

보광용 LED의 광특성과 광자속밀도 특성

이봉주
남서울대학교 전자공학과

A Study on the Lighting and the Photosynthetic Photon Flux Density with LED for Light Reinforcement

Boong-Joo Lee
Department of Electronic Engineering, Namseoul University

요약 본 연구에서는 식물생장에 필요한 빛의 파장과 세기, 광합성 광자속밀도에 대한 정확한 이해를 위해 LED의 광변화를 통해 단색광과 혼합광에 조건변화에 따른 광합성 광량자속밀도와 조도특성 파악하였다. LED의 조도와 광합성 광자속밀도의 특성을 파악하여 LED 조명설계시 도움을 주고자 한다. 조도와 광합성 광자속밀도는 거리에 반비례하는 특성을 보이며, 조도의 특성을 기준할 때는 Green광이 중요하며, 광합성을 위한 광합성 광자속밀도는 Blue광이 중요함을 알게 되었다. 식물의 광합성 특성만을 고려할 때, 영향도는 Blue > Red > white > Green 순서로 나타내었으며, 측정거리 30[cm]을 기준으로 60[cm], 90[cm], 120[cm]의 감소수준은 각각 약 36[%], 18[%], 10[%]의 수준으로 감소됨을 알았다. Red:Blue광원의 혼합광원의 특성을 본 결과, 혼합 Red:Blue LED 광원 비율(2:1, 3:1, 4:1)과 측정거리에 따른 값은 30[cm]에서의 측정값을 100%라 가정할 때 120[cm]에서의 측정값은 10~11[%]수준임을 확인하였다. 얻어진 결과를 통해 실내 온실의 광효율 극대화를 위한 최적 구조를 제안하고 향후 연구의 진행 방향 설정에 기여하고자 하였다.

Abstract This study determined the characteristics of LED illumination and photosynthetically active radiation flux density (PPFD) for LED lighting design in an indoor plant factory. This was done based on the light wavelength and PPFD intensity required for plant growth. It has been found that the wavelength and intensity are decreased according to the measuring distance, and green light has an important role in illumination characteristics, while blue light has an important role in the PPFD characteristics. Considering only the photosynthetic properties of plants, the effective order of photosynthesis was blue>red>white>green. When the measurement distance was 30 [cm], it was found that reduction levels of 60 [cm], 90 [cm], and 120 [cm] decreased to about 36 [%], 18 [%], and 10 [%], <note: ambiguous> respectively. As a result of the characteristics of mixed light (red:blue=2:1, 3:1, 4:1) and the measurement distance, when the measured value at 30 [cm] is 100%, the measured value at 120 [cm] is 10-11 [%]. From the obtained results, an optimal structure was proposed for maximizing the light efficiency of an indoor greenhouse for future research.

Keywords : LED, PPFD(Photosynthetically Active Radiation Flux Density), Photosynthesis, Illumination, Greenhouse

이 논문은 2020년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음

*Corresponding Author : Boong-Joo Lee(Namseoul University)

email: bjlee@nsu.ac.kr

Received November 23, 2020

Accepted March 5, 2021

Revised December 7, 2020

Published March 31, 2021

1. 서론

IT기술의 발전에 따른 첨단산업 분야에 발전이 이루어지는 반면 지구 온난화 및 기후변화에 따른 많은 환경 변화가 진행되고 있는 실정이다. 예상하지 못하는 자연현상이 진행되고 있어, 이에 농업분야에서도 새로운 융합 기술이 접목된 연구가 활발하다. 특히 자연환경에 영향을 받지 않고, 도심의 실내에서 신선한 채소를 생산할 수 있는 식물공장에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[1]. 인공 광원을 활용한 식물공장은 자연환경 변화에 영향을 받지 않고, 소비자나 가까운 위치에 재배가 가능하여 이로부터 운송 시간과 운송비 절감될 수 있다. 즉, 자연광 대신 특정광의 파장과 광크기의 변화가 가능한 LED 인공광원에 대한 연구가 진행 중이다[2, 3]. 특정파장의 조사가 가능한 LED 광원의 활용은 선택적 성장촉진이 가능하며 자연환경변화와 무관하게 식물 생육 기간 단축 시킬 수 있는 큰 장점이 있는 광원이다.

식물이 성장하는데 필수적인 요소는 빛(세기와 파장), 이산화탄소의 농도, 온도라고 할 수 있다. 이중 광합성에 소요되는 에너지는 햇빛(가시광선 영역)이다. 엽록체 안에 존재하는 엽록소에서는 특정한 파장의 빛(청색, 적색)을 흡수하면 엽록소 분자 내 전자의 이동을 통한 산화 환원 반응을 진행되어 광인산화 반응을 한다. 엽록소만으로는 빛의 스펙트럼 중 일부분만 이용할 수 있으므로, 식물은 엽록소 외에도 다른 많은 종류의 색소 화합물을 통하여 다양한 파장의 빛 에너지를 흡수하거나 너무 강한 빛을 거르기도 한다[4]. 자연광 중 가시광선이 주로 광합성에 주로 쓰이는 빛의 파장으로 알려져 있으나 엽록소는 이러한 영역의 모든 빛을 똑같이 흡수하여 광합성을 하는 것이 아니다. 이러한 사실은 엽록소의 추출액에 각각의 다른 단색광을 비추었을 때 흡광도를 조사함으로써 알 수 있다. 엽록소는 가시광선 내의 파장에서 Blue 계열(400~500[nm])과 Red 계열(620~700[nm])의 빛을 잘 흡수하며, Green 계열(500~600[nm]) 빛은 거의 흡수하지 않는다. 즉 파장 대역의 빛의 흡수하고 이용 가치가 적은 녹색광은 반사하게 되어 우리가 식물을 녹색으로 인식하는 이유라고 알려져 있다[5,6]. 이처럼, 파장에 따른 광특성(Illumination)과 광합성 광자속밀도(PPFD: Photosynthetically active radiation Flux Density)에 대한 정확한 이해가 필요한 상황이다.

인공광원인 LED조명광원은 일반적인 조명등과 다르게 색온도, 색좌표 및 조도의 변화가 가능한 조명공원으로 단순한 조명분야 이외의 융합분야(통신, 의학, 농업

등)에서 현재 많은 연구가 진행되고 있다[7,8]. 또한, 식물성장에 최적화를 위한 조명설계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[9]. 그러나 광조도와 광합성 광자속밀도에 대한 정확한 특성비교에 대한 내용이 아직 미약하고 단일광과 혼합광에 대한 광합성 광자속밀도에 대한 특성을 좀더 심도있게 이해해야할 필요성이 요구되어진다.

본 연구의 목적은 LED를 활용한 식물공장 설계시 에너지의 효율적 접근을 위해 식물 성장 측면을 고려한 최적화 조명 설계에 도움을 주고자 한다. 즉, 식물 성장에 필요한 빛의 세기를 측정할 광합성 광자속밀도에 대한 정확한 이해를 하고 단색광과 혼합광에 조건변화에 따른 광합성 광자속밀도와 조도특성 보았다.

2. 실험방법

2.1 측정 시스템

본 실험에서 사용되어진 측정 지그는 Fig. 1과 같다. 사용되어진 LED는 RGB형태로 원하는 색변환이 가능하며, 측정 지그에는 전동 모터가 설치 되어 정확한 측정거리와 안정된 측정이 가능하다. 이로부터 정확한 높이제어가 가능하며 암막커튼을 활용하여 외광에 대한 영향을 최소화 시켰다. LED조명광원은 RGB LED(Full Color LED : 3528 Series)을 이용하여 광크기 및 광파장변화를 통한 광제어가 가능하며, 통신모듈이 탑재된 예코메이텍사의 모델을 활용하였다. 이때, 색변환은 단색광, 혼합광 및 적색광과 청색광의 비율(Red:Blue=2:1, 3:1, 4:1)을 변경하며 광특성과 광자속밀도 특성을 확인하였다.

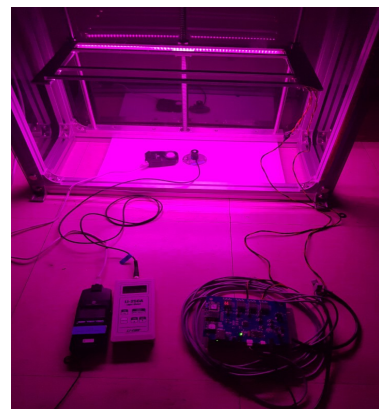


Fig. 1. schematic of measuring system

2.2 광특성 및 광량자속밀도(PPFD)의 측정

광특성과 광합성 광자속밀도를 측정하기 위해 Spectrometer Module(Avaspec-3648, Avantes Co.), CHROMA METER(CL-200A, KONICA MINOLTA Co.)과 Light Meter(LI-250A, LI-COR Co.)를 사용하였다. 일반적으로 조도란 사람이 느끼는 가시광선에 대한 내용으로 단위면적에 비추는 빛의 세기(lux)를 평가하는 것이고, 광합성 광자속밀도는 식물생장에 필요한 빛의 세기(μmol)를 평가하는 것이다. 이는 식물생장에 필요한 엽록소의 흡수 스펙트럼에 해당하는 값을 의미하며, 광합성 유효방사(PAR, Photosynthetically active radiation)를 이용해 나타낸다. 즉, PAR는 400~700nm의 파장 구간에서 초당 광양자 수를 뜻한다.

3. 실험결과

3.1 측정거리와 혼합광(Red:Blue)비율에 따른 특성

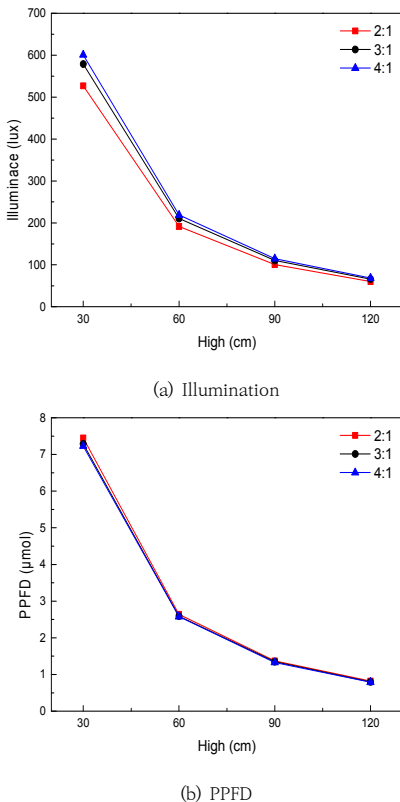


Fig. 2. Lighting and PPFD with R:B ratio and measuring distance

Fig. 2는 혼합광(Red:Blue) LED의 광원비율과 측정거리(LED 광원과 측정점의 높이)가 30[cm], 60[cm], 90[cm], 120[cm]에서 조도 및 광합성 광자속밀도의 결과값을 나타낸 것이다. 그 결과 측정점과 광원의 거리가 길수록 조도 및 광합성 광자속밀도는 작아지는 경향을 보였다. 혼합광(Red:Blue) LED의 광원비율변화에 따라라도 비슷한 경향을 보여졌다.

Table 1. Brain waves characteristics in mathematics region

Distnce	Red(2) : Blue(1)		Red(3) : Blue(1)		Red(4) : Blue(1)	
	Illumin ation [lux]	PPFD[μ mol]	Illumin ation [lux]	PPFD[μ mol]	Illumin ation [lux]	PPFD[μ mol]
30cm	527	7.45	579	7.29	601	7.23
60cm	191.4	2.64	210.5	2.59	218.7	2.58
90cm	100.6	1.37	110.4	1.35	114.6	1.33
120cm	59.9	0.82	65.9	0.8	68.5	0.79

Table 1은 정확한 감소비율을 알아보기 위해 혼합광(Red:Blue)의 광원 비율(2:1, 3:1, 4:1)과 거리에 따른 측정값을 나타낸 것이다. 조도값과 광합성 광자속밀도값은 광원과 측정 점과의 거리를 기준하면 30[cm]에서의 측정값을 100%라 가정할 때 120[cm]에서의 측정값은 10~11%수준으로 매우 큰값으로 감소됨을 확인하였다. 즉, 혼합광 광원비율에 따른 차이값은 크지 않고 감소비율은 거의 비슷한 결과를 알게되었다. 이처럼 LED 혼합광(Red:Blue)은 측정 거리가 멀어질수록 조도와 광합성 광량자속밀도는 작아짐을 알았다.

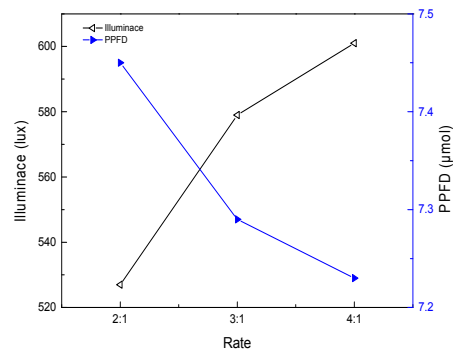


Fig. 3. Lighting and PPFD with R:B ratio (measuring distance : 30[cm])

Fig. 3은 측정점과 광원의 거리가 30[cm]일 때, R:B광원 비율에 조도와 광합성 광량자속밀도의 결과이다. R:B의 비율이 2:1, 3:1, 4:1로 되어감에 따라 조도는 증가되는 특성을 보이고 있으며 광합성 광량자속밀도는 감소됨을 알 수 있다. 이결과는 조도특성은 Red광의 영향이 크며, 광합성 광량자속밀도는 blue광의 영향도가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 향후 빛의 조도측면과 광합성 측면을 고려한 조명설계시 중요내용이 될 것이다.

3.2 단색광과 White광에 따른 특성

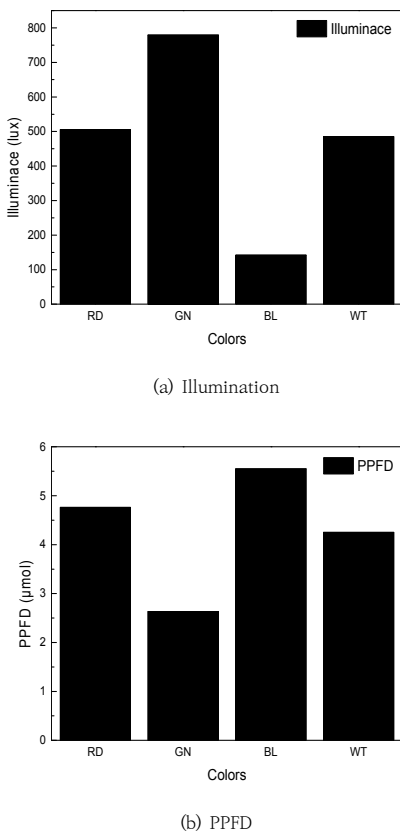


Fig. 4. Lighting and PPFD with color and white

단색광의 특성을 파악코자 단색광과 white광에 대한 광특성과 광합성 광자속밀도를 파악한 결과는 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다. 이때, 광특성의 정확한 비교를 위하여 광원에 인가하는 전력은 7[W]로 동일한 상태를 기준하였다.

Table 2. Brain waves characteristics in mathematics region

	Red	Green	Blue	White
PPFD [μmol]	4.76	2.63	5.55	4.25
Illumination [lux]	505	779.1	142	485
Color Coordinate	X	0.6958	0.1399	0.2458
	Y	0.3037	0.7326	0.0289

얻어진 결과를 보면, 동일한 전력을 인가후 단색광, White광의 광합성 광자속밀도(PPFD)는 Blue, Red, White, Green순의 높은 값을 갖는다. 위 결과로 광합성 광자속밀도의 영향도는 Blue광의 의존도가 가장 높으며, 그에 비해 Green광의 영향도는 현저히 적음을 알 수 있다. 그와 반대로 조도의 영향도는 Green, Red, White, Blue순의 높은 값을 갖는다. PPFD와 반대로 조도는 Green광의 의존도가 높으며, Blue의 영향은 적음을 알게 되었다.

이에 대한 좀 더 면밀한 비교를 위해 기준전력 10[W]를 기준하여 단색광과 white광에 대한 측정점과 광원의 거리에 따른 조도와 광합성 자속밀도에 대한 특성은 Fig. 5에 나타내었다.

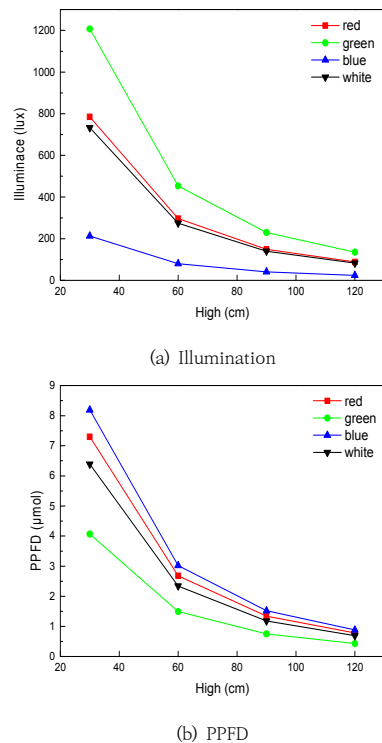


Fig. 5. Illumination and PPFD with color and white(10[W])

인가되는 Power의 값이 클수록 얻어지는 조도와 광합성 광자속밀도는 커짐을 알 수 있었으며, Fig. 4에서 얻은 결과와 동일하게 특성을 나타내었다. 조도의 경우 영향도는 Green>Red>white>Blue 순서로 나타내었으며, 측정거리 30[cm]를 기준으로 60[cm], 90[cm], 120[cm]의 감소수준은 각각 약 37[%], 19[%], 11[%]의 수준으로 감소됨을 알았다. 광합성 광자속밀도의 경우 영향도는 Blue>Red>white>Green 순서로 나타내었으며, 측정거리 30[cm]를 기준으로 60[cm], 90[cm], 120[cm]의 감소수준은 각각 약 36[%], 18[%], 10[%]의 수준으로 감소됨을 알았다.

이러한 결과로부터 알 수 있는 점은 조도를 높이고자 할 때는 Green광을 고려해야 하며, 광합성특성을 높이고자 하는 경우는 Blue광을 활용해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 자연광과 더불어 인공광원인 LED를 활용한 실내의 식물공장의 조명설계시 광합성효과를 증진 시키는 최적조건 설정에 도움을 주고자 한다. 즉, 식물생장에 필요한 빛의 파장과 세기, 광합성 광자속밀도에 대한 정확한 이해를 하고 단색광과 혼합광에 조건변화에 따른 광합성 광량자속밀도와 조도특성 파악하였다.

분석한 결과 조도와 광합성 광자속밀도는 거리에 반비례하는 특성을 보이며, 조도의 특성을 기준할 때는 Green광이 중요하며, 광합성을 위한 광합성 광량자속밀도는 Blue광이 중요함을 알게 되었다. 영향도는 Blue>Red>white>Green 순서로 나타내었으며, 측정거리 30[cm]를 기준으로 60[cm], 90[cm], 120[cm]의 감소수준은 각각 약 36[%], 18[%], 10[%]의 수준으로 감소됨을 알았다.

Red:Blue광원의 혼합광원의 특성을 본 결과, 혼합 Red:Blue LED 광원 비율(2:1, 3:1, 4:1)과 측정거리(LED 광원과 측정점과의 거리)에 따른 값은 30[cm]에서의 측정값을 100%라 가정할 때 120[cm]에서의 측정값은 10~11[%]수준임을 확인하였다. 즉, 거리가 멀어질수록 조도와 광합성 광량자속밀도는 작아짐을 알았다. 더불어 LED광원의 색깔의 차이보다는 측정거리의 인자가 더 중요함을 알 수 있었다.

이처럼 식물의 종류와 어느 부분의 성장을 하고자하는 것을 고려하여 LED의 특정 광파장과 거리에 대한 특성을 이해하는데 도움을 주고자 한다. 즉, 얻어진 결과를 토

대로 실제 구현하고자 하는 식물공장 조명설계 프로그램 상에 구현하는데 기초 데이터로 활용되며 실내 온실의 광효율 극대화를 위한 최적 구조를 제안을 위한 향후 연구의 진행 방향 설정에 기여하고자 하였다.

References

- Ji Wan Hong, "Study on the Plant Growth Variation According to Change of Luminous Flux LED Light in Plant Factory", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 3, pp.304-311, 2020
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.304>
- Jun-Hyuk Yang, Won-Ho Choi, Noh-Joon Park, and Dae-Hee Park, "A Study on Growth of the Green Leaf Lettuce Depends on PPFD and Light Quality of LED Lighting Source for Growing Plant" J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 142-147 February 2015
DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.142>
- Chang Sun Choi, Jun Gu Lee, Yoon Ah Jang-Sang Gyu Lee, "Effect of Artificial Light Sources on Growth and Quality Characteristics of Leaf Lettuce in Closed Plant Factory System", Journal of Agriculture & Life Science, Vol. 47, No. 6, pp.23-32
DOI: <http://dx.doi.org/10.14397/jals.2013.47.6.23>
- Woo Hyun Kang, Fan Zhang, June Woo Lee, "Improvement of Canopy Light Distribution, Photosynthesis, and Growth of Lettuce (Lactuca Sativa L.) in Plant Factory Conditions by Using Filters to Diffuse Light from LEDs", Korean J. Hortic. Sci. Technol. Vol. 34, No. 1, pp. 84-93, 2016
DOI: <http://dx.doi.org/10.12972/kihst.20160015>
- Hyeong Gon Kim, Jae Su Lee, Yong Hyeon Kim, "Chlorophyll Fluorescence, Chlorophyll Content, Graft-taking, and Growth of Grafted Cucumber Seedlings Affected by Photosynthetic Photon Flux of LED Lamps", Protected Horticulture and Plant Factory, Vol.27, No.3, pp. 231-238, July(2018)
DOI: <http://doi.org/10.12791/KSBEC.2018.27.3.231>
- N.Khan,N.Abas,"Comparative study of energy saving light sources", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.15, pp.296-309, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.072>
- Boong-Joo Lee, "Basic Research on Lighting Design for Learning Effect", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 4 pp. 518-524, 2020
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.4.518>
- Young-Jin Hong, Soon-Ja Lim, Wan-Bum Lee, "A study on lighting system for LED color temperature control using wireless communication and smartphone", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation

Society, Vol. 18, No. 11, pp. 72-77 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.72>

- [9] Jang-Weon Lee, Ji-won Lim, "A study on growth of plants using the LED", The Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineers, 2010 Autumn Annual Conference, , 2010. 9. 29
-

이 봉 주(Boong-Joo Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 인하대학교 전기공학
학과 졸업(공학사)
- 1998년 2월 : 인하대학교 대학원
전기공학과 졸업(공학석사)
- 2003년 2월 : 인하대학교 전기공
학과 졸업(공학박사)
- 2004년~2007년 LG전자 디지털
디스플레이연구소
- 2007년 9월~현재 남서울대학교 전자공학과 교수

〈관심분야〉

유기소자(트랜지스터,메모리), 태양전지, 발광소자(OLED, LED), 조명, 디스플레이