

Quantifying of Photon Flux Emitting from Light-emitting Diodes Using a Quantum Sensor and Spectroradiometer¹⁾

Yong Hyeon Kim* · Hyun Soo Park

Division of Bioresource Systems Engineering, Chonbuk National Univ., Chonju 561-756, Korea
(The Institute of Agricultural Science & Technology)

Abstract

This study was conducted to analyze the opto-electric characteristics of light-emitting diodes (LED) designed for growth and morphogenesis control of transplant and to quantify the photon flux emitting from LED using a quantum sensor and spectroradiometer. Difference in photon flux for blue and red LED between measured by a quantum sensor and measured by a spectroradiometer and numerically integrated was not observed. This result implies a spectroradiometer can be applied to quantify the photon flux emitting from far-red LED, which can not be measured using a quantum sensor. Since photon flux increases in proportion to wavelength, photon flux of LED modules arranged for red and far-red increased gradually as the number of LED stick emitting far-red in LED modules increased. Illumination of LED modules arranged for red and far-red decreased as the number of LED stick emitting far-red in LED modules increased. There was no difference in irradiance between LED modules arranged for red and far-red.

Key words: artificial lighting source, light quality, numerical integration, photomorphogenesis, transplant

* Corresponding author

¹⁾ 본 연구는 1999년도 농림부 농림기술관리센터의 첨단기술개발과제로 수행되었음.

서 론

광질(light quality)은 식물의 성장과 형태형성 반응에 커다란 영향(Hart, 1988; Fujiwara and Kozai, 1995)을 미치며, 엽내의 탄수화물과 단백질 함량에도 영향을 미친다(Warrington and Mitchell, 1976). 일반적으로 식물에 조사되는 광에 청색광과 적색광을 추가하면 식물의 광합성속도가 증가한다. 또한, 원적색광을 부가하면 꽃눈 형성, 종자 발아, 배축 신장, 잎의 전개 등 식물의 광형태형성 반응이 다르게 나타난다. 자연광에는 다양한 광질이 포함되어 있으나, 식물의 성장 또는 형태형성 반응을 촉진할 수 있는 특정한 파장의 광을 선택하여 조사하기가 쉽지 않다. 그러므로 광질 조절에 의해서 식물의 광형태형성 반응을 촉진하려면 특정한 파장 영역의 선택적인 조사가 가능한 인공광을 사용하는 것이 효과적이다.

인공광원에 포함된 적색광(red light, R)과 원적색광(far-red light, FR)의 비율(R/FR)을 조절하면 광형태형

성 반응의 센서 역할을 담당하는 파이토크롬(phytochrome)의 광평형상태(photoequilibrium state function, Φ)를 변화시킬 수 있다. 보통 Φ 가 크면 식물의 줄기 신장이 억제되나, 반대로 Φ 가 작게 되면 신장이 촉진되는 것으로 보고된 바 있다(Mancinelli, 1993). 이러한 관계를 폐쇄형 묘생산 시스템의 광환경 설정에 적용하면 목적하는 바 식물묘의 형태 형성을 촉진하거나 균일한 형질 발현에 도움이 될 것이다.

발광다이오드(light-emitting diodes, 이하 "LED"로 표시함)는 소형의 단색광원으로서 높은 신뢰성과 응답성을 지니고 있으며, 현열 발생광과 장파복사의 방출량이 작기 때문에 식물묘의 광형태형성 제어를 위한 인공광원으로서 사용되고 있다(Bula et al, 1991; Brown et al., 1995; Okamoto et al., 1996; Yanagi et al, 1996; Eun 등, 2000). Kim(1999)은 식물묘의 성장과 형태형성 제어를 위해서 청색, 녹색 및 적색광의 단색광 LED 모듈을 제작하여 LED의 분광 특성과 광강도를 분석하였으며, LED의 점등 회로에서 입

력 전류의 크기에 따라 광량을 쉽게 조절할 수 있음을 제시하였다.

상기의 단색광 LED 모듈을 혼합하여 제작한 조합광 LED 모듈은 식물묘의 성장과 형태형성 반응을 효과적으로 제어하는 데 사용할 수 있는 바, 본 연구에서는 적색-청색광과 적색-원적색광의 조합광 LED 모듈을 제작하였다. 광합성유효광량자속(photosynthetic photon flux, 이하 “PPF”로 표시함)을 기준으로 적색광에 청색광 또는 원적색광을 일정한 비율로 조합하려면 각각의 단색광 LED로부터 조사된 광량자속에 대한 정량화가 이루어져야 한다. 이제까지 PPF의 정량화에 사용된 센서는 광량자센서로서 측정 가능한 파장 영역은 400~700 nm이다. 그런데 원적색광은 730 nm에서 중심 파장을 갖기 때문에 PPF 센서를 이용한 정량화가 불가능하다.

식물묘의 성장 및 형태형성 제어용 인공광원으로서 조합광 LED 모듈을 제작하고자 시도된 본 연구의 목적은 조합광 LED 모듈의 광-전기 특성을 분석하고, 광량자센서와 분광광도계를 이용하여 LED 모듈로부터 조사된 광량자속에 대한 정량화 결과를 제시하는 데 있다.

재료 및 방법

1. 실험용 LED의 광-전기 특성

본 실험에 사용된 LED chip들의 광-전기 특성이 Table 1에 실려 있다. 청색광(NSPB633S, Nichia Chemical Co.), 적색광(LNJ295PCDA, Matsushita Co.),

원적색광(BCH-36, Showa Denko Co.)들의 주파장은 각각 470 nm, 660 nm, 730 nm이다.

2. 조합광 LED 모듈의 구성

식물묘의 성장 또는 형태형성 반응에 미치는 LED의 조사 효과를 높이고자 조합광 LED 모듈을 제작하였다. 본 연구에 사용된 LED 모듈은 발광부, 전원 제어부, 지지용 프레임 등으로 구성된다. 그러므로, 기존의 LED 프레임(Kim, 1999)에 청색, 적색 또는 원적색광 LED 스틱(stick)의 조합이 가능하도록 LED 모듈을 제작하였다.

발광부는 LED 스틱이 배열된 LED 어레이(array)로 이루어진다. 48개의 동일한 LED로 구성된 1개의 LED 스틱은 선광원을 이루고, 각각의 독립된 LED 스틱들이 평면에 배열되어 면광원의 LED 어레이를 이룬다. LED 어레이의 최대 발광유효면적은 315×290 mm으로서, 최대 40개의 LED 스틱이 배열될 수 있다. Table 2는 LED 발광부에 사용된 LED 스틱의 전기 특성을 나타낸 것이다. 청색광의 LED 스틱은 스틱 1개에 6개의 LED가 직렬로 연결되고, 이 직렬 LED는 8개의 병렬회로로 연결된다. 한편 적색과 원적색광 LED 스틱은 스틱 1개에 12개의 LED가 직렬로 연결되고, 이 직렬 LED는 4개의 병렬회로로 연결된다. 이와 같이 LED 스틱이 구성된 것은 LED 소자의 전기적 특성이 다르기 때문이다. 전원 제어부는 직류 전 원장치로서, 전압과 전류의 불륨을 조정할 수 있도록 구성하였다. 지지용 프레임에는 LED 스틱을 고정하는 연결용 기관과 LED 어레이에서 발생된 열을 방열시키

Table 2. Electric characteristics of LED stick.

Color	No. of LED	Forward current of LED stick (mA)	Forward current of LED (mA)	Shape of LED	Stick Size (mm)
Blue	48	200	25	ellipse (4.4 × 5.5)	8×340
Red	48	80	20	ellipse (4.4 × 5.5)	8×340
Far-red	48	80	20	circle (Φ5)	8×340

Table 1. Opto-electric characteristics of blue, red and far-red LEDs.

Color	Model	Forward current (mA)	Typical forward voltage (V)	Power consumption (mW)	Dominant wavelength (nm)
Blue	NSPB633S (Nichia)	20	3.6	3.0	470
Red	LNJ295PCDA (Matsushita)	20	1.8	-	660
Far-red	BCH-36 (Showa denko)	20	1.7	1.1	730

고자 DC 24 V, 0.23 A으로 구동되는 1개의 방열팬을 설치하였다.

3. LED 어레이의 분광 특성 및 광강도 측정

LED 어레이의 분광특성을 측정하고자 300~1,100 nm의 파장 영역에서 분광분석이 가능한 분광광도계 LI-1800, LI-COR)를 사용하였다. 또한 LED 어레이의 광강도로서 PPF, 조도 및 복사조도를 측정하고자 각각 광량자센서(LI-190SA, LI-COR), 조도센서(LI-110SA, LI-COR), 일사센서(LI-200SA, LI-COR)를 사용하였다. 광량자센서, 조도센서 및 일사센서로서 측정 가능한 파장 범위는 각각 400~700 nm, 380~600 nm 및 400~1,100 nm이다. 이들 센서와 LED 어레이 사이의 수직거리는 30 cm이며, LED 어레이의 최대 발광유효면적에 상당한 평면의 9개 지점에서 광강도를 측정하여 평균값을 구하였다. 청색광, 적색광 및 원적색광 LED 1개에 공급되는 전류는 각각 25, 10, 20 mA이며 단색광 LED 어레이의 점등 회로를 흐르는 정격전류는 각각 8, 3.2, 3.2 A로 설정하였다. 여기에서부터 일정한 간격으로 전류를 감소시키며 광강도 변화를 측정하였다. 보통 LED의 광-전기 특성은 10 mA의 정격전류에서 측정되나, 청색광 LED에 공급되는 전류를 적색광 또는 원적색광 LED에 비해서 높게 설정한 것은 청색광 LED의 수명을 크게 감소시키지 않는 범위에서 조사되는 광량자속을 증가시키기 위함이다.

청색광과 적색광의 조합광 LED 어레이는 이들 LED 스틱을 각각 20개씩 사용하여 1:1의 비율로 조합하였고, 적색광과 원적색광의 조합광 LED 어레이는 이들 스틱을 각각 3:1(적색 30개, 원적색 10개), 1:1(적색 20개, 원적색 20개), 1:3(적색 10개, 원적색 30개)의 비율로 조합하였다.

4. LED로부터 조사된 광량자속의 정량화

LED 모듈로부터 조사된 광량자속에 대한 정량화 가능성을 검토하고자 청색광과 적색광 LED로부터의 광량자속에 대한 광량자센서의 측정값과 분광광도계(LI-1800, LI-COR)로서 측정된 파장별 광량자속의 수치적 큰 결과를 비교하였다(Fig. 1 참조). 다음으로 원적색광 LED로부터의 파장별 광량자속을 수치적으로 적분하여 원적색광 LED의 광량자속을 결정하였다. 식(1)로

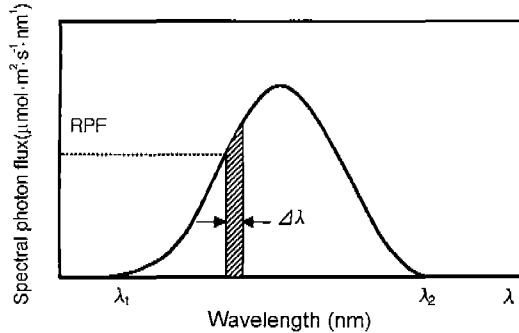


Fig. 1. Numerical integration of spectral photon flux measured by a spectroradiometer.

표현된 수치적분에는 심프슨 공식(Simpson's formula)을 사용하였다.

$$IPF = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RPF \Delta \lambda \quad (1)$$

여기에서 λ_1, λ_2 는 단색광 파장의 하한과 상한에 해당하며, RPF는 분광광도계로서 측정된 파장별 광량자속($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$), $\Delta \lambda$ 는 파장 간격(nm), IPF는 광량자속의 수치적분값($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)이다.

결과 및 고찰

1. 조합광 LED의 분광 특성

청색(B)+적색(R), 청색(B)+원적색(FR), 적색(R)+원적색(FR)의 조합광 LED 모듈에 각각 20개의 스틱이 사용된 청색, 적색 및 원적색광 LED의 분광 특성이 Fig. 2에 실려 있다. Table 2에서 제시한 바와 같이

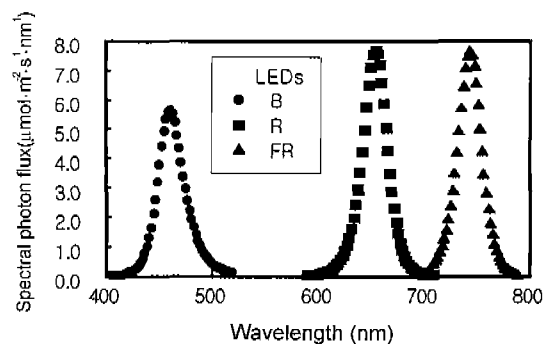


Fig. 2. Spectral photon distribution of blue(B), red(R) and far-red(FR) LED.

청색, 적색 및 원적색광 LED로 공급되는 전류가 각각 25 mA, 20 mA, 20 mA인 조건에서 분광 특성을 측정하였다. 청색, 적색 및 원적색광 LED에 대한 분광광량자속의 최대치는 각각 464 nm, 654 nm, 734 nm의 주파장에서 5.64, 7.68, 7.68 $\mu\text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 로 나타났다. 그러므로 조합광 LED 모듈에서 적색광 또는 원적색광의 혼합 여부에 따라 분광 특성과 분광광량자속의 최대치가 결정된다.

LED의 점등회로에서 입력 전류를 달리한 가운데 분광광도계를 사용하여 측정한 적색광 LED의 분광 특성이 Fig. 3에 실려 있다. 입력 전류에 따라 분광 PPF의 최대값에 차이가 있으나, 적색광 LED의 주파장은 전류와 무관하게 모두 660 nm에서 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 점등회로의 입력전류 크기에 따라 LED의 광강도를 조절할 수 있음을 의미하는 것으로서, Kim(1999)의 이전 연구에서 보고된 바 있다.

2. 단색광 LED로부터 조사된 광량자속의 정량화

일반적으로 사용되는 광량자센서의 측정 가능한 파장 범위는 400~700 nm이므로 광량자센서를 이용하여 원적색광 LED의 PPF를 측정하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 청색과 적색의 단색광 LED의 광량자속에 대해서 광량자센서로 측정한 결과와 분광광도계로 측정하여 적분한 결과를 비교하였다.

청색과 적색의 단색광 LED의 광량자속에 대해서 광량자센서로 측정한 결과와 분광광도계로 측정하여 수치적분한 결과가 Fig. 4와 Fig. 5에 실려 있다. 청색과 적색광 LED로부터 조사된 광량자속에서 대해서 수치적분한 결과가 측정치보다 다소 작기는 하나, 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 임의의 광원

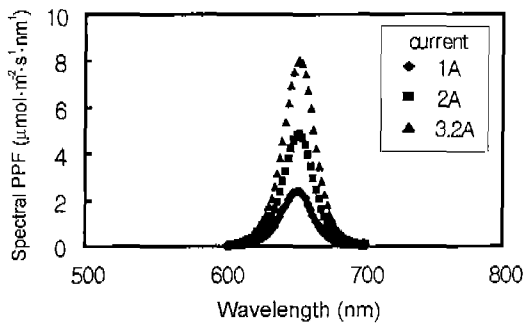


Fig. 3. Spectral PPF of red LEDs affected by the supplied current.

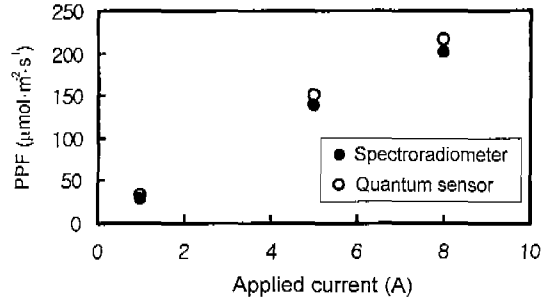


Fig. 4. Comparison of photosynthetic photon flux(PPF) measured by a spectroradiometer and quantum sensor for blue LED.

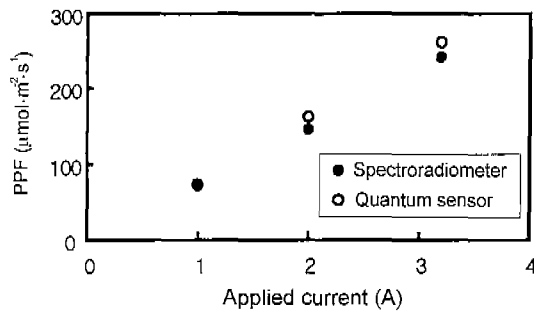


Fig. 5. Comparison of photosynthetic photon flux(PPF) measured by a spectroradiometer and quantum sensor for red LED.

으로부터 조사된 광량자속의 측정에 광량자센서 뿐만 아니라 분광광도계가 적용될 수 있음을 의미하는 것이다. 실제로 청색 또는 적색의 단색광 LED로부터 조사된 광량자속의 측정에 400~700 nm의 파장 영역에 대한 감지 능력을 갖는 광량자센서가 널리 사용되나, 700 nm 이상의 파장 영역에 대한 광량자속의 측정에 광량자센서의 적용은 부적합하다. 그러므로 730 nm에서 주파장을 갖는 원적색광 LED의 광량자속에 대한 정량화를 시도할 때 분광광도계를 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

원적색광 LED 모듈로부터 조사된 광을 분광광도계를 이용하여 측정한 후 수치적분에 의해서 예측된 광량자속이 Fig. 6에 실려 있다. 입력전류가 0.5 mA, 1.0 mA 및 2.5 mA일 때 광량자속은 각각 49 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 96 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 244 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서 입력전류의 크기에 따라 광량자속이 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 5의 결과와 비교할 때 적색광 LED 모듈에 입력되는 전류에 비해서 작은 전류

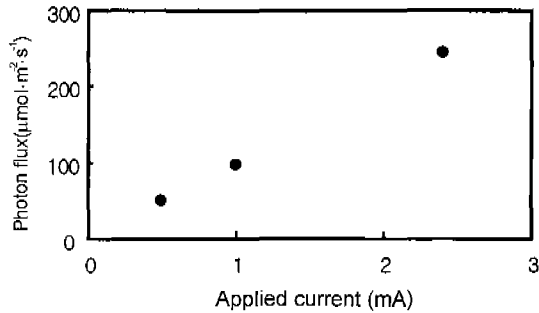


Fig. 6. Estimation of photon flux emitted from far-red LED by numerical integration.

가 공급될지라도 상대적으로 많은 광량자속이 조사됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 광질 제어를 목적으로 원적색광을 혼합할 때 730 nm에서 주파장을 갖는 원적색광 LED 모듈이 유효하게 사용될 수 있으며, 아울러 원적색광 LED 모듈을 사용할 때 점등회로에서 소모되는 전기에너지의 절감이 가능함을 암시하는 것이다.

3. 원적색광이 혼합된 조합광 LED 모듈의 광량자속, 조도 및 복사조도 특성

1) 조합광 LED 모듈의 광량자속 특성

청색(B)에 적색(R) 또는 원적색(FR)을 조합한 조합광 LED 모듈의 광량자속 특성이 Fig. 7에 실려 있다. 이들 조합광 LED 모듈의 광강도를 측정할 때 단색광 LED 스틱을 각각 20개씩 조합하였다. 여기에서 제시된 모든 광량자속은 분광광도계로서 측정된 상대광량자속을 수치적으로 적분한 것이다. 청색+적색, 청색+원적색을 조합한 조합광 LED 모듈의 광량자속은 거의 동일하였으나, 입력 전류가 증가할수록 청색에 원적색

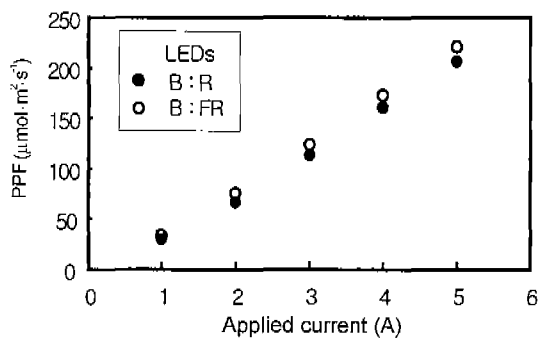


Fig. 7. Variation of photosynthetic photon flux affected by the applied current for the combination of blue(B) : red(R) and blue(B) : far-red(FR) LED.

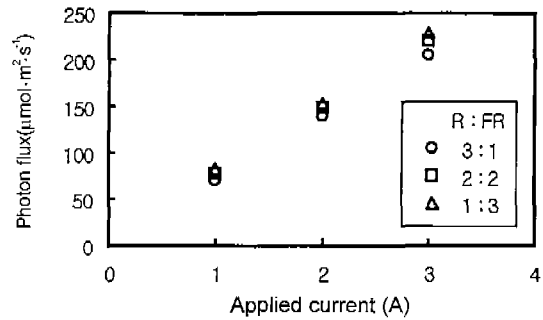


Fig. 8. Variation of photosynthetic photon flux affected by the applied current for the combination arrangement of red(R) and far-red(FR) LED.

을 조합한 LED로부터의 광량자속이 청색에 적색을 조합한 것에 비해서 조금 더 높게 나타났다. 단위에너지당 조사된 광량자수는 파장에 비례해서 증가한다. 광량자수의 증가는 광량자속의 증가를 의미하는 바, 상기 결과는 원적색의 파장이 적색에 비해서 더 큰 결과로 해석된다.

적색(R)에 원적색(FR)을 혼합한 조합광 LED 모듈의 광량자속이 Fig. 8에 실려 있다. 여기에서 적색과 원적색광 LED 스틱은 각각 30개:10개, 20개:20개 및 10개:30개의 비율로 다르게 조합하였다. Fig. 7로부터 적색광에 비해서 원적색광을 조사하는 LED 스틱이 증가할수록 조합광 LED의 광량자속이 조금씩 증가함을 알 수 있다. 이 같은 결과는 Fig. 7의 결과에서도 유사하게 나타난 바 있다.

2) 조합광 LED 모듈의 조도와 복사조도 특성

적색과 원적색광 LED 스틱을 기준으로 각각 3:1, 2:2 및 1:3의 비율로 조합한 조합광 LED 모듈의 조도와 복사조도 특성이 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 실려

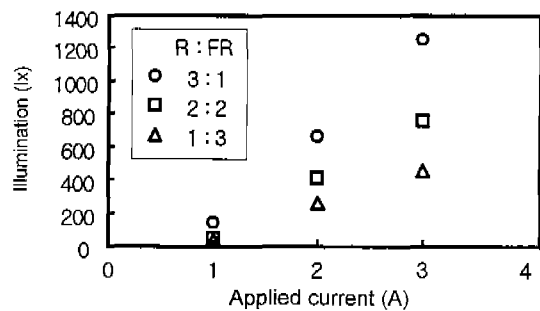


Fig. 9. Variation of illumination affected by the applied current for the combination arrangement of red(R) and far-red(FR) LED.

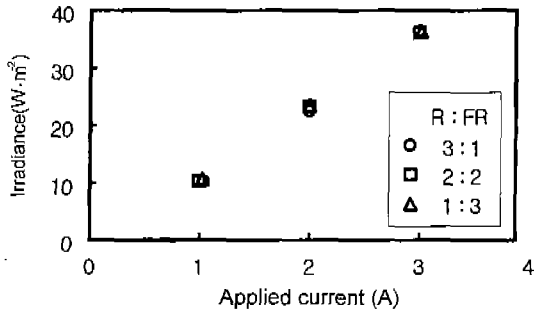


Fig. 10. Variation of irradiance affected by the applied current for the combination arrangement of red(R) and far-red(FR) LED.

있다. Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 조합광 LED 모듈의 조도 특성에 미치는 원적색광의 효과는 적색광보다 현저하게 낮게 나타났다. 비록 적색광의 비시감도가 작기는 하나, 원적색광의 비시감도는 감지할 수 없을 만큼 매우 낮은 수준이므로 상기의 결과는 당연한 것으로 해석된다. 한편 적색광과 원적색광 LED 모듈의 혼합 비율을 달리하였을 때 복사조도는 거의 유사하게 나타났다(Fig. 10.) 그러므로 적색광과 원적색광의 혼합 정도가 조합광 LED의 복사조도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

Literature cited

1. Bula, R., R.C. Morrow, T.W. Tibbitts, D.J. Barta, R.W. Ignatius and T.S. Martin. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. HortSci 26(2):203-205.
2. Brown, C.S., 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.
3. Eun, J.S., Y.S. Kim and Y.H. Kim. 2000. Effects of light emitting diodes on growth and morphogenesis of *in vitro* seedlings in *Platycodon grandiflorum*. Korean J. Plant Tissue Culture 27(1):71-75 (in Korean).
4. Fujiwara, K. and T. Kozai. 1995. Physical microenvironment and its effects. In "Automation and environmental control in plant tissue culture" (Edited by Aitken-Christie, J., T. Kozai and M.A.L. Smith) pp 342-350, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
5. Hart, J.W. 1988. Light and plant growth. pp. 5-9. Unwin Hyman Ltd., London.
6. Kim, Y.H.. 1999. Plant growth and morphogenesis control in transplant production system using Light-emitting Diodes(LEDs) as artificial light source. -Spectral characteristics and light intensity of LEDs-. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 24(2): 115-122 (in Korean).
7. Mancinelli, A.L. 1993. The physiology of phytochrome action. In "Photomorphogenesis in plants" (Edited by Kendrick, R.E. and G.H.M. Kronenberg) pp.211-269, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
8. Okamoto, K., T. Yanagi, S. Takita, M. Tanaka, T. Higuchi, Y. Uchida and H. Watanabe. 1996. Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source. Acta Horticulturae 440:111-116.
9. Yanagi, T, K. Okamoto and S. Takita. 1996. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. Acta Horticulturae 440:117-122.
10. Warrington, I.J. and K.J. Mitchell. 1976. The influence of blue- and red- biased light spectra on the growth and development of plants. Agric. Meteorol. 16:247-262.

광량자센서와 분광광도계를 이용한 발광다이오우드 광량자속의 정량화

김용현* · 박현수

전북대학교 농과대학 생물자원시스템공학부 (전북대학교 농업과학기술연구소)

적 요

식물묘의 성장 및 형태형성 제어용 인공광원으로서 조합광 LED 모듈을 제작하여 조합광 LED 모듈의 광 전기 특성을 분석하고, 광량자 센서와 분광광도계를 이용하여 LED 모듈로부터 조사된 광량자속에 대한 정량화를 시도하였다. 청색과 적색의 단색광 LED로부터 조사된 광량자속을 광량자센서로 측정된 값과 분광 광도계로 측정하여 수치적으로 적분한 값을 비교한 결과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 광량자센서로서 측정이 불가능한 원적색광 LED로부터의 광량자속 정량화에 분광광도계를 적용될 수 있음을 의미하는 것이다. 적색광에 원적색광을 조사하는 LED 스틱의 혼합 비율을 달리한 조합광 LED 모듈의 광량자속은 원적색광을 조사하는 LED 스틱이 증가할수록 조합광 LED의 광량자속이 조금씩 증가하였다. 이러한 결과는 단위에너지당 조사된 광량자수는 파장에 비례해서 증가하기 때문인 것으로 해석된다. 이밖에 적색과 원적색광 LED 스틱의 조합 비율을 달리하였을 때 조합광 LED 모듈의 조도는 비시감도가 매우 낮은 원적색광이 차지하는 비율이 클수록 낮게 나타났다. 한편 적색광과 원적색광의 혼합 정도가 조합광 LED의 복사조도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

주제어 : 광질, 광형태형성, 수치적분, 식물묘, 인공광원