

인공광원으로 발광다이오드를 이용한 묘생산 시스템에서
식물생장 및 형태형성 제어[†]
- 발광다이오드의 분광 특성 및 광강도 -

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 -

김 용 현*

정화원

Y. H. Kim

ABSTRACT

Because of their small mass, volume, solid state construction and long life, light-emitting diodes(LEDs) hold promises as a lighting source for intensive plant production system. Spectral characteristics and light intensity of LEDs were tested to investigate their feasibility as artificial lighting sources for growth and morphogenesis control in transplant production system. Blue, green, and red LEDs had a peak-emission wavelength at 442nm, 522nm, and 673nm, respectively. Their half width defined as the difference between upper and lower wavelength in the intensity equivalent to 50% of the maximum intensity showed 26nm, 41nm, and 74nm, respectively. Photosynthetic photon flux(PPF) at the distance of 9cm under the LEDs array was measured as $235 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for red, $109 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for green, and $75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for blue LEDs. At the same distance, green LEDs had the illuminance of 13,000lx, nine to ten times higher than those of red and blue LEDs. Red, green, and blue LEDs at a distance of 9cm had the irradiance of $46\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, $19\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, $8\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. Light intensity of blue, green, and red LEDs increased linearly in proportion to the magnitude of the current applied to the operating circuit. Thus the light intensity of LEDs was controlled by the applied current in operating circuit.

주요용어(Key Words): 발광다이오드(Light-emitting Diode), 인공광(Artificial Light), 광강도(Light Intensity), 분광특성(Spectral Characteristics), 묘생산시스템(Transplant Production System)

[†] 이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

* 전북대학교 농과대학 농업기계공학과 (농업과학기술연구소)

1. 서 론

광환경은 식물의 생체중, 건물중, 초장, 엽면적 등과 같은 양적인 성장 증가와 화아형성, 발근, shoot 형성, 잎의 전개 등과 같은 형태형성에 커다란 영향을 미친다. 이제까지 식물재배의 광환경과 관련하여 광합성과 물질 생산에 대한 연구는 많이 이루어져 왔으나, 광형태형성 또는 식물의 성장 반응에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

형광등, 고압나트륨등, 메탈할라이드등과 같은 기존의 인공광원에는 각기 다양한 파장 영역이 포함되어 있으므로 식물의 광합성을 촉진시키거나 광형태형성에 유효한 특정 파장의 선택적인 조사(照射)가 불가능하다. 식물의 성장 제어에 적합한 파장 영역을 갖는 인공광원이 개발되면 식물의 광합성과 광형태형성 제어가 가능하므로 인공광을 이용한 식물공장의 실용화에 크게 기여할 것이다. 특히 효율이 높은 인공광원의 개발 또는 조명 시스템의 개선은 식물묘의 성장을 촉진시키거나 묘의 형태, 엽색, 식물체 성분 등을 포함한 품질 향상에 크게 기여할 것이다. 예를 들면 절화류의 상품 가치를 높여려면 초장을 길게 할 필요가 있다. 반대로 분화류의 경우 초장이 짧으면서 풍성하게 보일 경우 상품 가치가 높게 인정된다. 한편 이식용 묘는 초장이 짧으면서 적절한 두께의 줄기를 갖도록 육묘되는 것이 바람직하다.

최근들어 발광다이오드(light emitting diode, 이하 "LED"로 표시함)를 이용한 식물의 성장 및 광형태형성 제어에 대한 관심이 증대되고 있다. 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 배

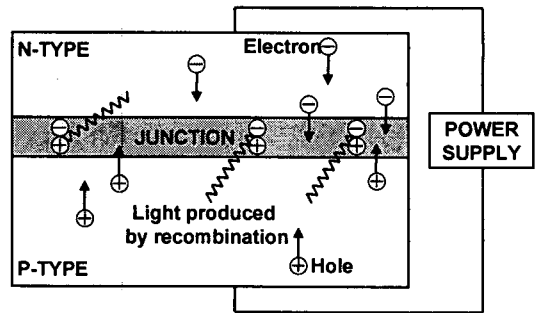


Fig. 1 Principle of light emitting in LEDs.

열한 구조로 되어 있다. 그림 1과 같이 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. 이로 인하여 램프에서 발열되고 식물에서 이용 가능한 광은 결정 내에서 에너지로 변환된 광량의 30~40% 정도로 알려져 있다(渡邊과 遠藤, 1997).

이러한 LED는 높은 신뢰성과 응답성을 지니고 있으며 점등에 소비되는 전력소모가 매우 작기 때문에 정보 표시판, 광고탑, 계시판 또는 가전제품의 지시계 등에 광범위하게 이용된다. 또한 LED는 수명이 길고, 펄스 구동이 용이하며, 현열 발생량과 장파복사의 방출량이 작기 때문에 식물생산의 인공광원으로 적합한 성질을 지니고 있다. 더구나 LED는 배열 방법에 따라 점광원, 선광원 또는 면광원으로서 이용이 가능하고, 소형으로서 단색광원의 특성을 지니고 있으므로 식물의 광형태형성 제어용 인공광원으로 사용된 바 있다(Brown 등, 1995; Okamoto 등, 1996; Yanagi 등, 1996). 이들에 의해서 단색광 LED가 식물묘의 성장 또는 형태형성에 미치는 효과가 보고되었으나, LED의 광합성 유효광량속밀도

(photosynthetic photon flux density, 이하 “PPF”라 칭함), 조도(illuminance) 및 복사조도(irradiance) 분포와 같은 광강도에 대한 구체적인 자료는 제시되지 않고 있다. LED의 분광 특성과 광강도는 인공광원으로 LED를 이용한 식물묘 생산 시스템의 조명 설계에 유용한 자료로 활용될 수 있다.

인공광원으로 LED를 이용한 식물묘 생산 시스템을 개발하려고 시도된 본 연구의 구체적인 목적은 식물묘의 생장 및 형태형성 제어를 위하여 제작된 청색, 녹색 및 적색의 단색광 LED module의 분광 특성과 광강도를 분석하여 조명 시스템의 설계에 필요한 기초 자료를 제시하는 데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 식물묘의 생장 및 형태형성 제어용 단색광 LED module 제작

(1) LED의 전기적 및 광학적 특성

표 1은 실험에 사용된 청색광 LED(NSPB520, NICHIA CHEMICAL), 녹색광 LED(E1L5E-AG, TOYODA GOSEI) 및 적색광 LED(KET583R-B, KODENSHI KOREA)의 전기적 및 광학적 특성을 나타낸 것이다. 이들 특성은 LED 제조업체의 기술 자료에서 인용된 것이다. LED를 점등할 때 허용 가능한 직류 전류의 최대치는 청색, 녹색 및 적색광 LED에서 각각 30mA, 30mA, 25mA로 제시되었다. 한편 직류 전류가 20mA인 조건에서 청색, 녹색 및 적색광 LED의 표준 직류전압은 각각 3.6V, 3.5V,

1.8V로서, 청색 및 녹색광 LED에 공급되는 전압이 적색광 LED의 경우에 비해서 약 2배 높음을 알 수 있다. 동일한 직류 전류 조건에서 청색, 녹색 및 적색광 LED의 주파장은 각각 470nm, 530nm, 660nm이며, 표준 광도는 녹색광 LED의 경우 1.10cd로서, 청색과 적색광 LED에 비해서 각각 3.1배, 2.2배 높게 나타났다.

(2) LED module의 구성

본 연구에서 식물의 생장 및 광형태형성 제어를 위해서 제작된 LED module은 발광부로서 LED와 기판을 포함한 LED array, LED array에서 발광되는 단색광의 선택과 광강도를 조절할 수 있는 전원과 전류 제어부, LED에서 발열된 열을 외부로 방출시키기 위한 송풍기, LED array를 지지하는 프레임 등으로 구성된다. 그림 2는 LED module과 전류 제어부의 개략도를 나타낸 것이다. LED array의 기판은 크기가 300mm × 300mm로서, 기판에 직경 5mm의 청색, 녹색 및 적색광 LED를 각각 16줄 × 48개/줄 = 768 개씩 배열하였다. 전원부에는 청색, 녹색 및 적색광 LED를 선택적으로 점등할 수 있는 스위치를 설치하였다. 한편 LED로부터 발광되는 광강도는 스위치의 볼륨 조절에 의해서 이루어진다. 표 1에 제시된 바와 같이 LED의 점등에 허용 가능한 직류 전류의 최대치를 공급하면 최고의 광강도를 얻을 수 있으나, LED의 성능은 쉽게 저하된다. 그러므로 본 연구에서는 개개의 LED로 흘러가는 직류 전류가 10mA를 초과하지 않도록 점등 회로와 전류 제어부를 구성하였다.

Table 1 Electro-optical characteristics of blue, green, and red LEDs

LED	DC forward current (mA)	DC forward voltage (V)		Power dissipation (mW)	Luminous intensity (cd)		Peak wavelength (nm)
		Typ.	Max.		Min.	Typ.	
BLUE	30	3.6	4.0	120	—	0.35	470
GREEN	30	3.5	4.0	120	0.84	1.10	525
RED	25	1.8	2.2	55	0.30	0.50	660

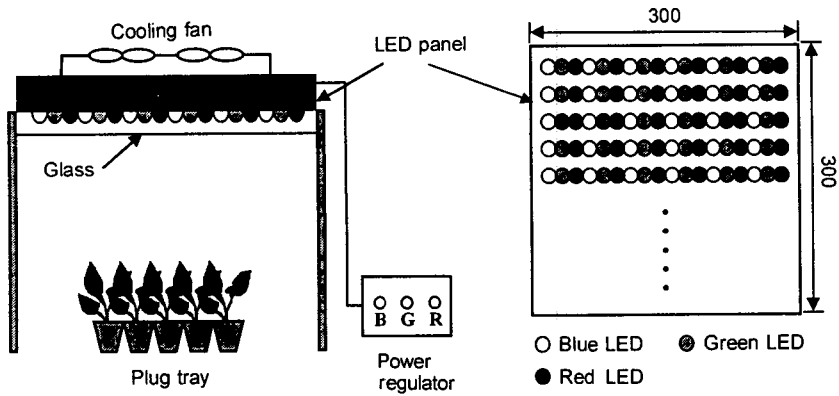


Fig. 2 Schematic diagram of LED module and power regulator.

나. LED의 분광 특성 및 광강도 측정

LED의 분광 특성을 측정하고자 300~1,100nm의 파장 범위에서 분광 분석이 가능한 분광복사계(LI-COR, LI-1800)를 사용하였다. 이 때 광원으로부터 분광복사계의 센서부까지의 거리는 30cm로 고정하였다.

LED의 광강도로서 PPF, 조도 및 복사조도를 측정하였으며, 이를 위하여 광량자센서(LI-COR, LI-190SA), 조도센서(LI-COR, LI-210SA), 일사센서(LI-COR, LI-200SA)를 사용하였다. 광강도는 암조건 상태에서 LED의 기판으로부터 수직 방향으로 9, 12, 18, 24, 30cm 떨어진 지점에서 측정되었다. 광강도는 스위치의 볼륨을 최대로 설정한 상태, 즉 개개의 LED를 홀러가는 직류 전류가 10mA인 조건에서 측정하였다.

한편 LED의 점등 회로에 공급되는 전류가 LED의 광강도에 미치는 효과를 분석하고자 청색, 녹색 및 적색광 LED를 점등할 때 이들 회로를 흐르는 전류와 단색광의 광강도를 측정하였다. 즉 청색, 녹색 및 적색광 LED로부터 50cm 떨어진 지점에서의 PPF가 각각 최대치, 최대치의 1/2, 0을 나타낼 때의 전류를 디지털 멀티미터(HUNG CHANG, HC-3500T)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. LED의 분광 특성

그림 3은 PPF에 기초한 청색, 녹색 및 적색광 LED의 분광 특성에 대한 상대값, 즉 각각의 단색광 LED에서 PPF의 최대값에 대한 파장별 PPF 비를 나타낸 것이다. 분광 특성에서 LED에서 발광된 광은 각각 442nm, 522nm, 673nm의 파장 영역에서 PPF의 최대치가 존재하는 단색광으로 나타났다. 표 1에서 제시된 단색광 LED의 주파장은 각각 470nm, 525nm, 660nm로서 PPF의 최대치가 측정된 파장 사

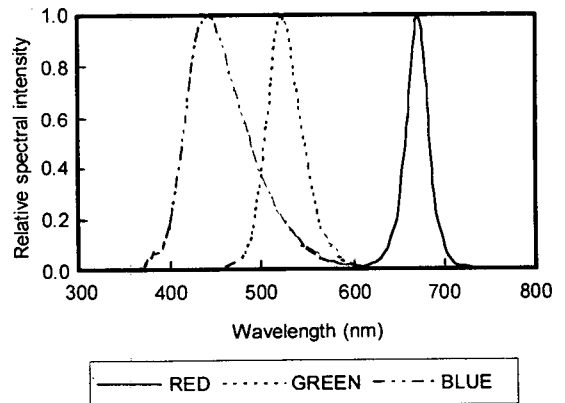


Fig. 3 Relative spectral intensity of blue, green, and red LEDs.

이에 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 표 1에서 제시된 LED의 주파장에 해당되는 직류 전류와 본 실험에서 공급된 직류 전류의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 표 1에서 제시된 LED의 주파장은 직류 전류가 20mA일 때에 해당되는 것이며, 본 실험에서는 LED의 급격한 성능 저하를 방지하고자 개개의 LED를 흐르는 직류 전류가 10mA를 초과하지 않도록 점등회로를 구성한 상태에서 LED의 분광 특성을 측정하였다. LED를 흘러가는 직류 전류가 변화하면 광강도 뿐만 아니라 광강도의 최대치가 나타나는 주파장이 다르게 나타난다.

단색광 LED의 반치폭(half width)은 최대 PPF의 50%에 해당되는 광강도를 나타내는 파장의 상한과 하한의 차이로 정의된다. 본 연구에 사용된 적색, 녹색 및 청색광 LED의 반치폭은 각각 26nm, 41nm, 74nm로 나타났다. 그러므로 적색광 LED가 단색광의 특성을 가장 분명하게 갖고 있음을 알 수 있다.

나. LED의 광강도

청색, 녹색 및 적색광 LED의 광강도로서 PPF, 조도, 복사조도를 분석하였다.

(1) PPF

그림 4는 LED panel로부터의 수직거리에 따른 청색, 녹색 및 적색광 LED의 PPF 변화를 나타낸 것이다. 단색광 LED의 경우 광원으로부터 9cm 떨어진 지점에서의 PPF는 적색, 녹색, 청색광 LED의 순서로 높게 나타났다. 이들의 PPF는 각각 $235 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $109 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서 적색광 LED의 PPF가 녹색광과 청색광에 비해서 2.2배, 3.8배 높게 나타났다. 표 1에서 제시된 광도는 녹색광 LED에서 가장 높게 나타났으나, PPF는 적색광 LED에서 높게 나타났다. 왜냐하면 광도는 광원의 밝기를 의미하고, 단위에너지

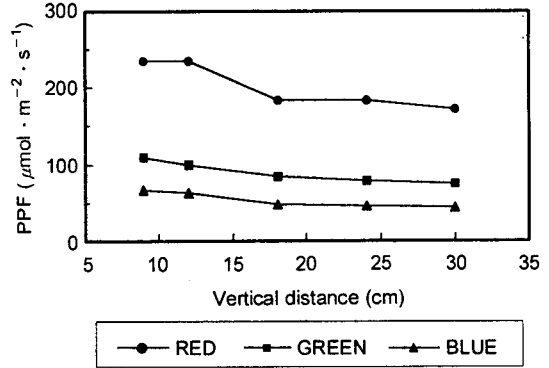


Fig. 4 Variation of photosynthetic photon flux (PPF) affected by the vertical distance from LEDs.

지당 광량자수는 파장이 길수록 증가하기 때문이다.

광원으로부터의 수직거리가 증가함에 따라 PPF가 점차 감소하였는데, 이러한 결과는 적색광 LED에서 분명하게 나타났다. 30cm 떨어진 지점에서 적색, 녹색 및 청색광 LED의 PPF는 각각 $171 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $73 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $44 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 나타났다.

이제까지 인공광을 이용하여 플러그묘를 육묘한 보고가 많지 않으나, 수행된 실험에서 PPF는 270~300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도로 보고되었다(김, 1998; 김과 古在, 1996a, 1996b). 최근에 김과 이(1998)는 식물묘 공장의 근접조명용 인공광원으로서 여러 종류의 형광등에 대한 분광 특성과 광강도를 분석한 바 있다. 단색광원인 적색광 LED로부터 얻을 수 있는 PPF는 플러그묘 육묘에 필요한 광강도 수준에 도달함을 알 수 있다. 이러한 결과는 적색광 LED가 근접조명용 인공광원으로 사용될 수 있음을 의미하는 것이다. 한편, 인공광하에서 접목묘의 활착 촉진 단계 또는 식물의 조직배양 단계에서 요구되는 PPF가 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도임을 감안하면(Infante 등, 1989; Kirdmanee 등, 1995), 적색광과 녹색광 LED는 접목묘의 활착 또는 식물의 조직배양을 위한 근접조명용 광원으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

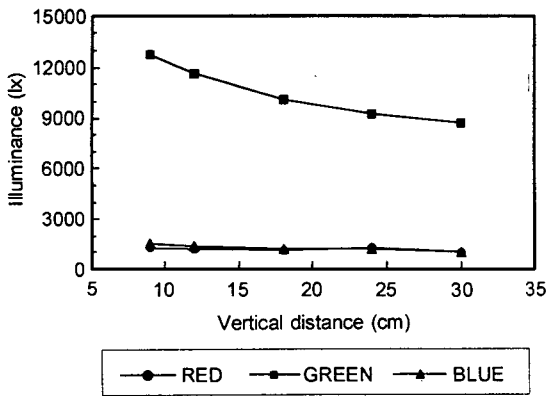


Fig. 5 Variation of illuminance affected by the vertical distance from LEDs.

한편 청색광 LED로부터 10cm 이상 떨어진 지점에서의 PPF는 $70 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하로 작기 때문에 보광용 광원으로 사용하는 것이 바람직할 것이다. 향후 PPF가 우수한 고휘도의 청색광 LED가 개발되면 식물묘 생산 시스템에 청색광 LED의 적용이 가능할 것이다.

(2) 조도

그림 5는 청색, 녹색 및 적색광 LED로부터의 수직거리에 따른 조도 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 녹색광 LED의 조도가 가장 높으며, 적색과 청색광 LED의 조도는 녹색광의 경우에 비해서 약 1/10 정도로 매우 낮게 나타났다. 이것은 녹색광의 파장 영역이 500~570nm이고, 비시감도가 555nm에서 최고치를 나타내므로 녹색광이 많이 들어있으면 조도는 당연히 높게 된다. 더구나 표 1에서 녹색광 LED의 광도가 청색과 적색광 LED의 경우에 비해서 각각 3.1배, 2.2배 높게 나타났기 때문에 녹색광 LED의 조도가 월등히 높게 나타난 것으로 판단된다. LED 광원으로부터 9cm 떨어진 지점에서의 조도는 녹색광의 경우 약 13,000 lx로서, 적색광 또는 청색광의 1,300~1,500 lx에 비해서 약 9~10배 높게 나타났다.

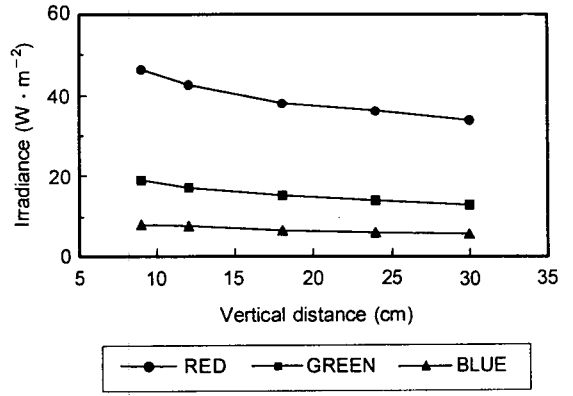


Fig. 6 Variation of irradiance affected by the vertical distance from LEDs.

(3) 복사조도

그림 6은 LED panel로부터의 수직거리에 따른 복사조도를 나타낸 것이다. 적색광 LED의 복사조도는 녹색 또는 청색광의 경우에 비해서 각각 2.4배, 5.8배 높게 나타나 적색광 LED에서 상대적으로 많은 발열이 이루어짐을 알 수 있다. 광원으로부터 9cm 떨어진 지점에서 적색, 녹색 및 청색광 LED의 복사조도는 각각 $46 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, $19 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, $8 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났다. 보통 형광등의 복사조도가 $40 \sim 50 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 임을 고려할 때 적색광 LED의 복사조도는 형광등과 비슷한 수준임을 알 수 있다.

다. LED의 전류와 광강도 제어

그림 6은 단색광 LED를 점등할 때 청색, 녹색 및 적색광의 광강도와 이들 회로를 흐르는 전류의 관계를 나타낸 것이다. 그림 7로부터 전류가 증가함에 따라 단색광의 광강도가 직선을 이루며 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 공급되는 전류의 크기를 조절할 수 있도록 점등 회로를 구성하면 전류의 크기에 따라 단색광 LED의 광강도가 변화될 수 있음을 의미하는 것이다. 실제로 본 연구에서는 점등 회로에 공급되는 전류를 가변시키면서 단색광 LED의 광강도를 조절하였다.

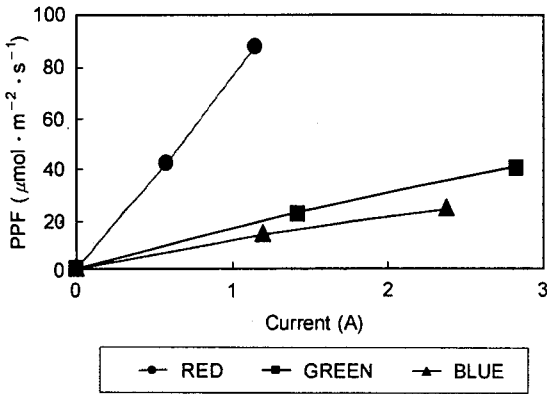


Fig. 7 Relation between PPF of blue, green, red LEDs and the applied current.

4. 요약 및 결론

인공광원으로 LED를 이용한 식물묘 생산 시스템에서 묘의 생장 및 형태형성 제어를 위하여 청색, 녹색 및 적색의 단색광 LED module을 제작하였다. 단색광 LED module의 분광 특성과 광강도의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 청색, 녹색 및 적색광 LED의 분광 특성을 분석한 결과 각각 442nm, 522nm, 673nm의 파장 영역에서 PPF의 최대치가 존재하는 단색광으로 나타났다. 단색광 LED의 반치폭(half width)은 적색, 녹색 및 청색광에서 각각 26nm, 41nm, 74nm로서, 적색광 LED가 단색광의 특성을 가장 분명하게 갖고 있었다.

2) LED 광원으로부터 9cm 떨어진 지점에서의 PPF는 적색광 235 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 녹색광 109 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 청색광 75 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서 적색광 LED의 PPF가 녹색광과 청색광에 비해서 2.2배, 3.8배 높게 나타났다.

3) LED 광원으로부터 9cm 떨어진 지점에서의 조도는 녹색광 LED의 경우 약 13,000 lx로서, 적색광 또는 청색광 LED의 조도에 비해서 9~10배 정도 높게 나타났다.

4) 광원으로부터 9cm 떨어진 지점에서 적색, 녹색

및 청색광 LED의 복사조도는 각각 $46\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, $19\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, $8\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났다.

5) 청색, 녹색 및 적색광 LED의 광강도는 공급되는 전류와 직선의 관계를 이루며 증가하였다. 그러므로 본 연구에서는 점등 회로에 공급되는 전류를 가변시키면서 단색광 LED의 광강도를 조절하였다.

참고 문헌

1. 김용현, 이종호. 1998. 식물묘 공장의 근접조명용 인공광원으로서 형광등의 광강도 및 분광 특성. 한국농업기계학회지 23(6):591-598.
2. 김용현. 1998. 인공광하의 풍동내에서 기류속도가 가지 플러그묘의 생장에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 7(1):9-14.
3. 김용현, 古在豊樹. 1996a. 인공광하의 공정육묘용 풍동설계 및 공정묘 개체군상의 공기역학적 특성. 한국농업기계학회지 21(4):429-435.
4. 김용현, 古在豊樹. 1996b. 기류속도가 인공광하에서 공정묘 개체군의 미기상에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):160-166.
5. 渡邊博之, 遠藤政弘. 1997. 植物工場ハンドブック. 東海大學出版會 p. 44.
6. 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.
7. Infante, R., E. Magnanini and B. Righetti. 1989. The role of light and CO₂ in optimizing the conditions for shoot proliferation of *Actinidia deliciosa* in vitro. Physiol. Plant. 77:191-195.
8. Kirdmanee, C., Y. Kitaya and T. Kozai. 1995. Effects of CO₂ enrichment and supporting material in vitro on photoautotrophic growth of *Eucalyptus*

- plantlets *in vitro* and *ex vitro*. *In Vitro Cell Dev. Biol. -Plant* 31:144-149.
9. 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.
10. 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.