학 스마트자연공간연구센터 계약교수

관심분야 : 컴퓨터비전, 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 컴퓨터공학부 교수

관심분야 : 상황인식, 건물에너지관리, 상황조명, 식물공장, 모바일서비스, USN Service, etc.

E-mail : defacto@kongju.ac.kr