

최 중
연구보고서

원예식물의 생장 및 광형태형성에 미치는
LED의 효과

Effect of Light Emitting Diodes(LED) on the
Growth and Photomorphogenesis in
Horticultural Plants

연구 기관
충북대학교 첨단원예기술개발연구센터

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “원예식물의 생장 및 광형태형성에 미치는 영향” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003 년 7 월 13 일

주관연구기관명 : 충북대학교
총괄연구책임자 : 백 기 엽
세부연구책임자 : 백 기 엽
연 구 원 : 허 정 욱
연 구 원 : 박 승 수
연 구 원 : 이 춘 우
연 구 원 : N.T.Thanh
연 구 원 : 전 민 화
연 구 원 : 박 혜 진

요 약 문

I. 제 목

원예식물의 생장 및 광형태형성에 미치는 LED의 효과

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근, 고획도화 및 저가격화 등에 따라 일반화되고 있는 발광다이오드 (LED: Light-Emitting Diode: 발광다이오드, 이하, LED) 가 새로운 식물 재배용 인공광원으로 주목을 받고 있다. 그 이유는 LED 가 종래의 인공광원에 비하여 다음과 같은 장점을 가지고 있기 때문이다. (1) 식물의 광합성 및 생장에 필요한 파장역 만을 갖는 단색광이다. (2) 소형으로 판넬화가 가능하여 Growth Chamber (생장상실) 와 같이 비교적 좁은 공간에서도 활용할 수 있다. (3) 전력 소모량이 적다 (기존광원의 절반). (4) 열선을 방사하지 않는다. (5) 수명이 반영구적이다. (6) 특정 파장역만을 갖는 광질선택이 가능하다.

현재, 식물체의 광형태형성 및 색소합성 등에 미치는 LED 의 효과에 대한 연구가 서서히 진행되고 있는데 그 예로서, 상치, 오이 및 시금치의 실생묘와 일부 배양소식물체에 있어서 LED 광조사로 기존의 인공광원과 거의 동등한 생장을 얻었다는 연구 결과가 보고되고 있다. 그러나, 이러한 연구보고에서는 광여과 필름에 의한 Red 나 Far-red 의 광비율 조절 등으로 식물체의 생장을 광질과 관련된 생리적 측면고찰이 대부분인데 그 이유로는 LED 의 단가가 매우 높고 (Red: 약 1,000 원, Blue: 약 5,000 원, Far-red: 약 2,500-3,000 원, Green: 약 5,000 원; 칩 한개당의 국내시판가격) 식물체의 광형태형성에 영향을 미치는 Blue LED 의 개발이 늦어졌다는 사실 등을 들 수 있다.

한편, Plug 육묘에서 Plug 묘의 품질에 결정적인 영향을 미치는 요인으로 건전묘 생산의 중요한 포인트가 되는 것이 절간의 길이를 조절하는 것이다. 지금까지는 절간의 길이를 짧게 하고 초장을 억제하기 위한 방법으로 주야간 온도차를 이용하는 DIF (주야간온도차) 기술, 생장억제제 처리 및 물리적 자극 등과 같은 방법 등을 이용하는 연구가 진행되고 있다. 현재, 우리 나라의 Plug 육묘기술은 아직 확립된 상태가 아니기 때문에 양질 Plug 묘의 안정공급이 어려운 실정으로, 양질의 Plug 묘를 생산하기 위한 새로운 시도로 광형태형성에 유효한 LED 의 특정광질을 이용한 육묘기술을 보

급시킬 필요가 있다. Plug 육묘시 LED 광조사에 의해 식물체의 성장 및 형태를 조절할 수 있다면, 정식후의 인위적인 광질조절에 의한 묘관리가 가능하게 되어 분화류의 초장조절 및 품질유지 효과도 기대된다.

금후 미래형 묘생산시설로 온도 및 습도 등 재배환경을 조절할 수 있는 성장상실을 이용한 Plug 묘생산 시스템인 “밀폐형의 인공광 이용형 식물공장”이 대두되고 있다. 기존에 식물공장의 광원으로 이용되고 있던 인공광원을 최대한으로 이용하면서 보다 우량한 묘를 생산하기 위해서는 LED 와 기존광원을 접목시킬 필요가 있다. 기존의 광원이 포함하고 있지 않는 파장역을 LED 로 보충하여 식물체의 광이용효율을 향상시킬 수 있게 된다.

기내 배양소식물체나 Plug 묘의 생산 및 공급의 균형이 맞지 않아 공급이 수요를 앞설 경우에는 생산된 묘의 저장이 필요하게 된다. 일반적으로 묘의 저장은 일시적으로 묘의 성장을 정지시킬 목적으로, 저온암흑 조건을 유지하는 밀폐된 환경 (예를 들어, Chamber) 내에서 이루어진다. 그러나 최근 들어 저장후 묘의 성장 및 품질향상을 위해서는 묘의 광합성 속도와 호흡속도를 일정하게 유지시키는 저온 약광조건하에서 저장성이 향상된다는 연구결과들이 보고되고 있다. 한편, 다른 광질과 비교하여 Green LED 는 광질의 특성상 식물군락에의 광반사율과 투과율이 매우 높기 때문에 Plug 묘와 같은 식물군락이 밀집된 집단에서 광원으로서의 이용가능성이 기대된다. Green LED 를 광원으로 하여 묘의 이산화탄소 교환속도를 0으로 (광합성 속도 = 호흡속도) 하는 광강도를 파악한다면 묘의 저장성을 향상시키고 정식후의 묘의 성장을 촉진시킬 수 있다고 사료된다.

본 연구에서는 LED를 이용하여 여러 가지 원예식물의 성장과 광형태형성을 조절할 수 있는 가능성을 구명하고, 이들 새로운 광원의 상업적 활용가능성과 상품화를 확립하기 위해 실시하였다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

1. 기내식물의 성장 및 광형태형성에 대한 LED 효과 규명

· 국화, 감자 등 기내 배양소식물체의 성장, 광합성 및 광형태형성을 위한 광원으로 먼저 Blue, Red 등의 LED 단색광을 조사하여 단색광이 배양소식물체에 미치는 영향을 파악한다.

· 그 다음 단계로 각각의 단색 LED 의 특성을 최대한으로 하는 LED 간의 혼합광 실험과, 형광등과의 혼합광 실험으로 기존의 인공광원과 접목하여 배양소식물체의 성장 및 광

합성을 최대한으로 하는 혼합광 형태를 도출한다.

2. Plug 묘의 품질향상을 위한 혼합광의 효과 규명

- 제 1 단계 과제로 LED 단색광 조사만으로도 초화류가 영양생장 및 생식생장을 하는가의 여부를 검토한다.
- 또한, 제 1 단계 실험에서 각각의 단색 LED 의 특성을 파악하여 LED 간의 혼합광 실험과 성장상실에 장착되어 있는 광원과의 혼합광 실험을 수행하여, Plug 묘의 품질 향상 (특히, 초장조절) 을 꾀할 수 있는 광질 및 혼합광 형태를 결정한다.

3. Plug 묘 저장에 있어서 LED 광조사 효과 규명

- 소비자의 수요에 맞는 안정된 plug 묘 공급을 위하여 필수적인 저장에 있어서 LED 를 광원으로 하는 저온저장에 대한 연구가 수행되고 있다.
- Green LED 는 다른 광질에 비하여 식물잎에의 투과율 및 반사율이 높아서 plug 묘 개체군 하위엽의 수광량을 높일 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 식물군락이 발달한 plug 묘 등에서의 광조사에 매우 유리하다.
- 한편 묘저장은 주로 암흑, 저온 조건하에서 실행되고 있으나 저장묘의 품질과 저장 후의 묘의 생장을 고려하여 저온, 약광조사조건 하에서의 저장이 암흑에서 보다 저장 후의 묘의 생장에 유효하다는 사실이 증명되고 있다.
- 그러므로 본 과제에서는 저온조건 하에서 Green LED 조사로 plug 묘의 저장성 향상에 미치는 영향을 이해하고 초화류의 저온약광 하에서의 묘저장에 대한 실험결과로부터 저장성을 향상시키기 위한 최적의 광강도를 결정한다.

4. 분화식물의 개화조절 및 초장조절 효과 규명

- 온실에서 재배되고 있는 아게라텀, 메리골드 등의 초화류를 중심으로 장일 또는 단일상태에서 일출 및 일몰시간대의 단시간 LED 조사로 분화식물의 개화 및 초장에 미치는 영향을 검토한다.
- 본 과제는 일출 및 일몰시에 단시간 동안, 식물이 필요로 하는 단일 파장역의 LED 광조사로 자연광의 보조광원으로서 LED 이용가능성을 타진한다.
- 식물의 일장조건과 관계없이 일출 및 일몰시간의 광조사에 의해 분화식물의 개화시기나 초장을 조절할 수 있는 최적의 광질 및 광조사 시간을 파악한다.

5. 절화의 품질 및 수명연장에 있어서의 효과 규명

- 국내 · 외적으로 수요가 높은 장미, 국화, 카네이션 등의 절화식물에 있어서는 절화 수확 후, 판매시 및 구매 후의 수명연장 및 품질보전에 있어 목굽음 현상, 개화시간이 짧다는 등의 문제를 안고 있다.
- 본 과제에서는 구매후 실내조건 및 판매전 저장조건 하에서의 LED 조사가 절화 수명 및 품질에 미치는 영향을 규명한다.
- 연구결과에 따라, 최적의 광질 및 광강도가 결정되면 실내 및 판매점에서 수명연장 및 품질을 위하여 손쉽게 광강도를 조절할 수 있는, 단일의 광질을 갖는 LED 스텐드를 제작하여 LED의 실용화 및 일반화를 도모한다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

LED를 사용하여 메리골드 및 살비아의 개화반응은 혼합광질에 따른 영향이 없는 것으로 나타났으며 아게라툼의 경우에는 FLFr구에 비해 FLB구 및 FLR구에 있어서 개화수가 증가하였다. 특히, 메리골드의 개화는 형광등과 원적색광이 혼합된 FLFr구에서 억제되었으며, 아게라툼과 살비아 실험묘는 혼합광질의 영향이 없이 모든 처리구에서 개화반응을 나타냈다. 형광등과 적색, 청색 및 원적색 발광다이오드와의 혼합광 조사구에서의 개화기간은 대조구인 형광등 조사구에 비해 6일 연장되었으며 기공발달 또한 형광등 조사구에 비해 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

메리골드의 기공수는 FLFr구에서 가장 많았으며 단일광 조사구보다는 형광등과 발광다이오드를 혼합하여 조사한 혼합광 처리구에서 기공수가 현저히 증가하는 경향을 나타냈다. 살비아 실험묘에 있어서 기공의 크기는 다른 처리구에 비해 단일의 청색광 조사구에서 증가하였으나, 메리골드의 기공크기는 청색 광질의 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 광질이 식물체 줄기나 잎의 해부학적인 변화에 미치는 영향에 대한 연구결과로는 하배축 신장에 있어서 청색광의 직접적이거나 간접적인 영향, 효소의 합성과 조절, 기공열림, 엽록체 변이 및 광형태형성에 관한 것들이 보고되고 있으나, 기공발달과 관련된 직접적인 관계에 대한 연구결과는 거의 없다. 본 연구결과 기공발달에 있어서 청색광 수용체뿐만 아니라 phytochrome의 매개가 필요한 것으로 판단되었다.

아게라툼, 메리골드 및 살비아 실험묘의 당 및 전분함량의 변화를 측정해 본 결과 전분 축적은 대조구 및 BR구에 비해 BFr구 및 RFr구에서 현저하였다. 실험종료일에

있어서 청색광 적색의 혼합광질은 아게라툼과 살비아 식물체내 전분축적에 효과적인 광질이었으며, 메리골드의 경우, 전분함량은 RFr구에서 최대로 나타났다. 또한, 실험개시 21-28일에 있어서 아게라툼의 환원당은 청색과 적색의 혼합광 조사구에서 최대에 달하였다.

단일조건하에서 1일당 적색광 조사시간을 연장하는 것은 식물체의 개화기간을 연장하는 데에 효과적이며, 보광시간과 관계없이 청색광을 보광하는 것은 자연광구에 비해 개화기간을 연장하는데에 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 장일식물에 있어서 개화에 필요한 작용스펙트럼은 적색광으로 적색광의 효과는 원적색광에 의해 반전된다는 연구결과가 있는데, 이것은 phytochrome의 중개에 의한 것으로 생각된다. 메리골드와 살비아 실생묘의 경우, phytochrome활성은 1일 60분간의 적색광 조사에 의해 유지되었던 것으로 생각되며 이에 의해 자연광구에 비해 개화기간 또한 연장된 것으로 생각된다.

아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 성장초기 단계에 발광다이오드에 의해 제공된 청색, 적색 및 혼합광은 식물체의 성장뿐만 아니라 식물체의 순광합성속도 및 식물체의 에틸렌 생합성에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 수 종의 원예식물의 광합성능과 에틸렌 생합성에 있어서 광질이 미치는 영향에 대한 상세한 검토가 필요하며 phytochrome 및 cryptochrome과 같은 광수용체와의 상호작용에 대한 연구가 절실히 필요하다고 생각된다.

분화용으로 LED의 이용가능성 구명을 위해 시클라멘 'Dixie White'의 개화기간에 광질 및 명기시간이 통계적으로 유의한 영향을 미친다는 것으로 알 수 있었으며 단일 조건 하에서 적색광과 적색과 청색의 혼합광은 기존의 형광등 조사에 비해 시클라멘의 개화반응을 현저히 촉진한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 본 연구를 통하여 식물체의 상업적 생산에 있어서 발광다이오드와 같은 인공광원을 이용함으로써 광질 및 명기시간을 조절하여 식물체의 성장 및 개화를 촉진할 수 있는 가능성이 검토되었다.

관엽식물에 있어서 LED의 이용가능성을 구명한 결과, 온실조건하에서 발광다이오드를 이용한 보광장치에 의해 제공된 청색, 적색 및 혼합광질은 관엽 디펜바키아와 피커스 식물체의 다양한 성장 및 발달과정에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그러나 식물체의 제2차 대사과정, 잎발달, 색소형성이나 광합성능에 관한 생리학적 측면에서의 특성이 그 밖의 다른 식물종과는 매우 상이하다는 것을 알 수 있었다. 본 실험 결과, 발광다이오드를 이용함으로써 겨울철이나, 장미기간 등, 광강도나 특정파장의 광질특성을 향상시킬 수 있으며, 온실에서 고품질 분화생산에 있어서의 이용가능성이 검토되었다.

절화수명 연장 효과를 본 결과 적색광은 절화장미와 절화 카네이션의 수명이나 화편전개

에 영향을 미치는 광질이라는 것을 알 수 있었으나, 절화기간 동안에 적색광을 광원으로 하는 상업적인 이용가능성을 완전히 설명하기는 아직 불분명한 점이 많이 남아있다. 왜냐하면 절화수명과 품질에 있어서 적색광이나 청색광등 광질의 영향에 대한 연구보고가 매우 적기 때문이다. 다만, 본 실험조건에서, 발광다이오드에 의한 고광강도의 적색광 조사에 의해 절화장미의 꽃목굽음 현상이 다른 실험구에 비해 현저히 감소하였으며 화편진개에 유효한 것을 알 수 있었다. 앞으로 적색광이나 형광등과 적색광의 혼합광 조사에 의한 그 밖의 다른 종의 절화류의 수명 및 품질에 미치는 영향에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

고구마 배양소식물체의 건물중 증가, 엽면적 확대, 초장신장, 식물체내 전분농도 및 당농도 변화 등의 생장 및 형태형성에 있어서 광질이 유의한 영향을 미치는 것을 알 수 있었으나, 종래의 연속광조사 및 본 실험에서 설정된 간헐적인 광조사에 의한 영향은 없는 것으로 나타나, 종래의 16시간 명기 및 8시간 암기조절과 같은 광조사 시간 및 방법의 이용에 대한 재인식이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 앞으로 배양기내에서 식물체를 대량생산 할 경우, 종래의 16시간 명기 및 8시간 암기조절방법보다 생장 및 형태형성에 있어서 발광다이오드를 이용한 간헐조사 및 명기시간 단축 등의 광이용 효율을 증가시키기 위한 명기시간의 조절에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

활용방안에 대한 건의사항으로는,

- 원예식물의 조직배양과 재배시 LED의 이용

- 실험결과를 토대로 조직배양시 특수 파장의 LED가 효과적일 경우 전력비가 형광등에 비해 매우 저렴하고, 반영구적이기 때문에 이용가능성이 매우 높을 것으로 생각되고 이를 상업화할 수 있는 기계적 제작을 참여 기업체를 통하여 기술 이전하고 실용과 하고자 함.
- Plug 육묘시 가장 문제가 되는 도장문제를 해결하기 위해서 외국에서 실험적으로 적용해오고 있는 일출, 일몰시 LED 광원의 Pulse 처리효과를 구명하여 효과가 있을 경우 실험적으로 생산현장에 적용하여 실용화 할 수 있는 방안을 강구하는 것이 필요하다고 생각된다.

- 대학 및 연구소의 실험기기용 LED 패널제작 및 공급

- 현재까지 국내에서 LED 패널은 참여기업체인 좋은 인상에서 실험적으로 제작하여 공급하고 있는 실정임. 일본에서 수입한 LED는 규모에 따라 차이가 있으나 Control box를 포함할 경우 최소 실험용 패널을 구입하더라도 2,000만원 이상 고가이나 국내에서 실험과정을 거쳐 제작할 경우 절반수준으로 가격을 낮출 수 있

을 것으로 예상됨.

특히 광질이나 광도에 의한 광형태형성, 광에 의한 종자발아 조절 등에 미치는 LED의 효과를 감안한다면 실용화한 LED 시스템의 수요가 매우 높을 것으로 기대되며, 참여 기업체도 이에 대한 경제성을 고려하여 연구에 참여하였으며 실용화 시켰음.

SUMMARY

The protocol and methodology for utilization of LEDs as an alternative lighting source for the growth and morphogenesis for commercial plant production of several flowering plants and some potted horticultural plants were considered. Based on our study, it appears that a controlled light treatment with an appropriate ratio of blue, red, or far-red provided by a fluorescent lamp using LEDs may improve lateral branching, suppress stem elongation, or prolong the blooming period on flowering plant production in a closed system such as growth chamber. Such the system could be considered for use on a commercial scale.

1. Characteristics of growth and flowering of some flowering plants grown in mixture irradiation of a fluorescent lamp with LEDs

The objective of this experiment was to investigate characteristics of growth and flowering of some bedding plants grown in mixing light conditions with fluorescent tubes and blue, red, and far-red Light-Emitting Diodes. Ageratum (cv. Blue Field), marigold (cv. Orange Boy), and salvia (cv. Red Vista) plants which developed with two true leaves were grown for 70 days in a growth chamber, where air temperature and relative humidity were maintained at 25°C and 60%, respectively. The experiment had four treatments with different mixing lights; Fluorescent lamp (FL), FL+Blue LED (FLB), FL+Red LED (FLR), and FL+Far-red LED (FLFr). Photosynthetic photon flux on the culture shelf was kept at $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in all the treatments, and photoperiod was provided at 16 hour per day. Total dry weight per plant of ageratum seedlings was not significantly different in FLB, FLR, and FLFr treatments. Plant height per plant of ageratum and marigold was not significantly different between FL and FLR treatments, and it was the longest in FLFr treatment. Number of flowers in marigold plants was not significantly different in all the treatments, however, did not bloom in FLFr during the growing period. Number of stomata of marigold seedlings was greater in FLR and FLFr than in FL.

2. Growth responses of marigold and salvia flowering plants as affected by monochromic or mixture irradiation by a Light-Emitting Diode (LED)

The experiment was conducted to examine the effects of monochromic blue or red light and mixture radiation with fluorescent lamp and LED of blue, red, or far-red on growth and morphogenesis of marigold and salvia seedlings. The plants, which developed with two leaves, were grown in a growth chamber for 70 days, where air temperature and relative humidity were maintained at 25°C and 60%, respectively. Photoperiod of a 16 hour was provided by FL, monochromic LED of B or R, and mixture light (FLB, FLR, or FLFr) with fluorescent lamp and blue, red, or far-red maintained at $90\pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ photosynthetic photon flux during the culture period. Dry weight of salvia plants was greater in the mixture treatments with supplemented blue, red, or far-red region to conventional FL, respectively. Stem length of marigold was greatest in B and R treatments, and was smallest in FL and FLR treatments with increased spectral energy of red region compared with FL spectral distribution. On the other hand, the stem length per plant of salvia seedlings was greatest in FLFr, and it was about three times higher in FLFr than in R treatment with lower plant height. In salvia seedlings, number of flowers per plant was highest in FLFr and FL treatments, and there were not significantly different both of them.

3. Effect of mixture irradiation with Light-Emitting Diodes on growth and development of some flowering plants

Stem elongation, lateral branching, or leaf extension is influenced by light quality on plant production. The experiment was conducted to investigate the effect of mixture lights providing by Light-Emitting Diodes (LEDs) of blue, red, or far-red used as an artificial light for plug seedling production. All of the seedlings of ageratum (cv. Blue Field), marigold (cv. Orange Boy), and salvia (cv. Red Vista) which developed two true leaves, was kept in the growth chamber which controlled at 25°C air temperature and 60 % relative humidity for 28 days. Photosynthetic photon flux in each mixture treatment of blue+red, blue+far-red or red+far-red (1:1 in spectral energy) was maintained at $90\pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ provided with photoperiod of 16 hrs. On day 28, number of lateral branches in ageratum was 14.3 times greater in monochromic Red light treatment than in the treatments with mixing light of Red (R) or Far-red (Fr) light in BR and BFr, and it was above 2 times greater than in FL. In marigold, the first node length was not significantly different in FL, BR, and BFr treatments and gave the smallest in R treatment. The fourth node length in BFr, on the otherhands, was the longest, although it was not significantly different in FL, B, R, and BR treatments. Total dry weight of salvia was 2 times higher in the BR treatment than in FL.

4. Supplemental blue and red light with low PPF during sunrise and sunset twilight influence on growth and morphogenesis of some flowering plants

The effect of supplemental blue or red light with low light intensity in sunrise and sunset twilight on growth and morphogenesis of *Ageratum houstonianum* Mill., *Tagetes erecta* L., and *Salvia splendens* F. Sello ex Ruem & Schult. was investigated. The seedlings, which developed with two true leaves, were used for plant materials. Different supplemental lights with 30 or 60 minute per day were established in greenhouse, which controlled at 25/15°C (day/night) air temperature and 40% relative humidity in average. The photosynthetic photon flux for the supplemental lighting except for natural condition without any supplemental light was about 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 70 days. The treatment of supplemented red light with 30 minute, respectively, in sunrise and sunset twilight (totally 60 minute per day) gave the greatest shoot and root dry weights in marigold seedling. Blue and red supplemental lights regardless of the lighting time significantly stimulated development of lateral branches in marigold. Plant height per plant in ageratum and salvia seedlings was significantly shorter in supplemental red treatment with 30 or 60 minute than in natural light treatment during the culture period. Number of flower buds in marigold was about 2 times higher in red light treatment with 60 minute per day than in other treatments. In salvia seedling, number of open flowers was 2 times greater in natural light than in the supplemental treatments, although the number of flower buds was no remarkably difference in the supplemental light qualities. Different characteristics on formation and development of stomata in all the seedlings could be observed by the treatment of supplemental blue or red light in sunrise and sunset twilight during a day compared to natural light without supplemental light.

5. Effect of light quality on variations in CO₂ and ethylene concentrations inside culture vessels during the growth of ageratum, marigold and salvia seedlings

Ageratum (*Ageratum houstonianum* Mill. 'Blue Field), *Marigold* (*Tegetes erecta* L. 'Orange Boy') and *Salvia* (*Salvia splendens* F. Sello ex Ruem & Schult. 'Red Vista') that developed two true leaves were used as plant materials. The plants were grown in a growth chamber, which

controlled at 25°C air temperature, 60% relative humidity, and 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 14 days. Blue, red or blue plus red lights provided by Light-Emitting Diode were used as a light source. In marigold and salvia seedlings, significant differences of CO₂ concentration inside and outside growing vessel was shown in blue light treatment than others during 14 days, and were gradually decreased from 5 days after treatment. On day 14, there was no significantly different in net photosynthetic rate per seedling. In the seedlings, dry weights per plant were not significantly different in all the treatments. Dry weight of ageratum was increased by mixture radiation of blue and red. Maximum leaf area in marigold was shown in red or blue plus red light compared with fluorescent lamp. It was suggested that the net photosynthetic rate were influenced by the light qualities at the beginning stage of plant growth.

6. Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. 'Dixie White'

The effect of light quality (spectral quality) and lighting period (day length) were studied on flowering of *Cyclamen persicum* cv. 'Dixie White'. Light generated from light emitting diodes (LED) i.e. monochromic blue (10 or 12 h per day), monochromic red (10 or 12 h per day) and blue plus red (10 or 12 h per day) and fluorescent lights were used in these studies. It was found that blue plus red LEDs were useful for flower induction in cyclamen and the number of flower buds and open flowers were highest in the plants grown under blue plus red LED (10 h per day). Blue and red LEDs alone reduced the flowering response. Peduncle length (flower stalk length) and blooming period of flowers were also influenced by light qualities and lighting period treatments. Peduncle length was 23.8 cm with the plants grown under red LED (12 h per day) treatment and it was 14 cm with the plants grown under fluorescent light. Blooming period of flowers grown under fluorescent light was 20 days, whereas it was 40 days with the plants grown under red LEDs (10 h per day). The accumulation of sucrose and reducing sugars was highest in the plants grown under red LEDs. These results indicate that flowering and further growth can be controlled with the manipulation of light quality and lighting period in cyclamen.

7. Growth and development of dieffenbachia and ficus plants under different supplemental light qualities in a greenhouse

The effect of supplemental lighting providing by Light-Emitting Diodes at daytime on growth of two ornamental plants was investigated. 'Camella' *Dieffenbachia amoena* and 'Melany' *Ficus pumila* were grown under different supplemental lights of blue, red, or blue plus red for 50 days. The supplemental lights with $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in photosynthetic photon flux were established in greenhouse which controlled at 27.5°C air temperature and 75% relative humidity in average from 15th June to 4th August. Fresh weight of 'Camella' was the greatest in the supplemental treatment of blue plus red light, although there was no significant difference in dry weight. Higher plant height was shown in the mixture light of blue plus red and in control of natural lighting. The fresh and dry weights of 'Melany' were significantly higher in the mixture treatment than in control without any supplemental light. Number of unfolded leaves of 'Camella' and 'Melany' was increased in the mixture treatment. Net photosynthetic rate (NPR) of 'Camella' was the greatest in the mixture light and control, and the red alone and mixture light treatments gave the highest NPR in 'Melany'. Wax content per leaf of blue plus red treatment in 'Melany' was significantly higher than in control.

8. Longevity and quality of cut 'Master' carnation and 'Red Sandra' rose flowers as affected by red light

Carnation (cv. Master) and rose (cv. Red Sandra) with stem length of 45 cm were placed in the test tube filled with distilled water used as vase water. The flowers were treated with the vase water plus commercial preservative of 20 ml l^{-1} under fluorescent tubes and under fluorescent tubes of $50 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPF without the solution as a control. Mixture radiation of fluorescent tubes plus red light provided by Light-Emitting Diodes (LEDs) and red alone of low 50 or high $90 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ without the keeping solution were also tested. Red light with high PPF and in the mixture radiation under low PPF both extended the vase life in cut carnation, and flower freshness could be maintained for 10.9 days compared with control of the solution-free water under the fluorescent tubes. In cut rose, the vase life in the treatment containing the solution under conditions of fluorescent tubes alone and in red alone regardless of light intensity could be prolonged for 4.6 and 4.2 days than that of control, respectively. Complete petal opening in carnation flowers was accomplished by the treatment of red LEDs with high PPF during vaselife.

9. Continuous or Intermittent Radiation Using Light-Emitting Diodes Influence on the Growth and Morphogenesis of Sweetpotato Plantlets Cultured *In Vitro*

The study was conducted to investigate the effect of continuous or intermittent lighting by Light-Emitting Diodes (LEDs) on growth and morphogenesis in Sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam. 'Beniazuma') cultured *in vitro*. The explants of single node cutting were cultured under MS medium with half strength for 35 days. Photoperiod was provided at 16 h in the continuous radiation treatments, and 20 or 10 sec. (photo/dark) was intermittently treated. Fresh and dry weight in the treatment of intermittent blue lighting with 20 and 10 sec. (on/off) were greater than in continuous fluorescent tube. Intermittent red and blue plus red or continuous blue plus red had greater no. of nodes, otherwise there was shorter shoot length in the treatments. Maximum root length was shown in intermittent blue lighting condition among the treatments. The results suggest that the growth of *in vitro* Sweetpotato plantlet can be successfully cultured under the intermittent or continuous radiation provided by LEDs, and morphology also established by control of light quality or radiation time with an interval.

CONTENTS

Chapter I . Outline of the research project	18
Chapter II . Present status of domestic and foreign research	22
Chapter III . Research details and results	25
Chapter IV . Accomplishment of research and contribution to the related fields	110
Chapter V . Application plan of the research results	116
Chapter VI . Foreign research results related to the application of LEDs in horticultural plants	118
Chapter VII . References	121

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	18
1.	연구개발의 필요성	18
2.	연구개발의 목표 및 연구 범위	20
제 2 장	국내외 기술개발 현황	22
1.	국외 기술개발 현황	22
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	25
1.	형광등과 발광다이오드의 혼합광 조사가 아게라텀, 메리골드 및 살비아 초화식물의 생장 및 개화에 미치는 영향	25
2.	발광다이오드에 의한 단색광 및 혼합광 조사가 메리골드 및 살비아 실생묘의 생장에 미치는 영향	32
3.	발광다이오드 간의 혼합광 조사가 몇 가지 초화식물의 생장 에 미치는 영향	38
4.	일출 및 일몰시에 저광강도의 적색 및 청색 발광다이오드를 이용한 보광처리가 몇 가지 초화식물의 생장 및 형태형성에 미치는 영향	47
5.	아게라텀, 메리골드 및 살비아 재배기간 동안의 이산화탄소 와 에틸렌 농도변화에 미치는 광질의 영향	62
6.	광질 및 명기시간이 분화 미니 시클라멘 ‘딕시 화이트’의 개화에 미치는 영향	73
7.	온실조건 하에서의 보광처리가 관엽 디펜바키아와 피커스의 생장에 미치는 영향	82
8.	적색광 조사가 카네이션 ‘마스터’와 장미 ‘레드 산드라’의 절화수명과 품질에 미치는 영향	92

9. 발광다이오드를 이용한 연속 및 간헐조사가 고구마 배양소식물체의 생장과 형태형성에 미치는 영향	99
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	110
1. 연도별 연구목표 및 평가착안점	110
2. 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전예의 기여도	115
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	116
1. 기내식물배양에서의 활용	116
2. 기외 묘생산에서의 활용	116
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	118
제 7 장 참고문헌	121

제 1 장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 필요성

종래에는 식물 재배용 인공광원으로 형광등, 메탈등, 수은등이나 백열등 등이 이용되고 있었다. 이러한 광원들은 식물의 성장 및 광형태형성에 불필요한 파장역의 광이 포함되어 있기 때문에 광이용효율 (광질 및 광강도) 이 낮고 일정공간 내에서 광원이 차지하는 비율이 높아 생산효율이 낮으며, 광선 중에 열선을 포함하고 있어 공조시설비에 비용이 많이 소요된다. 또한, 전력비 증가로 인하여 묘생산 비용이 증가하게 되는 원인이 되고 있다.

최근, 고휘도화 및 저가격화 등에 따라 일반화되고 있는 발광다이오드 (LED: Light-Emitting Diode: 발광다이오드, 이하, LED) 가 새로운 식물 재배용 인공광원으로 주목을 받고 있다. 그 이유는 LED 가 종래의 인공광원에 비하여 다음과 같은 장점을 가지고 있기 때문이다. (1) 식물의 광합성 및 성장에 필요한 파장역만을 갖는 단색광이다. (2) 소형으로 판넬화가 가능하여 Growth Chamber (성장상실) 와 같이 비교적 좁은 공간에서도 활용할 수 있다. (3) 전력 소모량이 적다 (기존광원의 절반). (4) 열선을 방사하지 않는다. (5) 수명이 반영구적이다. (6) 특정 파장역만을 갖는 광질선택이 가능하다.

현재, 식물체의 광형태형성 및 색소합성 등에 미치는 LED 의 효과에 대한 연구가 서서히 진행되고 있는데 그 예로서, 상치, 오이 및 시금치의 실생묘와 일부 배양소식물체에 있어서 LED 광조사로 기존의 인공광원과 거의 동등한 성장을 얻었다는 연구결과가 보고되고 있다. 그러나, 이러한 연구보고에서는 광여과 필름에 의한 Red 나 Far-red 의 광비율 조절 등으로 식물체의 성장을 광질과 관련된 생리적 측면고찰이 대부분인데 그 이유로는 LED 의 단가가 매우 높고 (Red: 약 1,000 원, Blue: 약 5,000 원, Far-red: 약 2,500-3,000 원, Green: 약 5,000 원; 칩 한개당의 국내시판가격) 식물체의 광형태형성에 영향을 미치는 Blue LED 의 개발이 늦어졌다는 사실 등을 들 수 있다.

식물체의 신장억제나 굴광성 등에 영향을 미친다고 생각되는 Blue LED 가 10 여년 전에 일본에서 개발된 이래, 국내에서도 고휘도의 Blue LED 가 제작되기 시작하여 금후 Red 및 Far-red LED 와 함께 식물생산에 있어서 Blue LED 의 효과를 규명하는 데에 관심을 모으고 있다.

상업적인 이용가치로 인해 식물, 의료 (소아 황달치료에의 이용가능성 검토) 등의

여러 분야에서 LED 의 이용가능성이 검토되고 있는데, 식물체에 있어서는 극소수를 제외하고 각 광질이 식물체에 미치는 영향에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않고 있다. 그러므로 여러 종류의 기내 배양소식물체 및 기외 재배 식물체 등의 원예식물에 있어서 식물체의 성장 및 광형태형성에 미치는 LED 의 효과 규명이 시급한 실정이다.

기내 배양소식물체는 이용목적에 따라, 식물체의 절간신장 촉진이나 억제가 필요하다. 예를 들어, 식물체의 계대배양을 위해서는 절간의 길이가 긴 편이 작업효율이 높으므로 절간을 신장시켜야 하는 경우도 있다. 또한, 한꺼번에 한 개의 모식물체로부터 많은 수의 식물체를 유도하기 위해서는 절간의 길이를 가능하면 짧게 유지시키면서 배양하는 경우도 있다. 이와 같이, 기내 배양소식물체의 인위적인 형태조절은 식물생장조절물질도 이용되고 있으나 효율적인 측면에서는 인공광원으로 이용하고 있는 광질 자체를 응용하는 것이 보다 실용적이라고 할 수 있다. 단색 LED 및 LED 간을 혼합하였을 때의 각 광질 특성을 파악하여 가장 적절하고 실용적인 광질을 규명한다면 식물조직배양 분야에서의 LED 이용이 가능해지고 우량한 배양소식물체 생산이 가능하리라 사료된다. 또한, 최근 20L 이상의 대형 Bioreactor 를 이용한 식물의 세포, 조직 및 기관의 대량배양 가능성이 제시되어 많은 관심을 끌고 있다. 예를 들어, 약용식물인 인삼의 모상근 배양이 그것이다. 인삼의 모상근을 대량배양 함으로서 다량의 유용성 물질을 생산해 내는 것이다. 일본에서는 LED 광조사가 엽채류에 있어서 비타민 C 의 함량증가에 유효하다는 연구결과를 보고하고 있고, 마늘에서도 유사한 연구가 진행되고 있다. 만일, 식물의 세포, 조직 및 기관배양에 있어서 LED 광조사에 의해 식물체내의 유용물질 함량을 증가시킬 수 있다면 주요 약용식물체의 응용가능성이 크게 기대된다.

한편, Plug 육묘에서 Plug 묘의 품질에 결정적인 영향을 미치는 요인으로 건전묘 생산의 중요한 포인트가 되는 것이 절간의 길이를 조절하는 것이다. 지금까지는 절간의 길이를 짧게 하고 초장을 억제하기 위한 방법으로 주야간 온도차를 이용하는 DIF (주야간온도차) 기술, 생장억제제 처리 및 물리적 자극 등과 같은 방법 등을 이용하는 연구가 진행되고 있다. 현재, 우리나라의 Plug 육묘기술은 아직 확립된 상태가 아니기 때문에 양질 Plug 묘의 안정공급이 어려운 실정으로, 양질의 Plug 묘를 생산하기 위한 새로운 시도로 광형태형성에 유효한 LED 의 특정광질을 이용한 육묘기술을 보급시킬 필요가 있다. Plug 육묘시 LED 광조사에 의해 식물체의 성장 및 형태를 조절할 수 있다면, 정식후의 인위적인 광질조절에 의한 묘관리가 가능하게 되어 분화류의 초장조절 및 품질유지 효과도 기대된다.

국내 Plug 묘 생산은 대개 자연조건 (특히 광환경) 에 의해 크게 좌우되며 병충해

등에 의한 피해율이 높은 비닐하우스와 같은 재래시설에서 주로 이루어지고 있기 때문에 묘생산율이 저하되고 고품질의 묘를 생산하는 데에 많은 어려움이 있다. 자연광이 갖는 이점을 최대한으로 살리면서 묘의 품질을 유지하기 위한 방법으로 일출 및 일몰시의 광효율을 높이는 보조광원서의 LED 이용이 유효하다고 생각된다. 아직은 고가인 LED의 이용가능성 확대와 실용화를 위해 LED를 적은 양으로 단시간에 조사함으로써 식물체의 광환경을 개선하여 Plug 묘의 개화촉진, 개화지연 및 초장조절 등이 가능하게 될 것이다.

금후 미래형 묘생산시설로 온도 및 습도 등 재배환경을 조절할 수 있는 성장상실을 이용한 Plug 묘생산시스템인 “밀폐형의 인공광 이용형 식물공장”이 대두되고 있다. 기존에 식물공장의 광원으로 이용되고 있던 인공광원을 최대한으로 이용하면서 보다 우량한 묘를 생산하기 위해서는 LED와 기존광원을 접목시킬 필요가 있다. 기존의 광원이 포함하고 있지 않는 파장역을 LED로 보충하여 식물체의 광이용효율을 향상시킬 수 있게 된다.

2. 연구개발 목표 및 연구 범위

본 연구는 Red, Far-red, Blue의 단색 LED, 각 LED 간의 혼합 및 기존 인공광원과의 혼합 등에 의한 LED 광조사가 식물의 색소생성, 개화생리 등, 식물생장 및 광형태형성에 미치는 영향을 조사하여 새로운 식물 재배용 인공광원으로서의 이용가능성을 검토한다. 그리고, 이를 토대로 하여 식물재배광원으로서의 LED의 장점을 최대한으로 이용하는 인공광 이용형 식물공장 체제의 구축 및 시설재배에 응용할 수 있는 가능성 제시를 그 목표로 한다.

가. 기내 배양소식물체의 생장 및 광형태형성에 있어서의 LED 광조사 효과

생장 및 광형태형성에 있어서의 광질의 특성과약과 광혼합에 의한 적정의 광질 결정을 결정한다.

나. Plug 육묘시의 LED 광조사 효과

생장 및 품질향상을 위한 LED 혼합형태의 파장과 Pulse 광조사 극단주기 광조사에 의한 LED 광효율의 향상

다. 분화식물 재배시 LED 광조사 효과

1) 성장상실 조건하에서 단색 LED 광조사, LED 간의 혼합광조사 및 기존광원과의 혼

합광조사로 식물체의 개화 및 초장조절을 위한 적정광질 결정한다.

2) 시설재배 조건하에서 일출, 일몰시의 식물체 성장촉진 및 품질향상을 위한 적정 광질 및 광조사 시간 결정과 개화 및 LED를 이용한 초장조절 방법을 모색한다.

라. 절화류의 수명연장 효과

국화, 장미, 거베라 등, 수요가 높은 절화의 수명연장 및 품질향상을 위한 광질 및 광강도를 결정한다.

마. LED 광조사 스텐드의 제작

실내식물 (분화류 및 절화류) 의 수명연장, 품질향상 및 실내조명효과를 연출하는 광질결정과 LED 를 이용한 스텐드 제작에 의한 LED 실용화 및 대중화를 도모한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국외 기술개발 현황

LEDs (Light-Emitting Diodes; LEDs, 이하 발광다이오드)는 거리의 광고탑이나 게시판, 가전제품의 indicator 등으로 이용되고 있는 광으로 고속응답성, 저소비전력 등의 이점으로부터 최근 10여년 사이에 미국의 NASA 및 일본 국공립 연구기관이나 기업 연구소 등에서 크게 관심을 끌고 있는 광원이다. 본 보고서에서는 미국과 일본의 연구사례를 주로 하여 발광다이오드의 이용현황에 대하여 서술하고자 한다.

가. 일본의 발광다이오드 이용현황

특히, 일본의 경우, 주로 발광다이오드 maker가 중심이 되어 발광과장역 확대나 고휘도화에 대한 연구가 진행된 결과, 현재는 광도가 높고 다채로운 색의 발광다이오드 램프가 비교적 저가격으로 보급되고 있다. 발광다이오드는 발광(發光) 디바이스로서 우수한 표시기능을 갖고 있으며 식물용 재배광원으로서도 그 밖의 광원에는 없는 특성을 갖고 있다. 일본에서는 식물재배용 인공광원으로서 발광다이오드의 특징을 충분히 이해하고 그 장점을 최대한으로 이용함으로써 지금까지와는 크게 다른 개념의 식물공장 즉, 높은 식물제어 기능과 생산능력을 겸비하고 시스템의 크기가 콤팩트한 식물공장을 구축할 수 있는 가능성을 기대하고 있다.

발광다이오드를 이용하여 식물을 재배할 경우, 식물체의 생장에 필요한 파장의 광을 집중적으로, 밸런스 좋게 조사할 수 있기 때문에 재배의 효율성을 향상시키며 특히, Mitsubishi (주) 광 연구실에서는 상치, 시금치 및 수종의 초화의 개화나 결실시기 조절, 수확물의 초형이나 영양성분 조절 등에의 이용가능성을 검토하고 있으며 발광다이오드를 광원으로 하는 보다 효율적인 식물재배용 광조사 시스템에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

식물재배에 이용하는 가시영역의 발광다이오드에는 적외 영역의 에너지 방사를 거의 포함하지 않기 때문에 다른 광원에 비해, 광원을 재배식물에 매우 근접하여 설치할 수 있다. 실제로 발광다이오드가 설치된 패널을 상치 식물 앞에 접촉하지 않을 정도의 근거리에서 조사해도 열선(熱線)에 의한 잎의 연소현상 등의 장애가 전혀 없는 것으로 증명되었다. 이와 같이 발광다이오드를 재배식물의 크기가 광원패널의 크기에 수용될 수 있다면 식물 앞의 근접조사가 가능해짐에 따라 식물의 광이용효율을 향상시키며 비교적 소형의 재배 Unit을 연속하여 몇 층으로 쌓으므로 전체적으로 매우 콤팩트한 재배장치를 만들 수 있게

된다.

한편, 발광다이오드는 발광특성상 단주기의 pluse 광조사 (극단주기 광조사)에 적합한 광원이다. 일반적으로 필라멘트를 갖는 식물재배용 인공광원 중에서 pulse광조사는 램프에 대한 부담이 커서 램프수명을 극단적으로 단축시키는 단점이 있다. 또한, 광출력도 pulse화하면 연속점등에 비해 저하하는 경우가 많다. 발광다이오드는 고속반응성이 매우 높으며 전원과의 사이에 간단한 pulse발생기를 설치하는 것만으로 나노 (n) 초 이하의 단주기로 pulse광조사가 가능해진다.

또한, 그 밖의 램프와 달리 발광다이오드에 의한 pulse광조사는 램프의 수명이나 출력에 있어서도 양호한 효과가 있다. 발광다이오드의 경우, 동일조건에서는 연속점등사용보다도 pulse점등이 램프수명을 연장시키는 장점이 있다. 게다가 동일 소비전력을 비교해 보면 pulse점등이 연속점등에 비해 광출력이 증가하는 특성이 있다.

식물의 성장, 특히, 식물의 광합성에 있어서 연속광보다 pulse광조사가 광이용효율이 높다는 연구결과 등이 보고되고 있다. 앞으로 식물재배에 있어서 pulse광조사의 장점을 정량적으로 확인할 필요는 있으나, pulse발생기 등의 장치적인 비용을 상회하는 재배효율의 향상이 수 종의 식물을 대상으로 한 실험 연구를 통하여 인정된다면 pulse광조사용 식물재배용 인공광원으로서 발광다이오드가 매우 우수한 광원으로 인정받을 수 있다.

한편, 세계에서 처음으로 식물재배용 인공광원으로 발광다이오드를 이용한 것은 Mitsubishi (주)의 연구 그룹이었다. 이 연구그룹은 1982년이라는 이른 시기에 토마토를 온실에서 재배할 때에 peak파장 650 nm의 적색 발광다이오드를 보광한 연구결과를 보고하였다. 그 후에 발광다이오드에 의한 식물재배에 관해서는 우주기지 등의 폐쇄계에서의 생명유지 시스템 (CELSS)관련기술의 하나로서 미국 NASA의 연구그룹을 중심으로 발광다이오드의 이용가능성에 대한 검토가 시작되었으며 현재, CELSS에서의 식물재배용 인공광원으로서의 이용가능성이 기대되고 있다.

1990년대에는 아직 식물의 재배실험에 필요한 청색광을 충분히 공급하는 고휘도의 발광다이오드가 개발되지 않은 상태로 실험에 이용할 수 있는 것은 광강도가 매우 낮은 SiC계의 청색 발광다이오드였다. 따라서 청색형광등을 발광다이오드 램프Unit에 겹쳐서 발광다이오드 램프사이를 통해서 식물에 청색광을 공급하였으며 NASA의 연구그룹은 직경 1 cm, 길이 12 cm정도의 소형 청색 형광등을 발광다이오드 램프사이에 설치하여 청색광량을 조절하는 등의 시도를 하다가 1993년 말에 일본의 Nikka화학 (주)에서 고휘도의 청색 발광다이오드를 개발하게 되어 현재까지 청색광이 식물체의 성장 및 형태형성에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되고 있다.

나. 미국의 발광다이오드 이용현황

미국에서는 일본의 적색광에 대한 연구결과가 학회에 보고되고 난 후부터 관심을 가지기 시작하여, 우주기지 등의 폐쇄형 공간내에서의 생명유지 시스템 (CELSS) 관련기술의 하나로 NASA의 연구그룹을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 1987년부터 발광다이오드를 인공광원으로 한 본격적인 재배실험이 Wisconsin대학의 Dr. Tibbitts 등을 중심으로 한 연구그룹에 의해 시작되었으며, 주로 상치를 이용한 육묘실험과 재배실험에 대한 연구결과가 보고되고 있다.

발광다이오드 개발의 선두주자인 일본에 비해 미국에서는 Wisconsin대학의 Dr. Bula 등을 선두로 하여 식물체의 생장 및 형태형성에 미치는 청색 및 적색의 발광다이오드에 대한 실험결과에 대하여 주목을 끌기 시작하였다.

한편, 1995년 이후부터는 발광다이오드의 가격이 고가인 점에서 Clemson대학의 Dr. Rajapakse 연구팀을 중심으로 하여 온실조건 하에서 이용하는 유색의 필름을 이용하여 태양광으로부터 공급받는 적색 및 원적색광을 선택적으로 흡수하는 광선택성 필름을 개발하여 이들 필름에 의한 광질선택이 식물체의 생장 및 형태형성에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되기 시작하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 형광등과 발광다이오드의 혼합광 조사가 아게라텀, 메리골드 및 살비아 초화식물의 성장 및 개화에 미치는 영향

식물체의 성장, 발달, 분화, 생식 및 형태형성에 있어서 매우 중요한 에너지원으로 식물체의 줄기신장, 엽면적 확대, 신초생장이나 광합성을 촉진하는 중요한 환경요인의 하나이다. 광환경 (광강도, 일장 등) 중에서 광질은 인공광원을 사용하는 성장상실과 같은 폐쇄공간 내에서 식물의 성장 및 형태형성에 영향을 미친다. 인공광원을 이용하여 양질의 식물묘를 생산하기 위해서는 측지발생이 양호하며 절간신장이 억제된 식물 초장이 적당하여야 하고 엽색이 짙으며 적절한 엽수가 확보되며 적당한 엽면적이 확보되어야 하며 근부활력이 양호하고 생장이 균일하여야 한다는 등의 조건이 갖추어지도록 재배하여야 한다.

한편, 발광다이오드는 기존의 인공광원에 비해 크기가 작고, 과장역이 좁으며 열선을 방사하지 않고 전력비 소모가 적으며 수명이 반영구적이라는 등의 장점을 가지고 있어서 성장상실과 같은 소형공간내에서의 이용성이 높아 새로운 인공광원으로서의 이용가능성이 검토되고 있다. 최근 들어 발광다이오드가 원예식물의 성장 및 형태형성에 유의한 영향을 미친다는 연구결과가 보고되고 있으나, 아직은 발광다이오드의 영향이 여러 원예식물에서 구명되고 있지는 않다.

본 연구에서는 성장상실과 같은 소형공간내에서 새로운 식물재배용 인공광원으로서 발광다이오드를 광원으로 하여 식물생산을 도모하였으며, 아게라텀, 메리골드 및 살비아 실생묘의 성장 및 개화반응에 있어서 형광등과 발광다이오드의 혼합광질의 영향을 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 본엽이 2매 전개된 *Ageratum* (*Ageratum houstonianum* Mill. cv. Blue Field), Marigold (*Tagetes erecta* L. cv. Orange Boy) 및 *Salvia* (*Salvia splendens* F. Sello ex Reum & Schult. cv. Red Vista)를 공시하였다. 재배개시 14일째에 아게라텀, 메리골

드 및 살비아 신품묘는 피트모스, 버미큘라이트 및 펄라이트가 혼합된 혼합상토 (BM1, Berger Horticulture Co. Ltd., quebec, Canada)로 한 플라스틱 트레이 (50×50 cm)에 이식하였다. 실험기간 동안 N:P:K의 비율이 서로 다른 두 종류의 액비를 관수하였다.

아게라툼, 메리골드 및 살비아 신품묘는 기온 25°C, 상대습도가 60%로 설정된 생장상실에서 70일간 재배되었다. 실험구는 혼합광질의 차이에 따라 형광등과 청색광을 혼합한 FLB구, 형광등과 적색광을 혼합한 FLR구, 형광등과 원적색광을 혼합한 FLFr구 및 대조구인 FL구의 네 개 실험구를 설정하였다. 실험기간 동안 생장상실내 광강도는 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 였으며 명기시간은 16시간으로 설정하였다.

실험종료후 각 신품묘의 건물중, 식물초장, 개화수, 기공수 및 개화기간을 측정하였으며, 기공은 레이저 스캐닝 콘포칼 시스템 (Bio-rad, MRC)을 이용하여 관찰하였다.

2) 통계분석

각 실험구당 12개체의 식물을 공시하였으며 SAS 프로그램 (Version 6.21, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

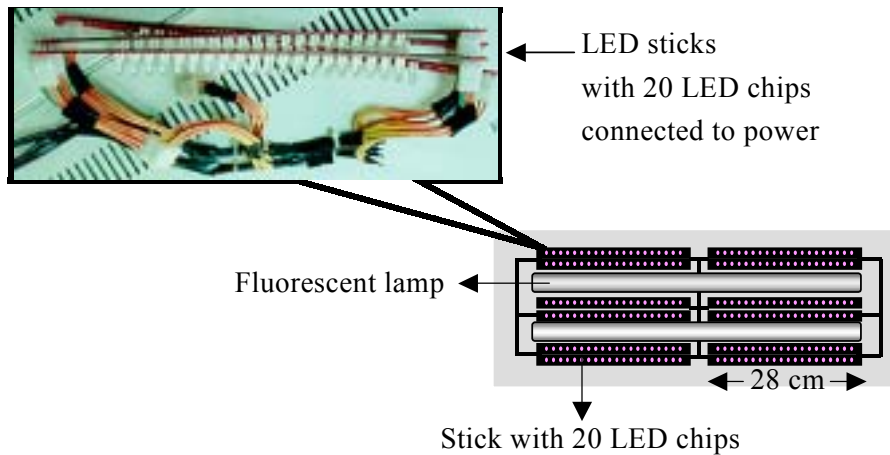


그림 1-1. 인공광원으로 이용된 형광등과 발광다이오드 혼합광조사 장치의 모식도.

나. 결과 및 고찰

형광등과 발광다이오드의 혼합광질은 아게라땀, 메리골드 및 살비아 실생묘의 건물중 증가, 개화수 및 개화기간 등에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 1-2). 실험개시 70일째에 있어서 아게라땀 실생묘의 지상부 및 지하부 건물중은 형광등과 발광다이오드의 혼합광 조사구인 FLB구, FLR구 및 FLFr구에서는 통계적인 유의성이 인정되지 않았으나, 혼합광구에 있어서는 FLFr구에서 증가하는 경향을 나타냈다 (그림 1-3). 대조구와 FLR구에 있어서 메리골드의 건물중 증가는 통계적인 유의차가 인정되지 않았다. 한편, 살비아 실생묘의 건물중은 형광등과 청색, 적색 및 원적색광을 혼합하여 처리한 실험구간에는 건물중의 차이가 없었으나 대조구에 비해 이들 혼합광 조사구의 건물중 증가가 현저하여 대조구에 비해 약 2배 이상 증가하는 것을 알 수 있었다. 건물중 증가라는 측면에서 식물체 생장은 비록 아게라땀에서는 FLFr구를 제외하고 다른 혼합광 처리구에 있어서 광질의 영향은 인정되지 않았으나, 메리골드 및 살비아 실생묘에 있어서는 기존의 형광등 조사구에 비해 형광등에 청색, 적색 및 원적색광을 보광처리하는 것이 효과적이었다고 할 수 있다.

한편, 연구결과에 의하면 상치 식물체의 건물중 증가와 잎의 생장은 광강도가 $85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 및 $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 인 청색, 적색 및 청색광 적색의 혼합광 조사에 의해 현저히 촉진되었다고 하는데 본 실험에서와 같이 실험기간 동안 광강도가 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 일정하게 유지된 혼합광질 조건하에서도 세 종류의 초화식물의 생장이 촉진되는 유사한 결과를 얻을 수 있었는데, 식물체의 성장후기에 있어서 광포화점을 찾아 광강도를 증가시킨다면 식물체의 성장 및 형태형성을 더욱 촉진할 수 있을 것으로 생각된다.



그림 1-2. 혼합광질 하에서 자란 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 생장.

대조구 및 FLR구에 있어서 아게라툼과 메리골드의 초장의 차이에는 유의성이 인정되지 않았으며, 살비아의 경우에는 FLFr구에서 초장신장이 현저하게 촉진되는 것으로 나타났다 (그림 1-4). 메리골드 실생묘의 경우, 형광등과 청색광의 혼합광질 및 형광등과 원적색광의 혼합광질은 다른 광질에 비해 식물체의 초장신장 효과가 현저하였다.

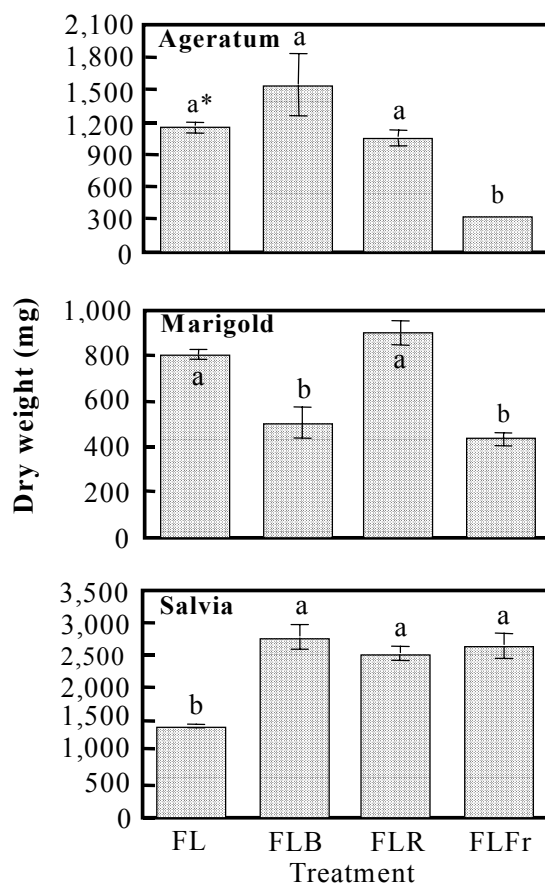


그림 1-3. 혼합광질 조건에서 자란 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 건물중.

연구결과에 의하면 원적색광질이 수 종의 분화 및 초화식물의 줄기신장을 촉진하고 측지발생을 억제한다고 하는데, 본 실험에서 FLFr구에서 세 종류 초화식물의 줄기신장이 촉진된 것은 다른 처리구에 비해 원적색의 파장역의 에너지가 증가되었기 때문으로 생각된다.

메리골드 및 살비아 실생묘의 개화반응은 혼합광질에 따른 영향이 없는 것으로 나타났다으며 아게라툼의 경우에는 FLFr구에 비해 FLB구 및 FLR구에 있어서 개화수가 증가하였다 (표 1-1). 특히, 메리골드의 개화는 형광등과 원적색광이 혼합된 FLFr구에서 억제되었으며, 아게라툼과 살비아 실생묘는 혼합광질의 영향이 없이 모든 처리구에서 개화반응을 나타냈다. 형광등과 적색, 청색 및 원적색 발광다이오드와의 혼합광 조사구에서의 개화기간은 대조구인 형광등 조사구에 비해 6일 연장되었으며 기공발달 또한 형광등 조사구에 비해 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

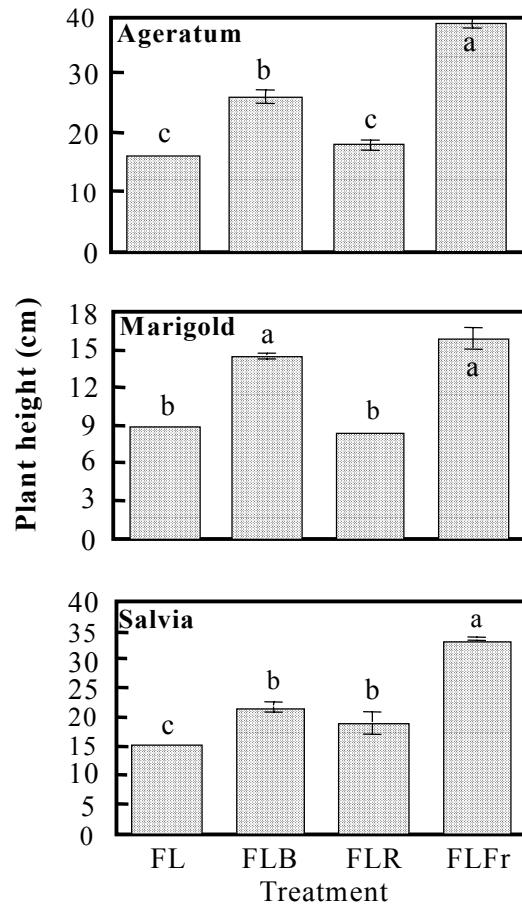


그림 1-4. 혼합광질 조건에서 자란 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 초장.

표 1-1. Number of flowers and blooming period of ageratum, marigold, and salvia flowering plants grown under mixture irradiation with LEDs for 70 days.

Light sources	No. flowers			Blooming period (days)		
	Ageratum	Marigold	Salvia	Ageratum	Marigold	Salvia
FL	5.6 a ^z	0.4 a	1.2 a	25 a	17	9 c
FLB	4.6 a	0.3 a	0.4 a	23 a	12	17 a
FLR	4.6 a	1.0 a	0.8 a	22 b	16	19 a
FLFr	1.2 b	0.0 a	1.2 a	20 b	- ^y	15 b

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yBloomed still under the FLFr treatment during the experimental period.

이상으로 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘는 기존의 형광등 조사에 비해 발광다이오드 시스템을 이용한 형광등과 청색, 적색 및 원적색광의 발광다이오드의 혼합광 조사에 의해 성장 및 형태형성이 촉진되는 것을 알 수 있었다. 실험결과로부터 세 종류의 초화식물의 양적, 질적인 성장반응이 혼합광질의 영향을 받는다는 것을 알 수 있었으며 이러한 초화식물의 성장반응 특성은 식물 종에 따라 다르다는 것을 알 수 있었다. 또한, 기존 광원의 보조광원으로서 발광다이오드를 이용하는 것은 절감된 전력비용과 전구의 수명이 길다는 장점을 살려서 배양기내 및 기외식물체 생산에 이용되는 기존의 광환경을 향상시킬 수 있는 하나의 방법으로 생각된다.

2. 발광다이오드에 의한 단색광 및 혼합광 조사가 메리골드 및 살비아 실생묘의 생장에 미치는 영향

광질은 특히 식물체의 성장과 발달에 영향을 미치는 요인으로, 주로 광질 변화에 따른 식물체의 생리학적, 형태학적, 해부학적 측면에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 적색광은 식물체의 광합성에서 중요한 역할을 하며 또한 식물체내 전분축적에도 영향을 미치며 반면, 청색광은 식물체의 엽록소 형성, 엽록체 발달, 기공열림과 형태형성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 또한 식물잎에서의 해부학적 구조에도 영향을 미친다. 성장상실과 같은 폐쇄형 공간에서의 식물생산에 있어서 가장 일반적

으로 이용되는 인공광원은 형광등으로 이 광원은 식물재배용으로 보다는 인간생활을 위한 광원으로 개발된 것이다. 형광등은 광과장 범위가 매우 넓기 때문에 식물체의 성장과 광합성에 불필요한 과장역을 많이 포함하고 있다.

최근 들어 발광다이오드 (Light-Emitting Diodes; LEDs)는 과장역이 좁고 소형으로 열선을 포함하지 않으며 수명이 길다는 등의 이점에서 식물체의 엽록소 생성, 광합성 및 형태형성 등의 반응을 포함하는 광생물학적 연구광원으로 주목을 받고 있다. 발광다이오드를 광원으로 한 조건하에서 배양기내 심비디움 소식물체나 백합인편 등의 식물생장이 기존의 광원에서 자란 식물체에 비해 촉진되었다는 연구결과 등이 보고되고 있다. 그러나, 발광다이오드 광조사 조건하에서 초화식물의 개화기간 동안이나 개화조절 등, 식물체의 광형태형성적 측면에서의 연구는 거의 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 두 종류의 초화식물의 성장 및 형태형성에 미치는 단일광질 및 혼합광질의 영향을 구명하고, 기존의 식물재배용 인공광원인 형광등 조사조건 하에서 자란 식물체의 성장과 비교, 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 본엽이 2매 전개된 Marigold (*Tagetes erecta* L. cv. Orange Boy) 및 *Salvia* (*Salvia splendens* F. Sello ex Reum & Schult. cv. Red Vista)를 공시하였다. 재배개시 14 일째에 메리골드 및 살비아 실생묘는 피트모스, 버미큘라이트 및 펄라이트가 혼합된 혼합상토 (BM1, Berger Horticulture Co. Ltd., quebec, Canada)가 충전된 플라스틱 트레이 (50±50 cm) 에 이식하였다. 실험기간 동안 표 2-1과 같은 액비를 교대로 관수하였다. 각 실생묘는 기온 25°C, 상대습도 60%로 설정된 성장상실에서 첫 번째 개화한 꽃이 폐화하기 까지 70일간 재배되었다.

표 2-1. Composition of fertilizers used in the experiment.

	N:P:K ratio (%)	Nutrients (%)							
		Mg	Fe	B	Mn	Cu	Mo	Zn	Ca
No. 1	20:10:20	0.15	0.1	0.01	0.05	0.05	0.015	0.05	-
No. 2	14:0:14	2.90	0.1	0.02	0.05	0.05	0.015	0.05	5.9

실험구는 단일의 청색광 조사구 (B구), 단일의 적색광 조사구 (R구), 형광등과 청색

광파의 혼합광 조사구 (FLB구), 형광등과 적색광파의 혼합광 조사구 (FLR구), 형광등과 원적색광파의 혼합광 조사구 (FLFr구), 및 대조구인 형광등 조사구 (FL구)의 6개 실험구를 설정하였다. 각 광원의 파장분포는 그림 2-1과 같으며, 형광등에 혼합된 청색, 적색 및 원적색광의 에너지 비율은 각각 48.5%, 37.6% 및 96%였다. 모든 실험구의 광강도는 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정하였으며 명기시간은 16시간이었다. 실험개시 70일째에 각 실생묘의 건물중 식물초장, 절간길이, 화아수, 개화수, 개화기간을 측정하였으며 레이저 스캐닝 콘포칼 시스템 (Bio-rad MRC 1024es, U.K.) 을 이용하여 식물 잎의 기공을 관찰하고 기공수를 측정하였다.

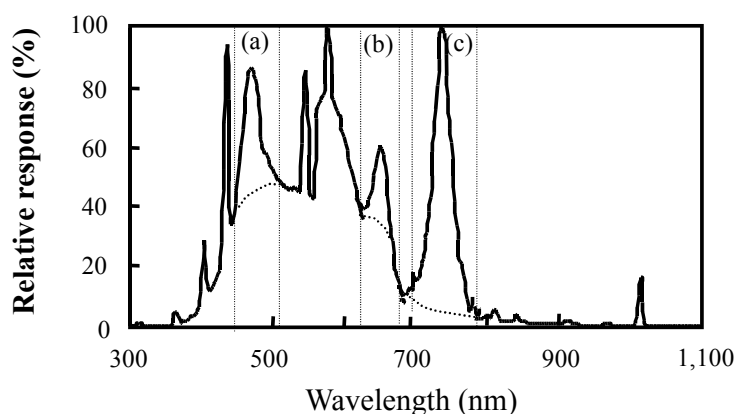


그림 2-1. 각 광질의 파장분포.

2) 통계분석

각 실험구당 5개체의 식물을 공시하였고 실험구는 3반복이었으며 SAS 프로그램 (Version 6.21, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

메리골드 실생묘의 건물중은 형광등과 적색의 발광다이오드를 혼합하여 조사한 FLR구나 단일의 적색광 조사구인 R구에서 통계적으로 유의하게 증가하였으나, 단일

의 청색광 조사구인 B구에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 반면, 살비아 실생묘의 건물중은 단일광 조사구에 비해 형광등과 적색광, 청색광 및 원적색광을 혼합하여 조사한 FLB구, FLR구 및 FLFr구에서 현저히 증가하는 경향을 나타내었다.

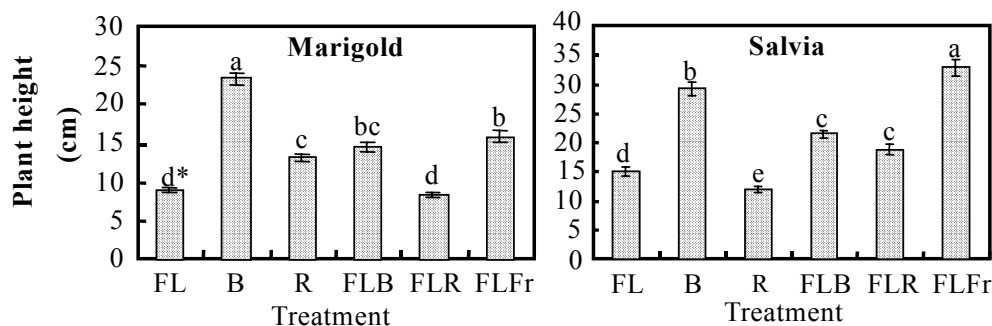


그림 2-2. 메리골드 및 살비아 실생묘의 식물초장.

단일의 발광다이오드 및 형광등과 발광다이오드와의 혼합광 조사는 메리골드 및 살비아 실생묘의 제1마디 신장에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다 (표 2-2). 살비아 실생묘의 제1마디 신장은 B구에서 현저하였으며 대조구, FLR구 및 FLB구의 혼합광 조사구에서 억제되었다. 이와 상이한 결과로서 청색광은 절간신장을 억제하는데 이와 같은 성장과 형태형성을 조절하는 cryptochrome과 같은 청색광 수용체를 갖고 있다는 상이한 연구결과가 보고되고 있다. 메리골드의 경우, 제1마디 신장이 억제된 R구를 제외한 모든 실험구에서는 식물체의 마디신장에 미치는 광질의 유의한 영향은 없는 것으로 나타났다.

메리골드 실생묘의 줄기신장은 단일의 청색광 조사구인 B구에서 최대였으며 FLR구 및 대조구에 비해 약 3배 이상 신장하는 것으로 나타났다 (그림 2-2). 살비아의 경우, 줄기신장은 형광등에 원적색광을 혼합하여 조사한 FLFr구에서 현저하였으며 단일의 적색광 조사구인 R구에서 감소하는 것으로 나타났다. 줄기신장의 촉진이나 억제에 있어서 식물 종에 따른 이와 같은 차이는 아마도 청색광 수용체인 cryptochrome과 적색광 수용체인 phytochrome 의 상이한 상호작용에 의한 것으로 생각되는데, 이와 같은 다양한 생리학적 반응은 다 수의 원예식물에 대하여 보고되고 있다.

표 2-2. Internode length per plant of marigold and salvia flowering plants grown under blue/red monochromic light and mixture irradiation with conventional fluorescent lamp and LED of blue, red, or far-red for 70 days.

Light sources	Marigold			Salvia		
	1st (cm)	2nd	3rd	1st (cm)	2nd	3rd
FL (Cont.)	2.2 a ^z	0.8 d	0.9 d	1.1 c	1.6 c	2.4 c
B (Blue)	2.6 a	3.7 a	3.7 a	5.7 a	4.9 a	4.1 b
R (Red)	1.7 b	2.9 b	3.4 a	2.9 b	2.7b	2.2 c
FLB (FL+Blue)	2.4 a	1.0 d	1.4 c	1.1 c	1.7 c	2.2 c
FLR (FL+Red)	2.2 a	0.7 d	1.0 d	1.4 c	1.9 c	2.2 c
FLFr (FL+Far-red)	2.3 a	1.6 c	2.5 b	3.4 b	5.1 a	5.0 a

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

표 2-3. Number of visible flower buds and blooming period per plant of marigold and salvia flowering plants grown under blue/red monochromic light and mixture irradiation with conventional fluorescent lamp and LED of blue, red, or far-red for 70 days.

Light sources	Marigold		Salvia	
	No. buds	Blooming period (days)	No. buds	Blooming period
FL	14.8 a ^z	17	3.0 a	9
B	2.4 c	7	0.4 b	-
R	3.4 c	6	0.4 b	-
FLB	8.2 b	12	3.4 a	17
FLR	16.4 a	16	4.0 a	19
FLFr	7.4 b	- ^y	3.0 a	15

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yThere was no open flower as affected by the monochromic or mixing lights for 70 days.

이상의 결과는 과장분포나 식물 종의 차이에 따른 하배축 (제1마디) 신장의 억제효과는 형광등에 비해 적색광역이나 청색광역의 에너지 증가와 관련된 것으로 생각된다. 메리골드의 제2마디 및 제3마디 신장은 FLR구 및 대조구인 FL구에서 억제되었으며 단일의 청색 및

적색광 조사에 의해 신장되는 것으로 나타났다. 자연광 하에서 자라는 수 종의 원예식물에 있어서 줄기신장속도가 가속화되지 않는 것은 자연광에 포함되어 있는 청색광의 과장역이 부족하기 때문으로 생각된다.

메리골드의 화아발달은 FLR구 및 FL구에서 촉진되었으며 화아수는 단일광 조사구인 B구 및 R구에 비해 약 5배 이상 증가하였다 (표 2-3). 한편, 모든 실험구에 있어서 혼합광질에 따른 살비아 실생묘의 개화수의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 과장역이 좁은 청색광이나 적색광은 메리골드 실생묘의 화아발달을 억제하는 것으로 생각된다. 연구결과에 의하면 단일의 청색광은 광수용체인 cryptochrome의 영향에 의해 arabidopsis의 개화반응을 지연시킨다고 하는데, 아직 광질과 개화반응과 관련된 메카니즘은 아직 불분명하다.

형광등과 발광다이오드와의 혼합광질은 실생묘의 개화기간에 영향을 미치는데, 대조구에 비해 FLB구, FLR구 및 FLFr구에서 통계적으로 유의하게 개화기간이 연장되는 것을 알 수 있었다 (표 2-3). 살비아의 경우, 단일의 청색광이나 적색광 조사구에서는 화아가 발달하지 않았으며, 메리골드에서는 FLFr구에서 화아형성이 억제되는 것으로 나타났다.

표 2-4. Number of stomata in marigold and salvia flowering plants grown under blue/red monochromic light and mixture irradiation from a conventional fluorescent lamp and LED of blue, red, or far-red for 70 days.

Light sources	Marigold (per mm ²)	Salvia (per mm ²)
FL	49 c ^z	110.6 c
B	34 d	4.4 d
R	19.6 d	6.5 d
FLB	61.0 c	164.0 b
FLR	107.8 b	190.7 a
FLFr	112.1 a	145.0 b

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test. Treatment codes see Table 2.2.

생장기간 동안에 저광강도 조건하에서 자란 장미의 경우, 일반적으로 장미의 개화반응이 지연된다고 하지만 광질에 반응하는 개화생리에 관한 연구보고는 거의 없는 것이 현실이다. Phytochrome은 식물체의 개화반응에 영향을 미치는 광수용체로 알려져 있는데, arabidopsis의 개화반응은 명기시간과는 무관하며 phytochrome 유전자가 관여하

여 작용하므로서 유도된다고 한다. 본실험에서는 개화반응을 유도하는 시그널 특성에 관해서는 언급하지 않았으나, 서로 다른 광질에 의해 식물체가 명기시간을 인지하고 식물체의 발달단계를 전환시키는 요인이 된다는 것을 시사하고 있다.

메리골드의 기공수는 FLFr구에서 가장 많았으며 단일광 조사구보다는 형광등과 발광다이오드를 혼합하여 조사한 혼합광 처리구에서 기공수가 현저히 증가하는 경향을 나타냈다 (표 2-4). 살비아 실생묘에 있어서 기공의 크기는 다른 처리구에 비해 단일의 청색광 조사구에서 증가하였으나, 메리골드의 기공크기는 청색 광질의 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 광질이 식물체 줄기나 잎의 해부학적인 변화에 미치는 영향에 대한 연구결과로는 하배축 신장에 있어서 청색광의 직접적이거나 간접적인 영향, 효소의 합성과 조절, 기공열림, 엽록체 변이 및 광형태형성에 관한 것들이 보고되고 있으나, 기공발달과 관련된 직접적인 관계에 대한 연구결과는 거의 없다. 본 연구결과 기공발달에 있어서 청색광 수용체뿐만 아니라 phytochrome의 매개가 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구결과를 기초로 성장상실과 같은 폐쇄공간 내에서의 식물생산에 있어서 형광등과 청색, 적색 및 원적색의 발광다이오드의 혼합비율을 조절하므로서 식물체의 측지발생, 줄기신장 억제나 개화기간을 연장하는 등의 광생물학적인 반응을 유도할 수 있다고 생각된다.

3. 발광다이오드 간의 혼합광 조사가 몇 가지 초화식물의 성장에 미치는 영향

일반적으로 상대습도, 온도, 광강도 또는 광질은 식물체의 성장, 발달 및 형태형성에 영향을 미치는 환경요인으로 특히, 이러한 환경요인들 중에서 광질은 식물체 잎의 색소형성, 엽면적 확대, 측지발생 및 줄기신장 등과 같은 식물성장 및 형태형성에 영향을 미친다.

현재 발광다이오드는 배양기내 및 기외식물 생산을 위한 새로운 인공광원으로 주목되고 있다. 광질이 수종의 배양기내 및 기외식물체의 성장 및 발달에 영향을 미친다는 연구결과들이 보고되고 있으나, 아직 청색, 적색 및 원적색의 광질이 식물체의 성장 및 형태형성 뿐만 아니라 식물체내 당 및 전분함량에 미치는 영향에 대한 검토는 충분히 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 인공광원으로 이용된 발광다이오드에 의해 제공된 적색, 청색 및 원적색광들의 혼합광질이 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 성장 및 형태형성에

미치는 영향에 대하여 검토하였다. 또한, 서로 다른 혼합광질하에서 자란 이들 실생묘의 당 및 전분 함량변화에 미치는 광질의 영향을 검토하여 기존의 광원인 형광등하에서의 성장반응과 비교하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 본엽이 2매 전개된 *Ageratum* (*Ageratum houstonianum* Mill. cv. Blue Field), Marigold (*Tagetes erecta* L. cv. Orange Boy) 및 *Salvia* (*Salvia splendens* F. Sello ex Reum &Schult. cv. Red Vista)를 공시하였다. 실험기간 동안 실생묘는 펄라이트 및 버미큘라이트가 혼용된 혼합상토에서 재배되었으며 N:P:K의 비율이 서로 다른 액비를 관수하였다. 광조사 시스템은 발광다이오드를 광원으로 하는 LED system (GF-series, Good Feeling Co. Ltd., Sungnam, Korea)를 이용하였으며 실험구는 혼합광질의 차이에 따라 다음과 같은 4개의 실험구를 설정하였다. ㄱ) 청색광과 적색광을 1:1의 에너지 비율로 혼합한 BR구, ㄴ) 청색광과 원적색광을 1:1의 에너지 비율로 혼합한 BFr구, ㄷ) 적색광과 원적색광을 1:1의 에너지 비율로 혼합한 RFr구, ㄹ) 기존의 형광등을 광원으로 하는 대조구인 FL구. 각 실험구 있어서 광강도는 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정하였으며 광조사 시간은 16시간이었다. 실험기간 동안 각 실생묘는 기온 25°C , 상대습도가 60%로 설정된 성장상실에서 28일간 재배되었다.

실험종료후 각 실생묘의 건물중, 신초길이, 화아수 및 측지수를 측정하였으며 엽면적은 Leaf-area-analysis program (Skyeleaf, Skye Instruments Co. Ltd., U.K.)을 이용하여 측정하였다. 또한, 식물체내의 당 및 전분 함량의 변화는 재배시작일인 0, 7, 14, 21 및 28일에 분석, 산출하였으며, 실험기간 0-7일, 7-14일, 14-21일과 21-28일에 다음과 같은 공식을 이용하여 각 실생묘의 건물중을 기초로 한 상대성장속도를 산출하였다.

$$\text{상대성장속도 (day}^{-1}\text{)} = [\ln (W_2) - \ln (W_1)] / (T_2 - T_1)$$

(W_1 및 W_2 는 T_1 및 T_2 시간에 있어서 아게라텀, 메리골드 및 살비아의 건물중으로 단 $T_1 < T_2$)

2) 통계분석

각 실험구당 12개체의 식물을 공시하였으며 SAS 프로그램 (Version 6.21, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

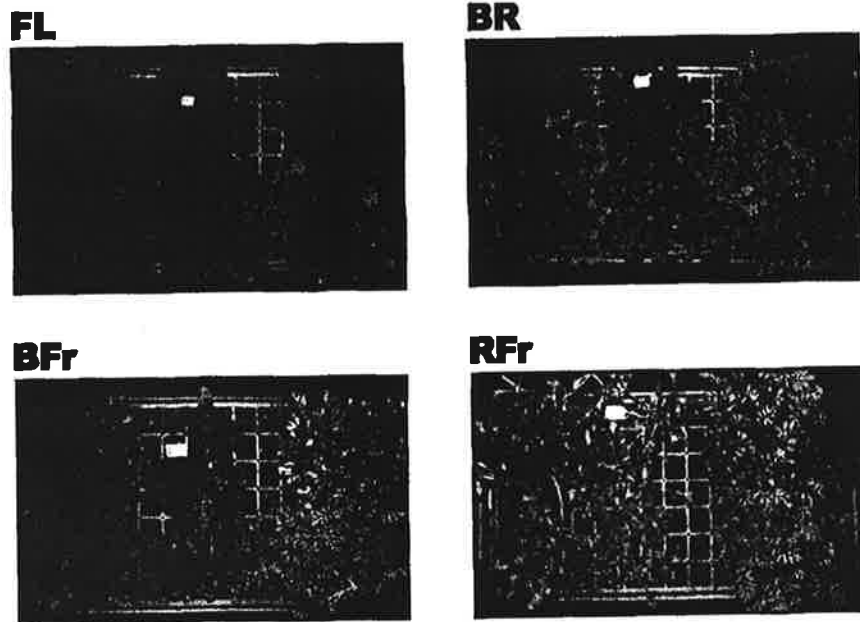


그림 3-1. 발광다이오드에 의한 혼합광 조사조건 하에서 자란 실생묘의 성장.

온도와 상대습도가 조절된 성장상실 조건하에서 각 발광다이오드간의 혼합광질은 아게라팀, 메리플드 및 살비아 실생묘의 성장 및 형태형성에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 3-1). 각 실생묘의 건물중은 청색광과 적색광을 1:1의 에너지 비율로 혼합하여 조사한 BR구와 형광등 조사구에서 현저하게 증가하였다 (그림 3-2). BR구와 형광등 조사구에 있어서 각 실생묘의 건물중은 청색광과 원적색광을 혼합한 BFr구에 비해 약 2배 증가하였다. 실험개시 7일째에 있어서 메리플드 실생묘의 건물중은 혼합광질의 영향이 인정되지 않았으며 실험개시 21일째 아게라팀의 경우에는 형광등 조사구에 비해 청색과 적색광 혼합구에서 자란 식물체의 건물중이 감소하는 경향을 나타내었다. 실험개시 28일째에 살비아 실생묘의 건물중은 대조구에서 최대였으며 적색광과 원적색광을 혼합하여 조사한 RFr구에서 최소였다.

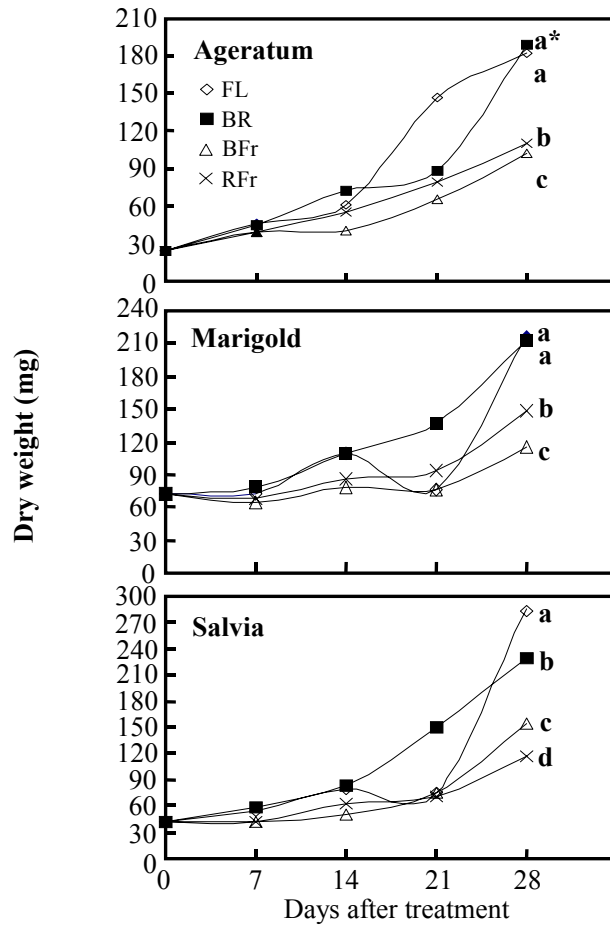


그림 3-2. 발광다이오드에 의한 혼합광 조사조건 하에서 자란 실생묘의 건물중.

아게라툼의 경우, 건물중을 기초로 한 실생묘의 상대성장속도는 청색광과 적색광을 혼합하여 조사한 혼합광질의 영향을 받아 현저하게 증가하는 것으로 나타났다 (표 3-1). 실험기간 동안 메리골드와 살비아의 성장속도는 형광등 조사조건 하에서 실험기간 21-28일 사이에 이루어졌으며 이에 반하여 청색광과 적색광을 혼합하여 조사한 실험구에서의 성장속도는 비교적 완만한 경향을 나타냈다. 실험개시 3주째 대조구에서의 성장속도가 최대였으나 점차 감소하였으며, 적색과 청색의 혼합광질에 의해 성장속도가 현저히 증가하는 것으로 나타났는데, BFr구와 RFr구에서 건물중 증가가 둔감

한 것은 실험기간 동안 성장속도가 낮았기 때문으로 생각된다.

표 3-1. Relative growth rate (RGR) of ageratum, marigold, and salvia seedlings grown under different mixture irradiation on dry weight basis, for the time periods of day 0 to 7, 7 to 14, 14 to 21, and 21 to 28 after treatments.

Light sources	Time period (day)	Dry weight basis (d ⁻¹)		
		Ageratum	Marigold	Salvia
Fluorescent Lamp (FL)	0-7	0.09	0.00	0.04
	7-14	0.04	0.06	0.05
	14-21	0.13	0.05	0.01
	21-28	0.03	0.15	0.19
Blue+Red (BR)	0-7	0.09	0.01	0.05
	7-14	0.07	0.05	0.05
	14-21	0.03	0.03	0.09
	21-28	0.11	0.06	0.06
Blue+Far-red (BFR)	0-7	0.06	0.02	0.01
	7-14	0.05	0.03	0.03
	14-21	0.07	0.00	0.06
	21-28	0.06	0.06	0.10
Red+Far-red (RFR)	0-7	0.07	0.01	0.01
	7-14	0.05	0.03	0.05
	14-21	0.05	0.02	0.02
	21-28	0.05	0.06	0.07

혼합광질이 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 엽면적 증대에 미치는 영향은 표 3-2와 같다. 아게라툼과 메리골드 실생묘의 엽면적은 BR구에서 현저하게 증가하였으며 살비아의 경우, BR구 및 형광등 조사구에서 현저하게 증가하였다. 한편, 청색광과 원적색광을 혼합한 BFR구에서는 각 실생묘의 엽면적 증대가 억제되는 경향을 나타내었다. 또한 RFR구에서도 아게라툼과 살비아 실생묘의 엽면적 증대가 억제되었으나 메리골드의 엽면적은 오히려 적색광과 원적색광은 혼합조사한 실험구에서 최대였다.

각 실생묘의 줄기신장은 BFR구나 RFR구에 비해 BR구나 대조구에서 억제되었다 (표

3-2). 일반적으로 줄기신장은 광원의 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 광원으로부터 방사되는 적색과 원적색의 비율에 의해 식물체의 성장 및 형태형성에 영향을 받아, 이들 비율이 상대적으로 낮을 때에는 줄기신장 효과가 향상되는 반면 비율이 높아질수록 줄기신장이 억제된다.

표 3-2. Influence of different mixture irradiation on leaf area and stem length per plant of ageratum, marigold, and salvia seedlings after 28 days.

Light sources	Leaf area (cm ²)			Stem length (cm)		
	Ageratum	Marigold	Salvia	Ageratum	Marigold	Salvia
FL	43.0 a ^z	37.2 b	55.9 a	8.2 c	6.1 c	6.6 c
BR	47.9 a	44.6 a	47.3 a	9.2 c	6.6 c	5.8 c
BFr	21.5 b	24.6 c	27.9 b	14.2 b	15.1 a	13.5 b
RFr	23.9 b	44.4 a	33.2 b	29.3 a	11.8 b	15.9 a

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test. Treatment codes see Table 3.1.

표 3-3. Fluorescence parameters qP, qN, and Fv/Fm in leaf of ageratum (Ag), marigold (Ma), and salvia (Sa) seedlings grown under different mixture irradiation after 28 days.

Light sources	qP			qN			Fv/Fm		
	Ag	Ma	Sa	Ag	Ma	Sa	Ag	Ma	Sa
FL	0.740 b ^z	0.711 c	0.687 d	0.739 b	0.711 c	0.687 c	0.621 c	0.681 c	0.541 c
BR	0.729 c	0.744 b	0.709 a	0.729 c	0.744 b	0.709 a	0.644 b	0.691 b	0.596 a
BFr	0.756 a	0.767 a	0.704 b	0.756 a	0.767 a	0.704 b	0.617 d	0.745 a	0.556 b
RFr	0.707 d	0.744 b	0.652 c	0.707 d	0.744 b	0.652 d	0.701 a	0.744 a	0.540 c

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test. Treatment codes see Table 3.1.

본 실험조건에서는 형광등구나 BR구에 비해 원적색광역의 비율이 증가한 RFr구나 BFr구에서 줄기신장이 증가한 것으로 생각된다. 이와 동일한 연구결과로서 pelargonium 의 줄기신장이 원적색광의 비율이 높은 조건하에서 촉진된다는 연구보고가 있다. 또한, 성장상실 조건하에서 70일간 재배한 메리골드 및 살비아의 줄기신장은 단일의 청색광에 의해 촉진된다는 보고가 있으며 이와는 다른 결과로는 청색과 적색을 혼합하여 조사할 때에 줄기신장이 억제된다는 연구결과가 있다.

표 3-3은 혼합광질이 엽록소 형광에 미치는 영향에 대하여 나타낸다. 아게라툼과 메리골드 실생묘의 qP와 qN치는 건물중이 낮았던 BFr구에서 통계적으로 유의하게 감소하였다. 살비아의 qP와 qN치는 다른 광질에 비해 BR구에서 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 아게라툼 및 메리골드의 Fv/Fm은 대조구 및 BFr구에서 감소하였으며 RFr구에서 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 고광강도 및 고농도의 이산화탄소 시용조건에서 배양된 기내 감자 소식물체에 있어서 Fv/Fm은 감소한다는 연구결과가 있는데, 살비아의 Fv/Fm은 건물중 증가는 그다지 현저하지 않았으나 BR구에서 최대인 것으로 나타났다. 살비아의 광저해현상은 BR구에 비해 FL구 및 RFr구에서 현저하였으며 이는 엽면적 확대나 건물중 증가로 연결되며, 형광등 조사조건 하에서 식물체의 광합성은 다른 혼합광질에 비해 광저해 현상에 매우 민감한 것으로 생각된다. 일반적으로 엽록소 형광은 스트레스 요인과 광합성과정과의 상호작용에 대한 정보를 제공하는 것으로 광질과 관련된 형광특성에 관한 연구는 전무한 상태로 앞으로 좀더 상세히 검토되어야 할 분야로 생각된다.

표 3-4. Flowering responses per plant of ageratum (Ag), marigold (Ma), and salvia (Sa) seedlings grown under different mixture irradiation after 28 days.

Light sources	Flowering node			No. flowering buds			No. open flowers		
	Ag	Ma	Sa	Ag	Ma	Sa	Ag	Ma	Sa
FL	7 b ^z	5 a	7 a	1 a	13 b	0 b	0 b	8 a	1 a
BR	8 a	5 a	7 a	0 b	21 a	1 a	1 a	5 b	0 b
BFr	7 b	5 a	7 a	1 a	8 c	1 a	0 b	0 d	0 b
RFr	7 b	5 a	7 a	0 b	14 b	1 a	0 b	3 c	0 b

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test. Treatment codes see Table 3.1.

아게라툼 실생묘의 첫 번째 착화는 BR구에서 이루어졌으며 메리골드와 살비아의 경우에는 착화마디에 광질의 영향이 없는 것으로 나타났다 (표 3-4). 메리골드의 화아수는 형광등 조사구에 비해 BR구에서 약 2배 증가하였으나, 최종적으로 개화수는 형광등구에서 증가하는 결과를 나타내었다. 한편, RFr구 및 BFr구에서는 화아형성은 유도되었으나 개화는 지연되는 경향을 나타내었다. 메리골드의 경우 첫 번째 개화가 이루어진 실험구는 RFr구였다. 이러한 결과는 적색광 단독보다는 적색과 원적색광의 비율 조절에 의해 식물체의 개화를 조절할 수 있다는 것을 시사한다.

한편, 메리골드 및 살비아의 화아발달은 적색과 원적색광의 혼합광질에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 적색광 원적색광은 백합과 식물의 줄기신장을 촉진할 뿐만 아니라 개화반응을 촉진하며, 형광등에 비해 적색이나 원적색광역을 증가시킨 조건하에서 초화식물의 화아발달을 촉진하거나 개화기간이 연장된다는 연구결과가 있다.

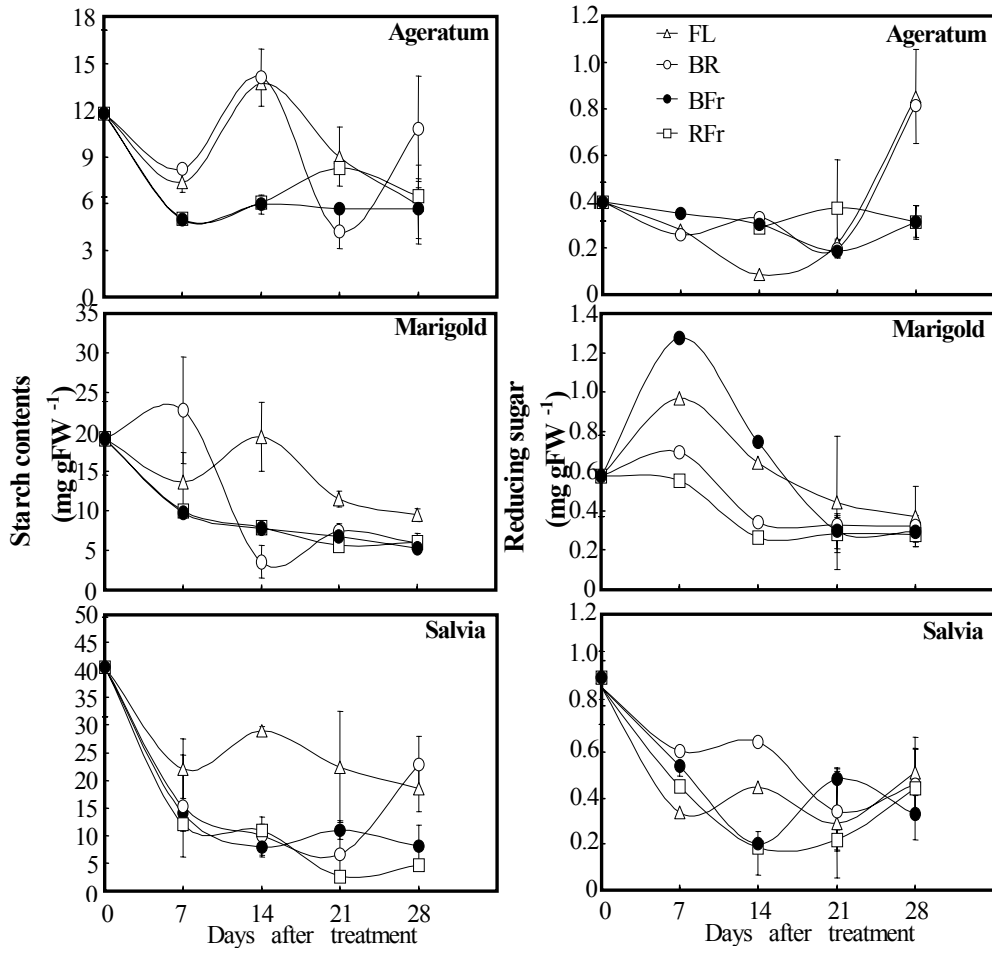


그림 3-3. 발광다이오드에 의한 혼합광 조사조건 하에서 자란 실생묘의 당과 전분함량의 변화.

아게라텀, 메리골드 및 살비아 실생묘의 당 및 전분함량의 변화는 그림 3-3과 같다. 당과 전분 축적은 대조구 및 BR구에 비해 BFr구 및 RFr구에서 현저하였다. 실험종료일에 있어서 청색광 적색의 혼합광질은 아게라텀과 살비아 식물체내 전분축적에 효과적인 광질이었으며, 메리골드의 경우, 전분함량은 RFr구에서 최대로 나타났다. 또한, 실험개시 21-28일에 있어서 아게라텀의 환원당은 청색과 적색의 혼합광 조사구에서 최대였는데, 광질에 대한 식물체의 대사과정은 다른 고등식물이나 녹조류에서 고찰되기도 한다.

이상으로 성장상실과 같은 폐쇄된 공간내에서 인공광원으로 발광다이오드에 의한 혼합광질의 조사는 형광등과 같은 기존의 인공광원에 비해 아게라텀, 메리골드 및 살비아 실생묘의 영양생장이나 생식생장을 촉진시킬 수 있었으며, 서로 다른 혼합광질 조건하에서 개화 및 성장반응이 식물의 종에 따라 다르다는 것을 알 수 있었다.

4. 일출 및 일몰시에 저광강도의 적색 및 청색 발광다이오드를 이용한 보광처리가 몇 가지 초화식물의 성장 및 형태형성에 미치는 영향

현재, 발광다이오드는 실용적인 이용면에서 발광다이오드 만의 고유의 특성 때문에 원예식물의 성장에 필요한 새로운 인공광원으로서의 이용성이 검토되고 있다. 스펙트럼 에너지에 있어서 발광다이오드는 파장역에 따른 청색, 적색 및 원적색 등의 광질 단파장의 밴드를 나타내는데, 이 단파장은 수 종의 배양기내 및 기외재배식물체의 성장에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 연구결과에 의하면 단파장의 적색광은 식물체의 광합성에 있어서 중요한 역할을 하는 광질이라고 하는데, 이와 같이 발광다이오드는 원예식물의 엽록소 합성, 광합성이나 광형태형성과 같은 광생물학적인 측면에서 연구대상이 되고 있다.

온실조건 하에서의 식물체 생산에 있어서 식물체의 생장은 광강도, 광질과 같은 외부환경요인의 영향을 받는데, 온실조건 하에서 광강도나 광질은 수 종의 원예식물의 광합성이나 형태형성에 적절하지 않은 경우가 많다. 온실조건 하에서 보광은 한정된 태양광을 조절하는 것으로, HID등, 형광등, 백열등 및 HPS등이나 메탈등 등의 다양한 광원은 일반적으로 광강도, 광질이나 명기시간 조절이라는 의미에서 그 효과가 검토되고 있다.

한편, 발광다이오드는 크기가 소형으로 단파장역을 갖고 있으며 수명이 길다는 등

의 장점으로부터 식물재배에서 상업적인 이용성이 검토되고 있는데, 이러한 발광다이오드의 특성으로부터 식물생산을 가능하게 하는 새로운 인공광원으로서의 이용가능성이 기대된다.

본 연구에서는 단일의 온실조건하에서 일출과 일몰시에 저광강도의 발광다이오드에 의한 청색, 적색 및 청색과 적색의 혼합광 조사가 아게라텀, 메리골드 및 살비아 실생묘의 생장 및 형태형성에 미치는 효과에 대하여 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 본엽이 2매 전개된 *Ageratum* (*Ageratum houstonianum* Mill. cv. Blue Field), Marigold (*Tagetes erecta* L. cv. Orange Boy), 및 *Salvia* (*Salvia splendens* F. Sello ex Ruem & Schult., cv. Red Vidta)를 공시하였다. 실험개시후 14일째에 50 x 50 cm의 혼합상토가 충전된 트레이에 이식하였으며 실험기간 동안 N:P:K의 비율이 서로 다른 두 종류의 액비를 관수하였다. 세 종류의 실생묘는 대기온도 25°C/15°C 및 상대습도가 40%인 온실조건 하에서 70일간 재배하였다.

보광용 광원으로는 LED system (GF-series, Good Feeling Co. Ltd., Sungnam, Korea)을 이용하였으며 보광광강도는 일출 및 일몰시 각각 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정하였다. 보광시간은 1일당 30 및 60 분으로 하였으며 실험은 70일간 실시하였다. 실험구는 광질 및 조사시간의 차이에 따라 5개의 실험구를 설정하였는데, 단일의 적색광 보광구인 R구, 단일의 청색광 보광구인 B구 및 보광을 실시하지 않은 NL구이다.

실험개시 70일째에 세 종류 실생묘의 생체중, 건물중, 하배축길이, 절간길이, 초장, 측지수, 개화소요일수 및 개화기간을 측정하였다. 또한, 실험종료일에 식물체 앞의 기공은 레이저 스캐닝 콘포칼 시스템 (MRC1024es, Bio-Rad Microscience Ltd., Hempstead, Herts, U.K.)을 이용하여 측정하였다.

2) 통계분석

본 실험은 각 실험구당 반복수는 12였으며, 실험반복수는 1로 하였고, 분산분석과 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

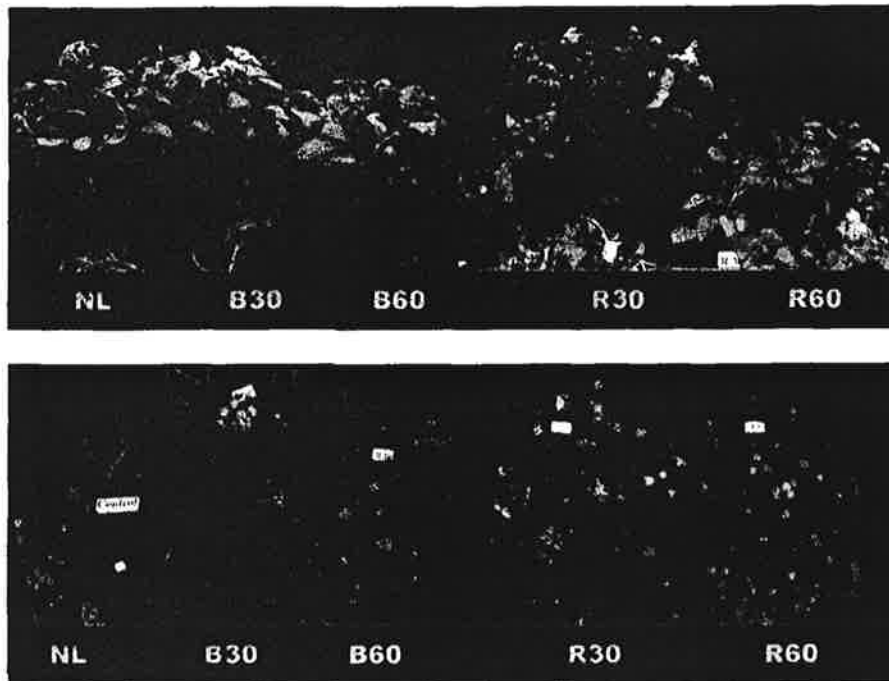


그림 4-1. 광질 및 보광시간이 다른 조건하에서 자란 아게라툼 실생묘.

메리골드 및 살비아 실생묘의 생체중은 70일간 일출 및 일몰시의 단시간 보광조사에 의한 영향을 받은 것으로 나타났는데 (그림 4-1; 4-2), 일출과 일몰시 1일 60분간 적색광을 보광한 R60구에서 메리골드 실생묘의 생체중은 보광을 실시하지 않은 자연광 조사구인 NL구에 비해 통계적으로 유의하게 증가하였다 (표 4-1). 메리골드의 경우, 적색광을 60분간 조사하는 것은 청색광 조사구인 B30구나 B60구에 비해 생체중 증가에 효과적인 것으로 나타났다. 한편, 아게라툼 및 살비아 실생묘에서는 생체중 증가에 있어서 광질 및 보광시간에 따른 영향은 없었다.



그림 4-2. 광질 및 보광시간이 다른 조건하에서 자란 메리골드 및 살비아 실생묘.

메리골드의 건물중은 적색광을 일출 및 일몰시 각각 30분씩 보광처리한 R60구에서 최대였다 (그림 4-3). 연구결과에 의하면 광질은 식물체의 성장 및 발달에 유의한 영향을 미치며, 식물체의 광합성뿐만 아니라 식물체내 전분축적에 적색광이 많은 영향을 미친다고 한다. 1일 60분의 적색광 보광처리에 의해 메리골드의 건물중 축적이 현저하였으며 화아수 증가와 같은 생식생장이나 탄수화물 축적량이 증가하였다. 오이 실생묘의 건물중 증가, 엽면적 증대, 광합성 및 기공전도도의 증가에 있어서 일출시 청색광을 5분간 보광하는 것이 효과적이라는 연구보고가 있는데, 본 연구결과, 메리골드의 성장반응 촉진효과는 적색광의 보광에 의해 촉진되었으며, 이것은 상기의 연구결과에서 나타난 바와 같이 식물체의 왕성한 광합성에 기인하는 것으로 판단된다.

메리골드에 있어서 화아발달은 광질 및 보광시간의 영향을 받았는데, 1일당 60분간 적색광을 보광한 R60구에서 화아수가 최대였다 (그림 4-4). 광질은 아게라툼과 살비아 실생묘의 화아발달에는 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않았으며, 살비아 실생묘의 개화수는 다른 실험구에 비해 대조구인 자연광구에서 유의하게 증가하였다 (표 4-2).

아게라툼과 메리골드에 있어서 청색이나 적색광 보광은 실생묘의 개화를 촉진하여 아게라툼의 경우, 적색광을 보광한 R30구 및 R60구에서 개화소요일수가 현저하게 단축되는 것을 알 수 있었으며, 청색광 보광구인 B30구에서는 식물체의 개화를 지연시켰다.

표 4-1. Total fresh weight per plant of ageratum, marigold, and salvia seedlings grown under supplemental blue or red lighting with a duration of 30 or 60 min. per day during sunrise and sunset twilight for 70 days.

Light sources	Ageratum (g)	Marigold (g)	Salvia (g)
NL ^z	4.9 a ^w	1.7 bc	5.2 a
B30 ^y	3.4 a	1.2 c	3.4 b
B60 ^y	3.5 a	1.2 c	3.6 b
R30 ^x	3.4 a	2.1 b	3.2 b
R60 ^x	3.6 a	2.7 a	3.5 b
Light quality (a)	ns	**	ns
Irradiation time (b)	ns	ns	ns
(a)×(b) ^v	ns	ns	ns

^zNatural light during the experiment.

^ySupplemental blue light irradiation for 30 or 60 min. during sunrise and sunset per day.

^xSupplemental red light irradiation for 30 or 60 min. during sunrise and sunset per day.

^wMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^vRepresent interaction between light quality and irradiation time.

한편, 메리골드 실생묘에서는 아게라툼과 달리, R60구에서 개화가 현저히 지연되는 것으로 나타났다. 살비아의 경우, 개화소요일수는 광질이나 보광시간의 차이에 따른 영향은 나타나지 않았으나, 개화기간은 R60구에서 현저하게 연장되는 것으로 나타났다. 연구결과에 의하면 단일의 청색광은 arabidopsis의 개화를 지연시키거나 메리골드의 개화를 지연시킨다고 하는데, 본 실험에 있어서는 적색광보다 청색광이 아게라툼의 개화를 지연시키는 효과가 현저하였다.

메리골드와 살비아 실생묘의 개화기간은 자연광구인 NL구에 비해 R60구에서 10일

상 연장되었는데, 초화식물에 있어서 영양생장에서 생식생장으로의 전환은 광질에 대한 식물체의 반응성에 의존하는 것으로 생각된다. 그러나, 현재 개화생리와 광질과의 관계에 대한 연구는 매우 적은 실정으로 생식생장에 있어서 명기시간과 관련된 광질의 효과에 관한 연구가 시급하다.

본 실험결과, 단일조건하에서 1일당 적색광 조사시간을 연장하는 것은 식물체의 개화기간을 연장하는 데에 효과적이며, 보광시간과 관계없이 청색광을 보광하는 것은 자연광구에 비해 개화기간을 연장하는데에 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 장일식물에 있어서 개화에 필요한 작용스펙트럼은 적색광으로 적색광의 효과는 원적색광에 의해 반진된다는 연구결과가 있는데, 이것은 phytochrome의 중개에 의한 것으로 생각된다. 메리골드와 살비아 실험묘의 경우, phytochrome활성은 1일 60분간의 적색광 조사에 의해 유지되었던 것으로 생각되며 이에 의해 자연광구에 비해 개화기간 또한 연장된 것으로 생각된다.

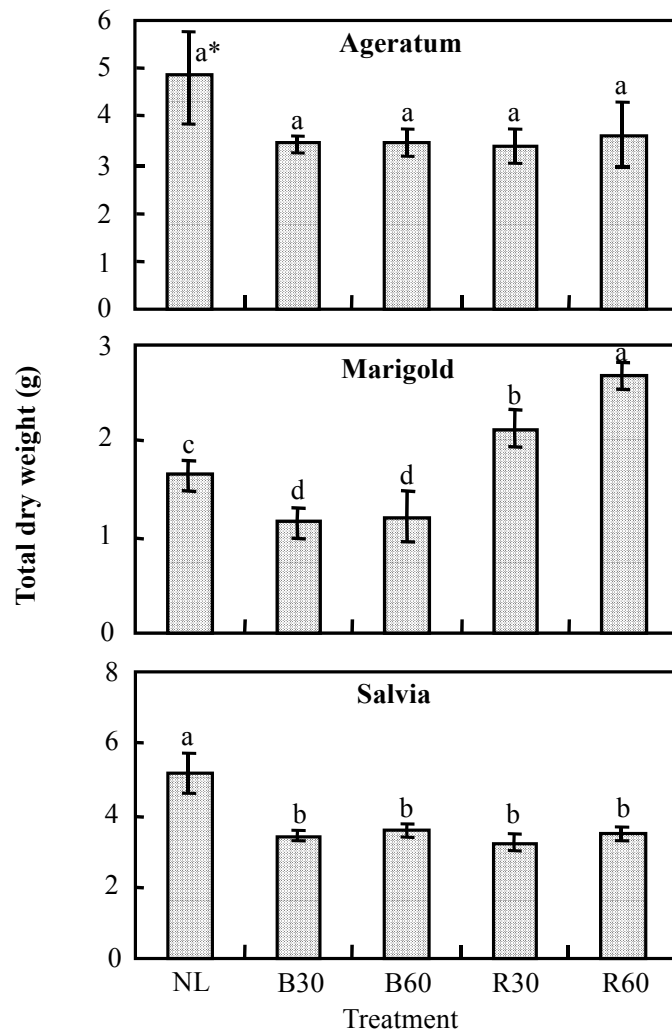


그림 4-3. 광질 및 보광시간이 다른 조건하에서 자란 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 건물중.

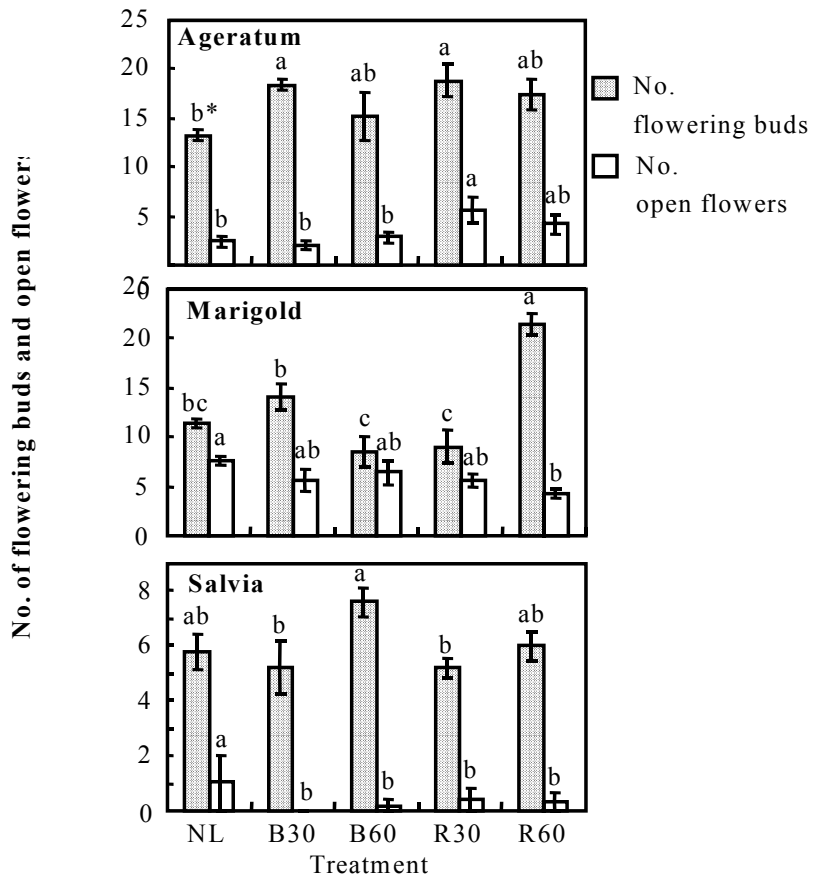


그림 4-4. 광질 및 보광시간이 다른 조건하에서 자란 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 화아수 및 개화수.

한편, 광질 및 보광시간은 아게라툼 및 메리골드 실생묘의 하배축 신장 및 제1마디 신장에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다 (표 4-3). 살비아 실생묘의 하배축은 B60구와 R30구에서 유의하게 신장하였으며 B30구에서 신장이 억제되었다. 아게라툼의 경

우, 하배측, 제1마디나 제2마디의 신장에 있어서 보광시간에 비해 광질효과가 현저하였다.

아게라툼 및 살비아 실생묘의 초장신장은 보광시간과 관계없이 청색광 보광에 의해 현저하게 촉진되었으며 메리골드의 초장신장은 자연광구에서 억제되었다 (그림 4-5). 메리골드의 절간수는 자연광구에 비해 적색이나 청색광을 보광처리의 영향을 받았는데, 아게라툼과 살비아의 경우, 식물체의 초장에 대한 영향은 인정되었으나 광질이나 보광시간의 차이에 따른 유의차는 없는 것으로 나타났다 (표 4-4).

표 4-2. Days to flowering and blooming period per plant of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings grown under supplemental blue and red lighting with a duration of 30 or 60 min. per day during sunrise and sunset for 70 days.

Light sources	Days to flowering (days)			Blooming period (days)		
	Ageratum	Marigold	Salvia	Ageratum	Marigold	Salvia
NL	52.0 b ^z	32.3 c	35.3 a	70 ^y	29.3 c	23.7 c
B30	60.0 a	32.0 c	35.3 a	70	32.3 b	28.0 b
B60	50.0 b	33.0 c	35.3 a	70	34.0 b	29.7 b
R30	38.7 c	35.0 b	36.0 a	70	36.0 b	29.7 b
R60	39.7 c	38.3 a	36.3 a	70	41.3 a	35.3 a

	Days to flowering (days)			Blooming period (days)	
	Ageratum	Marigold	Salvia	Marigold	Salvia
Light quality (a)	**	**	ns	**	**
Irradiation time (b)	**	**	ns	*	**
(a) × (b) ^w	*	*	ns	*	*

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yStill blooming after experiment in all the treatment.

^wRepresent interaction between light quality and irradiation time.

메리골드의 측지형성에 있어서 보광시간의 영향보다 광질에 따른 통계적인 유의차가 인정되었으나 자연광 및 청색광 보광조건 하에서 자란 아게라툼의 경우 측지발생

수가 증가하는 것으로 나타났다 (표 4-5). 반면에 살비아 실생묘의 측지발생에 있어서 보광광질이나 보광시간의 차이는 유의한 영향을 미치지 않았다. 이와 상반된 연구결과에 의하면 광질이 신초신장이나 측지발생에 영향을 미치지 않는다고 한다. 아게라툼과 살비아의 신초신장을 촉진하였던 청색광질은 식물체의 액아에서의 광수용을 자극하여 측지발생이 촉진되었다고 생각된다. 또한, 메리골드의 경우, 신초신장이나 측지발생에 있어서 자연광 조사구에 비해 적색과 청색의 보광처리가 효과적인 것으로 나타났다. 연구결과에 의하면 신초신장이나 측지발생은 식물생장조절물질과 같은 내생호르몬 농도 변화에 의해 영향을 받으며 이 내생호르몬은 광질의 영향을 받는다고 한다. 일반적으로 쌍자엽 식물체에 있어서 측지발생은 phytochrome중개에 의한 적색광과 원적색광의 비율에 의해 조절된다.

아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 기공형성은 일출 및 일몰시의 단시간의 보광광질에 의해 유의하게 영향을 받는 것으로 나타났다 (그림 4-6). 아게라툼 및 메리골드 식물잎의 기공수는 청색광 보광구나 자연광구에 비해 R60구에서 현저히 증가하는 것으로 나타났으며, R60구에서 자란 메리골드의 기공열림은 청색광 보광구에 비해 왕성하였다.

적색광 보광에 의한 장일처리는 다른 처리구에 비해 살비아 실생묘의 기공수를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 또한, 자연광구에 비해 적색광을 보광한 실험구에서 자란 식물체의 기공의 크기가 커졌다. 연구결과에 의하면 청색광은 엽록소 형성, 기공열림이나 광형태형성에 중요한 광질이라고 한다. 그러나, 본 실험조건 하에서 자란 아게라툼과 메리골드 실생묘의 기공열림 활성이나 기공밀도의 증가는 청색광 보다는 적색광의 보광에 의해 촉진되는 것으로 나타났다.

Figure 4-3. Hypocotyl and internode length of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings grown under supplemental blue and red lighting with a duration of 30 or 60 min. per day during sunrise and sunset for 70 days.

Light sources	Length (cm)								
	Ageratum			Marigold			Salvia		
	hypocotyl	1st	2nd	hypocotyl	1st	2nd	hypocotyl	1st	2nd
NL (cont.)	2.5 a ^z	2.5 a	2.5 abc	2.1 a	1.0 a	1.2 ab	2.4 a	2.6 b	3.5 c
B30	1.9 bc	2.4 a	2.8 ab	2.3 a	1.0 a	1.5 a	1.1 c	2.7 b	3.9 bc
B60	2.2 ab	2.8 a	3.0 a	2.2 a	1.0 a	1.2 ab	2.5 a	3.7 a	5.3 a
R30	1.6 c	2.1 a	2.2 c	1.9 a	1.0 a	1.1 b	2.2 a	3.1 ab	4.6 ab
R60	0.4 c	2.1 a	2.3 bc	2.3 a	1.0 a	1.2 ab	1.8 b	3.3 ab	4.7 ab

	Hypocotyl length		
	Ageratum	Marigold	Salvia
Light quality (a)	**	ns	ns
Irradiation time (b)	*	ns	**
(a)×(b) ^y	ns	ns	**

	1st internode length		
	Ageratum	Marigold	Salvia
Light quality (a)	**	ns	ns
Irradiation time (b)	ns	ns	*
(a)×(b)	ns	ns	ns

	2nd internode length		
	Ageratum	Marigold	Salvia
Light quality (a)	**	*	ns
Irradiation time (b)	ns	ns	ns
(a)×(b)	ns	ns	ns

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yRepresent interaction between light quality and irradiation time.

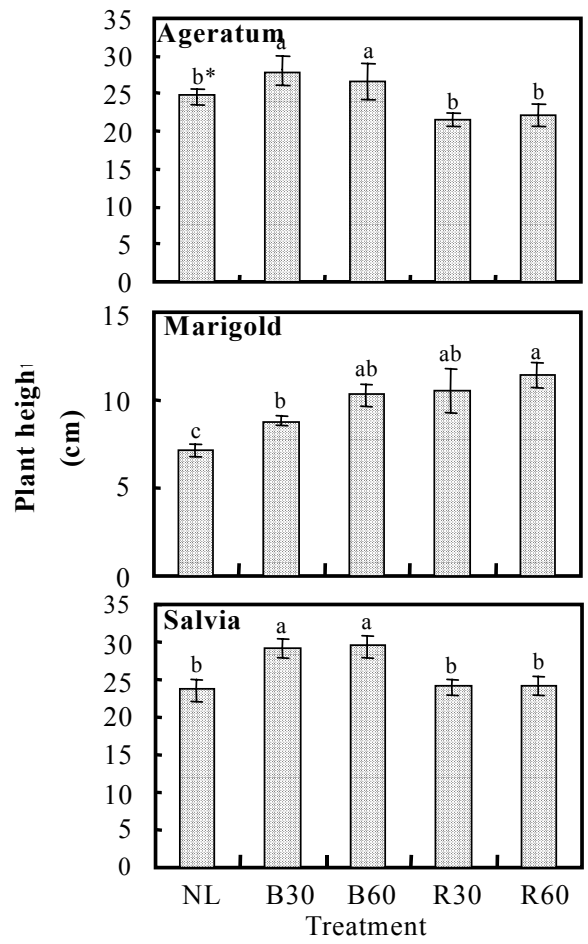


그림 4-5. 광질 및 보광시간이 다른 조건하에서 자란 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 초장.

이상으로, 봄이나 가을과 같이 일장시간이 짧은 시기 동안 $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 같은 저광의 적색광을 보광하여 일장시간을 30분이나 1시간으로 연장하는 것이 메리골드 및 살비아 실생묘의 영양생장과 형태형성을 촉진하는 데에 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 또한, 일장시간을 연장하기 위한 보광광질과 보광시간은 온실조건과 같은 개방공간에서 자라는 식물체의 형태형성적 반응이나 초화식물의 생식생장 및 건물중을 증가시키는데에 유의한 영향을 미치는 요인이라는 것을 알 수 있었다.

표 4-4. Number of internodes per plant of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings grown under supplemental blue and red lighting with a duration of 30 or 60 min. per day during sunrise and sunset for 70 days.

Light sources	Ageratum	Marigold	Salvia
NL	11.0 a ^z	5.4 b	7.6 a
B30	11.6 a	8.2 a	6.6 a
B60	10.8 a	9.2 a	8.0 a
R30	10.8 a	9.0 a	6.6 a
R60	11.0 a	9.6 a	7.0 a
Light quality (a)	ns	**	ns
Irradiation time (b)	ns	ns	ns
(a)×(b) ^y	ns	ns	ns

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yRepresent interaction between light quality and irradiation time.

☒ 4-5. Number of lateral branches per plant of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings grown under supplemental blue and red lighting with a duration of 30 or 60 min. per day during sunrise and sunset for 70 days.

Light sources	Ageratum	Marigold	Salvia
NL	20.4 a ^z	5.4 b	7.6 a
B30	19.2 a	8.2 a	6.6 a
B60	18.4 a	9.2 a	8.0 a
R30	17.0 b	9.0 a	6.6 a
R60	17.8 b	9.6 a	7.0 a
Light quality (a)	*	*	ns
Irradiation time (b)	ns	ns	ns
(a) × (b) ^y	ns	ns	ns

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yRepresent interaction between light quality and irradiation time.

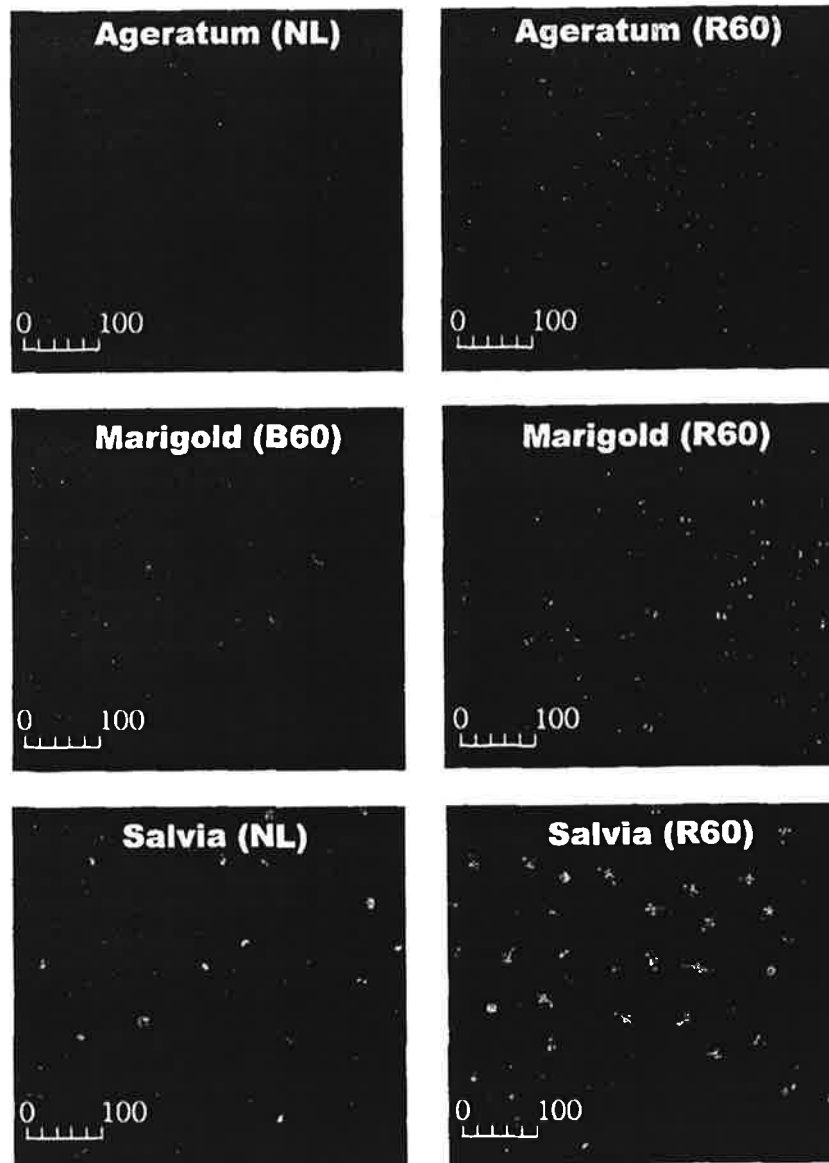


그림 4-6. 보광광질 및 보광시간이 다른 조건하에서 자란 아게라툼, 페리골드 및 살비아 실생묘의 기공.

5. 아게라툼, 메리골드 및 살비아 재배기간 동안의 이산화탄소와 에틸렌 농도변화에 미치는 광질의 영향

생장상실과 같이 환경이 조절된 조건에서 식물체의 생장에 필요한 광원은 적정의 광강도 하에서 식물체의 광형태형성 반응을 유도하고 식물체의 정상적인 성장과 발달을 촉진한다. 식물체의 생산에 있어서 공정묘의 묘질은 양호한 근부생장, 측지발생정도, 초장 및 엽색 등의 기준에 의해 결정되는데, 발광다이오드나 광질선택성 필터 등, 스펙트럼 분포가 조절된 광질과 같은 인공광원에 의해 조절된 광질은 수종의 식물체의 성장 및 형태형성에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다. 또한, 광질은 식물체의 광합성에 영향을 미치며 적색광보다 청색 및 적색광이 식물체의 광합성을 촉진한다는 연구결과가 보고되고 있다. 그러나 식물재배용 인공광원으로 발광다이오드에 의한 청색, 적색 및 이들 광의 혼합광질이 성장상실과 같은 공간내에서 식물체 종류에 따른 광합성 반응의 변화에 대한 검토는 거의 이루어지고 있지 않다.

한편, 에틸렌은 배양기내 식물체의 대량증식 과정에 있어서 칼루스형성, 액아발달 및 기내 개화 등에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있는데, 특히, 청색, 적색 및 백색의 광질은 식물체내에서의 ACC에서 에틸렌으로의 전환을 억제하는 광질이며 원적색광은 에틸렌으로의 전환을 촉진하는 광질로 알려져 있다. 최근의 연구보고에 의하면 적색광이 *Phaseolus vulgaris* 식물체 종자에서의 에틸렌 합성을 촉진시킨다고 하는데, 앞으로 식물체내의 에틸렌 합성은 식물체의 성장과 발달과 관련된 ACC synthase나 ACC관련 효소 및 ACC oxidase 등의 활성과 관련하여 검토되어야 한다고 생각한다.

본 연구에서는 청색, 적색 및 적색과 청색의 혼합광질이 세 종류의 초화식물이 자라고 있는 배양기내 이산화탄소 농도와 에틸렌 농도변화, 식물체의 성장 및 광합성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 본엽이 2매 전개된 *Ageratum* (*Ageratum houstonianum* Mill. cv. Blue Field), Marigold (*Tagetes erecta* L. cv. Orange Boy)와 *Salvia* (*Salvia splendens* F. Sello ex Ruem & Schult. cv. Red Vista)를 공시하였다. 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘는 혼합상토를 충전한 트레이 (20×20 cm)에 이식되었다.

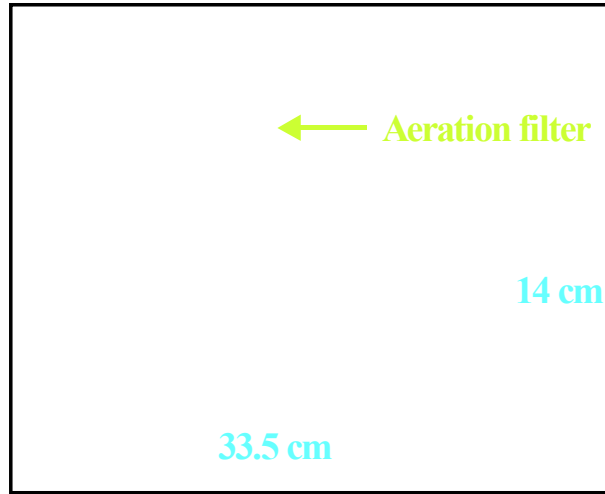


그림 5-1. 실험기간 동안 이산화탄소 및 에틸렌 농도를 측정하기 위하여 이용한 배양기.

실험기간 동안 이산화탄소 및 에틸렌 농도변화를 측정하기 위하여 그림 5-1과 같은 배양기내에 이 들 실험묘가 이식된 트레이를 설치하고 환기필터를 부착한 뚜껑으로 배양기를 봉한 후 실험을 실시하였다. 실험개시일에 수도수를 충분히 관수한 후 실험기간 동안 관수를 하지 않았다. 배양기의 뚜껑에는 광투과성을 높이기 위하여 투명의 폴리프로필렌 필름으로 처리하였으며 환기를 위하여 3개의 환기필터를 부착하였고 배양기내 환기횟수는 시간당 6.2회였다. 실험은 기온 25°C, 상대습도 60%의 이산화탄소를 사용하지 않은 성장상실 조건하에서 14일간 실시하였다.

실험구는 광질의 차이에 따라 다음과 같은 4개의 실험구를 설정하였으며 명기시간은 16시간으로 설정하였다. ㄱ) 단일의 청색광 조사구 (B구), ㄴ) 단일의 적색광 조사구 (R구), ㄷ) 청색광 적색광을 1:1비율로 혼합한 혼합광구 (BR구), ㄹ) 대조구인 형광등 조사구 (FL구)

실험기간 동안 식물체의 건물중, 생체중, 엽면적, 절간수 및 초장을 측정하였으며, 배양기내 이산화탄소와 에틸렌 농도변화를 측정하였고, 배양기내외 이산화탄소의 농도차, 환기회수 및 배양기 용적에 의해 다음과 같은 공식을 이용하여 아게라텀, 메리골드 및 살비아 실험묘의 순광합성속도를 산출하였다.

$$P_n = E \cdot V \cdot (C_{in} - C_{out}) \cdot k / n$$

P_n : 순광합성속도, E : 환기횟수, V : 배양기 용적, C_{in}, C_{out} : 배양기 내, 외 이산화탄소 농도, k : 환산계수, n : 식물체수

2) 통계분석

본 실험은 각 실험구당 반복수는 14였으며, 실험반복수는 2로 하였고, 분산분석과 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

12일간 서로 다른 광질 조건하에서 자란 실생묘의 생장은 그림 5-2와 같다. 아게라팀의 지상부 및 지하부 건물중은 적색과 청색의 혼합광 조사구인 BR구와 형광등 조사구에서 증가하였다 (그림 5-2). 메리골드 및 살비아는 적색, 청색 및 혼합광 등 광질의 차이에 따른 건물중 차이는 통계적으로 유의차가 없었다.

청색과 적색의 혼합광질은 아게라팀 및 살비아 실생묘의 엽면적 확대에 유의한 영향을 미쳐서 BR구에서 엽면적 증대가 최대였으나, 단일의 청색광질은 아게라팀과 메리골드 실생묘의 엽면적 증대를 억제하는 것으로 나타났다 (표 5-1). 살비아 실생묘의 엽면적은 형광등이나 단일의 청색광보다 혼합광 및 단일의 적색광질에 의해 유의하게 증가하였다. 아게라팀 식물체의 엽면적은 대조구에서 최대였으며 단일의 청색광질은 엽면적 확대를 억제하는 것으로 나타났다.

표 5-1. Leaf area per plant of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings grown under different light qualities for 14 days.

Light sources	Ageratum (cm ²)	Marigold (cm ²)	Salvia (cm ²)
FL (cont.)	9.7 b ^y	9.3 a	8.7 b
B (Blue light)	7.8 c	6.6 c	8.1 b
R (Red light)	8.8 b	8.0 b	9.6 a
BR (Blue+Red light ^z)	10.5 a	8.1 b	9.9 a

^z1:1 in spectral energy.

^yMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

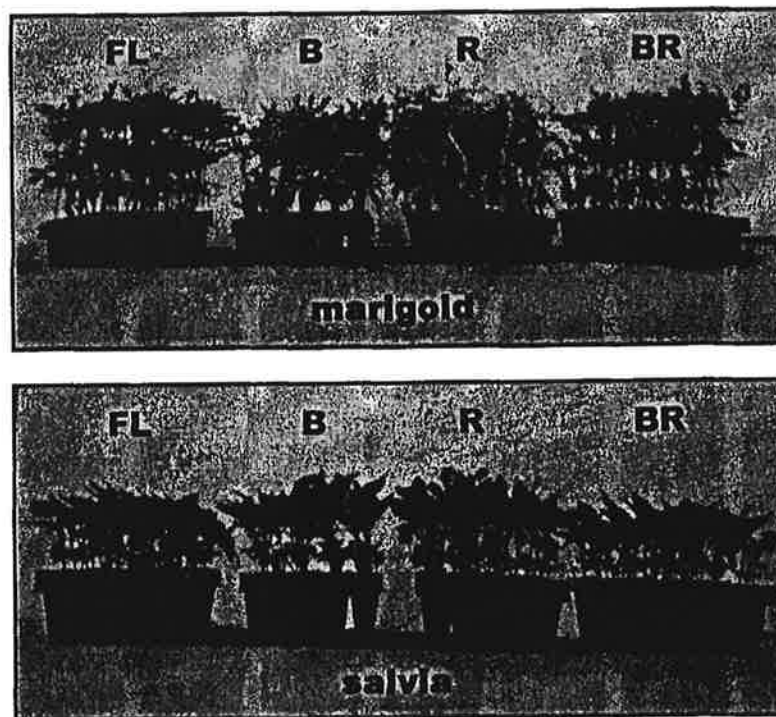


그림 5-2. 서로 다른 광질하에서 자란 실생묘의 생장.

아게라탐과 살비아 실생묘의 하배축과 제1마디 길이는 BR구나 대조구에 비해 B구 및 R구의 단일광 조사구에서 현저한 경향을 보였다 (그림 5-4). 그러나 메리골드의 제1마디 신장에 있어서는 광질의 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한, 단일의 적색광질은 아게라탐, 메리골드 및 살비아 실생묘의 초장증가에 영향을 미쳤는데, 적색광질에 의해 세 종류 실생묘의 초장신장이 현저히 촉진되었으나, 절간수 증가에 있어서는 광질의 영향이 없는 것으로 나타났다 (표 5-2).

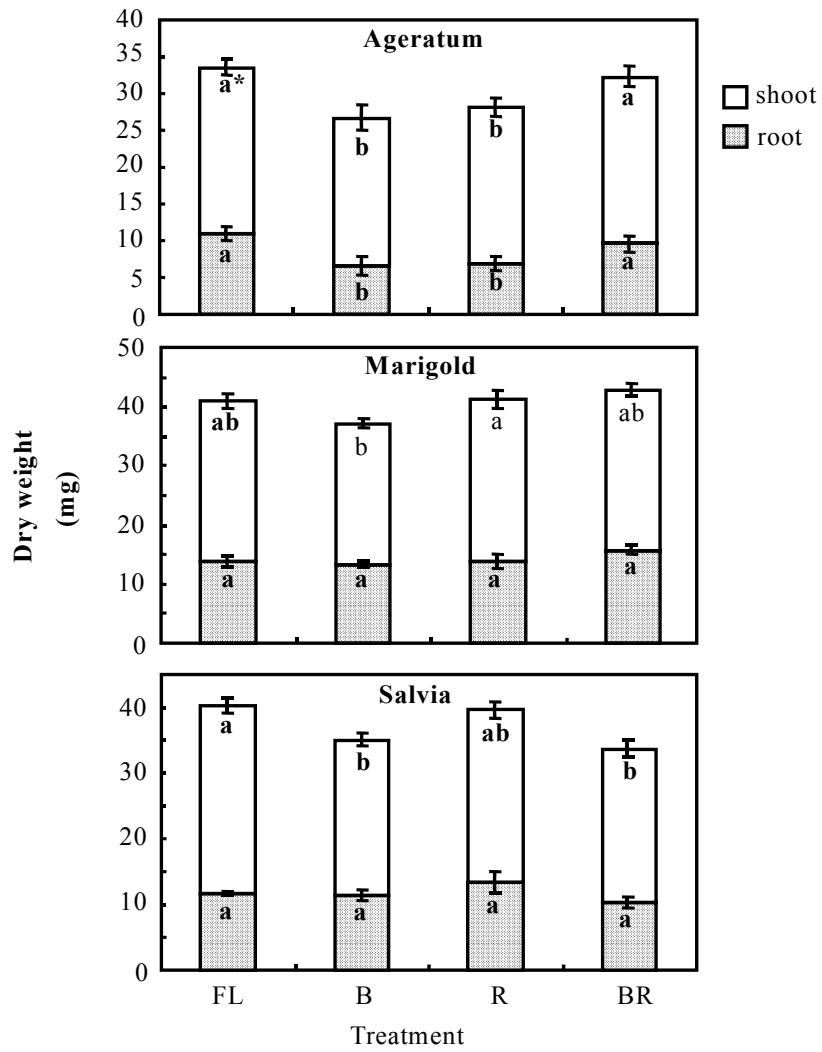


그림 5-3. 서로 다른 광질조건 하에서 성장한 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 건물중.

표 5-2. Plant height and number of internodes per plant of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings grown under the different light qualities for 14 days.

Light sources	Plant height (cm)			No. internodes		
	Ag	Ma	Sa	Ag	Ma	Sa
FL (cont.)	6.5 c ^z	9.7 ab	3.9 b	4.3 a	3.0 a	3.0 a
B	8.7 b	8.6 c	4.8 a	4.1 a	2.3 b	2.0 b
R	11.0 a	10.7 a	4.8 a	4.4 a	3.0 a	2.0 b
BR	6.1 c	9.1 bc	3.4 b	4.1 a	3.0 a	2.1 b

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

재배기간 동안 실생묘 당 순광합성속도는 아게라텀 실생묘의 순광합성속도는 실험 개시 6일후부터 대조구인 형광등 조사구에서 현저하게 감소하는 경향을 나타내었으며, 혼합광 조사구인 BR구에서 대조구에 비해 순광합성속도가 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다 (그림 5-5).

다른 광질에 비해 단일의 청색광질하에서 자란 메리골드 실생묘의 순광합성속도는 통계적으로 유의하게 감소하였으며, 살비아 실생묘의 경우, 실험기간 동안 R구와 BR구 간에 순광합성속도에 유의한 차이가 없었다 (그림 5-5). 아게라텀, 메리골드 및 살비아 실생묘의 순광합성속도는 청색광에 의해 감소하였으며, 적색광과 혼합광은 실생묘의 순광합성속도를 증가시키는 광질로 나타났다. 일반적으로 광합성에 의해 이산화탄소 농도감소는 에틸렌 생합성을 억제하므로서 이루어진다고 한다. 그러나, 적색과 청색의 혼합광, 단일의 적색광이나 형광등은 메리골드와 살비아 실생묘에 있어서 에틸렌 생합성량이 높으며 광합성속도를 증가시키는 것으로 나타났다.

연구보고에 의하면 이산화탄소 농도를 높이지 않고 광강도를 $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 고광강도조건하에서 식물체의 광합성속도는 적색광질에 의해 감소한다고 하는데, 광강도가 $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이하일 경우에는 광질에 따른 순광합성속도에는 차이가 없다고 하며, 청색광질은 기내배양된 *Betula pendula* 식물체의 광합성속도를 현저하게 증가시키는 반면 적색이나 적색과 원적색광은 혼합한 조건 하에서는 광합성속도가 감소한다고 한다. 한편, 청색과 적색을 혼합하여 조사한 조건하에서 기내배양된 식물체를 기외로 이식한 후의 생장은 단일의 청색광 조사구에서 배양된 식물체보다 현저하게 향상된다고 한다.

일반적으로 고등식물에 있어서 에틸렌 생합성은 환경요인 및 유전적인 요인, 호르

몬, 중력, 온도, 노화, 이산화탄소, 산소 및 광과 같은 스트레스 요인에 의해 영향을 받는데, 본 실험결과, 아게라팀, 메리골드 및 살비아 실험묘로부터의 에틸렌 생합성은 광질의 영향을 받는 것으로 나타났다 (그림 5-6).

아게라팀의 에틸렌 생합성은 실험개시후 6일까지는 대조구에서 촉진되었으며, B구, R구 및 BR구에서는 식물체의 성장초기에 에틸렌 생합성이 억제되는 것으로 나타났다. 아게라팀의 경우에는 실험종료일에 에틸렌 생합성에 있어서 광질의 영향이 없었다. 광질의 차이에 따른 식물체의 에틸렌 반응성은 메리골드나 살비아에 비해 아게라팀에서 낮은 경향을 나타냈다. 실험개시후 1일째에 있어서 메리골드의 에틸렌 생합성은 청색광에 의해 촉진되었으며, 대조구에서는 감소하는 경향을 보였다. 실험개시 13일째에는 형광등 조사구에 비해 적색 및 청색을 혼합한 BR구에서 에틸렌 생합성이 최대였다. 살비아 실험묘에 있어서 배양기내 에틸렌 농도는 BR구와 B구에서 가장 낮았으며 메리골드와 살비아의 경우에는 실험개시후 5일째부터 모든 실험구에서 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

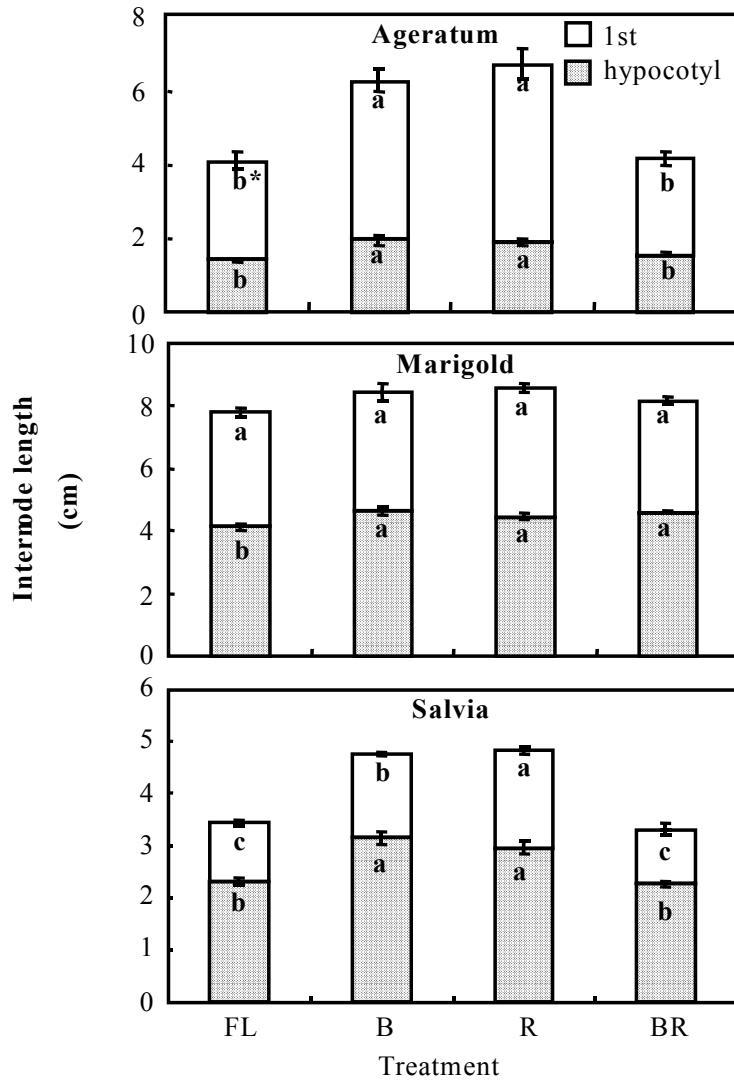


그림 5-4. 서로 다른 광질조건 하에서 성장한 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 하배축 및 제1마디 길이.

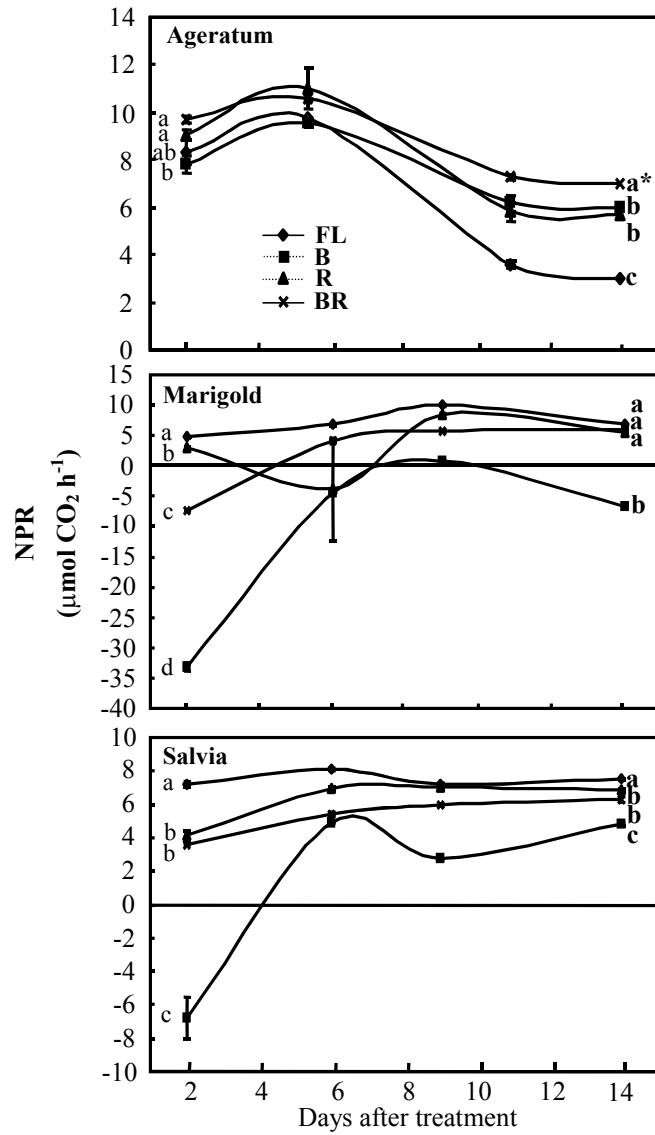


그림 5-5. 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실험묘 당 순광합성속도의 변화.

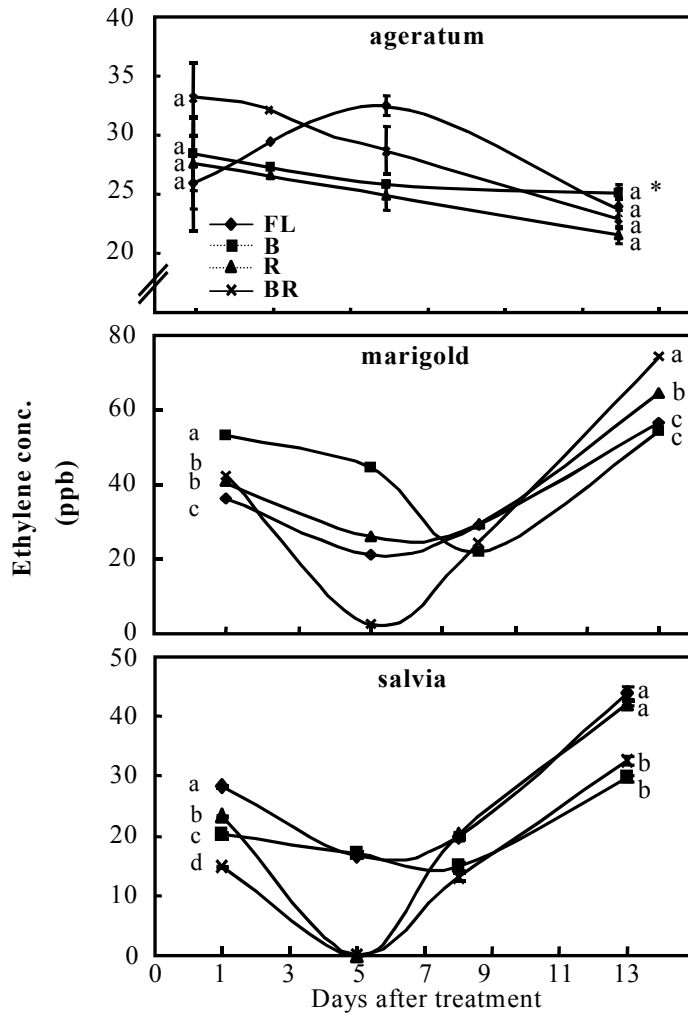


그림 5-6. 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘가 자라고 있는 배양기내 에틸렌 농도의 변화.

연구결과에 의하면, *Phaseolus vulgaris* 의 잎에 있어서 에틸렌 생합성은 적색광에 의해 억제되며, 청색, 적색, 녹색 및 백색광은 *alstromeria* 식물체의 잎과 화편에 있어서 에틸렌 생합성에 영향을 미쳐서, 식물체 잎에 있어서 ACC에서 에틸렌으로의 전환은 청색, 적색, 녹색 및 백색광에 의해 억제되는 반면 원적색광은 이 전환반응을 촉진한다고 한다. 화편에 있어서 ACC의 전환은 청색과 백색에 의해 억제되며 적색과 녹색은 에틸렌으로의 전환을 촉진하는 효과가 있다고 하는데, 본 실험조건에서는 청색과 백색의 형광등 조사에 의해 억제되는 것으로 나타났다. 특히, 메리골드 실생묘에 있어서 혼합광 조사는 단일의 청색, 적색 및 형광등에 비해 에틸렌 생성을 촉진하였는데, 실험기간 동안 배양기내 에틸렌 농도변화에 있어서 광질의 효과는 식물종이나 식물체의 성장단계에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다. 앞으로 ACC전환이나 IAA에 의한 에틸렌 생성경로가 광질의 영향을 받는다는 것에 대한 상세한 연구가 필요하다고 생각된다.

본 연구결과, 아게라툼, 메리골드 및 살비아 실생묘의 성장초기 단계에 발광다이오드에 의해 제공된 청색, 적색 및 혼합광은 식물체의 성장뿐만 아니라 식물체의 순광합성속도 및 식물체의 에틸렌 생합성에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 수종의 원예식물의 광합성능과 에틸렌 생합성에 있어서 광질이 미치는 영향에 대한 상세한 검토가 필요하며 phytochrome 및 cryptochrome과 같은 광수용체와의 상호작용에 대한 연구가 절실히 필요하다고 생각된다.

6. 광질 및 명기시간이 분화 미니 시클라멘 ‘딕시 화이트’의 개화에 미치는 영향

시클라멘은 절화나 분화식물로 매우 인기가 높은 중성식물로, 일장이나 광강도는 시클라멘의 개화 및 화아발달에 많은 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다. 일반적으로 시클라멘은 성장단계를 세 단계로 나누기도 하는데, 첫째 단계는 영양생장기로 첫 번째 꽃이 형성되기까지의 기간을 말하며, 두 번째 단계는 영양생장과 생식생장을 함께 하는 단계이며, 세 번째 단계는 액아 발달기를 말한다. 첫 번째 개화는 잎이 10-13매 발달하였을 때에 화아가 발달하기 시작한다. 현재, 시클라멘 화아유도와 잎 전개에 있어서 온도의 영향에 대한 연구가 많이 이루어지고 있지만, 시클라멘의 개화에 미치는 광환경의 영향에 대한 연구보고는 그리 많지 않은 상황이다. 개화는 식물체의 형태형성적인 반응의 하나로 광강도나 특정파장의 영향을 받는다. 광은 양적인 면에서, 또한 질적인 면에서 식물체의 성장과 발달에 영향을 미치는 환경요인으로, 질적인 면에서

의 광환경이란 일장이나 광질을 일컫는 것으로 양적인 면이란 광강도를 일컫는 말이다. 본 연구에서는 광질이 본엽이 10-12매 전개된 시클라멘의 화아발달기 동안에 식물체의 화아발달 및 생장에 미치는 영향을 구명하고자 실시하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 과종후 126일 동안 육묘한 본엽이 10-12매 전개된 시클라멘 (*Cyclamen persicum* Mill. cv. 'Dixie White')을 공시하였다. 식물체는 15×20 cm의 플라스틱 포트에 이식되었으며, 상토는 혼합상토 (BM1, Berger Horticultural Co. Ltd., Quebec, Canada)를 이용하였다. 모든 식물체는 상대습도 50%, 온도 20°C로 유지된 성장상실로 옮겨져 63일 동안 재배되었다 (그림 6-2). 재배기간 동안 N:P:K의 비율이 20:10:20인 액비를 관수하였다.

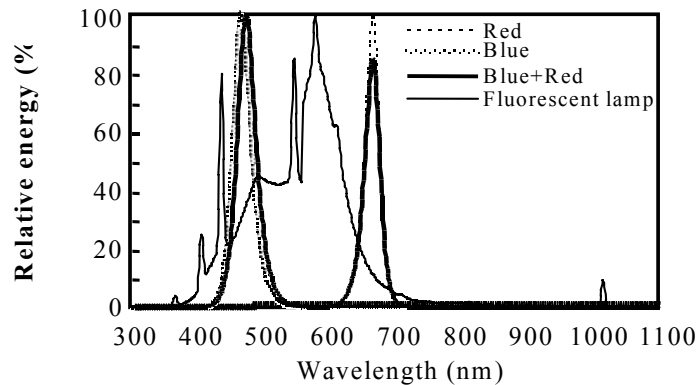


그림 6-1. 형광등, 적색, 청색 및 적색과 청색광의 혼합광의 스펙트럼 분포.

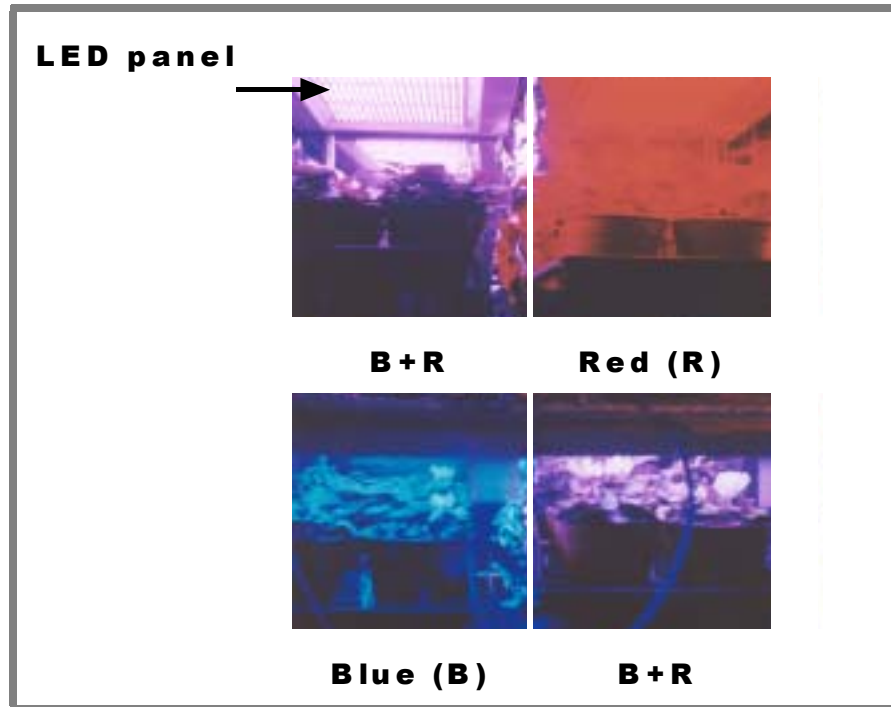


그림 6-2. 발광다이오드가 설치된 성장상실 내부의 사진.

실험구는 발광다이오드에 의한 광질과 명기시간의 차이에 따라 7개의 실험구를 설정하였다 (표 6-1). 각 실험구에 있어서 명기시간은 10 및 12시간으로 조절하였는데, 각 실험구의 광강도를 동일하게 유지하기 위하여 각 실험구의 1일 적산 광강도를 83 및 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 조절하였다. 대조구로 형광등을 10시간 조사한 FL구를 설정하였으며, 광질조절을 위하여 광조사 시스템을 이용하였고 각 광질에 따른 스펙트럼 분포는 그림 6-1과 같다. 실험개시 63일째에 시클라멘의 환경장, 화아수, 개화수 및 개화기간을 측정하였으며 식물체내 당 및 전분농도를 측정하였다.

표 6-1. General description of the experiment.

Light sources	Light Quality	Photoperiod (h day ⁻¹)	Daily integrated PPF ^z ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
FL (cont.)	fluorescent lamp	12	83±10
B10	blue light	10	100±10
B12	blue light	12	83±10
R10	red light	10	100±10
R12	red light	12	83±10
BR10	blue plus red light ^y	10	100±10
BR12	blue plus red light	12	83±10

^zPhotosynthetic photon flux.

^y1:1 ratio in spectral energy.

2) 통계분석

본 실험은 각 실험구당 반복수는 12였으며, 실험반복수는 1로 하였고, 분산분석과 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

광질은 시클라멘의 화아유도와 화아발달속도에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다 (표 6-2). 화아수와 개화수는 명기시간보다 광질의 영향을 받아 다른 처리구에 비해 청색과 적색을 1:1비율로 혼합하여 명기시간을 10시간으로 조절한 BR10구에서 최대였다. 한편 명기시간 (일장)은 단독으로 화아발달이나 개화수에 유의한 영향을 미치지 않은 것으로 나타났으며, 개화수에 있어서는 광질 및 명기시간의 상호작용의 효과가 인정되었다. 또한, 단일의 청색광 및 적색광은 명기시간과 무관히 시클라멘의 개화를 억제하는 것으로 나타났다.

적색광은 *Arabidopsis* 식물체의 개화를 지연시키며 청색광 역시 *Cryptochrome*의 중개에 의해 *Arabidopsis*의 개화를 지연시킨다는 연구결과가 보고되고 있다. 적색광은 *phytochrome*의 중개에 의해 청색광은 *Cryptochrome*의 중개에 의해 식물체의 광형태형성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, 식물체에 있어서 개화반응은 식물체 내부의 *Circadian* 리듬, 개화관련 유전자 및 광수용체의 매개에 의해 이루어지는 반응으로 이러한 요인들과의 분자생물학적 상호작용에 대한 것은 아직 불분명하다.

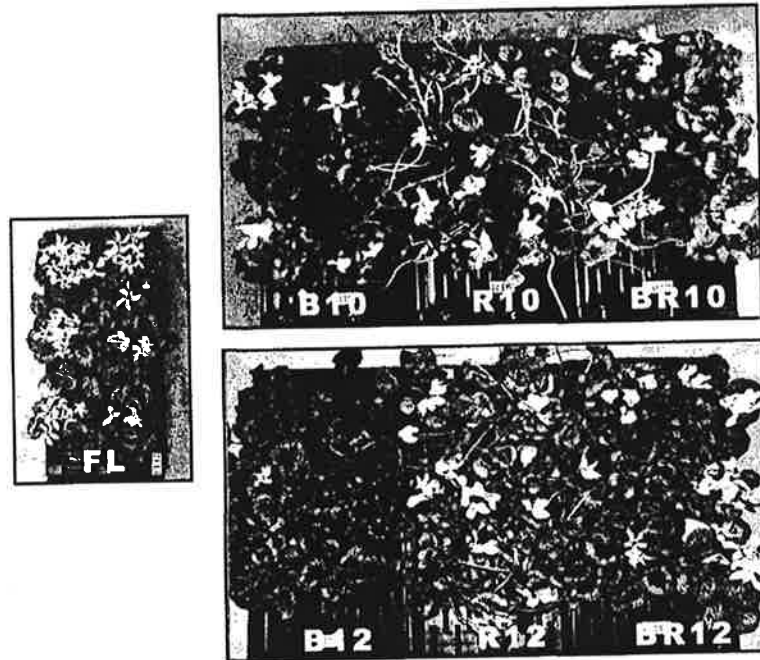


그림 6-3. 서로 다른 광질 및 명기시간 하에서 자란 시클라멘의 성장.

시클라멘의 화경장은 광질 및 명기시간의 영향을 받아 형광등에서 자란 식물체보다 적색광 조사의 장일조건하에서 현저하게 신장하는 것으로 나타났다 (그림 6-3; 6-4). 단일의 청색광을 조사한 B10구, B12구 및 혼합광 조사구인 BR10구에서 화경장 신장은 대조구에 비해 감소하는 경향을 보였는데, 광질과 명기시간의 상호작용은 화경생장에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 연구보고에 의하면 성장초기의 화경신장은 매우 느리지만 그 후에 신장속도는 매우 가속화된다고 하는데, 본 연구결과와도 일치한다고 할 수 있다. 한편, 단일처리가 절화장미의 수명을 연장시키는 효과가 있다는 연구결과에서와 같이, 단일의 청색광을 조사한 실험구와 단일처리의 적색과 청색의 혼합광 처리구에 있어서 개화소요일수가 대조구에 비해 2주 이상 단축되었으며, 특히, 단일처리의 혼합광 조사는 대조구에 비해 20일 이상 단축되는 것으로 나타났다 (표 6-3).

표 6-2. Number of flowering buds and open flowers per plant of miniature cyclamen 'Dixie White' grown under different light qualities and photoperiods on day 63.

Light sources	No. flowering buds	No. open flowers
FL (cont.)	15.0 ab ^z	6.0 a
B10	9.2 c	2.2 bc
B12	2.4 d	0.2 c
R10	9.8 c	3.4 ab
R12	11.0 bc	3.6 ab
BR10	16.2 a	4.0 ab
BR12	11.4 abc	5.8 a
Light quality (a)	**	**
Day length (b)	ns	ns
(a)×(b) ^y	ns	**

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yRepresent interaction between light quality and photoperiod.

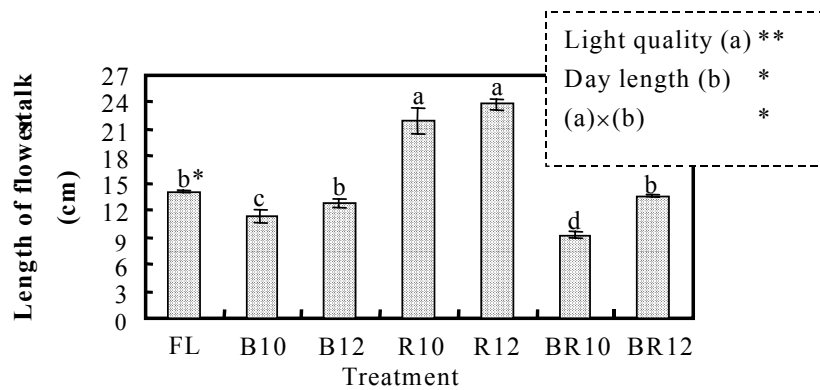


그림 6-4. 광질 및 명기시간이 다른 조건하에서 자란 시클라멘의 화경장.

광질 및 명기시간은 시클라멘의 개화기간에 영향을 미쳤는데, 형광등조사구에 비해 단일조건의 적색광 조사구에서는 20일간 개화가 연장되어 적색광이 개화기간 연장에 유의한 효과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한, 시클라멘의 개화소요일수나 개화기간연장에는 광질 및 명기시간의 상호작용에 의한 효과는 없는 것으로 나타났다. 식물체의 개화생리에 있어서 광질의 영향에 대하여 명백히 알려지지 않았으나, 본 실험을 통하여, 광질이 생식생장을 유도하는 하나의 요인으로 개화생리에 영향을 미친다는 것으로 시사한다.

표 6-3. Days to flowering and blooming period of miniature cyclamen ‘Dixie White’ grown under different light qualities and photoperiods on day 63.

Light sources	Days to flowering	Blooming period (days)
FL (cont.)	25 a ^z	20 c
B10	9 c	25 c
B12	7 c	26 bc
R10	8 c	40 a
R12	15 b	35 ab
BR10	3 c	39 a
BR12	16 b	24 c
Light quality (a)	**	**
Day length (b)	**	**
(a)×(b) ^y	ns	ns

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan’s multiple range test.

^yRepresent interaction between light quality and photoperiod.

광질은 시클라멘의 탄소와 질소대사를 조절하는 데에 영향을 미치는 것으로, 적색광하에서의 시클라멘의 생장은 탄수화물의 축적에 의한 것으로 생각되며 청색광은 암호흡과 탄수화물의 이화작용을 촉진하는 데에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 시클라멘의 지하부 및 지상부의 당 및 전분함량은 광질 및 명기시간의 영향을 받는 것으로 나타났다 (표 6-4; 그림 6-5; 그림 6-6).

적색광 조사구에서는 시클라멘의 당함량이 최대였으며, 청색과 혼합광 조사구에서

보다 당함량이 높았다. 적색광 하에서 자란 시클라멘에서 탄수화물의 축적이 높은 것은 시클라멘의 개화기간이나 화경장 신장과 같은 형태학적 반응과 관련된 것으로, 시클라멘 식물체의 지상부와 지하부에서의 탄수화물 축적은 개화기간이 연장과 생식생장이 촉진되었기 때문으로 생각된다. 이와 같이 광질과 관련된 대사반응은 다른 종의 식물체에서도 검토되었던 것으로 앞으로 탄수화물 대사에 있어서 광질의 효과에 대한 생리학적 측면에서 상세한 연구가 이루어져야 한다.

표 6-4. Reducing sugar content per dry weight of shoot and root in miniature cyclamen 'Dixie White' grown under different light qualities and photoperiods for 63 days.

Light sources	Shoot (mg g DW ⁻¹)	Root (mg g DW ⁻¹)	Total (mg g DW ⁻¹)
FL	206.6 b ^z	255.2 b	461.8 cd
B10	194.5 b	238.4 b	432.9 cd
B12	177.5 b	219.3 b	396.8 d
R10	462.3 a	335.6 a	797.8 a
R12	429.9 a	253.0 b	682.9 b
BR10	257.1 a	246.4 b	503.4 c
BR12	214.0 b	233.7 b	447.6 cd
Light quality (a)	**	**	**
Day length (b)	*	**	**
(a)×(b) ^y	ns	*	ns

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

^yRepresent interaction between light quality and photoperiod.

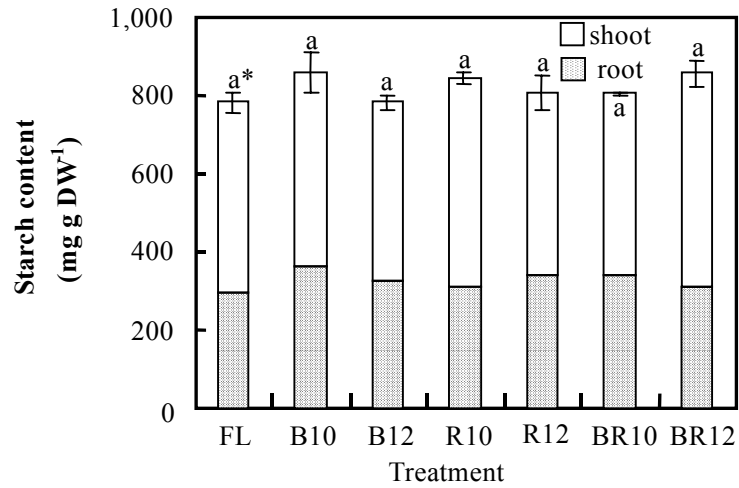


그림 6-5. 광질 및 명기시간이 다른 조건하에서 자란 시클라멘의 지하부 및 지상부 전분함량.

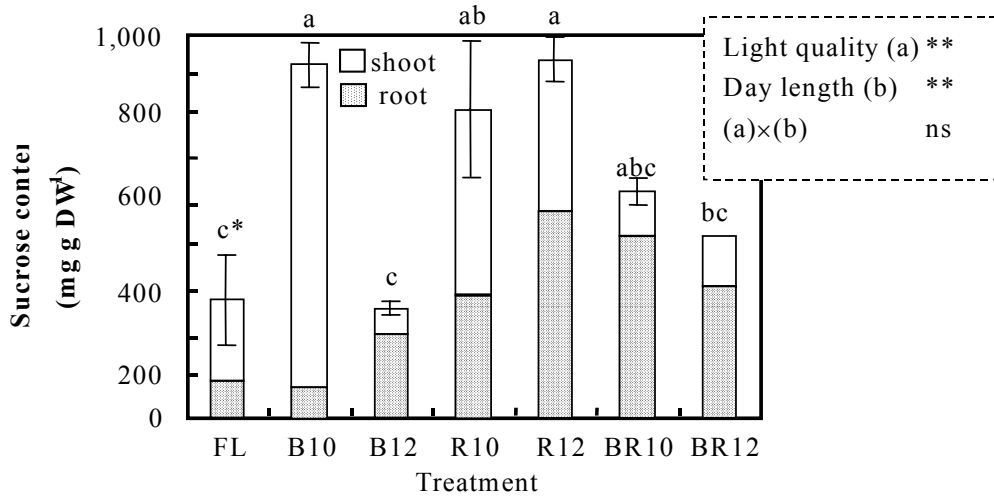


그림 6-6. 광질 및 명기시간이 다른 조건하에서 자란 시클라멘의 지하부 및 지상부 당함량.

이상으로, 분화 시클라멘 'Dixie White'의 개화기간에 광질 및 명기시간이 통계적으로 유의한 영향을 미친다는 것으로 알 수 있었으며 단일조건 하에서 적색광과 적색과 청색의 혼합광은 기존의 형광등 조사에 비해 시클라멘의 개화반응을 현저히 촉진한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 본 연구를 통하여 식물체의 상업적 생산에 있어서 발광다이오드와 같은 인공광원을 이용함으로써 광질 및 명기시간을 조절하여 식물체의 생장 및 개화를 촉진할 수 있는 가능성이 검토되었다.

7. 온실조건 하에서의 보광처리가 관엽 디펜바키아와 피커스의 생장에 미치는 영향

생장상실과 같은 폐쇄된 공간내에서의 식물생산은 외부의 환경조건과 관계없이 광강도, 스펙트럼 분포, 광질, 온도나 상대습도 등의 식물의 생장에 영향을 미치는 환경요인 조절은 온실조건에 비해 용이하다. 그러므로, 외부의 환경조건과 관계없이 식물체의 생장과 발달이 적당히 이루어진 식물체의 주년생산이 가능해진다. 이에 반하여, 온실과 같은 개방형 공간에서는 식물체의 생장과 발달에 외부 환경요인의 영향이 매우 크기 때문에 생장환경을 인위적으로 조절하여야 할 필요가 있으며 식물체의 생장과 발달을 향상시키기 위해서는 보광이나 차광 등의 광환경 조절이 필요하게 된다.

현재, 발광다이오드나 스펙트럼 필터를 이용하여 스펙트럼 분포나 광강도 면에 있어서의 광환경에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 식물생산에 있어서 식물재배용 인공광원으로서의 발광다이오드의 효율은 실용적이며 상업적인 면에서 이용가능성에 대한 검토가 상세히 이루어지고 있지 않은 것이 현실이다.

본 연구에서는 적색광, 청색광 및 적색과 청색의 혼합광을 보광할 수 있는 광조사 시스템을 개발하여, 본 시스템의 상업적 이용을 위하여 개발된 보광장치를 온실에서 식물재배에 적용하는 것으로, 특히, 광강도가 낮은 장마기간 동안 온실에서 발광다이오드를 이용한 보광처리가 관엽 분화 디펜바키아와 피커스의 생장 및 형태형성에 미치는 보광광질의 영향을 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 삼목후 180일 간 육묘한 관엽분화 *dieffenbachia* (*Dieffenbachia amoena* Hort. et Bull. cv. Camella)와 *ficus* (*Ficus elasta* L. cv. Melany)를 공시하였다. 식물재료

는 육묘용 혼합상토 (BM1, Berger Horticulture, Quebec, Canada)를 충전한 20×15 cm의 플라스틱 포트에 이식하였으며 관수는 3일 간격으로 실시하였다.

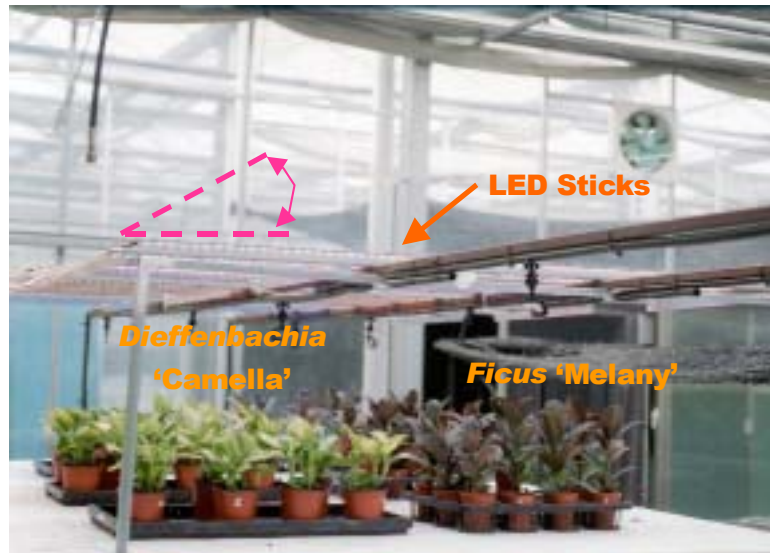


그림 7-1. 발광다이오드를 이용한 온실 이용형 보광조사 시스템.

실험구는 보광광질의 종류에 따라 다음과 같은 4개의 실험구를 설정하였다. ㄱ) 단일의 청색광 조사구 (B구), ㄴ) 단일의 적색광 조사구 (R구), ㄷ) 적색광과 청색광을 1:1의 에너지 비율로 혼합한 혼합광 조사구 (BR구), ㄹ) 보광을 하지 않은 자연광구 (NL구).

각 보광처리구에 있어서 광강도는 $30 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 하였다. 온실조건 하에서 보광에 이용한 광원은 그림 7-1과 같은 발광다이오드를 이용한 보광조사 시스템 (Good Feeling Co. Ltd., Sungnam, Korea)를 이용하였다.

실험구당 식물체수는 12개체로 하였으며 실험기간은 50일로 하였다. 실험개시 50일째에 식물체의 생체중, 엽면적, 초장, 분지수 및 전개엽수를 측정하였으며, 명기시작 후 2시간 동안 식물체 정부로부터 2-3번째 잎의 엽록소형광을 측정하였다. 또한, 식물체 잎의 당, 전분 및 왁스함량을 측정하였다.

2) 통계분석

각 실험구당 12개체의 식물을 공시하였으며 SAS 프로그램 (Version 6.21, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

실험개시 50일째에 디펜바키아의 생체중은 보광광질의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 적색광과 청색광을 1:1의 에너지 비율로 혼합하여 보광처리한 BR구에서 최대였고 (표 7-1), 피커스의 지하부 생체중은 보광에 의한 영향이 없는 반면, 디펜바키아의 건물중 증가는 혼합광 보광에 의해 촉진되었다 (그림 7-2; 7-3).

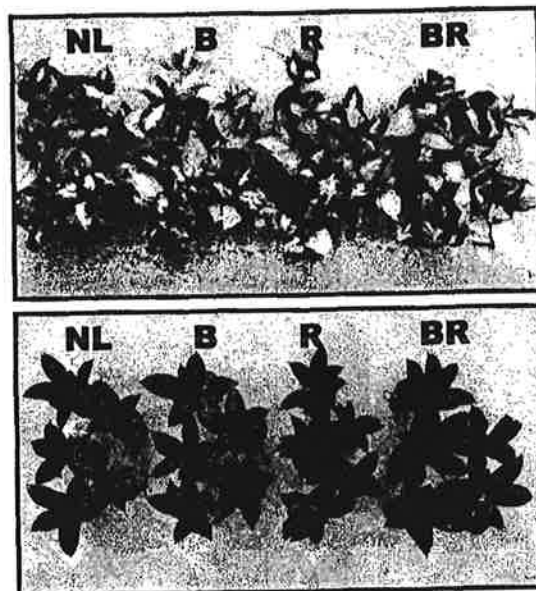


그림 7-2. 보광광질이 다른 조건하에서 자란 관엽 디펜바키아와 피커스.

생장 초기에 피커스의 전개엽수 증가는 혼합광 보광구에서 현저하였으나, 실험개시 30일 이후부터는 적색광 조사구에서의 증가가 현저하였으며, 대조구에서의 증가와 비교하여 유의차가 없었다. 피커스의 엽수증가는 보광 및 광질의 차이에 의한 영향을

받지 않았다.

표 7-1. Shoot and root fresh weight per plant of dieffenbachia ‘Camella’ and ficus ‘Melany’ plants grown under different supplemental lights for 50 days.

Light sources	Dieffenbachia (g)			Ficus (g)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
NL ^z	14.97 b ^y	19.43 b	34.40 b	14.45 bc	5.18 a	19.63 b
B ^y	15.95 ab	20.10 b	36.05 b	16.93 ab	6.17 a	23.09 a
R ^x	16.62 ab	18.18 b	34.80 b	13.20 c	6.36 a	19.60 b
BR ^w	19.63 a	25.08 a	44.71 a	18.91 a	6.87 a	25.78 a

^zNatural light without any supplemental lighting during the experiment.

^ySupplemental lighting with blue LEDs.

^xSupplemental lighting with red LEDs.

^wSupplemental lighting with blue plus red LEDs of 1:1 ratio in spectral energy.

^vMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan’s multiple range test.

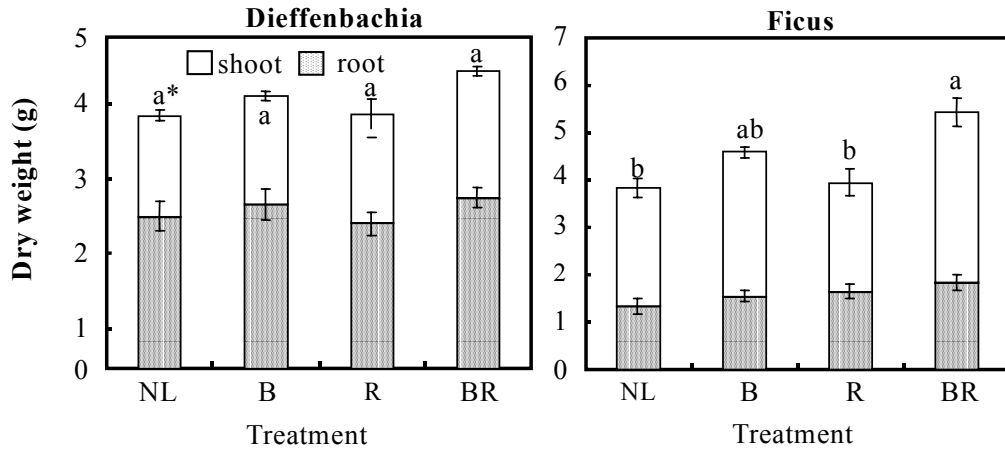


그림 7-3. 실험개시 50일째에 있어서 디펜바키아와 피커스의 건물중 변화.

디펜바키아와 피커스 식물의 엽면적 증가는 혼합광 보광에 의해 촉진되었다 (표 7-2). 광질과 엽면적 증대에 관한 연구보고에 의하면, 적색과 원적색광을 혼합하여 조사하는 것보다 적색광과 청색광을 혼합하여 조사하는 것이 식물잎의 면적증대가 현저하다고 한다. 본 실험에서는 엽수증가는 적색광과 혼합광 보광처리에서는 통계적인 유의차가 없었으며 이러한 혼합광질이 엽면적 확대나 엽두께의 증가에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 스펙트럼 에너지효율은 적색이나 청색의 단일광에서 보다 잎의 성장을 유도하는 적색광과 청색광의 혼합광에 의한 보광처리 조건하에서 높은 것으로 생각된다. 한편, 단일광 조사구인 B구 및 R구에서는 디펜바키아의 초장신장이 억제되었으며 피커스의 경우에는 단일의 적색광 보광조사에 의해 억제되었다 (표 7-2).

표 7-2. Leaf area and plant height per plant of dieffenbachia ‘Camella’ and ficus ‘Melany’ plants grown under different supplemental lights for 50 days.

Light sources	Dieffenbachia		Ficus	
	Leaf area (cm ²)	Plant height (cm)	Leaf area (cm ²)	Plant height (cm)
NL	265.3 b ^z	5.1 a	222.7 b	11.0 a
B	298.7 b	4.2 b	259.6 ab	11.1 a
R	278.5 b	4.2 b	211.2 b	9.9 b
BR	326.6 a	4.8 a	280.7 a	12.5 a

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan’s multiple range test.

표 7-3. Number of lateral branches and leaf length/leaf width ratio (LL/LW ratio) per plant of dieffenbachia ‘Camella’ and ficus ‘Melany’ plants grown under different supplemental lights for 50 days.

Light sources	Dieffenbachia		Ficus	
	No. branches	LL/LW ratio	No. branches	LL/LW ratio
NL	5.6 b ^z	1.8 a	-	2.3 a
B	6.6 b	1.8 a	-	2.3 a
R	7.4 b	1.8 a	-	2.4 a
BR	8.4 a	1.8 a	-	2.3 a

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan’s multiple range test.

적색광과 청색광의 혼합광 보광처리는 피커스의 분지에는 영향이 없었으나, 디펜바키아의 분지수 증가에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 사용되는 수종의 생장억제제는 초화식물의 식물체 초장을 억제하기 위하여 상업적으로 이용되기도 한다. 그러나, 피커스나 디펜바키아와 같은 관엽식물의 경우, 초화식물과 달리 적당히 발달된 잎과 어우러진 초장을 유지하는 것이 중요하다. 다수의 측지가 발생되어 적당한 초장을 이룬 식물체 생산은 온실 조건하에서 단일광을 보광하는것보다 청색광과 적색광을 혼합하여 보광처

리하는 것이 유효하다는 것을 알 수 있었다. 장마기간과 같이 광강도나 광질등의 광환경이 식물체의 생장에 부적절한 경우, 청색, 적색이나 이들 광을 혼합하여 보광하므로써 비정상적인 잎 성장을 감소시키고 정상적인 식물체의 생산성을 향상시키는 하나의 방법으로 생각 된다.

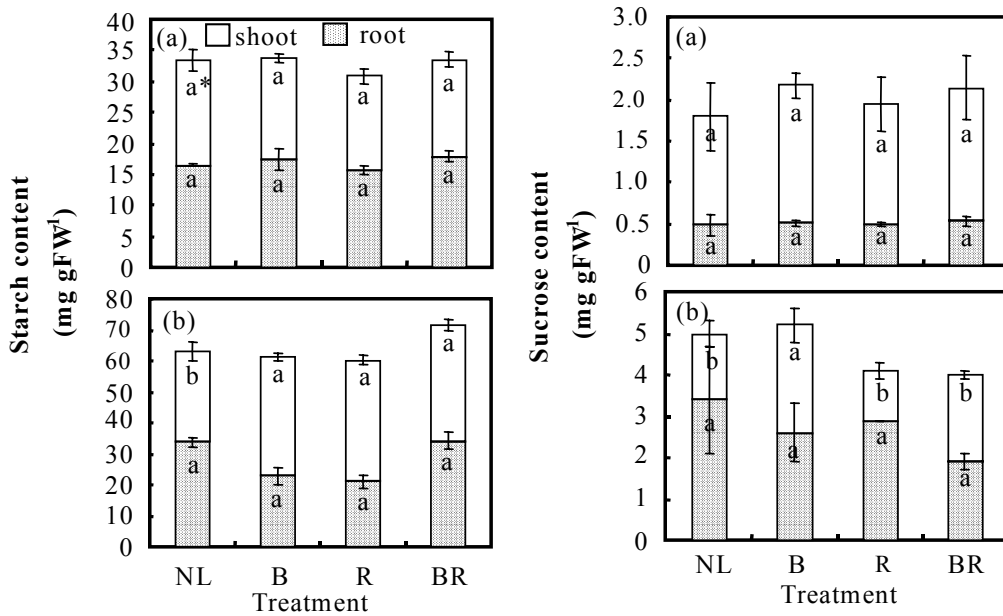


그림 7-4. 보광하에서 50일간 재배된 관엽 디펜바키아와 피커스의 당 및 전분함량의 변화.

보광광질은 관엽 디펜바키아의 지상부와 지하부에 있어서 당 및 전분함량 변화에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다 (그림 7-4). 피커스의 지하부에 있어서 당 및 전분함량에는 광질에 따른 차이가 없었으나, 지상부에 있어서 전분함량은 보광을 실시하지 않은 자연광구에 비해 보광처리한 실험구에서 증가하였으며, 특히, 당함량은 청색광을 보광한 처리구에서 유의하게 증가하였다. 또한, 청색광은 강낭콩 식물체의 성장 및 탄수화물 축적에 매우 유효한 것으로 보고되고 있으며, 단백질 합성능을 향상시키는 광질로 보고되고 있다. 본 실험 조건에서는 피커스의 당 및 전분함량 증가에 있어서 단일광 보광보다 혼합광을 보광하는 것이 효과적으로 나타났는데, 이것은 아마도 phytochrome과 cryptochrome의 상호작용에 의해 증대된 효소합성이 증가되었기 때문으로 생각된다.

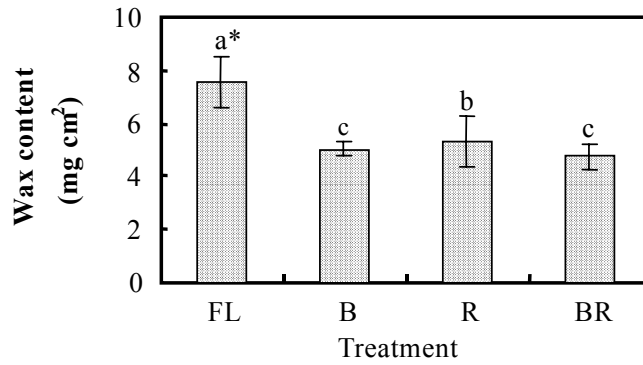


그림 7-5. 실험개시 50일째에 있어서 피커스 식물체의 왁스함량 변화.

표 7-4. Chlorophyll and carotenoid content in shoot fresh weight of dieffenbachia and ficus plants grown under different supplemental lights for 50 days.

Light sources	Dieffenbachia (mg gFW ⁻¹)		
	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid
NL	1.163 a ^z	0.366 a	0.506 a
B	0.639 a	0.538 a	0.286 b
R	1.051 a	0.294 a	0.480 a
BR	1.246 a	0.361 a	0.530 a

Light sources	Ficus (mg gFW ⁻¹)		
	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid
NL	1.094 a	0.441 a	0.508 a
B	1.345 a	0.509 a	0.514 a
R	1.332 a	0.406 a	0.589 a
BR	1.329 a	0.498 a	0.526 a

^zMeans followed by a same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

한편, 식물체 잎의 왁스성분은 증산작용에 의한 식물체 잎으로부터의 수분상실을 억제하는 등 식물체를 환경으로부터 보호하는 중요한 성분의 하나로 알려져 있다(그림 7-5). 관엽

피커스의 잎의 왁스성분을 추출한 결과, 청색광과 적색광을 혼합하여 조사한 실험구와 단일의 청색광을 조사한 실험구에서 엽면적당 왁스함량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 수종의 식물체의 잎두께는 저광강도의 청색광 조사와 적색:원적색광의 비율에 의해 영향을 받는다는 연구보고가 있는데 앞으로 광질과 잎의 두께 및 왁스형성과의 관련성에 대한 연구가 필요하다.

발광다이오드를 이용한 보광광질은 관엽 디펜바키아의 엽록소 함량에 유의한 영향을 미치지 않았으며, 카로티노이드 함량은 단일의 적색광 및 혼합광 조사에 의해 다른 실험구에 비해 증가하는 경향을 나타내었다 (표 7-4). 적색광 보다 청색광 조사에 의해 엽록소 a와 b의 함량이 증가한다는 연구결과가 보고되어 있으나, 본 실험조건에서는 관엽 피커스 식물체에서 엽록소 합성은 이들 광질의 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.

피커스 식물체에 있어서 엽록소 a와 b의 함량 비는 대조구와 비교하여 적색광 조사구에서 2배 이상 증가하였으며, 대조구와 적색광 보광구에서 카로티노이드 함량에는 통계적인 유의차가 인정되지 않았다. 엽록소 합성에 미치는 적색 및 청색광질 효과는 광강도의 효과에 비해 그다지 명백하지는 않으나, 이상의 결과는 장마기간과 같이 비교적 광강도가 낮은 조건하에서 엽록소 합성에 청색과 같은 특정파장의 광질이 영향을 미친다는 것을 시사한다.

실험개시 50일째에 서로 다른 보광광질 조건하에서 재배한 디펜바키아 식물체의 순광합성속도를 산출한 결과, 단일광 보광구보다 혼합광 보광구 및 대조구에서 높은 것으로 나타났으며, 피커스의 경우, 혼합광 조사구나 적색광 조사구에서 증가하였다 (그림 7-6). 구름이 낀 여름철의 온실조건하에서 절화장미를 생산하는 경우, 보광을 실시한 결과 장미수량이 증가하고 신초부 건물중이 증가한다는 보고가 있다.

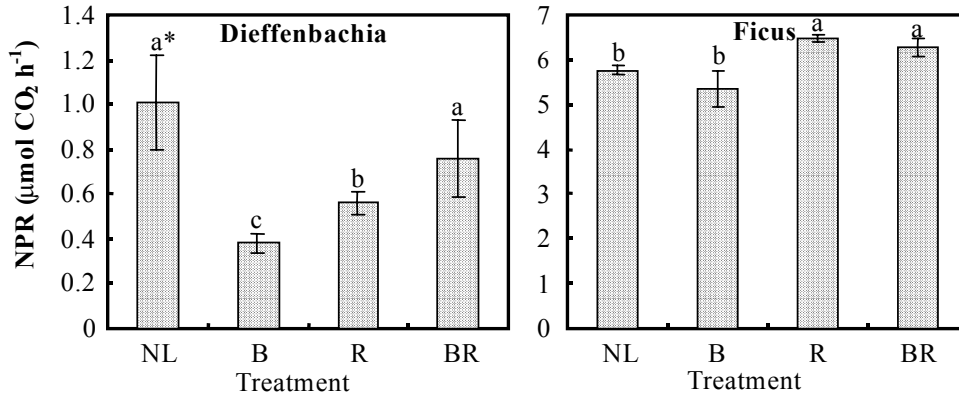


그림 7-6. 실험개시 50일째에 있어서 디펜바키아와 피커스의 순광합성속도.

또한, 성장상실 조건하에서 수 종의 초화식물의 광합성속도는 형광등조사구에 비해 적색광과 청색광을 혼합하여 조사한 실험구에서 현저히 증가하는 것으로 알려져 있는데, 이와 같이 광질에 따라 광합성능이 다른 것은 수 종의 식물체에 있어서 광합성 능력을 증가시키는 특정파장의 광질에 따라 식물종과 생리학적 대사과정간에 다양한 차이점을 갖고 있기 때문으로 생각된다. 일반적으로 장마기간과 같이 광강도가 낮은 시기에 온실조건 하에서 식물체의 성장 및 광합성에 필요한 광포화점 확보는 자연광에 의한 광강도만으로는 불충분하여 보광을 필요로 하게 되는데, 광강도가 식물체의 성장 및 광합성에 충분하지 않은 시기에 특정파장의 광질을 이용하여 보광하므로써 두 종류의 관엽식물의 광합성능을 유지할 수 있었던 것으로 생각된다.

이상으로 온실조건하에서 발광다이오드를 이용한 보광장치에 의해 제공된 청색, 적색 및 혼합광질은 관엽 디펜바키아와 피커스 식물체의 다양한 성장 및 발달과정에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그러나 식물체의 제2차 대사과정, 잎발달, 색소형성이나 광합성능에 관한 생리학적 측면에서의 특성이 그 밖의 다른 식물종과는 매우 상이하다는 것을 알 수 있었다. 본 실험결과, 발광다이오드를 이용하므로써 겨울철이나, 장마기간 등, 광강도나 특정파장의 광질특성을 향상시킬 수 있으며, 온실에서 고품질 분화생산에 있어서의 이용가능성이 검토되었다.

8. 적색광 조사가 카네이션 ‘마스터’와 장미 ‘레드 산드라’의 절화수명과 품질에 미치는 영향

화훼류의 절화 수확후 절화수명연장 및 품질유지는 화훼작물의 가치를 결정하는 매우 중요한 요인으로 절화의 수송시간과도 관련된다. 현재, 절화의 수명연장과 품질유지를 위하여 다양한 선도보존제가 이용되거나 실험되고 있다. 절화류에 있어서 꽃이 만개하거나 화색이 발현되는 과정에서는 다양한 물질과 에너지를 필요로 하게 된다. 특히, 박테리아에 의한 절화류의 위조나 꽃목굽음 현상등과 같은 생리학적, 형태학적인 반응은 절화장미의 수명을 단축시키는 원인이 되고 있다.

일반적으로 실내조건 하에서 형광등은 인간이나 실내식물에 대한 광원으로 이용되고 있으며 이 광원은 식물체의 생장을 위해 필요한 광과장역 이외의 여러 과장역을 포함하고 있기 때문에 식물체의 영양원과 관계없이 식물생장을 위한 적당한 광원이라고 할 수 없다. 분화나 절화류의 수확후 품질은 실내환경 조건하에서 이들 식물의 광합성을 유지하는 데에 영향을 받게 되기 때문에 수확 시에 이들 식물의 탄수화물 수준을 높게 유지하는 것이 매우 중요하다. 탄수화물 수준을 높게 유지하기 위해서는 적당한 광조건 하에서 식물을 재배하여야 하지만 이들 식물의 저장시, 수확후나 소비자에게 수송될 때까지의 품질에 미치는 영향에 대해서는 그다지 많은 연구가 진행되어 있지 않다.

본 실험에서는 수확후 절화 카네이션과 장미의 절화수명과 품질유지에 있어서 환경요인 중에 광질의 영향을 고려하여, 적색의 광질효과에 대하여 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 수확후 48시간 이내의 절화카네이션 (*Dianthus caryophyllus* L. Master)과 장미 (*Rosa hybrida* L. cv. Red Sandra)를 사용하였다. 카네이션과 장미는 직경 2-2.5 cm 전개된 것으로 선택하였으며 절간장을 45 cm로 하여 물속 자르기를 실시한 후에 증류수 100 ml가 채워진 시험관에 꽂아 실험을 실시하였다. 절화보존수의 증발을 막기 위하여 시험관 입구는 파라필름으로 봉하였으며, 실험기간 동안 살균제는 첨가하지 않았다.

실험구는 절화보존용 광원의 종류 및 광강도에 따라 다음과 같은 5개의 실험구를 설정하였다. 1) 증류수에 선도보존제를 첨가하지 않고 광원을 형광등으로 하여 광강

도를 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정한 FT구 (대조구), ㄴ) 증류수에 선도보존제를 첨가하고 광원을 형광등으로 하여 광강도를 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정한 FTP구, ㄷ) 선도보존제를 첨가하지 않고 형광등과 적색광을 혼합하여 광강도를 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정한 FTR구 (혼합광 조사구에 있어서의 파장역은 그림 8-1과 같다), ㄹ) 증류수에 선도보존제를 첨가하지 않고 광원을 적색광으로 하여 광강도를 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정한 RL구, ㅁ) 증류수에 선도보존제를 첨가하지 않고 광원을 적색광으로 하여 광강도를 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 설정한 RH구.

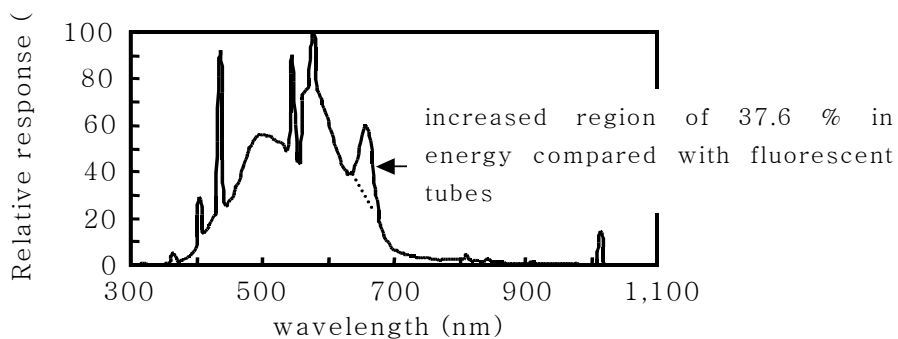


그림 8-1. 형광등과 적색광을 혼합한 실험구의 파장분포.

실험기간 동안 절화의 화경, 위조정도와 절화수명 및 절화의 생체중을 매일 측정하고 각 처리구당 30%이상이 위조되었을 때를 기준으로 하여 위조로 판정하였다. 또한, 절화장미의 경우, 화편이 하나이상 위조되고 꽃목이 30° 각도로 굽었을 때를 꽃목굽음 현상으로 처리하였다.

2) 통계분석

본 실험은 각 실험구를 2반복 처리하였으며 각 처리구당 체 반복수는 10이었으며, 분산분석과 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

나. 결과 및 고찰

저광강도의 적색광을 조사한 RL구에 있어서 절화 카네이션의 화경전개는 다른 실

험구에 비해 억제되는 것으로 나타났다 (그림 8-2). 고광강도의 적색광을 조사한 RH구나 증류수에 선도보존제를 첨가한 FTP구에서 절화 카네이션의 화편이 완전하게 전개되었다. 또한, 이 두 실험구에 있어서는 최대의 화경장을 나타내었다 (그림 8-3).

한편, 대조구와 형광등에 선도보존제를 첨가한 실험구에서는 내부 화편이 말리거나 위조되는 현상이 나타났다. 일반적으로 수확후 카네이션 화편이 말리거나 위조되는 현상은 박테리아에 의한 것으로 보고되고 있다. 그러나, 본 실험에서 선도보존제를 처리하거나 적색광을 조사한 것이 화편의 위조를 초래한 원인이었는지는 불분명하다. 왜냐하면 본 실험에서는 실험기간 동안 절화주변의 에틸렌 농도나 증류수내의 박테리아 농도를 측정하지 않았기 때문이다. 절화 카네이션의 완전한 화경전개는 고광강도의 적색광을 조사한 실험구에서 이루어졌는데, 이는 비록 증류수내에 선도보존제나 영양분이 첨가되지는 않았으나 광강도가 높은 것에 의해 절화 카네이션의 광합성 능력이 다른 실험구보다 향상되므로서 화경전개에 필요로 하는 에너지를 충족시킬 수 있었다고 생각된다.

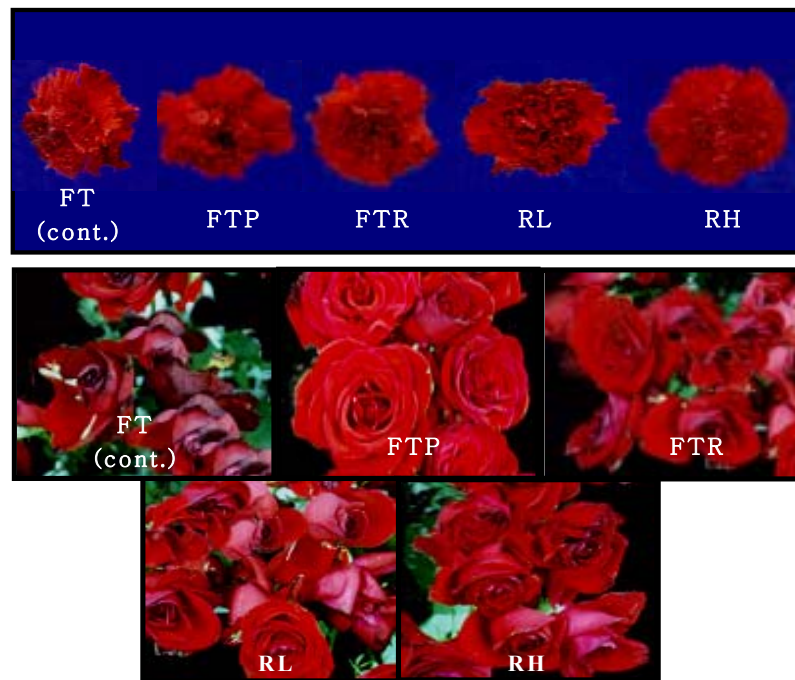


그림 8-2. 서로 다른 광원 및 광강도 조건 하에서 보존된 절화 카네이션과 장미의 화경전개.

절화장미의 화경장은 저광강도의 형광등을 광원으로 하여 증류수내에 선도보존제를 첨가한 FTP구에서 최대였다 (그림 8-2). 절화장미의 화경은 실험개시 2일후에 완전히 전개되었는데, 이는 절화장미의 화편전개가 화편의 탄수화물 상태에 의존한다는 연구보고와 일치하고 있다. FTP실험구에서는 다른 실험구와 달리 증류수에 당이 포함된 선도보존제가 첨가됨에 따라 화편전개에 필요한 에너지가 충족된 것으로 생각된다.

한편, 적색광이나 형광등과의 혼합광 조사구에서는 절화기간 동안 화경의 전개가 억제되었다. 고광강도의 적색광을 조사한 RH구에서는 절화기간 동안에 화편이 떨어지거나 위조되는 일없이 화경이 적절한 수준에서 화경장이 유지되었다 (그림 8-2). 일반적으로 절화장미의 관상가치는 화편이 완전히 전개된 절화보다 화경장이 어느 정도 수준에서 유지된 것이 높은 것으로 알려져 있는데, 절화장미의 화경장 유지에 고광강도의 적색광이 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 절화장미의 절화기간 동안에 광강도가 높을 경우 화편의 색이 짙어지고 화경전개가 완전히 이루어지지 않았다는 연구결과가 보고되어 있는데, 본 실험에서는 고광강도의 적색광 조사구 보다는 저광강도의 적색광 조사구에서 화편의 색이 짙어지는 현상이 나타났으며 화경전개도 억제되었다.

절화장미와 절화 카네이션의 절화기간 동안의 생체중 변화는 그림 8-3과 같다. 절화기간 후기에 절화 카네이션의 생체중 변화는 RH구에서 가장 경미한 것으로 나타났는데, 생체중 변화 경향은 FTR구와 유사하였다. 실험개시 7일째부터 절화 카네이션의 생체중 감소는 FTR구와 RH구에서 매우 작은 것으로 나타났는데, 이는 적색광을 조사하거나 형광등이 갖는 적색광역을 보광적으로 높임으로서 절화 카네이션 잎의 광합성능력을 유지할 수 있었다고 추정되었다.

절화 카네이션의 내부화편의 위조는 그림 8-2에서 보는 바와 같이 대조구와 저광강도의 적색광 조사구에서 관찰되었으며, 다른 처리구에 비해 절화수명 또한 짧은 것으로 나타났다 (표 8-1). 대조구인 FT구에서 실험개시 2일 후부터 생체중은 감소하였으며 이것은 절화기간 동안 절화의 수분흡수가 감소하였기 때문으로 생각된다. 이상으로 절화 카네이션의 절화수명과 품질에 있어서 가장 유효한 광질은 고광강도의 적색광으로 생각되며 또한 기존의 형광등에 적색광을 혼합하여 조사한 혼합광도 유효한 것으로 나타났다.

Table 8-1. Influence of light qualities on vase life in carnation and rose cut flowers.

Light treatment	Vase life (days)	
	Carnation 'Master'	Rose 'Red Sandra'
Fluorescent tubes (FT) of low* PPF (cont.)	10.5b***	3.8c
FT of low PPF + preservation solution (FTP)	10.5b	8.4a
Mixture light of FT + red of low PPF (FTR)	10.8a	3.6c
Red alone of low PPF (RL)	10.0b	7.0b
Red alone of high** PPF (RH)	10.9a	8.0a

* $50 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

** $90 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

*** $P < 0.05$.

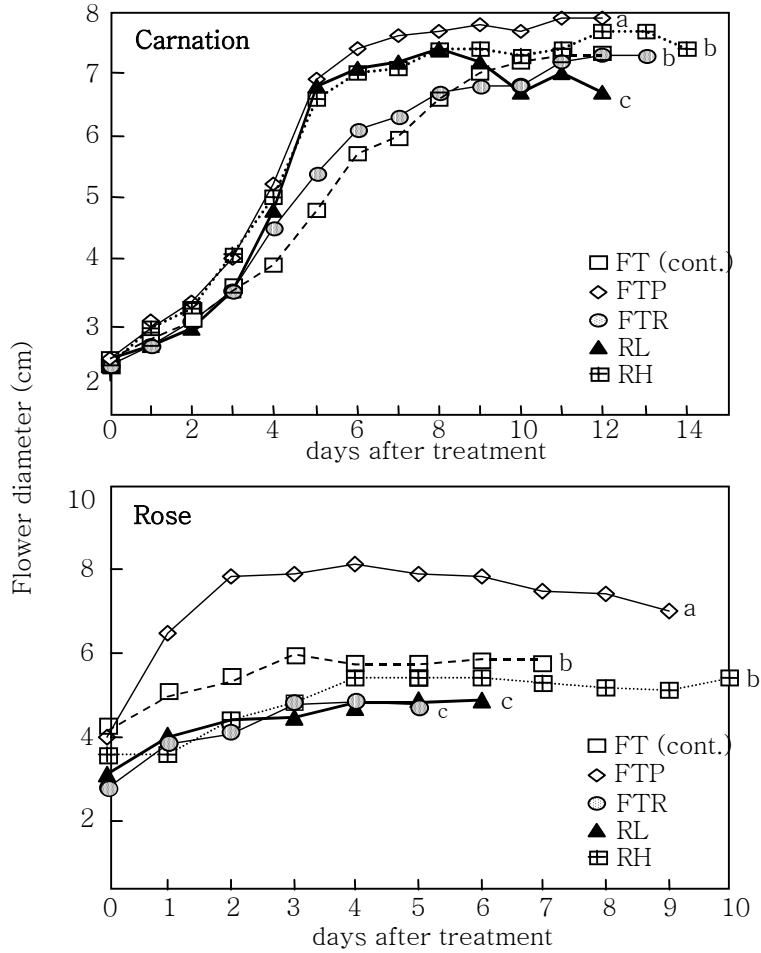


그림 8-3. 절화기간 동안 절화 카네이션과 절화장미의 생체중 변화.

한편, 절화장미의 경우, 처리후 6일까지 대조구나 FTP구에 있어서 절화의 수분흡수량에 있어서는 통계적인 유의차가 없었다. 더욱이, 절화장미의 수분흡수는 처리개시 6일부터 폐화까지 FTP, RL구와 RH구에서 억제된 것으로 나타났다. 또한, 광강도의 고저와 관계없이 FTP구나 RH구에서는 수분 흡수량이 다른 실험구에 비해 낮았지만 처리후 6일까지 위조현상은 관찰되지 않았으며, 대조구, RL구 및 FTPrndptj 위조가 발생하는 것으로 나타났다. 절화기간 마지막 날에 있어서 절화장미의 수분흡수량은 FTP구에서 가장 높았다. 절화기간 동안에 수분흡수량이 적었던 RH구의 절화기간은 다른

처리구에 비해 4.2일 연장되는 것으로 나타났다 (표 8-1). 고휘강도의 적색광 조사구와 절화의 선도보존제를 처리한 FTP구간에 절화 장미의 절화수명은 통계적인 유의차가 보이지 않았다.

절화장미의 절화기간 동안, 절화수명은 고휘강도의 적색광 조사구에서 연장되었으나, 위조 및 꽃목굽음 현상이 대부분의 처리구에 있어서 나타났다. 이상의 결과로부터 고휘강도의 적색광은 형광등에 비해 수분흡수량과 관계없이 절화의 수명연장에 효과적인 광질이었다고 할 수 있는데, 이는 고휘강도와 관련된 절화장미의 광합성과 관련된 것으로 생각된다.

절화장미의 품질면에서 꽃목굽음 현상은 고휘강도의 적색광을 조사한 실험구에서 현저히 감소하는 것으로 나타났다 (그림 8-4). 저광강도의 대조구, FTR구, 및 FTP구에 있어서 꽃목굽음 현상은 절화기간 동안에 60%이상 발생하였다. 일반적으로 절화장미의 꽃목굽음 현상은 잎에서의 수분손실이나 줄기에서의 수분흡수능의 차이, 또는 식물의 다른 기관에서의 수분흡수능이 다르기 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 밖에도, 절화기간동안의 수분흡수나 꽃줄기부분의 미생물에 의한 감염에 의해 발생하는 것으로도 알려져 있는데, 미생물 방제를 위한 살균제의 사용으로 절화장미나 카네이션 등 그 밖의 절화류의 수명연장을 도모하고 있다.

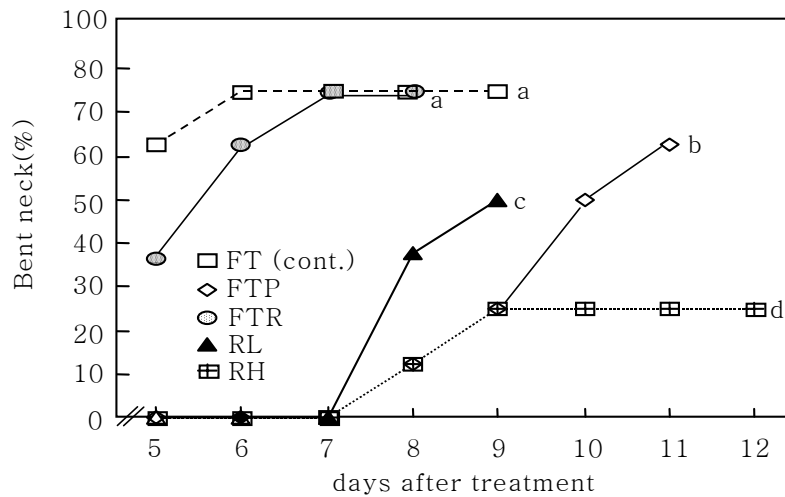


그림 8-4. 절화기간 동안 절화장미의 꽃목굽음 현상 발생의 경시적 변화.

본 연구결과, 적색광은 절화장미와 절화 카네이션의 수명이나 화편전개에 영향을 미치는 광질이라는 것을 알 수 있었으나, 절화기간 동안에 적색광을 광원으로 하는 상업적인 이용가능성을 완전히 설명하기는 아직 불분명한 점이 많이 남아있다. 왜냐하면 절화 수명과 품질에 있어서 적색광이나 청색광등 광질의 영향에 대한 연구보고가 매우 적기 때문이다. 다만, 본 실험조건에서, 발광다이오드에 의한 고광강도의 적색광 조사에 의해 절화장미의 꽃목굽음 현상이 다른 실험구에 비해 현저히 감소하였으며 화편전개에 유효한 것을 알 수 있었다. 앞으로 적색광이나 형광등과 적색광의 혼합광 조사에 의한 그 밖의 다른 종의 절화류의 수명 및 품질에 미치는 영향에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

9. 발광다이오드를 이용한 연속 및 간헐조사가 고구마 배양소식물체의 성장과 형태형성에 미치는 영향

식물체의 성장에 있어서 광조사는 식물체 성장을 위한 에너지원으로서 필요하며 또한, 일장이 식물체의 성장에 적합하지 않을 경우에 보광적인 의미에서 필요한 것이다. 배양소식물체의 성장 및 형태형성을 위한 종래의 광조사 방법은 명기시간 16시간 및 암기시간을 8시간으로 하여 명기동안 연속적으로 광을 조사하는 것이다.

한편, 발광다이오드를 광원으로 하는 광조사 시스템을 이용하면 명기시간 및 광질의 조절이 용이하여 연속광조사가 아닌 명기시간을 나누어서 조절할 수 있는 간헐조사가 가능해진다. 이와 같이 명기시간을 조절하므로써, 배양소식물체 생산에 있어서의 광조사 효율을 향상시키고 식물체의 성장 및 형태형성을 적당히 유지하거나 촉진시킬 수 있으며, 종래의 16시간 연속광조사 방법에 비해 전력소모량을 절감시킬 수 있으며, 또한, 발광다이오드를 광원으로 하는 광조사 시스템을 이용할 경우에는 발광다이오드의 특성상 그 수명을 크게 연장시킬 수 있는 등의 가능성이 기대된다.

일반적으로 광질은 배양기내외 식물체의 성장 및 형태형성에 영향을 미치는 환경요인으로 잘 알려져 있으며 국내외적으로 이에 대한 연구가 진행되고 있는데, 배양소식물체의 적절한 성장 및 형태형성을 위한 발광다이오드를 이용한 명기시간 조절이 배양소식물체의 성장 및 형태형성에 미치는 영향에 대한 연구보고는 전무한 상태이다.

본 연구에서는 발광다이오드에 의한 청색, 적색 및 청색과 적색을 혼합한 광원에 의한 16시간 연속 및 20 sec. on 및 10 sec. off (1일 총 명기시간은 16시간이며 암기시간은 8시간) 의 간헐조사가 고구마 배양소식물체의 성장 및 형태형성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

가. 실험방법

1) 식물재료

식물재료는 단절단엽의 고구마 (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., cv. Beniazuma)를 이용하였다. 배양배지는 1/2MS (Murashige & Skoog, 1962)로 하였으며 배지 당농도는 30 g L⁻¹ 한천농도는 7 g L⁻¹로 하였고 멸균전 pH는 5.6으로 조정하였다.

배양실 조건은 대기온도 25C, 상대습도 60%, 이산화탄소를 사용하지 않은 조건으로 하였으며, 배양실내 광강도는 90 mmol m⁻² s⁻¹로 설정하였으며, 배양기간은 35일로 하였다.

광조사시간은 연속조사구에서 16시간으로 하였으며 간헐조사구에서는 20 sec. (photo) / 10 sec. (dark) 로 나누어 총 16시간으로 하였다. 실험구는 광질 및 광조사 방법에 따라 총 7개의 실험구를 설정하였다 (표 9-1). 각 실험구에 있어서 광질을 달리하기 위해서 LED광조사 System (LPRS, Goodfeeling Co. Ltd., Sungnam, Korea)을 이용하였다 (그림 9-1).

실험개시 35일째에 고구마 배양소식물체의 건물중, 엽면적, 최대뿌리길이, 전개엽수 및 초장을 측정하였고, 배양기내외 이산화탄소 농도차, 배양기 환기횟수로부터 순광합성속도를 산출하였다. 또한, 고구마 배양소식물체의 잎으로부터 당 및 전분농도를 측정하였다.

2) 통계분석

각 실험구당 6개의 소식물체를 공시하였으며 실험종료 후에 SAS 프로그램(Version 6.21, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계분석하였다.

표 9-1. Experimental design of the experiment.

Treatments	Light Source	Radiation type
FL (Cont.)	Fluorescent lamps	continuous
B	Blue LEDs	continuous
BI	Blue LEDs	intermittent
R	Red LEDs	continuous
RI	Red LEDs	intermittent
BR	Blue+Red LEDs*	continuous
BRI	Blue+Red LEDs	intermittent

*1:1 in spectral energy.

나. 결과 및 고찰

배양개시 35일째의 고구마 배양소식물체는 그림 9-1 및 그림 9-2와 같다. 고구마 배양소식물체의 지상부 및 지하부의 총건물중은 광조사 방법보다 광질의 영향을 유의하게 받은 것으로 나타났으며, 대조구에 비해 단일의 청색광 조사구 및 청색과 적색의 혼합광 조사구에서 증가하였다. (그림 9-3). 지상부 및 지하부의 건물중 증가경향은 총건물중에서와 유사한 경향으로 단일의 청색광 조사구 및 혼합광 조사구에서 증가하였으며, 고구마 식물체의 지상부 생장은 광질 및 광조사 방법의 차이에 따른 영향이 없는 것으로 나타나, 배양소식물체의 건물중 증가는 배양기간 동안의 광에너지에 의해 이루어진 것으로 생각된다.

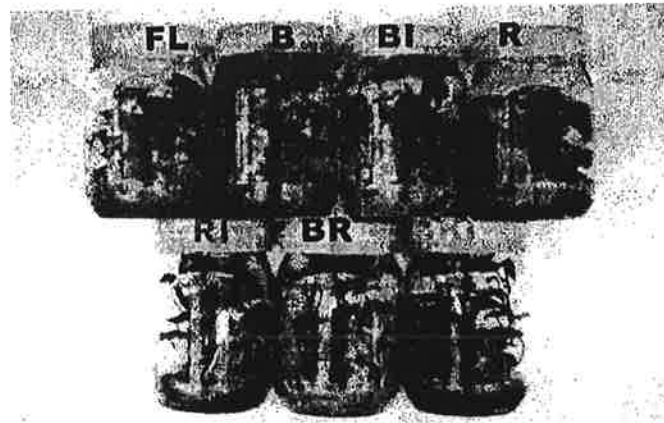


그림 9-1. 광질 및 광조사 방법이 다른 조건하에서 35일간 배양한 고구마 소식물체.



그림 9-2. 광질 및 광조사 방법이 다른 조건하에서 35일간 배양한 고구마 소식물체.

고구마 배양소식물체의 엽면적 증가는 광조사 방법의 차이가 아닌 단일의 청색광질 및 혼합광질에 의해 촉진된 것을 알 수 있었으며, 광질 및 광조사 시간의 상호작용에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다(그림 9-4). 또한, 형광등을 16시간 연속하여 조사한 대조구(FL구) 및 단일의 적색광을 간헐적으로 조사한 RI구에서의 엽면적이 감소하는 경향을 나타냈다.

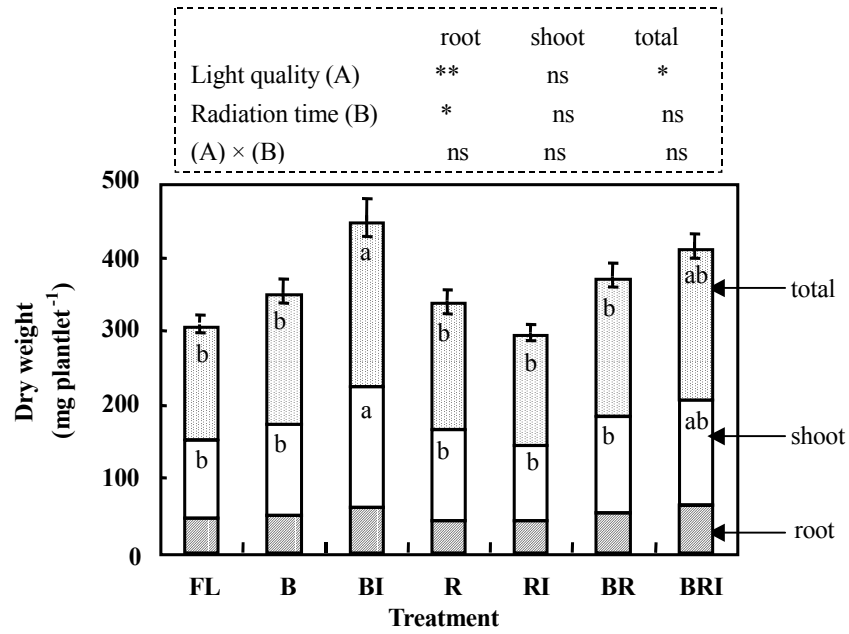


그림 9-3. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 건물중에 미치는 영향.

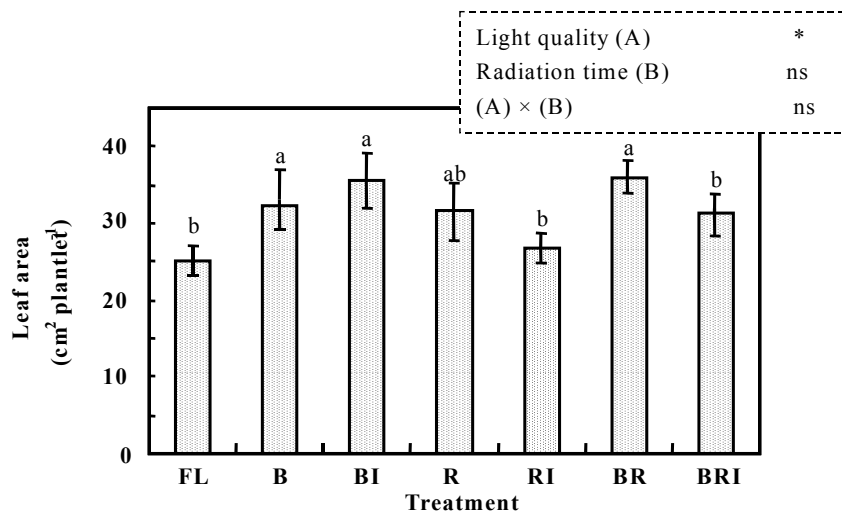


그림 9-4. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 건물중에 미치는 영향.

고구마 배양소식물체의 뿌리신장은 대조구에 비해 단일의 청색광을 20 sec. on/10 sec. off의 방법으로 간헐적으로 조사한 BI구에서 최대로 뿌리신장에 광질의 영향이 현저한 것을 알 수 있었다 (그림 9-5). 그 밖의 다른 실험구 간에는 통계적인 유의성은 인정되지 않았으나, 청색광구와 혼합광구에서는 광조사 시간의 영향이 인정되어 연속조사보다 간헐조사구에서 뿌리신장이 촉진되는 경향을 보였다. 또한, 지하부 건물중 결과에 비교해 보면, 지하부 건물중 증가는 뿌리신장이 광질에 의해 촉진된 결과로 생각된다.

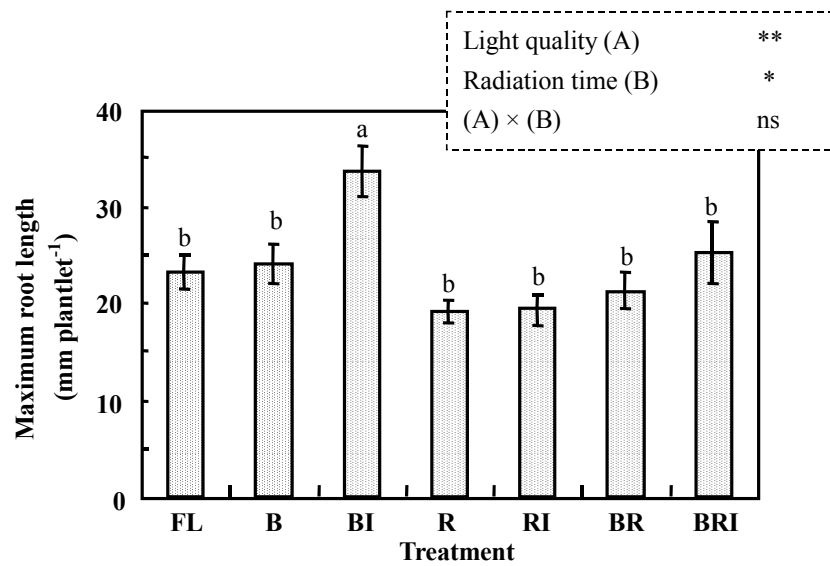


그림 9-5. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 뿌리생장에 미치는 영향.

배양소식물체의 초장은 광질 및 광질과 광조사 시간의 상호작용의 영향을 받은 것을 나타내, B구, BI구 및 단일의 적색광 조사구인 R구에서 최대였으며 BR구에서 최소였다 (그림 9-6). 수 종의 초화류에 있어서 초장조절을 위한 광질의 영향에 대한 연구 결과들에 의하면 단일의 적색광이나 청색광을 조사한 조건하에서 자란 식물체의 초장이 증가하며, 이들 단일광 조사구에 비해 청색과 적색의 혼합광질 하에서 초장신장이 억제된다고 한다. 본 연구 결과, 배양기내 고구마 식물체의 초장신장에 있어서도 청색 및 적색의 혼합광질의 초장신장 억제효과가 인정되었다.

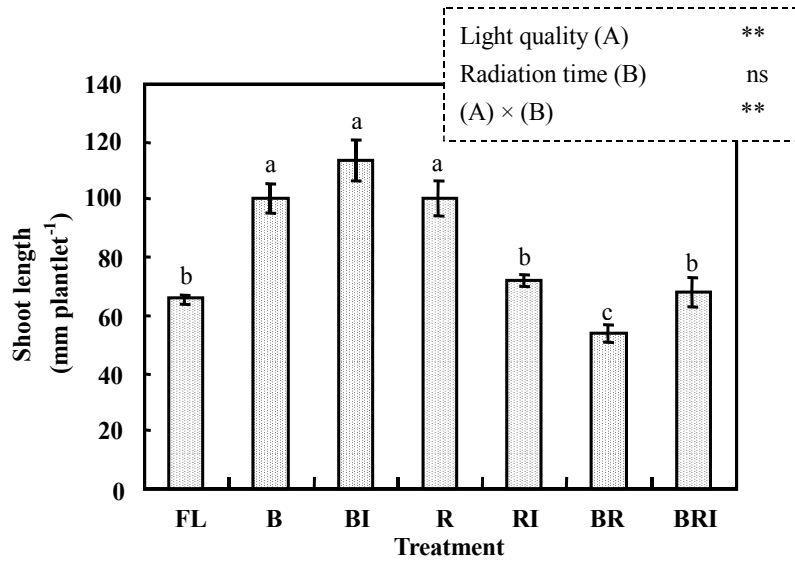


그림 9-6. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 초장에 미치는 영향.

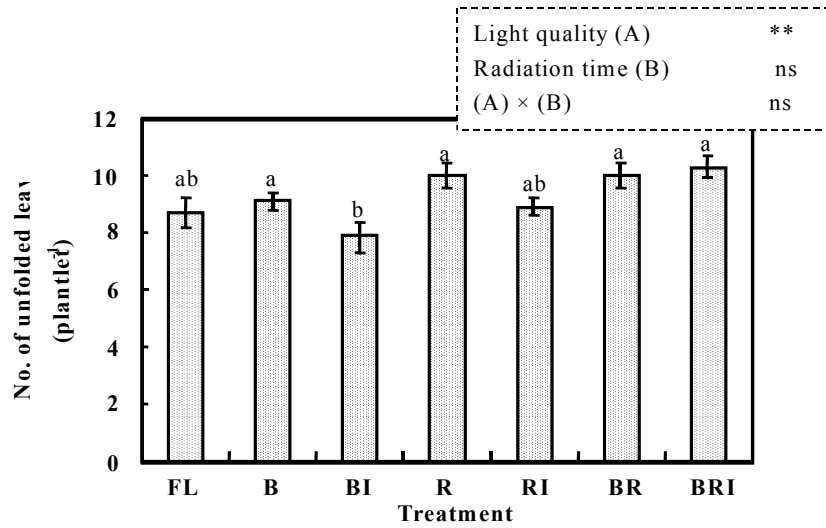


그림 9-7. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 엽수증가에 미치는 영향.

광질의 배양소식물체의 엽수증가에 유의한 영향을 미친다는 것을 알 수 있는데, 식물체의 건물중 증가나 엽면적 증가에 있어서 유의한 영향을 미친 B구나 BR구에서 증가하는 경향을 나타냈다 (그림 9-7). 또한, 고구마 배양소식물체의 엽수증가는 종래의 연속광조사나 간헐적 광조사 등의 광조사 방법의 차이에 따른 영향이 없는 것을 알 수 있었다.

그림 9-8에 배양기내의 이산화탄소의 농도차 및 배양기 환기회수에 따라 산출한 배양소식물체당 순광합성속도를 나타낸다. 식물체의 순광합성속도는 광질뿐만 아니라 광조사 방법 (광조사 시간)에 따른 통계적인 유의차가 인정되었다. 청색광 조사구 및 혼합광 조사구에 있어서 종래의 연속광조사보다 간헐조사구에서의 순광합성속도는 대조구 및 다른 실험구에 비해 현저히 증가하였다. BRI구에 있어서 순광합성속도는 대조구인 FL구에 비해 약 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

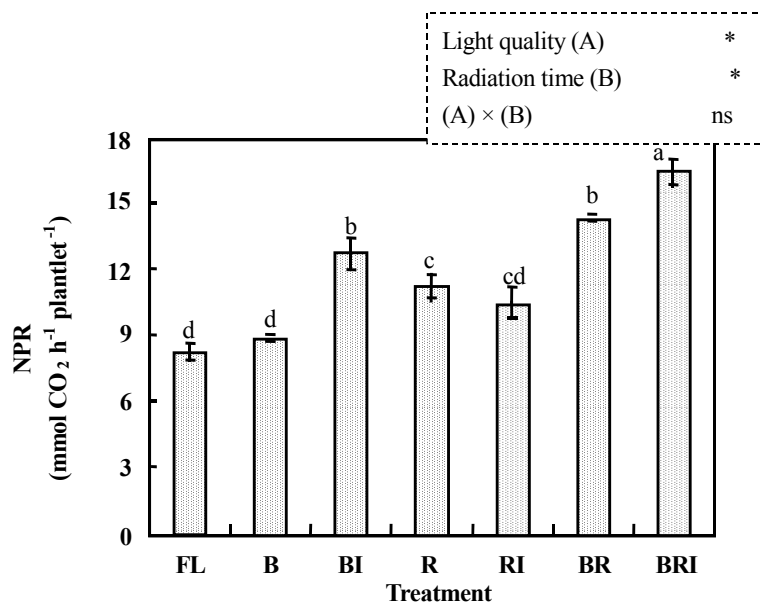


그림 9-8. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 순광합성속도에 미치는 영향.

고구마 배양소식물체 앞에서의 전분농도 및 당농도의 변화는 그림 9-9 및 그림9-10과 같다. 앞에서의 전분 축적은 광질 및 광조사 시간의 영향을 받는 것으로 나타났다. 모든 실험

구에 있어서 전분농도는 연속광조사보다 간헐적인 광조사구 (BI구, RI구 및 BRI구)에서 현저히 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 식물체의 전분농도는 RI구 및 BRI구에서 최대였으며 연속광조사구인 FL구 및 B구에서 최소였다. RI구 및 BRI구의 전분농도는 FL구 및 B구보다 약 3배 증가하였다.

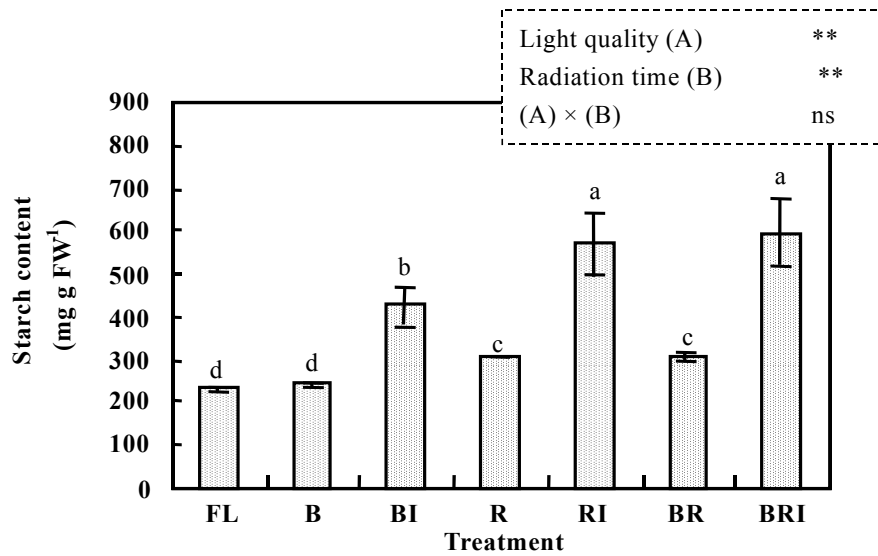


그림 9-9. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 전분농도 변화에 미치는 영향.

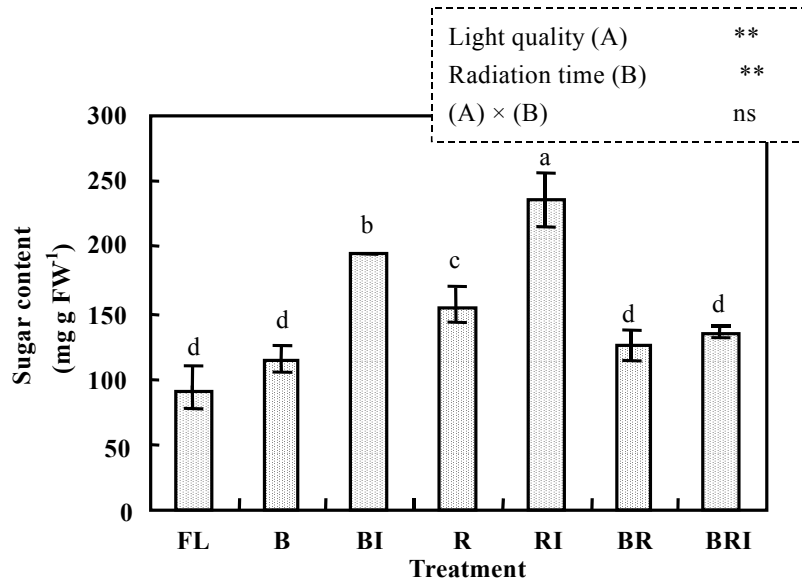


그림 9-10. 광질 및 광조사 방법이 고구마 배양소식물체의 당농도 변화에 미치는 영향.

전분농도 변화에서와 같이 광질 및 광조사 시간은 식물체내 당농도 변화에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 단일의 청색광 및 적색광 조사구는 B구 및 R구에 있어서 식물체내 당농도 증가의 연속광조사보다 간헐조사에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 각 실험구에 있어서 당농도는 적색광을 간헐조사한 R구에서 최대였으며 R구의 당농도는 종래의 FL구에 비해 약 3배 증가하였다. 한편, FL구, B구, BR구 및 BRI구에서는 광질 및 광조사 시간의 차이에 따른 유의성이 인정되지 않았다. 광질 및 광조사 시간(명기시간)이 다른 조건 하에서 자란 시클라멘 분화식물의 잎에서의 당 및 전분 농도 변화를 조사한 연구결과에 의하면 식물체내 당 및 전분농도는 다른 광질에 비해 단일의 적색광 조사구에서 현저히 증가한다고 한다. 본 연구에서의 당 및 전분농도에 관한 결과는 식물체로부터 이용할 수 있는 중요한 영양성분 중에는 전분을 들 수 있는데, 특히, 전분을 추출하는 대표적인 식물체인 고구마에서 광조사 방법 및 광질 조절에 의해 전분농도를 증가시킬 수 있는 가능성을 시사한다고 할 수 있다.

이상의 결과로부터, 고구마 배양소식물체의 건물중 증가, 엽면적 확대, 초장신장, 식물체내 전분농도 및 당농도변화 등의 생장 및 형태형성에 있어서 광질이 유의한 영향을 미치는 것을 알 수 있었으나, 종래의 연속광조사 및 본 실험에서 설정된 간헐적인 광조사에 의한 영향

은 없는 것으로 나타나, 종래의 16시간 명기 및 8시간 암기조절과 같은 광조사 시간 및 방법의 이용에 대한 재인식이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 앞으로 배양기내에서 식물체를 대량생산 할 경우, 종래의 16시간 명기 및 8시간 암기조절방법보다 생장 및 형태형성에 있어서 발광다이오드를 이용한 간헐조사 및 명기시간 단축 등의 광이용 효율을 증가시키기 위한 명기시간의 조절에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 연도별 연구목표 및 평가착안점

가. 연도별 연구목표 및 내용

구 분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2000)	Plug 육묘시 LED의 이용	<ol style="list-style-type: none"> 1. 생장상실 및 온실조건에서 4종의 plug묘를 사용하여 LED 실험을 수행 <ul style="list-style-type: none"> ◦ LED로써 Red, 형광등, Blue, Far-red를 단색 및 혼용 처리 ◦ 처리시간 18/6(주/야) 30초~3분간 연속 Pulse 처리 ◦ LED의 광도를 30~150$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$로 구분하여 처리 ◦ 조사항목 : Plug묘의 영양생장, 개화시기, 개화일수, 화색, 초장 등 품질에 미치는 영향을 조사 2. 절화류의 수명연장에 미치는 LED 효과 구명 <ul style="list-style-type: none"> ◦ 광원으로 적색광, 형광등을 이용 ◦ 장미, 카네이션 등을 이용하여 LED 처리와 무처리 간 수명연장에 미치는 반응을 조사 ◦ 분화식물(시크라멘 등)에 LED 조사시 개화현상에 미치는 효과조사 ◦ 조사항목 : 꽃의 개화 상태, 수명연장, 품질향상에 미치는 성장상태 측정

구 분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
2차년도 (2001년)	조직배양시 LED의 이용	<p>1. 단색 및 혼합 LED 광조사 효과구명</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ LED원으로써 Red, Blue, Far-rad, 형광등의 단색처리 효과구명 ◦ 혼합광으로써 형광등+Red, Blue, Red+ Blue, Red+Far-rad, Blue+Far Red 등 5처리구 설정 ◦ 이들 광원을 이용하여 원예식물의 조직배양시 식물의 기내 성장정도, 형태형성에 미치는 영향을 조사 <p>2. 단색 및 혼합광의 Pulse 처리가 기내 성장 및 형태형성에 미치는 영향조사</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 1의 실험에서 사용한 광원을 기존 16/8시간 명암처리 방법과 비교하여 30초~3분 간격으로 Pulse 처리하여 원예식물의 기내 배양시 성장 및 형태형성에 미치는 효과 분석 ◦ 1의 실험과 비교하여 Pulse 처리가 신초증식에 미치는 효과를 분석 ◦ 조사항목 : 기내 식물의 초장, 생체중, 엽면적, 증식율, 기내발근율 등
3차년도 (2002)	분화생산시 LED의 이용	<p>1. 아제라툼, 살비아, 카랑코예 등 분화 생산시 보조광원으로써 LED의 이용</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ Red, Blue, 형광등의 단색과 혼합광을 $30\sim 150\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$의 광합성 유효광양자 밀도를 이용하여 생장에 미치는 효과를 조사 ◦ 이들 광원을 일출 및 일몰시 30~2시간 보조광원으로 이용하여 조사함 ◦ 조사항목 : 줄기신장, 개화, 수명연장 ◦ 처리내용 : 적정광질, 광도, 일장처리 <p>2. 절화 수명연장 및 분화식물의 품질향상을 위한 LED 광조사 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 1~2년차 실험에서 얻어진 결과를 토대로 상업적으로 응용할 수 있는 LED 패널 및 control box 제작 ◦ 시제품 생산

나. 연구평가의 착안점

구 분	평가의 착안점 및 척도	
	착 안 사 항	척 도 (점수)
1차년 도 (2001) [30 %]	<ul style="list-style-type: none"> · Plug 묘에의 광조사 효과 · Plug 묘의 생장 및 품질에 미치는 영향 규명 · 초장조절에 있어서의 혼합광 효과 규명 · 묘저장성 향상 효과 	<ul style="list-style-type: none"> -광조사 후의 개화 및 생장상태 고찰 (20 %) -영양생장을 위한 최적의 광질결정 (30 %) -기존광원과 LED 혼합시의 개화시기, 개화일수 및 초장조절에의 영향 파악 (30 %) -저장성 향상을 위한 광강도의 결정 (20 %)
2차년 도 (2002) [40 %]	<ul style="list-style-type: none"> · 단색 LED 광조사 효과 규명 · 혼합 LED 효과 규명 · 형광등과 간의 혼합광 조사 효과 규명 · Multiple shoot 의 증식 및 생장에 미치는 효과 규명 · Pulse 광 조사효과 규명 	<ul style="list-style-type: none"> -식물종별 단색 LED 광조사 (10 %) -식물종별 혼합 LED 광조사 (20 %) -식물생장에 있어서 최적 혼합광형태 파악 (30 %) -Multiple shoot 의 증식 및 생장에 적합한 광질 및 광강도의 결정 (10 %) -적정 광조사 시간 파악 (20 %)
3차년 도 (2002) [30 %]	<ul style="list-style-type: none"> · 보조광원으로서의 이용성 검토 · 분화식물의 개화 및 초장조절을 위한 광조건의 확립 · 절화류의 수명연장 및 품질면에서의 효과 규명 · LED 광조사 스탠드의 제작 	<ul style="list-style-type: none"> -자연광과의 혼합광 효과 (20 %) -개화시기, 개화일수 및 초장에 미치는 광질 효과 (30 %) -수명연장을 위한 광질결정 (30 %) -LED 의 실용화 및 대중화 (20 %)
최종 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 기내 배양소식물체의 생장 및 광형태 형성에 미치는 효과 · Plug 묘의 생장 및 광형태형성에 미치는 효과 규명 · Plug 묘 저장시의 광조사 효과 · 분화식물의 품질에 미치는 효과 규명 · 절화류 품질에의 효과 규명 · LED 광조사 스탠드의 제작 	<ul style="list-style-type: none"> -적정 광질 및 광강도 파악 (20 %) -혼합광 형태의 광조사에 의한 개화조절 및 초장 조절을 위한 광질 파악 (20 %) -기내 절편체와 Plug 묘 장기저장을 위한 광강도 설정 (15 %) -개화에 있어서 적정광질 파악 (15 %) -수명연장을 위한 광질파악 (15 %) -수명연장 및 조명용 스탠드 (15 %)

다음은 지금까지의 LED 실험과 관련한 연구결과를 국내외 학술지 및 심포지움에 발표한 내용이다.

[국제 학술지]

Betalain synthesis by hairy root of red beet cultured in vitro under different light quality. 2002. Acta Horticulturae. 580권. 209 - 214.

Characteristics of growth and flowering on some bedding plants grown in mixing fluorescent tube and light-emitting diode. 2002. Acta Horticulturae. 580권. 77 - 83.

Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a light-emitting diode. 2002. Plant Growth Regulation. 38: 225-230.

Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. Dixie White. 2002. Plant Growth Regulation. 40: 7-10.

Longevity and quality of cut 'Master' Carnation and 'Red Sandra' Rose flowers as affected by red light. 2003. Plant Growth Regulation. in press.

[국제 학술대회]

Characteristics of growth and flowering on some bedding plants grown in mixing fluorescent tube and light-emitting diode. 4th international ISHS symposium on artificial lighting. 2000. Abst. P 14.

Betalain synthesis by hairy root of red beet cultured in vitro under different light quality. 2000. Abst. P 42.

Supplemental blue or red light with low photosynthetic photon flux in sunrise and sunset twilight influence growth and morphogenesis of Ageratum, Marigold, and Salvia seedlings cultured in greenhouse. 2001. HortScience. 36권 3호. 565.

[국내 학술대회]

Effect of red light on the vase life of cut flowers, carnation and rose. 2000. 한국과학기술지. 18권 2호. 156.

Effect of mixing light with fluorescent lamps and light-emitting diodes on growth and

morphogenesis of ageratum, marigold, and salvia plug seedlings. 2000. 한국과학기술지. 18권 2호. 153.

The growth and morphogenesis of plug seedlings cultured under conditions of the different mixing light with light-emitting diodes (LEDs) as a plant lighting source. 2000. 한국과학기술지. 18권 5호. 662.

Flowering and growth of cyclamen miniature 'Dixie White' influenced by control of light quality and day length using light-emitting diode. 2001. 한국과학기술지. 19권. 47.

Growth of 'Camella' dieffenbachia and 'Melany' ficus ornamental plants as affected by light quality. 2001. 한국과학기술지. 19권. 34.

Continuous or intermittent radiation using light-emitting diode influence on the growth and morphogenesis of sweetpotato plantlets cultured in vitro. 2002. 한국과학기술지. 20권. 33.

Effect of light quality on photosynthesis and growth of ageratum, marigold and salvia plug seedlings. 2002. 한국과학기술지. 20권. 40.

Storage physiology and growth after transplanting of marigold and salvia seedlings under low temperature condition as affected by green light. 2002. 한국과학기술지. 20권. 40.

Light quality influence on growth and sugar metabolism of grape rootstock 5BB cultured in vitro. 2002. 한국과학기술지. 20권. 88.

Light quality influence on growth, starch content, and antocyanine synthesis in red curled lettuce spp.. 2002. 한국과학기술지. 20권. 31.

Growth of mustard cress grown under conditions of continuous or intermittent lighting provided by light-emitting diodes (LEDs). 2002. 한국과학기술지. 20권. 64.

[잡지 게재]

적색발광다이오드 조사에 의한 절화의 수명연장 효과. 농경과 원예. 통권 167호. 116 - 119.

2. 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전예의 기여도

가. 실험결과를 토대로 조직배양시 특수 파장의 LED가 효과적일 경우 전력비가 형광등에 비해 매우 저렴하고, 반영구적이기 때문에 이용가능성이 매우 높을 것으로 생각되고 이를 상업화할 수 있는 기계적 제작을 참여 기업체를 통하여 기술이전이 가능하게 되었다.

나. Plug 육묘시 가장 문제가 되는 도장문제를 해결하기 위해서 외국에서 실험적으로 적용해오고 있는 일출, 일몰시 LED 광원의 Pulse 처리효과를 구명하여 효과가 있을 경우 실험적으로 생산현장에 적용하여 실용화 할 수 있는 방안이 강구되었다.

다. 대학 및 연구소의 실험기기용 LED 패널제작 및 공급

1) 현재까지 국내에서 LED 패널은 참여기업체인 좋은 인상에서 실험적으로 제작하여 공급하고 있는 실정이다. 한편, 일본에서 수입한 LED는 규모에 따라 차이가 있으나 Control box를 포함할 경우 최소 실험용 패널을 구입하더라도 2,000만원 이상 고가이나 국내에서 실험과정을 거쳐 제작할 경우 절반수준으로 가격을 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

2) 특히 광질이나 광도에 의한 광형태형성, 광에 의한 종자발아 조절 등에 미치는 LED의 효과를 감안한다면 실용화한 LED 시스템의 수요가 매우 높을 것으로 기대되며, 참여 기업체도 이에 대한 경제성을 고려하여 연구에 참여하고 있다.

3) 본 연구과제를 통하여 단색 LED의 특성, LED 간의 혼합광 및 기존광원과 LED 간의 혼합광 등의 광질특성 규명으로 식물의 인공광 환경에 대한 연구에 획기적인 발판을 마련할 수 있다.

4) 새로운 LED 광조사 시스템의 이용으로 Unit 식 성장상실의 공간활용성 향상과 더불어, 자유로운 광질 이용에 의한 기존 인공광원의 광효율 향상에 기여하게 될 것이다.

5) 본 과제의 성공적인 수행으로 새로운 식물재배용 인공광원으로서의 이용가능성을 증명하고, 금후 새로운 광환경으로서의 인식도 향상으로 LED의 대중화 및 일반화의 토대를 마련하게 될 것이다.

6) 본 과제 수행상 얻어진 Know-How는 과제수행에서 이용되는 식물체 이외의 원예 식물에 적용될 기초연구로서 활용될 수 있다.

7) 과제 수행과정에서 얻어지는 LED 이용상의 Know-How 및 실용적 결과 등은 특허를 출원하여 산업재산권의 보호를 도모할 것이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

식물 재배용 인공광원으로서 LED 의 최대의 이점은 compact 한 장치로 재배식물의 생장이나 특성의 식물생리 및 형태형성 등을 정밀하게 제어할 수 있다는 점이다. 또한 재배식물의 생육단계에 맞추어서 광질이나 광강도를 쉽게 제어할 수 있기 때문에 재배기간의 단축이나 증수효과, 건전묘 육성효과 등을 기대할 수 있다. 과장이나 광강도를 제어함으로써, 화아형성이나 초장조절, 가식부나 그 안의 영양성분 증량 등, 목적으로 하는 식물의 생리현상을 조절할 수 있다. LED 의 설치가 용이하고, 수명이 반영구적이므로 재설비를 위한 투자가 불필요하며 발열량이 적어서 열로 인한 공조비를 절감할 수 있기 때문에, 식물 재배용 인공광원으로서의 LED 의 장점을 최대한으로 이용하는 데에는 광환경 제어형 식물공장에의 이용 가능성이 크게 주목된다.

1. 기내식물배양에서의 활용

기내식물배양에 있어서, 인공광원으로서 LED 이용으로 기존의 식물생장조절물질에 의해 증식 및 생장율을 증가시켰던 식물체 증식 및 생장율 증가를 기대할 수 있으므로, 식물생장조절물질 사용농도를 감소시키거나 변이체의 감소 등으로 인한 식물체의 손실 절감, 노동력 (인건비) 절감 및 배양경비 절감효과를 거둘 수 있다.

2. 기외 묘생산에서의 활용

가. Plug 육묘시 일정시간의 LED 광조사로 개화촉진, 개화지연 및 초장을 조절할 수 있기 때문에 plug 묘 출하시기의 임의조절로 노동력 절감 및 농가 소득증대를 꾀할 수 있다.

나. 시설재배 조건하에서의 Plug 육묘시 일출, 일몰시간대에 보조광원으로서 특정파장의 LED 를 간헐조사하여 일장특성과 무관히 광질의 특성을 살리는 조사로 식물체의 생식생장을 조절하여 광조건이 불리한 시기의 생산성 향상을 도모할 수 있다.

다. LED 를 이용한 식물의 광환경 향상에 의해, 양질의 배양소식물체 및 Plug 묘 생산성 증대로 국제경쟁력 견비에 따른 세계시장으로의 진출이 가능해진다.

라. 본 연구과제 수행결과로 LED 광조사가 식물체의 생장 및 광형태형성에 미치는 효과를 규명하여 식물재배용 인공광원으로서의 LED 이용가능성을 제시할 수 있다면,

새로운 광원으로서 인공광 이용형 식물공장체제를 발전시킬 수 있게 된다. 이에 따라, 기존의 성장상과 같이 밀폐된 소공간에서의 광환경을 향상시켜 양질묘의 생산이 가능해질 것이다.

마. 21세기 한국농업은 식물재배의 산업화를 위해서 앞으로 재배공간의 식물공장화, 시설재배시 환경조절의 자동화 및 단순화를 실현할 수 있어야만 국제경쟁력을 기를 수 있다고 해도 과언이 아니다. 본 과제 수행을 통하여 한국농업에 있어서 새로운 광환경의 개념도입으로 미래형 농업에 대한 의식을 고취시키는데 크게 기여할 것이다.

바. 본 과제의 LED 를 이용한 광조사 시스템의 개발에 의해 LED 에 대한 기술개발의 촉진 및 관심고조로 구매단가를 낮추어 LED 를 식물재배에 이용하는 기회를 높이므로 농업분야에서 LED 의 실용화 및 대중화가 실현될 가능성이 있어, 기존시설의 합리적 이용과 연구기관의 확대 등이 가능해질 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1993년 말에 Nikka화학(주)에서 고휘도의 peak과장 450 nm의 청색발광다이오드를 개발한 이래, 적색에 청색을 혼합한 발광다이오드를 식물재배에 이용하는 시도가 이루어지기 시작하였으며 Tokai대학의 Takaziru교수 및 Kagawa대학의 Tanaka교수 등이 청색광이 식물체에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되기 시작하였다.

Kagawa대학의 Dr. Okamoto, Dr. Yanagi 등도 시금치를 대상으로 적색광의 효과에 대하여 보고하였다. 또한 1993년 말에 일본에서 처음으로 개발된 청색의 발광다이오드를 이용하여 Kagawa대학의 Dr. Tanaka 등이 심비디움 배양소식물체를 대상으로 한 실험결과를 발표하였다. 1990년대에 발광다이오드의 출력향상을 배경으로 하여 세계적으로 수가 적었던 연구 그룹 중에서 Chiba대학의 Kozai 교수팀은 감자 배양소식물체의 조직배양에 있어서 적색광 및 원적색광 조사효과에 관한 연구결과를 보고하였다.

1994년 초에는 일본의 연구그룹의 연구결과에 의해 미국에서도 청색광의 효과를 증명하기 위한 연구가 시작되어 Wisconsin대학의 Bula 교수팀은 고휘도의 청색 발광다이오드를 이용한 조명장치를 도입하여 상치등을 중심으로 한 재배실험 예에 대한 연구결과를 보고하였다. 1995년 2월에는 이와 같은 조명장치를 겹쳐서 만든 Space shuttle, Discovery를 개발하여 미중력공간에서 밀의 발아 등에 관한 연구를 수행하였다.

청색 및 적색의 발광다이오드를 광원으로 한 재배실험의 결과는 다음과 같다. 식물의 광반응계의 활성스펙트럼을 고려하여 세종류의 peak과장 (청색 450 nm, 적색 660 nm 및 원적색 430 nm)을 갖는 발광다이오드를 광원으로 하여 상치를 수경재배한 결과, 상치는 광합성 유효광량자속 (PPF; Photosynthetic Photon Flux, 광강도)을 $100 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 하여 청색광을 8% 이상 첨가한 적색광을 조사한 실험구에서 자연광 조건하에서 자란 상치와 동일한 초형 및 엽색을 나타내는 등 재배효율이 향상되는 것이 판명되었다. 재배하는 동안에 청색광이 부족한 경우에는 절간과 엽병신장이 촉진되는 등 도장현상이 발생하는 것으로 나타났으나, 이러한 도장현상은 적색광량을 증가시키므로써 어느 정도는 회피할 수 있는 것으로 판단되었다. 상치의 생장에 있어서 원적색광은 온실조건 하에서의 상치생장에 그다지 현저한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 반대로 초형에 영향을 미쳐서 생육을 억제하는 것으로 판단되었다.

발광다이오드의 발광패널에 pulse 발생기를 장착한 전원장치를 접속하여 조사광을 주기 10 ms 에서 10 ms, 명기와 암기의 비율을 10-50% 사이로 변화시킨 조건하에서 실험을 실시하였다. pulse광의 소비전력을 100 W m^{-2} , 명기와 암기의 비율을 50%로 고정하여 주기를 10 ms 에서 10 ms 로 변화시켜서 상치묘를 20일간 재배한 결과, 주기를 100 ms 이하의 pulse

광을 조사한 경우 연속광 조사에 비해 약 20 %의 생육촉진효과가 인정되었으며 단기간의 pulse광이 상치의 생장을 촉진하는 것이 판명되었다. 또한, Pulse광 조사를 10 %에서 50 %까지 변화시켰는데, 명기의 소비전력을 조절하고 암기를 포함한 평균소비전력을 100 W m⁻²가 되도록 설정하여 실험한 결과, 명기와 암기의 비율이 25 % - 50 %로 한 경우에 상치의 생장을 촉진한 반면에 명기와 암기의 비율을 10 %로 한 경우에는 pulse화 효율은 거의 없어지는 것을 알 수 있었다.

한편, 수냉식 발광다이오드 패널을 광원으로 한 재배실험을 실시하였는데, 발광다이오드의 외부양자효율(전기에서 광으로의 최종변환효율)은 현재, 효율이 높은 것으로 알려진 적색의 발광다이오드에서도 22%정도로 매우 낮은 상태이다. 따라서 발광다이오드를 고밀도로 집적해서 패널광원을 제작하는 경우에는 발광다이오드 칩의 발열에 의한 패널의 온도 상승이 커다란 문제점으로 지적된다. 그러므로 발광다이오드로부터의 발열을 감소시키기 위하여, 발광다이오드 패널 하부에 동으로 만든 냉각수 탱크를 설치한 수냉식 발광다이오드 패널을 광원으로 하는 장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 이 패널은 발광다이오드 집적기반의 안쪽을 냉각수로 제열(除熱)하므로써 패널온도를 일정하게 유지하고 발광면 측면으로의 열 이동을 거의 차단할 수 있는 것이 장점이다. 이러한 패널을 폐쇄형 재배장치에 부착시켜서 상치를 재배한 결과, 밀폐된 재배실의 온도상승을 완전하게 막을 수 있었으며, 이에 따라 일반적인 에어컨을 사용한 공조방법과 비교하여 시스템의 온도제어에 드는 전력을 약 50 % 절감시킬 수 있었으며 재배한 상치의 성장도 양호한 것으로 판명되었다. 이 밖에도 발광다이오드에 의해 명암주기의 단축에 의한 식물의 증수효과에 대한 연구, 과장이나 광량을 제어하므로써 화아형성이나 초형조절, 가식부(可食部)나 가식부 내의 영양성분의 증량 등에 관한 실험연구가 서서히 진행되고 있다.

발광다이오드를 식물재배용 인공광원으로 하는 경우 최대의 이점은 콤팩트한 장치로서 재배식물의 생장이나 특성의 식물생리를 정밀하게 제어할 수 있다는 것이다. 예를 들어, 식물을 정식한 포트에서부터 발광다이오드 패널까지의 높이는 재배하는 식물의 최대초장 정도를 확보하면 되고 상치 등과 같은 엽채류의 경우에는 약 20 cm정도이며, 일반 공정묘에서도 10 cm정도이면 식물재배에 충분하다. 이러한 재배 Unit를 몇 층으로 겹쳐서 재배하므로써 재배공간을 입체적으로 활용할 수 있으며 콤팩트한 재배장치에 재배면적의 수 배의 면적을 확보할 수 있게 된다. 또한, 재배장치의 소형화는 온도관리에 소요되는 경비를 절감시키는 일과도 관련된다.

게다가, 재배식물의 생육단계에 맞춰서 조사과장이나 광량을 프로그램 제어 할 수 있으며, 그 결과, 재배기간의 단축이나 증수효과 및 건전묘 육성효과 등이 기대된다. 이와 같은 식물재배용 인공광원으로서의 발광다이오드의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는 태양광을 변용하지 않고 인공광 만을 이용하는 완전제어형 식물공장 체계가 발광다이오드를 이용

하는 데에 적합하다고 할 수 있다.

현재, 식물재배에 유효한 적색 및 청색의 고휘도 발광다이오드의 광출력, 램프비용 등을 기존의 광원과 비교해 볼때에 동량의 가시광을 얻기 위한 램프비용은 적색의 경우 고압나트륨 램프에 비해 약 5배, 청색광은 약 160배 정도의 차이를 보인다. 이와 같이 램프비용을 어떻게 해석해야 하는가에 대해서는 이용성이라는 면에서 매우 중요한 문제이지만, 조사되는 광의 식물이용효율이나 램프수명의 차이 등을 고려하면 적어도 적색의 발광다이오드와 유사한 비용으로 식물공장용 광원으로서 충분히 이용할 수 있다고 생각된다. 또한, 발광다이오드를 완전제어형 식물공장의 인공광원으로 생각할 때에 예상되는 소비전력은 고압나트륨 램프에 비해 약 30% 정도의 절감효과가 상치재배 실험을 통하여 검증되었다. 이 밖에도 근접조사나 재배장치의 소형화에 의한 광의 유효이용도 **Running Cost**를 크게 절감시키는 데에 유효하다고 생각되어 전체적으로 식물공장의 조명이나 공조에 관련된 전력비용의 약 40% 정도를 절감할 수 있는 것으로 판단되고 있다.

현재, 일본 및 미국을 중심으로 하여 발광다이오드를 식물재배용 인공광원으로 하는 연구가 배양기내 및 기외 식물을 대상으로 하여 진행되고 있으나 대상식물로는 수종의 초화류의 형태형성, 기내 배양식물의 형태형성 등에 관한 연구가 주류를 이루고 있는 반면에 식물체의 생리현상에 미치는 영향에 대해서는 가능성만이 시사되고 있을 뿐 구체적인 고찰이 이루어지고 있지 않은 실정으로 이에 대한 정량적인 연구의 중요성이 시사되고 있다. 또한, 본 연구센터 및 금호생명과학 연구소 등 소수의 연구팀이 발광다이오드에 대한 연구를 진행하고 있으나, 원예식물을 대상으로 하는 구체적인 연구는 거의 이루어지고 있지 않은 것이 국내의 현실이다. 본 연구결과를 토대로 하여 국내에서도 발광다이오드에 대한 관심고조와 식물체에 미치는 생리적인 효과에 대한 학문적, 정량적 검토가 더욱 필요하며, 국외에 비해 늦었으나, 국내의 실정에 맞는 광조사 시스템의 개발에도 관심을 가져야 할 시기로 생각된다. 전력비용의 절감이나 재배식물의 생장 및 생리의 정확한 조절에 충분히 이용할 수 있는 것이 발광다이오드이지만, 우선 식물재배용 인공광원으로서의 성능이나 장점을 지금까지 이상으로 정량적으로 파악할 필요가 있다. 또한, 앞으로는 초기비용과 **Running Cost**을 조절하여 재배장치 전체로서 비용과 성능이 조화를 이룬 재배시스템을 구축하는 것이 필요하다고 생각된다.

제 7 장 참 고 문 헌

Abeles, F.B., Morgan, P.W. and Salveit, M.E., Jr. 1992. Regulation of ethylene production by internal, environmental, and stress factors. pp. 56-119. In: Abeles, F.B., Morgan, P.W., and Salveit, M.E. (eds.). Ethylene in plant biology, Academic Press, Inc., Harcourt Brace Jovanovich Publisher, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto.

Abde, I.Z. and Hughes, H. 1995. In vitro acclimatization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) plantlets: a quantitative comparison of epicuticular leaf wax as a function of polyethylene glycol treatment. Plant Cell Reports 15:111-114.

Albright, L.D. 1997. Greenhouse thermal environment and light control. pp. 33-47. In: Goto, E., Kurata, K., Hayashi, M., and Sase, S. (eds.). Plant Production in Closed Ecosystems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

Appelgren, M. 1991. Effects of light quality on stem elongation of *Pelargonium* in vitro Scientia Hort. 45:345-351.

Attridge, T.H. 1990. Seedling development. pp. 65-101. In: Arnold, E. (ed.). Light and plant responses - A study of plant photophysiology and the natural environment - A division of Hodder and Stoughton, London, New York, Melbourne, Auckland.

Ballare, C.L., Scopel, A.L. and Sanchez, R.A. 1991. Photocontrol of stem elongation in plant neighborhoods: effects of photon fluence rate under natural conditions of radiation. Plant Cell Environ. 14: 57-65.

Barreiro, R., Guiamet, J.J., Beltrano, J. and Montaldi, E.R. 1992. Regulation of the photosynthetic capacity of primary bean leaves by the red:far-red ratio and photosynthetic photon flux density of incident light. Physiol. Plant. 85:97-101.

Barro, F., Haba, D. L., Maldonado, J.M. and Fontes, A.G. 1989. Effect of light quality on growth, contents of carbohydrates, proteins and pigments, and nitrate reductase activity in soybean plants. J. Plant Physiol. 134:586-591.

- Benedikt, H., Kilian, R., Peter, S. and Schafer, C. 1997. Light-stress-related changes in the properties of photosystem . *Planta* 201:456-462.
- Bergh, A.A. and Dean, P.J. 1976. Light-emitting diodes, monographs in electrical and electronic engineering. Clarendon Press, Oxford, England.
- Black, M. and Shuttleworth, J.E. 1974. The role of the cotyledons in the photocontrol of hypocotyl extension in *Cucumis sativus*. *Planta* 117: 57-66.
- Boardman, N.K. 1977. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 28:355-377.
- Boo, H.O., Shin, K.S., Heo, J.W. and Paek, K.Y. 2002. Betalain synthesis by hairy root of red beet cultured *in vitro* under different light quality. *Acta Hort.* 580:209-214.
- Bradburne, J.A., Kasperbauer, M.J. and Mathis, J.N. 1989. Reflected Far-red light effects on chlorophyll and light-harvesting chlorophyll protein contents under field conditions. *Plant Physiol.* 91: 800-803.
- Brown, C.S., Schuerger, A.C. and Sager, J.C. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120:808-813.
- Bruggink, G.T. 1992. A comparative analysis of the influence of light on the growth of young tomato and carnation plants. *Scientia Hort.* 51:71-81.
- Bruggink, G.T. and Heuvelink, E. 1987. Influence of light on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants. *Scientia Hort.* 31:161-174.
- Buchanan, B.B., Grussem, W. and Jones, R.L. 2000. Synthesis and catabolism of storage lipids. pp. 507-512. In: Buchanan, B.B., Grussem, W., and Jones, R.L. (eds.). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*, Courier Co.

- Bula, R.J., Morrow, R.C., Tibbitts, T.W. and Barta, D.J. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience* 26:203-205.
- Capellades, M.Q., Lemeur, R. and Debergh, P.C. 1990. Kinetics of chlorophyll fluorescence in micropropagated rose shootlets. *Photosynthetica* 24:190-193.
- Casal, J.J., Deregibus, V.A. and Sanchez, R.A. 1985. Variations in tiller dynamics and morphology in *Lolium multiflorum* Lam. Vegetative and reproductive plants as affected by differences in Red/Far-red irradiation. *Annu. Bot.* 56:553-559.
- Chaplin, M.F. 1986. Monosaccharides, pp. 1-36. In: Chaplin, M.F. and Kennedy, J.F. (eds.). *Carbohydrate Analysis A Practical Approach*, IRL Press Ltd, Oxford.
- Cook, L.W., Camras, M.D., Rudaz, S.L. and Steranka, F.M. 1988. High efficiency 650 nm aluminum gallium arsenide lightemitting diodes. *Int. Symp. GaAs and Related Compounds*. Heraklion Press, Greece, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 19:777-780.
- Cosgrove, D.J. 1981. Rapid suppression of growth by blue light. *Plant Physiol.* 67:584-590.
- Deregibus, V.A., Sanchez, R.A. and Casal, J.J. 1983. Effects of light quality on tiller production in *Lolium* spp. *Plant Physiol.* 72:900-902.
- Deutch, B. and Rasmussen, O. 1974. Growth chamber illumination and photomorphogenic efficacy . Physiological action of infrared radiation beyond 750 nm. *Physiol. Plant.* 30:64-71.
- Gerald, F.D., Hayes, R. and Jabben, M. 1979. Kinetics and time dependence of the effect of Far Red light on the photoperiodic induction of flowering in wintex barley. *Plant Physiol.* 64: 1015-1021.
- Hdidder, C. and Desjardins, Y. 1994. Effect of sucrose on photosynthesis and phosphoenolpyruvate carboxylase activity of in vitro cultured strawberry plantlets. *Plant Cell Tiss. & Org. Cult.* 36:27-33.

Hendricks, S.B. and Borthwick, H.A. 1963. Control of plant growth by light. pp. 233-263. In: Evans, L.T. (ed.). Environmental control of plant growth, Academic Press, New York.

Hart, J. W. 1988, Light and Plant Growth, Photoreceptors, Unwin Hyman Publisher, Boston, Sydney, Wellington. pp. 52-137.

Heins, R.D. and Erwin, J. 1990. Understanding and applying DIF. Greenhouse Grower. 8(2):73-78.

Heins, R.D. and Wilkins, H.F. 1979. The influence of node number, light source, and time of irradiation during darkness on lateral branching and cutting production in 'Bright Golden Anne' chrysanthemum. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 104:265-270.

Heo, J.W., Lee, C.W., Chakrabarty, D. and Paek, K.Y. 2002a. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). Plant Growth Regulation *in press*.

Heo, J.W., Lee, C.W. and Paek, K.Y. 2002b. Characteristics of growth and flowering on some bedding plants grown in mixing fluorescent tube and Light-Emitting Diode. Acta Hort. 580:77-82.

Hoenecke, M.E., Bula, R.J. and Tibbitts, T.W. 1992. Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. HortScience 25: 427-430.

Fonseka, H.D., Asanuma, K.I. and Ichii, M. 1997. Changes in nitrate reductase activity of leaf and nitrogen distribution with growth in potato plants. Japanese J. Crop. Sci. 66:669-674.

Fujiwara, K., Kozai, T. and Watanabe, I. 1987. Fundamental studies on environments in plant tissue culture vessels. (3) Measurements of carbon dioxide gas concentration in stoppered vessels containing tissue cultured plantlets and estimates of net photosynthetic rates of the plantlets. J. Agri. Met. Japan. 43 (1):21-30. (In Japanese with English summary and captions).

Gabryszewska, E. and Rudnicki, R.M. 1997. The effects of light quality on the growth and development of shoots and roots of *Ficus benjamina* *in vitro*. Acta Hort. 418:163-167.

Goins, G.D., Yorio, N.C., Sanwo-Lewandowski, M.M. and Brown, C.S. 1998. Life cycle

experiments with arabidopsis grown under red light emitting diodes (LEDs). *Life Support and Biosphere Science*. 5:143-149.

Guo, H., Yang, H., Mockler, T. and Lin, C. 1998. Regulation of flowering time by arabidopsis photoreceptor. *Science* 279:1360-1363.

Johan, M., Van Huylbroeck, J.M. and Debergh, P.C. 1996. Impact of sugar concentration in vitro on photosynthesis and carbon metabolism during ex vitro acclimatization of spathiphyllum plantlets. *Physiol. Plant*. 96:298-304.

Kamiya, A. and Miyachi, S. 1975. Blue light-induced formation of phosphoenolpyruvate carboxylase in colorless chlorella mutant cells. *Plant Cell Physiol*. 16:729-736.

Kao, C.H. and Yang, S.F. 1982. Light inhibition of the conversion of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid to ethylene in leaves is mediated through carbon dioxide. *Planta* 155:261-266.

Karlson, M.G. and Werner, J.W. 2001. Temperature after flower initiation affects morphology and flowering of cyclamen. *Scientia Hort*. 91:357-387.

Karlson, M.G. and Werner, J.W. 2001. Temperature affects rate of leaf folding and flowering in cyclamen. *HortScience* 36:292-294.

Kasemir, H. 1983. Light control of chlorophyll accumulation in higher plants. pp. 662-686. In: Shropshire, K.W. and Mohr, H. (eds.). *Photomorphogenesis*. Springer-Verlag, Berlin, New York, Tokyo.

Kasperbauer, M.J. and Peaslee, D.E. 1973. Morphology and photosynthetic efficiency of tobacco leaves that received end-of-day red or far-red light during development. *Plant Physiol*. 52:440-442.

Kawai, S., Watanabe, H., Yoshino, T., Tanaka, F. and Suzuki, M. 1996. Light emitting diodes as the light source for plant growth regulators. Issue 4. Flowering regulation of chrysanthemum by irradiation of LEDs in summer. *Abs. J. Jap. Hort. Sci.* 454-455.

Kozai, T., Hujiwara, K. and Watanabe, I. 1986. Fundamental studies on environments in plant tissue culture vessels. (2) Effects of stoppers and gas exchange rates between inside and outside vessels closed with stoppers. J. Agri. Met. Japan. 42 (2):119-127. (In Japanese with English summary and captions).

Kowallik, W. 1982. Blue light effects on respiration. Annu. Rev. Plant Physiol. 33:51-72.

Kowallik, W. 1987. Blue light effect on carbohydrate and protein metabolism. pp. 7-16. In: Senger, H. (ed). Blue light responses: Phenomena and occurrence in plants and microorganisms, Boca Raton, CRC Press Inc.

Kowallik, W. and Schurmann, R. 1984. Chlorophyll a/chlorophyll b ratio in *Chlorella vulgaris* in blue or red light. pp. 373-380. In: Senger, H. (ed.). Blue light effects in biological systems, Springer-Verlag, Berlin, New York.

Kubota, S., Yamato, T., Hisamatsu, T., Esaki, S., Oi, R., Roh, M.S. and Koshioka, M. 2000. Effects of red- and far-red-rich spectral treatments and diurnal temperature alternation on the growth and development of petunia. J. Jap. Soc. Hort. Sci. 69:403-409.

Latimer J.C., Johjima, T. and Harada, K. 1991. The effect of mechanical stress on growth and subsequent yield of four cultivars of cucumber. Scientia Hort. 47:221-230.

Lees, R.P., Evans, E.H. and Brown, R.G. 1991. A study of the chlorophyll fluorescence from mature and micropropagated clematis by time-resolved spectroscopy. J. Photochem. Photobiol. 8:307-313.

Li, S., Rajapakse, N.C., Young, R.E. and Oi, R. 2000. Growth responses of chrysanthemum and bell pepper transplants to photosensitive plastic films. Scientia Hort. 84:215-225.

Lin, C. 2000. Plant blue light receptors. Trends in Plant Sci. 5(8):337-342.

Lopez-Figueroa, F. and Neil, F.X. 1989. Red light and blue light photoreceptors controlling

chlorophyll a synthesis in the red alga *Porphyra umbilicalis* and in the green alga *Ulva rigida*. *Physiol. Plant.* 76:391-397.

Louche, T.D., Samson, G.C., Hernandez, C., Chagvardieff, P. and Desjardins, Y. 1999. Importance of light and CO₂ on the effects of endomycorrhizal colonization on growth and photosynthesis of potato plantlet (*Solanum tuberosum* L.) in vitro tripartite system, *New Phytol.* 142:539-550.

Lu, C.M. and Zhang, J.H. 1999. Effects of salt stress on PS II function and photoinhibition in the cyanobacterium *Spirulina platensis*. *J. Plant Physiol.* 155:740-745.

Lyons, R.E. 1982. Roles of gibberellin and auxin in growth and development of *Cyclamen persicum* Mill. Ph. D. thesis, University of Minnesota, St. Paul.

Mannheim, B. 1989. Methods of biochemical analysis and food analysis using test-combinations. Boehringer Mannheim GmbH, Mannheim, Germany. pp. 1-142.

Mansfield, T.A. and Meidner, H. 1966. Stomatal opening in light of different wavelengths: Effects of blue light independent of carbon dioxide concentration. *J. Exp. Bot.* 17:510-521.

Matthys, D., Gielis, J. and Debergh, P.C. 1995. Ethylene. pp. 473-491. In: Aitken-Christie, J., Kozai, T., and Smith, M.A. (eds.). *Automation and environmental control in plant tissue culture*. Kluwer Academic Publishers.

Mccree, K.J. 1972a. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9:191-216.

Mccree, K.J. 1972b. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10:443-453.

Michalczuk, B., Rudnicki, R.M. and Moe, R. 1998. The effect of light quality on ethylene biosynthesis in leaves and petals of alstroemeria plants. *Acta Hort. Abs. No.* 325

Miyachi, S. and Kamiya, S. 1978. Wavelength effects on photosynthetic carbon metabolism in

chlorella. *Plant Cell Physiol.* 19:277-288.

Miyashita, Y., Kitaya, Y., Kozai, T. and Kimura, T., 1995, Effects of red and far-red light on the growth and morphology of potato plantlets in vitro: Using light emitting diodes as a light source for micropropagation, *Acta Hort.* 393:710-715.

Mockler, T.C., Guo, H., Yang, H., Duong, H. and Lin, C. 1999. Antagonistic actions of arabidopsis cryptochromes and phytochrome B in the regulation of floral induction. *Development* 126: 2073-2082.

Moe, R. and Heins, R.D. 1990, Control of plant morphogenesis and flowering by light quality and temperature, *Acta Hort.* 272:81-89.

Moe, R., Heins, R.D. and Erwin, J. 1991. Stem elongation and flowering of the long-day plant *Campanula isophylla* 'Moretti' in response to day and night temperature alterations and light quality. *Scientia Hort.* 48:141-151.

Moe, R. and Kristofferson, T. 1969. The effect of temperature and light on growth and flowering of *Rosa* spp. 'Baccara' in greenhouses. *Acta Hort.* 14: 157-166.

Mohr, H. and Shropshire, W. Jr. 1983. An introduction to photomorphogenesis for the general reader. pp. 24-38. In: Shrophire, W. Jr. and Mohr, H. (eds.). *Encyclopedia of plant physiology*, New series, Berlin, Springer-Verlag.

Moreira, D.S. and Debergh, P.C. 1997. The effect of light quality on the morphogenesis of in vitro cultures of *Azorina vidalii*(Wats.) Feer. *Plant Cell, Tiss. & Org. Cult.* 51:187-193.

Morgan, D. C., Child, R. and Smith, H. 1981. Absence of fluencerate dependency of phytochrome modulation of stem extension in light grown *Sinapis alba*. *Planta* 151:497-498.

Mortensen, L.M. and Fjed, T. 1998. Effects of air humidity, lighting period and lamp type on growth and vase life of roses. *Scientia Hort.* 73:229-237.

Mortensen, L.M. and Stromme, E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops.

Scientia Hort. 33:27-36.

Muir, R.M. and Zhu, L. 1983. Effect of light in the control of growth by auxin and its inhibitor(s) in the sunflower. *Physiol. Plant.* 57:407-410.

Muthuvelan, B., Fujimori, K. and Murugan, C. 1997. Influence of irradiation quality on photosynthetic pigments, saccharides, nitrate reductase activity, thylakoid organization and growth of *Ulva pertusa*. *Biol. Plant.* 40(2):211-218.

Nelson, P.V. 1991. Light and temperature. pp. 359-393. In: Greenhouse operation and management. Prentice Hall, New Jersey.

Neuray, G.K. 1973. Bud formation in *Cyclamen persicum*. *Acta Hort.* 31:77-79.

Paker M.W., Hendricks, S.B. and Brothwick, H.A. 1950. Action spectrum for the photoperiodic control of the long-day plant *Hyosyamus niger*. *Bot Gaz.* 111:242-252.

Philosoph, H.S., Aharoni, N. and Yang, S.F. 1986. Carbon dioxide enhances the development of the ethylene forming enzyme in tobacco leaf discs. *Plant Physiol.* 82:925-929.

Pidgeon, C.M., Reid, D.M. and Facchini, P.J. 1997. Light induced changes in ethylene production in *Phaseolus vulgaris* cv. Taylor. Growth regulators and hormones. Session No. 47. Abs. No. 801.

Pushnik, J.C., Miller, G.F., Jolley, V.D., Brown, J.C., Davis, T.D. and Barnes, A.M. 1987. Influences of ultra-violet (UV)-blue light radiation on the growth of cotton. . Photosynthesis, leaf anatomy, and iron reduction. *J. Plant Nutri.* 10:2283-2297.

Quail, P.H., Gallagher, E.A. and Wellburn, A.R. 1976. Membrane-associated phytochrome: non-coincidence with plastid membrane marker profiles on sucrose gradients. *Photochem. Photobiol.* 24:495-498.

Rajaspakse, N.C. and Kelly, J.W. 1994. Influence of spectral filters on growth and postharvest quality of potted miniature roses. *Scientia Hort.* 56:245-255.

Roger, C.S. and David, S.K. 1997. Height control. pp. 241-257. In: Plug & Transplant Production A Grower's Guide-. Ball Publishing, Batavia, Illinois.

Rudiger, W. 1986. Phytochrome. pp. 17-33. In: Kendrick, R.E. and Kronenberg, G.H.M. (eds.). Photomorphogenesis in plants, Dordrecht: Mortinus Nijhoff Publishers.

Saebo, A, Krekling, T. and Appelgren, M. 2000. Influence of light quality on *in vitro* photosynthesis, leaf morphometry, leaf anatomy and field performance in micropropagated *Betula pendula* 'Rooth'. Acta Hort. Abs. No. 327.

Saebo, A., Krekling, T. and Appelgren, M. 1995. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in vitro. Plant Cell, Tiss. & Org. Cult. 41:177-185.

Schuerger, A.C., Brown, C.S. and Stryjewski, E.C. 1997. Anatomical feature of pepper plants (*Capsicum annuum*L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. Annu. Bot. 79:273-282.

Senger, H. and Schmidt, W. 1986. Cryptochrome and UV receptors. pp. 137-158. In: Kendrick, R.E. and Kronenberg, G.H.M. (eds.). Photomorphogenesis in plants, Dordrecht: Mortinus Nijhoff Publishers.

Smith, H. 1982. Light quality, photoperception, and plant strategy. Annu. Rev. Plant Physiol. 33:481-518.

Smith, H. and Morgan, D.C. 1983. The function of phytochrome in nature. Photomorphogenesis. pp. 491-517. In: Shropshire, J.W. and Mohr, H. (eds.). Encyclopedia of Plant Physiology, New Ser., Springer, Berlin.

Styler, R.C. and Koranski, D.S. 1998, Controlling the root-to-shoot ratio, GrowerTalks. 114-119.

Suarez-Lopez, P., Wheatley, K., Robson, F., Onouchi, H., Valverde, F. and Coupland, G. 2001. CONSTANS mediates between the circadian clock and the control of flowering in arabidopsis. Nature 410:1116-1120.

Sundberg, M.D. 1981a. Apical events prior to floral evocation in *Cyclamen persicum* 'F-1 Rosemunde' (Primulaceae). Bot Gaz. 142: 27-35.

Sundberg, M.D. 1981b. The development of leaves and axillary flowers along the primary shoot axis of *Cyclamen persicum* 'F-1 Rosemunde' (Primulaceae). Bot Gaz. 142: 214-221.

Sung, I.K., Kiyota, M., Tani, A., Hirano, T., Murakami, K. and Taira, T.1998. Time dependence of the growth promotion of cucumber seedlings by Blue-Lighting during morning twilight. Environ. Cont. in Biol. pp. 85-90.

Takahashi, S., Tamashiro, A., Sakihama, Y., Yamamoto, Y., Kawamitsu, Y. and Yamasaki, H. 2002. High-susceptibility of photosynthesis to photoinhibition in the tropical plant *Ficus microcarpa* L. cv. Golden Leaves. BMC Plant Biol. *in press*.

Tanaka, M., Takamura, T., Weatanabe, H., Endo, M., Yanagi, T. and Okamoto, K. 1998. *In vitro* growth of cymbidium plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). J. Hort. Sci. & Biotech. 73(1):39-44.

Tennessen, D.J., Singsaas, E.L. and Sharkey, T.D. 1994. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. Photosynthesis Res. 39:85-92.

Thomas, B. and Dickinson, H.G. 1979. Evidence for two photoreceptors controlling growth in de-etiolated seedlings. Planta 146: 545-560.

Tripathy, B.C. and Brown, C.S. 1995. Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light. Plant Physiol. 107:407-411.

Van Huylenbroeck, J.M. and Debergh, P.C. 1996. Impact of sugar concentration in vitro on photosynthesis and carbon metabolism during ex vitro acclimatization of spathiphyllum plantlets. Physiol. Plant. 96:298-304.

Van Huylenbroeck, J.M., Huygens, H. and Debergh, P.C. 1995. Photoinhibition during acclimatization of micropropagated spathiphyllum 'Petite' plantlets. In Vitro Cell. Dev. Biol.

31:160-164.

Van Huylbroeck, J.M., Piqueras, A. and Debergh, P.C. 1998. Photosynthesis and carbon metabolism in leaves formed prior and during ex vitro acclimatization of micropropagated plants. *Plant Sci.* 134:21-30.

Van Huylbroeck, J.M. and Riek, J.D. 1995. Sugar and starch metabolism during ex vitro rooting and acclimatization of micropropagated spathiphyllum 'Petite' plantlets. *Plant Sci.* 111:19-25.

Van Kooten, O. and Snel, J.F.H. 1990. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. *Photosynthesis Res.* 25:147-150.

Vince-Prue, D. 1977. Photocontrol of stem elongation in light-grown plants of *Fuchsia hybrida*. *Planta* 133:141-156.

Vince-Pure, D. 1983. Photomorphogenesis and flowering. pp. 457-484. In: Shrophire, W. Jr. and Mohr, H. (eds.). *Encyclopedia of plant physiology, New series*, Berlin, Springer-Verlag.

Watanabe, H., Kawai, S., Yoshino, T., Tanaka, F. and Suzuki, M. 1996. Light emitting diodes as the light source for plant growth regulators. Issue 3. Flowering regulation of chrysanthemum by irradiation of LEDs in winter. *Abs. J. Jap. Hort. Sci.* 452-453.

Wellburn, A.R. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.* 144:307-313.

Widmer, R.E. and Lyons, R.E. 1985. *Cyclamen persicum*. In: Halevy, A.H. (ed.). *Handbook of flowering*, Florida, CRC Press Inc. pp. 382-390.

Wild, A. and Holzapeel, A. 1980. The effect of blue and red light on the content of chlorophyll, cytochrome, soluble reducing sugars, soluble proteins and nitrate reductase activity during growth of the primary leaves of *Sinapsis alba*. pp. 444-451. In: Senger, H. (ed.) *The blue light syndrome*, Berlin: Spinger-Verlag.

Williams, E.W. and Hall, R. 1978. *Luminescence and the LED*. Pergamon Press, New York, NY.

Wilson, S.B. and Rajapakse, N.C. 2001. Growth control of Lisianthus by photosensitive plastic films. HortTechnology. 11:581-584.

Yanagi, T., Okamoto, K. and Takita, S. 1996. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. Acta Hort. 440:117-122.

Zeiger, E. 1983. The biology of stomatal guard cells. Annu. Rev. Plant Physiol. 34: 441-475.

Zeiger, E. 1984. Blue light and stomatal function. pp. 484-494. In: Senger, H. (ed.). Blue light effects in biological systems, Berlin, Springer-Verlag.

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.