

교육학석사학위논문

청색광(Blue Light)에 의한 식물의 생장과
광합성 활성

Plant Growth and Photosynthetic Activity
by Blue Light

충북대학교 대학원

과학교육학과 생물교육전공

남 희 숙

2022 년 2 월

교육학석사학위논문

청색광(Blue Light)에 의한 식물의 생장과
광합성 활성

Plant Growth and Photosynthetic Activity
by Blue Light

지도교수 이 준 상

과학교육학과 생물교육전공

남 희 숙

이 논문을 교육학석사학위 논문으로 제출함.

2022 년 2 월

본 논문을 남희숙의 교육학석사학위 논문으로 인정함.

심 사 위 원 장 김 대 재 ⑨

심 사 위 원 이 준 상 ⑨

심 사 위 원 신 세 인 ⑨

충 북 대 학 교 대 학 원

2022 년 2 월

차 례

표 차례	ii
그림 차례	iii
Abstract	v
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	2
III. 본 론	11
1. 청색광에 의한 채소의 생육 특성	11
2. 청색광에 의한 화훼의 생육 특성	43
3. 청색광에 의한 과수의 생육 특성	48
4. 청색광에 의한 기내 묘 및 새싹 묘의 생육 특성	48
5. 청색광에 의한 CAM 식물의 생육 특성	50
6. 청색광에 의한 식물체 내에서의 기작	55
IV. 결 과	63
V. 결론 및 제언	67
참고문헌	69
감사의 글	74

표 차례

〈표 3-1〉 이식 후 37일째에 적색 및 청색 LED의 다양한 조합 비율에서 재배된 방울토마토 묘의 성장 특성	29
〈표 3-2〉 이식 후 적색 및 청색 LED의 다양한 조합 비율에서 재배된 방울토마토의 열매 수확량 및 품질	29
〈표 3-3〉 파프리카 ‘Spirit’ 이식 18일 후의 생육 특성	31
〈표 3-4〉 파프리카 ‘Spirit’ 이식 114일 후의 성장 특성	32
〈표 3-5〉 매주 수확되는 파프리카 ‘Spirit’ 6개의 조기 수확량	32
〈표 3-6〉 ‘Elkat’ Frigo 딸기 동화지수에 대한 조명의 영향	37
〈표 3-7〉 열매 맺기 전과 후 ‘Elkat’ Frigo 딸기의 발달과 수확량	38
〈표 3-8〉 개화 후 10일에 Everbearing 딸기 ‘HSI38’의 성장 및 발달에 대한 다양한 광질 변화의 효과	39
〈표 3-9〉 <i>Rosa hybrida</i> ‘Radrazz’와 <i>R. chinensis</i> ‘Old Blush’ 잎의 백색광 또는 청색광 조건에서 6주간 배양 후 광질이 광합성 매개변수 및 색소 함량에 미치는 영향	44

그림 차례

<그림 3-1> 다양한 LED와 FL+HPS에서 재배한 상추의 SPAD 값	12
<그림 3-2> 다양한 LED와 FL+HPS에서 재배한 상추의 총 페놀 농도	13
<그림 3-3> 다양한 LED와 FL+HPS에서 재배한 상추의 항산화 능력	13
<그림 3-4> 다양한 LED와 FL+HPS에서 재배한 적상추 ‘Sunmang’의 PAL 유전자 발현	14
<그림 3-5> 3가지 복합 LED에서 재배한 잎 모양 지수와 상추	15
<그림 3-6> LED의 다른 조명 품질에 따른 상추의 안토시아닌 함량	17
<그림 3-7> LED의 다른 조명 품질에 따른 상추의 비타민 C 함량	18
<그림 3-8> <i>Brassica rapa</i> 묘의 광 조절 형태 변화	22
<그림 3-9> 배추의 AsA 함량에 대한 백색, 청색 및 적색 LED 조명의 효과	24
<그림 3-10> 배추 묘의 활성산소종(ROS) 소거 활성에 대한 백색, 청색 및 적색 LED 조명의 효과	25
<그림 3-11> 적색-청색 LED의 다양한 조합 비율에서 자란 방울토마토 묘목	28
<그림 3-12> 적색 및 청색 LED, UVa 방사선 처리 후 파프리카 열매의 표면 색상	33
<그림 3-13> 적색 및 적색+청색 LED 처리에 따른 딸기 잎 및 새싹의 생체중 내에서의 탄수화물 함량	36

〈그림 3-14〉 적색 및 적색+청색 LED 처리에 따른 딸기 잎의 광합성 색소 함량 및 비율	37
〈그림 3-15〉 개화 후 10일에 다양한 광질에서 자란 Everbearing 딸기 ‘HS138’의 표현형	40
〈그림 3-16〉 실내 LEDs에서 자란 Salvia ‘Vista Red’ 묘목	47
〈그림 3-17〉 <i>Kalanchoe pinnata</i> 의 온전한 잎에서 빛에 대한 기공 전도도의 변화	51
〈그림 3-18〉 <i>Kalanchoe pinnata</i> 및 <i>K. daigremontiana</i> 의 표피에서 빛과 Fusicoccin에 대한 기공 반응	52
〈그림 3-19〉 <i>Kalanchoe pinnata</i> 및 <i>K. daigremontiana</i> 의 표피에서 Tautomycin 과 Vanadate에 의한 기공 열림 억제	53
〈그림 3-20〉 백색, 청색 또는 적색광에서 재배한 벼의 전자 이동 과정과 광보호에 대한 도식적 표현	56
〈그림 3-21〉 적색광의 낮은 PAR에서 청색광에 의한 식물 성장 촉진	58
〈그림 3-22〉 포토트로핀 매개에 의한 성장 촉진	59
〈그림 3-23〉 BL과 CO ₂ 의 신호가 수렴하는 CBC 기능	60
〈그림 3-24〉 기공 개방의 가능한 메커니즘	62

Plant Growth and Photosynthetic Activity by Blue Light*

Nam, Hee Sug

*Department of Biology Education
Graduate School, Chungbuk National University
Cheongju, Korea
Supervised by Professor Lee, Jun Sang*

Abstract

Light, which is one of the environmental factors of plants, is an energy source for photosynthesis as well as growth and development of plants and has a great influence on the accumulation of metabolites.

This study was conducted to analyze the effect of blue light on the growth and photosynthetic activity of horticultural crops, vitro culture seedlings and sprout seedlings, and CAM plants.

As a result, blue light was effective in increasing the functional substances such as chlorophyll, phenol concentration, antioxidant level, flavonoid, anthocyanin, AsA (L-ascorbic acid), and minerals in most crop cultivation. However, it was confirmed that the combined treatment of red light and blue light was more effective for overall crop growth than treatment with blue light alone. In the case of grapes, nighttime irradiation delayed maturation. Since even in the same crop, the characteristics of responding to light are different depending on the variety and the growth is different according to the ratio of mixed light, it is effective to increase the yield by finding and cultivating the light conditions suitable for the purpose of cultivation. In addition, it is economical to stop the artificial light source because it does not have a lasting effect in the long-term treatment after the beginning of harvest of fruit vegetables and after flowering of flowers and it

is judged that the treatment at the time of seedling of crops is very effective for crop growth because the seedling quality is good.

key words: growth, light emitting diodes(LEDs), blue light, ascorbic acid, minerals, chlorophyll, anthocyanin, phenol concentration, antioxidant activity.

* A thesis for the degree of Master in February 2022.

I. 서론

최근 지구 온난화에 따른 이상 기후로 인하여 식물 생육에 적합한 환경요인을 보장받을 수 없게 되었다. 이러한 환경 문제점을 극복하기 위해 유리 온실이나 플라스틱 온실과 같은 환경 제어가 가능한 시설재배 면적이 증가하고 있는 추세이다. 또한 국민소득이 향상됨에 따라 식품 소비 구조가 고급화되고 다양화되면서 연중 안정적인 고품질 농작물 생산을 위한 연구도 꾸준히 진행되고 있다.

식물의 환경요소 중 하나인 빛은 식물의 성장과 발달뿐만 아니라 광합성을 위한 에너지원이며 대사산물의 축적에도 많은 영향을 미친다.

식물체에 조사되는 적색광, 청색광, 녹색광 등의 여러 가지 파장의 빛은 피토크롬(phytochrome), 크립토크롬(cryptochrome), 포토트로핀(phototropin), 제아크산틴(zeaxanthin) 등과 같은 광수용체에 의해 흡수되고 식물체 내에서 다양한 반응을 유도한다. 적색광은 광합성 기관의 발달과 전분 축적에 중요하고, 청색광은 엽록체 발달과 엽록소 형성, 기공개폐 및 광형태형성 등에 관여한다. 그러나 식물의 특징에 알맞게 조사 되는 광은 생육을 촉진 시키지만 적절하게 사용하지 못하면 오히려 해를 가져올 수도 있다.

이에 본 연구는 청색광이 원예작물, 기내 묘와 새싹 묘, CAM 식물의 생장과 광합성 활성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하여 청색광의 효율을 최적화하기 위한 광 조건을 찾아 작물의 종류와 재배 목적에 맞는 광조사를 함으로써 작물의 품질을 향상시키고 최대 수확량을 얻을 수 있는 기초자료를 확보하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 청색광 반응의 광 생리학

(1) 청색광은 비대칭적인 생장과 굴곡을 촉진한다

빛을 향한 방향성을 갖는 생장을 굴광성(phototropism)이라 하며 이는 단자엽식물과 쌍자엽식물의 암처에서 자란 유식물에서 극적으로 나타나는 광형태형성(photomorphogenetic)반응이다.

벼과 초본의 줄기는 토양을 뚫고 자랄 때 자엽초라고 하는 변형된 잎에 의해 보호되며 자엽초가 빛을 불균등하게 감지하면 자엽초의 빛을 받은 쪽과 그늘진 쪽에서 옥신의 농도가 불균등해지고 그 결과, 불균등(비대칭) 생장 및 굴곡을 일으킨다.

(2) 청색광 촉진 반응의 조절

암처에서 자라는 유식물의 줄기는 매우 빠르게 신장하는데, 빛에 의한 줄기 신장 저해는 토양 표면을 뚫고 나오는 유식물의 주요한 형태형성 반응이다. 황백화된 유식물에서 Pr의 Pfr(각각 적색광과 원적색광을 흡수하는 피토크롬 형태)로의 전환은 피토크롬 의존적으로 급격한 신장 속도의 감소를 가져온다.

반면, 신장률의 감소에 대한 작용 스펙트럼은 청색 부위에서 강력한 활성을 나타내며 실제로 줄기 신장 저해의 작용 스펙트럼 중 400~500 nm의 청색 부위는 굴광성의 그것과 아주 흡사하다.

청색광이 일으키는 또 다른 신속 반응으로는 생장 속도 저해에 앞서 일어나는 하배측 세포막의 탈분극(depolarization)이다. 막의 탈분극화는 음이온 채널

들의 활성화에 의해 초래되는데, 이 채널은 염소 이온과 같은 음이온의 유출을 촉진한다. 음이온 채널 차단제인 NPPB[5-nitro-2-(4-phenylpropylamino)-benzoate]를 처리하면 청색광 의존적인 막의 탈분극이 일어나지 않으며, 하배축 신장에 미치는 청색광의 저해 효과가 감소한다.

(3) 청색광은 기공 열림을 촉진한다

유색광(colored light)을 비추어 빛에 대한 기공의 반응을 자세히 연구한 결과, 빛은 공변세포의 두 가지 별개의 반응, 즉 공변세포 엽록체의 합성, 그리고 특이적 청색광 반응을 활성화시켰다.

청색광 특이적 반응을 연구할 때 청색광만을 단독으로 사용할 수 없다. 왜냐하면 청색광은 청색광 특이적인 반응과 공변세포 광합성 둘 다를 촉진하기 때문이다. 두 가지 종류의 광반응을 명확히 구분하기 위해 먼저 고광도의 적색광을 사용하여 광합성 반응을 포화시키는데 이렇게 하면 추가로 가해지는 적색광과 청색광을 증가시키더라도 광합성에 의해 매개되는 기공 열림을 방지할 수 있다. 이처럼 포화 적색광이 유도된 후 이어 낮은 광자속의 청색광을 가하면, 상당한 정도로 기공이 더욱 열리게 되는데 이는 공변세포의 광합성이 더 많이 촉진된 것이 아니다. 왜냐하면 이미 적색광이 광합성을 이미 포화시키고 있기 때문이다.

포화 적색광 배경에서 청색광에 대한 기공 반응의 작용 스펙트럼은 세 손가락(three-finger)패턴을 보이는데 이는 전형적인 청색광 반응이면서 광합성의 작용 스펙트럼과는 명확하게 구분되는데 이 작용 스펙트럼은 공변세포가 청색광에 특이적으로 반응한다는 것의 증거가 된다.

빛은 공변세포 원형질체의 이온 흡수와 유기 용질의 축적을 촉진하고 이는 세포의 삼투 포텐셜을 저하시킨다(삼투압을 높인다). 그 결과 공변세포 원형질체로 물이 유입되어 부피가 팽창한다. 세포벽을 가진 공변세포에서는 이러한 팽압 증가로 인해 세포벽의 변형이 일어나 기공의 구경을 증가시킨다.

(4) 청색광은 공변세포 원형질막의 양성자 펌프를 활성화시킨다

온전한 잎에서 청색광에 의해 양성자 펌프가 촉진되면 공변세포를 둘러싼 아포플라스트 공간의 pH가 저하되며 아울러 이온 흡수와 기공 열림에 필요한 추진력이 형성된다.

푸시콕신은 원형질막 ATPase의 잘 알려진 활성화 물질(activator)이며 푸시콕신 노출은 외향성 전류를 촉진하여 양성자 기울기를 생성한다. 이러한 양성자 기울기는 양성자 이오노포어(ionophore)인 CCCP(carbonyl cyanide *m*-chlorophenylhydrazone)에 의해 소실되며, 이 화합물은 양성자에 대한 원형질막의 투과성을 높여 막을 가로지르는 양성자 기울기의 형성을 방해하여 양성자의 순유출을 없앤다.

공변세포 원형질막에서의 양성자 펌핑과 기공 열림 사이의 관련성은 두 가지이다.

- 푸시콕신은 공변세포 원형질체로부터 양성자 배출과 기공 열림을 모두 촉진한다.

- CCCP는 푸시콕신이 촉진하는 열림을 저해한다. 나아가 청색광의 플루엣스율의 함수로 양성자 펌핑 속도가 증가한다는 것은 잎에 도달하는 햇빛 내의 청색광 광자의 숫자가 증가하면 기공이 더욱 크게 열리게 된다.

(5) 청색광 반응은 특징적인 키네틱스와 지연 시간이 있다

전형적 광합성 반응은 ‘점등(light on)’신호 후 매우 빠르게 활성화되고 소등 시 바로 멈추는데, 이와 달리 청색광 반응은 섬광을 처리한 후 몇 분 동안 최대 속도로 진행된다.

‘소등(light off)’신호 후에도 남아 있는 청색광 반응의 이러한 잔존성은 다음과 같이 설명될 수 있다. 청색광 수용체의 불활성형은 청색광에 의해 활성형으로 전환되는데, 청색광이 꺼진 후 이 활성형 수용체가 생리적 불활성형으로 되돌아올 때 천천히 되돌아오기 때문에 그 반응도 상당 시간 동안 잔존할 수 있다는 것이다. 이와같이 청색광 섬광에 대한 반응 속도는 활성형이 불활성형으로 되돌아가는 시간 경과(time course)에 의해 좌우된다.

청색광 섬광에 대한 반응의 또 다른 특성은 지연 시간인데, 이것은 청색광에 의해 촉진되는 산성화 반응 및 외향적 전류의 생성이 약 25초 지연된다. 이 시간 간격은 신호전달 과정이 광수용체 부위로부터 양성자 펌프 ATPase 까지 진행하는 데 걸리는 시간인 동시에 양성자 기울기가 형성되는 데 필요한 시간이다.

(6) 청색광은 공변세포의 삼투 균형을 조절한다

식물생리학자인 로이드(F. E. Loyd)는 1908년에 공변세포의 팽압은 녹말-당 상호 전환에서 비롯된 삼투적 변화에 의해 조절된다고 하였는데, 이 개념은 기공 운동의 녹말-당 가설의 모태가 되었다. 1940년대 일본에서 공변세포의 칼륨 이온 플럭스가 발견되었고, 1960년대에는 서구에서 재발견되었는데, 이러한 발견은 공변세포의 삼투조절이 녹말-당 가설에 따라 이루어지는 것이 아니

라 칼륨과 그 반대 이온인 Cl^- 과 malate^{2-} 음이온에 의해 이루어진다는 현대적 이론으로 대체되었다.

공변세포에서 칼륨의 농도는 공변세포가 열릴 때 몇 배로 증가하는데, 식물 종에 따라 닫힌 상태의 100 mM에서 출발하여 열린 상태의 400~800 mM으로 증가한다.

기공이 열리는 동안 염소 이온은 아포플라스트로부터 공변세포로 흡수되고, 기공이 닫힐 때는 배출된다. 반면에, 말산(malate)은 공변세포 시토플라스마에서 녹말의 가수분해로 생성된 탄소골격을 사용하는 대사 경로를 통해 합성된다. 기공이 닫히는 동안 공변세포의 말산 함량은 감소한다.

양성자 펌프에 의해 H^+ 의 전기화학적 퍼텐셜 $\Delta\mu_{\text{H}^+}$ 가 생성되고 이로부터 추진되는 2차 수송 메커니즘을 통해 칼륨과 염소 이온은 공변세포 내로 흡수된다. 양성자 배출은 공변세포 원형질막을 가로지르는 전기 퍼텐셜 차이를 더욱 음성적으로 만든다.

양성자 기울기의 전기적 성분은 전압에 의해 조절되는(voltage regulated) 칼륨 채널을 통해 칼륨 이온이 수동적으로 흡수되게 하는 추진력을 제공한다. 염소 이온은 양성자-염소 이온의 동시 수송체(symporter)를 통해 흡수된다고 여겨진다. 이와같이 청색광 의존적인 양성자 펌핑에 의해 생성된 추진력은 기공 열림을 위한 이온 흡수 시 핵심적 역할을 수행한다.

(7) 설탕은 공변세포에서 삼투 활성 물질이다

온전한 잎에서 기공 운동의 일일 변화에 관한 연구에 의하면 공변세포 내의 칼륨 함량은 이른 아침의 기공 열림과 병행하여 증가하지만, 기공 구멍이 계

속 증가하는 조건 하에서 이른 오후에는 그 함량이 감소한다. 이와 대조적으로 설탕 함량은 아침에 천천히 증가하며, 칼륨 이온이 유출되면 설탕이 공변세포의 주도적 삼투 활성 용질이 된다. 일몰의 기공 닫힘은 공변세포의 설탕 함량의 감소와 병행하여 일어난다.

이러한 삼투조절 특성은 기공 열림이 주로 K^+ 흡수와 관련되며, 닫힘은 설탕 함량의 감소와 관련되어 있다.

2. 청색광 촉진 반응의 조절

청색광에 의해 유도되는 기공 열림의 감각 전달 과정 중에서 몇몇 핵심적 단계들이 규명되었다. 양성자 펌핑 H^+ -ATPase는 기공 운동 조절에 있어서 중심적 역할을 한다. H^+ -ATPase는 C-말단에서 효소 자체의 활성을 조절하는 자가 억제 도메인을 갖고 있는데 실험적으로 단백질 분해 효소(protease)에 의해 이 자가 억제 도메인을 제거하면 H^+ -ATPase는 비가역적으로 활성화된다. C-말단의 자가 억제 도메인은 촉매 부위를 차단함으로써 효소 활성을 저하시키는 것으로 생각된다. 반대로 푸시록신은 자가 억제 도메인을 촉매 부위로부터 멀어지도록 위치를 변환시킴으로써 효소를 활성화하는 것으로 보인다.

H^+ -ATPase는 청색광을 쬔을 때 ATP에 대한 K_m 이 낮아지고 V_{max} 는 높아지는데, 이것은 청색광이 H^+ -ATPase를 활성화시킴을 가리킨다. 이 효소의 활성화는 C-말단 도메인에서의 세린과 트레오닌 잔기의 인산화를 포함한다. H^+ -ATPase의 인산화를 차단하는 단백질 키나아제 저해제는 청색광에 의해 촉진되는 양성자 펌핑과 기공 열림을 억제한다. 푸시록신과 마찬가지로 C-말단 도메인의 인산화는 C-말단의 자가 억제 도메인의 위치를 효소의 촉매 부

위로부터 멀어지게 하는 것 같다.

공변세포의 양성자 펌핑 속도는 청색광의 플루엔스율에 따라 증가하며, 양성자 펌프에 의해 생성된 전기화학적 기울기는 공변세포로의 이온 흡수를 일으킴으로써 팽압을 높이고 팽압으로 매개된 기공 구경을 증가시킨다. 이러한 과정들은 청색광에 의한 세린/트레오닌 단백질 키나아제의 활성화와 청색광에 의해 촉진되는 기공 열림을 연계시키는 주요한 단계들을 규정한다.

3. 청색광의 광수용체

(1) 크립토크롬은 식물 발달을 조절한다

크립토크롬은 하배축 신장 저해, 자엽 확장, 막 탈분극화, 엽병 신장 및 안토시아닌 생산 등의 촉진, 그리고 일주기 시계의 조절과 같은 몇몇 청색광 반응을 매개한다. 형질 전환된 담배 또는 애기 장대에서 CRY1(cryptochrome 1; CRY1)단백질을 과발현시키면 청색광에 의해 촉진되는 하배축 신장 저해가 더욱 강력하게 나타나고 안토시아닌 생산도 많아진다.

CRY1 및 CRY2는 식물계를 통해 두루 발견되는데 CRY2의 경우 청색광에서 우선적으로 분해되지만 CRY1은 훨씬 안정적이다.

CRY1과 CRY2는 둘 다 개화 유도시에 주된 역할을 수행한다.

(2) 포토트로핀은 청색광 의존적인 굴광성과 엽록체 운동을 매개한다

방향성 광원하에서 성장하는 식물들은 최대한 빛을 흡수하기 위해 빛을 향해 굽는다. 그리고 이 굴광성은 청색광에 의해 이루어진다. *phot1*과 *phot2*는 모두 굴광성 반응에 관여하며, *pho2*는 높은 빛의 세기에서 기능을 수행하거나

혹은 장시간에 걸쳐 기능을 수행한다.

잎은 변화하는 광 조건 하에서 엽록체의 세포 내 분포를 바꿀 수 있는 적응성이 있다. 세포 내 엽록체의 재분포는 빛의 흡수를 조절하여 광 손상을 방지한다.

빛이 약할 때 엽록체는 엽육세포의 상부 표면이나 하부 표면에 모여(‘축적’ 반응) 빛 흡수를 최대화한다.

빛이 강할 때 엽록체는 입사광과 평행한 세포면으로 이동하여(‘회피’반응) 빛 흡수를 최소화함으로써 광 손상을 피한다. 최근 연구에 의하면 *phot1* 돌연변이체의 엽육세포는 정상적인 회피 반응을 보이는 반면, 이중 돌연변이체인 *phot1/phot2*의 세포는 회피 반응과 축적 반응 모두 일으키지 못한다. 이러한 결과는 회피 반응에서 *phot2*가 핵심적 역할을 수행하며, *phot1*와 *phot2*는 둘 다 축적 반응에 기여함을 가리킨다.

(3) 제아크산틴은 공변세포에서 청색광의 광수용을 매개한다

제아크산틴은 엽록체의 크산토펜회로(xanthophyll cycle)의 한 성분이며, 이 회로는 광합성 색소를 과도한 들뜬 에너지로부터 보호한다. 뿐만 아니라, 제아크산틴은 공변세포에서 청색광 수용체의 기능을 가지면서 청색광에 의해 촉진되는 기공 열림을 매개한다.

(4) 녹색광은 청색광에 의해 촉진되는 기공 열림을 역전시킨다

청색광에 의해 촉진되는 기공 열림은 스펙트럼의 500~600 nm부위의 녹색광에 의해 무효화된다. 청색광과 녹색광을 동시에 조사하면 공변세포의 청색

광 반응이 저해된다.

녹색광이 꺼질 때 기공이 열리는 반응은 청색광이 있을 때만 일어난다.

녹색광에 의한 청색광 반응의 역전에는 포토트로핀이 아닌 제아크산틴이 필요하다. 청색광에 의해 유도되는 기공 열림의 작용 스펙트럼은 제아크산틴의 흡수스펙트럼과 일치한다.

이처럼 기공이 연이은 청색광 및 녹색광 섬광에 반응하여 열리고 닫히는 것은 단백질에 결합된 제아크산틴이 청색광에 의해 생리 활성형인 녹색광 흡수형으로 전환되기도 하고, 반대로 녹색광에 의해 불활성형인 청색광 흡수형으로 역전되기도 하는 광 회로의 결과이다.

Ⅲ. 본 론

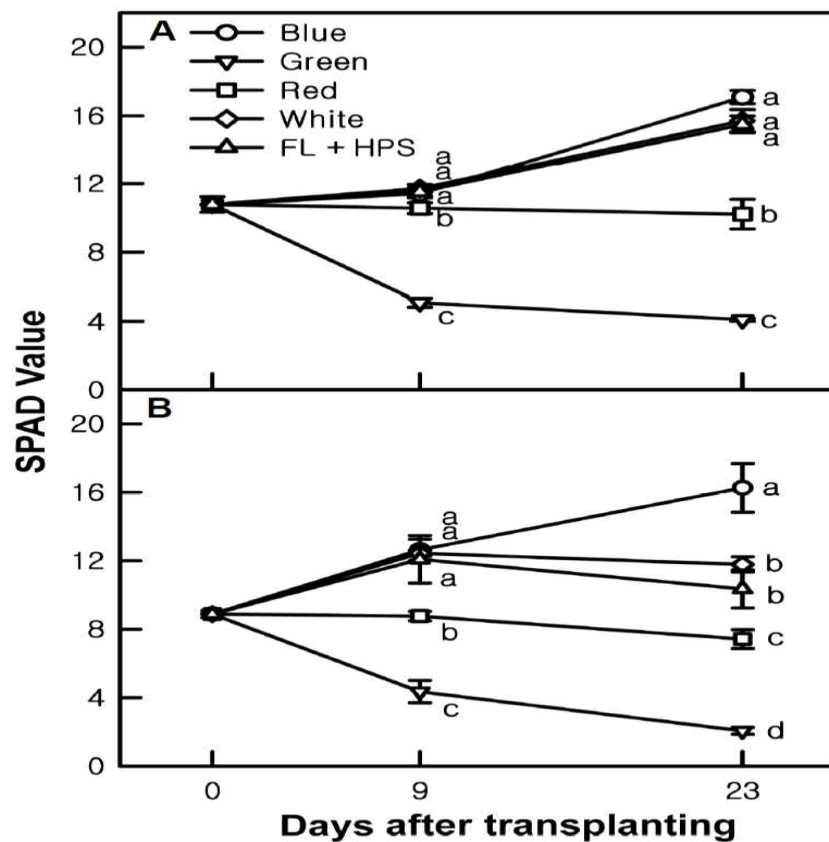
1. 청색광에 의한 채소의 생육 특성

(1) 잎채소

손기호 등(2012)은 적축면 상추('Sunmang')와 청축면 상추('Grand rapid TBR')에 다양한 광원을 조사하여 엽형, 생장 및 기능성 물질의 영향을 조사하였다. 정상적인 환경 조건(20℃, 형광등+고압나트륨등, $130 \pm 5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 광주기 12시간)에서 18일간 자란 상추 묘를 다양한 LED 광원(청색 LED, 456 nm; 녹색 LED, 518 nm; 적색 LED, 654 nm; 백색 LED, 456 nm + 558 nm)이 설치된 환경 조건(20℃, $130 \pm 7 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 광주기 12시간)의 인큐베이터에 정식 하였다. 엽장, 엽폭, 엽면적, 지상부·지하부의 생체중 및 건물중, 지상부/지하부 비율, 엽록소 함량, 총 페놀 농도, 항산화도, PAL(phenylalanine ammonia-lyase) 유전자의 발현 정도를 정식 후 9일과 23일째에 측정하였다. 두 상추 품종의 엽형지수는 청색 LED와 백색 LED 처리에서 모든 기간 동안 대조구(형광등 + 고압나트륨등)와 비슷한 결과를 보였다. 그러나 적색 LED와 녹색 LED 처리는 다른 처리보다 엽형을 길게 유도하였다. 녹색 LED 처리는 상추 생육에 부정적인 영향을 보였다. 지상부·지하부의 생체중 및 건물중, 엽면적과 같은 생육 특성의 대부분은 두 품종 모두 적색 LED 처리에서 가장 높았다. 적축면의 경우 정식 후 23일째에 적색 LED 처리의 지상부 생체중은 녹색 LED 처리보다 3.8배 높았다. 반면 상추의 엽록소, 총 페놀 농도, 항산화도는 생육과 반대의 경향을 보였다. 엽록소 함량을 나타내는 SPAD 값은 청색 LED 처리에서 엽록소 함량이 생육 전반에서 후반으로 갈수록 점차 증가하여 다른 LED 처리

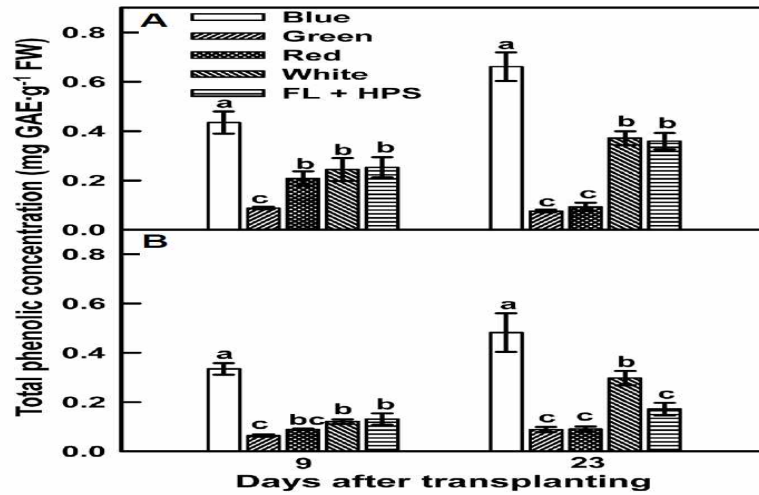
에 비해 유의적으로 높은 값을 보였다<그림 3-1>. 청색 LED 처리는 전 생육 기간에서 두 측면 상추 모두에서 유의적으로 가장 높은 총 페놀 물질의 축적을 유도하였다<그림 3-2>. 항산화도 역시 총 페놀 농도와 비슷한 경향으로 청색 LED 처리에서 가장 높았다<그림 3-3>. 또한 페놀 물질 생합성의 핵심 유전자인 PAL 유전자는 정식 후 9일째 청색 LED에서 가장 높은 발현 정도를 나타냈다<그림 3-4>.

<그림 3-1> 다양한 LED 및 FL+HPS(형광등+고압나트륨등)에서 재배한 상추 식물의 SPAD 값. (A) ‘Sunmang’, (B) ‘Grand rpid TBR’.



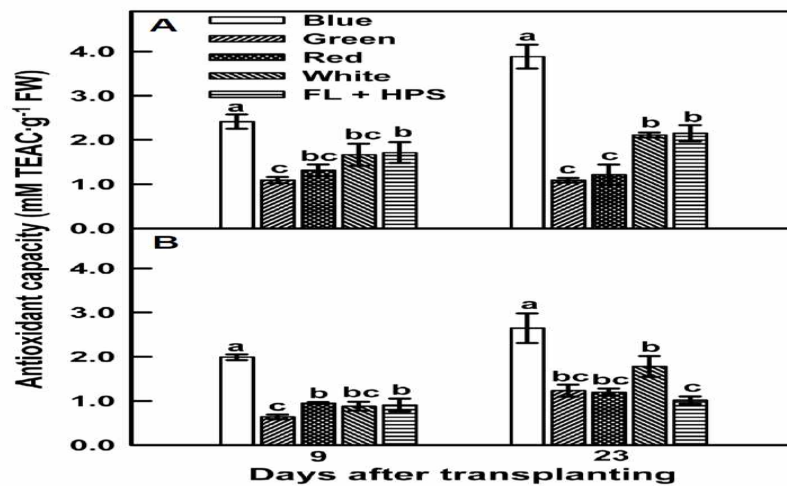
출처: 손기호 등((2012), 단색 발광다이오드에서 자란 측면상추 두 품종의 엽형, 생장 및 기능성 물질, 원예과학기술지, 30(6), (p.668).

<그림 3-2> 다양한 LED와 FL+HPS(형광등+고압나트륨등)에서 재배한 상추의 총 페놀 농도. (A) ‘Sunmang’, (B) ‘Grand rpid TBR’.



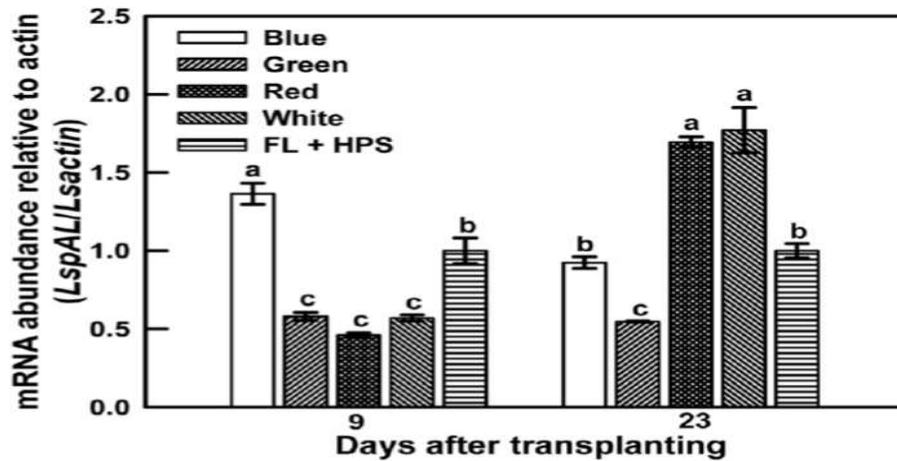
출처: 손기호 등((2012), 단색 발광다이오드에서 자란 축면상추 두 품종의 엽형, 생장 및 기능성 물질, 원예과학기술지, 30(6), (p.670).

<그림 3-3> 다양한 LED와 FL+HPS(형광등+고압나트륨등)에서 재배한 상추의 항산화 능력. (A) ‘Sunmang’, (B) ‘Grand rpid TBR’.



출처: 손기호 등((2012), 단색 발광다이오드에서 자란 축면상추 두 품종의 엽형, 생장 및 기능성 물질, 원예과학기술지, 30(6), (p.670).

<그림 3-4> 다양한 LED와 FL+HPS(형광등+고압나트륨등)에서 재배한 적상추 'Sunmang'의 PAL(페닐알라닌 암모니아 분해효소) 유전자 발현



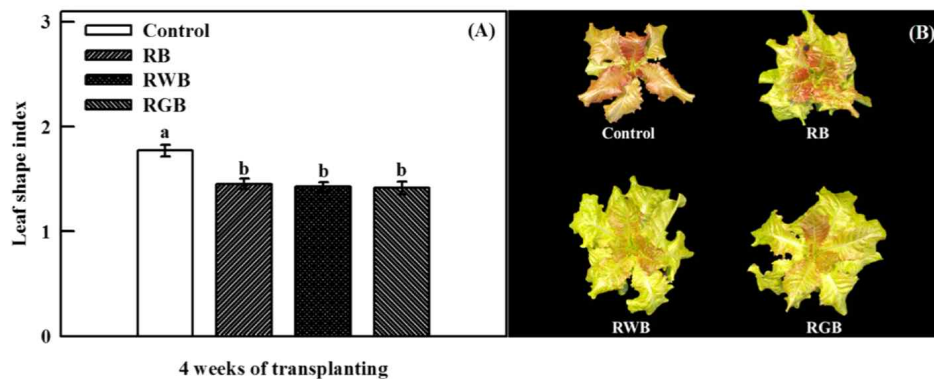
출처: 손기호 등((2012), 단색 발광다이오드에서 자란 축면상추 두 품종의 엽형, 생장 및 기능성 물질, 원예과학기술지, 30(6), (p.671).

이 연구에서 광질은 상추의 생육, 형태 및 기능성 물질의 축적에 중요한 요소로 작용한다는 것을 확인할 수 있었다(손기호 등 2012).

손기호 등(2016)은 폐쇄형 식물생산시스템에서 세 가지 혼합 LED 광원과 형광등에서 자란 상추의 생육과 광 이용효율을 비교하였다. 18일간 육묘한 적치마 상추묘를 적색(R, 655 nm), 청색(B, 456 nm), 녹색(G, 515 nm), 백색(W, 456 nm + 558 nm)의 혼합 LED(R:B=8:2, R:W:B=8:1:1), R:G:B=8:1:1)와 형광등이 설치된 폐쇄형 식물생산시스템에 정식 하였다. 정식 후 4주간 재배된 적치마 상추의 엽형, 생육, 엽면적, 엽록소 함량(SPAD 값)을 조사한 결과, 엽형지수는 형광등 처리가 모든 LED 처리구에 비하여 유의적으로 높은 값은 나타났다<그림 3-5A>. 외형상으로 보았을 때 또한 형광등과 LED 처리구에서 자란 상추의 확연한 크기 차이를 볼 수 있었다<그림 3-5B>. 지상부와 지하부의 생

체중 및 건물중은 형광등보다 LED 처리구에서 높은 값을 기록하였다.

<그림 3-5> 3가지 복합 LED에서 재배한 잎 모양 지수(A)와 상추(B)



손기호 등(2016), 혼합 발광다이오드와 형광등에서 자란 적치마 상추의 생육 및 광 이용 효율 비교, 시설원예식물공장, Vol. 25, NO. 3, (p.142).

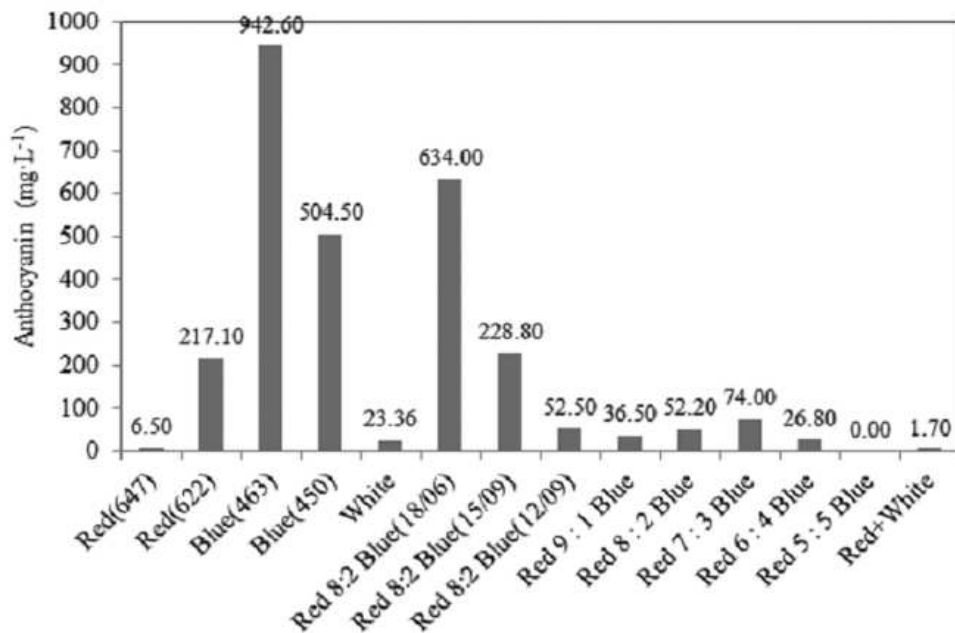
본 연구에서 형광등과 LED 처리구의 뚜렷한 성장 차이의 원인은 조사되는 광질의 차이로 설명할 수 있다. 형광등의 적색 파장은 전체 광량의 18%로 차지한 반면, 3가지 LED 처리구들은 78~82%의 적색 파장을 함유하였다. 적색 광은 식물의 광합성 기관 발달과 전분 축적을 위한 중요한 에너지원으로 이용되기 때문에 작물 생육에 효과적인 광스펙트럼으로 잘 알려져 있다. 실제로 상추의 생육에 있어 적색 LED의 긍정적인 효과가 보고되었다. 또한, 이전 연구에서 다양한 적색과 청색의 혼합광에 따른 상추의 생육을 검토한 결과, 적색과 청색이 8:2비율에서 상추의 생육이 형광등보다 높게 보고되었다. 본 연구의 3가지 LED 광원 조합의 적색의 비율이 78~82%였으며 청색의 비율은 13~22%였다는 점에서 형광등보다 월등한 성장 결과를 뒷받침할 수 있다. 식물 성장에 있어 단일 파장의 광 조사보다 청색 또는 원적색 파장을 같이 조사하

는 것이 광합성을 촉진시켜 생장 증진에 더욱 효율적으로 알려져 있는데 이는 phytochrome(적색과 원적색 파장 흡수)과 cryptochrome(자외선-A와 청색 파장 흡수)의 시너지효과로 설명될 수 있다. 잎의 두께를 나타내는 비엽중(SLW)값 역시 형광등보다 LED 처리구에서 높았으며, 엽면적은 형광등보다 높은 수치를 나타냈지만 유의적인 차이는 없었다. 청색광은 잎의 엽육조직 형성을 유도하므로, 청색광 수준이 증가함에 따라 잎 두께가 증가된다. LED 처리구에서는 RB가 수치적으로 높은 엽록소 값을 보였다. 엽록소 형성은 주로 청색광에 의존된다고 알려져 있으며 이번 결과에서도 특히 청색 파장이 주로 영향을 주었다. 4주 동안 LED 처리구와 대조구(형광등)의 광 이용효율을 분석한 결과 형광등의 총 소비전력은 145 kW인 반면, LED 처리구는 평균 약 54 kW로 형광등의 약 37% 수준이었다. 총 소비전력을 기반으로 LED 처리구들의 광 이용효율은 약 34 mg/W으로 형광등보다 약 3.4배 높은 에너지 효율이었다. 본 연구는 식물 생산 시스템에서 적절한 조합의 LED 조사는 형광등에 비해 상추 생장을 증진시킬 수 있으며 추가적으로 에너지 절감을 통해 광 이용효율도 극대화 할 수 있음을 보여주었다(손기호 등 2016).

단색광, 혼합광, 광조사 주기에 대해 최만권 등(2014)은 총 14가지 실험구를 설치하여 적치마 상추의 생육특성 안토시아닌 및 비타민 C 함량에 대해 조사하였다. 그 결과, 단색광 처리에서 적색광(622 nm)은 초장, 엽수, 지상부 생체중, 청색광(450 nm, 463 nm)은 근장과 엽폭을 증대시키는 것으로 나타났다. 따라서 적색광은 상추의 지상부 생육에, 청색광은 지하부 생육에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 혼합광의 경우 적색광과 백색광 혼합광에서 초장, 엽수, 엽폭, 지상부와 지하부의 생체중 및 건물중이 가장 높게 나타났다. 이는

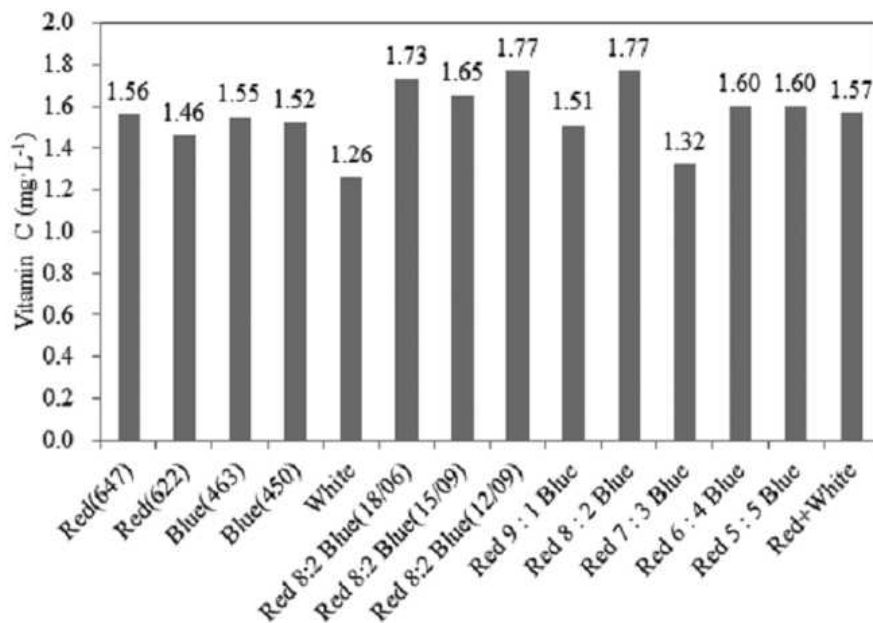
백색광이 LED 광원에 비해 광파장대 영역이 다양하기 때문에 생육이 좋은 것으로 판단된다. 근장과 엽록소 함량에 대해서는 적색광과 청색광의 비율이 7:3에서 가장 양호한 결과를 보였다. 한편, 적색광과 청색광 비율이 6:4와 5:5의 처리구에서는 엽록소 함량이 증가하지 않았다. 광조사 시간에 따른 초장, 엽폭, 엽수, 엽록소 함량, 지상부 생체중 및 근체중의 생육 특성은 광주기가 15/9h에서 가장 효과적인 반응을 보였다. <그림 3-6>과 <그림 3-7>은 단색광, 혼합광, 광주기에 따른 정식 후 35일째 상추의 안토시아닌 및 비타민 C 함량을 분석한 결과이다.

<그림 3-6> LED의 다른 조명 품질에 따른 상추의 안토시아닌 함량



출처: 최만권 등(2014), LED 광 파장이 상추 생육과 비타민 C 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향, 시설원예식물공장, Vol. 23, No. 1, (p.23).

<그림 3-7> LED의 다른 조명 품질에 따른 상추의 비타민 C 함량



출처: 최만권 등(2014), LED광 파장이 상추 생육과 비타민 C 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향, 시설원예식물공장, Vol. 23, No. 1, (p.23).

안토시아닌 함량은 단색광에서는 463 nm의 청색광 처리에서 가장 높았고, 혼합광에서는 적색광과 청색광의 비율이 7:3일 때 가장 높게 나타났다. 또한 광조사 주기에 따른 실험에서는 광주기 18/6h의 처리구에서 안토시아닌 함량이 가장 높았다. 비타민 C 함량은 적색광과 청색광의 비율이 8:2일 때 1.77 mg · L⁻¹로 가장 높게 나타났으며, 백색광에서 1.26 mg · L⁻¹로 가장 적은 함량을 보였다(최만권 등 2014).

Shin et al.(2014)은 식물공장 내 적색광, 청색광, 적청 혼합광, 자외선, 적외선, 형광등의 광원을 달리하여 어린잎 상추의 생육과 무기성분 흡수를 검토하였다. 잎의 형태는 Red 파장에서 초장 및 하배축의 길이 신장이 촉진되어 도

장 하였고 Far red에서는 생장이 불가능하였으나 Red + Blue의 혼합광원에서는 초장이 짧고 엽수가 많고 생체중이 증가하여 상추의 형태 및 발달 차원에서 유의적으로 좋았다. 광질에 따른 어린잎 상추의 색차 및 상대 엽록소 함량을 조사한 결과, 적색도를 나타내는 Hunter a*값은 Red + Blue 혼합광 및 형광등에서 높았고 적색광 및 자외선에서는 낮게 나타났는데 상대 엽록소 함량을 나타내는 SPAD 값도 같은 경향이었다. 특히 상대 엽록소 함량은 형광등의 23.3에 비해 혼합광에서 1.4배 향상된 적색도를 나타냈다. 광원별 상추의 무기물 함량을 조사한 결과, pH 및 K 함량은 모든 처리에서 차이가 없었으나 N, Ca, Mg, Fe, Ascorbic acid 함량은 LED 처리구에서 많았고 P 함량은 형광등 처리구에서 많았다. 이상의 결과를 요약하면 단색광에 비하여 Red + Blue 혼합광에서 상추의 생육이 우수하고 무기물 함량이 증대되어 식물공장 내 생산성 향상을 위해서는 혼합광 조절로 상품성 있는 고품질의 상추 생산이 가능할 것으로 판단되었다.

Ouzounis et al.(2015)은 청색광도 및 타이밍의 영향을 평가하기 위해 상추 *Lactuca sativa* cv. “Bataivia”(녹색)와 “Lollo Rossa”(적색) 2종을 늦은 겨울 온실에서 자연광과 보조 고압나트륨(SON-T)등 아래서 $90 \pm 10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 17:00에서 21:00까지 조명한 후 조사하였다. 온실 온도는 주간/야간 22/11℃로 하였다. LED 처리는 대조구(청색광 처리 없음), 1B 06-08(청색 $45 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 06:00-08:00), 1B 17-19(청색 $45 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 17:00-19:00), 1B 21-08(청색 $45 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 21:00-08:00), 그리고 2B 17-19(청색 $80 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 17:00-19:00)로 하였다. 총 생체중과 건물중은 추가된 청색광에 영향을 받지 않았다. 추가된 청색광에서 자란 식물은 더 작았다. 청상추 재배지의 기공 전도도는 대조

구에 비해 모든 처리에서 청색광이 더 높았다. 엽록소 형광으로 측정된 광합성 수율은 품종 간 달랐으며, 적상추에서는 청색광 증가에 따라 PSⅡ의 양자 수율이 감소하고 비광화학억제 수율이 증가하였으나 청상추에서는 차이가 관측되지 않았다. 2차 대사물을 정량화한 결과, 추가로 청색광을 받은 4가지 처리에서 모두 대조구에 비해 색소, 페놀산, 플라보노이드 양이 높았다. 이 효과는 적상추에서 더욱 두드러져 처리법과 화합물에 따라 결과가 다르다는 점을 부각 시켰다. 이 연구 결과에 따르면 높은 광도가 식물에서 광보호 열 손실을 유발할 뿐만 아니라 낮은 강도에서 빛 자체의 특정 스펙트럼 구성도 유발한다. 그러나 빛에 대한 이러한 식물의 반응은 품종에 따라 달라진다.

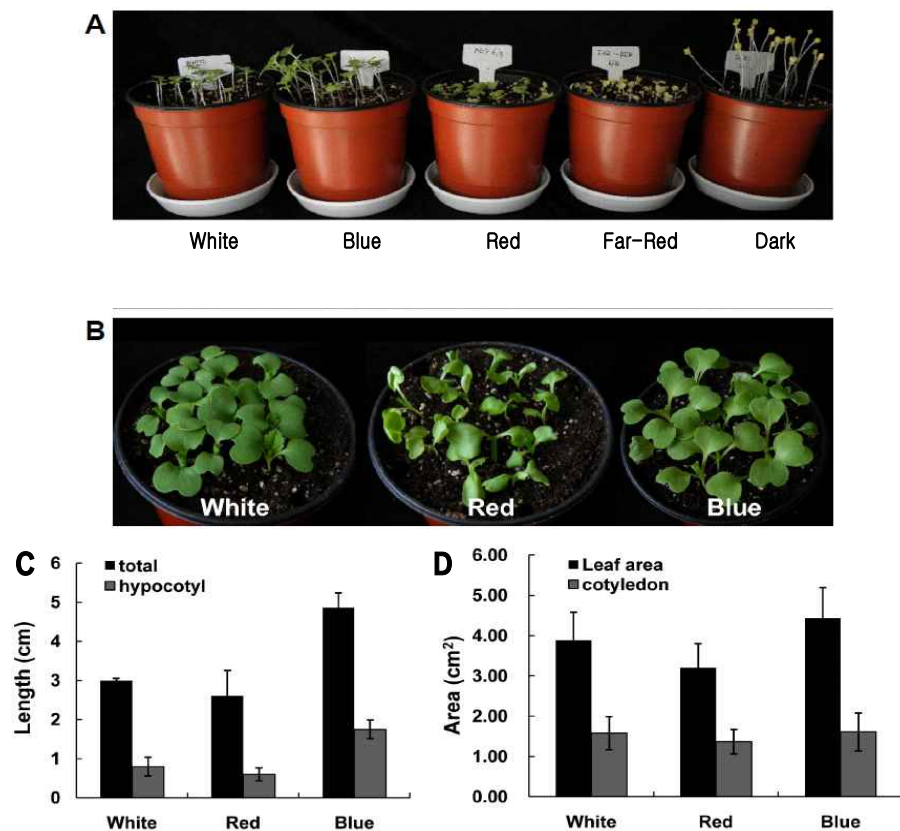
Chen et al.(2019)은 동일한 광도($7.49 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)를 기준으로 적색과 청색의 LED의 서로 다른 6가지 조명 처리에 노출된 상추의 성장반응과 당분 축적을 평가했다. 단색 적색광(R), 단색 청색광(B), 대조구로 적색과 청색의 혼합광(RB, R:B=1:1), R, RB와 B의 혼합(R/RB/B, 4h R to 4h RB and then 4h B)와 R/B(4h), R/B(1h)을 교대로 조명 처리하였다. R/B(1h) 결과는 서로 다른 조사 처리가 상추의 분명한 형태학적 변화를 초래한다는 것을 보여주었다. 모든 처리 중 상추순의 생체중과 건물중이 가장 높은 것은 R/B(1h)로 다른 처리보다 유의미하게 높았다. R/B로 처리된 식물과 비교했을 때, 상추의 총 당도지수(TSI)뿐만 아니라 과당, 포도당, 조섬유 함량이 R 처리에 의해 유의미하게 향상되었다. 한편, 단색 R은 acid invertase(AI), neutral invertase(NI) 같은 수크로스 분해효소의 활동을 유의미하게 촉진 시켰고 수크로스 합성 효소(SPS)의 활성을 감소시켰다. 또한 R/B(1h)로 처리된 식물에서 SPS의 가장 강한 활성을 동반한 수크로스 및 전분 함량이 가장 높았다. R/B(4h)와 R/B(1h) 교번 처

리는 수크로스분해효소(SS) 활성을 억제하는 한편, 다른 처리에 비해 SPS의 활성을 강화하여 다양한 빛 환경이 수크로스 대사 효소의 활성을 조절하여 당 구성에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 전반적으로 본 연구에서는 상추 수율, 맛, 에너지 사용 효율 측면에서 R/B(1h)가 최적의 조명 전략이었다.

김진아 등(2013)은 인공광원이 배추(*Brassica rapa*)의 유묘에 미치는 영향을 연구하였다. 초기 1주 동안 단일 광 파장에 노출된 배추 유묘의 생장을 보면 백색광 조건에서 생장한 묘와 비교했을 때 적색광과 청색광 조건에서는 유묘의 발달과 생육이 정상이었다. 특히 청색광 조건에서는 하배축이 길었고 <그림 3-8A과 3-8C> 청색 단일광 조건에서 자란 유묘는 자엽이 넓게 발달하고 본엽이 가장 먼저 발달하기 시작하여 총 엽면적과 자엽면적이 다른 광 조건에 비해 컸다<그림 3-8B과 3-8D>. 암 조건에서 자란 유묘는 하배축이 길고 황화된 반면, 초적외광 조건에서 자란 유묘는 황화되었으나 하배축이 거의 신장하지 않았다. 마이크로어레이를 이용하여 유전자 대량 발현분석 실험을 수행한 결과, 청색광 조건에서 유묘의 생육이 가장 왕성하였으며 적색광 조건과 비교하여 발현 변화를 보인 유전자의 수가 2배 많았다. 각각의 광질 조건에서 발현 증가된 유전자들을 기능별로 분류해 보면(GO 분석) 적색광과 청색광은 생물학적 과정(biological process)과 관련된 유전자의 발현에 영향을 많이 주었다. 특히 대사 과정(metabolic process)과 발달과정(developmental process) 그리고 세포 요소(cellular component)중 색소체(plastid)나 엽록체(chloroplast)관련 유전자들의 발현이 청색광 조건에서 더 많이 증가하였다. 또한 초적외광 조건에서도 다양한 유전자들이 발현 변화를 보였다. 본 연구는 다양한 배추 유묘의 생장에 대한 광질의 영향을 분자생물학적으로 증명하기

위해 수행되었으며 유묘의 배양에 LED 광원이 효율적으로 이용될 수 있음을 보여 주었다.

<그림 3-8> *Brassica rapa* 묘의 광조절 형태 변화

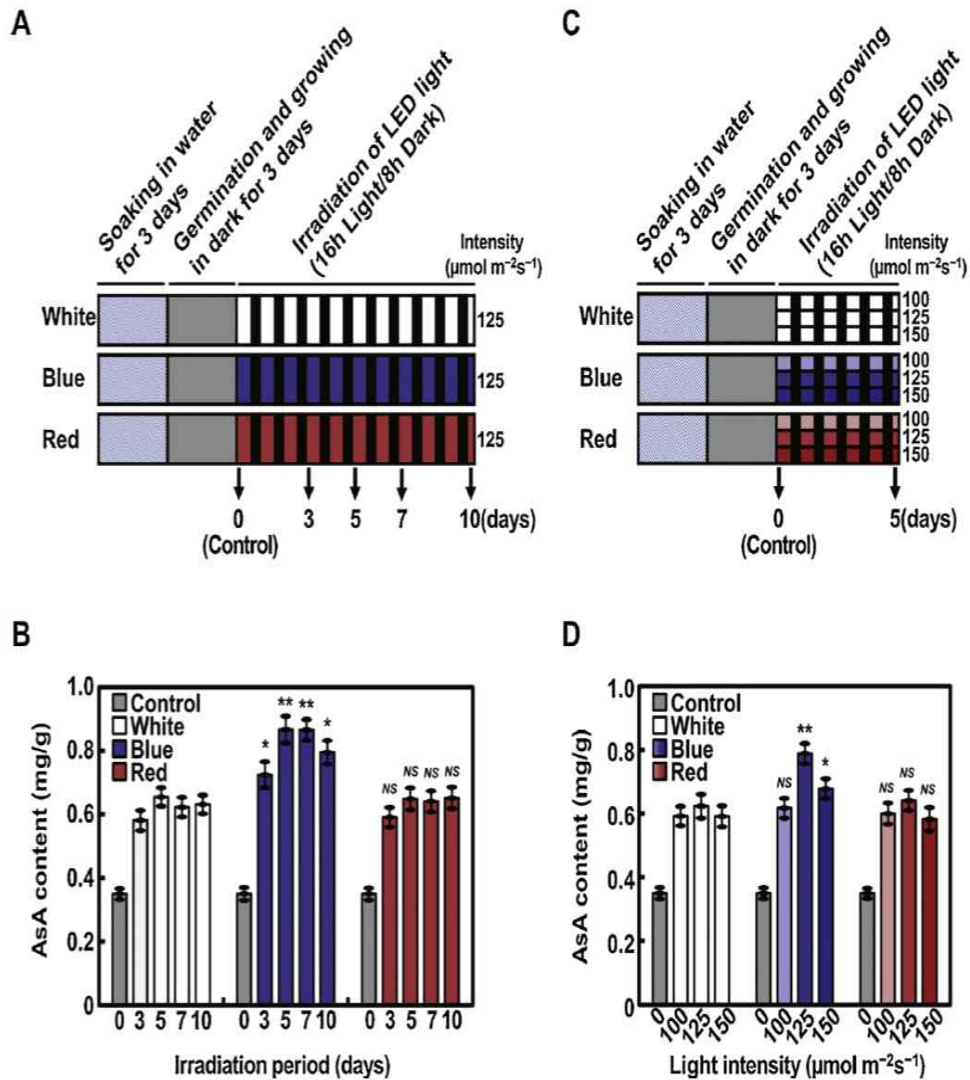


출처: 김진아 등(2013), LED 광원의 다양한 광질이 배추 유묘의 유전자 발현에 미치는 영향, 원예과학기술지, 31(5), (p.609).

배추는 동남아를 대표하는 채소 중 하나이며 인간 식생활에 L-아스코르브산(AsA)의 주요 공급원이다. Kang et al.(2019)은 광선 조사가 AsA 함량에 미치는 영향을 조사하기 위해 0, 3, 5, 7, 10일 동안 백색, 청색, 적색 LED 광

이 있는 chamber에서 재배된 배추 묘목에서 AsA 함량을 측정하였다 <그림 3-9A>. 그 결과 $125 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 강도의 청색 LED 광 조사는 백색 LED 조명 조사에 비해 5일 자란 배추 묘목의 AsA 함량을 40% 증가시켰다 <그림 3-9B>. 따라서 청색 LED 광 조사는 AsA 생합성 및 재활용 관련 유전자의 발현을 유도하였다. 광도가 AsA 축적에 미치는 영향을 알아보기 위해 5일 동안 100, 125, 150 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 광도에서 백색, 적색, 청색 LED 광선으로 배추 묘목에 조사하였다<그림 3-9C>. 그 결과 세 가지 유형의 LED 조명은 모두 AsA 함량을 비슷한 정도로 증가시켰다<그림 3-9D>. 단, 125와 150 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 광도의 청색 LED가 AsA 함량 증가에 가장 효과적이었다 <그림 3-9D>. 청색 LED 광선 조사에 의한 AsA 증가가 ROS-scavenging 활성과 관련이 있는지 조사하기 위해 5일 동안 백색, 청색, 적색 LED 조명 아래서 재배된 배추 묘목에서 H_2O_2 함량과 SOD 활성을 측정하였다<그림 3-10>. 그 결과 청색 LED 광선 조사에 의한 AsA 함량의 증가가 산화방지제인 SOD의 활성 강화에 반영되어 항산화 활동에 영향을 미쳤다. 이 외에도 청색 LED 광선 조사에 의한 AsA 함량 개선 기술은 배추순 뿐만 아니라 다른 식용 채소순에도 적용되었다. 결론적으로 청색 LED 조명을 적용해 배추 묘목의 AsA 함량을 인공적으로 개선하는 원천기술을 도입하고 있는데, 이는 특정 유형의 LED 조명을 적용하면 농작물의 의도적인 재배가 가능하다는 의미를 내포하고 있다.

<그림 3-9> 배추의 AsA 함량에 대한 백색, 청색 및 적색 LED 조명의 효과.
(A 및 C) 실험 조건의 도식 표현: (A)는 (B)에 대한 것이고 (C)는 (D)에 대한 것임.



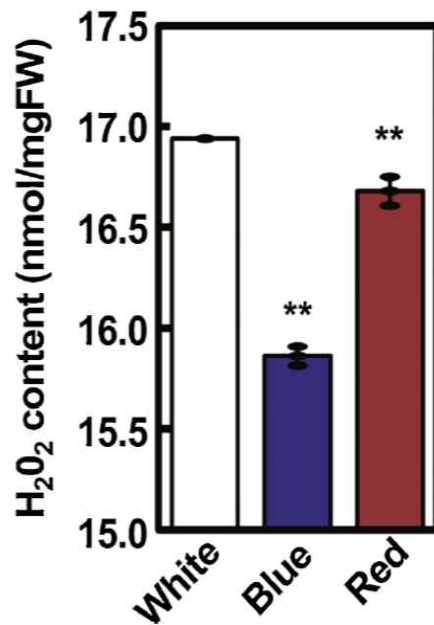
출처: Kang 등(2019), Blue LED Light Irradiation Enhances L-Ascorbic Acid Content while Reducing Reactive Oxygen Species Accumulation in Chinese cabbage Seedlings, *Scientia Horticulturae* 261, 108924, (p.3).

<그림 3-10> 배추 묘의 활성산소종(ROS) 소거 활동에 대한 백색, 청색 및 적색 LED 조명의 효과. (A) 분리된 잎을 즉시 3,3'-Diaminobenzidine(DA-B) 염색 용액에 담근 사진. Control은 무염색.

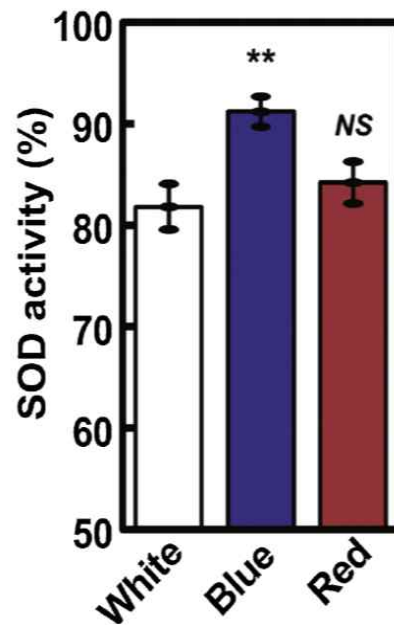
A



B



C



출처: Kang 등(2019), Blue LED Light Irradiation Denhances L-Ascorbic Acid Content While Reducing Reactive Oxygen Species Accumulation in Chinese cabbage Seedlings, *Scientia Horticulturae* 261, 108924, (p.6).

이명옥 등(2018)은 LED 광원이 시금치 품종별 생육, 잎, 형태 변화 및 세포 길이에 대한 영향을 구명하기 위한 실험을 수행하였다. 최아된 시금치 (*Spinacia oleracea*.) 품종 ‘월드스타’와 ‘수시로’를 버미큘라이트에 육묘한 후 NEF 시스템에 정식한 뒤 LED 적색광(R), 청색광(B), 혼합광(R:B=2:1) 및 백색광(W)에서 $130 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD 광도로 25일간 재배하였다. 정식 후 일주일 간격으로 25일 동안 엽장, 엽폭, 엽병, 엽수, 광합성률을 측정하였고, 상편생장지수(Leaf Epinasty Index)는 잎이 최대로 전개된 후에 측정하였다. 상편생장이 발생한 잎 가운데와 가장자리를 자른 조직의 세포길이, 폭 및 세포 면적을 측정하였다. 정식 후 25일째에는 엽면적, 뿌리길이, 지상부 및 지하부의 생체중, 건물중을 조사하였다. 지상부 생체중과 건물중, 엽수, 엽면적 모두 월드스타 품종이 수시로 품종에 비해 유의적으로 높았다. 건물중은 월드스타 품종의 경우 혼합광(RB)과 적색광(R) 두 처리구에서 청색광(B)과 흰색광(W) 두 처리보다 약 35% 유의적으로 높았다. 수시로 품종의 경우 혼합광(RB) 처리구에서 지상부 건물중이 가장 높아 건물중이 가장 낮았던 백색광(W) 처리구에 비해 40% 높은 건물중 결과를 보였다. 두 품종 모두 혼합광(RB)과 적색광(R)의 처리구에서만 정식 21일 이후 잎 상편생장이 나타났고 적색광(R) 처리구에서 혼합광(RB) 처리구 보다 유의적으로 높아 잎 상편생장은 적색광(R)과 관련이 있는 것을 알 수 있었다. 잎 가운데와 가장자리 부위 세포 크기를 현미경으로 관찰한 결과 두 품종 모두 상편생장이 나타난 적색광(R) 처리구의 잎 가장자리 세포 밀도가 잎 가운데보다 낮은 것으로 나타나 앞서 보고된 연구 결과들에서 제시한 상편생장과 잎 가운데와 가장자리 부위의 세포 크기 차이 연관성을 뒷받침하고 있다. 또한 청색광(B)이 적색광(R)에서 발생하는 상

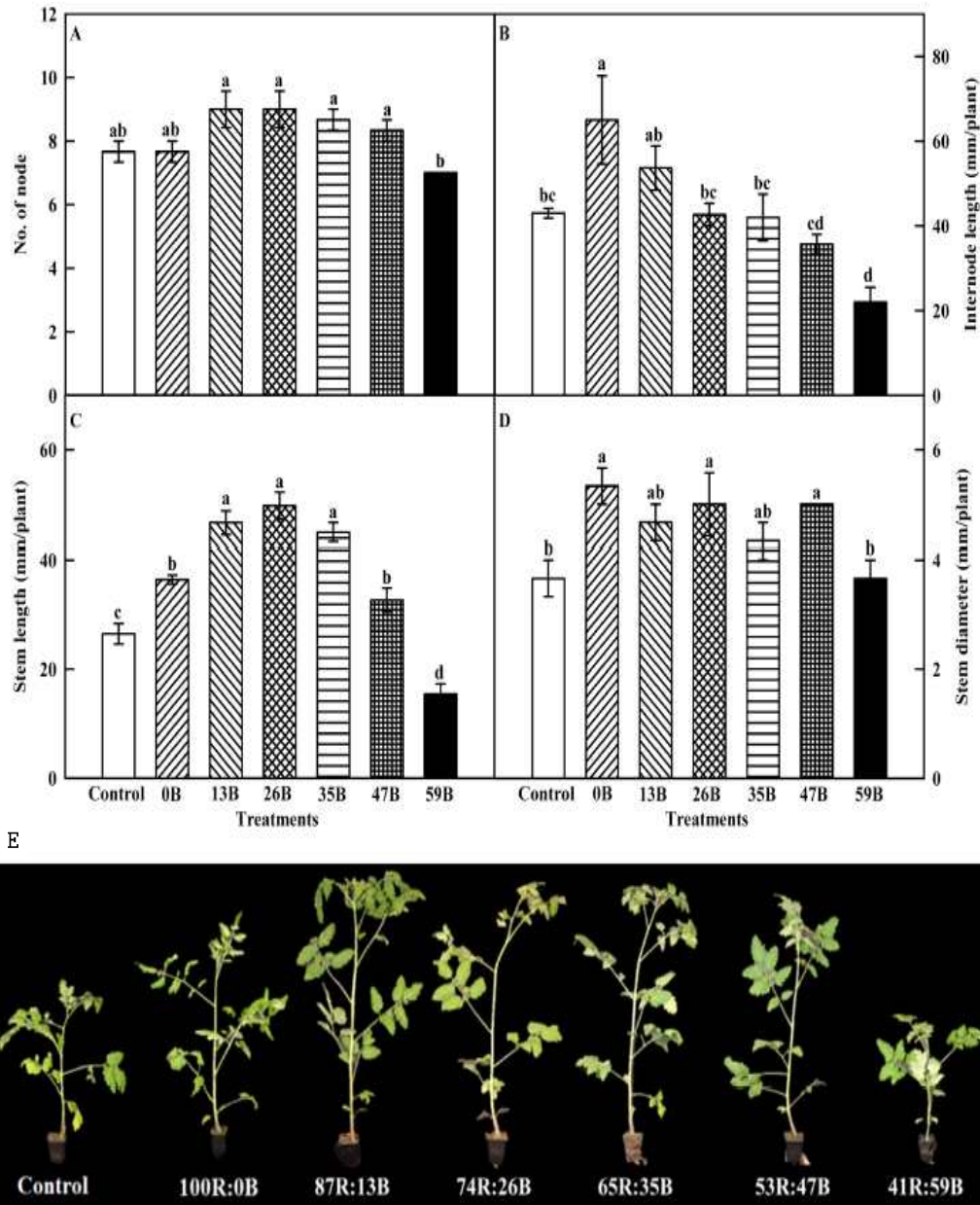
편생장을 완화시켜주는 역할을 하는 것으로 보여 두 광원의 적절한 혼합비율을 규명할 필요가 있다. 또한, 엽형 변화가 심했던 수시로 품종보다는 월드스타 품종이 LED 광원을 이용한 식물공장 재배에 더 적합한 것으로 판단된다.

(2) 열매채소

손기호 등(2018)은 적색 대 청색 LED의 다양한 조합 비율이 이식 전 방울토마토 묘목의 품질에 미치는 영향과 이식 후 토마토 과일의 수확량과 품질에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구를 하였다. 생후 2주 된 방울토마토 묘목 (*Solanum lycopersicum* cv. 'Cuty')은 적색광(R; 피크파장 655 nm)대 청색광(B; 456 nm) LED (R:B = 41:59(59B), 53:47(47B), 65:35(35B), 74:26(26B), 87:13(13B), 100:0(0B)의 다양한 조합으로 배양되었다. 이후 방울토마토 묘목을 벤로형 온실에 이식해 75일간 재배하였다. 묘목 단계에서 0B와 59B를 제외한 모든 RB복합 처리에서 묘목의 줄기 생체중이 LED 처리 27일 후 대조구보다 높았다. 줄기 건물중량과 잎면적도 줄기 생체중과 유사한 경향을 보였다.

줄기 길이는 대조구 및 기타 처리와 비교하여 13B, 26B, 35B 처리에서 유의하게 더 높았다<그림 3-11>. 특히 26B 식물의 줄기 길이는 59B식물의 줄기 길이보다 약 3.2배 길었다. 37일에서 토마토 식물의 성장은 이식 전 27일 동안의 다양한 LED 처리의 영향을 받는 것으로 관찰되었다<표 3-1>. 이식 후 37일만에 26B와 47B에서 마디 수가 유의미하게 증가하였고, 26B에서 식물 높이는 대조구(FL+HPS)와 59B에 비해 유의미하게 높았다.

<그림 3-11> 적색-청색 LED의 다양한 조합으로 자란 방울토마토 묘목



출처: 손기호 등(2018), 다양한 조합의 적색과 청색 혼합 LED 광에서 자란 방울토마토 묘의 생육과 정식 후 수확량 및 품질, 시설원예식물공장, Vol. 27, No. 1, (p.58).

<표 3-1> 이식 후 37일째에 적색 및 청색 LED의 다양한 조합 비율에서 재배된 방울 토마토 묘의 성장 특성

Treatment	Shoot (g/plant)		Leaf area (m ²)	SPAD value	Stem diameter (mm)	No. of node	Plant height (cm/plant)
	Fresh weight	Dry weight					
Control ²	502.73	62.67	0.48 c ³	54.67	1.03	19.67 bc	107.67 bc
100R:0B	607.07	72.17	0.60 bc	56.70	0.93	22.00 ab	130.67 ab
87R:13B	533.53	66.87	0.48 c	51.93	0.80	21.67 ab	123.67 ab
74R:26B	585.23	69.90	0.65 abc	53.77	0.90	24.00 a	141.00 a
65R:35B	585.70	69.60	0.61 abc	53.60	0.93	18.00 c	118.33 ab
53R:47B	604.77	68.53	0.87 a	54.63	1.00	23.33 a	131.33 ab
41R:59B	611.20	67.87	0.79 ab	51.33	1.17	19.00 c	93.33 c
Significance ^x	NS	NS	*	NS	NS	***	**

²Fluorescent lamps with high pressure lamps.

³Mean separation within column's by Duncan's multiple range test.

^xNS = nonsignificant, *, **, *** Significant at $p < 0.05$, 0.01 or 0.001, respectively.

출처: 손기호 등(2018), 다양한 조합의 적색과 청색 혼합 LED 광에서 자란 방울토마토 묘의 생육과 정식 후 수확량 및 품질, 시설원예식물공장, Vol. 27, No. 1, (p.60).

<표 3-2> 이식 후 적색 및 청색 LED의 다양한 조합 비율에서 재배된 방울토마토의 과실 수확량 및 품질

Treatment	Total fruit yield (kg/plant)	Fruit weight (g/fruit)	Fruit size (mm/fruit)	Soluble solids content (°Brix)	Total acidity (%)
Control ²	1.14 cd ³	28.93 abc	39.08 a	6.83	0.93
100R:0B	1.33 bcd	25.32 d	37.33 ab	6.88	0.79
87R:13B	1.62 ab	27.65 bcd	38.67 a	7.13	1.13
74R:26B	1.77 a	27.63 bcd	36.42 b	7.50	1.03
65R:35B	1.62 ab	31.24 a	39.00 a	6.87	0.80
53R:47B	1.41 abc	26.88 cd	37.17 ab	7.05	0.89
41R:59B	0.98 d	29.57 ab	38.83 a	6.83	0.90
Significance ^x	**	**	*	NS	NS

²Fluorescent lamps with high pressure lamps.

³Mean separation within column's by Duncan's multiple range test.

^xNS = nonsignificant, *, ** Significant at $p < 0.05$ or 0.01, respectively.

출처: 손기호 등(2018), 다양한 조합의 적색과 청색 혼합 LED 광에서 자란 방울토마토 묘의 생육과 정식 후 수확량 및 품질, 시설원예식물공장, Vol. 27, No. 1, (p.60).

총 과일 수확량은 이식 전 토마토 성장 특성에 의해 영향을 받았다 <표 3-2>. 가장 높은 26B는 식물의 총 과일 수확량은 대조구(FL+HPS)와 59B 식물의 각각 1.6배와 1.8배였다. 따라서 본 연구 결과 다양한 적색 대 청색 LED 조합 비율이 방울토마토 묘목의 성장에 직접 영향을 미치며, 이식 후 과일 수확량 등 생식생장 파라미터에도 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다(손기호 등 2018).

이재수 등(2012)은 폐쇄형 묘 생산 시스템에서 청색 LED, 적색 LED, 백색 형광등을 인공광원으로 하여 파프리카 육묘 시 성장 특성과 정식 후 성장 및 초기 수량을 분석하기 위한 연구를 진행하였다. 폐쇄형 시스템에서 파프리카 육묘용 환경 조건은 광주기 16/8h, 평균 PPF $204 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 기온 26/20℃, 상대습도 70%이었다. 육묘 후 21일째 백색 형광등과 LED 하에서 성장된 파프리카 묘의 엽장, 엽폭, 엽면적 등 잎 관련 지표뿐만 아니라 지상부 생체중과 건물중, 엽록소 함량 등이 자연광 처리구에 비해서 크게 나타났다. 청색 LED, 적색 LED 및 자연광 처리구에서의 엽면적은 대조구인 형광등 처리구와 비교할 때 각각 63%, 63%, 28%에 해당하였다. 또한 청색 LED, 적색 LED 및 자연광 처리구의 지상부 건물중은 각각 대조구의 64%, 50%, 22%로 나타났다. 정식 후 18일째에 엽수와 줄기 직경은 처리구간의 유의차가 나타났으나, 마디수, 초장, 평균 절간장은 유의차가 없었다<표 3-3>. 정식 후 18일째 엽수는 대조구에서 44매로 가장 크게 나타났다. 적색 LED, 청색 LED 및 자연광 처리구의 엽수는 대조구에 비해서 각각 86%, 81%, 48%로서 정식 시기와 비교할 때 엽수의 차이가 줄어들었다.

<표 3-3> 파프리카 ‘Spirit’ 이식 18일 후의 생육 특성

Treatments	No. of leaves	No. of nodes	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Main stem length (cm)	Average length of internodes (mm)
Blue LED	35.7b ²	8.0a	37.1a	8.41ab	20.5b	49.0a
Red LED	37.7ab	9.3a	34.9a	8.23ab	19.6b	37.5a
Natural light	21.3c	9.0a	37.4a	7.60b	27.8a	41.6a
Control	44.0a	8.0a	35.5a	9.13a	17.1c	44.4a
LSD _{0.05}	7.7	2.0	3.4	0.99	3.3	15.6

²Means with the same letter are not significantly different.

출처: 이재수 등(2012), 발광다이오드, 형광등 및 자연광 하에서 육묘 된 파프리카의 묘소질 및 정식 후 초기 수량, *생물환경조절학회지*, 21(3), (p.224).

정식 후 114일째에는 초장, 줄기 직경, 평균 절간장 등에서 유의차가 인정되었다<표 3-4>. 정식 후 114일째에 초장은 청색 LED와 적색 LED 처리구에서 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 결과는 단색 LED에서 육묘 된 파프리카의 줄기 신장이 정식 후에 억제된 것으로 판단된다. 초기 4주 동안 수확된 파프리카는 청색 LED 3.5개/plant, 적색 LED 3.3개/plant, 자연광 1.0개/plant로서 대조구 2.2개/plant에 비해서 각각 159%, 150%, 45%로 나타났다<표 3-5>. 초기 수량은 적색 LED 453g/plant, 청색 LED 403g/plant, 자연광 101g/plant로서 대조구 273g/plant과 비교할 때 각각 166%, 148%, 37%로 나타났다. 한편 적색 LED 처리구에서의 평균 중량은 136g으로서 다른 처리구와 비교할 때 상대적으로 큰 과실이 생산되었다. 한편 정식 후 온실에서의 재배기간이 길어짐에 따라 인공광 처리구와 자연광 처리구에서 수량 차이가 없었다. 이러한 결과를 종합하면 LED 또는 형광등을 인공광원으로 이용한 조건에서 육묘 된 파프리카의 정식 후 초기 생육이 양호하였으며, 초기 수확이 자연광 처리구에 비해서 1주 정도 빠르게 이루어졌다. 따라서 LED 또는 형광등과 같은 인공광

원이 파프리카 육묘에 이용될 경우 묘소질 향상, 조기 수확 및 초기 수량 증대가 기대된다(이재수 등 2012).

<표 3-4> 파프리카 ‘Spirit’ 이식 114일 후의 성장 특성

Treatments	No. of nodes	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Main stem length (cm)	Average length of internodes (mm)
Blue LED	14.0b ²	99.6c	14.5b	22.1b	68.0c
Red LED	13.8b	107.8bc	14.6b	21.1b	76.8b
Natural light	14.0b	134.1a	16.0a	30.5a	94.9a
Control	15.8a	119.6ab	16.2a	18.2c	74.1bc
LSD _{0.05}	1.6	15.4	1.2	2.8	7.6

²Means with the same letter are not significantly different.

출처: 이재수 등(2012), 발광다이오드, 형광등 및 자연광 하에서 육묘 된 파프리카의 묘소질 및 정식 후 초기 수량, *생물환경조절학회지*, 21(3), (p.224).

<표 3-5> 매주 수확되는 파프리카 ‘Spirit’ 6개의 초기 수확량

Treatments	Yield (g)					Yield per plant (g)
	1 week	2 week	3 week	4 week	Total	
Blue LED	1,305 (11 ²)	637 (6)	359 (3)	119 (1)	2,420 (21)	115 (3.5)
Red LED	1,051 (9)	1,074 (7)	453 (3)	141 (1)	2,719 (20)	136 (3.3)
Natural light	0 (0)	300 (3)	93 (1)	212 (2)	605 (6)	101 (1.0)
Control	731 (5)	808 (7)	0 (0)	101 (1)	1,640 (13)	126 (2.2)

²Figure in parenthesis means the number of fruits harvested.

출처: 이재수 등(2012), 발광다이오드, 형광등 및 자연광 하에서 육묘 된 파프리카의 묘소질 및 정식 후 초기 수량, *생물환경조절학회지*, 21(3), (p.225).

최인이 등(2009)은 미성숙 즉 미착색과의 착색 증진을 위해 LED 광원의 적색광, 청색광 그리고 UVa를 각각 두 가지 광도로 처리하여 처리에 따른 착색

정도를 비교하였다. 사용한 착색단고추 품종은 적색 계통의 'Special'과 황색 계통의 'Helsinki'로 춘천의 한 농가에서 수경 재배 하였다. LED의 경우 Red_High는 $50 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 내외, Red_Low $20 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 내외, Blue_High는 $70 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 내외, Blue_Low는 $40 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 내외, UVa의 경우 고광도는 $3 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 저광도는 $0.25 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 처리하고 온도는 25°C 로 하였다.

<그림 3-12> 적색, 청색 LED 및 UVa 방사선 처리 후 파프리카 열매 표면 색상



출처: 최인이 등(2009), 적색 및 청색 LED광과 UVa광 처리가 착색단고추 과실의 착색에 미치는 영향. 생물환경조절학회지, 18(4), (p.434).

품종에 상관없이 처리 2일 후에 과실의 착색이 급격히 진행되었고 3일째에 처리별로 큰 차이를 보였다. 'Special'의 경우 2일째 고광도 UVa광이 제일 급격한 착색 변화를 나타냈고, 저광도 UVa를 제외한 나머지 처리구에서는 비슷한 착색 변화를 보였다. 처리 3일째에는 고광도 LED 적색광이 급격한 착색

변화를 나타내며 고휘도 UVa광보다 높은 착색 값을 나타냈다. 'Helsinki'경우에는 2일째에 청색광, 적색광, UVa의 순으로 착색 변화가 빠르게 진행되었다. 두 품종 모두 3일째에는 'Special'의 a^*/b^* 값(a^* : 녹색에서 적색의 값, b^* : 청색에서 황색의 값)과 황색 품종 'Helsinki'의 착색 정도를 나타내는 b^* 값이 모두 저광도보다 고휘도에서 높은 값을 나타내며 착색 증진 효과를 나타냈다. 착색 종료일인 처리 후 6일째 두 품종 모두 무처리구와 저광도 UVa광을 제외한 나머지 모든 처리구에서는 비슷한 값을 나타냈다<그림 3-12>. UVa처리구 과실의 표면이 주글거리는 피해가 있었다. 이 연구 결과 저광도 보다는 고휘도의 LED 광원을 사용하는 것이 착색이 빠르게 진행되는 것을 도우며 UVa 파장은 과실의 외관에 피해를 입히기 때문에 적합하지 않다(최인이 등 2009).

Azad et al.(2011)은 LED 보광이 온실에서 키운 어린 고추의 생장과 식물성 화학물질(phytochemical) 함량에 미치는 영향을 조사하였다. 처리한 LED 광원은 청색광(470 nm), 적색광(660 nm), 청색+적색광, 근적색광(740 nm), 그리고 자외선(UV-B 300 nm)이며, 실험 기간 중의 이들 광원의 Photon flux는 각각 49, 16, 40, 5.0, 0.82 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었다. LED 광은 낮 동안 16시간이며 UV-B는 발아 후 12일간 일몰 후 10분간 매일 처리되었다. 실험 결과, 광 처리는 무처리에 비하여 고추의 생장과 식물성 화학물질 함량에 상당한 변화를 보였다. 적색광 처리는 고추의 엽수, 마디 수, 엽폭과 생체중을 각각 약 34%, 27%, 50%, 40% 증가되었다. 청색광 처리도 엽장을 약 13% 증가시켰고, 근적색광 처리에 의해 경장과 절간장을 각각 17%와 34% 정도 증가시켰다. 15일간 처리 후 수확한 고추잎의 총 안토시아닌(anthocyanin)과 엽록소(chlorophyll)함량은 청색광 처리에서 무처리에 비해 각각 6배와 2배가 증가하였다. 적색광은 총

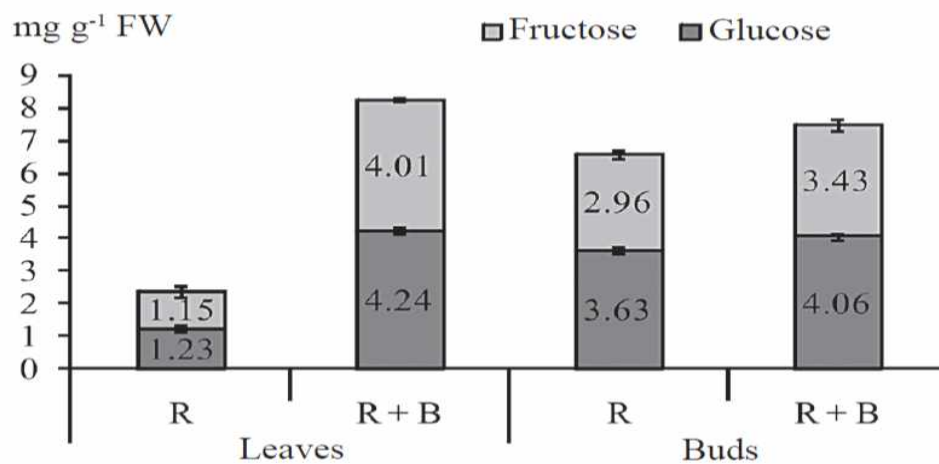
페놀성화합물(phenolic compound)함량을 최소 2배로 증가시켰으며, 반대에 근적색광은 아스코르브산(ascorbic acid)과 항산화능(antioxidant activity)을 각각 31%와 66%를 감소시켰다.

최효길 등(2013)은 LED 광원을 이용한 폐쇄형 성장실에서 생육 중인 성숙한 딸기 ‘대왕’ 품종 과실의 생장 특성 및 기능성 식물 화합물 형성을 조사하기 위한 실험을 진행하였다. 인공광원으로 청색 LED 광(448 nm), 적색 LED 광(634 nm 및 661 nm), 그리고 청색과 적색이 3:7로 조합된 혼합 LED 광을 사용하였으며, 태양광이 없는 폐쇄형 성장상에서 주간 16시간 및 야간 8시간의 광주기와 함께 $200 \pm 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광도로 LED 광을 처리하였다. 청색과 적색 파장이 혼합된 LED 광에서 자란 딸기 과실의 생산량이 다른 LED 광 처리보다 높았다. 유리당 중의 하나인 과당은 혼합 LED 광 처리에서 증가되었다. 안토시아닌 함량 역시 다른 LED 광 처리에 비하여 혼합 LED에서 현저하게 증가하였다. 총 페놀화합물과 플라보노이드 함량은 LED 광 처리별 유의적 차이가 없었다. 반면, 청색 LED 광에서 자란 딸기 과실은 다른 LED 광 처리에 비하여 빨리 익었다. 적색이나 청색의 LED 광에서 생육한 과실의 항산화 활성이 혼합 LED 광보다 유의적으로 높게 나타났다. 따라서 온실에서의 딸기 생육시 부족한 태양광의 보충 광원으로서 청색과 적색의 혼합 LED 광을 사용하면 과실의 생산량과 유리당 함량의 증진에 유용하리라 판단되고, 식물 공장에서도 딸기 재배 시 성숙 시기의 조절이나 당 함량 및 항산화제 증진과 같은 목적을 실현하기 위해서 LED 파장의 선택적 이용이 필요할 것으로 생각된다.

Samuolienė et al.(2010)은 frigo plants인 ‘Elkat’딸기(*Fragaria × ananassa* Duch.)묘를 다른 조건의 LED 처리에서 한 달 동안 상업용 온실인 phytotron

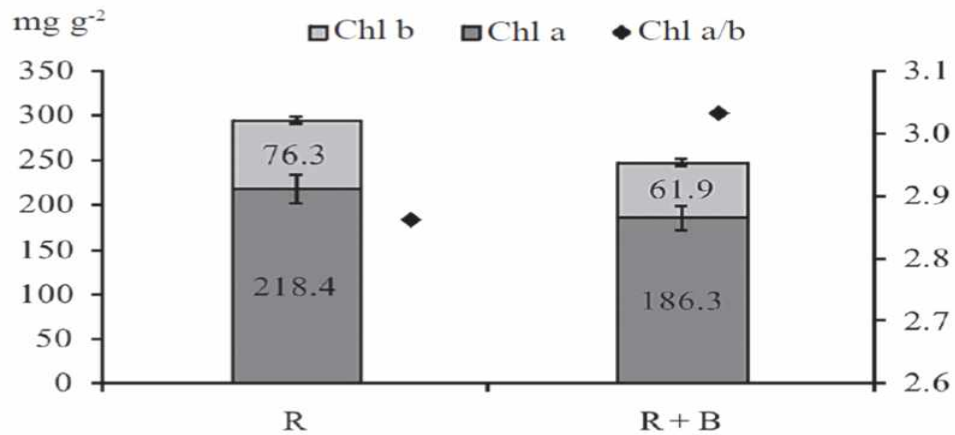
chamber에서 성장시킨 후 생육상태를 조사하였다. 단일 적색광(640 nm, 200 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)과 적색광(640 nm, 174.5 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) + 청색광(455 nm, 25.5 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 혼합광으로 16시간 광주기로 하고 phytotron chamber의 온도는 낮 21℃ 밤 16℃ 조건을 유지하였다. LED 처리 후 딸기 묘는 폴리에틸렌 하우스에서 흰색필름으로 멀칭 된 베드로 옮겨 심었다. 광의 스펙트럼 품질은 ‘Elkat’딸기의 frigo plants에 형태발생과 다양한 생리적 반응을 보였다. 적색광과 청색광 혼합 LED 하에서 자란 딸기에서 탄수화물 축적이 증가하였으며 <그림 3-13> 색소 비율에 영향을 미쳤다<그림 3-14>.

<그림 3-13> 적색 및 적색+청색 LED 처리에 따른 딸기 잎과 새싹의 생체중 (FW) 내에서의 탄수화물 함량



출처: Samuolienė 등(2010), The Effect of Red and Blue Light Component on the Growth and Development of Frigo Strawberries, *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 97, No. 2, (p.102).

<그림 3-14> 적색 및 적색+청색 LED 처리에 따른 딸기 잎의 광합성 색소 함량 및 비율



출처: Samuolienė 등(2010), The Effect of Red and Blue Light Component on the Growth and Development of Frigo Strawberries, *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 97, No. 2, (p.102).

<표 3-6> 'Elkat' Frigo 딸기 동화지수에 대한 조명의 영향

Assimilative indices	R	R + B
Shoot/root ratio	0.88 ± 0.041	0.50 ± 0.023
Leaf area ratio cm² g⁻¹	0.14 ± 0.017	0.12 ± 0.019
Specific leaf area m² kg⁻¹	15.40 ± 1.610	18.30 ± 1.440
Leaf weight ratio kg kg⁻¹	0.49 ± 0.010	0.48 ± 0.006
Whole plant dry weight g	34.30 ± 0.160	33.80 ± 0.680
Length of flowering stem cm	11.90 ± 0.900	8.40 ± 0.800

Notes. R – 640 nm, R + B – 640 nm, 455 nm. The standard deviation of the mean ($p = 0.05$) are presented.

출처: Samuolienė 등(2010), The Effect of Red and Blue Light Component on the Growth and Development of Frigo Strawberries, *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 97, No. 2, (p.101).

<표 3-7> 열매 맺기 전(7월 8일)과 후(7월 24일) ‘Elkat’ Frigo 딸기의 발육 및 수확량

Productivity indices	Fruiting time	R	R + B
Number of runners per plant	Beginning of fruiting	1.0 ± 0.61	1.2 ± 0.30
	Ending of fruiting	2.5 ± 1.22	3.1 ± 0.71
Number of inflorescences per plant	Beginning of fruiting	1.3 ± 0.40	1.4 ± 0.70
Number of crowns per plant	Beginning of fruiting	1.4 ± 0.42	1.6 ± 0.51
Number of berries per plant	During all fruiting	49.7 ± 9.11	50.7 ± 4.12
Mass of berry g	During all fruiting	3.2 ± 0.42	4.9 ± 0.60

출처: Samuolienė 등(2010), The Effect of Red and Blue Light Component on the Growth and Development of Frigo Strawberries, *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 97, No. 2, (p.102).

반면, 적색 LED 에서는 개화 줄기를 포함한 모든 식물체에서 shoot/root율이 1.8배 높게 나타났다<표 3-6>. 적색과 청색광의 혼용처리는 러너, 개화, 크라운 형성에 긍정적인 영향을 미친 것으로 조사되었다<표 3-7>. frigo딸기의 결실은 식재 후 40일 후에 끝난다. 단일 적색광 처리 또는 적색과 청색 LED 혼합 처리는 frigo딸기의 수확에 지속적인 영향을 미치지 않았다. 그러나 적색광 처리로 과일 크기가 작아졌다. 적색과 청색 LED 광 성분의 혼합은 frigo 딸기의 발달에 필요하고 이는 일반 식물에서도 마찬가지라는 것을 확인시켜주었다(Samuolienė et al. 2010).

Yoshida et al.(2016)은 장일식물인 딸기(*Fragaria×anassa* Duch. ‘HS138’)의 개화, 광합성, 과일 수확량 등에 미치는 다양한 빛의 효과를 연구하여 식물공장의 과일 생산 효율을 높였다. 식물들은 육묘기 동안 청색과 적색 LED(청색광 피크 파장: 405, 450, 470 nm, 적색광 피크 파장: 630, 660, 685 nm) 3가지 유형을 연속 조명 아래 재배했다. 다양한 피크 LED 타입의 모든 청색광은 적

적색광(685 nm를 제외한 630, 660 nm)에 비해 개화가 더 많이 촉진되었다. 적색광 범위 중 파장이 길면 조기 개화와 양의 상관관계가 있는 반면, 개화일수는 청색 LED 처리 파장의 피크에 관계없이 유의한 차이가 없었다. <표 3-8>은 개화 후 10일에 B, R 및 B→R 처리에서 식물의 형태발생 변수를 보여주고, <그림 3-15>는 표현형을 보여준다. 영구 개화 딸기 종인 *Fragaria vesca* accession Hawaii-4를 사용한 유사한 실험 결과 광질에 대한 개화 반응패턴이 거의 동일 하였다. 이는 장일 딸기 식물이 광질에 유사한 개화 반응을 보인다는 것을 시사한다. 적색광(660 nm)에서 광합성률은 청색광(450 nm)에서보다 높았다. 그러나 적색광에서 자란 식물은 청색광에서 자란 식물보다 광합성 능력이 낮았다. 육묘 시 사용한 광색은 일일 과일 생산량에는 차이가 없었지만, 개화가 진전되면서 육묘 시 청색광 조사로 수확이 빨라졌다.

<표 3-8> 개화 후 10일에 Everbearing 딸기 식물 ‘HSI38’의 성장 및 발달에 대한 다양한 광질의 효과

Treatment	Days to anthesis	Number of leaves	Number of buds	Leaf area per plant (cm ² /plant)	Average leaf area per leaf (cm ² /leaf)	SLW* (mg DW cm ⁻²)	Leaf petiole length (cm)
B	40 b	29 b	72 a	1782 a	62.2 a	4.5 b	11.1 a
R	49 a	45 a	36 b	2140 a	47.2 b	5.8 a	9.4 b
B→R	41 b	34 ab	76 a	1717 a	50.7 b	5.6 a	9.0 b

*Specific leaf weight. Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$ as determined with the Tukey-Kramer's test ($n=3$).

출처: Yoshida 등(2016), Effect of Varying Light Quality from Single-Peak Blue and Red Light-Emitting Diodes During Nursery Period on Flowering, Photosynthesis, Growth, and Fruit Yield of Everbearing Strawberry, *Plant Biotechnology* 33, (p.272).

<그림 3-15> 개화 후 10일에 다양한 광질에서 자란 Everbearing 딸기 ‘HS138’의 표현형



출처: Yoshida 등(2016), Effect of Varying Light Quality from Single-Peak Blue and Red Light-Emitting Diodes During Nursery Period on Flowering, Photosynthesis, Growth, and Fruit Yield of Everbearing Strawberry, *Plant Biotechnology* 33, (p.272).

이지은 등(2016)은 참외 육묘 시설 내에서 우수한 품질의 모종을 생산하기 위한 LED 광원의 이용 가능성을 검토하기 위해 접목 활착 후 20일 동안 광원과 광도를 달리하여 묘소질과 정식 후 생육을 비교하였다. 광원은 청색광(B), 적청색 혼합광원 RB3, RB7을 이용하였고, 광도(PPFD)는 50, 100, 200 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 처리하였다. 조명 시간은 일출(7:30) 전 2시간과 일몰(17:30) 후 2시간씩 하루에 총 4시간을 처리하는 일장 연장법을 이용하였다. 참외 지상부의 생장 지표인 접수 길이와 줄기 직경은 청색광의 비율이 높을수록 길어지고 굵어지는 경향을 나타냈다. 적청색 혼합광원(RB3)이 다른 광원들에 비해

건물중과 조직의 충실도가 높은 경향이였다. 광합성률은 적색광의 비율이 높을수록 증가하였으며 RB7 200 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 처리구에서 5.44 $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 가장 높았다. 정식 후 RB3 200 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 처리구의 초장이 132.2 cm로 가장 길었고, 마디 수가 22.7개로 가장 많았으며 개화율도 75%로 가장 높았다. 청색광(B) 단독으로 처리한 것보다는 적청색 혼합광원(RB3)으로 처리한 것이 묘소질을 양호하게 하였고, 광도를 200 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 높이는 것이 우량 묘 생산에 유리할 것으로 판단되었다.

(3) 뿌리채소

이나라와 이승엽(2014)은 고구마 품종 ‘맛나미’, ‘신황미’, ‘연황미’ 3가지 품종의 정단분열조직배양 유래의 바이러스 무병주를 기내 마디 배양한 것을 3주간 담액수경 재배한 후 균일 신초를 5cm 크기로 잘라 72공 플러그 트레이에 삽식하여 형광등(40 W), 적색(660 nm), 청색(460 nm), 적+청(R:B=8:2), 적+청(R:B=7:3) LED 등 5종류의 광원이 설치된 시설에서 재배하여 30 cm 크기의 삽수를 채취하여 흑색 비닐로 멀칭재배 하였다. 정식 30일째 생존율과 줄기 길이 및 직경, 마디 수, 곁가지 수 등을 조사하였고 120일 후 줄기 길이 및 직경, 마디 수, 줄기 생체중과 괴근 수량 및 품질특성 등을 조사하였다. 그 결과 묘소질은 적+청(R:B=7:3) 혼합 LED에서 줄기 신장, 줄기 두께, 잎 수 및 뿌리 발달 등이 양호하여 건묘 육성에 가장 효과적이었다. 정식 30일 후 포장 생존율은 적:청(R:B=7:3) 혼합 LED에서 형광등과 적색 LED보다 유일하게 높았으며, 품종 간 차이는 없었다. 줄기 길이, 줄기 두께, 마디 수 등의 지상부 생육 특성도 LED 광질 및 품종 간에 유의한 차이가 없었다. 정식 120일 후 지상부

생육 특성에서도 줄기 길이, 줄기 두께, 마디 수, 곁가지 수, 생체중 등에서 LED 광질에 따른 유의성은 인정되지 않았으며, 줄기 길이, 마디 수, 줄기 두께, 생체중 등에서 품종 간에 유의한 차이를 보였다. 주당 평균중, 평균 괴근중 및 수량 등은 LED 광질에 따른 차이가 없었으며, 품종 간에는 유의한 차이를 보였다. 품종 간 수량은 ‘맛나미’와 ‘연황미’에서 ‘신황미’보다 유의하게 높았다.

유경란과 이승엽(2017)은 고구마 바이러스 무병주의 기내 소식물체 생장에 미치는 LED의 영향을 조사하기 위하여, ‘맛나미’, ‘신천미’, ‘연황미’의 소식물체에서 10 mm 크기의 마디를 잘라 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BA를 첨가한 MS배지에 배양하였다. 광질은 형광등을 대조구로 하여, 적색(660 nm), 청색(460 nm), 백색, 적+청(R:B=8:2), 적+청(R:B=7:3) LED를 20 cm거리에서 $150 \pm 5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 광합성유효광량자속(PPF)을 유지하였으며, 일장은 16/8(day/night)시간, 배양온도는 25℃로 조절하였다. LED 광질에 대한 품종 간 반응은 적색 LED에서 같은 방법으로 10품종의 마디 배양을 하여 소식물체 생장을 조사하였다. 배양 3주 후에 줄기 신장은 적색 LED에서 형광등보다 유의하게 증가하였으며, 청색광에서 가장 낮았다. 줄기 두께는 적+청(R:B=7:3)과 백색 LED에서 증가하였다. 생체중 및 건물중도 적색광에서 가장 높았다. 또한 적색 LED에서 신초 생육은 유의한 품종 간 차이를 보였다. 줄기 길이, 생체중 및 건물중 등은 ‘신천미’, ‘맛나미’, ‘신황미’등에서 컸다. 따라서 LED 광원을 이용한 고구마 마디 배양은 적색 LED에서 3주간 배양하여 5 cm 이상 키운 소식물체를 토양 이식하는 것이 대조구인 형광등보다 배양 기간을 1주 이상 단축할 수 있었다.

2. 청색광에 의한 화훼의 생육 특성

임재운 등(2013)은 국화 생육에 있어서 LED광이 미치는 영향을 구명하기 위해서 국화 '*Shinma*'를 발근제를 처리하여 16주 동안 삼중하였고 1-2W형 온실에서 약 2달간 배양하였다. 광 조건은 단일광 적색광(R), 650 nm, 647 nm, 622 nm, 청색광(B) 463 nm, 450 nm, 백색광(W)과 혼합광(R:B=9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, R:W=7:3) 그리고 광원의 조사 시간에 따른 LED 효과를 구명하고자 광원 비율 R:B=8:2의 컨트롤 베드를 3개로 구성하고, 대조구(태양광)를 포함하여 총 15개의 컨트롤 베드를 구성하여 수행하였다. 광 조사 시간에 따른 생육에서는 6/6(on/off)에서 초장, 엽수, 생체중, 엽면적이 높게 나타났지만, 전체적으로 통계적인 유의성은 인정되지 않았다. 단일광원의 경우 청색광(B) 450 nm에서 초장과 엽면적이 가장 크게 나타났고, 근장에서는 적색광(R) 650 nm에서 가장 높게 나타났다. 그 외의 측정항목에서는 대조구(태양광)와 백색광(W)에서 높게 나타나, 단일광원에 대한 영향도 있지만, 다양한 파장대의 광원도 작물 생육에 필요한 것으로 판단된다. 혼합광의 경우 단일광과 달리 대조구(태양광)를 제외하고 적색광(R)의 비율이 가장 높은 적색광(R):청색광(B)=9:1에서 초장이 가장 높게 나타났으며, 생체중에서는 적색광(R):백색광(W)=7:3에서 가장 높게 나타났다. 그다음으로는 대조구(태양광)에서 높게 나타났으며, 엽면적에 있어 대조구(태양광)가 가장 높게 나타났다. 국화 생육에 있어서 LED 광이 미치는 영향을 구명한 결과 국화의 생장 및 형태형성에 분명히 영향을 미치는 것으로 보였으며, 단일광과 혼합광에 대해 적절한 광원의 선택은 보광의 목적이나 고품질 국화 생산을 위해 필요하다고 판단된다.

Abidi et al.(2012)은 빛이 식물 구조를 어떻게 조절하는지 알아보기 위해 두

가지 장미품종 ‘Radrazz’와 ‘Old Blush’를 백색광과 청색광 두 광질에서 동일한 광합성 효율로 6주 동안 한 마디로부터 재배하였다. 식물이 발달은 어둠 속에서 완전히 억제된 반면, 청색광은 꽃봉오리가 터지기부터 개화까지 완전한 발달을 지속하였다. 청색광은 두 품종 모두에서 기공 전도도와 세포 간 CO₂ 농도가 증가하고 있음에도 불구하고 완전히 확장된 잎의 순 CO₂ 동화율을 감소시켰다<표 3-9>. ‘Radrazz’의 경우 청색광에서 CO₂ 동화의 감소는 광합성 색소 함량 감소와 관련이 있는 반면, 두 품종 모두에서 엽록소a/b 비율이 증가하였다<표 3-9>.

<표 3-9> *Rosa hybrida* ‘Radrazz’와 *R. chinensis* ‘Old Blush’ 잎의 백색광(WL: 110 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 또는 청색광(BL:110 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)조건에서 6주간 배양 후 광질이 광합성 매개변수 및 색소 함량에 미치는 영향

genotype	‘Radrazz’		‘Old Blush’	
	WL	BL	WL	BL
photosynthetic parameters				
CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.71 (± 0.45)	1.27 (± 0.35)*	2.87 (± 0.89)	1.20 (± 0.59 ***)
stomatal conductance ($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	115 (± 25)	166 (31)***	105 (± 37)	178 (± 20)**
intercellular CO ₂ concentration ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$)	383 (± 30)	398 (± 10)	342 (± 25)	392 (± 10)***
pigment content (mg g^{-1})				
chlorophyll a	229 (± 32)	194 (± 25)*	199 (± 53)	210 (± 51)
chlorophyll b	99 (± 15)	67 (± 10)**	89 (± 18)	80 (± 31)
chlorophyll a/b	2.6 (± 0.1)	2.9 (± 0.2)***	2.2 (± 0.5)	2.7 (± 0.3)*
carotenoids	32 (± 7)	19 (± 4)***	43 (± 8)	41 (± 8)

Values in brackets represent SE with 20 plants. *, ** and ***significant differences between white and blue light treatments at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively.

출처: Abidi 등(2012), Blue Light Effects on Rose Photosynthesis and Photomorphogenesis, *Plant Biology*, (p.72).

청색광은 백색광과 마찬가지로 정단분열조직의 동일한 유기적 활동과 마디

성장과 꽃의 발육을 유도하였다. 청색광에서 장미의 정상적인 발달은 장미 식물이 빛 환경에 적응하는 강한 특성을 나타낸다. 이는 또한 청색 파장에 의해 광형태형성 과정이 모두 유발될 수 있으며, 청색광은 광합성을 통해 충분한 에너지를 공급하여 장미의 정상적인 성장과 발달을 유지할 수 있음을 나타낸다(Abidi et al. 2012).

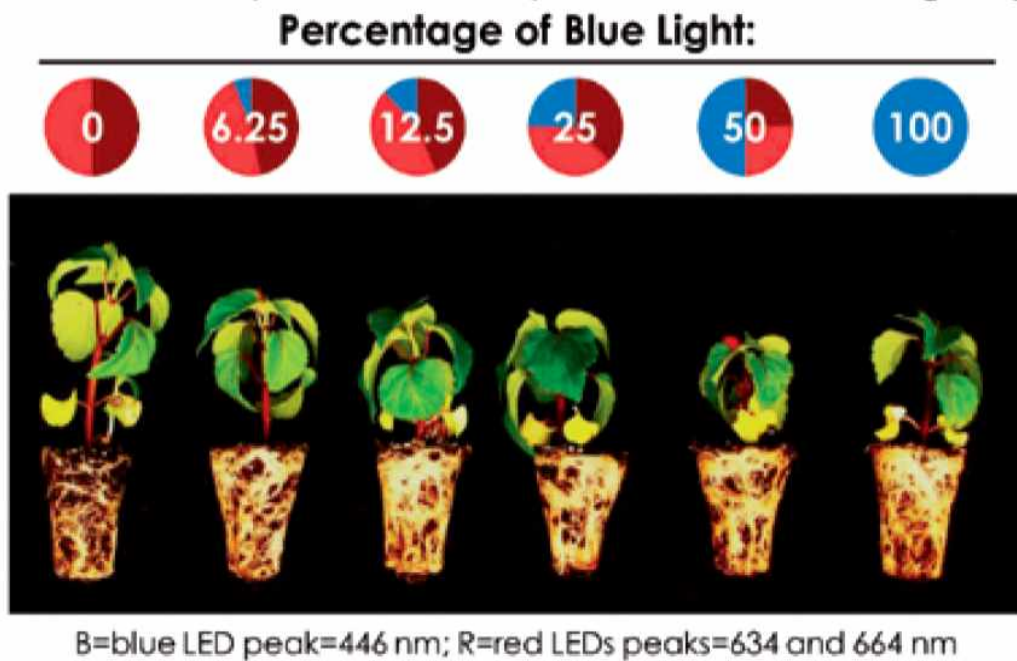
김소희 등(2014)은 일몰 후 LED의 다양한 광질 및 보광처리 시간이 칼랑코에의 성장과 개화에 미치는 영향을 조사하여 고품질의 식물을 생산하기 위한 연구를 수행하였다. 칼랑코에는 일몰 후 2시간의 적색광에서 식물의 초장, 줄기 직경, 지하부 생체중 및 건물중이 증가하였다. 초장은 절간의 수보다는 절간의 길이에 의해 영향을 받았다. 단일성 작물인 칼랑코에 일몰 후 광질 처리는 무처리구에 비해 개화가 억제되는 경향을 보였다. 특히 청색광은 보광처리 시간에 관계없이 화아수와 개화수가 억제되는 정도가 높았다. 칼랑코에를 일몰 후에 광질 처리는 개화소요일수가 단축되어 개화가 촉진되는 경향이었고, 특히, 일몰 후 4시간의 적색+청색 혼합광 처리는 무처리에 비해 개화소요일수가 3일 빨랐다. 또한 일몰 후 4시간의 적색+청색 혼합광에서 적색도를 나타내는 Hunter L, a, b값도 우수하여 색택이 좋았다. 엽록소 함량은 일몰 후의 광질 처리에 크게 영향을 받지 않았으나, 안토시아닌 함량은 청색광 처리에서 증가하였다.

이진재와 황지혜(2014)는 프리지아 ‘이본느’를 가지고 매일 오후 5시에서 8시까지 150일 동안 LED(청색, 녹색, 적색, 청색:녹색:적색 혼합)광과 백열등, 메탈할라이드등으로 보광함으로써, 꽃눈분화 이후부터 개화가 완전히 종료될 때까지 광질에 따른 장일 처리가 프리지아 생육 및 개화에 미치는 영향을 조

사하였다. 엽분열기부터 화뢰형성기까지 초장은 광원별 장일 처리에 의해 큰 변화는 없었고 엽수는 메탈할라이드등 처리에서 감소하는 경향이었으나 화뢰 발달기 때 엽 내 엽록소 함량은 메탈할라이드등에서 가장 높았다. LED 청색광과 녹색광에서 개화기가 빨랐는데 특히 녹색광 처리에서 가장 빨라 무처리와 메탈할라이드등에 비해 6~8일 정도 단축되었다. 포장 내 개화기간은 LED 적색광에서 가장 짧아 일시수확에는 효과적이었다. 메탈할라이드 등에서 절화중, 소화의 길이와 폭 등 절화 특성이 우수하였다. 구근의 특성을 조사한 결과 LED 적색광에서는 구폭과 구중이, 백열등 처리에서는 구고와 구중이 감소하였고, 구근내 전분 함량은 모든 시험구 사이에 특별한 차이가 없었다. 결과적으로 개화촉진은 LED 녹색등에서 효과적이었고 개화 품질은 메탈할라이드등 처리에서 우수하였다.

Erik(2017)에 의하면 광합성 반응을 주도하고 에너지 관점에서 볼 때 청색광자는 높은 에너지를 완전히 활용되지 않고 에너지의 일부가 긴 파장의 광합성광자에 비해 일부 손실되기 때문에 녹색 또는 적색 광자보다 덜 효율적이라고 하였다. 그러나 일반적인 식물 성장을 위한 조명에서 최소한의 청색광 강도가 필요하며 청색광은 기공 열림을 조절하고 기공은 수분 손실과 이산화탄소흡수를 조절한다. 일반적으로 낮은 강도의 청색광만이 완전한 기능의 광합성을 위한 광스펙트럼에 필요하다. <그림 3-16>은 Salvia 'Vista Red'를 실내에서 하루 18시간 LED 처리로 4주간 재배한 묘이다. 청색광이 없이 자란 식물과 비교해서 청색광에서 짧고 작으며 두껍고 짙은 녹색 잎을 가졌다. 짧은 파장(청색/uv)은 잎 착색에 영향을 미칠 수 있는 화합물 생산을 자극한다. 예를 들어 청색/uv가 없는 경우 식물은 자주빛 잎이나 녹색잎이다.

<그림 3-16> 실내 LEDs에서 자란 Salvia 'Vista Red' 묘목



출처: Erik, R.(2017), Effects of Blue Light on Plants, GPNMAG.COM, (p.38).

양상추 같이 일부 잎이 많은 작물은 청색/uv가 또한 항산화제와 비타민 같은 건강에 좋은 화합물 생산을 증가시키기 때문에 이러한 작물의 경우 마케팅에서 잎 착색 및 영양과 같은 작물 품질 속성을 증가시킬 수 있다. 청색/uv 부재 시 토마토류의 일부 식물의 잎, 줄기, 잎자루에서 부풀거나 작은 물집이 발생하기도 하는데 생리장해는 일반적으로 청색/uv율이 증가하는 만큼 감소한다. 일반적으로 낮은 강도($1\sim2\ \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 광주기 조명에서 청색광은 대부분 낮의 길이에 민감한 작물의 개화를 조절하지 않지만 높은 강도(such as $20\ \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ or higher)에서 청색광은 장일식물의 개화를 촉진하고 단일식물의 개화를 억제하였다(Erik, R. 2017).

3. 청색광에 의한 과수의 생육 특성

김준혁 등(2017)은 ‘거봉’포도 재배시 야간의 빛 공해에 따른 피해를 예측하기 위하여 만개기부터 수확기까지 인공광원으로 적색, 청색, 백색 등을 사용하여 매일 오후 10시부터 오전 2시까지 4시간 동안 야간 조사를 하였다. 야간 조사는 생산량을 비롯하여 가용성 고형물 함량, anthocyanin, chlorophyll a 함량에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 무처리구의 가용성 고형물 함량은 17.5 °Brix로 야간에 빛을 조사한 적색광, 청색광, 백색광 처리구의 16.4, 16.2, 16.3 °Brix에 비해 1 °Brix이상 높았으며, 과피의 anthocyanin 함량 또한 무처리구가 $4.08 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 로 적색광, 청색광, 백색광 처리구의 3.14, 2.47, 2.82 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 보다 높은 것으로 조사되었다. 반면에 chlorophyll a 함량은 무처리구가 $0.268 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 로 적색광, 청색광, 백색광 처리구의 0.339, 0.345, 0.372 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 와 비교하여 가장 낮았다. 결과적으로 당의 증가와 anthocyanin의 축적 및 chlorophyll의 감소는 과실 성숙에 수반된 현상이라는 점을 고려할 때, 야간 조사는 ‘거봉’의 암기를 중단시켜 과실의 성숙 과정을 지연시키며 적색광 처리는 생산량 감소를 수반하였다. 따라서 광 파장에 관계없이 야간 조사에 의한 빛 공해가 나타나는 것으로 확인되었으며, 가로등을 비롯한 야간 조명이 설치된 지역에 인접한 포도원의 경우 과실의 성숙이 불량해질 수 있는 것으로 판단되었다.

4. 청색광에 의한 기내 묘 및 새싹 묘의 생육 특성

임현정 등(2019)은 차나무의 기내배양 과정 중 증식 배양 단계에서 LED 광질 조건에 따른 기내 배양묘의 생육 특성과 광합성에 미치는 영향을 조사하였

다. 광질은 적색광(R), 청색광(B), 혼합광(R+B+W)을 사용하여 처리하였고, 형광등(F)을 대조구로 하였다. 초장 생육은 적색광에서 가장 좋았으며, 특히 뿌리 생육에 있어서 혼합광은 길이와 표면적 증대에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 T/R율, 엽록소 함량은 혼합광 처리에서 증가하는 것으로 나타났다. 엽록소 형광반응 이미지 촬영 결과 모든 처리구에서 광질에 따른 F_v/F_m (광계Ⅱ의 활성을 나타내주는 지표)의 값은 현저한 차이가 없었다. 그러나 배양묘의 NPQ(nonphotochemical quenching)는 청색광 처리에서 가장 많이 증가하여, 다른 광질과 유의적인 차이를 보였으며, 광합성 효율을 억제시키는 것으로 나타났다. 이상의 결과로 차나무 기내배양은 배양목적에 따라 광질을 선택하는 것은 매우 중요하며, 차나무 기내배양 시 건설한 식물 생산을 위해서는 혼합광 처리가 유리할 것으로 판단하였다.

최인이 등(2019)은 적무 새싹 재배 시 LED와 QD-LED(Quantum Dot)광 조사가 종자 발아율, 항산화능, 그리고 미생물에 미치는 영향에 대해 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 조사한 광은 청색(B), 적색(R), 청색+적색(B+R) 그리고 청색+적색+원적색 혼합광(QD-LED)광이며, 대조구로 명조건(형광등-FL)과 암 조건(Dark)을 두었다. 발아율은 암 조건에서 가장 높았다. 암 조건에서 7일간 배양한 후 1일간 광 처리한 적무 새싹의 초장과 생체중은 모든 처리구에서 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 광조사 후 자엽의 녹색은 청색+적색, 배측의 적색은 청색 QD-LED의 색 발현이 우수하였다. 항산화 능력과 페놀은 암 조건과 청색+적색, 안토시아닌은 청색과 QD-LED가 높은 수치를 나타냈다. 총 세균은 모든 처리구가 유사하며 살균 효과는 나타나지 않았다. 대장균은 QD-LED의 수치가 가장 낮았으며, 총 곰팡이 수는 형광등에서 가장

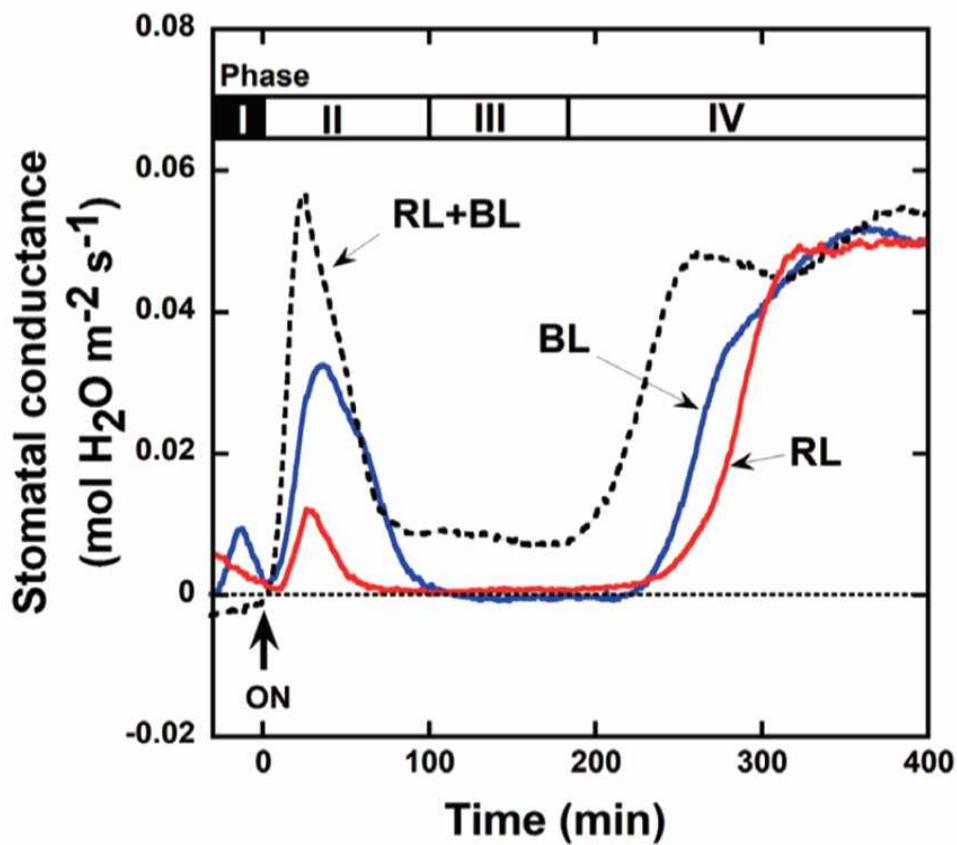
낮았다. 위의 결과를 종합하면, 적무 새싹 생산을 위해 암 조건에서 받아시켜 7일간 새싹으로 재배한 후, 수확 전 24시간 동안 청색광 또는 QD-LED 광을 조사하는 것이 안토시아닌 함량을 증가시키고 색 발현 및 대장균 살균에 적합하다고 판단된다.

5. 청색광에 의한 CAM 식물의 생육 특성

Gotoh et al.(2019)은 청색광에 의한 기공 열림을 조사하기 위한 실험을 진행하였다. 청색광은 C_3 , C_4 식물의 기공 열림을 위한 기본 신호이나 CAM (crassulacean acid metabolism plants)식물은 청색광에 반응하여 기공을 열리는지 알려지지 않았다. CAM 식물 *Kalanchoe pinnata* 와 *Kalanchoe daigremontiana* 의 완전히 성숙한 잎을 분리하여 10 mM MES, 50 mM KCl, 그리고 0.1 mM $CaCl_2$ (pH 6.5)에 넣고 2시간 동안 어두운 상태를 유지한 후 기공 청색광 반응을 조사하였는데 CAM 식물 *Kalanchoe pinnata*와 *Kalanchoe daigremontiana*에서 C_3 와 C_4 식물과 대조적으로 밤에 기공을 열고 낮의 일부 동안 기공을 닫았다. RL과 BL단독 처리에서는 기공 열림이 유도되지 않았다<그림 3-17>. *K. pinnata*와 *K. daigremontiana*의 분리된 표피껍질과 온전한 잎 모두에서 적색광 배경에 약한 청색광이 겹쳐졌을 때 기공 열림 반응이 있었다<그림 3-18>. 청색광-의존적 기공 열림은 각각 Tautomycin과 Vanadate에 의해 완전히 억제되어지고, protein phosphatase 1형과 원형질막 H^+ -ATPase에 의해 억제된다<그림 3-19>. BL과 Fusicoccin(FC)이 CAM 식물 표피의 기공 개방을 유도 실험을 위해 기본 완충용액에 5 μ M의 Fusicoccin을 첨가하고 분리된 표피를 3시간 동안 어둡게 배양한 후 조사한 결과 적색광과 청색광을 단독 처리했을

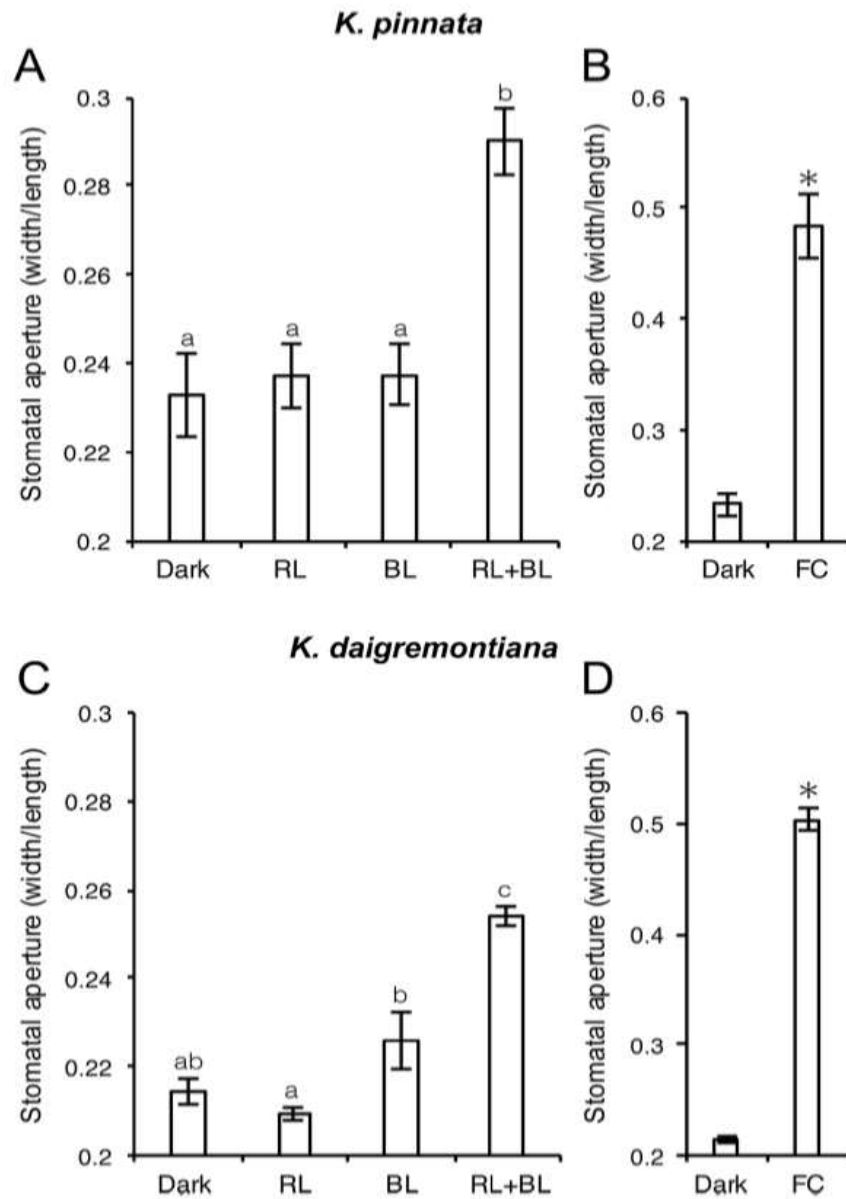
때는 기공 열림이 없었으나 적색광과 청색광을 혼용하여 처리했을 때는 기공이 열렸다. 또한 원형질막 H^+ -ATPase를 활성화시키는 Fusicoccin은 어둠 속에서 기공 열림을 유도했다<그림 3-18>.

<그림 3-17> *Kalanchoe pinnata*의 온전한 잎에서 빛에 대한 기공 전도도의 변화. 위쪽을 가리키는 화살표는 연속 조명의 적용을 나타낸다. 적색선: $600 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 적색광(RL); 청색선: $10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 청색광(BL); 점선: $600 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ RL 및 $10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ BL(RL+BL)



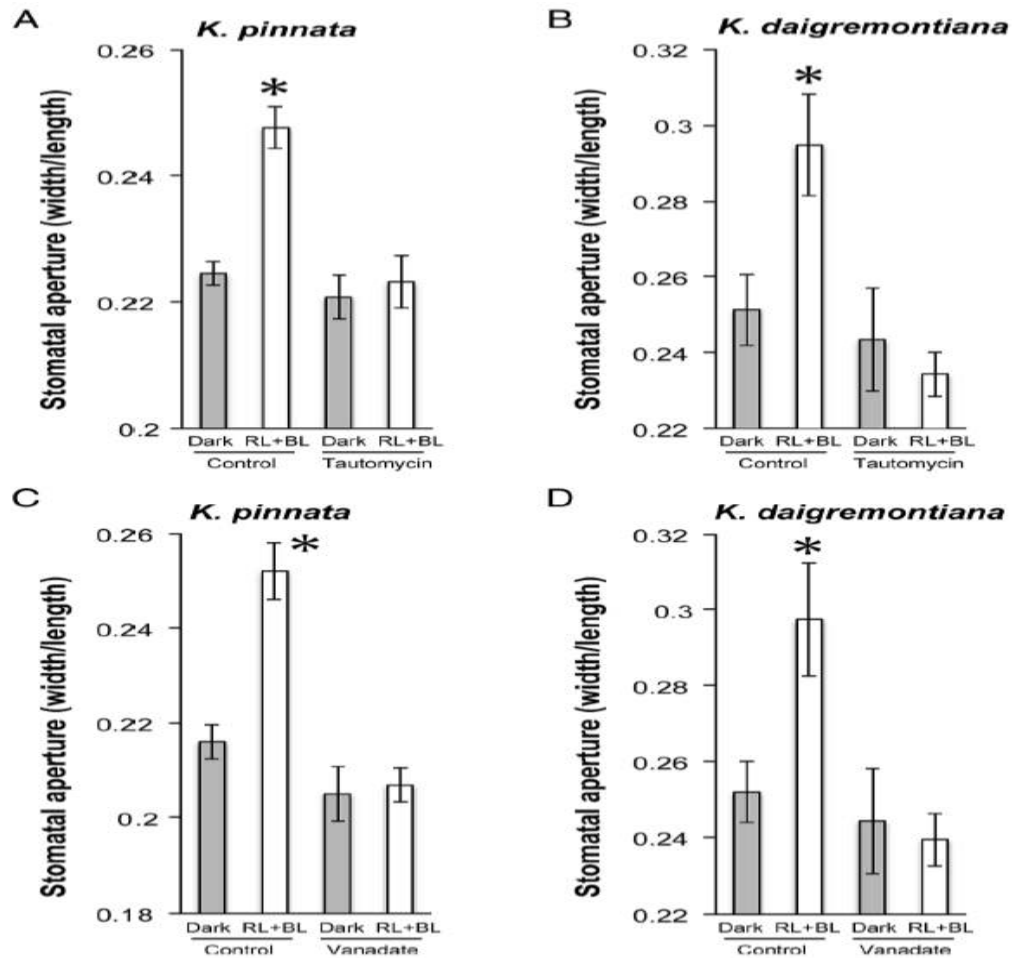
출처: Gotoh 등(2019), Stomatal Response to Blue Light in Crassulacean Acid Metabolism Plants *Kalanchoe pinnata* and *Kalanchoe daigremontiana*, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 70, No. 4, (p.1369).

<그림 3-18> *Kalanchoe pinnata*(A, B) 및 *K. daigremontiana*(C, D)의 표피에서 빛과 Fusicoccin(FC)에 대한 기공 반응



출처: Gotoh 등(2019), Stomatal Response to Blue Light in Crassulacean Acid Metabolism Plants *Kalanchoe pinnata* and *Kalanchoe daigremontiana*, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 70, No. 4, (p.1371).

<그림 3-19> *Kalanchoe pinnata*(A, C) 및 *K. daigremontiana*(B, D)의 표피에서 Tautomycin(A, B) 및 Vanadate(C, D)에 의한 기공 개방 억제



출처: Gotoh 등(2019), Stomatal Response to Blue Light in Crassulacean Acid Metabolism Plants *Kalanchoe pinnata* and *Kalanchoe daigremontiana*, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 70, No. 4, (p.1371).

이는 적색광과 청색광을 조사했을 때의 2배 정도이다. 분리된 표피에 기본 완충용액에 Tautomycin (2.5 μ M) 또는 Vanadate (1 mM)를 첨가하고 빛을 조사하여 기공 반응을 조사하였더니 두 식물 모두에서 기공 열림이 완전히 억제되었다. 청색광과 Fusicoccin 둘 다 *K. pinnata*에서 공변세포 원형질막

H⁺-ATPase의 인산화를 유도했다. 이러한 결과는 청색광-의존적 기공 열림은 CAM plants *K. pinnata*와 *K. daigremontiana*에서 CO₂ 흡수에 의한 광합성과는 독립적으로 발생한다는 것을 나타낸다(Gotoh et al. 2019).

He et al.(2017)은 CAM 식물의 성장과 광합성 특성을 알아보기 위해 *Mesembrythemum cyrstallinum* CAM 식물을 충분한 물을 공급하고 실내 LED 조명에서 재배하였다. 식물들은 서로 다른 적색:청색 LED 비율에서 350 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 동일한 광합성 광자 플러스 밀도로 16시간 동안 수경 재배하였다. 100:0(0B), 90:10(10B), 80:20(20B), 70:30(30B), 50:50(50B), 0:100(100B) 조건으로 재배한 결과 10B에서 자란 *M. crystallinum*은 줄기 및 뿌리 생체중과 shoot/root율이 가장 컸으며 0B 조건에서 자란 *M. crystallinum*은 가장 낮은 값을 보였다. 0B 조건에서 자란 식물에 비해 다른 식물은 모두 비슷하지만 총 엽록소(Chl)와 카로티노이드(Car) 함량, Chl a/b 비율이 높았다. 그러나 서로 다른 적색 및 청색 LED로 재배된 모든 식물에서 Chl//Car 비율에 유의한 차이는 없었다. 광화학적억제, 비광화학적억제, 전자전달율로 측정한 광합성 빛 사용효율은 높은 청색 LED에서 자란 식물이 0B에서 자란 식물에 비해 빛에너지를 더 많이 활용하고 방열 메카니즘이 더 효과적인 것으로 나타났다. 통계적으로 서로 다른 조합의 적색 및 청색 LED에서 자란 식물들 간에 광합성 O₂ 발생 속도, 광 포화 CO₂ 동화율(light-saturated CO₂ assimilation rate), 광 포화 기공 전도도(light-saturated stomatal conductance)에 차이가 없었지만 0B 식물보다 유의미하게 높았다. 전체 수용성 단백질의 경우 서로 다른 조합의 적색 및 청색 LED에서 자란 모든 식물은 값이 비슷했지만 0B 조건에서 자란 식물보다 유의미하게 높았다. 그러나 높은 청색 LED에서 자란 식물은 낮은 청색 LED에

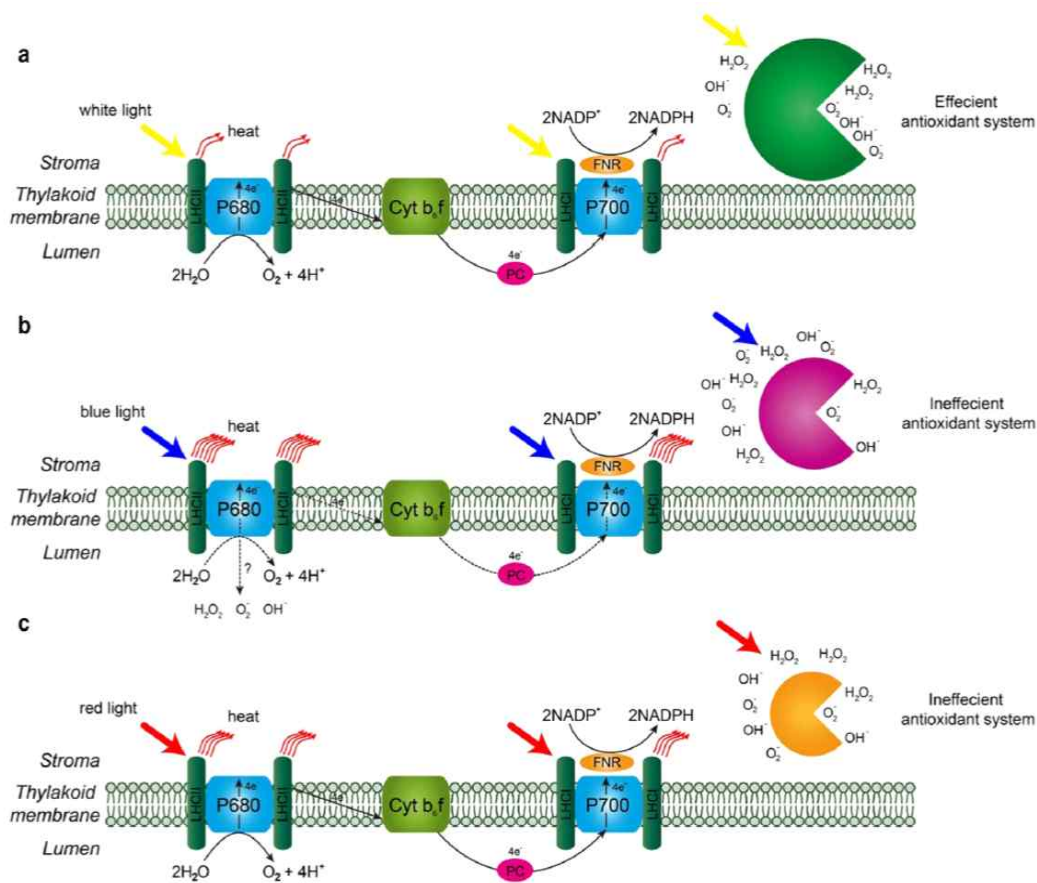
서 자란 식물보다 리불로스-1,5-이인산 카르복실효소 산소효소(Rubisco)단백질이 훨씬 높았다. 광 포화 CO_2 동화율과 광포화 기공 전도도가 높지만 광 조사 기간 동안 CAM 식물인 *M. crystallinum*의 산도가 매우 낮다는 것은 CAM 식물이 적절한 물을 공급받았을 때 C_3 광합성을 수행했음을 의미한다. 이번 연구 결과는 적색 또는 청색 LED만 비교했을 때 적색과 청색 LED 조명의 적절한 조합은 식물의 성장과 *M. crystallinum*의 광합성 능력을 높인 것으로 나타났다.

6. 청색광에 의한 식물체 내에서의 기작

Hamdani et al.(2019)은 엽록소 a의 들뜬 상태의 비광화학억제(NPQ)는 식물이 높은 조명 아래 생존하기 위해 사용하는 주요 광화학 보호 메커니즘이며 장기적인 광질 처리가 광합성 특성, 특히 쌀의 NPQ에 미치는 영향을 보고하였다. 입사 광자 플럭스 밀도가 $300 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 인 적색광(648~672 nm), 청색광(438~460 nm), 백색광(529~624 nm)의 세 가지 LED를 사용했으며, 서로 다른 광질로 성장한 잎의 흡수 광자 플럭스 밀도의 차이는 7% 미만이었다. 연구 결과에 따르면 청색광은 백색광과 비교하여 P_{700} 이 완전히 산화된 후 F_v/F_m 의 상당한 감소율을 유발했다. 또한 청색광은 NPQ 유도 초기 속도가 증가함에 따라 더 높은 NPQ를 유도했으며, 이는 NPQ의 qE성분에 해당하고, PSII의 최대 양자 수율, 즉 $Y(\text{II})$ 는 감소하였다. 반면, 장기적인 적색광에서 재배되는 쌀은 $Y(\text{II})$ 가 감소하고 NPQ가 증가하였으나 F_v/F_m 의 변화는 없었다. 더욱이 청색광 또는 적색광에서 재배되는 쌀은 백색광에서 재배되는 쌀에 비해 catalase와 ascorbate peroxidase 모두의 전사체 풍부도가 감소하였고,

H₂O₂ 함량도 증가하였다<그림 3-20>. 이 연구에서 적당한 입사광 수준에서도 장기적인 청색 또는 적색광에서 자란 쌀은 항산화 시스템을 손상시키고 이는 광계II의 양자 수율을 낮추며 NPQ를 증가시켰음을 시사한다.

<그림 3-20> 백색(a) 청색(b) 또는 적색광(c)에서 재배된 벼의 전자 이동 과정 및 광보호의 도식적 표현



출처: Hamdani 등(2019), Changes in the Photosynthesis Properties and Photoprotection Capacity in Rice(*Oryza sativa*) Grown under Red, Blue, or White Light, Photosynthesis Research 139, (p.117).

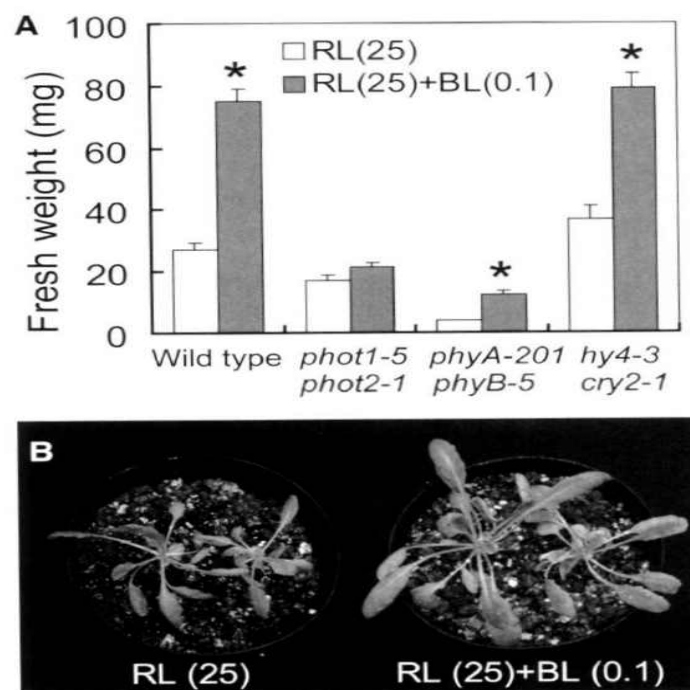
Suetsugu et al.(2014)은 기공 조절에서 엽록체의 역할을 명확히 하기 위해

분리된 표피, 공변세포 원형질체 및 *Aravidospsis thaliana*의 온전한 잎에서 청색광(BL) 의존적인 기공 개방에 대한 적색광(RL)의 영향을 조사하였다. 청색광(BL)은 H^+ -ATPases의 활성화를 통해 기공 개방을 유도하고 이후 공변세포에 이온이 축적된다. 대부분의 식물 중에서, 적색광(RL)은 청색광(BL) 의존적인 기공 개방을 강화한다. 이러한 RL 효과는 표피의 유일한 세포소기관인 공변세포의 엽록체에서 기인한다. 분리된 표피조직과 온전한 잎에서 RL에 중첩된 약한 BL은 기공 개방을 강화시켰으나 BL만으로는 효과가 낮았다. 공변세포 원형질체에서 RL은 BL 의존적인 H^+ 펌프를 강화하였고 광합성 전자전달 저해제인 DCMU(dichlorophenyldimethylurea)는 이러한 효과를 제거하였다. RL은 BL에 반응하여 H^+ -ATPase의 인산화 수준을 높였으나, 이러한 RL효과는 DCMU에 의해 억제되지 않았다. 또한 DCMU는 온전한 잎에서 RL 유도 및 BL 의존적인 기공 개방 모두를 억제하였다. 잎의 광합성률은 DCMU 존재 시 BL 의존성 기공 개방과 상관관계를 가지며, 공변세포 엽록체가 BL 의존성 기공 개방을 촉진하는 ATP 또는 환원 당량을 제공하고, 표피의 PAR 흡수에 의해 엽육세포 엽록체 내에서 광합성 CO_2 고정을 간접적으로 모니터링 한다고 생각된다.

Takemiya et al.(2005)은 식물 성장에 미치는 포토트로핀 의존적 효과를 보고하였다. 포토트로핀(*phot1*과 *phot2*)은 포토트로피즘, 엽록체 이동, 잎 확장 및 기공 개방을 위한 식물의 청색광 수용체이다. 이 모든 반응은 광 에너지를 효율적으로 포착하고, 광 손상을 줄이며, CO_2 를 획득하는 데 도움을 줌으로써 광합성을 최적화하는 것으로 생각된다. 그러나 포토트로핀을 통한 식물 성장의 촉진에 대한 실험적 증거는 부족하다. *Arabidopsis thaliana* 야생형 식물,

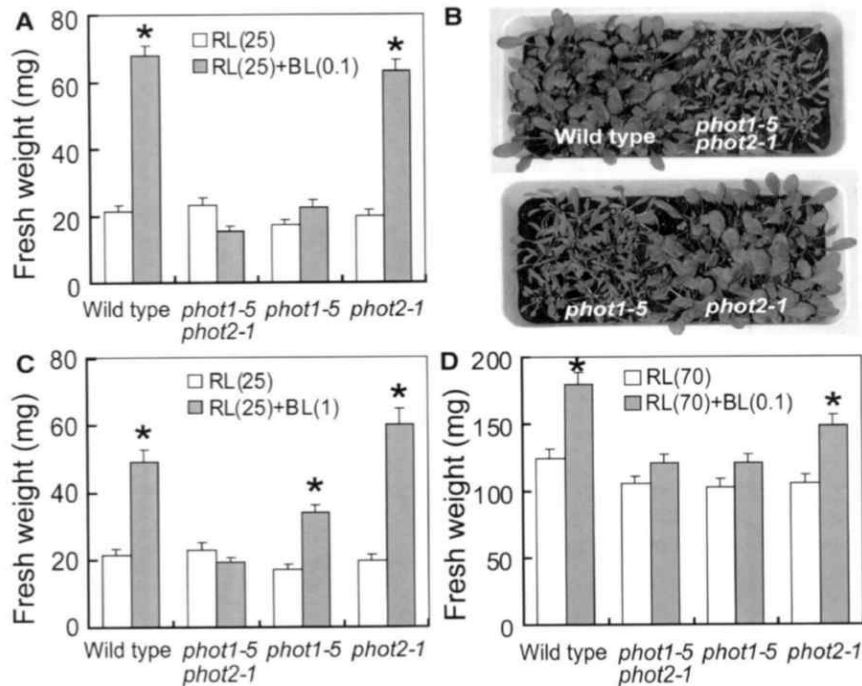
phot1 및 *phot2* 돌연변이, *phot1*, *phot2* 이중 돌연변이를 적색광 아래서 배양했을 때, 유의한 성장 차이는 관찰되지 않았다<그림 3-22A의 흰색막대>. 다만 매우 낮은 청색광($0.1 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)이 적색광 위에 겹쳐졌다면 기능성 *PHOT1* 유전자가 이동된 식물에서 생체중이 최대 3배까지 크게 증가한 것으로 나타났다<그림 3-21A>. <그림 3-21B>는 각각 적색등과 매우 낮은 강도의 청색광으로 보충된 적색등에서 자란 6주 된 식물의 전형적인 경우를 보여 준다.

<그림 3-21> 적색광의 낮은 PAR에서 청색광에 의한 식물 성장 촉진



출처: Takemiya 등(2005), Phototropins Promote Plant Growth in Response to Blue Light in Low Light Environments, The Plant Cell. Vol. 17, (p.1121)

<그림 3-22> 포토트로핀 매개에 의한 성장 촉진



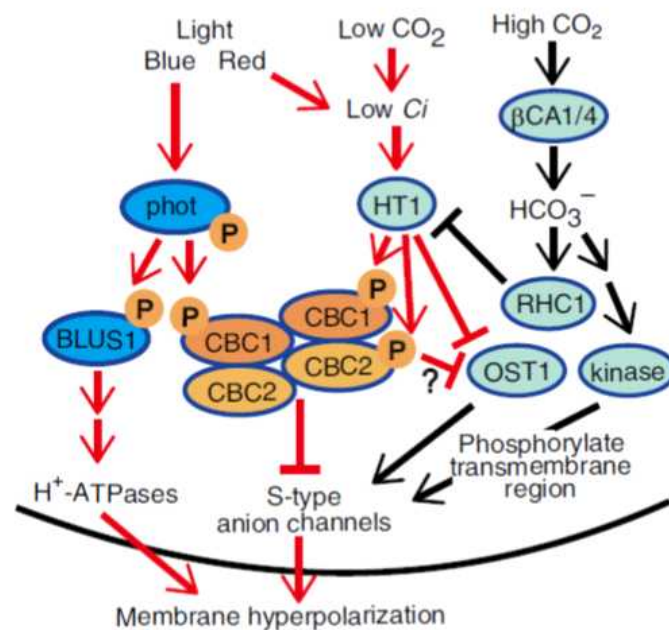
출처: Takemiya 등(2005), Phototropins Promote Plant Growth in Response to Blue Light in Low Light Environments, The Plant Cell. Vol. 17, (p.1122)

청색광의 세기를 $1 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 높였을 때, *phot1* 단일 돌연변이에서도 성장강화가 발견되었으나 이중 돌연변이는 발견되지 않아 *phot2*가 감도가 낮은 *phot1*과 유사한 반응을 매개한 것으로 나타났다<그림 3-22C>. 그 영향은 특히 낮은 광합성 활성 방사선 아래에서 발생했다. <그림 3-22C와 D>의 두 실험 결과는 이미 잘 알려진 생리적 포토트로핀 매개 반응(엽록체 이동, 기공 개방, 잎 확장 등)은 청색광에 의한 성장강화에 이러한 반응이 관여했음을 나타낸다. 포토트로핀이 자연환경의 낮은 광합성 활성 방사선 하에서 광합성 성능을 최적화하는 다양한 반응을 제어하고 통합함으로써 식물의 성장을 촉진한

다고 결론 지었다(Takemiya et al. 2005).

Hiyama et al.(2017)은 광합성 활성 방사선(PAR)의 주요성분인 청색광(BL)과 공변세포 내 저농도의 CO₂ 신호를 연결하는 두 개의 키나아제(CBC 1/2)를 식별하고 특성화하기 위한 연구를 진행하였다. 기공은 열림과 닫힘을 통하여 식물과 대기 사이의 가스교환을 조절한다. 낮은 CO₂ 농도에 반응하여 기공을 열어 광합성을 극대화하고 있으나 광합성과 기공 전도도를 조정하는 메커니즘은 아직 밝혀지지 않았다. CBC1/CBC2는 BL과 낮은 CO₂ 농도의 두 개의 반응 안에서 S형 음이온 채널의 억제에 의해 기공 개방을 중복 자극한다.

<그림 3-23> BL과 CO₂의 신호가 수렴하는 CBC 기능. 적색선: 자극된 기공 개방, 검은색선: 가속화된 기공 폐쇄.

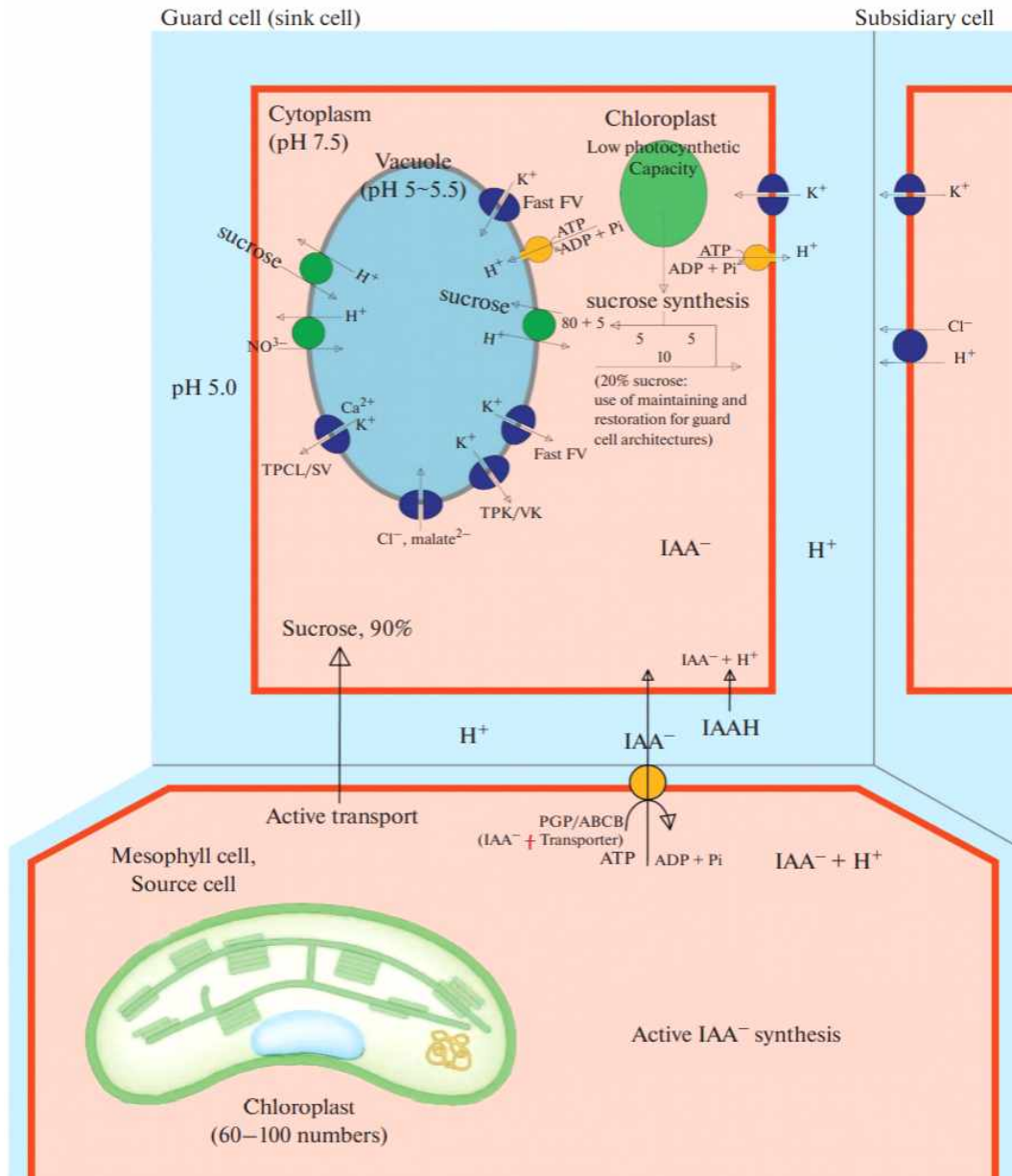


출처: Hiyama 등(2017), Blue Light and CO₂ Signal Converge to Regulate Light-Induced Stomatal Opening, nature communications, Doi: 10.1038, (p.11).

CBC1/CBC2는 포토트로핀과 HT 1(HIGH LEAF TEMPERATURE 1)의 신호 경로 안에서의 기능이다. CBC1/CBC2는 HT 1과 상호작용하며 인산화된다 <그림 3-23>. CBC가 청색광(BL)과 CO₂의 신호를 통합하여 기공 개방을 조절하고 청색광(BL)과 낮은 CO₂ 신호의 수렴지 역할을 할 것을 제안하였다 (Hiyama et al. 2017).

Lee(2021)는 식물 기공 개방 메커니즘에 관한 연구를 하였다. 기공은 공변세포 액포로 삼투성 물질이 운반되면서 열린다. 액포는 K⁺전송과 관련된 채널 종류가 많은데, 그중 내부-K⁺채널/FV, 외부-K⁺채널/FV, 외부 TPK/VK채널, TPC1/SV채널이 있다. 액포 안에 있는 두 개의 H⁺전달 효소인 H⁺-ATPase와 H⁺-PPase는 H⁺를 세포질에서 액포로 활발하게 운반하며 그것들은 세포질 내부의 많은 신진대사에 이상적인 pH 조건을 만드는 역할을 한다. K⁺는 세포질에서 액포로 운반되어지나 액포에 양전하가 너무 많기 때문에 액포 속으로 들어갈 수 없다. 따라서 공변세포 액포의 삼투압을 높이기 위해서는 K⁺를 대체할 수 있는 용액의 운반이 필요하다. 액포막에는 sucrose를 액포로 운반할 수 있는 활성 운반 단백질인 sucrose-H⁺antiport가 포함되어 있다<그림 3-24>. 기공 열림에는 K⁺를 포함한 다양한 용액이 필요하지만, sucrose는 액포의 삼투압을 증가시킬 수 있는 가장 중요한 물질로 제안되고 있다. 또한 청색광 수용체 매개 신호전달경로에 의해 유도된 기공 개방은 청색광 자극에 의한 광합성의 영향을 반영할 가능성이 높다. 단일 청색광만 처리하더라도 광합성을 유도할 수 있다는 수많은 결과가 발표되었기 때문이다.

<그림 3-24> 기공 개방의 가능한 메커니즘



출처: Lee(2021), The Stomatal Openings Occurred from Blue Light Photoreceptors Mediated Signal Transduction Pathway May be Enhanced by a Blue Light Stimulated Photosynthesis, *Russian Journal of Plant Physiology*, 68, (p.823).

IV. 결 과

상추 재배에 있어서는 백열등보다 LED를 이용하는 것이 에너지 효율면에서 효과적일 뿐만 아니라 상추의 품질 향상에도 효과적이었다. 청색 단일광 처리로 엽록소 함량, 총 페놀 농도, 항산화도, 플라보노이드 및 안토시아닌 함량이 증대되었으며 RB 혼합광 처리에서 더 증대되었다. 또한 무기물 함량도 RB 혼합광에서 높았다. 광주기는 지상부 생육에는 15/9h에서 효과적이었고 안토시아닌 함량은 18/6h일 때 가장 효과적이었다. 상추순의 경우 R/B(1h) 교번처리에서 생체중과 건물중 그리고 수크로스 및 전분 함량이 가장 높았다.

배추 육묘에서도 청색광은 AsA(L-아스코르브산)의 함량을 증대시켰고 AsA 증가는 산화방지제인 SOD의 활성 강화에 반영되어 항산화 활동에 영향을 미쳤다. 또한 색소체나 엽록체 관련 유전자들의 발현을 증가시켰으며 하배축이 길고 자엽이 넓게 발달하여 본엽이 가장 먼저 발달할 수 있도록 하였다.

시금치는 품종에 따라 같은 조건의 빛을 조사하더라도 생육 특성에 차이를 보였으나 RB 혼합광에서는 품종에 상관없이 건물중이 가장 높았다.

토마토 묘에 RB 혼합광 처리는 묘소질을 양호하게 하였으며 26B 처리에서 식물 총 수확량을 증대시켰다.

파프리카는 LED나 형광등의 인공광원에서 육묘한 후 정식한 묘가 생육이 양호하였으며 초기 수확이 1주일 정도 빨랐다. 정식 후 재배기간이 길어짐에 따라 인공광에 의한 수량 차이는 보이지 않았다.

착색단고추에 LED 처리는 적색과 황색 계통의 착색에 효과적이었으나 UVa는 과실의 외관에 피해를 입히기 때문에 부적합하였으며 고광도의 LED 광원

이 착색에 효과적이었다. 일반 고추에서 청색광은 엽장을 증가시켰으며 고추 잎의 안토시아닌과 엽록소 함량을 증가시켰다.

딸기 육묘 시 RB 혼합광 처리는 탄수화물 축적, 색소 비율을 증가시켰으며 러너, 개화, 크라운 형성에 긍정적인 영향을 미쳤으나 수확에 지속적인 영향을 미치지 않았다. 특히 R:B=7:3의 혼합 LED에서 자란 딸기 과실의 생산량이 높았고 과당과 안토시아닌 함량이 증가하였다. 반면, 청색 LED에서 자란 딸기는 개화를 촉진 시켰고 개화가 진전되면서 수확일이 빨라졌으며 향산화 활성이 높았다.

참외 육묘시 광도를 $200 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 으로 적청색 혼합광원(RB3)으로 처리한 것이 묘소질을 양호하게 하였다.

고구마 묘소질은 R:B=7:3의 혼합 LED에서 줄기 신장, 줄기 두께, 잎 수 및 뿌리 발달 등이 양호하여 건묘 육성에 가장 효과적이었고 정식 30일 후 포장 생존율도 가장 높았으나 품종 간 차이는 없었다. 그러나 정식 120일 후 LED 광질은 지상부 생육 특성에 영향을 미치지 않았으나 품종 간에는 차이가 있었다.

국화 삽목 재배시 R:B=9:1의 비율에서 초장 생육이 가장 좋았고 R:W=7:3 비율에서 생체중이 가장 높았다.

장미는 청색광에서 품종과 관계없이 기공 전도도와 세포 간 CO_2 농도가 증가하여도 완전히 확장된 잎의 순 CO_2 동화율을 감소시켰고 엽록소 a/b 비율이 증가하였다. 또한 정단분열조직의 동일한 유기적 활동과 마디 성장, 꽃의 발육을 유도하였다. 이는 또한 청색 파장에 의해 광형태형성 과정이 모두 유

발될 수 있으며, 청색광은 광합성을 통해 충분한 에너지를 공급하여 장미의 정상적인 성장과 발달을 유지할 수 있음을 나타낸다.

단일성 작물인 칼랑코에 일몰 후 청색광 보광처리는 시간에 관계없이 화아수와 개화 수가 억제되었고 일몰 후 4시간의 적색+청색 혼합광 처리는 개화소요일수를 3일 앞당겼으며 색택도 우수하였으나 엽록소 함량에는 영향을 미치지 않았다. 청색광은 안토시아닌 함량을 증가시켰다.

프리지아에 청색광 LED 보광처리는 개화를 촉진 시켰다.

셀비어에서도 청색광은 기공 열림을 조절하고 완전한 광합성을 위해서는 낮은 강도의 청색광이 필요하다. 일반적으로 청색광은 확장성장을 억제하여 청색광이 없이 자란 식물과 비교해서 청색광에서 짧고 작으며 두껍고 짙은 녹색 잎을 갖는다.

양상추같이 일부 잎이 많은 작물은 청색/uv가 항산화제와 비타민 같은 건강에 좋은 화합물 생산을 증가시키고 청색/uv 부재시 토마토류의 일부 식물의 잎, 줄기, 잎자루에서 부풀거나 작은 물집이 발생하는 등의 생리장해를 유발한다. 높은 강도에서 청색광은 장일식물의 개화를 촉진하고 단일식물의 개화를 억제하였다.

‘거봉’ 포도에 야간 조사는 당도, 안토시아닌과, chlorophyll a 함량을 감소시켰으며 이는 과실 성숙에 수반된 현상이라는 점을 고려하면 야간 조사는 광과장에 관계없이 암기를 중단시켜 과실 성숙을 지연시켰다.

차나무 기내배양에 혼합광은 뿌리 생육과 T/R율, 엽록소 함량 증대에 효과적이었다.

적무 새싹 생산 시 암 조건에서 발아시켜 7일간 새싹으로 재배한 후, 수확 전 24시간 동안 청색광 또는 QD-LED 광을 조사하는 것이 안토시아닌 함량을 증가시키고 색 발현과 대장균 살균에 적합하였다.

CAM 식물에 청색광 조사는 C_3 와 C_4 식물과 대조적으로 밤에 기공을 열고 낮의 일부 동안 기공을 닫았다. 이는 CO_2 흡수에 의한 광합성과는 독립적으로 발생한다는 것을 나타낸다. 청색광과 Fusicoccin 둘 다 공변세포 원형질막 H^+ -ATPase의 인산화를 유도했다. 분리된 표피에서 청색광을 단독 처리했을 때는 기공 열림이 없었으나 적색광과 청색광을 혼용하여 처리했을 때는 기공이 열렸다. Tautomycin과 Vanadate를 첨가하고 빛을 조사하였더니 기공 열림이 완전히 억제되었다.

청색광은 H^+ -ATPases의 활성화를 통해 기공 개방을 유도하고 이후 공변세포에 이온이 축적된다. 공변세포 액포 안에 있는 두 개의 H^+ 전달 효소인 H^+ -ATPase와 H^+ -PPase는 H^+ 를 세포질에서 액포로 활발하게 운반하여 액포의 양전하가 증가하기 때문에 K^+ 가 액포 속으로 들어갈 수 없게 되므로 K^+ 를 대체할 수 있는 sucrose에 의해 액포의 삼투압을 증가시킬 수 있고 이로 인해 기공이 열린다. 그러므로 청색광에 의해 유도된 기공 개방은 청색광 자극에 의한 광합성의 영향이 반영될 가능성이 높다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서 원예작물과 기내 묘 및 새싹 묘 재배에 청색광은 작물의 엽록소, 페놀 농도, 항산화도, 플라보노이드 및 안토시아닌, AsA(L-아스코르브산), 무기물 등의 기능적인 물질함량을 높이는데 효과적이었다. 그리고 대부분의 식물은 청색 단일광에 비해 적색 단일광에서 작물의 생육이 양호하였지만 적색광 조명에 낮은 청색광이 조사되었을 때 식물의 성장과 광합성에 더 효과적이라는 공통점을 찾을 수 있었다.

청색광은 일반적으로 기공 열림을 촉진한다고 알려져 있지만 CAM 식물에서는 청색광 단독 처리에 의해서는 기공이 열리지 않는 것으로 보아 청색광은 적색광과 같이 조사되었을 때 최대의 시너지효과를 얻을 수 있는 것 같다. 그리고 줄기와 열매를 수확하는 작물에서는 청색광의 비율이 적색광의 비율보다 적어야 한다.

작물의 최적 광 환경 조건은 작물의 종류에 따라서도 다소 차이가 있고 같은 작물이라도 품종에 따라 반응하는 특성에 차이가 있으며 같은 작물 같은 품종에서도 생육단계에 따라 다른 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 같은 작물이라 하더라도 생산물의 목적에 맞게 광 조명 시기와 적색과 청색광의 혼합 비율을 조절하여야만 질 높은 생산물을 다량 수확할 수 있을 것이다.

포도의 경우는 야간 조사가 성숙 지연을 초래하는 것으로 보아 무분별한 인공광 조사는 작물 재배 시 주의를 요하며 인공광은 열매채소의 수확이나 화훼류의 개화 후 장기 처리에서는 지속적인 효과가 없었기 때문에 중단하는 것이 경제적으로 유리할 것이다.

묘소질은 열매채소의 수확시기와 수확량에 영향을 미치기 때문에 작물 유통
때의 광 처리는 묘소질을 양호하게 하기 위한 최적의 광 조절 시기라고 판단
된다.

광조사가 다른 환경 조건과의 상관관계에 관한 연구는 아직 부족하기 때문
에 앞으로 이에 관한 연구가 더 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 김소희 · 허유 · 황령환 · 박영훈 · 최영환 · 서정민 · 강점순(2014), “LED 광질이 칼랑코예의 생육과 개화에 미치는 영향,” *Journal of Environmental Science International*, 23(9), 1573-1581.
- 김준혁 · 박요섭 · 권용희 · 정명희 · 박희승(2017), “과장별 야간 조사에 따른 ‘거봉’ 포도의 품질 및 생산량,” *원예과학기술지*, 35(2), 170-177.
- 김진아 · 이연희 · 홍준기 · 홍성창 · 이수인 · 최수길 · 문이슬 · 구본성(2013), “LED 광원의 다양한 광질이 배추 유묘의 유전자 발현에 미치는 영향,” *원예과학기술지*, 31(5), 607-616.
- 손기호 · 박준형 · 김대일 · 오영민(2012), “단색 발광다이오드에서 자란 측면 상추 두 품종의 엽형, 생장 및 기능성 물질,” *원예과학기술지*, 30(6), 664-672.
- 손기호 · 송민정 · 오영민(2016), “혼합 발광다이오드와 형광등에서 자란 적치마 상추의 생육 및 광 이용 효율 비교,” *시설원예식물공장*, Vol. 25, NO. 3, 139-145.
- 손기호 · 김은영 · 오영민(2018), “다양한 조합의 적색과 청색 혼합 LED광에서 자란 방울토마토 묘의 생육과 정식 후 수확량 및 품질,” *시설원예식물공장*, Vol. 27, No. 1, 54-63.
- 유경란 · 이승엽(2017), “LED가 고구마 바이러스 무병묘의 기내 생장에 미치는 영향,” *원예과학기술지*, 35(4), 490-498.

- 이나라 · 이승엽(2014), “LED 광질에 따른 고구마의 묘소질 및 괴근 수량성,” 시설원예식물공장, Vol. 23, No. 4, 356-363.
- 이명옥 · 박상민 · 조은경 · 안진희 · 최은영(2018), “발광다이오드 광원에 따른 시금치 생육, 엽 형태형성 및 세포길이 변화,” 시설원예식물공장, Vol. 27, No. 3, 222-230.
- 이재수 · 이혜인 · 김용현(2012), “발광다이오드, 형광등 및 자연광 하에서 육묘된 파프리카의 묘소질 및 정식 후 초기 수량,” 생물환경조절학회지, 21(3), 220-227.
- 이지은 · 신용습 · 도한우 · 정종도 · 강영화(2016), “LED 광원과 광도에 따른 참외의 묘소질 및 정식 후 생육 변화,” 시설원예식물공장, Vol. 25, No. 4, 294-301.
- 이진재 · 황지혜(2014), “LED를 이용한 장일 처리가 프리지아(*Freesia hybrida*) ‘이븐느’의 생육 및 개화에 미치는 영향,” Kor. J. Hort. Sci. Technol. 32(6), 794-802.
- 임재운 · 윤용철 · 서광욱 · 김규형 · 문애경 · 김현태(2013), “LED광 파장이 국화생육에 미치는 영향,” 시설원예식물공장, Vol. 22, No. 1, 49-54.
- 임현정 · 나채선 · 송치현 · 원창오 · 송기선 · 황정규 · 김도현 · 김상근 · 김현철(2019), “LED 광질이 차나무 기내배양묘의 생육 및 광합성에 미치는 영향,” Journal of Agriculture & Life Science, 53(6), 13-21.
- 최만권 · 백경운 · 권순주 · 윤용철 · 김현태(2014), “LED광 파장이 상추생육과 비타민 C 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향,” 시설원예식물공장, Vol. 23, No. 1, 19-25.

- 최인이 · 원재희 · 정현진 · 강호민(2009), “적색 및 청색 LED광과 UVa광 처리가 착색단고추 과실의 착색에 미치는 영향.” *생물환경조절학회지*, 18(4), 431-435.
- 최인이 · 왕립 · 이주환 · 한수정 · 고영욱 · 김용득 · 강호민(2019), “LED와 QD-LED(Quantum Dot) 광처리가 적무 새싹의 생산과 품질에 미치는 영향,” *시설원예식물공장*, Vol. 28, No. 3, 265-272.
- 최효길 · 권준국 · 문병용 · 강남준 · 박경섭 · 조명환 · 김영철(2013), “과장별 LED광이 딸기의 생장 특성과 생리 활성 물질 형성에 미치는 효과,” *원예과학기술지*, 31(1), 56-64.
- Taiz, L. · E. Zeiger(전방욱 · 문병용 옮김)(2013), *식물생리학*, 5판, 서울, 라이프사이언스, 501-520.

2. 외국문헌

- Abidi, F., T. Girault, O. Douillet, G. Guillemain, G. Sintès, M. Laffaire, H. Ben Ahmed, S. Smiti, L. Huché-Thélier, N. Leduc(2012), “Blue Light Effects on Rose Photosynthesis and Photomorphogenesis,” *Plant Biology* ISSN 1435-8603.
- Azad, O. K., I. J. Chun, J. I. Jeong, S. T. Kwon, J. M. Hwang(2011), “Response of the Growth Characteristics and Phytochemical Contents of Pepper(*Capsicum annuum* L.) Seedlings with Supplemental LED Light in Glass House,” *Journal of Bio-Environment Control*, 20(3), 182-188.

- Chen, X. L., L. C. Wang, T. Li, Q. C. Yang, W. Z. Guo(2019), "Sugar Accumulation and Growth of Lettuce Exposed to Different Lighting Modes of Red and Blue LED Light," *Scientific Reports*, 9:6926.
- Erik, R.(2017), "Effects of Blue Light on Plants," *GPNMAG.COM*, 38.
- Gotoh, E., K. Oiawamoto, S. I. Inoue, K. I. Shimazaki, M. Doi(2019), "Stomatal Response to Blue Light in Crassulacean Acid Metabolism Plants *Kalanchoe pinnata* and *Kalanchoe daigremontiana*," *Journal of Experimental Botany*, Vol. 70, No. 4, 1367–1374.
- Hamdani, S., N. Khan, S. Perveen, M. Qu, J. Jiang, G. Jee, X. G. Zhu(2019), "Changes in the Photosynthesis Properties and Photoprotection Capacity in Rice(*Oryza sativa*)Grown under Red, Blue, or White Light," *Photosynthesis Research* 139:107–121.
- He, J., L. Qin, E. L. C. Chong, T. W. Choong, S. K. Lee(2017), "Plant Growth and Photosynthetic of *Mesembrythemum cytstallinum* Grown Aeroponically under Different Blue-and Red-LEDs," *frontiers in Plant Science*, Vol.8, Doi: 10.3389.
- Hiyama, A., A. Takemiya, S. Munemasa, E. Okuma, N. Sugiyama, Y. Tada, Y. Murata, K. I. Shimazaki(2017), "Blue Light and CO₂ Signal Converge to Regulate Light-Induced Stomatal Opening," *nature communications*, Doi: 10.1038.
- Kang, C. H., E. K. Yoon, M. Muthusamy, J. A. Kim, M. J. Jeong, S. I. Lee (2019), "Blue LED Light Irradiation Enhances L-Ascorbic Acid

- Content while Reducing Reactive Oxygen Species Accumulation in Chinese Cabbage Seedlings,” *Scientia Horticulturae* 261, 108924.
- Lee, J. S.(2021), “The Stomatal Openings Occurred from Blue Light Photo-receptors Mediated Signal Transduction Pathway May be Enhanced by a Blue Light Stimulated Photosynthesis,” *Russian Journal of Plant Physiology*, 68, 818–827.
- Ouzounis, T., B. R. Parjikolaei, X. Fretté, E. Rosenqvist, C. O. Ottosen(2015), “Predawn and High Intensity Application of Supplemental Blue Light Decreases the Quantum Yield of PSII and Enhances the Amount of Phenolic Acids, Flavonoids, and Pigments in *Lactuca sativa*,” *Frontiers in Plant Science*. Vol 6, Doi: 10.3389.
- Samuolienė, G., A. Brazaitytė, A. Urbonavičiūtė, G. Šabajevienė, P. Duchovskis(2010), “The Effect of Red and Blue Light Component on the Growth and Development of Frigo Strawberries,” *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 97, No. 2, 99–104.
- Shin, Y. S., M. J. Lee, E. S. Lee, J. H. Ahn, M. K. Kim, J. E. Lee, H. W. Do, J. D. Cheung, J. U. Park, Y. G. Um, S. D. Park, J. H. Chae(2014), “Effect of Light Emitting Diodes Treatment on Growth and Quality of Lettuce(*Lactuca sativa* L. ‘Oak Leaf’),” *Journal of Life Science* Vol. 24, No. 2, 148–153.
- Suetsugu, N., T. Takami, Y. Ebisu, H. Watanabe, C. Liboshi, M. Doi, K. I. Shimazaki(2014), “Guard Cell Chloroplasts Are Essential for Blue

Light-Dependent Stomatal Opening in Arabidopsis,” PLOS ONE, 9(9), e108374, Doi: 10.1371.

Takemiya, A., S. I. Inoue, M. Doi, T. Kinoshita, K. I. Shimazaki(2005), “Phototropins Promote Plant Growth in Response to Blue Light in Low Light Environments,” *The Plant Cell*, Vol. 17, 1120-1127.

Yoshida, H., D. Mizuta, N. Fukuda, S. Hikosaka, E. Goto(2016), “Effect of Varying Light Quality from Single-Peak Blue and Red Light-Emitting Diodes During Nursery Period on Flowering, Photosynthesis, Growth, and Fruit Yield of Everbearing Strawberry,” *Plant Biotechnology* 33, 267-276.

3. 기타

미시간 주립대학교, <https://www.canr.msu.edu/>

감사의 글

이 연구에 도움을 주신 이준상 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.