

## 동적 LED 시스템의 조명원적 성능분석

김효인\*, 김정태\*\*, 윤근영\*\*

\*경희대학교 대학원 건축공학과(hyoinkim@khu.ac.kr),  
\*\*경희대학교 건축공학과(jtkim@khu.ac.kr, gyyun@khu.ac.kr)

### Evaluation on the lighting performance of a dynamic LED lighting system

Kim, Hyo-in\* Kim, Jeong-Tai\*\* Yun, Geun-Young\*\*

\*Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, Kyung Hee University(hyoinkim@khu.ac.kr),  
\*\*Dept. of Architectural Engineering, Kyung Hee University(jtkim@khu.ac.kr, gyyun@khu.ac.kr)

#### Abstract

LED lighting has received much attention in recent years due to its high energy efficiency and environmental friendliness. As the color of light can be obtained by adjusting the light intensity of LEDs, the quality of visual environment can be improved. The aims of this study are to develop a wavelength adjustable LED lighting system and to examine its lighting performances. The LED lighting system and experimental cell for assessment of the lighting performance were constructed. This LED lighting system is able to materialize the various spectral power distribution and color temperature of light through the control of the four dimmers. Up to 432<sup>4</sup> kinds of light combinations are possible. The range of illuminance on workplane were measured as 7~1,831 lx. Improvement of psychological and physical functions for occupants can be expected according to control of lighting performances.

Keywords : 동적 LED 조명 시스템(Dynamic LED lighting system), 분광분포(Spectral power distribution), 색온도(Color temperature)

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구의 목적 및 배경

발광다이오드(Light Emitting Diode: LED) 조명은 백열등, 형광등과 달리 전기에너지를 빛에너지로 전환하는 효율이 높다. 수명이

10년을 넘을 뿐만 아니라, 수은과 같은 유해 물질이 없어 에너지 절약적이고, 친환경적인 조명광원으로 최근에 많은 주목을 받고 있다. 또한 정부는 이러한 장점을 감안하여 2015년까지 LED 보급률을 30% 선으로 끌어올린다는 '15/30 프로젝트'를 추진하는 등 차세대 광원의

투고일자 : 2011년 3월 8일, 심사일자 : 2011년 3월 21일, 게재확정일자 : 2011년 4월 5일  
교신저자 : 윤근영(gyyun@khu.ac.kr)

로써 기대가 매우 높다.<sup>1)</sup>

RGB LED의 경우, 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색의 LED로 구성되어 있기 때문에 빛의 세기를 조절하여 원하는 색을 얻을 수 있다.<sup>2)</sup> 조명계획에 있어서 작업공간에 적당한 밝기의 빛을 확보하는 것도 중요하지만, 공간이나 작업의 특성에 따른 CCT 및 시환경의 질적 개선이 중요하다.<sup>3)</sup> 따라서 RGB LED를 조절하여 질적으로 향상된 시환경을 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

최근 건강에 대한 관심이 높아짐에 따라, 빛과 생체리듬(Circadian rhythm)에 관한 연구도 관심이 높아지고 있다. 빛은 생체리듬에 직접적인 영향을 미치는 요인 중 하나이며, 빛의 세기뿐만 아니라 색온도, 빛의 파장 또한 인간의 행동이나 건강에 영향을 줄 수 있다.<sup>4)5)</sup> 따라서 건강성 향상을 위한 시간대별 빛의 강도와 광원의 파장 특성 등에 대한 연구의 중요성과 기대는 더욱 커질 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 가시광선 영역대의 빛의 파장별 강도(Spectral Power Distribution: SPD)를 조절할 수 있는 동적 LED 조명 시스템을 제시하고, 나아가 건축 적용 및 제어 방법을 개발함으로써, 재실자의 웰빙과 건강을 제고하고자 한다. 본 연구의 목적은 SPD의 조절이 가능한 동적 LED 조명 시스템을 개발하고, 이것의 광원의 파장별 빛의 강도, 색온도, 연색성 등 조명원적 성능을 파악하는 것이다. 이는 추후에 자연광과 결합된 저탄소

실내조명설계의 기초자료로 제시될 것이다.

## 1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 SPD와 색온도에 따른 재실자의 심리적 건강의 향상을 위한 동적 LED 조명 시스템과 제어 모델을 구축하기 위하여, 백색 LED와 RGB LED를 이용하여 동적 LED 조명 시스템을 개발하였다. 또한 본 시스템의 조명원적 특성을 파악하기 위하여, 개발된 동적 LED 조명 시스템으로 구현이 가능한 SPD, 조도, 색온도 등을 실측하였다. 측정된 데이터를 통하여 본 실험에서는 동적 LED 조명 시스템의 광학적 요소의 구현 범위를 파악하고, 신뢰성을 검토하고자 하였다.

## 2. 연구방법론

### 2.1 동적 LED 조명 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 동적 LED 조명 시스템은 가시광선 영역대의 SPD를 조절할 수 있으며, 빛의 색과 강도도 조절이 가능하다. 본 연구의 동적 LED 조명 시스템은 조광기를 사용하여, 발광부의 백색 LED 소자와 RGB LED 소자로 입력되는 전력의 세기를 조절할 수 있기 때문에 매우 다양한 색과 강도의 빛을 방출할 수 있다.

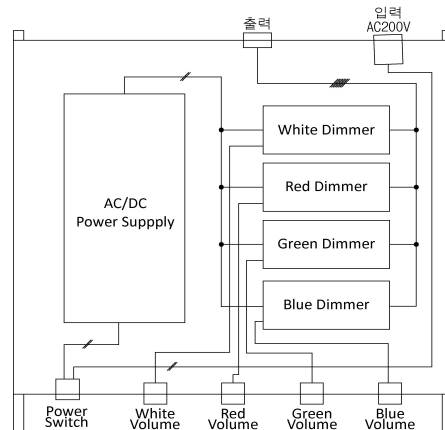


그림 1. 동적 LED 조명 시스템의 구성

- 1) 김권, [우리 지역 이 사업은 꼭<9>광주-LED 조명도시, 동아일보, A10면, 2008.7.15
- 2) Schubert, E.F., Lighting-Emitting Diodes, Cambridge University Press, 2006
- 3) 백승현, 정인영, 신화영, 김정태, LED광원과 형광광원의 상관색온도가 시 작업 성능에 미치는 영향, 한국조명·전기설비학회논문지, 제23권, 제1호, pp.18~26, 2009
- 4) Figueiro, M.G., Rea, M.S., Lack of short-wavelength light during the school day delays dim light melatonin onset(DLMO) in high school students, Neuroscience Letters, Vol.31, No.1, pp.92~96, 2010
- 5) Morita, T., Tokura, H., Effects of lights of different color temperature on the nocturnal changes in core temperature and melatonin in humans, Applied Human Science, Vol.15, No.5 pp.243~246, 1996

그림 1은 본 동적 LED 조명 시스템을 나타내는 도면이며, 전원장치와 백색 LED, RGB LED 소자로 보내지는 전력을 조절할 수 있게 구성되어 있다. 조광기는 4개의 조절기를 가지고 있으며, 각각 백색, 적색, 녹색, 청색 LED 소자에서 방출되는 광속을 증감시킬 수 있다. 또한 4가지 색을 조합한 조절이 가능하다. 백색 LED, RGB LED 모두 빛의 강도를 조절할 수 있지만, RGB LED 발광부는 주로 빛의 색을 구현하고, 백색 LED 발광부는 빛의 색을 유지하면서, 강도를 보정해주는 역할을 한다. 따라서 다양한 빛의 색을 구현하면서, 조명 기구로부터 방출되는 빛의 강도를 자유롭게 조절할 수 있는 장점이 있다. 그림 2는 동적 LED 조명 시스템의 발광부의 모습이다. 발광부는 길이 1.2m, 폭 0.3m의 직사각형 형태이며, 기존의 2등용 형광등 패널의 크기와 같다. 백색 LED 소자와 RGB LED 소자가 한 쪽에 몰려서 배열되지 않고 교대로 번갈아가며 배열되어 있어, 조명 장치로부터 전체적으로 같은 색상의 광이 방출되는 특징이 있다.

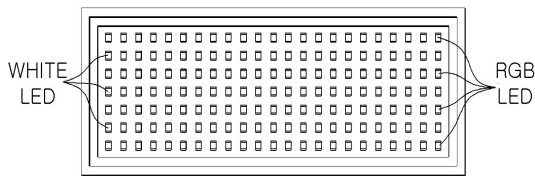


그림 2. 동적 LED 조명 시스템의 발광부

표 1은 LED 발광부에 사용된 LED 소자의 특성을 나타낸다. 백색 LED 소자와 RGB LED 소자는 동일한 크기이며 최대 70,000시간을 사용할 수 있다. 백색 LED는 5,000~8,000mcd의 광도를 구현할 수 있다. RGB LED의 경우, 적색 소자는 618~635nm, 녹색 소자는 520~535nm, 청색 소자는 455~475nm에서 피크점을 갖는 파장 분포를 보인다.

표 1. LED 소자의 특성

특성			
크기	5.5×5.0×1.6 mm (L×W×H)		
수명	최대 70,000 시간		
기타	백색 LED	광도[mcd]	5,000~8,000
	RGB LED	주요파장 [nm]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 적색: 618~635</li> <li>· 녹색: 520~535</li> <li>· 청색: 455~475</li> </ul>

## 2.2 실험실 개요

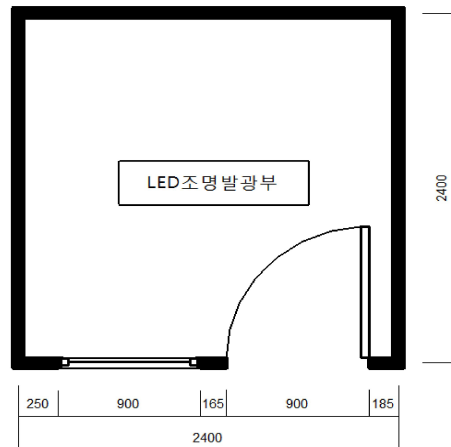


그림 3. 실험실의 모습

LED 조명이 설치된 실험실의 모습은 그림 3과 같다. 실험실의 크기는 2.4m(W) × 2.4m(D) × 2.68m(H)이며, 0.9m(W) × 0.9m(H)의 창을 가진다. LED 조명기구는 천장의 중앙부에 설치하였다. LED 조명에서 방출되는 빛의 색을 그대로 나타나게 하기 위하여, 내부벽체는 흰색으로 마감하였다. 또한, 실험시 외부로부터 유입되는 빛의 영향을 배제하기 위하여, 실험실의 창문은 내부 마감색과 동일한 흰색의 판으로 차단하였다. 창문을 차단시킨 이유는 외부의 빛이 실의 내부로 들어오게 되면 LED 조명이 특정 기능을 향상시킬 수 있는 빛을 방출하더라도, 외부의 빛에 의하여 그 기능을

제대로 수행하지 못할 가능성이 높아지기 때문이다. 내부벽체의 마감재의 반사율은 벽이 0.79, 창문의 차단판이 0.75, 바닥이 0.30이다.

### 2.3 측정방법

본 연구에서 개발한 LED 조명의 성능을 분석하기 위하여, 조도와 분광특성에 대하여 측정하였다. Topcon IM-5를 이용하여 작업면의 수평면 조도를 측정하였고, 파장, 색온도, 연색성 등에 대한 분광특성의 측정은 AVASpec-3648 UV/VIS Spectrometer를 사용하였다. 측정요소와 측정기기는 표 2와 같다. 실험자는 각 측정요소를 LED 조명의 하단부에서 작업면의 높이인 0.85m에서 측정하였다.

표 2. 측정요소와 측정기기

측정요소	측정기기	기기특성
조도, 반사율	 Topcon IM-5	<ul style="list-style-type: none"> <li>측정범위: 0.01~199,990 lx</li> <li>정밀도: ±2% rdg + 1 digit</li> </ul>
SPD, 색온도, 색좌표, 연색지수	 AVASpec-3648 UV/VIS Spectrometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>파장: 200~1,100nm</li> <li>레졸루션: 0.025~20nm</li> <li>미광: &lt;0.1%</li> <li>감광도: 14,000(counts/μW)/ms</li> <li>통합시간: 10μs - 10 minutes</li> </ul>

## 3. LED 파장조절기의 성능분석

### 3.1 조합별 파장 분포

그림 4는 LED 소자의 색의 조합에 대한 대표적인 SPD를 나타낸다. 그림 a, b, c, d는 4개의 조절기의 전력값을 각각 최대로 하였을 때의 SPD이다. 전력값이 최대일 때, 적색 LED 소자는 파장이 634nm에서 녹색 LED 소자는 517nm, 청색 LED 소자는 455nm에서 하나의 피크점을 가진다. 백색 LED 소자의 경우에는 425~725nm 사이에서 파장 분포를

보이고, 2개의 피크점을 가지며, 456nm에서 최대값을 가진다. 적색 LED 소자와 녹색 LED 소자, 청색 LED 소자의 전력값을 모두 최대로 한 e의 경우에는 3가지의 파장이 혼합되어 3개의 피크점을 가지며, 가장 큰 값은 456nm에서 나타났다. 백색 LED 소자와 RGB LED 소자의 전력값을 최대로 한 경우, 백색 LED 소자와 RGB LED 소자의 파장이 모두 혼합되어 나타났다.

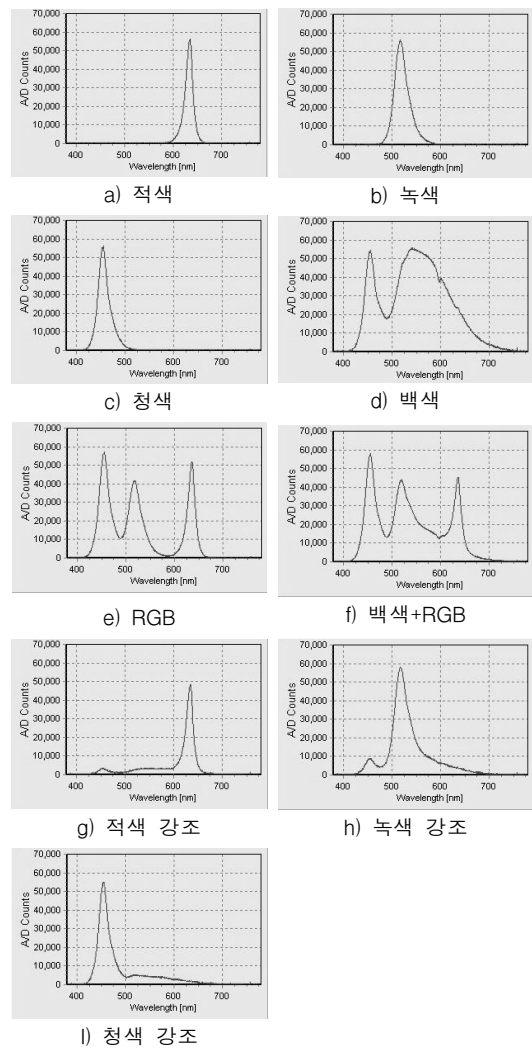


그림 4. LED 소자의 색 조합에 대한 대표적인 SPD

그림 4의 g, h, i의 경우는 4개의 조절기를

모두 조절하되, 적색, 녹색, 청색의 파장이 강조되는 SPD를 나타낸 것이다. 피크점은 그림 4의 a, b, c의 경우와 유사한 값을 갖지만, SPD는 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이처럼 각 LED 소자의 조합과 입력되는 전력의 세기에 따라 다양한 SPD를 구현할 수 있다.

### 3.2 조도

백색 LED와 RGB LED를 조합하여 출력하였을 때, 본 동적 LED 조명시스템에서 1.83m 떨어진 작업면의 최소 수평면조도는 7 lx, 최대 수평면조도는 1,831 lx로 나타났다. 조절이 가능한 조도의 최소 범위는 1 lx 이다.

### 3.3 색온도

본 연구의 동적 LED 조명 시스템은 다양한 색온도의 구현이 가능하다. 표 3은 본 동적 LED 조명 시스템을 사용하여 대표적인 자연광원과 인공광원의 색온도를 나타내는 색좌표와 연색지수(Color Rendition Index: CRI)를 측정된 것이다. 비교를 위한 자연광원은 일몰, 출몰, 정오일 때 태양의 색온도와, 구름의 양에 따른 하늘의 색온도를, 인공광원은 백열등, 백색 형광등, 주황색 형광등의 색온도를 선정하였다.<sup>6)</sup> 광색의 색온도가 3,300K 미만일 경우에는 따뜻한 인상을 주며, 5,300K 이상일 경우에는 시원한 인상으로 분류된다.<sup>7)</sup>

표 3은 개발된 동적 LED 조명 시스템을 이용하여 구현한 대표적인 색온도의 색좌표와 연색지수를 나타내며, 이것을 CIE 1931의 색도도(Chromaticity diagram)에 나타내면 그림 5와 같다. 이상적인 무채색의 경우는 색도도에서 점 E에 위치한다. 색의 순도는 점 E와 거리가 멀수록 높고, 색상은 점 E와 연결한 직선이 만나는 파장의 색에 따라 결정된다.

그러나 백색 LED와 RGB LED의 전력의 세기에 따라 크기는  $432^4$ 가지의 조합이 가능하므로, 동일한 색온도일지라도 표 3에서 나타난 색좌표 이외에도 다양한 색좌표를 구현할 수 있다. 예를 들어, 그림 6은 색온도가 5,300K으로 모두 동일하지만, 다양한 색좌표와 SPD를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 연색지수의 경우에도 92로 높은 값을 가지는 조합이 있다.

표 3. 대표적인 색온도 구현을 위한 색좌표와 연색지수

	색온도 (K)	x	y	CRI	광색의 인상	예
1	2,000	0.303	0.169	16	따뜻함	태양 (일몰, 출몰), 촛불
2	3,000	0.415	0.358	54		백열등(200W)
3	3,300	0.404	0.363	53	중간	백색 형광등 태양(정오)
4	4,500	0.250	0.158	4		
5	5,000	0.356	0.499	62		
6	5,300	0.338	0.360	89		
7	6,500	0.301	0.411	84	시원함	얇게 고루 구름 낀 하늘, 주황색 형광등
8	8,000	0.308	0.263	21		약간 구름 낀 하늘
9	12,000	0.291	0.245	45		맑고 깨끗한 하늘

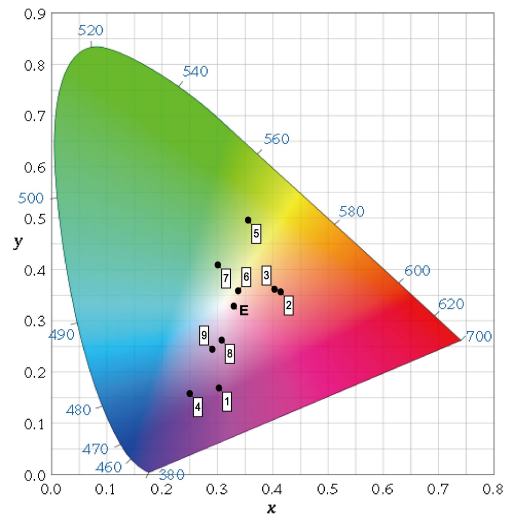


그림 5. 대표적인 색온도의 구현

6) 장우진, 황명근, 박승욱, 이성남, 노재엽, 조현민, LED조명기술개론, 도서출판 아진, 2009

7) Loe, D., Tregonza, P., The design of lighting, Taylor & Francis, p.27, 1998

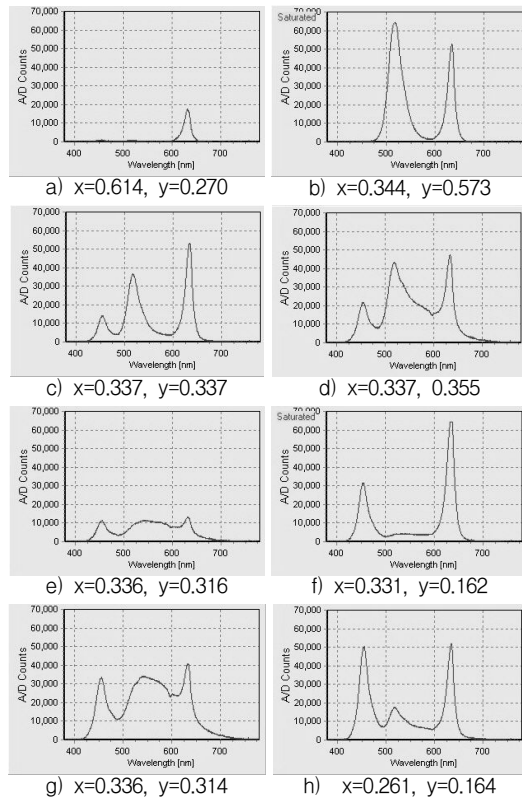


그림 6. 색온도 5,300K를 구현할 수 있는 여러 조합의 SPD

### 3.4 색온도 및 색좌표 구현의 예: 조도 (500 lx)

CIBSE(Chartered Institution of Building Services Engineers)의 Guide A: Environmental design에 의하면 사무실의 작업면 기준 조도는 500 lx이다.<sup>8)</sup> 본 동적 LED 조명 시스템이 기준 조도인 500 lx에서 빛의 특성을 얼마나 다양하게 구현하지 살펴보았다. 각 LED 소자에 입력되는 전력의 세기는 최대 432등급으로 분류가 가능하며, 이 경우 432<sup>4</sup>가지의 조합이 가능하다. 다만, 모든 경우의 수를 측정하는 것은 현실상 어려우므로, 본 연구에서는 전력의 세기를 5등급으로 나누었다. 측정 결과, 625가지의 조합 중 500 lx의 빛을 낼 수

8) CIBSE, Guide A: Environmental design, London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 2007

있는 조합은 147가지였다. LED 조명이 500 lx의 빛을 방출할 때, 나타나는 색좌표는 그림 7과 같다. 조도가 500 lx로 동일하지만, 구현되는 색은 각기 다른 것을 알 수 있다.

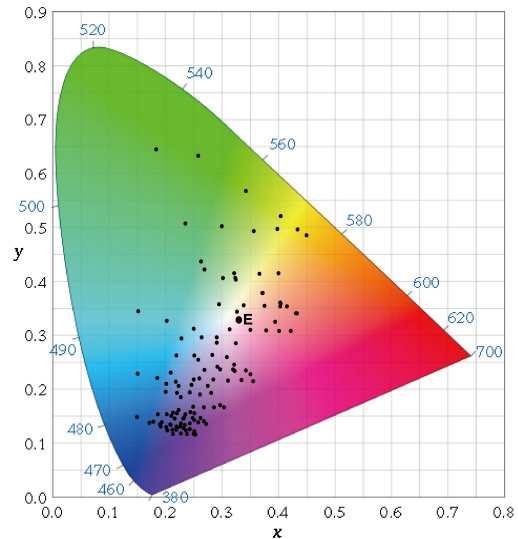


그림 7. 조도가 500 lx일 때 색좌표

그림 8은 조도가 500 lx일 때, 색온도의 상대빈도를 나타낸다. 이때의 평균 색온도는 5,591K(SD=4,363)이다. 조도가 500 lx일 때, 색온도는 2,000K에서 23,750K까지 나타난다. 측정된 색온도 중 74%가 6,250K 이하에서 분포함을 알 수 있다. 따라서 500 lx의 조도에서 광색의 느낌은 시원함보다는 따뜻하거나 중간의 느낌을 주는 빛이 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 연색지수의 경우, 최소 0에서 최대 89까지 고르게 분포하고 있다. 측정된 값 중 연색지수가 60이 넘는 경우는 29%를 차지한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 재실자의 건강과 공간의 특성에 적합한 시작업 환경의 조성을 위한 광원의 SPD 및 색온도의 조절이 가능한 동적 LED 조명 시스템을 개발하였다. 본 조명 시

시스템에 대한 조명원적 성능을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 동적 LED 조명 시스템은 조광기의 백색 LED, 적색 LED, 녹색 LED, 청색 LED의 4개의 전력의 세기를 조절함으로써 빛의 SPD와 색온도를 다양하게 구현할 수 있다. 조광기는 개별적으로 조절이 가능하므로 최대 432<sup>4</sup>가지의 빛의 조합이 가능하며, 최소 7 lx에서 최대 1,831 lx의 조도가 구현이 가능하다.
- (2) 개발된 조명 시스템은 대표적인 자연광원과 인공광원의 색온도를 포함하여 나타내고자 하는 다양한 색온도를 표현할 수 있다. 동일한 색온도를 나타낼 수 있는 빛의 조합이 다양하기 때문에, SPD, 조도, 연색지수 등이 다른 여러 가지의 빛을 얻을 수 있다. 또한 동일한 조도 하에서도, 여러 빛의 조합에 따라 다양한 특성을 가진 빛을 구현할 수 있다.

이와 같은 동적 LED 조명 시스템은 빛의 SPD와 색을 자유롭게 조절할 수 있기 때문에, 재실자의 생리적·지적 기능의 향상을 위한 추후 연구에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

광원의 조명원적 특성을 더욱 정밀하게 제어할 수 있는 LED 조명용 확산판이 현재 개발 중에 있다. 또한 LED 소자만을 이용한 조명 시스템이 아닌, 연색성이 뛰어난 할로겐램프나 다른 기존 광원의 조합, 자연광의 결합을 통하여 양질의 광원을 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 동적 LED 조명 시스템은 인간의 생체리듬을 정상적으로 유지하기 위한 시환경을 조성하는데 적용될 수 있으며, 또한 빛의 특성이 재실자의 주관적·심리적 반응 및 행태에 미치는 영향을 분석하는 연구에 적용될 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)

의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0007722)

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0001031)

## 참 고 문 헌

1. 김권, [우리 지역 이 사업은 꼭]<9>광주-LED 조명도시, 동아일보, A10면, 2008.7.15
2. 백승현, 정인영, 신화영, 김정태, LED광원과 형광광원의 상관색온도가 시작업 성능에 미치는 영향, 한국조명·전기설비학회 논문지, 제23권, 제1호, pp.18~26, 2009
3. 장우진, 황명근, 박승욱, 이성남, 노재엽, 조현민, LED조명기술개론, 도서출판 아진, 2009
4. CIBSE, Guide A: Environmental design, London, Chartered Institution of Building Services Engineers, 2007
5. Loe, D., Tregonza, P., The design of lighting, Taylor & Francis, p.27, 1998
6. Schubert, E.F., Lighting-Emitting Diodes, Cambridge University Press, 2006
7. Figueiro, M.G., Rea, M.S., Lack of short-wavelength light during the school day delays dim light melatonin onset(DLMO) in high school students, Neuroscience Letters, Vol.31, No.1, pp.92~96, 2010
8. Morita, T., Tokura, H., Effects of lights of different color temperature on the nocturnal changes in core temperature and melatonin in humans, Applied Human Science, Vol.15, No.5 pp.243-246, 1996