

## 식물재배를 위한 최적LED 배열조합설계

이성원 · 박세광

# LED array design for optimal combination of plant grown

Sungwon Lee · Sekwang Park

Received: 30 April 2014 / Revised: 20 June 2014 / Accepted: 24 September 2014  
© Korean Society for Plant Biotechnology

**Abstract** This paper is suitable for household plant factory by design and using both energy-saving LED and solar technology. Conventional household plant factory only depending on natural sunlight is sensitive for the change of external environment. Another a big problem of conventional common household plant factory is large power consumption. Recently interest in wellbeing food such as chemical-free is increased abruptly. To solve these two problems, this paper describes hybrid type of household plant. In particular, reducing the power photosynthesis photon flux density (PPFD) is kept uniform to enhance the growth of the plant. Ambient light sensor is adopted for the control of proper combination of sunlight and LED to keep PPFD constant.

**Keywords** Plant factory, Sunlight, Energy-saving, Uniform PPFD

### 서 론

농업은 기후와 토지 그리고 환경의 영향을 받기 때문에 계절에 따른 제한적인 재배와 농약사용에 의한 식품 안정성의 결여 등의 문제점으로 인해 인공 광을 이용한 식물공장이 부각되고 있다. 대부분의 식물공장은 생산성 향상을 목적으로 식물의 성장에 최적 조건이 되는 광, 온

도, 수분, 양분 등을 조절하고, 기후변화와 병해충에 대응하여 안정적 식물 공급이 가능한 완전 밀폐 형태를 갖추고 있다<sup>1)</sup>. 형광등, 백열등, 할로겐램프 등 다양한 종류의 광원을 사용하고 있지만, 특정 파장을 방출하는 LED를 주 광원으로 하는 식물재배기술이 각광받고 있다.

이는 원하는 파장 조합을 통해 다양한 종류의 식물과 환경에 따른 변화에 효과적으로 대응할 수 있기 때문이다. 이에 반해 시간과 계절에 따른 광량의 변화와 불필요한 파장영역 등 균일한 광량 공급이 힘든 큰 단점을 가지고 있는 태양광은 식물 공장에서 배제되어 왔다. 하지만 가정용 보급화 등 대중화를 위해서 필요한 전력효율 향상을 위해서는 자연에너지인 태양광의 이용이 큰 도움이 될 수 밖에 없어 이를 위해 차양 및 채광시스템의 실내조명 보광 형태로 연구되던 조도제어 시스템을 식물공장에 적용시킴으로 인공광의 효율적 사용으로 인한 에너지 절감 효과를 높이하고자 한다<sup>2)</sup>.

이 논문에서는 외부 자연광의 변화에도 항상 일정한 광합성광량자속밀도(Photosynthesis Photon Flux Density: PPFD)를 재배작물에 공급하기 위해 조도센서를 이용한 조도제어 시스템 구조를 제안한다.

### 본 론

#### LED 제어시스템의 원리

이 연구에 사용되는 LED 광 환경 제어시스템은 태양광의 세기에 따라 변화하는 조도센서의 출력 전류를 이용하여 인공 광원의 전류를 제어한다. 기존의 광 센서의 좁은 수광 범위로 인해 높은 오차 값을 MEMS 광 센서를 통해 해결한다.

재배식물의 최적파장조합을 위한 LED 색상을 조합하

S. W. Lee  
경북대학교전자전기컴퓨터학부  
(School of Electrical Engineering and Computer Science,  
Kyungpook National University)

S. K. Park (✉)  
경북대학교 IT대학전기공학과  
(Department of Electrical Engineering, Kyungpook National  
University)  
e-mail: skpark@knu.ac.kr

고, 최대광포화점을 기준으로 일정한 광량이 공급될 수 있도록 설계하여 유입되는 광량에 따라 인공 광원의 광속을 측정하여 실내조도를 광량의 유입량에 관계없이 설정되어 있는 조도 값으로 일정하게 유지시켜 인공 광원의 에너지를 절감한다<sup>3)</sup>. 하지만 차양 및 채광시스템에서 사용하는 인공광원 제어 시스템은 빛의 밝기를 기준으로 조도를 일정하게 유지함을 목적으로 하고 있기 때문에 식물 재배를 위해서는 식물의 성장에 실질적으로 관여하는 PPFD에 대한 추가적인 사항을 고려해야 한다.

또한 태양광의 광량은 계절과 날씨의 변화로 인해 0 [lx]에서 150,000 [lx]까지의 넓은 조도분포를 가지므로 이에 따른 측정범위가 넓은 광센서를 사용해야 한다.

식물의 최적 파장 조합

광합성이 일어나는 엽록체에는 그라나(grana) 속에 함유된 엽록소가 있는데 엽록소에는 a, b, c, d, e와 박테리오클로로필 a와 b 등이 포함되어 있다. 이 중 엽록소 a와 b의 개체가 가장 많으며 약 3:1의 비로 존재하고 있다. 이로 인해 식물 재배에 쓰이는 광원들은 이 엽록소 a와 b가 흡수할 수 있는 파장 대를 기준으로 제품화되고 있으며, 식물 재배에 사용되는 광원에는 할로겐등, 형광등, 백열등, LED 등 많은 종류의 등이 사용되지만 특정 침투각 파장을 가지는 LED가 보편적으로 사용되고 있다. 이 최적 LED 파장 조합에 대한 기존 식물 재배 기술들의 조명 시스템은 광합성 반응스펙트럼의 최대 피크에만 초점을 맞추어 전 가시영역에 걸쳐 분포된 광합성 반응스펙트럼을 사용하지 않는 방식으로 최적 LED 파장 조합에 대한 기존 식물 재배 기술들의 조명 시스템은 광합성 반응스펙트럼의 최대 피크에만 초점을 맞추어 전 가시영역에 걸쳐 분포된 광합성 반응스펙트럼을 사용하지 않는 방식으로 식물의 최적 성장에 적합하지 않다. 엽록소 a와 b 모두 450 nm 전후 파장대와 660 nm 전후 파장대의 영역에서 가장 높은 광합성 반응을 보임을 알 수 있다. 이를 통해 해당 특정 피크 파장을 조합하여 광합성 효율을 높이

는 연구가 진행되었으나 500 nm에서 650 nm에 이르는 영역의 파장은 생략되고 있다. 이로 인한 식물의 성장 저해 현상이나 결핍 영양소 문제를 야기할 수 있기 때문에 본 연구에서는 백색 LED를 추가로 사용하여 가시영역에 고루 분포된 광합성 반응 스펙트럼과 광합성 작용 스펙트럼에 일치시키도록 하였다.

Figure 1은 엽록소 비율이 적용된 광합성 반응 스펙트럼으로 최대 피크인 450 nm 파장과 660 nm 파장을 갖는 적색 LED와 청색 LED를 식물의 엽록소 a와 b의 3:1 비율에 따라 결합 사용하였다. LED의 피크 값이 협소하여 5 ~ 20 nm 파장 변화만 발생하여도 식물 성장에 큰 영향을 받는데 엽록소 a와 b의 비율에 맞춘 광합성 반응 스펙트럼의 경우 660 nm의 적색 LED와 거의 일치하는 반면, 450 nm의 파장 영역의 경우 피크 값이 두 군데로 분산되는 문제점이 발생한다. 광합성 반응 스펙트럼과 최대한 중첩되면서 효율성이 높도록 청색 LED의 최대 피크를 조정하여 적색 LED와의 비율을 맞추었으며, 상추의 특정 작물 최적 광합성 반응 스펙트럼을 기준으로 광합성 이용 최적 효율에 맞추어 파장을 조합하였다.

광원의 PPFD 계산

태양광의 PPFD 계산

Table 1은 광원 종류에 따른 1 PPFD에 해당하는 조도를 나타낸다<sup>4)</sup>. PPFD의 단위는  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 사용하며 1  $\text{m}^2$  면적에서 1초 동안 통과하는 mol량을 나타내는 수치이다. 태양광의  $1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD에 해당하는 조도는 54 lx이므로 엽채류(상추)의 최대광포화점인  $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 되기 위한 태양의 조도는 16,200 lx이다. 그러므로 태양광의 조도가 16,200 lx 이상에서는 더 이상 광합성 작용이 증가하지 않아 비효율적이다. 또한 지속적으로 광포화점을 유지하는 것 역시 생산대비 효율이 낮기 때문에 최대 광포화점에서 약 10% 정도 감소된 약  $260 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 기준으로 하여 14,040 lx를 최적의 광량으로 정하였다.

인공광의 PPFD 계산

상추의 광포화점을 기준으로 인공 광인 백열등의 조도는 14,500 lx이고, 형광등의 조도는 22,000 lx이다. 이에 반해 LED의 경우에는 2982 lx(Red), 3570 lx(Blue)로 백열등과 4.06 ~ 4.86배, 형광등과 6.16 ~ 7.37배의 조도차이를 보인다. 이는 식물재배에 있어 LED가 광 효율 및 전력효율에

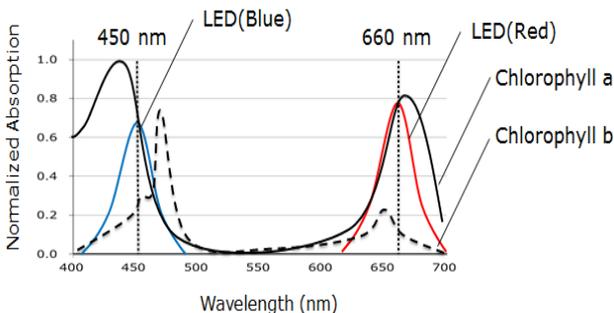


Fig. 1 Optical absorption spectrum of chlorophyll ratio is applied

Table 1 Amount of 1 PPFD according to the type of light Unit: [Lux]

Daylight	Incandescent	Fluorescent lamp	LED	
			Red	Blue
54.0	50.0	74.0	9.9	11.9

우수함을 나타낸다. 또한 적색 광과 청색광의 혼합은 앞서 제시한 광합성 반응스펙트럼에 의해 유리한 식물성장 효과를 나타내며, LED의  $1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD에 대한 조도는 혼합 광 비율에 따라 달라지므로 이를 고려해야 한다<sup>5)</sup>. 사용되는 LED의 개별적인 조도 값을 통해 PPFD를 구하고 합산하는 방식을 사용한다.

$$L_T = L_R + L_B + L_W \tag{1}$$

$$P_T = P_R + P_B + P_W \tag{2}$$

식 (1)에서  $L_T$ 는 합산된 LED Bar의 총 조도를 의미하며,  $L_R, B, W$ 는 각 적색, 청색, 백색 LED에 대한 각 조도를 의미한다. 식 (2)에서  $P_T$ 는 합산된 LED Bar의 총 PPFD를 나타내며,  $P_R, B, W$ 는 각 적색, 청색, 백색 LED에 대한 각 PPFD를 의미한다.

상추의 최적 조도 값을 기준으로  $L_T$ 를 14,040 lx로 하게 되면 광원의 종류 뿐만 아니라 LED 색 종류에 따른 PPFD가 다르기 때문에 실제 260 PPFD와 다르게 된다. 그러므로 최적광량을 설정하기 위해  $P_T$ 에 적용하여 적색, 청색, 백색 LED의 각 PPFD 값을 구하여 합산된 총합이 260 PPFD가 되도록 하였다.

### LED 제어시스템의 설계

Figure 2는 LED의 조도를 제어하기 위해 BJT와 광 센서를 이용한 회로이다. 저항소자 값을 조정하여 측정되는 값이 설정된 값에 일정하도록 회로를 구성하여, 인공광원의 조도를 조절한다. 광 센서를 동작시키기 위한 DC 5 V와 LED 광원을 구동하기 위한 DC 12 V를 인가한다. 광 센서에 의해 입력되는  $I_n$ 에 의해  $I_Q$ 가 변하고, BJT를 통해 DC 12 V를 제어한다.

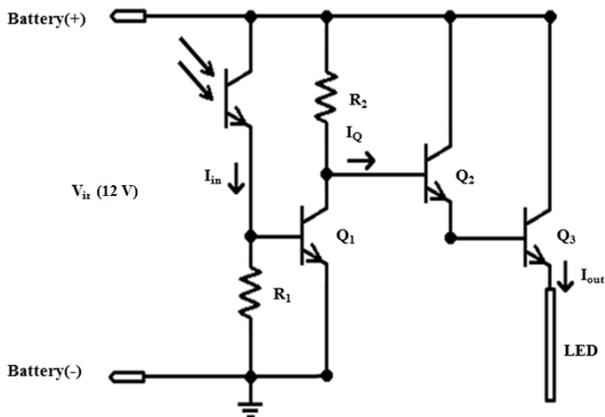


Fig. 2 Circuit design for the control of illumination

### 실험

재배 식물의 생장 변화와 실험 시간을 위한 생장 시기를 고려하여 엽채류 중 시저스그린 로메인상추와 붉은 로메인상추 2가지를 재배 하였으며 식물 생장의 최적 조건을 위해 온도는 20~22°C, 습도는 60~80%를 항상 유지 하였다. 전력 효율 시험을 위해 일중 태양광 변화에 따른 LED 전력 소모량을 측정하였다. Figure 3은 태양광 변화에 따른 PPFD 변화를 나타낸 것으로 태양광의 조도가 0 lx에서 260 PPFD가 공급되고, 외부 광원이 공급되면서 LED에 공급되는 전력이 낮아지는데 태양광의 조도가 13,000 lx에서 상추의 최적 광량인 300 PPFD가 공급된다. 또한, 설계된 LED 제어시스템에서 인공 광과 태양광의 총 PPFD의 변화는 최대오차범위 약 5.5%내에서 300 PPFD를 일정하게 유지함을 알 수 있는데, 이는 차양 및 채광시스템이 일정한 조도 값을 유지하는 것과 달리 식물의 광합성에 필요한 PPFD를 일정하게 유지하기 위한 목적이다.

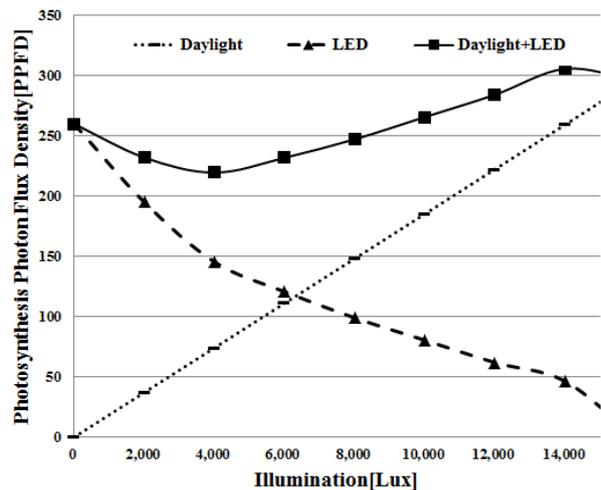


Fig. 3 Changes In total PPFD by daylight

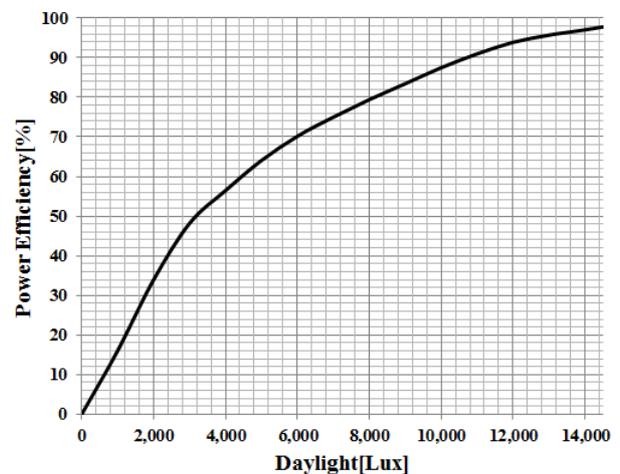


Fig. 4 Power efficiency changes due to solar illumination

Figure 4는 태양광 조도 변화에 따른 전력 효율을 나타낸다. 태양광의 조도가 증가할수록 인공 광의 소모전력이 감소하지만 부족한 PPFd는 태양광에 의해 보충되므로 에너지 절감효과는 증대된다. 0~8,000 lx에서는 1,000 lx 당 10.1%, 8,000~16,000 lx에서는 1000 lx 당 2.5%의 전력 증가율을 보였다. 일중 태양광을 기준으로 평균 43%의 전력 소모가 절감됨을 확인 할 수 있다.

## 결론

이 논문에서는 소비 전력을 줄이고 균일한 생산량을 가지는 가정용 식물 재배 시스템에 대한 기초 연구로 광원의 밝기를 유지하는 기존의 조도 제어시스템과 달리 식물의 적정 PPFd를 일정하게 공급하면서 태양광을 이용하여 전기에너지의 절감 효율을 높이는 LED 제어회로를 제안하였다. 태양광의 변화에도 인공광인 LED의 공급 전류를 제어하여 항상 일정한 PPFd가 공급되고 식물의 성장률이 단일 광원을 사용 했을 때와 96% 이상 일치함을 확인하였다. 실험을 통해 LED 제어회로는 계절과 날씨에 따라 주간 9~14시간 동안 태양광을 실내 식물 성장에 사용함으로써 일중 약 39.7%~52.6%의 불필요한 LED 전력 낭비를 줄일 수 있음을 확인하였다. 온도센서 및 습도센서 등 재배작물의 최적 환경을 모니터링하고 일정하게 유지하는 컨트롤시스템을 추가한다면 보다 생산 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 LED 제어회로와 조명의 효율적 설계, 식물의 성장시기에 따른 적정 PPFd 제어를 통해 에너지 절감 효율을 높일 수 있다.

## 사사

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 2012년도 지식경제부의 재원으로 산학연 공동기술개발 중점사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (C0056176).

## References

- Lee SW (2010) "Plant Factory and plant cultivation using the LED artificial Light". *Optical science and technology* 2:12-19
- Khan N, Abas N (2011) "Comparative study of energy saving light sources". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 15 January pp. 296-309
- Moncef Krarti, Paul M. Erickson, Timothy C. Hillman (2005) "A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting". *Buliding and Environment* vol. 40 June pp. 747-754
- Lee, WS, Kim SG (2012) "Development of Rotational Smart Lighting Control System for Plant Factory". *World Academy of Science. Engineering and Technology* February pp. 741-744
- Kim HH (2004) "Green-light Supplementation for Enganced Lettuce Growth under Red and Blue and Blue-light-emitting Diode". *Hortscience* pp. 1617-1622
- Lee SW (2010) "Plant Factory and plant cultivation using the LED artificial Light". *Optical science and technology* 2:12-19