

식물묘공장의 근접조명용 인공광원으로서 형광등의 광강도 및 분광 특성

Light intensity and spectral characteristics of fluorescent lamps as artificial light source for close illumination in transplant production factory

김용현* 이종호*
정회원 정회원
Y.H. Kim C.H. Lee

1. 서론

정식후 식물체의 생육, 수량 및 품질이 묘소질에 따라 다르게 나타나므로 양질의 묘에 대한 관심과 수요가 증대되고 있다. 양질의 묘를 생산하려면 전문적인 육묘 관리기술이 요구되는 바, 묘생산과 식물체의 재배에 대한 분업화가 진행되는 가운데 고도의 환경제어 시설을 갖춘 식물묘공장(이하 '식물공장'이라 칭함)에서 육묘가 점차 이루어지고 있다. 식물공장은 광원의 종류에 따라 태양광 이용형, 인공광 이용형, 태양광과 인공광의 병용형의 3가지 시스템으로 구분된다. 현재 국내에 보급되어 있는 육묘공장은 태양광 이용형으로서 재배농가의 위탁을 받아 전문적으로 묘를 생산하는 시설로 활용되고 있다. 그런데, 태양광 이용형 육묘공장에서는 기후의 영향을 쉽게 받는 자연광하에서 육묘가 이루어지기 때문에 품질이 균일한 묘의 계획적인 생산이 불가능하다. 이 때문에 인공광과 태양광의 병용 또는 인공광만을 사용한 식물생산의 상업화를 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 가운데 조직배양묘, 접목묘, 실생묘 등을 인공광하에서 효율적으로 생산하기 위한 식물묘 생산의 실용화 연구도 수행되고 있다.

인공광형 식물공장에서 해결되어야 할 최대 과제는 생산비의 상당 부분을 차지하게 되는 전력비의 절감이다. 최근들어 묘생산의 생력화가 용이한 플러그묘에 대한 수요가 급격하게 늘어나고 있다. 플러그묘는 재식밀도가 높으며 환경제어에 의한 생육촉진 효과가 크기 때문에 인공광형 식물공장에서 생산이 이루어질 때 단위개체당 전력비가 작게 될 것으로 예상된다.

인공광형 식물공장의 광원으로 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형광등이 주로 사용되고 있

* 전북대학교 농과대학 농업기계공학과

다. 이 가운데 고압나트륨등과 메탈할라이드등의 경우 램프효율은 높으나 각각 청색광 또는 적색광이 부족하여 단독으로 사용되지 않고 병행해서 보광용으로 사용되므로 식물공장의 근접 조명용 단독 광원으로는 부적합하다. 형광등은 고압나트륨등과 같은 고휘도 방전등에 비해서 광속은 낮으나 광이용효율이 높기 때문에 조직배양묘의 근접 조명용 광원으로 사용되고 있다. 한편, 플러그묘의 생산을 위한 인공광원으로서 형광등을 사용한 예는 매우 미약하다. 최근에 김과 古在(1996a, 1996b, 1996c), Kim 등(1996)은 인공광하에서 플러그묘 개체군의 공기역학적 특성을 구명하고자 광원으로 형광등을 사용하였으며, 플러그묘 생장에 미치는 기류속도의 영향을 구명한 바 있다(김, 1997). 그러나 국내에 보급되어 있는 형광등에 대해서는 광속 정도만 알려져 있을 뿐 식물생산과 관련된 광강도 및 분광 특성에 대한 보고 또는 근접 조명 설계에 필요한 자료는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 국내에 보급되어 있는 주요 형광등을 대상으로 식물생산과 관련된 광강도 및 분광 특성을 분석하고자 시도되었다.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 형광등

식물공장의 근접조명용 광원으로서 형광등의 광강도 및 분광 특성을 분석하고자 표 1에 제시한 바와 같은 6종류의 형광등을 선정하였다. 표1에서 FL 계통은 국내의 금호전기(주)에서 생산한 직관형 형광등이다. 이 가운데 FL20SD/18과 FL20SEX-D/18은 각각 일반 조명용 형광등(이하 “일반등”이라 칭함)과 일중3과장형광등(이하 “일중3과장등”이라 칭함)에 해당되며, 광원색으로 주광색을 갖는다. 한편, FL20SPG/18는 식물재배용 형광등(이하 “PG등”이라

Table 1. Specifications for fluorescent lamps selected in this study.

Model	Lamp ¹⁾ wattage (W)	Dimension ¹⁾		Luminous ¹⁾ flux (lm)	Light ¹⁾ source colour	Luminous ²⁾ efficacy (lm W ⁻¹)
		Length (mm)	Diameter (mm)			
FL20SD/18	18	580	28	1,070	Daylight	59
FL20SEX-D/18	18	580	28	1,380	Daylight	77
FL20SPG/18	18	580	28	420	-	23
FL20S · B	18	580	28	250	Blue	14
FL20S · R	18	580	28	700	Red	39
DULUXL55W/21-840	55	533	17.5	4,800	Cool-white	87

1) Values are cited from the manufacturer's catalogue.

2) Luminous efficacy is defined as the ratio of luminous flux to lamp wattage.

칭함)으로 사용되며, FL20S·B와 FL20S·R는 각각 청색과 적색의 단색광을 나타내는 형광등이다. DULUXL55W/21-840은 OSRAM에서 직관형을 브릿지(bridge) 기술로 결합시킨 3파장의 이중형광등(twin fluorescent lamp, 이하 “이중3파장등”이라 칭함)으로서 냉백색의 광원색을 갖는다. 이중3파장등은 휘도가 높으며, 기구내의 배선이 용이한 장점을 지니고 있다.

나. 측정 방법

실험용으로 선정된 형광등의 광강도로서 광합성유효광량자속밀도(photosynthetic photon flux density), 조도(illuminance), 복사조도(irradiance)를 측정하였으며, 이를 위하여 광량자센서(LI-COR, LI-190SA), 조도센서(LI-COR, LI-210SA), 일사센서(LI-COR, LI-200SA)가 사용되었다. 60cm x 57cm 크기의 사각판에 형광등을 각 4분씩 등간격으로 배열하였고, 근접조명에 필요한 자료를 얻고자 광원으로부터 수직 방향으로 5~50cm 떨어진 지점에서 5cm 간격마다 광강도를 측정하였다. 이 때 사각판의 반사율을 높이고자 한 겹의 알루미늄 호일을 씌웠으며, 외부로부터의 간섭을 차단하기 위해서 암조건에서 실험을 수행하였다. 광강도의 측정 센서가 놓여진 수평판의 크기는 광원이 부착된 사각판과 동일하며, 수평판을 9등분한 지점의 각 중앙에서 광강도를 측정하였다.

한편 각 광원의 분광 특성을 측정하고자 300~1,100nm의 파장 범위에서 분광 분석이 가능한 분광복사계(LI-COR, LI-1800)를 사용하였다. 이 때 광원으로부터 분광복사계의 센서부까지의 거리는 40cm로 고정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 형광등의 광강도

1) 광합성유효광량자속밀도

광량자속밀도는 단위시간·단위면적당 입사된 광량자수를 의미한다. 이 가운데 파장 영역이 400~700nm인 복사, 즉 광합성 유효복사에 해당되는 광량자속밀도를 광합성유효광량자속밀도(이하 “PPF”라 칭함)라 한다

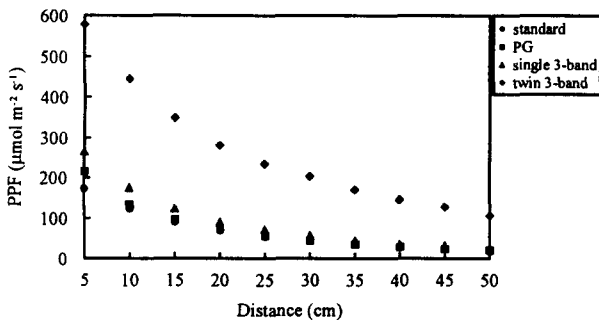


Fig. 1 Variation of photosynthetic photon flux density(PPF) as affected by the vertical distance under the different fluorescent lamps as light source.

이다. 광원으로부터 5cm 떨어진 지점에서의 PPF가 이중3파장, 일중3파장, PG, 일반등의 순서로서 각각 $580\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $265\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $217\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $174\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타난 가운데 광원으로부터의 수직거리가 증가함에 따라 PPF는 자연대수의 관계로

서 감소하였다. 50cm 떨어진 지점에서의 PPF는 이중3파장등에서 $107\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 나머지의 경우 $19\sim 28\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 이와 같은 결과는 표 1에 제시한 바와 같이 이중3파장등의 광속이 나머지 형광등의 광속에 비해서 높기 때문인 것으로 판단된다. PG등의 광속은 일반등 또는 일중3파장등에 비해서 30~38%에 불과하나, PPF가 일반 등보다 높고 이중3파장등보다는 작은 특성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

채소류 가운데 호광성을 제외한 상당 부분의 플러그로를 육묘할 때 배지 표면에서의 적정 PPF는 $250\sim 300\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상이 요구된다. 이러한 수준의 PPF는 이중3파장등을 나란하게 4분 배열할 때 광원으로부터 20~25cm 떨어진 지점에서 얻을 수 있는 광강도이므로, 이중3파장등의 사용에 의한 근접 조명이 가능함을 알 수 있다. 한편, 인공광하에서 접목묘의 활착 촉진 단계와 종속영양배양(heterotrophic culture)은 물론 광독립영양배양(photoautotrophic culture)으로 증식되는 식물의 조직배양 단계에서 적정 PPF가 $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이하임을 감안하면, 일반등, PG등 또는 일중3파장등 가운데 어느 것을 근접 조명용 광원으로 사용할지라도 요구되는 PPF를 얻을 수 있다.

2) 조도

조도는 단위면적·단위시간당 입사된 복사에너지를 표준비시감도에 기초하여 평가한 것이다. 종래에는 식물의 광-광합성곡선 또는 광합성의 광포화점을 표시할 때 조도가 널리 사용되었으나, 식물 생육과 관련된 광의 지표로서 사용하기에 부적합하므로 최근에는 조도 대신에 PPF가 널리 사용되고 있다.

그림 2는 본 실험에 사용된 형광등으로부터의 수직거리에 따른 조도 변화를 나타낸 것이

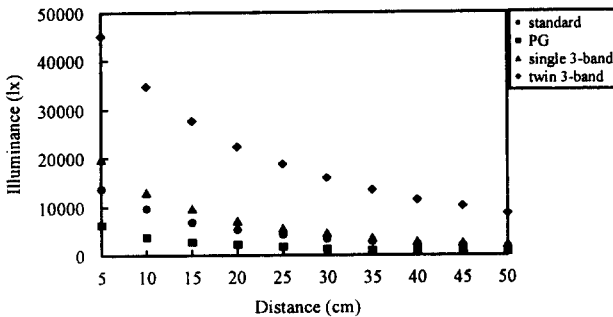


Fig. 2 Variation of illuminance as affected by the vertical distance under the different fluorescent lamps as light source.

다. 광원으로부터 5cm 떨어진 지점에서의 조도가 이중3파장등, 일중3파장등, 일반등, PG등의 순서로서 각각 45,000lx, 20,000lx, 14,000lx, 6,000lx로 나타났다. PG등에서 조도가 가장 작게 나타난 것은 나머지 형광등과 다르게 PG등에 녹색광이 상대적으로 작게 들어 있기 때문이다. 녹색광의 파장 영역이 500~570nm이고, 비시감도가 555nm에서 최고치를 나타내므로 녹색광이 부족하면 조도는 당연히 감소된다.

3) 복사조도

복사조도는 단위면적·단위시간당 입사된 복사에너지를 의미한다. 형광등과 같은 인공광원에서 발생하는 열은 식물공장내의 공조부하에 커다란 영향을 미치게 된다. 그림 3은 형광등으로부터의 수직거리에 따른 복사조도를 나타낸 것이다. 광원으로부터 5cm 떨어진 지점에

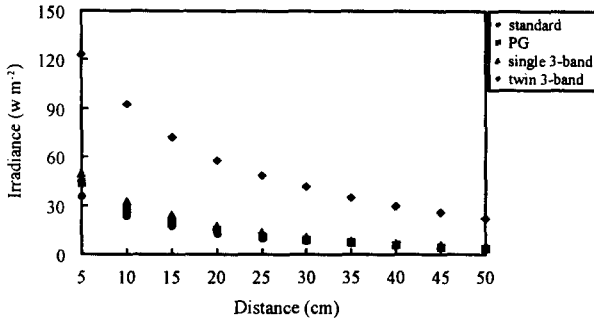


Fig. 3 Variation of irradiance as affected by the vertical distance under the different fluorescent lamps as light source.

나. 형광등의 분광 특성

형광등은 형광체의 선택 또는 조합에 따라 서로 다른 분광에너지 분포를 갖는다. 본 실험에서 사용된 형광등의 분광 특성이 그림 4, 5 및 6에 실려 있다. 단색광을 제외한 대부분의

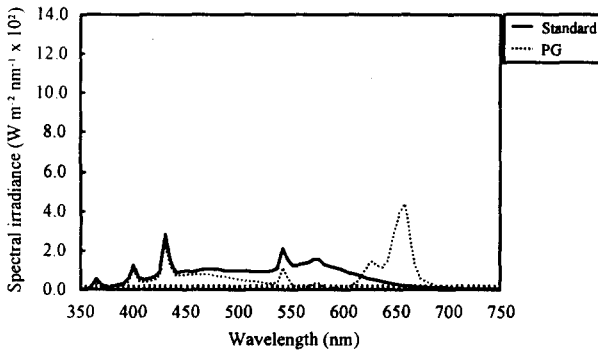


Fig. 4 Spectral characteristics for standard and PG fluorescent lamps.

형광등은 400~700nm의 광합성 유효 복사 영역에서 분광에너지 분포를 갖기 때문에 고압나트륨등 또는 메탈할라이드등과 달리 열복사의 방출이 적게 된다. 그림 4로부터 일반등은 430nm에서 단위과장당 복사조도가 최고치를 나타내었고, PG등에서는 660nm에서 최고치가 나타났으나 500~600nm에 해당되는 황녹색광이 매우 적음을 알 수 있다. 이것은 녹색광이 적고 적색광이 차지하는 비중이 큰 PG등의 특성 때문에 일반등에 비

해서 PG등이 조도는 낮으나 PPF가 높으므로 식물재배용 광원으로 적합함을 암시하는 것이다. 실제로 단위에너지당 방출되는 광량자수는 과장이 길수록 많게 된다. 그림 5는 일중 및 이중3과장등에 대한 분광 특성으로서 각각 545nm의 녹색광에서 단위과장당 복사조도의 최고치를 나타내었고, 다음으로 610nm, 435nm에서 높게 나타났다. 전체적으로 이중3과장등의 복사조도가 높게 나타난 가운데 특히, 610nm에서 복사조도는 일중3과장등에 비해서 3배 이상 높게 나타났다.

청색과 적색의 단색광 형광등에 대한 분광에너지 분포가 그림 6에 실려 있다. 적색광은 660nm에서 복사조도의 최고치를 나타낸 가운데 비교적 과장 폭이 작은 단색광의 특성을 지니고 있어 적색광의 부가에 유용할 것으로 예상된다. 한편, 청색광은 425nm에서 최고치가

서 이중3과장등의 조도가 123 W m^{-2} 로서 일중3과장등, PG등 및 일반등에 비해서 각각 2.5배, 2.8배, 3.4배 높게 나타났다. 형광등을 점등할 때 입력 전력의 약 10%가 안정기에 의해서 소비되면서 열로 방출되는 것으로 보고되었다. 그러므로 본 실험에 사용된 이중3과장등과 같이 많은 열을 방출하는 형광등에서는 안정기를 식물공장 외부에 설치하여 냉방부하를 작게 하는 것이 바람직하다.

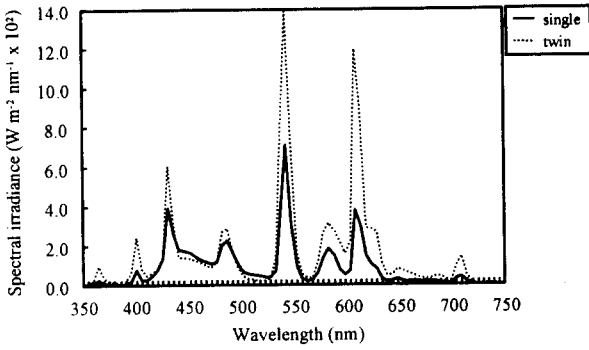


Fig. 5 Spectral characteristics for single and twin 3-band fluorescent lamps.

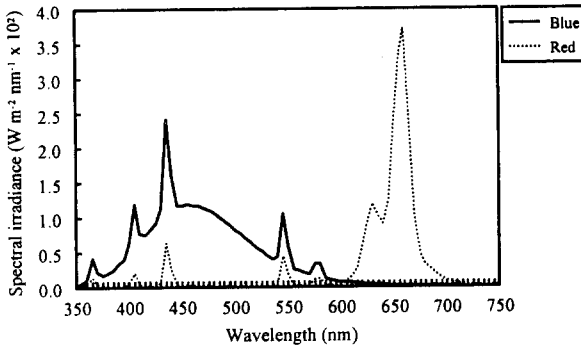


Fig. 6 Spectral characteristics for blue and red fluorescent lamps.

나타났으나, 파장 폭이 상대적으로 크기 때문에 보광용으로 사용하려면 광강도 뿐만 아니라 광질을 고려해야 할 것으로 판단된다.

다. 광량자속밀도, 조도 및 복사조도의 변환 관계

임의의 광속을 갖는 광원에 대해서 측정된 광량자속밀도, 조도 및 복사조도 사이에는 비례관계가 성립하므로 상호 변환이 가능하다. 그러므로 광강도 사이의 변환계수가 알려지면 기지의 광강도로부터 또 다른 광강도의 추정이 가능하다. 일반등, PG등, 일중 및 이중3파장등으로부터 수직 방향으로 5~50cm 떨어진 지점에서 5cm 간격으로 측정된 PPF, 조도 및 복사조도 사이의 상호 변환계수에 대한 평균치가 표 2에 실려 있다. PPF에 대한 조도의 변환계수가 일반등, 일중 및 이중3파장등에서는 76~79lx/ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이나, PG등에서는 29.7lx/ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이나,

PG등에서는 29.7lx/ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 낮게 나타났다. 한편, 복사조도에 대한 PPF의 변환계수가 4.85~5.34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}/\text{W m}^{-2}$ 로서 실험에 사용된 형광등 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 2. Conversion factors among photosynthetic photon flux density, illuminance and irradiance for different fluorescent lamps.

Light source	Conversion factors	
	lx/ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}/\text{W m}^{-2}$
FL20SD/18	78.2	5.27
FL20SPG/18	29.7	5.09
FL20SEX-D/18	76.2	5.34
DULUXL55W/21-840	79.2	4.85

4. 요약 및 결론

식물공장의 근접조명용 인공광원으로서의 가능성을 탐색하고자 주요 형광등의 PPF, 조도, 복사조도 및 분광 특성을 분석하였다. 광원으로부터의 수직거리에 따른 PPF 분포로부터 이중3과장등은 플러그묘의 근접조명용 광원으로서 적합하게 나타났다. 한편, 일반등, PG등 및 이중3과장등하에서는 PPF가 낮기 때문에 접목묘의 활착촉진 또는 식물의 조직배양 단계에서 근접조명용 인공광원으로 사용하는 것이 적합하다. 광원으로부터의 수직거리가 증가함에 따라 형광등의 광강도는 자연대수의 관계로서 감소하였다.

식물재배용 PG등에는 660nm의 적색광이 많이 들어있으나 500~600nm의 황녹색광이 작기 때문에 일반 형광등에 비해서 PPF는 높으며 조도는 낮게 나타났다. 이중 및 이중3과장등에서 단위과장당 복사조도는 각각 545nm의 녹색광에서 최고치가 나타났고, 다음으로 610nm, 435nm의 순서로 나타났다. 적색광은 660nm에서 복사조도의 최고치를 나타낸 가운데 단색광의 특성을 지니고 있어 적색광의 부가에 유용할 것으로 예상된다.

PPF에 대한 조도의 변환계수가 일반등, 이중 및 이중3과장등에서는 $76\sim 79\text{lx}/\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 이나, PG등에서는 $29.7\text{lx}/\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 로 낮게 나타났다. 복사조도에 대한 PPF의 변환계수는 $4.85\sim 5.34\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}/\text{W m}^{-2}$ 로서 실험에 사용된 형광등 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. 김용현. 1997. 식물생산과 관련한 광의 물리학적 용어 및 개념. 한국농업기계학회지 22(4):503-512.
2. 김용현. 1997. 기류속도가 인공광하의 플러그묘 생장에 미치는 영향. 한국물생산시설환경학회 학술논문발표요지 6(1):74-79.
3. 김용현, 古在豊樹. 1996. 인공광하의 공정육묘용 풍동설계 및 공정묘 개체군상의 공기역학적 특성. 한국농업기계학회지 21(4):429-435.
4. 김용현, 古在豊樹. 1996. 기류속도가 인공광하에서 공정묘 개체군의 미기상에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):160-166.
5. Kim, Y.H., T. Kozai, Y. Kitaya and C. Kubota. 1996. Design of a wind tunnel for plug seedlings production under artificial lighting. Acta Horticulturae 440:153-158.
6. 금호전기(주) 램프종합카탈로그.
7. OSRAM. Indoor and outdoor lighting '95/96 Catalogue.
8. 社團法人 照明學會編. 1992. 光バイオインダストリー. オム社.