

식물생장용 인공광원으로서 LED의 활용과 과제

김 용 현

전북대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

I. 서 론

최근 들어 빈번하게 발생하는 기후변화와 소비자의 식생활 패턴 변화에 따라 식량작물 또는 원예작물을 안정적으로 생산할 수 있는 생산 시스템과 관련 기술 개발에 관심이 높아지고 있다.

작물생산 시스템은 크게 개방형시스템(open system)과 폐쇄형시스템(closed system)으로 구분할 수 있다. 개방형시스템은 시스템의 경계를 통하여 작물생장에 필요한 에너지 및 물질(수분, CO₂, O₂) 이동이 제한받지 않는 시스템으로서, 기후변화에 완전하게 노출된 노지재배가 이에 해당한다. 폐쇄형시스템은 태양광이 투과되지 않도록 시스템의 경계가 단열재로 구성되어 있어 시스템 외부와 내부 사이에서 에너지 및 물질이동이 제한을 받는다. 이러한 시스템에서는 태양광의 이용이 불가능한 바, 녹색식물의 성장을 위해서 인공광(artificial lighting)이 요구된다. 그러므로 폐쇄형시스템은 인공광형 작물생산 시스템에 해당한다. 대표적인 폐쇄형시스템으로서 식물공장(plant factory)을 들 수 있다. 한편, 시설재배에 널리 이용되고 있는 유리온실 또는 플라스틱온실에서는 에너지 출입은 제한받지 않으나, 물질의 일부가 출입의 제한을 받는다. 그러므로

유리온실 또는 플라스틱온실은 반폐쇄형시스템(semi-closed system)에 해당한다.

인공광원은 발광 원리에 따라 서로 다른 분광 특성과 조명효율을 갖고 있으므로 식물의 광합성 또는 광형태형성 반응을 촉진하려면 사용 목적에 따라 적절한 인공광원을 선택하여야 한다. 현재까지 인공광원으로는 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형광등, 발광다이오드(light-emitting diode, LED) 램프가 주로 사용되는 가운데 인공광을 이용한 작물의 성장 촉진 또는 파이토케미컬(phytochemicals)에 관련한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 육묘 또는 엽채류와 같이 광포화점이 상대적으로 낮은 작물의 근접조명용으로 광원으로 LED 램프가 주목 받고 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 식물생장용 인공광원으로서 LED의 응용 가능성 검토와 더불어 LED의 기술적 과제를 제시하는 데 있다.

II. 식물생장용 인공광원

가. 인공광원의 종류

인공광원은 발광원리에 따라 열복사와 발광의 2 종류로 구분된다(Fig. 1).

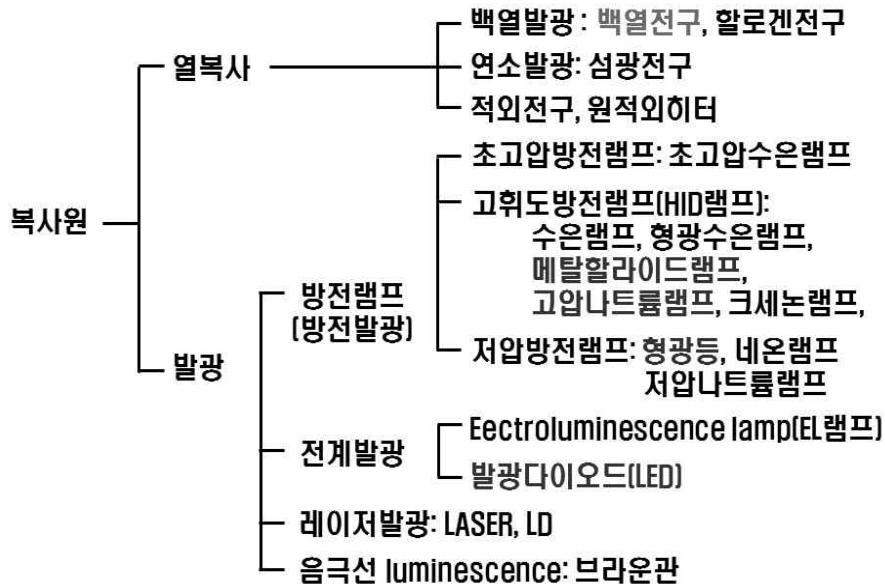


Fig. 1. Classification of artificial lighting sources by the principle of luminescence

나. LED

LED는 갈륨, 알루미늄, 비소, 인 등의 III-V족 원소 및 아연, 카드뮴, 셀렌, 텔루르 등의 II-VI족 원소의 화합물 반도체를 주요 재료로 사용한 발광소자이다. LED는 화합물 반도체 중에서 V족 또는 VI족 원소를 포함하여 상대적으로 전자가 많은 n형 반도체 결정과 II족 또는 III족 원소를 포함하여 전자가 상대적으로 적은 p형 반도체 결정을 기판 결정 위에 여러 층으로 배열한 구조로 되어 있다. LED의 p-n 접합부에 전압을 걸어주면 n형 결정에 들어있는 전자와 p형 결정에 들어있는 정공(正孔)이 p-n 접합부에서 재결합되는데, 이 과정에서 효율이 높은 전기에너지가 광에너지로 변환되어 발광이 이루어진다. p-n 접합부에서 변환된 광에너지의 일부가 발광되고, 나머지 에너지는 반도체 결정 내부를 통과하거나 반사되면서 감소하고 마지막에는 결정의 발열로서 소모된다(Fig. 2).

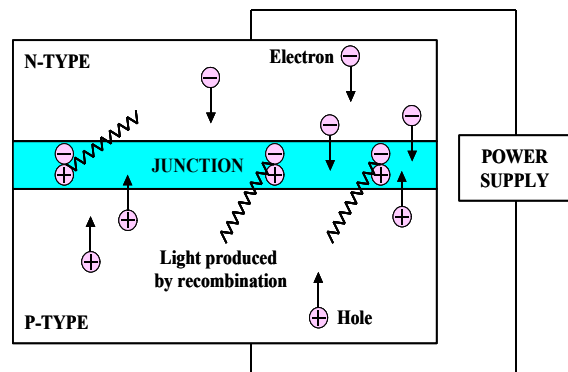


Fig. 2. Principles of luminescence of LED (김, 1999).

LED는 높은 신뢰성과 응답성을 지니고 있으며 점등에 소비되는 전력소모가 매우 작기 때문에 정보 표시관, 광고탑, 계시관 또는 가전제품의 지시계 등에 광범위하게 이용된다. LED의 장점은 단색광으로서 다른 광원과 다르게 고속 펄스점등이 가능하다(Fig. 3).

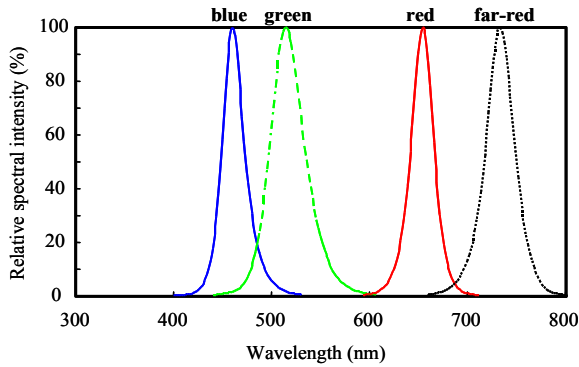


Fig. 3. Relative spectral intensity of blue, green, red and far-red LED (김 등, 2001).

Ⅲ. 식물생장용 인공광원으로서 LED의 응용과 과제

가. 식물생장용 인공광원으로서 LED의 응용

LED 램프는 형광등을 비롯한 방전램프에 비해서 수명이 길고, 전력소모가 적으며, 광질(파장) 선택 및 광양 제어가 쉬운 장점을 지니고 있다(김, 1999). 때문에 조직배양묘의 성장 촉진(은 등, 2000), 엽채류의 생장 및 phytochemicals 특성(Tibbitts et al., 1983; Li and Kubota, 2009), 플러그묘의 묘소질 향상

Table 1. Growth of lettuce on 21 days after transplanting.

Treatments	Leaf length (mm)	Leaf area (cm ²)	ODD ^y	Fresh wt. (g/plant)	Dry wt. (g/plant)	Hue
R1	286.2 a ^z	25.69 a	10.9 e	108.7 a	3.23 a	116.1 ab
R2	262.6 bc	23.60 abc	12.0 cde	102.2 a	3.32 a	115.7 b
R3	270.6 ab	23.85 abc	11.6 de	98.8 ab	2.74 a	115.7 b
R4	241.2 cd	19.26 c	15.7 a	77.4 b	2.66 a	116.2 ab
R5	272.6 ab	25.08 ab	13.6 bc	92.7 ab	2.58 a	116.5 a
R6	260.2 bc	24.53 ab	13.7 bc	108.7 a	3.44 a	116.0 ab
R7	269.6 ab	25.02 ab	12.7 cde	102.0 a	3.41 a	115.7 b
R8	227.4 d	24.46 ab	13.2 bcd	103.1 a	3.14 a	115.6 b
Control	225.8 d	20.75 bc	14.2 ab	94.0 ab	3.16 a	114.8 c
LSD _{.05}	22.1	4.85	1.9	23.9	0.98	0.7

^zmeans with the same letter are not significantly different.

^yOptical density difference measured by a chlorophyll meter(SPAD 502, MINOLTA, Japan).

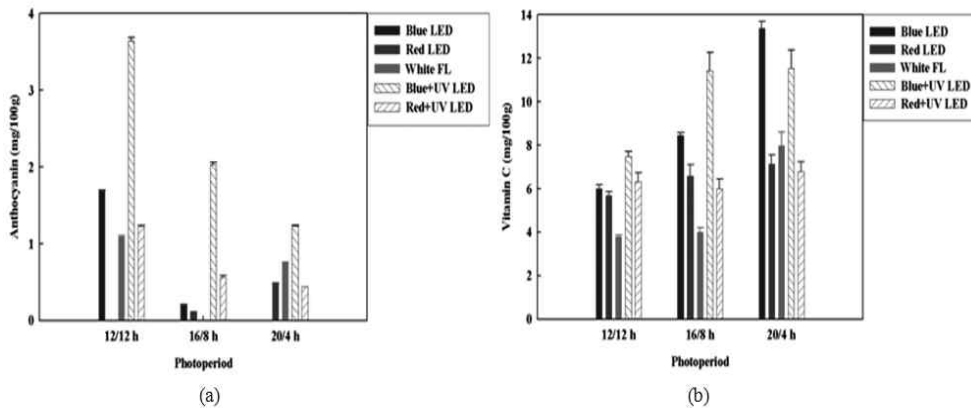


Fig. 4. Phytochemicals of lettuce as affected by different light quality and photoperiod of LED; (a) anthocyanin, (b) ascorbic acid.

(이 등, 2010; 엄 등, 2009), 접목묘의 활착 특성(김과 박, 2003), 시설원예의 전조재배 또는 과채류 보광재배(Brown et al., 1995; Dillard et al., 2008; 이 등, 2010), 화훼류, 허브류 및 약용식물의 생장, 식물공장에서 식물생장을 위한 인공광원으로 LED가 사용되거나, 응용 가능성에 대한 검토가 이루어지고 있다.

이 등(2011)은 적색광 LED 영역, 즉 630-670 nm의 파장을 5 nm 간격으로 구분한 8개의 처리구를 설치한 후 상추의 생장과 안토시아닌(anthocyanin) 함량에 미치는 광질 효과를 분석하였다. 이 결과 정식 후 21일째에 655-665 nm 영역에서의 엽장, 엽폭, 엽면적은 대조구(백색형광등)에 비해서 유의차가 인정될 정도로 높게 나타났다(Table 1). 지상부의 생체중과 건물중은 660 nm와 665 nm에서 높게 나타났다. 한편 적색 처리구의 엽록소함량은 대조구에 비해서 작게 나타났다. 특히 파장이 상대적으로 짧은 635 nm 처리구에서의 엽록소함량이 가장 작게 나타났다.

상추의 phytochemicals에 미치는 LED의 광질과 광주기 효과가 분명하게 나타났다(Fig. 4). 안토시아닌(anthocyanin) 함량은 청색(파장 450 nm) LED 또는 청색+UV(파장 365 nm) LED 처리구에서 높게 나타난 가운데 명기가 짧을수록 안토시아닌 함량이 증

가하였다. 한편 비타민 C(ascorbic acid) 함량은 명기가 길수록 증가하였고, 청색 LED 또는 청색+UV LED 처리구에서 높게 나타났다(이, 2011).

적색(R, 파장 660 nm)과 청색(B, 파장 450 nm) LED의 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux, PPF)을 혼합한 처리구에서의 안토시아닌 함량은 R:B=8:2일 때 12/12 h의 광주기(명기/암기)에서 가장 높게 나타났다(Fig. 5).

작물생산 시스템에서 LED의 응용은 적은 전력소모로 작물을 생산할 수 있을 뿐만 아니라 미량의 광에너지로서 형태형성 반응을 촉진할 수 있기 때문에 우주에서의 생명재생시스템 (Bioregenerative Life Support System)의 인공광원으로도 주목받고 있다 (Cuello, 2002).

2) 작물생산과 식량 자급률

2001년에 국내 쌀의 평균 생산량은 10a당 693 kg으로서 2000년 이후 최고치에 도달하였으나, 그 후 점차 감소하면서 2010년에는 483 kg/10a 까지 줄어들었다(Fig. 6). 우리나라의 쌀 자급율은 100%를 상회하나, 식량자급률과 곡물자급률은 1970년에 각각 86.2%, 80.5%이었다. 그 후 식량자급률과 곡물자급률이 지속적으로 감소하면서 2010년에는 54.9%,

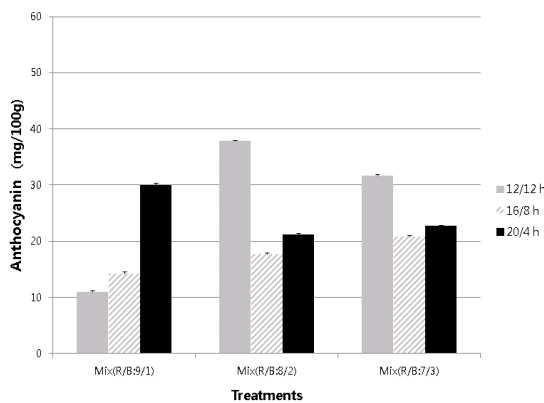


Fig. 5. Anthocyanin as affected by different photoperiod and the addition of blue LED to red LED.

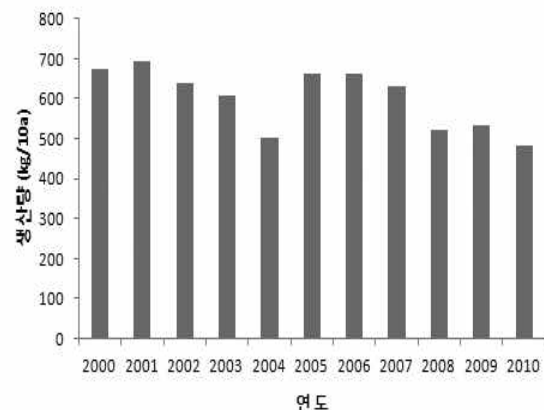


Fig. 6. Production of paddy rice

26.7%로서 OECD 국가들 가운데 낮은 수준에 해당한다(Fig. 7). 이러한 결과는 농가 호수, 경지면적 및 농업인구의 감소, 고령화 등에 기인한 것으로서 향후에도 지속될 것으로 전망된다. 평균 생산량의 감소와 자급률의 저하를 극복하려면 기존의 농법 또는 농업기술 대신에 발전 가능성이 높은 식물생산 시스템이나, 생명공학 기술을 응용한 기술농업 또는 고부가가치농업을 지향해야 할 것이다.

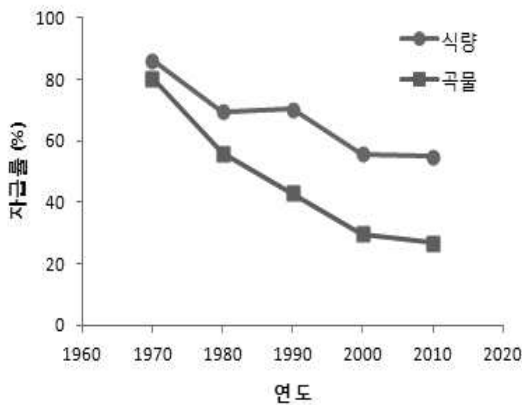


Fig. 7. Self-supply of food and cereal crops

3) 식물생장용 인공광원으로서 LED의 과제

LED 제조 공정은 에피 웨이퍼(Epi wafer), 칩(chip) 생산, 패키징(packaging) 및 조명기구 제조 등으로 구분된다. 현재 LED 칩 수준에서의 조명효율

은 100-130 lm/W로서 고압나트륨램프의 조명효율에 비해서 다소 작으나, 형광등보다 우수한 것으로 알려져 있다(Table 2). 단, 조명효율은 LED chip 수준에서 측정된 것으로서 패키징을 거쳐 조명기구로 완성되면서 조명효율의 저하가 불가피한 실정이다. 향후 LED의 최대 조명효율은 180-200 lm/W에 이를 것으로 전망된다. 이렇게 되면 LED 램프로부터 조사된 PPF가 현재 수준의 LED 램프로 비해서 약 2배 이상의 광양자를 방출할 것으로 예상된다.

식물생장용 광원으로 널리 쓰이고 있는 청색 또는 적색 LED로부터 약 20-25 cm 떨어진 지점에서 측정된 PPF는 200-250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 갖는다. 이러한 수준의 PPF를 갖는 LED를 사용할 경우 엽채류의 성장 촉진 또는 플러그묘 생산을 위한 근접조명이 가능하다. 또한 앞들깨, 국화 등의 전조재배에 필요한 최소 PPF가 10-30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이므로 LED를 전조재배용 광원으로 이용할 수 있다. 한편 과채류 또는 식량작물과 같이 광포화점이 높은 작물 재배에 LED 단독 광원만으로 작물의 생장에 충분한 PPF를 확보하기에는 한계가 있다.

LED를 근접조명용 광원으로서 이용할 때 LED로부터의 발열로 인하여 작물이 열 스트레스를 받을 수 있다. 이 경우 LED램프의 냉각이 요구된다. 현재 수냉식 또는 공랭식의 냉각 방법이 검토되고 있다.

LED의 구조 특성으로 다양한 파장의 단색광을

Table 2. Photosynthetic photon flux(PPF) efficiency of artificial lighting sources.

종 류	소비 전력 (W)	조명효율 (lm·W ⁻¹)	PPF-복사 환산계수 ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}/\text{W}$)	PPF-조도 환산계수 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/1,000\text{lx}$)
고압나트륨램프	360	138.9	1.85	13.3
고연색나트륨램프	400	60.0	1.33	22.1
메탈할라이드램프	400	100.0	1.36	13.6
고연색메탈할라이드램프	400	66.3	1.11	16.7
백색형광등	40	77.5	0.96	12.4
3과장형광등	40	89.0	1.22	13.7
식물생장용형광등	40	33.3	0.75	22.4

구현할 있으며, 주파수와 듀티비(duty ratio)를 다르게 만들 수 있다. 주파수와 듀티비를 다르게 설정할 경우 LED 램프의 점등에 필요한 전력소모를 절감할 것으로 기대된다. LED 파장의 적정 조합, 적정 주파수 및 듀티비에 따라 원예작물과 식량작물의 생장과 phytochemicals에 미치는 효과는 물론 생산 과정에서의 에너지 절감이 다르게 나타날 것이다. 그러므로 실험 설계 및 제작 단계에서 이에 대한 충분한 검토가 바람직하다.

끝으로 LED가 다른 인공광원에 비해서 전력소모가 적고, 수명이 긴 장점을 지니고 있으나 구입비와 설치비는 여전히 실용화의 장애 요소로 작용하고 있다.

IV. 참고 문헌

1. 김용현. 1999. 인공광원으로 발광다이오드를 이용한 묘생산 시스템에서 식물생장 및 형태형성 제어 -발광다이오드의 분광 특성 및 광강도-. 한국농업기계학회지 24(2):115-122.
2. 김용현, 박현수. 2003. 수박 접목묘의 활착 특성에 미치는 청색, 적색 및 원적색 발광다이오드의 영향. 한국농업기계학회지 28(2):151-156.
3. 김용현, 박현수. 2001. 적색광에 대한 청색광의 부가 조사가 접목묘의 증발산과 활착에 미치는 영향. 한국생물환경조절학회 학술발표 논문집 10(1):34-38.
4. 김용현, 은종선, 김영선. 2001. 기내 배양종묘의 미세번식을 위한 인공광원으로서 발광다이오드의 응용. 한국농업기계학회 학술대회 논문집 6(1):161-166.
5. 김용현, 이종호. 1998. 식물묘공장의 근접조명용 인공광원으로서 형광등의 광강도 및 분광특성. 한국농업기계학회지 23(6):591-598.
6. 엄영철, 장운아, 이준구, 김승유, 정승룡, 오상석, 차선화, 홍성창. 2009. 폐쇄형 육묘시설 내에서 몇 가지 광원이 토마토와 오이의 묘소질에 미치는 영향. 생물환경조절학회지 18(4):370-376.
7. 은종선, 김영선, 김용현. 2000. 도라지 배양묘의 생장 및 형태형성에 미치는 발광다이오드의 효과. 한국식물조직배양학회지 27(1):71-75.
8. 이재수, 박종호, 김용현. 2011. 상이한 파장의 적색 LED 램프하에서 성장된 상추의 생장 특성. 한국생물환경조절학회 추계 학술대회 논문집 20(2)(발표 예정)
9. 이재수, 이혜인, 박종호, 김용현. 2010. 인공광하에서 육묘된 파프리카의 정식 후 생장 및 수량. 한국생물환경조절학회 학술발표 논문집 19(1):185-186.
10. 이혜인. 2011. 식물생장용 인공광원의 광이용효율 분석. 전북대학교 대학원 석사학위논문.
11. Brown, S.B., A.C. Schuerger, and J.C. Sager. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 120(5):808-813.
12. Cuello, J.L. 2002. Latest developments in artificial lighting technologies for bioregenerative space life support. Acta Horticulturae 580:49-56.
13. Dillard, C.M., A.M. Eldemire, O.A. Monje, and J.C. Sager. 2008. Comparison of Spectral Combinations of Light Emitting Diodes for Crop Production. ASABE Paper No. 083894.
14. Qian Li, Q. and C. Kubota. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environmental and Experimental Botany 67:59-64.
15. Tibbitts, T.W., D.C. Morgan, and J.J. Warrington. 1983. Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide and tungsten halogen lamps at equal PPF. J. of Amer. Soc. Hort. Sci. 108:622-630.