

미래형 식물생산 시스템의 인공광 조절 기술

Control of Artificial Lighting for Plant Production System in the Future

전북대학교 생물자원시스템공학부
(농업과학기술연구소) 김용현

1. 서론

온실 또는 식물공장과 같은 식물생산 시스템은 이용되는 광원에 따라 태양광과 인공광을 함께 사용하는 태양광 병용형과 태양광이 투과되지 않도록 폐쇄 공간을 만들고 조명용 광원으로서 인공광만을 사용한 폐쇄형(또는 완전제어형)으로 구분된다. 향후 태양광 병용형과 폐쇄형 식물생산 시스템의 경제성을 비교할 때 시스템의 성능, 광원의 배광성, 소요 비용, 광량과 광질 조절의 용이성, 생산물의 수량과 품질 등을 종합적으로 고려하여야 할 것이다.

태양광은 청정에너지로서 무한대로 사용할 수 있는 장점을 지니고 있다. 그런데 온실 내로 투과되는 태양복사 에너지는 기상조건에 따라 변동이 클 뿐만 아니라 장파 복사가 많이 포함되어 있으므로 식물생산 시스템의 광원으로 태양광을 사용할 경우 시스템 내의 환경을 완전하게 제어하기가 쉽지 않다. 따라서 계획적인 생산, 정확한 재배관리, 완전 무농약 재배, 생산물의 품질 등을 고려할 때 식물생산 시스템의 바람직한 조명 형태는 태양광 병용형보다 인공광만을 이용한 폐쇄형이 유리할 것으로 판단된다.

인공광원은 발광 원리에 따라 서로 다른 스펙트럼과 조명효율을 갖고 있는 바, 식물의 광합성과 광형태형성 반응을 촉진하고자 여러 종류의 인공광원이 사용되고 있다. 예를 들면 식물공장 또는 시설원예의 보광용 광원으로서 휘도가 매우 높은 고압나트륨램프 또는 메탈할라이드램프가 사용되고 있다. 또한 조직배양묘, 접목묘, 실생묘 등 우량 식물묘의 생산에 형광등이 사용되고 있다. 이밖에 발광다이오드(light-emitting diode, LED)는 단색광의 파장을 지니고 있기 때문에 광형태형성 반응을 촉진하기 위한 광원으로 주목받고 있다.

인공광하에서 식물을 생산할 때 소비되는 전력은 식물생산 시스템의 상업화에 적지 않은 부담이 되고 있다. 그러므로 미래형 식물생산 시스템에서 소비전력을 절감시키려면 고효율의 인공광원과 광원으로부터 조사된 광에너지를 식물이 효과적으로 흡수할 수 있는 조명시스템이 개발되어야 할 것이다. 본 고의 목적은 인공광원의 종류와 특성을 살펴보고, 미래형 식물생산 시스템에 적용될 수 있는 인공광 조절 기술을 살펴보는 데 있다.

2. 광복사와 형태형성

가. 광복사

광복사는 1nm~1mm의 파장 영역에 해당하는 전자파로 정의되며, 파장에 따라 작용 또는 효과가 다르게 나타난다(Fig. 1).

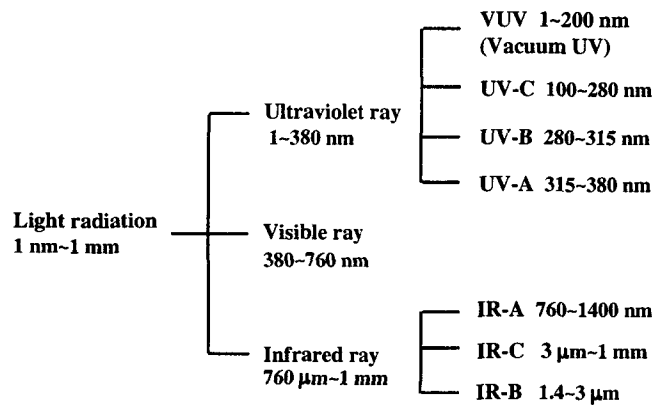


Fig. 1. Classification of light radiation.

나. 식물의 형태형성 반응

형태형성(morphogenesis)은 식물의 세포, 조직 및 기관의 형태적 변화를 의미하는 것으로서 종자 발아, 절간 신장, 엽의 전개, 화아의 형성 등이 이에 해당한다. 형태형성 반응은 광환경에 따라 형태가 다르게 나타나는 광형태형성(photomorphogenesis)과 DIF에 따라 형태가 변화하는 열형태형성(thermomorphogenesis)으로 구분된다. DIF는 주야간의 온도차에 해당하는 개념으로서 식물의 초장 또는 절간장 조절에 이용되고 있다.

식물을 생산할 때 건물중 또는 생체중 등과 관련한 성장제어 뿐만 아니라 식물의 형태형성제어는 중요한 의미를 지닌다. 특히 식물의 형태형성에 해당되는 초장의 제어는 묘생산에 유익한 결과를 제공한다. 일반적으로 절화의 상품가치를 높이려면 초장을 길게 할 필요가 있으나, 분화류의 경우 초장을 짧게 하고 입체감이 느껴져야 상품가치가 증대될 수 있다. 한편 이식용 묘는 초장이 짧고 적절한 줄기 직경을 갖는 것이 바람직하다.

식물조직배양에서 主徑이 직립 상태를 유지하는 형의 식물종을 증식할 경우 바람직한 조직배양묘의 형태는 증식과정과 성장 및 발근 과정에 따라 다르다. 증식과정에서 외식체의 절단 또는 이식작업을 손쉽게 하려면 조직배양묘의 절간장 또는 초장이 긴 것이 적당하다. 예를 들면, 로봇의 이용에 의한 증식과정의 자동화를 시도할 때 조직배양묘의 절간장 또는 초장이 긴 것이 바람직하다. 한편 성장 및 발근 과정에서 배양

기내의 소식물을 순화시켜 적당한 형태로 배양하려면 순화과정에서 쉽게 도복되거나 고사되지 않도록 묘의 초장을 짧게 하고 튼튼한 모습을 갖도록 하는 것이 필요하다.

다. Phytochrome과 광형태형성

엽중의 광수용체인 Phytochrome은 식물의 광형태형성 반응에 중심적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다. Phytochrome은 분자량이 약 120kDa 정도인 polypeptid의 복합체로서, 광에 의해서 결합상태가 가역적으로 변화한다. 한편 Phytochrome은 흡수 스펙트럼이 상이한 2개의 형태를 이루는 데, 이 가운데 적색광 흡수형(P_r)은 660nm 부근에서 흡수가 극대로 되며 원적색광 흡수형(P_{fr})은 730nm 부근에서 흡수가 극대로 되는 특성을 갖고 있다(Fig. 2). Phytochrome은 암조건에서 P_r 로서 생합성된다. P_r 은 생리적으로 불활성으로서 안정 상태를 유지하나, 적색광을 받으면 활성의 P_{fr} 로 변환된다. 이 P_{fr} 은 원적색광을 받으면 P_r 로 되돌아간다. 이 외에 암흑 조건하에서 P_{fr} 로부터 P_r 로 서서히 변화되는 반응이 일어나는 데 이 반응은 암반전이라 불리운다(Thomas와 Vince-Prue, 1997; 日本照明學會, 1992).

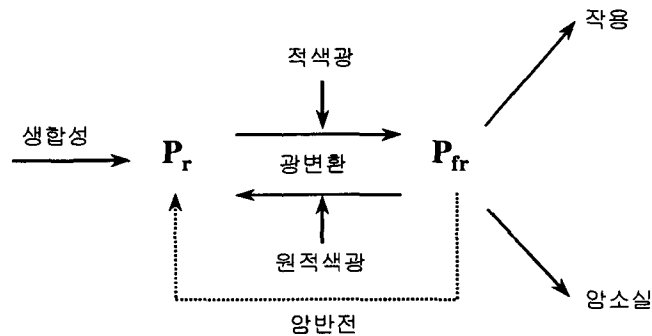


Fig. 2. Phototransformation of phytochrome.

식물의 광형태형성 반응은 약광반응과 강광반응의 2가지로 나누인다. 약광반응은 짧은 시간에 약광을 받을 때 일어나는 반응으로서 이 때 조사된 광은 Phytochrome을 작용시키기 위한 자극, 즉 신호로서의 기능을 갖는다. 약광반응에서 적색광과 원적색광은 가역적으로 작용한다. Table 1은 상추의 종자발아와 적색·원적색광의 가역성을 나타낸 것이다. 상추의 광발아는 적색광에서 촉진되고, 원적색광에서 억제되나, 최후로 받게 되는 광의 종류에 따라 발아율이 결정된다. 원적색광에 의한 발아억제 효과는 품종에 따라 커다란 차이가 있으며, 약광 반응의 신속성 또는 Phytochrome의 존재 상태와도 관계되는 것으로 알려져 있다. 이밖에 적색광에 의한 발아촉진 효과는 수분 상태 또는 온도에 따라 변화되며, 이에 따라 암발아율도 변화된다.

Table 1. Germination of lettuce seeds cv. Grand Rapids following consecutive exposures to R (1 min.) and FR (4 min.) (Borthwick et al., 1952).

Treatment	% germination
Dark control	8.5
R	98
R→FR	54
R→FR→R	100
R→FR→R→FR	43
R→FR→R→FR→R	99
R→FR→R→FR→R→FR	54
R→FR→R→FR→R→FR→R	98

강광반응은 강광 조건과 장시간의 광조사에 의해서 일어난다. 이 반응은 반응량이 조사된 에너지에 의존하므로 고에너지반응으로도 불리운다. 일정한 강광조건하에서 Phytochrome의 양 P에 대한 원적색광 흡수형 P_{fr}의 비율, 즉 P_{fr}/P은 광평형상태함수 (phototoequilibrium state function, Φ)로 정의되며, 원적색광에 대한 적색광의 광량 자속비에 따라 다음과 같이 표시된다(相賀 등, 1994).

$$\Phi = \frac{P_{fr}}{P} = \frac{0.87}{1 + \frac{0.295}{\zeta}} \quad (1)$$

$$\zeta = N_{660}/N_{730} \quad (2)$$

여기서, N은 단색광 파장영역에서의 광량자속($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$)에 해당한다. 원적색광에 대한 적색광의 비율, 즉 ζ 가 작을 때 Φ 는 작게 된다. 위와 같은 경우는 식물의 균락내부에서와 같이 원적색광이 풍부한 조건하에서 나타난다. 즉 식물의 엽군에 의해서 400~700nm의 광합성유효광량자속(photosynthetic photon flux, PPF)의 대부분이 흡수되므로 균락내부에는 원적색광이 풍부해진다. 보통 Φ 값이 크면 신장생장이 억제되나, 작게 되면 신장생장이 촉진된다. 그러므로 광환경의 원적색광에 대한 적색광의 비율을 변화시키면 식물의 광형태형성 제어가 가능해진다. 원적색광과 적색광의 비율에 대한 Phytochrome의 감수성은 식물의 종류에 따라 다르다. 오이, 상추, 해바라기 등은 감수성이 높으나, 백합 등은 감수성이 낮다.

3. 인공광원의 종류 및 특성

가. 인공광원의 종류

인공광원은 발광원리에 따라 열복사와 루미네스스(luminescence)의 2종류로 구분된다(Fig. 3). 이 가운데 식물성장용 광원으로 백열전구, 형광등, 형광수은램프, 안정기 내장형 형광수은램프, 메탈할라이드램프, 고압나트륨램프 등이 사용되고 있다.

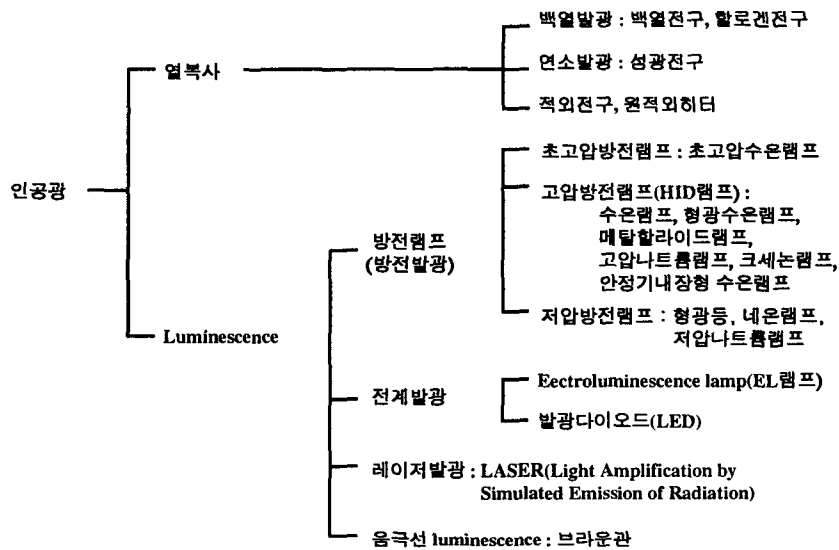


Fig. 3. Classification of artificial lighting sources by the principle of luminescence (社団法人 照明學會, 1992).

나. 인공광원의 특성

1) 백열전구(incandescent lamp, IL)

백열전구는 열복사에 의해서 발광이 이루어지는 램프로서, 텅스텐 필라멘트에 전기가 흐르면서 고온과 함께 백열이 이루어진다. 백열전구에는 청색광에 비해서 적색광이 많이 포함되어 있어 식물의 도장 가능성이 높으므로 광합성용 광원으로는 부적합하다. 광변환효율은 $10 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 정도로 낮다. 주로 작은 광강도로서 국화의 개화 제어, 딸기의 휴면 방지, 식물공장에서 발아촉진 등 광형태형성 제어용으로 사용된다. 이론 효율의 최대값은 $95 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이다.

2) 형광등(fluorescent lamp, FL)

형광등은 열음극을 지닌 저압 수은증기 방전램프로서, 방전에 의해서 발생하는 자외복사가 유리관내에 도포된 형광체에 의해서 가시광으로 변환된다. 형광체의 종류에 따라 비교적 쉽게 필요한 복사에너지 분포를 얻을 수 있다. 형광등 자체만으로는 식물생

산에 필요한 광강도를 확보하기가 쉽지 않아 유식물체의 조직배양용 광원으로 널리 사용되어 왔다. 최근 들어 근접조명 기술이 개발되어 식물묘 생산을 위한 광원으로서 주목받고 있다. 이론효율의 최대값은 백색형광등에서 $280 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, 고연색 형광등에서 $220 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이다.

형광등은 형광체의 선택 또는 조합에 따라 서로 다른 분광에너지 분포를 갖는다. 대부분의 형광등은 400~700nm 범위의 광합성유효복사 영역에서 분광에너지 분포를 갖기 때문에 고압나트륨램프 또는 메탈할라이드램프와 다르게 장파복사의 방출이 적다.

형광등 가운데 일중3파장 형광등(single 3-band fluorescent lamp)과 이중3파장 형광등(twin 3-band fluorescent lamp)의 복사조도는 각각 녹색광(545nm), 적색광(610nm), 청색광(435nm)에서 높게 나타나, 3파장 형광등의 전형적인 분광 특성을 나타냈다(Fig. 4). 식물생장용 형광등(PG fluorescent lamp)은 660nm의 적색광 영역을 많이 포함하고 있으나, 500~600nm에 해당되는 황녹색광은 매우 적게 방출되었다. 이것은 녹색광이 적고 적색광이 차지하는 비중이 상대적으로 큰 PG등의 특성이라고 할 수 있다. 한편 일반 형광등(standard fluorescent lamp)에는 430nm의 청색광이 많이 포함된 것으로 나타났다(김과이, 1998).

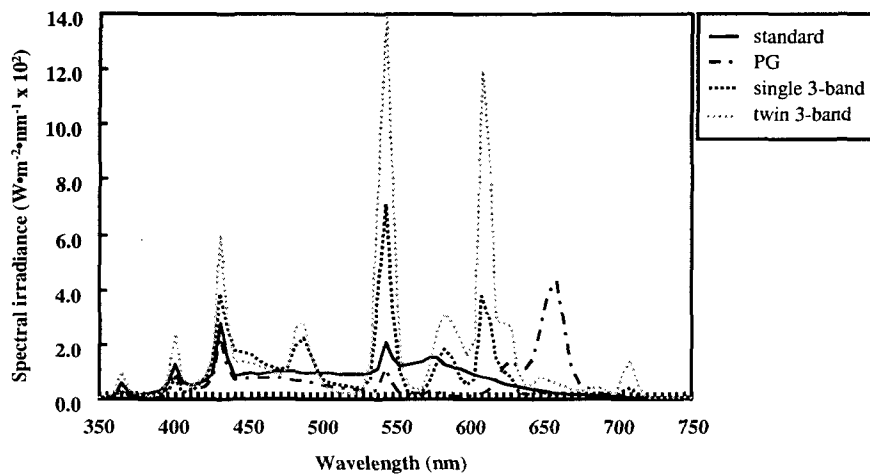


Fig. 4. Spectral characteristics for different fluorescent lamps (김과이, 1998).

3) 형광수은램프(high pressure mercury vapour lamp, HPMVL)

수은 방전에 의해서 수은의 증기압을 높이면 가시효율이 향상되는 램프로서, 오래 전부터 식물생장용 광원으로 사용되고 있다. 수은의 발광 휘선이 405nm, 436nm, 546nm, 577~579nm에 해당하므로 적색광이 부족하여 식물의 생장억제가 나타날 수 있는 바, 최근에는 적색광을 보강한 램프가 개발되었다. 효율은 $60 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 로서, 광합성 촉진을 위한 보광용 또는 일장 연장용으로 사용된다. 형광수은램프는 투명형과 형광형으로 구분된다. 또한 형광체의 종류에 따라 일반적인 X형과 적색광을 보강한 XW형로 나누인다. 용량은 50~2,000W이다. 이론효율의 최대값은 $120 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이며, 수명은 30,000h 정도이다.

4) 안정기 내장형 형광수은램프(self-ballasted mercury lamp, SBML)

수은램프의 발광관에 텅스텐 필라멘트를 직렬로 연결하여 안정기를 대신한 것으로서 수은램프에 들어있지 않은 적색광이 포함되어 있다. 분광에너지 분포가 양호하나, 효율이 $20 \sim 27 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 로서 낮기 때문에 주로 관상식물의 보광용으로 사용된다. 한편 식물생산용으로 수은램프의 발광관과 텅스텐 필라멘트의 입력 비율을 조정한 것도 있다. 이 램프는 투명형과 형광형으로 나누이며, 용량은 100~750W 정도이다.

5) 메탈할라이드램프(metal halide lamp, MHL)

메탈할라이드램프는 수은램프를 기본으로 하여 각종 금속 할로겐화물을 첨가한 램프로서, 휘선을 중심으로 발광이 이루어지는 것과 연속적인 발광을 많이 포함한 것 등 여러 종류가 있다. 대표적인 첨가물로서 인듐(청색광), 탈륨(녹색광), 나트륨(황색광), 리튬(적색광) 등이 있다. 효율은 $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 정도이나, 600nm 이상의 적색광이 작기 때문에 식물공장에서는 고압나트륨램프와 조합하여 널리 사용된다. 최근에는 온실의 보광용 또는 태양광병용형 식물공장에서 단독 광원으로 사용하고자 6,500K에 근사한 분광에너지 분포를 나타내는 고연색형 메탈할라이드램프가 개발되었다. 메탈할라이드램프는 효율이 우수한 시동기 내장형과 고연색형으로 구분되며, 용량은 70~2,000W 정도이다. 이론효율의 최대값은 $120 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이상이며, 수명은 18,000h 이상으로 알려져 있다.

6) 고압나트륨램프(high pressure sodium lamp, HPSL)

고압나트륨램프는 발광관에 광투과율이 높은 알루미늄 세라믹을 사용하고 관내에 나트륨과 완충가스로서 작용하는 수은이 아말감 형태로서 봉입되어 있다. 효율은 $130 \sim 150 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 로서 다른 광원에 비해서 높으나(Table 2), 적색광이 많이 포함되어 있어 식물의 도장을 유발하기 쉬우므로 청색광을 보충하고자 메탈할라이드램프와 함께 사용된다. 고압나트륨램프는 효율이 높은 시동기 내장형, 시동기 내장의 연색성 개선형, 고연색형으로 나누인다. 용량은 50~940W 정도이다.

일반적으로 고압나트륨램프의 효율은 램프의 입력전력에 따라 상승한다. 현재까지 개발된 고압나트륨램프 가운데 효율이 가장 높은 것은 1,200W의 입력전력에서 219,600lm의 광속을 나타내어 발광효율이 $183 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 에 이른다(本多, 2000). 이와 같이 고압나트륨램프의 효율이 상승하는 이유로서 시동가스로서 크세논가스 봉입 압력의 증가, 나트륨 증기압의 조절, 발광관 구조와 형상 등을 들 수 있다. 최근에는 봉입되는 수은량을 증가시켜 청색광을 보강한 램프가 식물생산용으로 판매되고 있다. 이론효율의 최대값은 $360 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 정도이다.

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

종 류	소비전력 (W)	발광효율 ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)	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
3파장형광등	40	89.0	1.22	13.7
식물생장용형광등	40	33.3	0.75	22.4

sources (本多, 2000).

4. 광환경 제어에 따른 식물의 성장 및 형태형성

가. 광강도

일반적으로 식물의 순광합성속도는 광포화점에 이르기까지 광강도의 증가에 따라 상승한다. Fig. 5는 조직배양된 모주로부터 감자 플러그묘를 생산하는 단계에서 플러그묘의 성장에 미치는 PPF의 영향을 나타낸 것이다(Kim et al., 2002b). PPF의 증가에 따라 초장은 감소하였으며, 건물중은 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 이르기까지 PPF의 증가에 따라 함께 증가하였으며, $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 PPF에서는 거의 일정하게 나타났다.

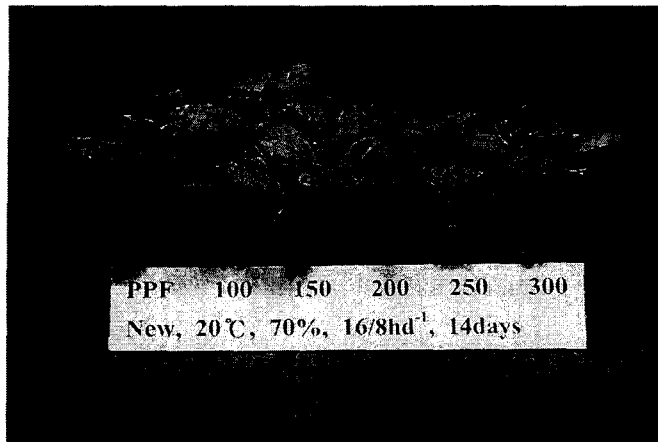


Fig. 5. Growth of potato plug seedlings as affected by photosynthetic photon flux(PPF) (Kim et al., 2002b).

나. 광질

일반적으로 조사된 광에 포함된 원적색광 파장영역(FR)의 광강도에 대한 적색광 파장영역(R)의 광강도의 비율, 즉 R/FR 값을 크게 하면 식물의 초장은 짧게 된다. 또한 광합성유효파장 영역에서의 광강도에 대한 청색광 파장영역에서의 광강도의 비율을 크게 하면 식물의 초장 또는 경장은 짧게 나타난다. Murakami et al.(1992)은 식물의 생장에 대한 R/FR 값의 영향을 구명하고자 3파장 형광등에 원적색광을 다르게 부가한 4 파장 형광등(Fig. 6의 A, B, C)하에서 해바라기 유식물을 8일간 재배하였다. 이 때 해바라기의 경장은 파장 600~700nm, 즉 적색광 파장 영역의 광량자속에 대한 파장 700~800nm, 즉 원적색광 파장 영역의 광량자속의 비율이 작을수록 증가하였다. 제라늄 조직배양묘에 원적색광을 조사하면 백색 형광등에 비해서 줄기의 신장이 촉진되나, 청색광을 조사하면 줄기 신장이 억제되었다(Appelgren, 1991). 또한 원적색광램프 또는 백열전구를 사용하여 R/FR 값이 작은 광을 조사시키면 줄기의 신장이 촉진되어 결과적으로 초장이 커진다.

Osterlund et al.(1999)은 식물체 내에서 줄기 신장이 이루어지는 과정을 광신호의 전달 원리로 해석하면서 광반응성 ON-OFF 스위치 기능을 담당하는 단백질 복합체 COP9에 대해서 보고하였다. 즉 암기에 광형태형성 반응의 억제 역할을 하는 COP1이 핵 내부에 축적되면서 COP9과 결합하여 황화(etiolation) 현상이 이루어짐을 보고하였다. 황화는 식물이 암조건 상태에 있을 때 잎과 뿌리의 생장이 억제되는 대신에 하배축(hypocotyl)의 신장이 비정상적으로 촉진되는 현상을 의미한다. 한편 명기에서 빛은

COP9으로부터 COP1을 분리시켜 세포질과 결합시켜 핵 내부에 COP1의 축적이 이루어지지 않도록 하면서 광형태형성 반응의 억제 효과를 제거한다(Fig. 7).

자외선 파장영역의 광은 식물의 성장을 저해한다. 이러한 영향을 이용하여 이식 직후의 묘에 자외광을 조사시키면 증산이 억제되어 수분스트레스를 경감시킴과 더불어 지상부의 성장을 억제할 수 있다. 이에 따라 지상부 건물중에 대한 지하부 건물중의 비율이 증대되어 묘의 활착이 촉진될 뿐만 아니라 활착 후의 성장을 촉진시킬 것으로 기대된다(鈴木, 1994).

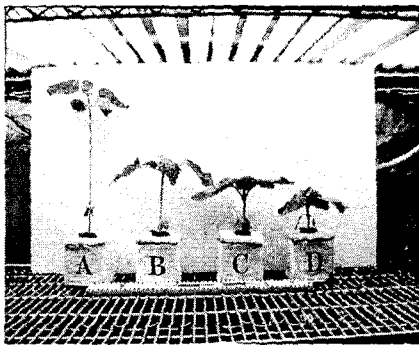


Fig. 6 Sunflower plants grown under 4-band fluorescent lamp(A, B, C) and 3-band fluorescent lamp(D) (Murakami et al., 1992).

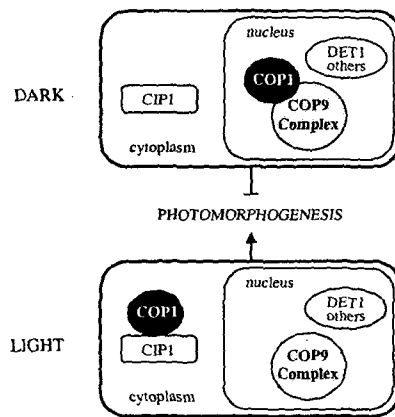


Fig. 7. Model for the cellular action of the COP9 complex (Chamovitz et al., 1996).

다. 광조사 방향

인공광형 식물공장에서 생산비의 상당부분을 차지하는 전력비를 절감시키려면 광원으로부터 조사된 광에너지가 가능한 식물에 의해서 모두 흡수되도록 하여 조명효율을 증대시켜야 한다.

조직배양묘의 성장을 촉진하고 초장의 신장을 억제하여 고품질의 묘를 얻고자 형광등을 사용하되 측방에서 광을 조사시키는 측방 광조사 시스템이 Hayashi et al. (1991)에 의해서 개발되었다(Fig. 8). 배양기의 윗부분에서 광을 조사시킨 하방 광조사와 측방 광조사에서 감자 조직배양묘의 경장을 $20\sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 범위의 PPF에서 비교한 결과 PPF가 동일할 때 측방 광조사구의 경장은 하방 광조사구의 경장에 비해서 약 20mm 짧게 나타났다. 그러나 PPF가 동일할 때 측방 광조사구와 하방 광조사구의 건물중에 대한 유의차는 인정되지 아니하였다. 이와 같은 측방 광조사에 의해서 배양된 조직배양묘는 종래의 하방 광조사에 의해서 배양된 조직배양묘에 비해서 초장이 짧고, 상위엽이 하위엽보다 다소 작게 나타나 이식용 묘로서 적합한 품질 특성을 지니고 있

었다. 또한 배양기 및 형광등을 연직으로 누적 배치할 수 있으므로 배양실내의 효과적인 공간 이용이 가능할 것으로 기대된다.

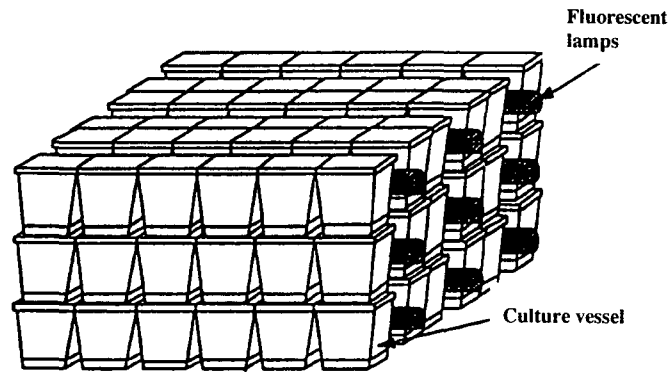


Fig. 8. A Schematic diagram of the sideward lighting system using fluorescent lamps (Hayashi et al., 1992).

라. 광주기

사라다나의 생체중에 미치는 명기 시간의 영향을 조사한 결과 1일중 18시간동안 광을 조사하면 12시간 광을 조사한 경우에 비해서 생체중은 약 40% 증가하였다(池田 등, 1988). 한편 명기 시간을 더욱 길게 하여 24시간(연속 조사)으로 한 경우 18시간 동안 광을 조사한 경우에 비해서 생체중의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이와 같이 식물의 생장에 미치는 광주기의 영향은 식물의 종류, 광강도 또는 CO₂ 농도 등에 따라 다르게 나타난다. 실용적인 측면에서 형태형성에 대한 명기 시간의 영향, 즉 일장반응을 고려함과 더불어 조명을 위해 투입되는 단위에너지당 수량을 고려하여 적정 명기시간을 결정하는 것이 바람직하다.

5. 최근에 개발된 식물생장용 인공광원 및 조명 기술

가. 발광다이오드(light-emitting diode, LED)

발광다이오드는 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 재결합되는 데, 이 과정에서 효율이 높은 전기에너지가 광에너지로 변환되

어 발광이 이루어진다. p-n 접합부에서 변환된 광에너지의 일부가 발광되고, 나머지에너지는 반도체 결정 내부를 통과하거나 반사되면서 감쇠하고 마지막에는 결정의 발열로서 소모된다(Fig. 9).

LED는 높은 신뢰성과 응답성을 지니고 있으며 점등에 소비되는 전력소모가 매우 작기 때문에 정보 표시판, 광고탑, 계시판 또는 가전제품의 지시계 등에 광범위하게 이용된다. LED의 가장 큰 장점은 단색광으로서 다른 광원과 다르게 고속 펄스점등을 비롯하여 광량 조절이 가능하다는 것이다. 또한 LED는 수명이 길고, 현열 발생량과 장파복사의 방출량이 작기 때문에 식물생산의 인공광원으로 적합한 성질을 지니고 있다. 단색광의 특성을 갖는 LED의 광질에 의한 조직배양묘 또는 플러그묘 등의 초장 혹은 광형태형성 제어(김 등, 2001; 김과 박, 2001a, 2001b; Brown et al.; Dooly, 1991; Seabrook, 1987)는 금후의 주요 연구과제에 해당한다. 광질에 의한 식물의 광형태형성 제어는 미량의 광에너지로서 형태형성을 가능케할 수 있다는 점 때문에 주목을 받고 있다.

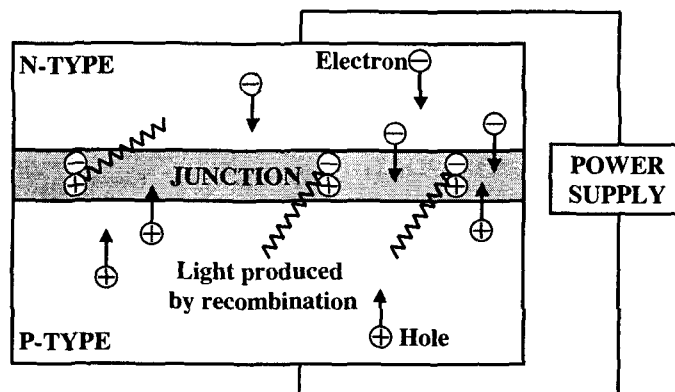


Fig. 9. Principles of light emitting in LED (김, 1999).

LED는 발광부의 온도를 낮게 유지하여 발광부로부터 장파복사의 방출을 억제할 수 있기 때문에 측방 광조사의 광원으로 유효하게 활용할 수 있다. 또한, LED는 각종 파장영역의 단색광(Fig. 10)을 방출하므로 보조광원으로 이용할 경우 광질 조절에 의한 식물의 광형태형성 제어가 가능하다. 표 2는 각종 LED의 종류와 특성을 나타낸 것이다.

은 등(2000)은 기내 종묘의 미세번식을 위한 인공광원으로서 LED의 응용 가능성을 탐색하고 광질이 배양묘의 성장과 광형태형성에 미치는 효과를 구명하고자 도라지를

대상으로 적색, 녹색, 청색의 단색광과 적색/청색의 혼합광으로 처리한 생장 결과를 대조구(형광등)의 경우와 비교 분석하였다. 적색광하에서는 배양묘의 줄기가 과도하게 신장되었으나, 청색광에서는 줄기 신장이 억제되는 것으로 나타났다(Fig. 11). 적색/청색의 혼합광 처리에서는 줄기 신장이 억제되고, 엽면적과 건물율이 증가하는 등 묘소질이 개선되어 건전묘 생산을 위해서 적색광의 단독 사용 대신에 적색광에 청색광을 혼합하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

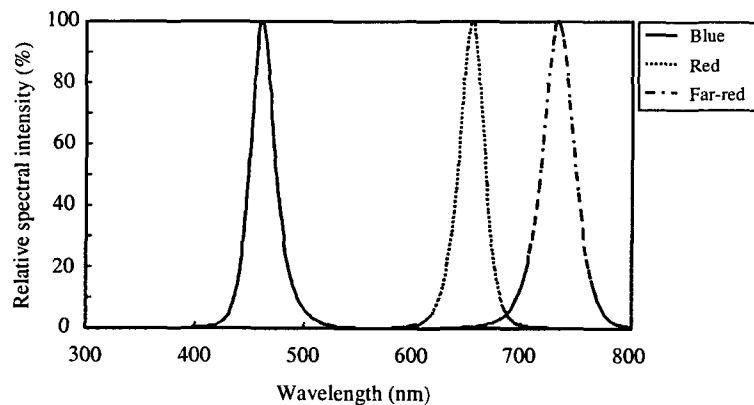


Fig. 10. Relative spectral intensity of blue, red and far-red LED (김 등, 2001).

Table 3. Spectral and photo-electric characteristics of light-emitting diode (太田垣, 1994).

색	파장 (nm)	광도 (mcd)	발광효율 (lm · W ⁻¹)	양자효율 (%)
赤	630	300	0.6~1.2	0.3~0.65
	660	5,000	3.6~5.3	9~20
綠	555	400	0.54~1.36	0.08~0.2
黃綠	565	300	1.8~4.5	0.3~0.7
黃	570	400		~0.5
青	450	1,000		
	490	10	0.042~0.14	0.03~0.1

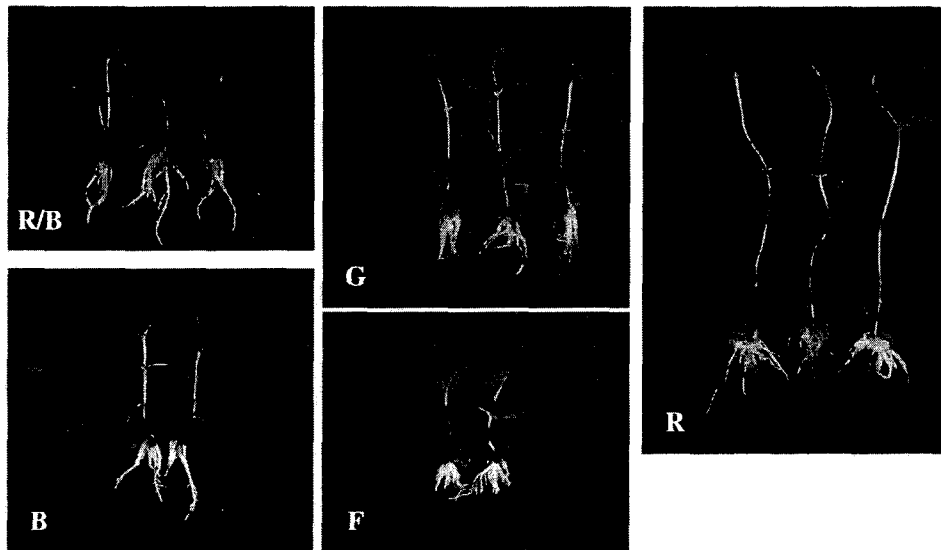


Fig. 11. 30-day-old *Platycodon grandiflorum* plantlets grown under fluorescent lamps(F), blue(B), green(G), red(R) and red/blue(R/B) LED (은 등, 2000).

LED를 인공광원으로 이용하는 식물생산 시스템에서 극복되어야 할 과제는 다음과 같다(渡邊, 2001). 첫째, LED의 식물의 광이용효율이 높은 재배시스템에서 LED의 출력차로 인한 작물의 생육 차이가 나타날 수 있다. 그러므로 식물생산 시스템의 생산능력 제고를 위해서 LED 출력의 균일화, 고출력 및 고휘도 등이 요구된다. 둘째, LED를 점등한 상태에서의 열화와 출력 저하가 극복되어야 한다. 특히 고습도 환경하에서 고출력으로 장시간 점등할 경우 출력 저하가 불가피하게 나타난다. LED의 수명은 칩의 재질, 구조, 램프의 성형수지 또는 방열구조 등에 따라 다르게 나타난다. 그러므로 LED의 내구성 향상을 위해서 사용 조건에 적합하도록 열화 방지 대책이 마련되어야 한다. 셋째, LED 칩의 발열에 따른 냉각이 요구된다. LED의 외부양자효율, 즉 전기에너지로부터 광에너지의 변환효율은 고휘도의 적색계에서 20~30%, 청색계에서 5~10%이며, 광변환되지 않은 전기에너지의 대부분은 LED 칩의 발열로서 소모된다. 넷째, LED의 높은 가격이다. 이로 말미암아 LED의 출력당 램프 비용이 고압나트륨램프, 메탈할라이드 램프 및 형광등에 비해서 매우 높은 편이다. 현재 적색광 LED는 국내에서 대량으로 생산되어 가격이 저렴하나, 청색광과 원적색광 LED는 수입되고 있는 실정이다. 향후 수요증가에 따라 LED의 가격은 내려갈 것으로 전망된다.

나. 레이저다이오드(laser diode, LD)

레이저(light amplification by stimulated emission of radiation, LASER)는 1917년 Einstein에 의해서 유도방출이 발견된 이래 다양한 재료를 이용하여 헬륨네온 레이저, 아르곤 이온 레이저, YAG 레이저, 이산화탄소 레이저, 엑시머 레이저, 반도체 레이저 등 여러 종류의 레이저가 개발되었다. 레이저는 사용 매체에 따라 고유의 발진 파장을 갖고 있다. 이 가운데 헬륨네온 레이저의 파장은 632.8nm로서 식물의 광합성유효파장 영역에 포함된다. 한편 아르곤 이온 레이저는 488nm와 514.5nm의 파장을 지니고 있어 식물재배용으로 광원으로서는 검토되었으나, 전기-광변환효율이 백열전구에 비해서 매우 낮기 때문에 식물재배용 광원으로는 부적합한 것으로 알려져 있다. 이제까지 발명된 레이저 가운데 전기-광변환효율이 우수하여 식물재배용 광원으로서 가능성이 있는 레이저는 사용되는 재료의 결정 조성을 선택하여 발진 파장을 식물의 광합성유효파장 영역에 적합하도록 만들어진 반도체 레이저뿐이다. LD는 반도체 레이저의 한 종류로서, 주로 제품의 바코드(bar code)를 인식하는 조명용이나, 콤팩트 디스크(compact disc, CD)의 정보기록 매체로서 사용되며 미니디스크(mini disc, MD), CR-ROM, 광통신 전달용, 복사기 또는 광학 프린터의 감광체에 사용된다.

LD의 장점은 LED와 마찬가지로 소형으로서 가볍고, 낮은 전압으로 구동되며, 수명이 100,000시간 이상으로 길다는 것이다. LD의 스펙트럼은 단색광으로서, LED 또는 각종 램프에 비해서 스펙트럼의 폭이 매우 좁은 특징을 지니고 있다. 한편 LD와 LED는 반도체 재료 또는 결정 조성에 따라 여러 가지 발광 파장을 나타내므로 식물의 광합성 또는 광형태형성에 필요한 파장을 만들 수 있다(Table 4).

Table 4. Spectral characteristics of laser diode (霜田, 1997).

재 료	파장 (nm)
GaN	440
Zn _x Cd _{1-x} Se	490~530
Ga _{1-x} Al _x As	650~840
In _x Ga _{1-x} Al _γ P _{1-γ}	660~690
GaAs	840
InP	910
In _x Ga _{1-x} As _γ P _{1-γ}	1,350~1,560
In _x Ga _{1-x} As	840~3,100
InAs	3,100
InSb	5,200
Pb _x Sn _{1-x} Te	6,500~32,000

더구나 LED 또는 LD와 같은 반도체 광원은 형광등, 고압나트륨램프와 다르게 장파복사를 방출시키지 않으므로 폐쇄형 식물생산 시스템에서의 냉방을 포함한 전력비 절감에 크게 기여할 것으로 판단된다. 최근 반도체 광원의 변환효율이 비약적으로 증가한 가운데 시작품으로 제작된 200mW급의 LD(파장 680nm)의 광변환효율은 35%로 나타났으며, 최대 효율은 60% 정도로 예상된다. LED와 마찬가지로 LD의 특징은 다른 램프와 다르게 고속 펄스점등을 포함하여 조광, 즉 광량 조절이 가능하다는 것이다.

土屋 등(1997)은 680nm 영역의 파장을 갖는 적색광 LD를 식물공장용 광원으로 사용하였다. $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 PPF에서 사라다나를 재배한 고압나트륨램프와 메탈할라이드램프하에서 재배된 대조구에 비해서 생육이 지연되고, 엽장이 크고 엽폭이 작아 가늘고 긴 엽형을 나타내었다. 엽면적, 생체중은 대조구와 비교할 때 작게 나타났다. 또한 엽색이 연하고 대부분의 개체에서 절간 신장이 이루어졌다. 이러한 결과는 사용된 LD가 단색광 광원으로서 식물생장에 필요한 청색광을 사용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 한편 청색광 형광등을 사용하여 혼합광을 조사한 결과 생체중의 증가와 정상적인 엽 형태가 이루어져 청색광의 조사 효과가 확인되었다.

다. 무전극방전램프(Electrodeless discharge lamp, EDL)

무전극방전램프는 점등 방식에 따라 여러 종류가 있으나, 장래의 식물공장용으로 기대되는 것으로서 마이크로파 램프(microwave lamp)가 있다. 본래 마이크로파 램프는 제판 분야에서 UV 경화용으로 사용되었으나, 봉입물의 변경으로 400~700nm의 가시광 영역에서 태양광과 유사한 분광에너지 분포를 갖게 되었다. 식물생장을 고려한 마이크로파 램프의 최대 특징은 전구로부터의 광합성유효복사(파장 400~700nm 범위의 복사) 출력이 높다는 것이다. 램프 입력 3.5kW용의 마이크로파 램프의 경우 전구로부터의 광합성유효복사는 1.7kW로서 전기 에너지 소비량의 약 50%가 광합성유효복사로 변환된다(Fig. 12).

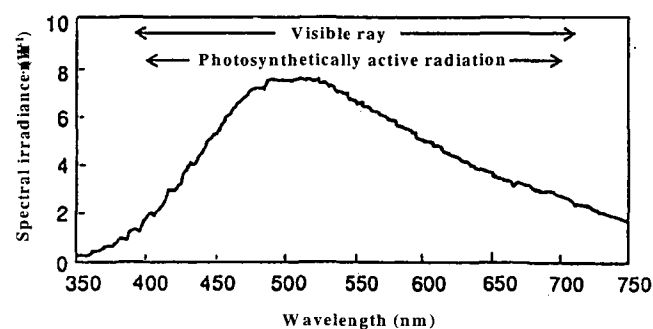


Fig. 12. Spectral characteristics of microwave lamp (古在와 北宅, 1993).

마이크로파 램프의 발광효율은 $130 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이며, 60,000h 정도의 수명을 갖고 있다. 이러한 램프에 적당한 광반사갹을 부착시키면 램프 아래의 수직방향으로 2m 떨어진 지점에서의 PPF는 $1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도에 이른다. 상기의 광량자속은 여름철의 청명일에 옥외수평면에서의 최대광합성유효광량자속에 이를 만큼 높은 값이다. 상기의 마이크로파 램프는 기존의 램프와 다른 특징을 갖고 있으므로 여러 분야에서 적용이 가능할 것이다. 특히 식물생산과 관련하여 고획도가 요구되는 growth chamber용 광원, 확산성 광섬유를 이용한 광조사 시스템용 광원, 온실의 보광용 광원, 식물공장용 광원 등으로서의 응용이 기대된다(古在와 北宅, 1993). 마이크로파 램프의 향후 과제로서 과대한 비용과 3,000~15,000h에 불과한 마그네틱의 짧은 수명을 들 수 있다.

라. 근접조명

근접조명은 광원과 상면 사이의 거리가 50~60cm 이내로 짧을지라도 인공광하에서 식물의 생장이 정상적으로 이루어질 수 있는 조명기술을 의미한다. 식물공장 또는 시설원예의 보광용 광원으로 사용되는 고압나트륨램프 또는 메탈할라이드램프는 형광등에 비해서 발광효율은 우수하나, 상면에서의 PPF 분포가 균일하지 않고 램프가 차지하는 공간이 크게 요구되어 식물생산 시스템의 근접조명용 광원으로는 부적합하다.

일반적으로 묘생산에 요구되는 광합성유효광량자속은 $200 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도이다. 김과 이(1998)는 식물공장의 근접조명용 인공광원으로서 형광등의 이용 가능성을 탐색한 결과 분광 특성과 광원으로부터의 수직거리에 따른 PPF 분포(Fig. 13)를 고려할 때 55W의 이중3과장 형광등이 묘생산을 위한 근접조명용 광원으로 적합함을 보고하였다. 한편, 인공광을 이용한 접목묘의 활착 촉진 또는 광독립영양배양(photoautotrophic culture)으로 증식되는 식물의 조직배양 단계에서 요구되는 PPF가 $50 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도임을 감안하면(Infante et al., 1989; Kirdmanee et al., 1995), 일반등, PG등 또는 이중3과장등 가운데 어느 것을 근접 조명용 광원으로 사용하여도 요구되는 PPF를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

형광등과 함께 LED도 근접조명용 광원으로 주목받고 있다. 청색, 녹색 및 적색광 LED로부터의 수직거리에 따른 PPF가 Fig. 14에 실려 있다(김, 1999). 적색광 LED로부터 18cm 떨어진 지점에서의 PPF는 약 $180 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서 묘생산에 요구되는 PPF에 도달하여 적색광 LED를 근접 조명용 인공광원으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 한편, 청색광 LED로부터 10cm 이상 떨어진 지점에서의 PPF는 $70 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도에 불과하여 보광용 광원으로 사용하는 것이 바람직할 것이므로 판단된다. 향후 고획도의 청색광 LED가 개발되면 묘생산 시스템에 청색광 LED의 적용이 가능할 것이다.

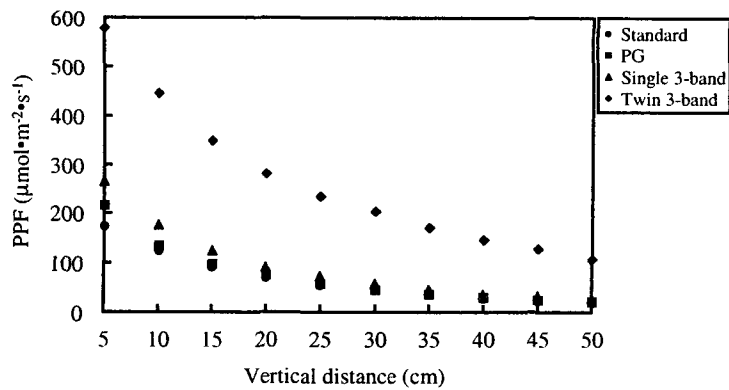


Fig. 13. Variation of photosynthetic photon flux density(PPF) affected by the vertical distance from the different fluorescent lamps as light source (김과 이, 1998).

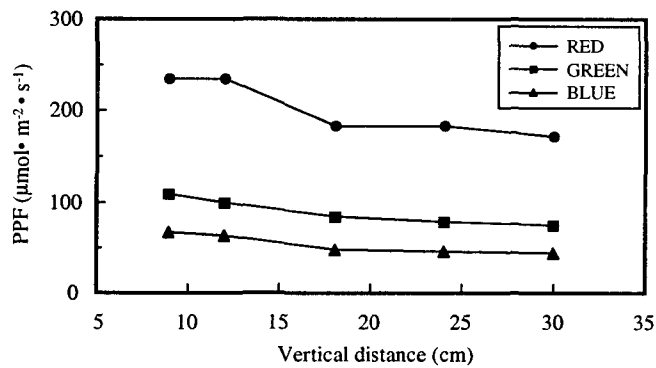


Fig. 14. Variation of photosynthetic photon flux(PPF) affected by the vertical distance from LED (김, 1999).

마. 초광각형 배광기구

인공광원의 조명효율을 향상시키려면 우선적으로 효율이 우수한 광원을 사용하여야 한다. 그런데 동일한 종류의 고압나트륨램프를 사용할지라도 입력전력에 따라 발광효율이 다르게 나타난다. 예를 들면 입력전력이 360W인 고압나트륨램프의 효율이 $139 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이나, 입력전력이 940W인 램프의 효율은 $157 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 에 이른다.

다음으로 배광형식에 따라 기구효율이 다르게 나타난다. 그러므로 조명기구로부터 복사되는 광의 이용율을 높이고자 재배면 이외로 복사되는 광을 최소화시킬 수 있는 초광각형 배광기구가 개발되었다. 초광각형 배광기구의 기본 조건은 다음과 같다(本多, 2000).

$$H/P_x \geq 3, \quad P_y = 2 P_x \quad (3)$$

여기에서 H: 기구의 높이, P_x : x축 방향으로 기구의 피치(pitch), P_y : y축 방향으로 기구의 피치이다.

태양광병용형 식물공장에서 360W 반사형 고압나트륨램프가 설치된 경우와 비교할 때 660W 초광각형 배광기구가 설치된 고압나트륨램프에서 약 30%의 조명비가 절감되었다. 향후 초광각형 배광기구의 가격을 낮추는 것이 과제에 해당한다.

바. 확산성 광섬유

정보 통신 등에 사용되는 광섬유는 섬유 표면으로부터의 광손실이 최소한으로 이루어지도록 구성되어 있으며, 멀리 떨어진 지점에 효과적으로 광을 전송하는 데 사용된다. 그런데 최근 식물재배용으로 광이 섬유 표면으로부터 확산되는 확산성 광섬유가 개발되었다(Kozai et al., 1992). 확산성 광섬유는 선광원 혹은 면광원으로서의 이용이 가능하다. 조직배양묘 생산에서 측방광조사 시스템의 배광재료로서 확산성 광섬유를 이용하면 형광등을 이용한 경우에 비해서 배양실내 공간을 효과적으로 이용할 수 있다(Fig. 15). 광섬유를 이용할 때 고출력은 물론 집광성이 우수한 소형의 광원이 요구된다. 마이크로파 램프는 상기의 요구 조건을 충족시킬 수 있는 광원으로 기대된다.

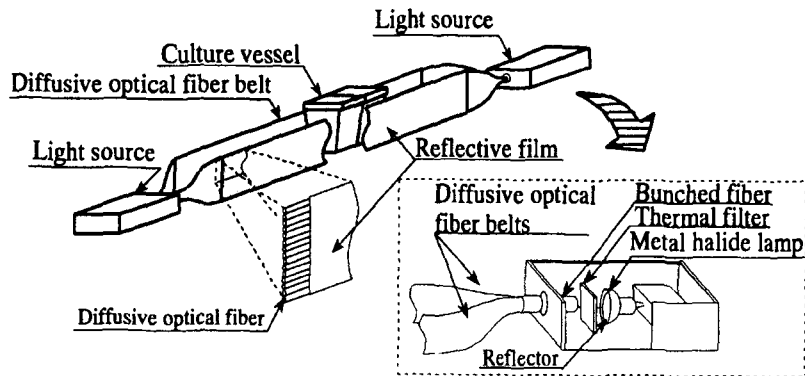


Fig. 15. Schematic diagram of the sideward lighting system using a pair of diffusive optical fiber belts for plant tissue culture (Kozai et al., 1992).

6. 근접조명을 이용한 폐쇄형 묘생산 시스템

가. 개방형 묘생산 시스템과 폐쇄형 묘생산 시스템

온실 또는 묘포장을 이용한 묘생산 시스템은 자연광을 이용하고 시스템 내부와 외부의 공기·물·열 등의 교환이 가능하므로 개방형묘생산 시스템(open system for transplant production)에 해당한다. 개방형 묘생산 시스템에서는 기상 조건이 수시로 변동하므로 상기의 묘소질을 구비한 묘를 안정적으로 생산하기가 곤란하다. 그러므로 묘의 상품화율이 비교적 낮다.

폐쇄형 묘생산 시스템(closed system for transplant production)은 고품질의 묘를 대량으로 생산하고자 자연광이 투과되지 않도록 단열재를 외벽재로 사용한 묘생산 시스템으로서 시스템 내부와 외부의 공기·물·열 등의 교환이 기본적으로 제한되며, 공기·물·열 등의 인위적인 제어가 가능한 공간을 활용한 묘생산 시스템을 의미한다. 이러한 시스템에서는 자연광의 이용이 불가능한 바, 녹색식물의 생장을 위한 인공광이 요구된다. 그러므로 폐쇄형 묘생산 시스템은 인공광형 묘생산 시스템(transplant production system using artificial lighting)에 해당한다(Kozai et al., 2000).

폐쇄형 묘생산 시스템에서 묘를 생산하는 목적은 제어된 환경하에서 우량묘를 생산하고, 정식 후 재배기간 동안 인위적 에너지와 자원의 사용량을 가능한 한 경감시키는 데 있다. 식물묘의 대량 생산 과정에 투입되는 자원과 에너지를 절감하고, 생력화하여 생산비를 낮추려면 기존의 개방형 묘생산 시스템 대신에 묘소질 향상에 크게 기여할 수 있는 혁신적인 묘생산 시스템의 개발이 바람직하다. 묘생산에 필요한 광량은 $200\sim 350\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로서 재배에 비해서 상대적으로 낮고, 육묘기간이 2~4주 정도로 짧으며, 묘의 재식밀도가 높고, 재배에 비해서 소비전력이 작으며, 조명과 냉방설비의 용량이 작기 때문에 근접조명용 광원으로서 형광등을 이용한 폐쇄형 묘생산 시스템의 상업화 가능성은 매우 높은 편이다(김과 이, 1998).

나. 폐쇄형 묘생산 시스템의 개발

공장화된 묘생산 시스템을 개발하고자 인공광하에서 플러그묘, 접목묘 및 조직배양묘 생산을 시도한 김(2000)은 인공광을 이용한 접목묘 활착촉진 시스템의 개발에 이어서 최근에는 오이 플러그묘와 조직배양에 의한 감자 배양묘 생산에 적용하기 위한 식물공장형 묘생산 시스템을 개발하였다(김과 박, 2002). 품종에 따라 차이가 있으나 고온·장일 조건에서 오이 플러그묘를 생산할 때 도장되거나 정식 후 암꽃 착생절위가 높아지며 암꽃 착생율이 떨어지는 등 묘소질의 저하가 우려되는데 특히 이러한 현상은 청장계 오이 품종에서 문제가 된다. 오이묘의 첫암꽃 착생절위에 미치는 광주기(18/6h, 12/12h, 9/15h, 6/18h)와 PPF(200, 300, 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)의 효과(Fig. 16)

를 검토한 결과 명기가 짧을수록 착생절위가 낮아지면서 광주기의 영향이 PPF에 비해서 분명하게 나타났다(김 등, 2001).

Kim et al.(2002a, 2002b, 2002c)은 식물공장형 묘생산 시스템에서 조직배양된 감자 소식물체를 이용하여 묘소질이 우수한 감자플러그묘를 생산하는 기술을 제시하였다(Fig. 17). 감자플러그묘의 생산 기술에는 배양소식물체를 이용한 모주(stock plant)의 적정 순화 및 증식 방법, 삽수(cuttings)의 증식 방법, 삽수로부터 감자 플러그묘의 생산 방법, 묘생산에 투입되는 에너지와 자원의 절감 방법 등이 포함된다.

인공광하에서 배양묘를 사용하여 플러그묘를 생산할 때 플러그묘 개체군내의 미기상 요소, 즉 기온, 상대습도, 포차, CO₂ 농도 등은 개체군 외부의 기류속도의 영향을 크게 받는다. 그러므로 김과 古在(1996a, 1996b, 1996c)는 인공광을 이용한 플러그묘 생산용 풍동을 제작하여 기류속도가 플러그묘 개체군의 미기상 분포에 미치는 영향을 구명하였고, 풍동을 이용한 묘개체군의 증발산속도 계측 시스템을 구성하였다(김과 박, 2000). 풍동 내에서 기류의 진행 방향을 따라 기온과 상대습도는 증가되고 포차와 CO₂ 농도가 감소하였으며, 0.3~0.9 m s⁻¹의 범위에서 기류속도가 증가할 때 공기의 확산계수가 증가함을 보고한 바 있다. 또한 상기와 같은 플러그묘 개체군내의 미기상 요소는 묘의 성장과 형태형성에 영향을 미친다. 즉 기류속도와 CO₂ 농도를 제어한 결과 기류의 진행방향을 따라 경경(stem diameter)이 감소하여 경경에 대한 경장의 비율이 높게 나타났으며, 엽면적이 증가하였다(김, 1998; 김과 송, 1999). 한편, 기류의 진행방향을 따라 플러그묘 개체군의 순광합성속도는 감소하였다(김과 古在, 1997). 상기의 결과를 종합하면 플러그묘 개체군 내외의 미기상 요소가 묘소질에 상당한 영향을 미치는 것으로 예상되나, 이에 대한 정량적인 결과가 제시되지 않고 있다. 그러므로 묘소질이 균일한 플러그묘의 생산을 위해서 인공광하에서 적절한 미기상 요소의 제어 방법과 이에 따른 묘소질의 평가 방법이 개발되어야 한다.

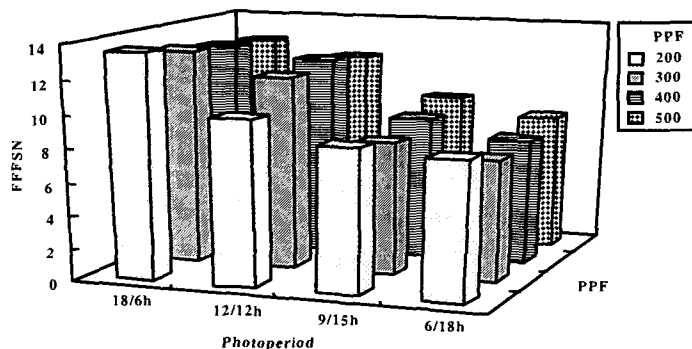


Fig. 16. First female flower setting node(FFSN) of cucumber as affected by photoperiod and photosynthetic photon flux(PPF) (김 등, 2001).

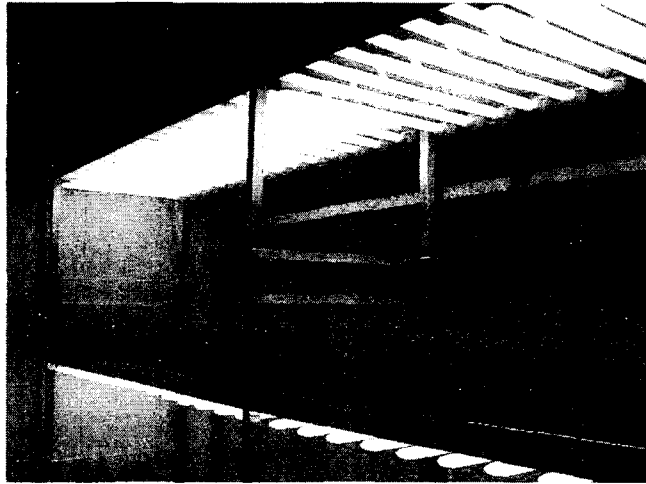


Fig. 17. Production of potato plug seedlings in closed transplant production System (Kim et al., 2002a, 2002c).

7. 결론

본고에서는 인공광원의 종류와 특성을 살펴보고, 식물생산 시스템에 적용 가능한 광조절 기술과 개발 방향을 검토하였다. 조명 시스템과 광원으로부터의 발열에 따른 냉방장치의 설치가 필수적인 폐쇄형 식물생산 시스템에서 소비전력의 경감을 위해서 인공광원의 효율 향상, 수명 연장 및 비용 절감을 도모하고, 장파복사의 방출을 작게 하여야 한다. 이 가운데 식물생산 시스템의 경제성을 향상시키고자 고효율 고압나트륨 램프가 개발되고 있다. 또한 형광등 또는 LED와 LD의 반도체 광원을 이용한 근접조명, 확산성 광섬유를 이용한 측방 광조사, 초광각형 배광기구 등 여러 가지 조명 방법과 기구가 개발되고 있어 향후 식물공장의 조명시스템에 적용될 것으로 전망된다.

아울러 인공광원으로 형광등을 이용한 폐쇄형 식물생산 시스템에서 근접조명에 의한 식물묘의 생산 가능성을 제시하였다. 향후 식물생산 시스템의 공장화 또는 묘소질이 균일한 우량묘 대량생산 시스템을 개발하고자 할 때 광환경 조절에 의한 식물의 생장 제어 및 광형태형성 제어기술의 확립이 더욱 요구될 것으로 전망된다. 특히 광강도, 광질, 광조사 방향, 광주기의 조절과 식물묘 개체군 내외의 미기상 제어는 균일한 묘소질을 갖춘 우량 식물묘의 생산에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김용현. 2000. 인공광을 이용한 접목묘 활착촉진 시스템의 시작품 설계 -활착촉진 시스템내의 기온과 상대습도 분포에 미치는 기류속도의 효과-. 한국농업기계학회지 25(3):213-220.
2. 김용현. 1999. 인공광원으로 발광다이오드를 이용한 묘생산 시스템에서 식물생장 및 형태형성 제어 -발광다이오드의 분광 특성 및 광강도-. 한국농업기계학회지 24(2):115-122.
3. 김용현. 1998. 인공광하의 풍동내에서 기류속도가 가지 플러그묘의 생장에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 7(1):9-14.
4. 김용현, 박현수. 2002. 오이 플러그묘의 생장에 미치는 광주기와 광합성유효광량자속의 영향. 생물환경조절학회지 11(1):40-44.
5. 김용현, 박현수. 2001a. 적색광에 대한 청색광의 부가 조사가 접목묘의 증발산과 활착에 미치는 영향. 한국생물환경조절학회 학술발표 논문집 10(1):34-38.
6. 김용현, 박현수. 2001b. 청색, 적색 및 원적색광 조사하에서 접목묘의 활착 특성. 한국농업기계학회 학술대회 논문집 6(1):167-172.
7. 김용현, 박현수. 2000. 인공광하에서 접목묘의 증발산속도 계측. 한국농업기계학회 학술대회 논문집 5(1):228-233.
8. 김용현, 박현수, 이지원, 유영미. 2001. 광주기와 광합성유효광량자속이 오이의 생장과 첫 압꽃 착생 절위에 미치는 영향. 원예과학기술지 19(別I):37.
9. 김용현, 송대빈. 1999. 인공광하에서 CO₂ 농도와 기류속도 제어가 플러그묘의 생육에 미치는 효과. 생물환경조절학회지 8(4):275-280.
10. 김용현, 은중선, 김영선. 2001. 기내 배양종묘의 미세번식을 위한 인공광원으로서 발광다이오드의 응용. 한국농업기계학회 학술대회 논문집 6(1):161-166.
11. 김용현, 이종호. 1998. 식물묘공장의 근접조명용 인공광원으로서 형광등의 광강도 및 분광특성. 한국농업기계학회지 23(6):591-598.
12. 김용현, 古在豊樹. 1997. 플러그묘 개체군의 순광합성속도 측정. 한국농업기계학회지 22(3):311-316.
13. 김용현, 古在豊樹. 1996a. 인공광하의 공정육묘용 풍동 설계 및 공정묘 개체군상의 공기역학적 특성. 한국농업기계학회지 21(4):429-435.
14. 김용현, 古在豊樹. 1996b. 인공광하에서 공정묘 개체군상의 공기역학적 저항 및 확산계수. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):152-159.
15. 김용현, 古在豊樹. 1996c. 기류속도가 인공광하에서 공정육묘 개체군의 미기상에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):160-166.
16. 은중선, 김영선, 김용현. 2000. 도라지 배양묘의 생장 및 형태형성에 미치는 발광다이오드의 효과. 한국식물조직배양학회지 27(1):71-75.

17. Appelgren, M. 1991. Effects of light on stem elongation of *Pelargonium in vitro*. *Scientia Horticulturae* 45:345-351.
18. Borthwick, H.A., S.B. Hendricks, and M.W. Parker. 1952. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 38:929-934.
19. 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.
20. Chamovitz, D.A., N. Wei, M.T. Osterlund, A.G. von Amin, J.M. Staub, M. Matsui, and X.W. Deng. 1996. The COP9 complex, a novel multisubunit nuclear regulator involved in light control of a plant development switch. *Cell* 86:115-121.
21. Dooly, J.H. 1991. Influence of lighting spectra on plant tissue culture. ASAE Paper No. 917530.
22. Hayashi, M., N. Fujita, Y. Kitaya, and T. Kozai. 1992. Effect of sideward lighting on the growth of potato plantlets *in vitro*. *Acta Hort.* 319:163-166.
23. Infante, R., E. Magnanini, and B. Righetti. 1989. The role of light and CO₂ in optimizing the conditions for shoot proliferation of *Actinida deliciosa in vitro*. *Physiol. Plant.* 77:191-195.
24. Kim, Y.H, J.K Kim, S.H Lee, Y.H Choi, M.G. Lee, H.J. Kim, J.W. Lee, and H.D. Suh. 2002a. Production of high quality potato transplants in closed transplant production factory. Conference of the Korean Society for Horticultural Science. May 24-25, 2002, Gyeongsang National University, Jinju, Korea.
25. Kim, Y.H, J.K Kim, S.H Lee, Y.H Choi, M.G. Lee, H.J. Kim, and J.W. Lee. 2002b. Evapotranspiration and Growth Characteristics of Potato Plantlets cultured *in vitro* for Stock Plants. Conference of the Korean Society for Horticultural Science. May 24-25, 2002, Gyeongsang National University, Jinju, Korea.
26. Kim, Y.H, S.H Lee, J.K Kim, M.G. Lee, Y.H Choi, H.J. Kim, J.W. Lee, H.D. Suh, and D.M. Park. 2002c. Growth of Potato Plug Seedlings as Affected by Photosynthetic Photon Flux. Conference of the Korean Society for Horticultural Science. May 24-25, 2002, Gyeongsang National University, Jinju, Korea.
27. 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.
28. Kozai, T., C. Kubota, C. Chun, K. Ohyama and F. Afreen. 2000. Necessity and concept of the closed transplant production system. International Symposium on Transplant Production in Closed System for Solving the Global Issues on Environmental Conservation, Food, Resources and Energy. Feb. 28 - Mar. 3, 2000,

Chiba University, Japan.

29. Kozai, T., S. Kino, B.R. Jeong, M. Hayashi, M. Kinowaki, M. Ochiai, and K. Mori. 1992. A sideward lighting system using diffusive optical fibers for production of vigorous micropropagated plantlets. *Acta Hort.* 319:237-242.
30. Murakami, K., H. Shibata, and I. Aiga. 1992. Fundamentals studies on the development of new fluorescent lamps for plant growth. *Acta Hort.* 319:329-334.
31. Osterlund, M.T., L.H. Ang, and X.W. Deng. 1999. The role of COP1 in repression of *Arabidopsis* photomorphogenic development. *Trends in Cell Biology* 9:113-118.
32. Seabrook, J.E.A. 1987. Changing the growth and morphology of potato plantlets *in vitro* by varying the illumination source. *Acta Hort.* 212:401-410.
33. Thomas, B. and D. Vince-Prue. 1997. *Photoperiodism in plants*. Academic Press. pp. 63-84.
34. 相賀一郎, 村上克介, 崔海信, 清田 信. 1994. 光對植物生理, 生態反應. SHITA Report No. 8:24-34.
35. 本多二郎. 2000. 高效率高壓ナトリウムランプ及び超廣角形配光器具の開発. SHITA Report No. 16:46-54.
36. 池田 彰, 中山繁樹, 北宅善昭, 失吹萬壽. 1988. 植物工場における物質生産の基礎的研究 (I) サラダナの光合成と日長, 光強度およびCO₂濃度の關係. *生物環境調節* 26:107-112.
37. 古在豊樹, 北宅善昭. 1993. マイクロ波ランプとその植物育成用人工光源への利用. *農業および園藝* 68(9):988-996.
38. 日本照明學會. 1992. 光バイオインダオリ-. オーム社 p.12-18.
39. 太田垣芳男. 1994. 人工光源・照明器具の種類とその特性 SHITA Report No. 8:35-43.
40. 霜田光一. 1997. 光學のすすめ12・レーザー光の實際. *OPTRONICS* 1:238-240.
41. 鈴木義則, 江頭 仁, 原田美智子. 1994. 紫外線照射苗の生育特性と環境反應. 日本農業氣象學會 1994年度大會・日本生物環境調節學會第32回集會合同大會講演要旨集 pp. 92-93.
42. 土屋廣司, 山崎 文, 宮島博文, 本間孝宜, 菅 博文. 1997. 植物工場へのレーザー光の利用. SHITA Report No. 13:17-29.
43. 渡邊博之. 2001. LED光源とした野菜工場. SHITA Report No. 17:13-22.