

식물 재배기의 효율적인 LED 조명 시스템 설계

안교명¹, 홍영진¹, 김환용^{1*}
¹원광대학교 전자공학과

Efficient LED lighting system design of the plant growing system

Xiao-Ming An¹, Young-Jin Hong¹, Hwan-Yong Kim^{1*}

¹Dept. of Electronic Engineering, Wonkwang university

요약 본 논문은 식물 재배시스템을 제작하고 LED 광원은 단색광 3개(적색, 청색, 백색), 혼합광 3개(적색1+청색1, 적색2+청색1, 적색1+청색2)를 제작하여 사용하였다. 제작한 식물 재배시스템을 이용하여 LED 광원별 광 특성, 광량의 변화에 따른 조도 및 PPF의 특성과 식물성장을 분석하였다. 분석결과 LED 광원의 광 효율은 백색 광원이 125 lm/W로 높으며 적색1+청색2 광원은 9.9 lm/W로 낮았다. 이러한 결과로 단색광이 혼합광 보다 광효율이 좋은 것을 확인 할 수 있었다. LED의 파장별 PPF ($25 \mu\text{mol}$, $50 \mu\text{mol}$, $100 \mu\text{mol}$) 조도값 크기는 백색 LED가 높으며 청색 LED가 낮았다. 따라서 LED 광원의 다양한 단색-혼합광 파장대역 조합에 따라 식물성장에 적합한 효율적인 LED 조명 시스템을 구성할 수 있다.

Abstract This paper devised a plant growing system As LED light source, three monochromatic lights (red, blue, white) and three mixed lights (red1+blue1, red2+blue1, red1+blue2) were made. According to the optical properties of those LED light sources and change in the amount of light, this author analyzed the characteristics of luminance and PPF and also plant growth. According to the light efficiency of those LED light sources, it was high in white light as 125 lm/W and was low in red1+blue2 light as 9.9 lm/W. This result shows that monochromatic light has higher light efficiency than mixed light. The PPF ($25 \mu\text{mol}$, $50 \mu\text{mol}$, $100 \mu\text{mol}$) luminance in different wavelengths of LEDs was high in white LEDs and was low in blue LEDs. therefore, it is possible to devise an efficient LED lighting system appropriate for growing plants by variety monochromatic lights and mixed light wave length combination of LED light source.

Keywords : LED Lighting, Plant growing, PPF

1. 서론

최근 기후 변화와 지구온난화는 농작물 수확량 및 식물생육에 막대한 영향을 주고 있다. 이 때문에 환경 조건을 인공적으로 제어하여 계절이나 장소에 상관없이 작물을 대량으로 생산할 수 있는 식물공장이 각광받고 있다. 또한 식물의 성장환경을 자연으로부터 인위적으로 차단하여 병해충의 유입을 방지하고 다단배문을 통해 생산량

을 증가시키고 지역, 계절, 일조량과 관계없이 연중 계획 생산이 가능해지고 있다[1].

LED 광원은 원하는 파장 조합을 통해 다양한 종류의 식물 성장에 효과적으로 응용되고 있다.

하지만 LED 광원을 사용할 경우 조명 설비 투자비용이 높으며 그 외 냉난방장치 등의 운영비 문제 등으로 기술 개발의 필요성이 대두 되고 있다. 식물성장 연구에 많이 사용되는 상추는 생육 기간이 짧고, 우리나라에서

본 논문은 2014년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨.

*Corresponding Author : Hwan-Yong Kim(Wonkwang Univ.)

Tel: +82-63-850-6740 email: hykim@wonkwang.ac.kr

Received July 30, 2015

Accepted November 6, 2015

Revised (1st September 3, 2015, 2nd September 8, 2015)

Published November 30, 2015

소비가 많은 채소로 생산적인 면에서 계절적 영향을 받지 않아 재배연구에 적합한 작물이다. 그리고 청경채는 청색광의 비율이 증가할수록 잎물 길이가 증가하는 등 다양한 식물성장 형태로 보고 되고 있다[2]. 또한 균일한 품질의 작물을 생산하기 위해 식물 종류에 필요한 단파장과 혼합파장의 LED 광원을 선택하여 조도 분포 및 최적 광원 배치에 대한 연구가 필요로 하고 있다[3-5]. 따라서 본 논문에서는 식물 재배시스템을 제작하여 단색광 3개, 혼합광 3개(총 6개)의 LED의 광원의 파장을 검증하고 광량 강도의 변화의 따른 단색광 및 혼합광의 광특성, 조도 및 PPFD분광분포에 대해 분석하였다. 또한 청치마상추와 청경채에 직접 적용하여 성장의 변화를 알아보고, 식물 성장에 적합한 LED 조명 시스템을 설계하고자 한다.

2. LED 조명시스템 설계

2.1 식물 재배기 조명시스템

그림 1은 식물재배 조명시스템의 실험장치 구성도이다. 실험장치는 LED 광원 모듈부, 전원공급부, 제어부의 3단계로 구성 하였다.

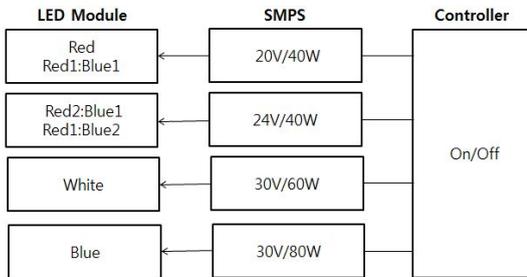


Fig. 1. The Block-diagram of the plant growing lighting system

그림 2는 식물 재배기 구조이다. 선반식 알루미늄 구조물로 크기는 길이 1000 mm, 폭 550 mm, 높이 1300 mm 이며 재배포트는 20개로 제작하였다. LED의 구동 방식은 PWM(Pulse Width Modulation : 펄스변조방식)을 이용한 정전류 구동방식이며, LED 각각 따로 제어가능하도록 시스템을 구축하였다.

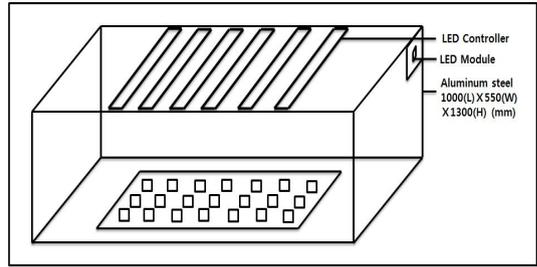


Fig. 2. The structure of the plant growing system

그림 3은 실험에 사용된 LED 배열구조를 나타낸다. LED 패키지는 국내 ITSWELL 사의 SMD 5050 패키지로 적색, 청색, 백색을 사용하여 총 6가지(적색, 청색, 백색, 적색1+백색1, 적색2+청색1, 적색1+청색2)로 제작하였다. 광원모듈의 크기는 길이 500 mm, 폭 30 mm, 높이 1.5 mm 으로 정사각형 구조이다. 또한, 광원의 크기는 길이 500 mm, 폭 30 mm, 높이 30 mm 으로 직관형 구조로 설계하였다.

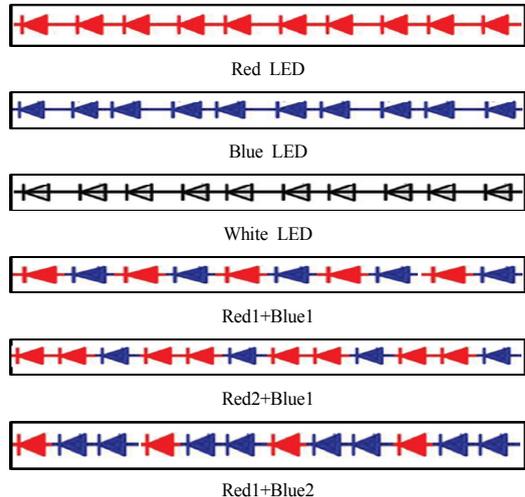


Fig. 3. The structure of LED arrangement

2.2 식물 재배 실험특성

적색광과 청색광은 주로 식물이 광합성에 이용하는 광원이다. 적색광은 주로 광합성 촉진에 중요한 역할을 하며, 청색광은 엽록체 형성 발달에 매우 중요한 역할을 한다. Duty rate는 주기를 가지는 펄스에서 쓰이는 용어로 전류가 흐르지 않는 시간에 대한 전류가 흐른 시간의 비를 말한다. Duty rate를 임의로 PPFD 값에 맞추어 적

색, 청색, 백색 단색광과 적색1+청색1, 적색2+청색1, 적색2+청색1 혼합광에서 처리하였다. 식물성장 실험을 위해 그림 4와 같이 재배 작물의 성장변화와 실험시간을 위한 성장시기를 고려하여 어린 입채소인 청치마상추와 청경채 2가지를 재배 작물로 선택하였다. 실험은 LED 광원별 25 μmol , 50 μmol , 100 μmol 총 3가지 조건 하에서 수행하였다. 환경조건은 Li-CO사의 Li-250A를 이용하여 광량과 식물체 간 거리인 280 mm에서 측정하였다. 또한 암실에서 평균온도 20~25 $^{\circ}\text{C}$, 습도 50 %에서 70 %를 유지하여 하루 12시간씩 15일간 20개체의 청치마상추와 청경채의 성장크기를 측정하였다. 그림 4는 청치마상추와 청경채의 단색광 3개와 혼합광 3개(총 6개)의 성장실험 장면을 나타내고 있다.

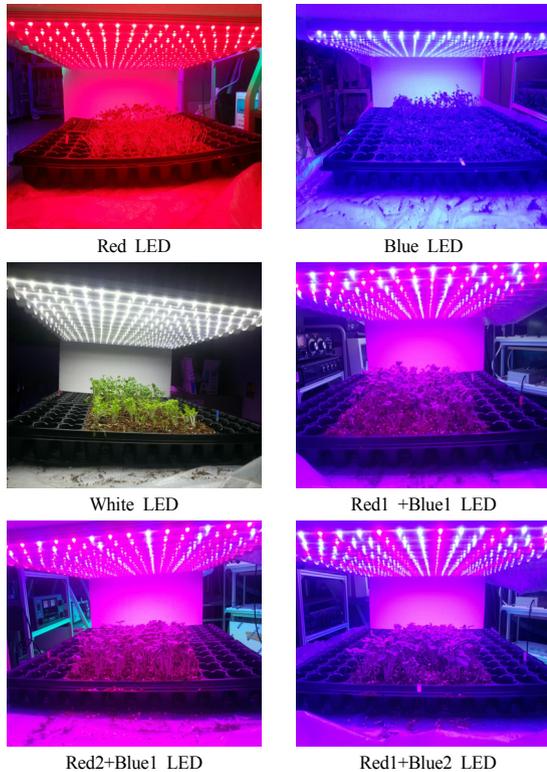


Fig. 4. The experiment to cultivate green leaf lettuce and bok choy

3. 모의 실험 및 분석

3.1 LED 광원의 광학적 측정

실험에 사용된 LED 광원별 광 특성을 분석하였다. 측정은 주위의 빛을 최대한 차단하고 LED와 분광기 사이의 거리를 100 mm로 고정된 상태로 1시간 구동시켜 안정화 상태에의 광속과 연색성 색온도를 측정하였고 30분간의 광속유지율을 적분구를 사용하여 측정 하였다. 표 1과 같이 구동전류, 전압, 전력을 사용하여 측정하였다.

Table 1. The specifications of plant growing LED light sources for optical measurement

measurement sample	driving current [mA]	driving voltage [V]	power [W]
Red	120	20	9
Blue	120	30	30
White	120	30	17
Red1+Blue1	120	20	9
Red2+Blue1	120	24	11
Red1+Blue2	120	24	9

표2와 같이 각 측정시료별 안정화 상태의 광특성 결과 각각의 LED의 광원의 광 효율은 단색광으로 적색 25 lm/W, 청색 13 lm/W, 백색 125 lm/W으로 나타났으며 혼합광은 적색1+청색1 11 lm/W, 적색2+청색1 17 lm/W, 적색1+청색2 9.9 lm/W 으로 나타났다. 전체적으로 LED의 광원의 광 효율은 백색 LED가 높았으며 적색1+청색2 광원이 광 효율이 낮은 것을 확인 하였다.

각 파장마다 출력량이 같을 경우에 사람의 시각은 노란색-녹색 부분을 가장 밝다고 인식하고, 적색과 청색 부분을 가장 어둡다고 인식한다.

동등한 효율을 가진 광원 가운데 출력이 노란색-녹색 범위에 가장 많이 집중되어 있는 광원은 1와트 (W) 당 루멘 (lm)값이 가장 높기 때문에 우리 눈은 사물을 쉽게 인식할 수 있다, 조명의 효율만을 높이려면 이 영역의 출력만을 높이면 된다.

Table 2. The results of optical properties in the status of stabilization

measurement sample	luminous flux [lm]	luminous efficiency [lm/W]	wave length [nm]
Red	52.97	25	660
Blue	48.84	13	450
White	450.65	125	450
Red1+Blue1	32.83	11	450
Red2+Blue1	46.38	17	650
Red1+Blue2	30.95	9.9	450

그러나 광원에 적색과 청색의 비율이 알맞지 않으면 색상 선명도가 떨어진다. 일반적으로 백색 LED는 청색 LED와 노란색 형광체를 이용하여 만든다. 이 백색 LED는 청색광과 노란색의 혼합에 의하여 백색광이 되었기 때문에 효율은 높지만 녹색과 전색 영역의 광이 부족하게 된다.

분광분석 결과 각각의 피크 파장은 단색광으로 적색 LED는 660 nm에서 최대가 되었고 청색 LED는 450 nm에서 최대가 되었으며, 백색 LED는 450 nm에서 최대가 되었다. 혼합광은 적색1+청색1 LED는 450 nm에서 최대가 되었고, 적색2+청색1 LED는 650 nm에서 최대가 되었고 적색1+청색2 LED는 450 nm에서 최대가 되었다. 또한 적색-청색 혼합광은 사람이 인지하는 시각적으로는 빛이 혼합되어 보이나 측정된 분광분포나 파장대역은 서로 독립적으로 타나난 것을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 660 nm 파장의 적색 LED는 식물의 엽록소작용을 최대로 하고 박아작용에 효과를 보이고, 450 nm 파장의 청색 LED는 광합성작용의 최대, 엽록소작용의 최대 효과를 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 녹색과 노란색의 파장은 식물의 성장에 도움을 주지 못하고 반사되거나 흡수율이 미미한 것으로 알려져 있다[6][7].

3.2 조도 및 PPFD 모의 실험

표 3은 PPFD 값에 따른 조도변화를 나타낸다.

LED 광원별 PPFD 값이 25 μmol , 50 μmol , 100 μmol 일때 식물과의 거리를 광원의 280 mm 에서 측정하였다.

Table 3. The characteristics of luminance and PPFD in the light sources used for the experiment

measurement sample	25 [μmol]	50 [μmol]	100 [μmol]
Red	156 lx	328 lx	579 lx
Blue	60 lx	112 lx	239 lx
White	803 lx	1764 lx	3777 lx
Red1+Blue1	100 lx	200 lx	423 lx
Red2+Blue1	108 lx	222 lx	444 lx
Red1+Blue2	70 lx	162 lx	307 lx

그림 5는 LED 광원별 균일도를 실험한 장치를 나타내며 1지점에서 5지점 까지 각각 5개의 LED A1에서 A5 지점에 위치한 5곳의 조도값을 측정하였다.

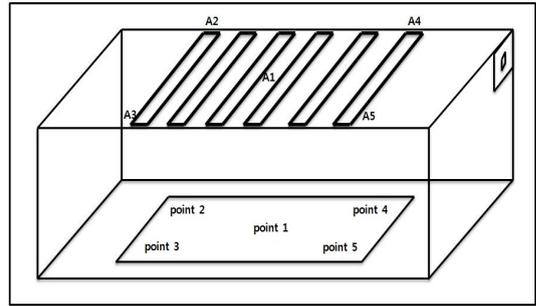


Fig. 5. The points to measure the degree of uniformity in light sources

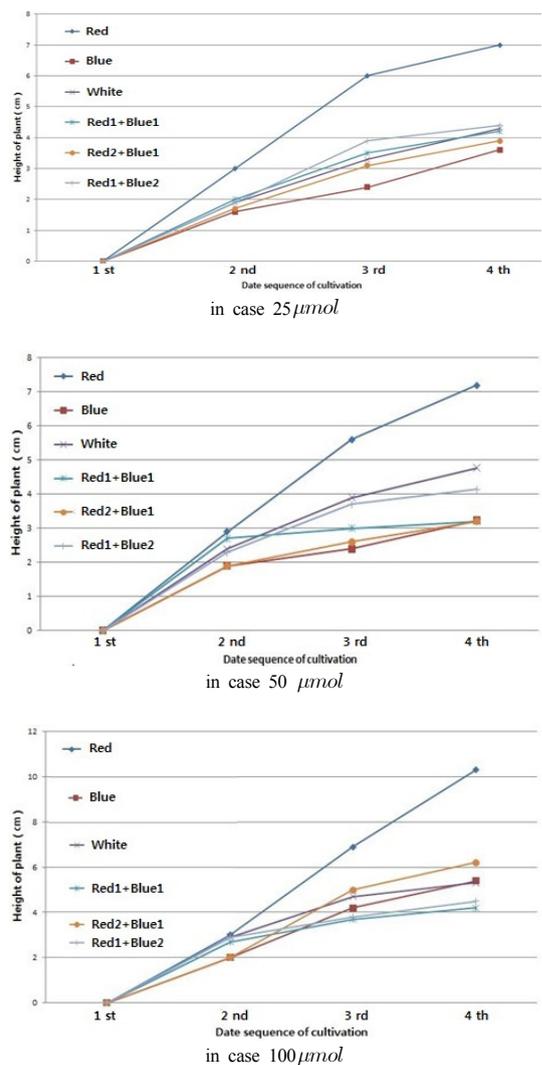


Fig. 6. The graph that shows the acceleration of growth in green leaf lettuce

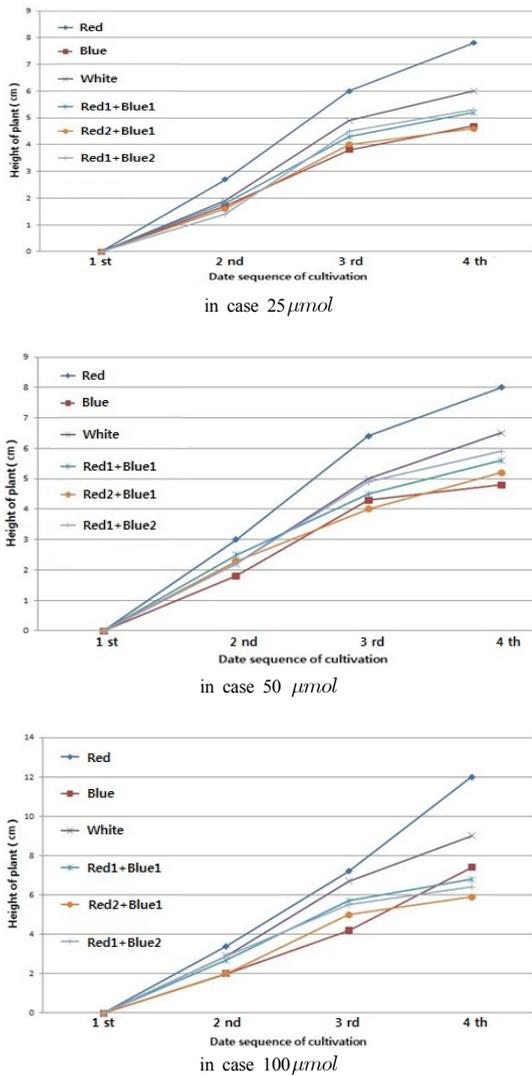


Fig. 7. The graph that shows the acceleration of growth in bok choy

LED의 조도는 광 강도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 보였다. 광 강도에 따른 조도값의 크기는 백색 > 적색 > 적색2+청색1 > 적색1+청색1 > 적색1+청색2 > 청색 LED 광원 순서로 나타났다. PPFD 값이 증가에 따른 조도의 증가폭이 백색 LED가 가장 크게 나타났고, 청색 LED가 가장 작게 나타났다.

백색 LED는 청색 LED에 형광체를 도포한 것으로 입력 전류가 높아 광 효율이 증가하여 조도가 가장 높은 것으로 예측된다. 또한 단색광보다 적색-청색 혼합광의 경우가 조도가 더 높기 때문에 식물성장에 있어 더 많은

영향을 미친다고 예측된다. 실험은 PPFD 값을 25 μmol, 50 μmol, 100 μmol 일 때 온도, 습도, 시간, 식물간 거리의 동일조건으로 하루 12시간씩 보광 하였고, 과종후 보광 시작으로부터 15일간 재배 하였다.

측정은 청치마상추와 청경채의 크기를 측정하여 비교 하였다. 앞서 실험결과 광원 종류에 따른 청치마상추와 청경채의 성장반응은 다음과 같다.

그림6과 같이 청치마상추는 25 μmol 일 때 길이는 적색 LED에서 가장 높았고, 청색 LED에서 가장 낮았다. 50 μmol 일 때 길이는 적색 LED에서 가장 높았고, 적색1+청색1 LED에서 가장 낮았다. 100 μmol 일 때 길이는 적색 LED에서 가장 높았고, 적색1+청색1 LED에서 가장 낮았다.

그림7과 같이 청경채는 25 μmol 일 때 길이는 적색 LED에서 가장 높았고, 적색1+청색2 LED에서 가장 낮았다. 50 μmol 일 때 적색 LED에서 가장 높았고, 청색 LED에서 가장 낮았다. 100 μmol 일 때 적색 LED에서 가장 높았고, 적색1+청색2 LED에서 가장 낮았다.

광원 종류에 따른 청치마상추와 청경채의 광합성률은 적색 LED에서 가장 높았으며 청색 LED에서 낮았다.

즉 적색 파장은 식물의 광합성을 촉진시키는 반면 청색 파장은 식물의 성장을 억제하는 것을 실험을 얻었다. 다른 광원은 통계적으로 차이가 없었다. 하지만 적색광원은 성장속도가 너무 높아 줄기 상태가 약해지는 현상을 보였다.

따라서 청치마상추와 청경채는 적색광 보다 적색광과 청색광을 혼합시킨 광조건에서 재배하는 것이 줄기의 급격한 성장을 방지하며, 높은 품질로 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 식물 재배시스템을 제작하고 LED 광원의 광학적 특성과 균일도가 식물성장에 미치는 효과에 대해 분석하였다. 또한 LED 광원의 종류별 성능을 측정하기 위해 단색광, 혼합광을 구성하고, 각 광원의 광량을 변화시켜 가면서 청치마상추와 청경채의 성장을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다. LED의 광원의 광 효율은 백색 광원이 125 lm/W 으로 높았고, 적색1+청색2 광원이 9.9 lm/W 으로 광 효율이 낮게 나타났다.

LED의 광원의 평균 조도 크기로 백색 > 적색 > 적색 2+청색1 > 적색1+청색1 > 적색1+청색2 > 청색 광원 순으로 확인하였다.

백색 LED는 청색 LED에 황색 형광체를 도포한 것으로 입력전류가 타 LED에 보다 많아 광효율이 증가하기 때문에 조도가 높은 것으로 보인다. 또한, 평균 조도의 오차범위가 최소 18lx로 광원이 균일하게 분포하였다. 따라서 적색-청색 혼합광 보다 적색 광원의 조도가 더 높기 때문에 식물성장에 더 많은 영향을 미치게 된다.

References

- [1] Seong-chan Hong, " Agricultural production, energy saving technology commercialization research using LED", Rural Development Administration National Academy of Agricultural Science, 2012.
- [2] Yong-seup Shin, "LED plant factory commercialization strategy and cultivar growing example / analyze marketability seminar", 2011.
- [3] Sang-Yoo Lee, "Plants growing using plant factory and LED artificial light", Optics and technology Vol.14 No.3, 2010.
- [4] Yu-hyo kim, "System configuration and research technology development example of plants factory", Rural Development Administration, 2010.
- [5] Dong-Rak Shin, "A Study on the Crops Growing Efficiency Using LED", Graduate School of Industry Pukyong National University, 2011.
- [6] G. Tamulatitis, et al., "High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation", J. Physics D: Applied Physics, vol. 38, pp.3182 -3187, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/17/S20>
- [7] Cheol-Gu Yoon, Hong-Kyoo Choi, "A Study on the Various Light Source Radiation Conditions and use of LED Illumination for Plant Factory", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 25(10) pp. 14-22, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2011.25.10.014>

안 교 명(Xiao-Ming An)

[준회원]



- 2015년 8월 : 원광대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

<관심분야>

LED조명, 임베디드 시스템, 회로 및 시스템

홍 영 진(Yonug-Jin Hong)

[준회원]



- 2015년 2월 : 원광대학교 전자공학과 졸업
- 2015년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 대학원 전자공학과

<관심분야>

LED조명, 임베디드 시스템, 회로 및 시스템

김 환 용(Hwan-Yong Kim)

[정회원]



- 1978년 2월 : 전북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1984년 8월 : 전북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1979년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

임베디드 시스템, SoC설계, 회로 및 시스템