

재실자의 수면-각성 주기에 따른 스마트폰 기반 파장제어 LED 조명시스템☆

Smartphone-based Wavelength Control LED Lighting System according to the Sleep-Wake Cycle of Occupants

김 양 수¹ 권 속 연² 황 준³ 임 재 현*
Yang-Soo Kim Sook-Youn Kwon Jun Hwang Jae-Hyun Lim

요 약

인간의 생체리듬 조절에 관여하는 멜라토닌 호르몬은 빛의 특정 단파장 비율에 따라 민감하게 반응한다. 단파장 비율이 고정된 기존 조명 빛은 재실자 생체리듬 교란 및 수면장애 현상을 초래한다. 특히 교대근무자의 경우, 일정치 않은 근무시간과 항상 동일한 빛 환경으로 인해 생활패턴이 불규칙적으로 변화하여 집중력 저하로 사고 발생의 위험도가 높아지거나 퇴근 이후 숙면을 취하지 못하는 등 건강한 일상생활을 유지하는 데 부정적 영향을 초래한다. 본 논문에서는 교대근무자를 대상으로 근무 또는 퇴근 시점에 따라 각성 및 수면에 적합한 조명 빛을 손쉽게 계속 및 제어할 수 있는 스마트폰 기반의 파장 제어 가능한 LED 조명시스템을 제안한다. 먼저, LED 조명을 대상으로 파장제어비율에 따라 변화하는 조명 빛 특성을 스마트폰에 내장된 컬러센서 및 외부에 연동된 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)를 통해 계속한 후 데이터베이스에 저장하고, 저장된 광 특성 데이터를 기반으로 계속 모듈과 조명제어모듈을 구현한다. 교대근무자를 대상으로 시스템 처리 절차에 따라 '근무' 시간대에는 각성이 필요한 시점으로 파악하여 작업유형에 따라 분류한 목표조도를 고려하여 단파장 비율이 최대치인 제어비율로 서비스하고, '퇴근' 무렵에는 자연스럽게 수면 상태에 진입할 수 있도록 단파장 비율이 최소치인 제어비율로 조명 빛을 가변화한다.

☞ 주제어 : 수면-각성, 생체리듬, 조명시스템, 엘이디, 스마트폰

ABSTRACT

Melatonin hormone involved in human's circadian rhythm adjustment sensitively responds to light's specific short wavelength ratio. A shift worker's circadian rhythm disturbance and sleep disorder are caused by the existing lighting conditions, whose short wavelength ratio is fixed. The life pattern of a shift worker changes irregularly because of irregular working hours and the same lighting environment; thus, his/her concentration is reduced. For such a reason, negative effects ensue to the detriment of healthy everyday life, including a high risk of accidents or having unsound sleep after leaving work. A smartphone-based wavelength control LED lighting system that targets shift workers and that can easily measure and control lighting suitable for wake-sleep cycle, according to working hours and closing hours, is proposed in this paper. First, after the light characteristics of LED lighting that changes depending on light control ratio are measured through the color sensor installed on the smartphone and the externally-linked Mini-Spectrometer, they are stored in the database. Based on the stored optical characteristics data, the measurement module and light control module are implemented. Lighting is offered using a control ratio having the maximum rate of short wavelength in consideration of the target illuminance, classified according to work type by identifying working hours as time when waking is required for shift workers. After a shift work leaves work, the amount of lighting is varied, using a control ratio having a minimum short wavelength rate so that a shift worker can enter the sleep state naturally.

☞ keyword : Sleep-Wake, Circadian rhythm, Lighting System, LED, Smartphone

1. 서 론

¹ Dept. of Computer Science & Engineering, Kongju National University, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 1223-24, Korea

² Smart Natural Space Research Center, Kongju National University, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 1223-24, Korea

³ Dept. of Multimedia, Seoul Womens University, Seoul, Nowon-gu, Hwarangro 621, Korea

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

[Received 13 August 2015, Reviewed 27 August 2015, Accepted 3 December 2015]

빛은 인간이 살아가는데 있어서 필수 요소이며 기본적으로 시각적인 도움을 주는 역할을 수행하고 궁극적으로는 인간 건강과도 밀접한 연관이 있다[1-3]. 빛을 광의로

☆ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A1A11054509)

☆ 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행하였음(2015K000281)

☆ 본 논문은 2015년도 한국인터넷정보학회 춘계학술발표대회 우수 논문 추천에 따라 확장 및 수정된 논문임

해석하면 모든 종류의 전자기파를 의미하며 협의로는 사람이 볼 수 있는 약 380nm-780nm의 파장을 가진 가시광선을 뜻한다[4].

빛의 특정 단파장 비율은 인간의 생체리듬 조절에 기여하는 멜라토닌 호르몬의 분비량과 밀접한 연관이 있으며 멜라토닌 분비량의 조절은 수면의 질을 개선하는데 영향을 미친다[5-12]. 선행 연구에 따르면 2003년 Lockly SW 의 2명은 460nm 파장의 빛이 555nm 파장의 빛보다 멜라토닌 억제에 더 많은 기여를 한다고 보고된 바 있다. 또한 2004년 Helen R 의 2명은 595nm, 660nm의 장파장의 빛보다 470nm, 495nm, 525nm의 단파장 빛이 멜라토닌 분비 및 억제에 더욱 민감하다는 연구결과를 제시하였다 [5-6]. 국내에서도 2011년 김경실 외 1명은 446nm~477nm에 해당하는 단파장 영역의 비율이 10% 이상 변화하게 되면 멜라토닌 분비 변화에 가장 큰 영향을 미침을 연구결과를 통해 밝혔다[7]. 즉 서비스 시점에 따라 단파장 비율을 적절하게 조절할 경우 재실자의 각성 상태를 유지하거나 수면 상태에 자연스럽게 진입하도록 도움을 주므로 건강한 생체패턴을 유지할 수 있다[13].

기존 조명 빛은 항시 고정된 단파장 비율로 서비스가 제공되므로 재실자 생체리듬이 불규칙하게 변화될 수 있으며 이로 인해 수면위상지연증후군, 수면위상전진증후군 등 다양한 수면장애 현상을 초래한다. 밀폐된 실내공간에 오랜 시간 상주하는 재실자, 근무시간이 불규칙한 교대근무자, 과중한 업무량에 의해 야간근무를 수행하는 야간근무자 등은 변동적인 근무시간과 획일화된 조명 빛 환경으로 인해 건강에 위협을 받는 수준이다[14~16]. 따라서 작업유형과 근무시점에 따라 적합한 단파장 비율을 가진 조명 빛 환경으로 가변화해야 한다. 특히 밤과 낮을 번갈아가며 근무하는 교대근무자는 획일화된 빛에 오랜 시간 노출되어 생체리듬이 불균형해지고 이로 인해 근무도중 집중력이 저하되어 사고 발생의 위험도가 높아진다. 따라서 근무시간이 밤에서 낮으로 변경되거나 혹은 그 반대로 변경되는 시점에 빠르게 교대근무자의 생체리듬을 재조정하기 위한 조명 빛 제어기술이 필요하다[17].

본 논문에서는 스마트폰에 내장된 RGBW 컬러센서와 외부에 연동된 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)를 이용하여 재실자 주변의 광 특성을 계측한 후 작업 유형 및 시점에 따라 단파장 비율을 제어하기 위한 LED조명 시스템을 제안한다.

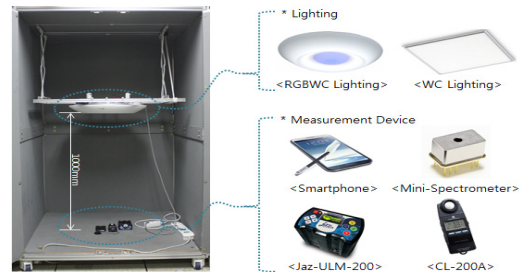
제안한 시스템은 조명 빛 특성 계측모듈과 조명제어 모듈로 구성된다. 조명 빛 특성 계측모듈은 컬러센서와 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)를 통해 계측된 데

이터를 기반으로 RGBW->XYZ 변환식과 McCamy의 색온도 산출식을 이용하여 조도, 색온도, 색좌표, 분광분포 (SPD;Spectral Power Distribution) 등 수집 데이터를 연산 및 변환한다. RGBW->XYZ 변환은 색차조도계 및 스마트폰에 내장된 컬러센서로 부터 수집한 광 특성 데이터를 기반으로 다중 회귀식을 통해 변환식을 도출한다. 조명제어모듈은 현재 조명 서비스 시점을 고려하여 재실자가 각성 상태를 유지하거나 수면 상태에 자연스럽게 진입할 수 있도록 단파장 비율이 최대치 또는 최소치에 해당하는 제어비율로 조명 빛을 가변화한다.

제안한 시스템은 교대근무자를 대상으로 하며 각성 및 수면 시점을 각각 ‘업무 시작 시간’ 부터 ‘업무 종료 1시간 전’, 그리고 ‘업무 종료 1시간 전’ 부터 ‘업무 종료 시간’ 으로 정의한다. 각성 시점에는 단파장 비율이 최대치인 조광제어비율로 서비스하여 교대근무자의 집중력을 향상시킴으로써 사고발생의 위험을 최소화하고, 수면 시점에는 단파장 비율이 최소치인 조명 빛을 서비스하여 퇴근 이후 편안하게 수면 상태에 진입하도록 조명 빛을 변화시킨다.

2. LED 조명의 광 특성 실측 실험

2.1 실험 환경



(그림 1) 실험공간 및 장치

(Figure 1) Experimental Space and Devices

그림 1은 실험공간 및 구성장치를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Red(R), Green(G), Blue(B), Warm White(W), Cool White(C) 광원을 조합한 감성조명과 Warm White(W), Cool White(C) 광원으로 이루어진 LED 백색면 조명의 광 특성을 평가하기 위한 실험을 진행하였다. 측정 장비는 스마트폰(Galaxy Note 2)에 내장된 RGBW 컬러센서와 스마트폰의 외부에 연동한 소형 스펙트로미

터(Mini-Spectrometer) 그리고 색차조도계(CL-200A)와 분광계(Jaz-ULM-200)로 구성된다. 실험공간은 가로 1,200mm, 세로 1,200mm, 높이 2,000mm인 라이팅 캐비닛을 활용하였으며 측정 장비와 조명 사이 거리는 최대조도에 따라 RGBWC 조명의 경우 1m, WC 조명은 1.7m로 설정하였다.

2.2 실험 방법

실험 방법은 다음과 같다. 먼저 RGBWC 조명과 WC 조명을 대상으로 일정 주기마다 제어비율을 순차적으로 증가시켜 조명 빛을 변화시킨다. 이때 측정장비를 이용하여 각 제어비율마다 변화하는 조명 빛 특성을 계속한 후 데이터베이스에 저장한다.

(표 1) 조광단계별 빛의 특성 요소
(Table 1) Characteristic Elements of Light according to Dimming Control

| 조명 | 제어요소 | 조광제어비율 | 측정요소 |
|----------------|------------------------------|---|---|
| RGBWC Lighting | Red, Green, Blue, Warm, Cool | (0, 0, 0, 0, 0) (0, 0, 0, 0, 64) (0, 0, 0, 0, 128) (...) (255, 255, 255, 255, 192) (255, 255, 255, 255, 255) Total 3125 times | RGBW, Illuminance, Color Temp, Chromaticity, Tristimulus, SPD |
| WC Lighting | Warm, Cool | (44, 44) (44, 48) (44, 52) (...) (255, 252) (255, 255) Total 2809 times | RGBW, Illuminance, Color Temp, Chromaticity, Tristimulus, SPD |

RGBWC 조명은 0에서 255까지의 제어범위를 0, 64, 128, 192, 255와 같이 5 단계의 제어비율로 구분하고, WC 조명은 0, 4, 8, 12, 16, ..., 248, 252, 255의 총 65 단계 제어비율로 구분한다. 즉 RGBWC 조명의 제어단계는 $5^5(3,125)$ 회이며 WC 조명의 총 제어단계는 $65^2(4,225)$ 회로 처리된다. WC 조명의 경우 하드웨어 특성에 따라 제어비율이 48 미만일 경우, 조명출력에 필요한 최소 전력에 부합하지 않으므로 조명이 점등되지 않는다. 이에 따라 WC 조명의 조광제어비율을 44(Off), 48, 52, ..., 248, 252, 255로 설정하여 총 $54^2(2,916)$ 회의 제어단계로 구분한다. 제어비율에 따라 각 조명의 특성을 실측하는데 있어 주요 요소를 살펴보면 컬러센서의 RGBW, 색차조도계의 조도, 색온도, 색좌표, 삼자극치 등이 있으며 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)와 분광계(Jaz-ULM-200)는 분광분포(SPD; Spectral Power Distribution) 데이터를 수

집하여 색온도 및 단파장 비율을 분석하는 데 활용한다. 본 연구에서는 Java 언어를 기반으로 조광제어용 어플리케이션을 개발하고 이를 적용하여 표 1의 조명 빛 특성 정보를 확보하였다.

2.3 조명 빛 특성 DB

본 연구에서는 대상조명의 제어비율에 따라 변화하는 빛의 특성을 파악하기 위해 센서와 계측장비로부터 수집된 raw 데이터를 DB에 저장한다. 이때 DB는 MySQL을 사용하였고 조명 빛 특성 저장을 위해 표 2와 같이 스키마를 설계하였다.

(표 2) 테이블의 필드 및 타입 설계
(Table 2) Design of Field and Type in Table

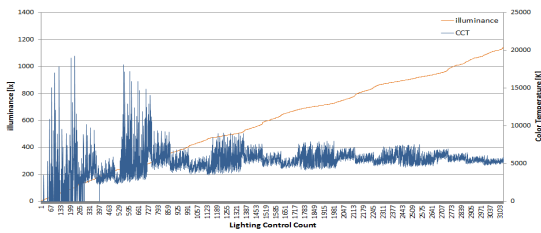
| 필드명 | 타입 | 설명 |
|------------|-------|---|
| type | int | Type of lighting RGBWC Lighting = 1 WC Lighting = 2 |
| red | int | Dimming ratios |
| green | int | |
| blue | int | |
| warm | int | |
| cool | int | |
| cl-lux | float | Illuminance, Color Temperature by CL-200A |
| cl-temp | float | Chromaticity x, y by CL-200A |
| cl-x | float | |
| cl-y | float | Tristimulus X, Y, Z by CL-200A |
| cl-large-x | float | |
| cl-large-y | float | |
| cl-large-z | float | |
| short-wave | float | Short-wavelength ratio calculated from the SPD |
| sp-r | int | The measured Values from the Smartphone |
| sp-g | int | |
| sp-b | int | |
| sp-w | int | |

표 2의 type 필드는 조명의 유형을 식별하기 위한 요소로 RGBWC 조명은 1, WC 조명은 2가 저장된다. RGBWC 조명의 조광제어비율은 red, green, blue, warm, cool 필드에 저장되며 WC 조명은 warm, cool 필드에 저장된다. 이때 WC 조명은 red, green, blue 광원이 존재하지 않으므로 해당 필드에 0을 입력한다. cl-lux, cl-temp, cl-x, cl-y, cl-large-x, cl-large-y, cl-large-z는 색차조도계로부터 계측된 조명 빛 특성을 저장하는 필드므로 각각 조도, 색온도, 색좌표 xy, 삼자극치 XYZ를 의미한다. sp-r,

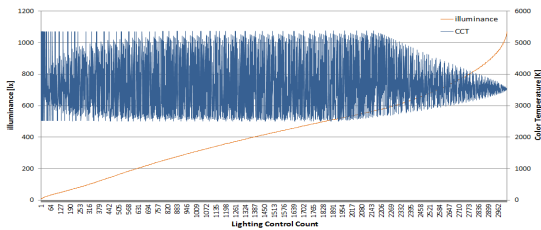
sp-g, sp-b, sp-w의 필드는 스마트폰 컬러센서를 통해 계측한 데이터저장 필드로써 각각 red, green, blue, white 광원에 대한 세기를 나타낸다. 마지막으로 short-wave는 분광계에서 계측한 파장 데이터를 이용하여 멜라토닌의 억제도가 높은 446nm~477nm의 단파장 비율 연산 값이다.

2.4 조명 빛 특성 분석

그림 2와 그림 3은 각 조명별로 수집한 빛 특성 데이터를 기반으로 조도 및 색온도 변화를 나타낸 것이다.



(그림 2) RGBWC 조명의 조도 및 색온도 변화
(Figure 2) Variation of Illuminance and Color temperature in RGBWC Lighting



(그림 3) WC 조명의 조도 및 색온도 변화
(Figure 3) Variation of illuminance and color temperature in WC Lighting

그림 2~그림 3에서 나타난 바와 같이 RGBWC 조명의 최소조도 및 최대조도는 각각 1.19lux와 1,143.9lux이며, WC 조명은 각각 8.69lux와 1,071.2lux이다. 또한 RGBWC 조명의 최소 색온도 및 최대 색온도는 2,304K과 19,269K이며 WC 조명은 2,511K과 5,383K으로 실측되었다. RGBWC 조명의 경우 400lux 미만의 조도 구간에서는 색온도가 약 1,800K~20,000K 범위 내에 불규칙하게 분포하는 반면 400lux 이상의 조도 구간에서는 색온도 범위가 점차 협소해지는 경향을 보였다. 또한 최대조도에 가까워질수록 색온도가 약 4,800K~5,800K의 범위 내에 집중

적으로 분포함을 확인하였다. WC 조명은 600lux 미만의 조도 구간에서 약 2,500K~5,400K 범위의 색온도가 고루 분포하였고, 600lux 이상의 조도 구간에서는 색온도의 표현 범위가 점차 줄어 약 3,500K에 도달함을 확인하였다. 두 개의 조명 모두 조도 변화에 따라 색온도가 확연한 차이를 보였으나 조도값이 일정 임계치를 초과한 이후에는 색온도의 표현 범위가 협소해지는 특징을 나타냈다.

(표 3) RGBWC조명의 광 특성 변화
(Table 3) The Change of Light Characteristic of RGBWC Lighting

| 조도 [lx] | 색온도 [K] | 단파장 비율 [%] | 색좌표 |
|--------------------|--------------------|---------------------|-----|
| 100±5 (23 data) | 2831 ~ 19270 | 0.98 ~ 35.63 | |
| 200±5 (23 data) | 2552 ~ 5453 | 3.55 ~ 21.99 | |
| 300±5 (21 data) | 4202 ~ 9302 | 14.64 ~ 25.41 | |
| 400±5 (18 data) | 4306 ~ 7056 | 12.29 ~ 21.76 | |
| 500±5 (49 data) | 3762 ~ 9058 | 10.96 ~ 22.78 | |
| 600±5 (26 data) | 4607 ~ 6483 | 14.2 ~ 20.01 | |

(표 4) WC조명의 광 특성 변화
(Table 4) The Change of Light Characteristic of WC Lighting

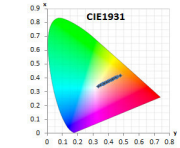
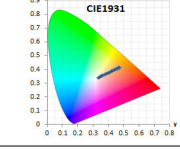
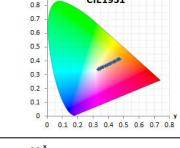
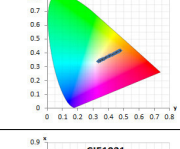
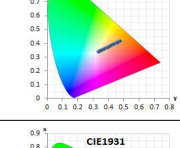
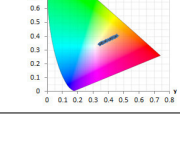
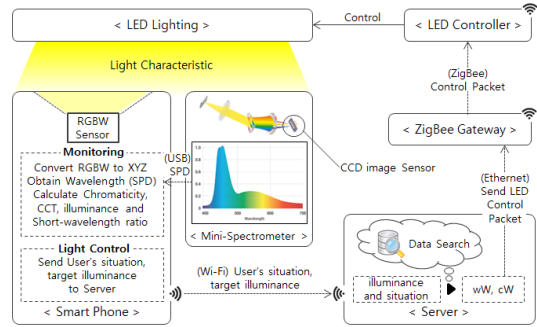
| 조도 [lx] | 색온도 [K] | 단파장 비율 [%] | 색좌표 |
|--------------------|-------------------|--------------------|---|
| 100±5 (29 data) | 2517 ~ 4968 | 3.92 ~ 16.66 |  |
| 200±5 (29 data) | 2576 ~ 5358 | 4.67 ~ 18.03 |  |
| 300±5 (33 data) | 2554 ~ 5364 | 4.53 ~ 18.25 |  |
| 400±5 (43 data) | 2512 ~ 5371 | 4.17 ~ 18.36 |  |
| 500±5 (47 data) | 2535 ~ 5378 | 4.41 ~ 18.41 |  |
| 600±5 (35 data) | 2709 ~ 5114 | 6.06 ~ 17.68 |  |

표 3와 표 4는 RGBWC 조명과 WC 조명의 특성을 실측한 후 목표 조도를 기준으로 색온도, 단파장 비율, 색좌표를 비교한 것이다. 두 개 조명 모두 실측 데이터를 기반으로 100lux~600lux까지 100lux씩 증가시켜가며 구분하였고 오차는 ±5lux 범위로 정하였다. RGBWC 조명은 100±5lux에서 색온도와 단파장 비율, 색좌표가 가장 넓게 분포하였고 600±5lux에서 색온도 표현 범위가 가장 협소하였다. WC 조명은 조도와 상관없이 색온도와 단파장 비율이 각각 약 2,500K~5,400K, 4%~18% 범위 내에 고루 분포하였고 색좌표 범위 또한 유사하였다.

3. 스마트폰 기반 파장 제어 LED 조명시스템

3.1 시스템 흐름도



(그림 4) 제안한 시스템의 흐름도
(Figure 4) Flow Chart of the Proposed System

본 논문에서 제안한 시스템은 크게 조명 빛 특성을 실측하기 위한 계측모듈과 조명제어모듈로 구성된다. 조명 빛 특성의 실측을 위해 스마트폰에 내장된 RGBW 컬러 센서 및 외부에 연동한 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)를 사용하고 조명제어를 위하여 Zigbee 무선 통신이 가능한 LED 컨트롤러 및 조광제어용 서버를 사용하였다.

그림 4는 본 논문에서 제안하는 조명제어시스템의 흐름도이다. 제안한 시스템은 다음과 같은 절차를 거쳐 재실자 주변의 빛 환경을 계측하고 각성 및 수면에 적합한 조광제어비율을 산출하여 서비스에 적용한다. 첫 번째, 스마트폰의 RGBW 컬러센서와 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)를 통해 현재 사용자 주변의 조명 빛에 대한 RGBW 센싱 데이터와 분광분포(SPD; Spectral Power Distribution) 데이터를 실측한다. 두 번째, RGBW 데이터를 XYZ 삼차극치로 변환한 후 색좌표 xy, 조도 Y, 색온도 CCT, 그리고 목표조도 별 각성 및 수면에 유효한 특정 단파장(446nm~477nm) 비율의 최소치와 최대치를 산출한다. 이때 RGBW->XYZ의 변환은 다중 회귀식을 활용하며 색온도 변환은 McCamy의 변환식을 적용하였다 [18]. 세 번째, 스마트폰에 저장된 고대근무자의 각성 및 수면 시점과 현재 조명 서비스 시점을 고려하여 목표조도 및 단파장 비율의 최소치 또는 최대치에 해당하는 조광제어비율을 검색한다. 서비스 시점이 각성에 해당하면 목표조도의 제어비율 후보군에서 단파장 비율이 최대치

인 조광제어비율을 최종 서비스 후보로 추출하고 수면 시점에 해당하면 단파장 비율이 최소치인 조광제어비율을 서비스에 적용한다. 이후 조광제어비율을 포함한 조명제어용 송신 패킷을 생성하여 LED 컨트롤러로 전송한다.

3.2 조명 빛 특성 계측

조명 빛 특성 계측 모듈은 스마트폰에 내장된 RGBW 컬러센서와 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)를 이용하여 Red, Green, Blue, White, 분광분포(SPD; Spectral Power Distribution) 데이터를 수집하고 이후 RGBW->XYZ 변환 및 McCamy 색온도 산출을 위한 알고리즘 처리, 단파장 비율 연산을 수행한다. 아래의 식 1~4는 각 처리 과정에 따른 수식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} X &= 0.1502R + 0.0291G - 0.0176B + 0.7951W - 7.26 & (\text{식1}) \\ Y &= -0.5645R + 0.8168G - 0.445B + 1.1337W - 10.3 \\ Z &= -0.1371R - 0.0190G + 1.1202B - 0.1809W + 4.13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X &= 0.3067R - 0.1156G + 0.0657B + 0.7144W - 0.06 & (\text{식2}) \\ Y &= 0.2349R + 0.1499G + 0.0901B + 0.3958W + 0.528 \\ Z &= -0.4071R + 0.2413G + 0.9211B + 0.0237W - 0.82 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= X/(X+Y+Z), y = Y/(X+Y+Z) & (\text{식3}) \\ n &= (x - 0.332)/(y - 0.1858) \\ CCT &= -437n^3 + 3607n^2 - 6861n + 5514.31 \end{aligned}$$

$$SW = \int_{446}^{477} S(\lambda) d\lambda, WW = \int_{380}^{780} S(\lambda) d\lambda \quad (\text{식4})$$

$SWR = (SW/WW) \times 100$
 *SW= Short Wavelength Area
 *WW= Whole Wavelength Area
 *SWR= Short Wavelength Ratio

식1과 식2는 RGBWC 조명과 WC 조명의 RGBW->XYZ 변환식을 각각 나타낸 것이다. RGBW->XYZ 변환식은 스마트폰의 RGBW 데이터와 색차조도계의 XYZ 데이터를 기반으로 다중 회귀식을 이용하여 도출하였다. 해당 변환식은 5개의 상수와 RGBW의 변수 4개로 구성되며 그 중 5개의 상수는 다중 회귀식에 의해 수학적으로 유도된 값이며 변수 4개는 스마트폰에서 실시간 측정된 데이터다. 스마트폰에 식1과 식2를 적용하여 산출한 XYZ와 색차조도계(CL-200A)에서 실측한 XYZ를 비교한 결과, 두 개 조명의 평균 오차율은 각각 2.314%(RGBWC), 0.943%(WC)를 나타냈다. 식 3은 색좌표를 기반으로 색온도 산출을 위해 사용된 McCamy의 색온도 변

환식이다[18-19]. 식 4는 소형 스펙트로미터(Mini-Spectrometer)로부터 수신한 분광분포 데이터를 기반으로 가시광선 전체 파장 범위(380nm~780nm)의 Absolute Irradiance와 생체리듬과 밀접한 연관이 있는 단파장 범위(446nm~477nm)의 Absolute Irradiance 관계를 백분율로 나타낸 것이다. Absolute Irradiance는 분광복사조도를 의미하며 단위는 $\mu\text{w}/\text{cm}^2/\text{nm}$ 를 사용한다. 아래 그림 5는 식1~식4에 해당하는 조명 빛 특성 계측 알고리즘의 의사코드이다.

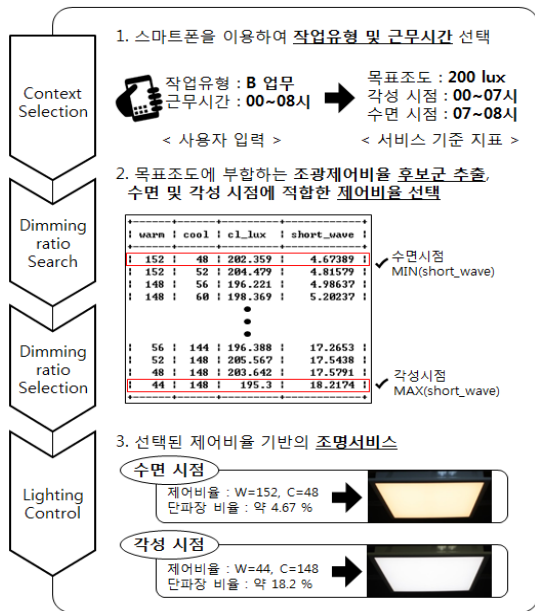
```
void function measureLightCharacteristic {
    set R to the value obtained from the color sensor;
    set G to the value obtained from the color sensor;
    set B to the value obtained from the color sensor;
    set W to the value obtained from the color sensor;
    set X to tristimulus X;
    set Y to tristimulus Y;
    set Z to tristimulus Z;
    set x to chromaticity x;
    set y to chromaticity y;
    set lux to illuminance;
    set cct to color temperature;
    If the current RGBWC Lighting true;
        X=0.1502*R+0.0291*G-0.0176*B+0.7951*W-7.26
        Y=-0.5645*R+0.8168*G-0.445B+1.1337*W-10.3
        Z=-0.1371*R-0.0190*G+1.1202*B-0.1809*W+4.13
    false;
        X=0.3067*R-0.1156*G-0.0657*B+0.7144*W-0.06
        Y=0.2349*R+0.1499*G+0.0901*B+0.3958*W+0.528
        Z=-0.4071*R+0.2413*G+0.9211*B+0.0237*W-0.82
    x=X/(X+Y+Z)
    y=Y/(X+Y+Z)
    lux=Y
    set mc for the McCamy CCT operation;
    mc=(x-0.332)/(y-0.1858)
    cct=-437*pow(mc, 3)+3607*pow(mc, 2)-6861*mc+5514.31}
```

(그림 5) 계측모듈의 의사코드
 (Figure 5) Pseudo-code of the Measurement module

3.3 LED 조명 제어

LED 조명제어모듈의 처리 절차는 다음과 같다. 우선 스마트폰에 저장된 교대근무자의 작업 유형과 근무 시간, 그리고 현재 조명 서비스 시점을 비교한 후, 목표조도에 부합하는 조광제어비율 후보군을 검색한다. 현 서비스 시점이 각성에 해당하면 목표조도의 조광제어비율 후보군 중 단파장 비율이 최대치인 제어비율을 최종 서비스 후보로 추출하고, 수면에 해당하면 단파장 비율이 최소치인 제어비율을 선택한다. 그런 다음 Zigbee 무선통신을 기반으로 해당 조광제어비율을 포함한 조명제어용

송신 패킷을 생성하여 LED 컨트롤러로 전송한다. 그림 6은 WC 조명을 대상으로 목표조도가 200lux일 때 부합하는 조광제어비율을 검색한 후 단파장 비율의 최대치 및 최소치에 해당하는 제어비율로 조명을 제어하는 일련의 과정을 나타낸 것이다.



(그림 6) 각성 및 수면 주기에 따른 조명 서비스의 절차
(Figure 6) The procedures of Lighting service according to sleep-wake cycle

4. 조명서비스 결과

4.1 서비스 시점 및 조명제어지표

본 연구에서 제안한 시스템은 교대근무자의 각성 시점을 ‘업무 시작 시간’ 부터 ‘업무 종료 1시간 전’ 으로 정하고, 수면 시점은 ‘업무 종료 1시간 이전’ 부터 ‘업무 종료 시간’으로 설정하였다. 또한 교대근무시간을 총 8시간씩 3교대로 정하여 01반은 00시~08시, 02반은 08시~16시, 03반은 16시~24시로 구분하였다. 즉 01반의 각성 시점과 수면 시점은 각각 00시~07시와 07시~08시, 02반은 08시~15시와 15시~16시, 03반의 경우 각각 16시~23시와 23시~24시에 해당한다. 작업 유형에 따른 목표조도는 다음과 같다. ‘A업무’는 목표조도100 lux, ‘B업무’는 200lux, ‘C업무’는 400 lux로 설정하였다. 작업 유형은 KS 3011

조도기준을 기반으로 설계한 것으로서 ‘A업무’는 ‘빈번하지 않은 시 작업’을 의미하며, ‘B업무’는 ‘고휘도대비 혹은 큰 물체 대상의 시 작업’, ‘C업무’는 ‘일반휘도대비 혹은 작은 물체 대상의 시 작업’으로 정의된다[20].

4.2 각성 및 수면 시점에 따른 조명서비스

본 장에서는 제안한 시스템을 적용하여 조명 빛을 자동으로 제어하고 조절된 빛의 특성을 계측하여 정확도를 확인하였다.

표 5는 작업 유형 및 제어지표에 따라 서비스된 조명 빛 특성을 계측하여 그 결과를 비교한 것이다. 표 5의 RGBWC 조명에서 blue 광원의 제어비율을 살펴보면 각 목표조도마다 각성 시점에 255, 수면 시점에는 최대치인 255가 추출되었다. 즉, blue가 단파장 비율을 기반으로 조명환경을 조절할 경우 다른 광원에 비해 가장 큰 영향을 미치는 광원임을 확인하였다. WC 조명의 특성을 살펴보면 각성 시점에는 warm white 광원의 제어비율은 44단계로 유지하면서 cool white 광원의 제어 비율만을 점차 높여야 한다. 반면에, 수면 시점에는 cool white 광원의 제어 비율을 44~48단계로 유지하면서 warm white 광원의 제어 비율만을 조절해야 한다. 두 개 조명의 차이점을 살펴보면 각성 및 수면 시점에 따라 변화하는 WC 조명의 단파장 비율은 약 4%~18% 범위 내에서 목표조도의 증감여부에 따라 비례하는 패턴을 보였다. 이와 달리 RGBWC 조명의 단파장 비율은 목표조도변화와 상관없이 약 0.9%~35.6% 범위 내에서 불규칙하게 변화하였다.

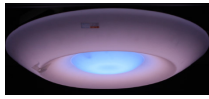
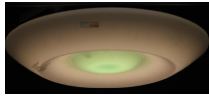

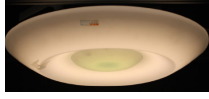
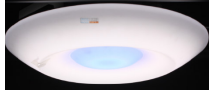


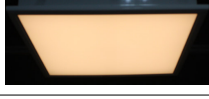
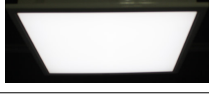
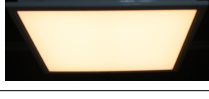
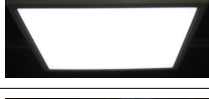

표 6은 RGBWC 조명과 WC 조명을 대상으로 구현한 시스템을 적용하여 서비스 한 결과이다. 테이블에 나타난 바와 같이 조명의 종류 및 작업 유형에 따라 목표조도와 ‘각성’, ‘수면’의 서비스 시점을 구분한 후 조도 및 단파장 비율의 변화를 실측하였다. 두 조명 모두 서비스 시점에 따라 목표조도에 부합하는 빛의 밝기 및 단파장 비율로 서비스됨을 확인하였다. 또한, RGBWC 조명은 다양한 광원의 조합으로 목표조도의 변화에 따라 빛의 밝기뿐만 아니라 색상이 다양하게 변화하는 반면 WC 조명은 주로 빛의 밝기와 두 가지 색상 변화만을 인지할 수 있었다. 즉 광원의 조합에 따라 LED 백색조명은 그 용도와 적용처가 다를 수 있으며, 인간에게 친숙한 자연광의 특성을 기준으로 두 개 조명을 비교할 때 대부분의 색좌표가 플랑키안 궤적(Planckian Locus)에 위치하면서 단파장 비율 및 빛의 색상 변화가 일정한 WC 조명이 RGBWC 조명보다 전조명으로 더욱 적합할 것으로 보인다.

(표 5) 작업유형과 서비스 시점에 따른 조명별 특성 분석

(Table 5) Characteristic Analysis of Lightings according to Work type and Service Time

| 작업 유형 | 제어 시간 | 목표조도 및 단파장비율 | 데이터 타입 | 조명 모델 | | | | | |
|-------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|--|
| | | | | RGBWC Lighting | | WC Lighting | | | |
| | | | | 측정된 조도 및 단파장비율(SPD) | 측정된 색좌표 | 측정된 조도 및 단파장비율(SPD) | 측정된 색좌표 | | |
| A | 00~07 08~15 16~23 | 100 lux Maximum | 제어비율 | (64, 255, 255, 64, 0) | | (44, 120) | | | |
| | | | 수치 | 102 lux, 35.6 % | (0.254646, 0.21841) | 102 lux, 17.97 % | (0.317771, 0.331436) | | |
| | 그래프 | Wavelength Graph | | CIE1931 | | Wavelength Graph | | CIE1931 | |
| | | 제어비율 | (192, 192, 0, 64, 0) | | (120, 44) | | | | |
| 수치 | 95 lux, 0.976 % | (0.451747, 0.451601) | 91 lux, 3.92 % | (0.45481, 0.395971) | | | | | |
| 그래프 | Wavelength Graph | | CIE1931 | | Wavelength Graph | | CIE1931 | | |
| B | 00~07 08~15 16~23 | 200 lux Maximum | 제어비율 | (128, 128, 255, 192, 0) | | (44, 148) | | | |
| | | | 수치 | 201 lux, 21.9 % | (0.345029, 0.273682) | 201 lux, 18.03 % | (0.323726, 0.340551) | | |
| | 그래프 | Wavelength Graph | | CIE1931 | | Wavelength Graph | | CIE1931 | |
| | | 제어비율 | (192, 128, 0, 192, 0) | | (152, 48) | | | | |
| 수치 | 200 lux, 3.55 % | (0.463844, 0.415889) | 198 lux, 4.67 % | (0.449485, 0.406778) | | | | | |
| 그래프 | Wavelength Graph | | CIE1931 | | Wavelength Graph | | CIE1931 | | |
| C | 00~07 08~15 16~23 | 400 lux Maximum | 제어비율 | (64, 255, 255, 128, 64) | | (44, 208) | | | |
| | | | 수치 | 394 lux, 21.76 % | (0.313027, 0.295716) | 421 lux, 18.36 % | (0.325395, 0.345345) | | |
| | 그래프 | Wavelength Graph | | CIE1931 | | Wavelength Graph | | CIE1931 | |
| | | 제어비율 | (255, 255, 0, 128, 64) | | (220, 44) | | | | |
| 수치 | 404 lux, 12.2 % | (0.366887, 0.36387) | 407 lux, 4.17 % | (0.45785, 0.41588) | | | | | |
| 그래프 | Wavelength Graph | | CIE1931 | | Wavelength Graph | | CIE1931 | | |

(표 6) 조명서비스 결과
(Table 6) The Result of Lighting service

| 조명타입 및 작업유형 | 목표조도 서비스시점 | 조도 및 단파장비율 | 조명 서비스 |
|----------------|---------------|--------------------|---|
| RGBWC 'A' | 100lx '각성' | 103 lux 35.6 % |  |
| | 100lx '수면' | 95 lux 0.976 % |  |
| RGBWC 'B' | 200lx '각성' | 202 lux 21.9 % |  |
| | 200lx '수면' | 199 lux 3.55 % |  |
| RGBWC 'C' | 400lx '각성' | 395 lux 21.76 % |  |
| | 400lx '수면' | 403 lux 12.2 % |  |
| WC 'A' | 100lx '각성' | 102 lux 17.97 % |  |
| | 100lx '수면' | 91 lux 3.92 % |  |
| WC 'B' | 200lx '각성' | 201 lux 18.03 % |  |
| | 200lx '수면' | 198 lux 4.67 % |  |
| WC 'C' | 400lx '각성' | 421 lux 18.36 % |  |
| | 400lx '수면' | 407 lux 4.17 % |  |

5. 결론 및 향후연구방향

본 논문에서는 교대근무자를 대상으로 스마트폰에 내장된 컬러센서를 이용하여 주변 빛 특성을 계측하고, '각성' 및 '수면' 시점에 따라 단파장 비율 조절이 가능한 조명시스템을 제안하였다.

제안한 시스템은 스마트폰에 부가적으로 소형 스펙트럼로미터(Mini-Spectrometer)를 연동하여 저렴한 비용으로 언제 어디서나 손쉽게 조명 빛의 상세 정보를 계측하여 '각성'이 필요한 시점에는 단파장 비율이 최대치인 제어 비율로 조명 빛을 서비스하고 '수면'이 필요한 시점에 이르러 단파장 비율이 최소치인 제어비율로 서비스를 제공한다. 이를 통해 교대근무자의 근무 시간대에는 멜라토닌 분비를 최대 억제시켜 사고 발생의 위험도를 최소화하고, 퇴근 무렵에는 멜라토닌 분비량을 촉진시킴으로써 수면 장애 현상을 방지하도록 설계하였다.

시스템 개발을 위해 먼저 교대근무자의 작업 유형과 근무 시간에 따른 '각성' 및 '수면' 시점, 그리고 조명제어 지표를 정의하였다. 그런 다음 교대근무자의 작업 유형과 조명 서비스 시점에 따라 목표조도 및 단파장 비율의 최대치 또는 최소치로 서비스를 제공 한 후 빛의 특성을 실측하여 지표와 비교하였다. 조명서비스 결과, 두 개 조명 모두 서비스 중인 조도가 목표조도에 부합하였고 서비스 시점에 따라 단파장 비율이 적합하게 조절되었음을 확인하였다.

향후에는 24절기, 기상조건 및 시간에 따라 변화하는 자연광 특성을 실측 및 분석하고, 자연광의 시간대별 단파장 비율을 제어지표로 활용하여 창이 없는 실내공간에 오랜 시간 상주하는 근무자에게 건강한 조명 빛을 서비스하기 위한 시스템 개발에 대한 연구를 진행할 것이다.

참 고 문 헌 (Reference)

[1] Kim gon, "Healthy Light in the Era of Well-being", Architectural Institute of Korea, Volume. 49, No. 5, pp. 51-55, June 2005.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00595270>

[2] Yunjung Kwon, "LED Control For Therapy Using Comparator", Conference of Korean Society For Internet Information, Volume. 14, No. 2, 2013.
<http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02279520>

- [3] Soyoung Ahn, Dongmin Shin, Dongkyu Shin, Dongil Shin, "Analysis of user state and living space control system using EEG", Conference of Korean Society For Internet Information, Volume. 15, No. 2, 2014. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06140760>
- [4] RTA Prado, FL Ferreira, "Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials", Energy and Buildings, Volume. 37, No. 4, pp. 295-300, April 2005. 10.1016/j.enbuild.2004.03.009
- [5] SW Lockly, et al., CA Czeisler, "High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light", J Clin Endocrinol Metab, Volume. 88, No. 9, pp. 4502-4505, September 2003. <http://dx.doi.org/10.1210/jc.2003-030570>
- [6] HR Wright, LC Lack, DJ Kennaway, "Differential effects of light wavelength in phase advancing the melatonin rhythm", Journal of Pineal Research, Volume. 36, No. 2, pp. 140-144, January 2004. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1600-079X.2003.00108.x>
- [7] Kyoung-Sil Kim, An-Seop Choi, "Study of Relationship between Light and Melatonin", The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp. 7-8, November 2011. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01787878>
- [8] Lucy A. Nweman, Marquis T. Walker, R. Lane Brown, et al., "Melanopsin forms a functional short-wavelength photopigment", Biochemistry, Volume. 42, No. 44, pp. 12734-12738, October 2003. <http://dx.doi.org/10.1021/bi035418z>
- [9] Christian Cajochen, et al., "High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light", The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, Volume. 90, No. 3, pp. 1311-1316, March 2005. <http://dx.doi.org/10.1210/jc.2004-0957>
- [10] Takeshi Morita, Hiromi Tokura, "The Influence of Different Wavelengths of Light of Human Biological Rhythms", Applied Human Science, Volume. 17, No. 3, pp. 91-96, 1998. <http://doi.org/10.2114/jpa.17.91>
- [11] Jung Ho-Youn, Choi Jong-Dae, Lee Sa-Ra, Yun Geun_Young, "The Changes of Circadian rhythm on Wavelength of Light", Architectural Institute of Korea, Volume. 32, No. 2, pp. 309-310, October 2012. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02216747>
- [12] Kim Yang-Soo, et al., "LED Lighting System based on Smartphone possible of Wavelength Control", Conference of Korean Society For Internet Information, Volume. 16, No. 1, 2015. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06297726>
- [13] Sook-Youn Kwon, "Design of Natural Light Reproduction System using a Matching Algorithm based on Chromaticity Coordinates", PhD dissertation, Dept. of Computer Science & Engineering, Kongju National University, December 2013. <http://www.riss.kr/link?id=T13373917>
- [14] C.N. Ong, et al., "Shiftwork and work injuries in an iron and steel mill", Applied Ergonomics, Volume. 18, No. 1, pp. 51-56, March 1987. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870\(87\)90070-6](http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870(87)90070-6)
- [15] Timothy H. Monk, et al., "Maintaining safety and high performance on shiftwork", Applied Ergonomics, Volume. 27, No. 1, pp. 17-23, February 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00048-8](http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870(95)00048-8)
- [16] Dea-Ho Kim, Sang-Seol Lee, "The Analysis of Influences that Night Work of Shiftworkers affect at Sleep and Social Life", Korean Association of Human Resource Development, Volume. 2, No. 2, pp.163-182, December 2000. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE00502188>
- [17] Sun Jung Han, Eun Yeon Joo, "Circadian Rhythm Sleep Disorders", J Kor Sleep Soc, Volume. 5, pp. 74-81, December 2008. <http://dx.doi.org/10.13078/jksrs.08013>
- [18] C. S. McCamy, "Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates", Color Research & Application, Volume. 17, No. 2, pp. 142-144, April 1992. <http://dx.doi.org/10.1002/col.5080170211>
- [19] In-Tae Kim, et al., "Comparison of Calculated and Measured CCT of the Light Sources", The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp. 103-106, March 2010. <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01458354>
- [20] "KSA 3011", Recommended levels of illumination, 1998. http://www.kssn.net/StdKS/KS_detail.asp?K1=A&K2=3011&K3=2

● 저 자 소 개 ●



김 양 수 (Yang-Soo Kim)

2014년 공주대학교 컴퓨터공학부 소프트웨어공학전공(공학사)

2015~현재 공주대학교 컴퓨터공학과(석사과정)

관심분야 : 모바일 서비스, 사물 인터넷, 상황인식

E-mail : kmarine89@kongju.ac.kr



권 속 연 (Sook-Youn Kwon)

2000년 한국방송통신대학교 컴퓨터학과(이학사)

2002년 공주대학교 대학원 전자계산학과(이학석사)

2014년 공주대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)

2014~현재 공주대학교 스마트자연공간연구센터 연구교수

관심분야 : 상황인식, 건물에너지관리, 상황조명, 식물공장, USN Service

E-mail : sookyou@kongju.ac.kr



황 준 (Jun Hwang)

1985년 중앙대학교 컴퓨터공학과(공학사)

1987년 중앙대학교 컴퓨터공학과(공학석사)

1991년 중앙대학교 컴퓨터공학과(공학박사)

1992~현재 서울여자대학교 정보미디어학과 멀티미디어학과 교수

관심분야 : Convergency Computing, Digital Broadcasting

E-mail : hjun@swu.ac.kr



임 재 현 (Jae-Hyun Lim)

1986년 중앙대학교 전산계산학과(이학사)

1988년 중앙대학교 대학원 전자계산학과(이학석사)

1998년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)

1998~현재 공주대학교 컴퓨터공학부 교수

관심분야 : 상황인식, 건물에너지관리, 상황조명, 식물공장, USN Service

E-mail : defacto@kongju.ac.kr