

# 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 시뮬레이션을 통한 광원 조합의 최적화

## Optimization of Light Source Combination through the Illuminance and Color Temperature Simulation of Circadian Lighting Apparatus

박양재\*, 최종현\*\*, 장명기\*\*

가천의과학대학교 의료공학부 IT학과 유비쿼터스 컴퓨팅 전공\*, (주)이아이라이팅\*\*

Yang-Jae Park(yjpark@gachon.ac.kr)\*, Jong-Hyun Choi(cjh@eilighting.com)\*\*,  
Myong-Gi Jang(mgjang@eilighting.com)\*\*

### 요약

본 연구의 목적은 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 표현 능력을 극대화할 수 있는 최적의 광원 조합을 도출하는데 있다. 이를 위하여 감성조명용 조명기기는 2000K와 8000K의 서로 다른 색온도를 가지는 형광램프로 구성하였으며, 각각의 형광램프의 조합 수량을 변화시키며 조명기기의 조도 및 색온도 표현 능력을 광학 simulation을 통해 평가하였다. 이 때, Kruithof's curve 및 예외 경우를 고려하여 실내 활동종류에 따른 조도 및 색온도 영역을 가족모임, 학습, 휴식, 수면 등의 4가지로 다시 구분하였으며, 이를 통해 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 구현범위에 대한 목표치를 설정하였다. 평가 결과, 2000K와 8000K의 색온도를 가지는 형광램프를 각각 4개와 5개씩 채용한 조명기기 2 개를 조합하는 경우 4000lx에서 최대 밝기를 보이며 3000K와 6000K에서도 500lx 이상의 밝기를 구현할 수 있는 것으로 예측되었다. 본 연구에서 최적화 된 광원 조합을 통해 구현할 수 있는 조도 범위는 44~750lx 이며 유효 색온도 범위는 2500 ~ 6500K인 것으로 예측되었다.

■ 중심어 : | 감성조명 | 조도 | 색온도 |

### Abstract

The aim of this study is to optimize the light source combination which can maximize the capability of the illuminance and color temperature of circadian lighting apparatus. To achieve this goal, the circadian lighting apparatus was consisted of two different types of fluorescent lamps having different color temperature of 2000K and 8000K, respectively, and the capability of the illuminance and color temperature of circadian lighting apparatus was evaluated by optical simulation as the number of the respective lamps were varied. Considering the Kruithof's curve and exceptional cases, the ranges of illuminance and color temperature for the living activities were reclassified in 4 groups - gathering, studying, relaxing and sleeping - so that the target range of illuminance and color temperature of lighting apparatus was settled. As a result, in the case of adopting two fixtures in which four 2000K lamps and five 8000K lamps were consisted, respectively to one fixture, the highest illuminance was expected at 4000lx and over 500lx of illuminance was calculated between 3000K and 6000K. Through the optimized combination of light sources, the range of illuminance and color temperature were calculated as 44~750lx and 2500~6500K, respectively.

■ keyword : | Circadian Lighting | Illuminance | Color Temperature |

## I. 서론

현재 인류는 어떤 기기나 사물에 컴퓨터를 집어넣어 커뮤니케이션이 가능하도록 해 주는 정보기술(IT) 환경 또는 정보기술 패러다임을 뜻하는 “유비쿼터스”를 영위하기 위한 세계적 기술개발의 경쟁 속에서 살고 있다. 이와 함께 조명에 대한 개념도 단순히 어둠을 밝히는 기능적 접근에서 탈피하여 다양한 생활환경에 따라 최적의 조명환경을 제공하기 위한 효율적 접근이 시도되고 있다.

인간의 생체리듬과 빛의 연관성을 다루는 감성조명에 관한 보고서에 의하면[1-5][9], 인류는 수십만 년 동안 태양, 별, 달 등의 자연 빛에 순응하며 진화해 왔으며 자연의 빛과 유사한 조명환경에서 보다 능률적인 작업과 편안한 휴식이 가능하다고 한다. 또한 이들 보고서는 다양한 조명환경에 따라 인간의 신체 및 정신이 민감하게 반응함을 지적하며[2-4] 자연의 빛에 가까울수록 인간은 편안함을 느낄 수 있음에 주목하고 있다. 따라서 미래지향적인 조명의 궁극적인 목적은 24시간 동안 변화하는 자연 빛에 순응된 인간의 생체리듬에 맞추어 각각의 생활환경에 최적화된 밝기와 색온도를 제공하는 것이라고 할 수 있다.

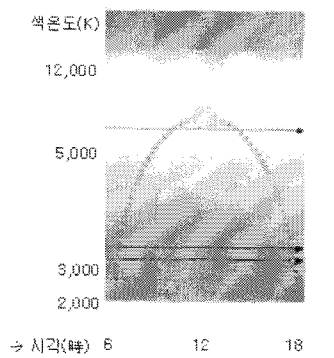


그림 1. 하루 동안 자연 빛의 변화

[그림 1]은 하루 동안 자연 빛의 변화를 색온도 관점에서 도식화 한 것이다. [그림 1]에서 볼 수 있듯이 자연 빛은 아침, 저녁에는 2500K ~ 3500K의 낮은 색온도를 가지는 붉은 계통의 저조도 조명환경을 연출하며, 낮에

는 4000K ~ 7000K에 이르는 백색의 고조도 조명환경을 연출한다. 이러한 자연 빛의 변화에 맞추어 인간은 6000K 근처의 높은 색온도에서는 작업 능률이 높아지고, 3000K 근방의 낮은 색온도에서는 편안함을 느끼며 조도가 차츰 어두워짐에 따라 멜라토닌이 분비되어 졸음을 느끼게 된다.

따라서 능률적인 작업이 필요한 사무실과 편안한 휴식을 위한 침실은 근본적으로 다른 조명 환경이 필요하며, 거실과 같이 손님 접대, TV 시청, 독서 등의 다양한 활동이 한 공간에서 일어나는 곳에서는 동일한 조명 장치에서 다양한 밝기와 색온도를 연출할 수 있는 감성조명의 도입이 필요하다.

감성조명을 위한 조명기기는 낮은 색온도의 램프와 높은 색온도의 램프를 혼용하여 원하는 조도와 색온도를 구현하게 되므로 조명기기의 설계 초기부터 구현하고자 하는 조도 및 색온도의 범위를 고려한 광원의 종류 및 수량 선정이 매우 중요하다.

본 연구에서는 2000K의 램프와 8000K의 램프를 혼합하는 감성조명용 조명기기의 조도와 색온도에 대한 목표 범위를 감성공학적 관점에서 설정하고, 목표 달성을 위한 최적의 램프 조합을 도출하고자 한다. 특히, 각 광원의 기본적인 spectrum data만 제공된 상태에서 조명기기의 조도 및 색온도를 예측하여 실물 제작에 대한 자원 낭비를 줄이며, 실물 제작 전에 최종 제품의 성능을 미리 확인하고 방향성을 제시할 수 있다는 점에 의의가 있다 하겠다.

## II. 연구방법

### 1. 조도 및 색온도 목표 설정

실내조명의 계획 단계에서 조도와 색온도를 예측하는 일은 매우 중요하다. 네덜란드의 과학자 Kruthof는 조도와 색온도가 서로 밀접한 상호 관계를 가지며 사람이 조명에 의해 느끼는 감정에 영향을 주고 있음을 밝힌 바 있다[7].

[그림 2]는 실내조명으로 사용될 수 있는 다양한 색온도에 대해 사람이 편안함을 느끼는 조도 영역을 표현

하고 있는 Kruithof's curve를 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 약 2500K의 낮은 색온도에서는 50 ~ 100 lx의 낮은 조도 범위가 편안한 영역이며, 6500K의 높은 색온도에서는 500lx 이상의 높은 조도를 제공해야 사람들은 편안함을 느끼게 된다.

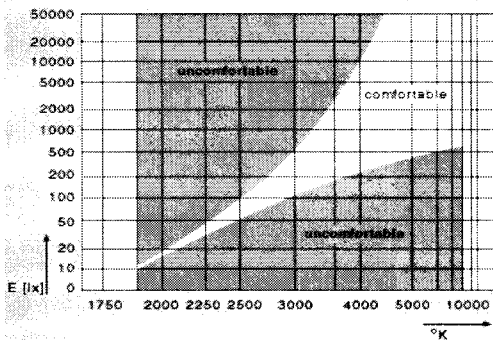


그림 2. Kruithof's curve

하지만, 일본의 과학자 Nakamura[8]는 같은 조명환경에서도 어떤 활동을 하느냐에 따라 느낌이 달라질 수 있으므로 Kruithof curve가 항상 유용하지는 않음을 밝혔으며, Naoyuki Ooi[6]는 이를 바탕으로 실내 활동의 종류 따라 사람이 선호하는 조도와 색온도 영역을 좀 더 구체적으로 연구하였다.

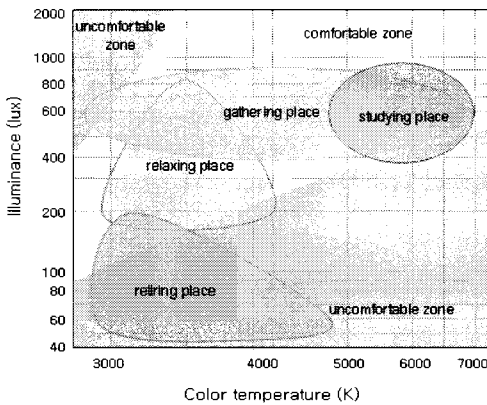


그림 3. 실내 활동유형에 따른 조도 및 색온도 선호 영역

Ooi는 실내의 활동유형을 가족모임(gathering), 학습(studying), 휴식(relaxing), 수면(retiring), 요리

(cooking) 그리고 식사(dining) 등 크게 6가지로 구분하여 각 활동유형 별로 선호하는 조명 영역을 연구하였다. [그림 3]은 Ooi의 연구 결과 중 서로 겹치는 부분을 제외하고 대표적인 4 분야를 큰 영역으로 도식화 한 것이다. [그림 3]에서 볼 수 있듯이 다양한 실내 활동유형을 모두 만족시키기 위한 감성조명용 조명기기를 구현하기 위해서는 높은 색온도에서는 충분히 높은 조도를 확보하며, 낮은 색온도에서는 Kruithof curve의 uncomfortable zone까지 포함하도록 가능한 넓은 조도 범위를 확보해야 함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도에 대한 구현 범위 목표치를 [표 1]과 같이 설정하였다.

표 1. 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 목표 범위

색온도	조도
전 영역 (3000~6000K)	500 lx 이상 포함
3500K	50 ~ 500 lx 포함

## 2. Simulation 방법

본 연구의 대상 조명기기는 사무실과 가정에서 가장 흔하게 사용되고 있는 1200\*300mm 크기의 매입형 및 돌출형 등기구를 대상으로 하였으며, 2000K와 8000K 두 종류 램프의 최적 조합을 도출하기 위한 조도 및 색온도 예측 방법은 [그림 4]와 같다.

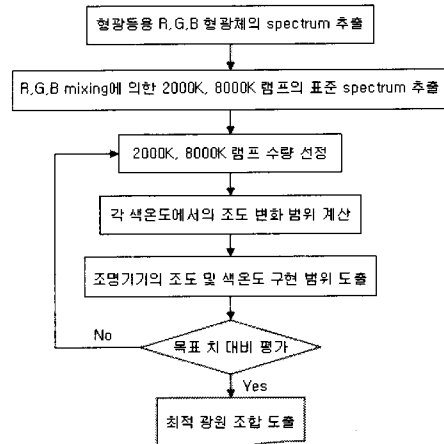


그림 4. 최적 광원 조합을 위한 simulation flow chart

형광등용 R, G, B 형광체의 spectrum을 추출하기 위하여 R, G, B 형광체를 따로 코팅한 단색 램프를 제작하여 Konica Minolta의 분광기인 CS-2000을 이용하여 spectrum을 추출하였으며 결과를 [그림 5]에 나타내었다.

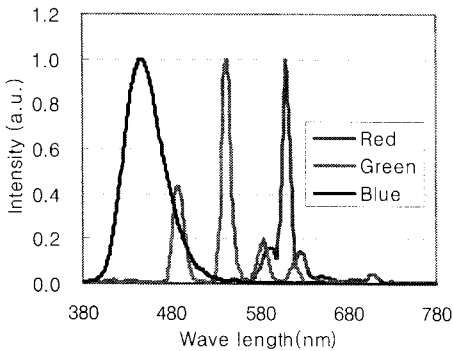


그림 5. R, G, B 형광체의 spectrum

이후 각각의 R, G, B data를 혼합하여 2000K와 8000K 램프의 spectrum을 도출하였으며, 이 때 각각의 색온도 좌표는 CIE1931 좌표계에서 black body locus 상에 위치하도록 설정하였다. 광원의 spectrum으로부터 각 단색 spectrum의 혼합 색에 대한 조도 및 색온도를 계산하기 위하여 [그림 6]의 color matching function 과 식(1)~식(4)의 3차극치 계산법을 이용하였다.

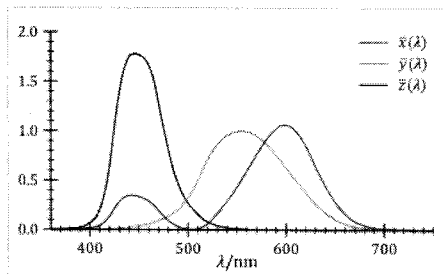


그림 6. CIE1931 Standard Color-matching functions

[그림 7]은 R, G, B 형광체의 spectrum의 적절한 배합과 color matching function 그리고 식(1)~식(4)의 계산에 의해 얻어진 2000K와 8000K 램프의 spectrum으로

본 연구에서 감성조명용 조명기기를 구성하는 두 종류의 광원이 된다.

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda)x(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda)y(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda)z(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

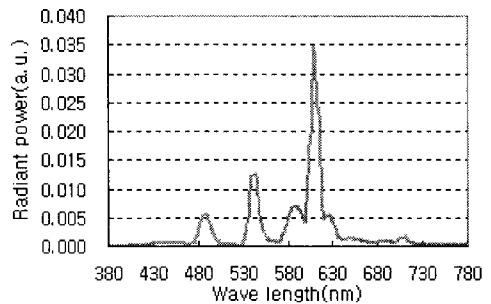
$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda)y(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

위에서,

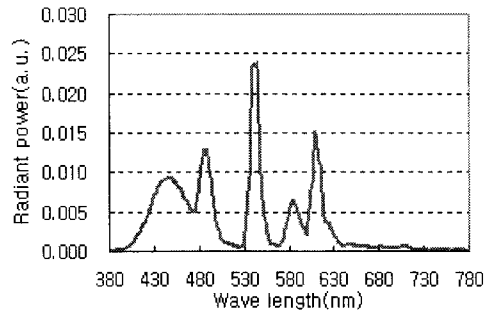
$S(\lambda)$  : Relative spectral power distribution of the illuminant

$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$  : Color-matching function

$R(\lambda)$  : Spectral reflectance of specimen



(a) 2000K 램프의 spectrum



(b) 8000K 램프의 spectrum

그림 7. 형광체의 R, G, B spectrum data로부터 계산된 2000K와 8000K 램프의 spectrum

식(2)의 Y 값은 광원의 휘도(luminance, cd/m<sup>2</sup>)에 대응되는 값으로 일반조명에서 필요로 하는 조도(illuminance, lx)와 직접 대응되지 않는다. 본 연구에서는 향후 Y 값이 조명기기의 조도와 직접 대응될 수 있도록 ROA社의 광학 설계 툴인 Light Tools를 이용하여 간단한 simulation을 진행하였다. 이 때, 램프의 휘도 값으로부터 총 광량을 계산하고 조명기기로부터 2m 지점에 receiver를 위치시킨 후 receiver의 평균 조도를 구하는 방식을 택하였다.

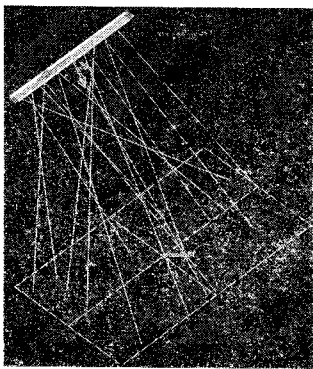


그림 8. Light Tools를 이용한 조도 simulation

이상과 같이 각 광원의 spectrum과 광량 및 조명기기에서의 조도 기여도를 알고 나면 조명기기를 구성하는 각 광원의 수량과 dimming 비율을 적용하여 조명기기의 최종 조도 및 색온도 구현 범위를 계산할 수 있으며, 본 실험에서는 [그림 9]와 같이 (주)이아이라이팅에서 자체 개발한 광학 계산 tool을 이용하여 계산하였다.

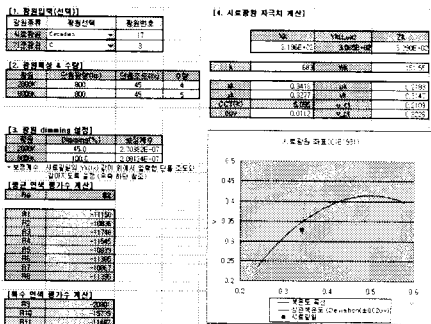


그림 9. (주)이아이라이팅의 조도 및 색온도 계산 tool

본 연구에 사용되는 광원은 관경 12.6mm(T4)의 상대적으로 세관 램프이며, 하나의 조명기기에 사용되는 2000K와 8000K 램프는 모두 합쳐 약 9개 수준을 유지하도록 하였다. 이는 본 연구에 적용 될 램프의 소비전력이 약 10W이므로 조명기기의 소비전력을 100W 이내로 책정하며, 램프의 조밀한 배치를 통해 조명기기의 외관 상 램프 무늬가 없는 면광원 형태를 얻기 위함이다.

[표 2]에 상기 조건을 만족하며 두 종류의 램프에 대한 혼합 비율을 변화시킬 수 있는 경우를 나열하였다. Case별 램프의 혼합비율은 정수 배가 될 수 있도록 설정하여 램프의 혼합비율에 따른 조명기기의 성능차이를 시각적으로 느낄 수 있도록 하였다. 하지만 각 case별 램프의 실제 조합 수량은 다양한 조건에 대한 simulation을 통해 각 비율 별 최적의 램프 조합 수량을 선정하였다. 예를 들어 case 1의 경우 2000K 램프와 8000K 램프의 수량이 4:4인 경우와 4:5인 경우 그리고 5:4인 경우를 모두 실험결과를 검토하여 조도와 색온도 표현력이 가장 우월한 4:5 조합을 선정하게 되었다.

본 실험에서는 [표 2]에서 나열된 램프 조합에 의해 구성된 조명기기의 조도 및 색온도 구현 범위를 계산하고 이를 통해 최적의 램프 조합 방법을 도출하고자 한다.

표 2. 실험대상 램프 비율 및 수량

구분	램프 종류	수량	램프 총 수량	램프비율 (2000K : 8000K)
Case 1	2000K	4	9	1:1
	8000K	5		
Case 2	2000K	3	9	1:2
	8000K	6		
Case 3	2000K	2	8	1:3
	8000K	6		

### III. 실험결과

본 연구에서는 [표 2]에 나열된 램프 조합 비율에 맞추어 조명기기를 구성한 후, 동일한 조명기기 2대를 동시에 제어하는 경우를 가정하여 조명기기의 조도 및 색

온도 구현 범위를 계산하였으며, 그 결과는 [그림 10]과 같다.

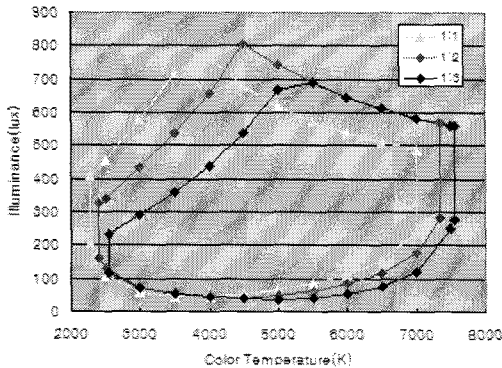


그림 10. 램프 조합에 따른 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 구현 범위

[그림 10]에서 볼 수 있듯이 저조도 영역의 dimming 능력은 낮은 색온도 영역에서는 램프의 조합 조건 변화에 따른 차이가 없으나 높은 색온도 영역에서는 8000K 램프의 비율이 높을수록 더욱 낮은 조도까지 dimming 이 가능함을 알 수 있다.

고조도 영역의 경우 램프 조합 조건의 변화에 따라 구현할 수 있는 색온도 범위가 상대적으로 크게 차이 남을 알 수 있으며, 특히 case 2와 case 3의 경우 3000K의 색온도 영역에서 500lx를 넘지 못하므로 [표 1]에서 목표로 설정한 조도 구현 범위를 만족하지 못하였다.

#### IV. 결론

[그림 11]에 본 연구에서 계산된 램프 조합에 따른 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 구현 범위와 [표 1]에서 설정된 목표치를 함께 표현하였다. Case 1의 경우 3000K~6000K 영역 전체에서 500lx의 조도를 구현할 수 있으며, 3500K의 색온도에서 50~500lx의 조도 영역을 구현할 수 있음을 보이므로 본 연구 대상 중 최고의 광원 조합을 가지는 경우라 하겠다.

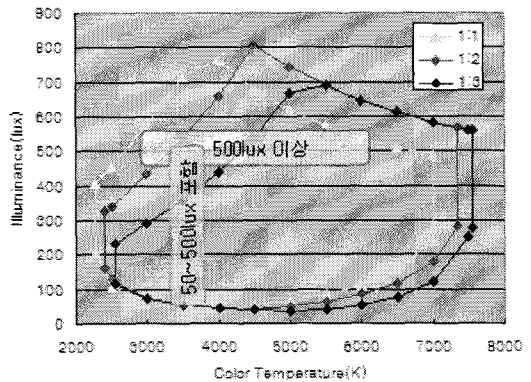


그림 11. 램프 조합에 따른 감성조명용 조명기기의 조도 및 색온도 구현 범위 와 목표치

Case 2의 경우 3000K의 색온도에서 최고 조도가 500lx를 넘지 못해서 최적 조합으로 선정되지 못했지만, 5000K 이상의 높은 색온도 영역에서 case 1 대비 고 조도 구현이 가능하므로 사무실이나 도서관에서는 오히려 더 적합한 조합이라 할 수 있을 것이다.

또한 동일 공간에서 사용되는 조명기기의 수량과 배치 방법에 따라 램프의 최적 조합이 바뀔 수 있으므로, 향후 조명기기의 실제 적용 공간에 대한 연구가 추가로 진행 되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] 이진숙, "건축조명광원의 광학적 특성에 따른 인간의 감성반응 분석", J. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.19, No.5, pp.9-16, 2005.
- [2] 원슬기, "고령자를 위한 주거시설 조명환경 계획에 관한 연구", J. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.21, No.6, pp.8-18, 2007.
- [3] 박재민, "조명환경에 따른 시각 감성변화의 인간 공학적 평가", J. of the Korean Institute of Plant Engineering, Vol.5, No.3, pp.31-40, 2000.
- [4] 정우석, "색채 조명 자극에 대한 인체 반응에 관

한 연구”, 감성과학, Vol.7, No.4, pp.51-56, 2004.

[5] 지순덕, “LED 기반 백색 조명의 색온도 및 연색 지수에 따른 감성 평가”, 감성과학, Vol.9, No.4, pp.353-366, 2006.

[6] N. Oi, “Preferred Combinations between Illuminance and Color Temperature in Several Settings for Daily Living Activities,” Proceedings of the 2nd International Symposium on Design of Artificial Environments, pp.214-215, 2007.

[7] H. Nakamura, “Is Kruthof’s Curve correct?” J. Illuminating Engineering Institute of Japan, Vol.85, No.9, pp.793-795, 2001.

[8] S. Mark, “A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health,” J. Circadian Rhythms, 6(1), 2008.

[9] S. Takahashi, “Effects of color lighting on emotional-expression judgment and personal impression,” v31 suppl, pp.14-15, 2007.

**최 종 현(Jong-Hyun Choi)**

정회원



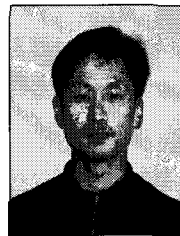
- 1999년 2월 : 한양대학교 재료공학과(공학사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 재료공학과(공학석사)
- 2007년 1월 : LG Display 연구소 (주임연구원)

• 현재 : (주)이아이라이팅(연구소장)

<관심분야> : 감성조명, 무선조명제어, LED조명기기, 고효율/친환경 광원

**장 명 기(Myong-Gi Jang)**

정회원



- 2004년 2월 : 서울산업대학교 기계설계(공학사)
- 2006년 6월 : LG Display 연구소 (선임연구원)
- 2006년 8월 : 연세대학교 기계시스템(공학석사)

• 현재 : (주)이아이라이팅(대표이사)

<관심분야> : 감성조명, 지능형조명시스템, 고효율/친환경 광원, 3D display

**저 자 소 개**

**박 양 재( Yang-Jae Park )**

정회원



- 1984년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학사)
- 1990년 8월 : 인하대학교 정보공학과(공학석사)
- 2003년 8월 : 인하대학교 전자계산공학과(공학박사)

• 1993년 2월 ~ 현재 : 가천의과학대학교 의료공학부 IT학과 유비쿼터스 컴퓨팅 전공 교수

<관심분야> : 모바일 네트워크, 음성신호처리, HCI 유비쿼터스컴퓨팅, 감성조명