

태양광 파장 유사 조합광과 원적색광이 추가된 고압나트륨등 하에서의 오이의 생육과 광형태형성

강우현^{1†} · 김재우^{1†} · 손정익^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원

Growth and Photomorphogenesis of Cucumber Plants under Artificial Solar and High Pressure Sodium Lamp with Additional Far-red Light

Woo Hyun Kang^{1†}, Jae Woo Kim^{1†}, and Jung Eek Son^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Abstract. Plant growth and morphology are affected by light environments. The morphogenesis and growth of the plants growing in plant factories are different from those grown under sunlight due to the effect of far-red light included in sunlight. The objective of this study was to compare the morphogenesis and growth of cucumber plants grown under artificial sunlight, high pressure sodium lamp (HPS), and HPS with additional far-red light (HPS+FR). The artificial solar (AS) with a spectrum similar to sunlight was manufactured using sulfur plasma lamp, incandescent lamp, and green-reducing optical film. HPS was used as a conventional electrical light source and far-red LEDs were added for HPS+FR. The optical properties of each light source was analyzed. The morphogenesis, growth, and photosynthetic rate were compared in each light source. The ratio of red to far-red lights and phytochrome photostationary state were similar in AS and HPS+FR. There were significant differences in morphology and growth between HPS and HPS+FR, but there were no significant differences between AS and HPS+FR. SPAD was highest in HPS, while photosynthetic rate was higher at AS and HPS. Although the photosynthetic rate in HPS+FR was lower than HPS, the growth was similar in AS. It was because canopy light interception was increased by longer petioles and larger leaf areas induced by FR. It is confirmed that the electrical light with additional far-red light induces similar photomorphogenesis and growth in sunlight spectrum. From the results, we expect that similar results will be obtained by adding far-red light to electrical light sources in plant factories.

Additional key words : leaf area, photosynthesis, phytochrome photostationary state, plant factory

서 론

식물공장은 노지나 온실과 달리 인공광원을 이용하여 광도, 광질 및 광주기 등을 용이하게 제어하기 때문에, 특정 광 환경에서 식물의 반응을 확인할 수 있다(Massa 등, 2008; Hernández와 Kubota, 2016). 기존의 식물공장에서는 효율성을 고려한 연구들에서는 주로 광합성에 관여하는 청색(400-500nm)과 녹색(500-600nm) 및 적색(600-700nm) 영역의 파장에 대한 연구가 주로 수행되었다(Matsuda 등, 2007; Terushima 등, 2009). 그러나 일반적으로 식물이 노출되는 태양광에는 원적색광(700-800nm)이

포함되어 있으며 원적색광은 적색광과 함께 피토크롬의 활성을 통한 식물의 발생과 생장 및 발달에 관여하는 것으로 알려져 있다. 원적색광은 줄기와 엽병의 길이 조절을 통한 음지회피 반응을 유도하고(Franklin, 2008), 엽면적을 증가시켰다(Casal 등, 1985; Skinner와 Simmons, 1993). 또한 광합성 속도에 영향을 미쳤으며(Barreiro 등, 1992; Zhen와 van Iersel, 2017), 단위 면적 당 엽록소 함량을 감소시켰다(Heraut-Bron 등, 2000).

그러나 식물공장에서 이용되는 형광등이나 LED와 같은 대부분의 인공광원에는 조명으로써 효율이 떨어지는 원적색광이 포함되어있지 않다. 최근에는 위와 같은 원적색광의 중요성을 고려하여 식물공장에서 추가적인 원적색광에 대한 식물의 반응에 관한 연구들이 진행되고 있다. 적색과 청색 LED에 원적색광을 추가하였을 때 공통적으로 엽면적, 초장, 지상부 생육이 증가하였으며, 잎의 엽록소

†These authors contributed equally to this work

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr

Received December 31, 2018; Revised January 15, 2019;

Accepted January 18, 2019

합량이 감소하였다(Lee 등, 2016). 또한 적색과 원적색의 비율에 따라 엽채류의 이차대사산물 생성에 차이가 발생하였으며(Bae 등, 2017), 작물의 종류에 따라 개화시기와 화아 분화에 영향을 미쳤다(Park와 Runkle, 2017).

한편 태양광과 인공광원에서 각각 식물을 재배하였을 때 광질의 차이에 의한 식물의 형태형성 및 생육의 차이를 비교하기 위한 연구가 진행되었다. 식물공장에서 형광등과 고압나트륨등으로 재배된 오이의 생육과 형태가 태양광의 파장에서 재배된 작물과 비교하였을 때 태양광의 파장에서 재배된 오이의 형태형성이 수광에 유리한 방향으로 진행되었고, 생육에 유의미한 영향을 준 것으로 보고되었다(Hogewoning 등, 2010b). 저자는 태양광의 파장에 포함되어있는 원적색광에 의한 효과라고 언급하였지만 이를 확인하기 위한 추가적인 연구는 진행되지 않았다. 앞서 언급한 원적색광에 의한 식물의 형태적 특성은 태양광의 파장에서 나타나는 형태적 특성과 유사한 것으로 보이며, 온실에서 진행된 보광에 관한 선행 연구에서 원적색광이 추가된 광원과 태양광 파장 유사 조합광에서의 식물의 형태형성과 생육이 유사하였다(Hogewoning 등, 2012). 이를 근거로 태양광에서 나타나는 엽병의 길이와 엽면적 증가 등 수광에 유리한 형태적 특성은 원적색광에 의한 영향이 크며 인공광원에 원적색광을 추가함으로써 태양광 아래서와 유사한 형태형성과 생육을 유도할 수 있을 것이라고 판단되었다. 이러한 가정을 검증하기 위해 태양광 파장 유사 조합광, 고압나트륨등 및 원적색광 추가 고압나트륨등의 광학적 특성 분석에 따른 작물의 광형태형성과 생육 반응의 비교가 필요하다.

본 연구의 목적은 원적색광 영역이 부재한 기존의 인공광원에 태양광과 정량적으로 같은 원적색광을 추가함으로써 오이의 형태형성과 광합성 속도를 태양광 하에서 재배된 것과 유사하게 유도할 수 있음을 확인하는 것이다.

재료 및 방법

1. 공시작물 및 재배조건

서울대학교의 식물공장 모듈에서 오이(*Cucumis sativus* cv. Joenbaekdadaki)를 재배하여 실험을 진행하였다. 오이 종자는 스펀지 배지에 파종하였고 비순환식 담액수경 재배방식으로 3주간 육묘를 진행하였다. Hoagland 배양액을 이용하였고 육묘과정에서 첫 2주간은 양액을 투입하지 않았으며 이후 1주는 양액의 농도를 $0.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 으로 유지하였다. 육묘에는 적색, 청색, 녹색 LED의 혼합 광원(R42180, 625nm; B42180, 465nm; G42180, 525nm; Seoul Semiconductor Co., Ansan, Korea)을 이용하였고 광합성유효광양자속밀도(Photosynthetic

photon flux density, PPF)는 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지하였다. 식물공장 내부의 상대습도는 50-60%로 유지하였고 CO_2 농도는 $400\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 유지하였다. 주간 온도와 야간 온도는 각각 24°C 와 16°C 로 유지하였고 명기와 암기는 각각 16과 8시간으로 설정하였다.

육묘가 끝난 후 서로 다른 3개의 광 환경에 각각 3주씩 총 9주의 오이를 정식하였다. 정식 후 16일간 재배하였고 재배기간 동안 양액의 전기전도도는 $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 유지하였다. 광 환경과 양액의 농도를 제외한 다른 모든 생장 환경은 육묘과정과 동일하게 유지하였다.

2. 광 처리

정식 이후 인공광원에 태양광과 같은 수준의 원적색광을 추가하였을 때 태양광 아래에서 재배된 작물의 형태와 생육, 생리적 반응을 비교하기 위해 서로 다른 3가지 광 조건에서 실험을 진행하였다. 태양광의 파장은 시간과 계절, 위치 등에 따라 변화하기 때문에 인공광원과 같은 조건에서 실험을 진행하기 위해서는 태양광의 파장과 광도를 일정하게 유지할 필요가 있다. 따라서 태양광 파장 유사 조합광(artificial solar, AS)을 미국재료시험협회의 표준 태양 파장(ASTM G173-03)을 참조하여 Hogewoning 등(2010b)의 방법을 참고로 1000W 황 플라즈마 광원(G3, LG electronics Inc, Seoul, Korea)과 200W 백열등(Shandong Ever Lighting Electric Appliances, Shandong, China), 그리고 녹색 광 차단 필름(Gamcolor filter 1581, Los Angeles, CA, USA)을 이용하여 제작하였다. 인공광원에서 원적색광(FR, 700-800nm)의 유무에 따른 식물체의 광형태형성과 생육을 비교하기 위하여 고압나트륨등(HPS; 400 W SON-T agro 400, Philips Lighting, Eindhoven, The Netherlands)과 HPS에 FR LED (JDR-IR730-30 W, 730nm, Jiaderui, Shenzhen, China)를 추가로 설치한 조합 광원(HPS+FR)을 이용하였다.

각 광원에서 발생하는 열이 오이의 형태와 생육에 미치는 영향을 감소시키고 광원의 배광 특성에 의한 영향을 줄이기 위하여 산란 유리(DAGlass 301, DAGlass, Głogów Małopolski, Poland)를 재배상과 광원 사이에 설치하였다(Kang 등, 2016). 2주의 재배기간 동안 모든 광 환경의 재배상에서 PPF)는 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지하였으며, 원적색광의 광량자속(Photon flux density, PFD)은 $60\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지하였다. 또한 광 환경이 엽온에 미치는 영향을 확인하기 위하여 적외선 온도계(FLIR i7, FLIR Systems, Danderyd, Sweden)를 사용하여 엽온을 측정하였다.

3. 광 스펙트럼 특성 분석

각각의 광 환경에서 광질을 비교 및 분석하기 위해 분

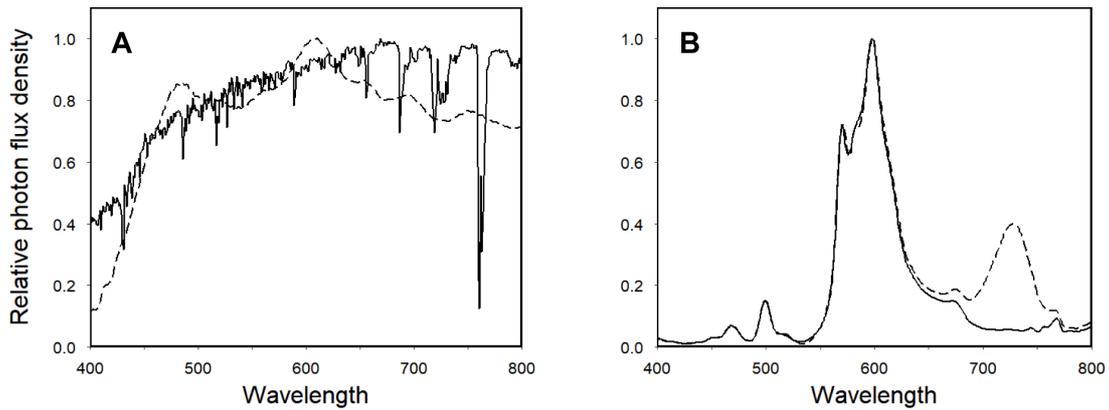


Fig. 1. Standard solar spectrum (solid line, ASTM G173-03, A), and relative spectra of artificial solar (dot line, A), high pressure sodium lamp (HPS, solid line, B), and HPS with far-red LED (dot line, B).

Table 1. The spectral composition of photon flux density, red:far-red ratio (R/FR), and phytochrome photostationary state (PSS) of the artificial solar (AS), high-pressure sodium lamp (HPS), and HPS with far-red LED (HPS+FR).

Light source	Spectral composition (%)				R/FR	PSS
	Blue (400-500 nm)	Green (500-600 nm)	Red (600-700 nm)	Far-red (700-800 nm)		
AS	18	28	29	25	1.17	0.73
HPS	5	45	40	8	4.65	0.85
HPS+FR	4	35	36	23	1.55	0.74

광기(BLUE-Wave Miniature Spectrometer, StellarNet Inc., Tampa, FL, USA)를 통해 광원의 파장을 측정하였으며, 400-800nm 범위의 상대적인 PFD 값을 그래프에 나타내었다(Fig. 1). 이를 근거로 각 광환경의 특징을 분석하기 위해 PPFD 범위에서 청색과 녹색, 적색 영역이 차지하는 비율과 적색과 원적색 영역 파장의 PFD 비율, 그리고 피토크롬의 광평형상태값 (Phytochrome photostationary state, PSS)을 계산하였다(Table 1). PSS 값은 Sager 등(1988)의 방법에 따라 각 광원의 PFD와 PCC (Photochemical cross section)를 이용하여 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$PSS = \frac{\sum_{300}^{800} N_{\lambda} \sigma_{r_{\lambda}}}{\sum_{300}^{800} N_{\lambda} \sigma_{r_{\lambda}} + \sum_{300}^{800} N_{\lambda} \sigma_{fr_{\lambda}}} \quad (1)$$

식 (1)에서 N_{λ} 는 각 광원의 파장 별 PFD 이고 $\sigma_{r_{\lambda}}$, $\sigma_{fr_{\lambda}}$ 는 각각 P_r 과 P_{fr} 의 PCC 값이다.

4. 광합성, SPAD, 형태 및 생육 측정

정식 16일차 잎의 광합성 속도를 엽 광합성 측정기 (LI-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)를 이용하여 측정하였다. 엽 광합성 속도는 각 광환경에서 재배된 오이 식물체의 두 번째 잎에서 Clear-top 챔버를 이용하여 측정하였다. SPAD 값은 chlorophyll meter(SPAD-502,

Konica Minolta Sensing, INC, Japan)를 이용하여 측정하였다. 각 식물체에서 서로 다른 5개의 지점에서 측정이 가능한 크기의 잎을 대상으로 측정하였으며, 각 잎의 5개 지점에서 측정한 값들의 평균을 이용하였다.

재배기간이 끝난 후 재배된 모든 식물체의 형태와 생육을 측정하였다. 각 오이 형태를 비교하기 위해 정면과 수직방향에서 사진을 촬영하였다. 각 식물체는 잎과 엽병, 줄기, 뿌리, 그리고 그 외의 나머지 부분으로 분리되었고, 뿌리를 제외한 각 기관별 면적과 길이는 이미지 분석 프로그램인 ImageJ v1.50 (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA)를 통해 계산되었다. 잎의 개수는 각 식물체에서 면적이 10cm² 보다 큰 잎들을 대상으로 하여 측정하였다. 생육 조사 후 식물체 기관별로 65°C에서 3주간 건조된 중량을 측정하였다.

5. 통계분석

식물체의 형태와 생육, 광합성 속도, SPAD의 측정이 끝난 후 각 측정값들의 차이에 유의성이 존재하는지 알아 보기 위한 통계처리를 실시하였다. 통계 분석은 분산 분석과 던컨의 다중검정($\alpha < 0.05$)을 실시하였고 통계처리에는 R 3.3.1(R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 광 스펙트럼 특성

제작된 AS의 파장은 태양광의 파장과 매우 유사한 형태를 보였으며 400-800nm의 파장 범위에서 PFD가 연속적으로 존재하였다(Fig. 1A). 반면 HPS의 파장은 400-550nm 범위에서 PFD가 상대적으로 낮았고 550-700nm 사이에 집중되었다(Fig. 1B). HPS+FR의 파장은 700nm 이전으로 HPS와 동일하였으며, FR LED의 추가로 730nm 부근에서 정점이 나타났다(Fig. 1B).

각 광원의 청색, 녹색, 적색의 PFD 비율을 분석한 결과, AS의 청색 비율이 24%로 가장 높았으며 HPS와 HPS+FR의 청색 비율은 5%로 AS의 0.2배 수준으로 확인되었다. 녹색과 적색 영역의 PFD 비율은 HPS+FR과 HPS가 AS에 비해 높았으나 녹색과 적색의 비율은 세 광원에서 모두 약 1:1로 나타났다(Table 1). 하지만 광도가 600nm 부근에서 높게 형성되는 HPS의 특성상 HPS+FR과 HPS의 녹색과 적색 영역의 PFD는 550-650nm에서 집중적으로 나타난 반면 AS의 녹색과 적색 영역의 PFD는 500-700nm에 고르게 분포하였다(Fig. 1).

각 광원의 원적색광에 대한 적색광의 PFD의 비율(R/FR)을 계산한 결과, AS에서 가장 작았고, HPS+FR과 HPS는 각각 AS에 비해 약 1.3과 4배 더 크게 나타났다(Table 1). AS와 HPS+FR은 원적색광 범위에서 같은 PFD를 가지지만 AS의 적색 비율이 HPS+FR에서 보다 낮기 때문에 R/FR은 더 크게 나타났다. PSS 값은 AS와 HPS+FR가 거의 유사하였고 HPS는 앞의 두 광원에 비

해 약 1.2배 더 큰 값을 가졌다(Table 1). PSS는 파이트 크롬의 활성화 상태에 따른 파장 별 흡수율을 통해 계산되기 때문에 R/FR 값에 비해 AS와 HPS+FR 간에 차이가 거의 없었다.

각 광 환경에서 엽온을 측정한 결과 AS에서 유의하게 높았으며, HPS와 HPS+FR 간에 유의한 차이는 보이지 않았다(Table 2). AS에서 상대적으로 높은 엽온은 황 플라즈마 램프와 백열등에 포함된 열선 영역의 파장에 의한 것으로 추측되며 HPS와 HPS+FR을 비교하였을 때 추가적인 FR LED에 의한 엽온의 상승은 없었다.

2. 식물의 형태 형성과 생육

AS와 HPS+FR에서 재배한 오이의 형태를 비교하기 위해 작물의 정면과 상부에서 촬영된 사진을 통해 HPS에서 재배된 오이와 비교하였을 때, AS와 HPS+FR에서의 줄기와 엽병의 길이가 상대적으로 더 길고, 엽면적이 더 넓은 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2). AS와 HPS+FR에서 재배된 식물체 각 기관의 넓이와 길이를 비교하였을 때, 엽면적과 엽병 길이는 HPS+FR 처리구에서 높게 나타났고 줄기의 길이와 식물체 높이는 AS 처리구에서

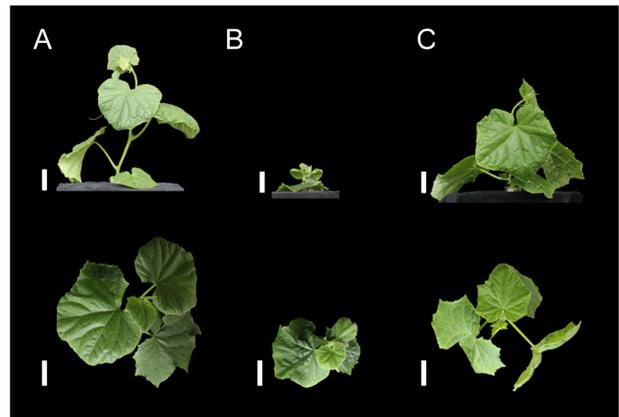


Fig. 2. *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS, A), high-pressure sodium lamp (HPS, B), and HPS with far-red LED (C). Refer to Fig. 1 for detail spectra of the light sources. The images on the top and the bottom were taken from the front and the upside, respectively.

Table 2. The leaf temperature of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS), high-pressure sodium (HPS), and HPS with far-red LED (HPS+FR).

Light source	Leaf temperature (°C)
AS	28.14a ²
HPS	23.64b
HPS+FR	24.32b

²Means with the same letter are not significantly different according to Duncan's new multiple range test at $\alpha < 0.05$ (n = 5).

Table 3. The area and length of organs and the number of leaves of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS), high-pressure sodium (HPS), and HPS with far-red LED (HPS+FR).

Light source	Leaf1 ² (cm ²)	Leaf2 (cm ²)	Leaf3 (cm ²)	Total leaf (m ²)	Stem (cm)	Petiole (cm)	Plant height (cm)	Number of leaves
AS	86.03a ²	170.77ab	209.94a	595.81a	23.16a	8.19a	20.77a	4.7a
HPS	74.68a	66.32b	17.35b	190.38b	4.80b	2.15b	7.07b	3.3b
HPS+FR	79.64a	245.44a	299.07a	773.73a	18.25a	8.87a	18.40a	4.7a

²Occurrence order of leaves.

³Means with the same letter are not significantly different according to Duncan's new multiple range test at $\alpha < 0.05$ (n = 3).

Table 4. The dry weight (mg) of organs of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS), high-pressure sodium (HPS), and HPS with far-red LED (HPS+FR).

Light source	Leaf 1 ²	Leaf 2	Leaf 3	Total leaf	Stem	Petiole	Root	Rema-inder	Total plant
AS	223a ³	617.7a	754a	2140.7a	299.3a	160.7a	466.5a	43a	3110.2a
HPS	373.3a	166.3b	59.3b	710b	38.7b	23.3b	184.5b	9.3a	965.9b
HPS+FR	274.3a	751a	916a	2364a	221ab	193.3a	423.2ab	35.3a	3236.9a

²Occurrence order of leaves.

³Means with the same letter are not significantly different according to Duncan's new multiple range test at $\alpha < 0.05$ (n = 3).

더 높게 나타났으나 유의미한 차이는 없었다(Table 3). HPS에서의 엽면적과 줄기 및 엽병의 길이, 잎의 총 개수는 AS와 HPS+FR에서와 비교하였을 때 모두 유의하게 작은 것을 확인할 수 있었다. 각 기관별 건물중을 측정하였을 때에도 AS에서 재배된 오이의 엽 및 엽병의 건물중은 HPS에서 재배된 오이와 비교하였을 때 유의하게 높았으며 HPS+FR와는 엽, 줄기, 엽병, 뿌리 등 모든 기관에서 유의미한 차이가 나타나지 않았다(Table 4).

AS와 HPS+FR의 파장은 큰 차이가 있었지만(Fig. 1), 작물의 형태와 생육은 큰 차이를 보이지 않았다. 반면 HPS+FR과 HPS의 파장은 일부 적색과 원적색광 영역을 제외하고 거의 일치하지만 형태형성과 생육 면에서 큰 차이가 나타났(Fig. 2). 작물은 HPS 하에서 굉장히 작은 크기를 나타냈으며, 형태형성 적인 특징에서도 같은 엽면적에서 엽병장의 길이가 짧아져 엽면적 대비 엽병장의 비율이 AS 및 HPS+FR 대비 유의하게 높음을 확인할 수 있다(Fig. 3).

엽면적에 대한 엽병장의 비율 분포를 분석하였을 경우, 엽면적이 작은 잎의 발달 초기에는 비율이 유사한 값을 나타냈으나 엽면적이 증가할수록 형태형성적 차이가 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4). 또한 재식 및 광 처리 이전에 발생한 첫 번째 잎과 재식 이후에 발생한 두 번째 잎 및 세 번째 잎의 면적을 비교하였을 때, 첫 번째 잎은 처리군 간에 유의한 엽면적 차이를 보이지 않았지만, 두 번째 잎과 세 번째 잎의 면적은 AS와 HPS+FR에서 유의하게 크게 나타났다. 이는 건물중에서도 같은 결과를 나타내어, 첫 번째 잎 간에는 유의한 차이가 발견되지 않았지만, 각각의 광 처리군으로 재식한 이후 발생한 두번째와 세번째 잎의 건물중은 HPS에서 유의하게 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Table 4).

이는 AS 및 HPS로 재배된 오이의 생육을 비교하여 AS에서 재배된 오이의 엽면적과 엽병장, 건물중이 HPS 대비 유의하게 높았음을 보고한 Hogewoning 등(2010b)의 선행 연구와 일치하는 결과이다. 이 연구에서는 유의하게 작은 엽면적 및 짧은 엽병장은 작물의 엽 배치에 큰 차이를 주어 작물의 유효 수광면적을 크게 감소시키

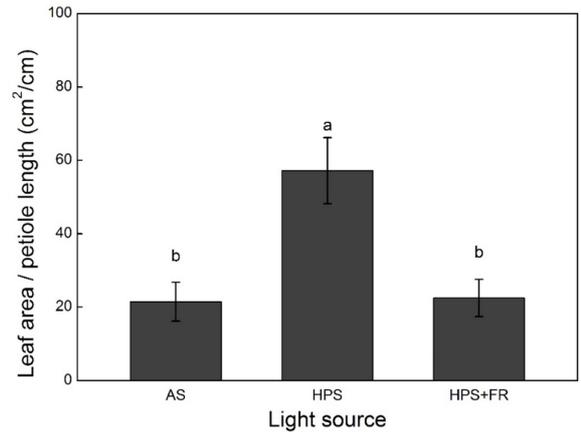


Fig. 3. The ratio between leaf area and petiole length of leaves of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS), high-pressure sodium lamp (HPS), and HPS with far-red LED (HPS+FR). Leaves with leaf area between 50 to 300 cm² were used in the calculation. Letters on the bars indicate mean separation by Duncan's new multiple range test ($\alpha < 0.05$). Means with the same letter are not significantly different.

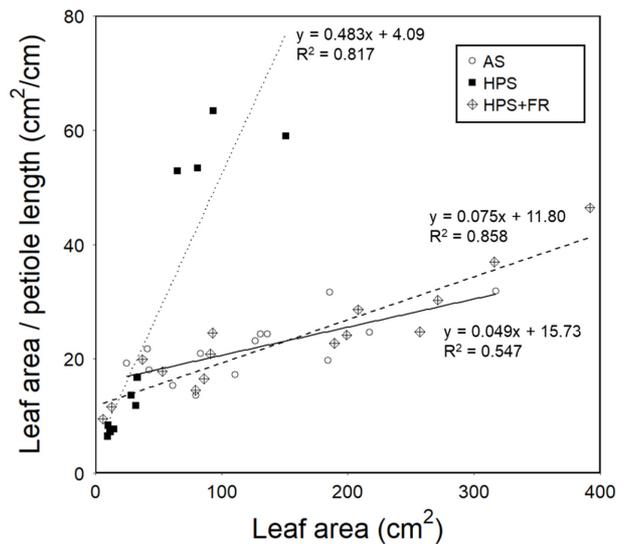


Fig. 4. The relationship between leaf area and petiole length of leaves of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS, solid-line), high-pressure sodium lamp (HPS, dashed-line), and HPS with far-red LED (HPS+FR, dot-line).

며 이로 인해 작물의 수광량이 감소되어 작물의 생산성을 크게 감소시킨 것으로 보고되었다. 이는 HPS가 온실 재배에서 보광 용도로 널리 사용된다는 것을 고려하였을 때 원적색광의 추가를 통해 보광 사용시의 작물 생산성을 향상할 수 있을 것임을 시사한다(Demotes-Mainard 등, 2016; Trouwborst 등, 2010).

본 연구에서는 이러한 AS와 HPS의 차이는 HPS 광원에 원적색광을 추가하여 보완할 수 있으며 이 경우 AS와 유의한 차이가 없는 생육형태가 나타나는 것을 확인하였다. 또한 광원의 파장 형태가 다르더라도 식물의 생육과 형태형성은 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

PSS는 식물의 형태 형성에 관여하는 피토크롬의 활성화 비율을 광원의 파장에 따른 광량지속을 통해 간접적으로 나타낸 값으로, FR이 포함된 AS와 HPS+FR에서 상대적으로 낮은 PSS 값을 보였으며 HPS에서 상대적으로 높았다(Table 1). PSS 값이 낮은 AS와 HPS+FR에서는 HPS에 비하여 공통적으로 줄기와 엽병의 신장이 촉진되었고 엽면적이 증가하였으며, 이는 기존의 연구 결과들과 같은 경향을 보였다(Hogewoning 등, 2012; Park와 Runkle, 2017). 낮은 PSS 값에서 나타나는 엽병의 길이 증가와 엽면적의 증가는 작물의 수광면적을 증가시키며, 이로 인해 AS와 HPS+FR에서 작물 전체의 생육이 높게 나타난 것으로 유추할 수 있다(Hogewoning 등, 2010b). 반면 AS와 HPS+FR는 유사한 PSS로 인해 피토크롬을 통한 광형태형성의 차이가 나타나지 않았고, 생육에 큰 차이가 나타나지 않은 것으로 보인다.

3. SPAD와 광합성 속도

본 실험에서는 처리에 따른 오이 잎의 엽록소 함량을 비교하기 위하여 SPAD 값을 측정하여 상대적인 엽록소 함량의 척도로 이용하였다. 각 처리군에서 재배된 작물의 SPAD 값을 비교하였을 때 AS와 HPS+FR에서 재배된 오이들 간에는 유의차가 없었지만, HPS에서의 SPAD는 다른 처리군에 비해 유의하게 높은 값을 가졌다(Fig. 5). 낮은 R/FR 값을 가진 광원에서 재배된 식물체의 엽록소 함량과 SPAD 값이 감소하였고(Heraut-Bron 등, 2000; Shibuya 등, 2010), 온실에서 원적색광을 이용하여 보광을 실시하였을 경우 적색광을 이용하였을 때 보다 잎의 엽록소 함량이 상대적으로 감소하였다(Tucker, 1981). 이와 같은 결과는 상대적인 엽록소 함량을 나타내는 SPAD 값이 HPS 처리군에서 높게 나타난 본 실험의 결과와 부합하는 것으로 보인다. 반면 광원의 청색 비율이 높아질수록 잎의 엽록소 함량이 높아지는 것으로 알려져 있는데(Hogewoning 등, 2010a; Hernández와 Kubota, 2016), 본 실험에서는 HPS+FR보다 AS의 청색

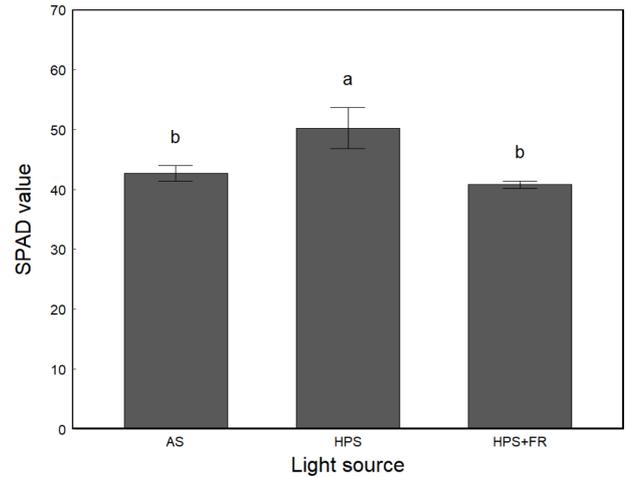


Fig. 5. The leaf SPAD value of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS), high-pressure sodium lamp (HPS), and HPS with far-red LED (HPS+FR). SPAD was measured at five different points on leaves in each light source. Letters on the bars indicate mean separation Duncan's new multiple range test ($\alpha < 0.05$, $n = 3$). Means with the same letter are not significantly different.

광 비율이 약 5배 높음에도 불구하고(Table 1) SPAD 값은 유의한 차이가 발생하지 않았다. 재배 환경에 원적색 영역의 파장이 존재할 때 청색광의 유무에 따른 엽록소 함량의 변화에 관해서는 충분한 논의가 이루어져 있지 않지만, 활성화된 피토크롬에 의해 엽록소의 생합성이 조절된다는 사실이 알려져 있다(Huq 등, 2004). 본 실험에서는 AS와 HPS+FR에서 활성화된 피토크롬의 비율인 PSS 값이 거의 유사한 것으로 확인되었고, 주로 적색과 청색 LED를 이용하였던 이전 연구들과는 다르게 AS의 높은 청색 영역의 비율에도 불구하고 SPAD 값의 유의한 차이가 나타나지 않은 것으로 보인다.

각 처리군 별 광합성 속도 측정 결과, AS와 HPS에서의 엽 광합성 속도는 유의한 차이를 보이지 않았지만, HPS+FR에서 유의하게 낮은 것으로 확인되었다(Fig. 6). 식물의 종과 실험 환경에 따라 원적색광에 의해 광합성 속도가 증가하는 사례와 감소하는 사례가 모두 보고되었고(Barreiro 등, 1992; Heraut-Bron 등, 2000; Bae 등, 2017), 원적색광이 광합성 속도에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 분명하지 않다(Demotes-Mainard 등, 2016). 본 실험의 경우에는 HPS+FR과 HPS의 광합성 속도를 비교하였을 때 추가적인 원적색광에 의해 광합성 속도가 감소한 것으로 확인되었다. 반면 AS 처리군에서는 HPS+FR과 같은 수준의 원적색광이 존재함에도 불구하고 광합성 속도가 HPS+FR에 비해 유의하게 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 재배과정에서 청색광의 비율이 높아질수록 광합성 속도가 증가하는 것으로 알려져 있고

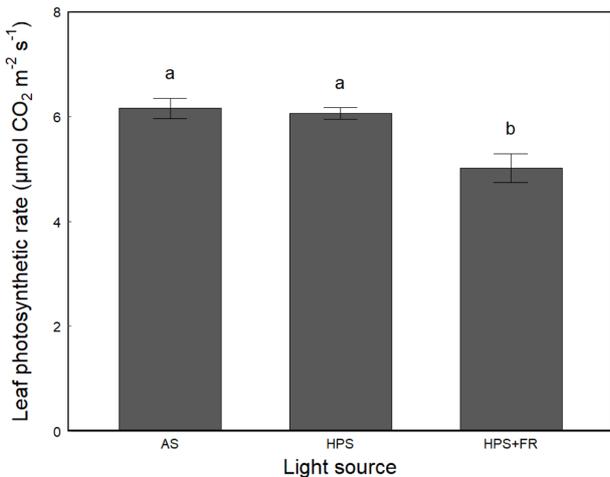


Fig. 6. The leaf photosynthetic rate of *Cucumis sativus* grown under the artificial solar (AS), high-pressure sodium lamp (HPS), HPS with far-red LED (HPS+FR). Leaf photosynthetic rate was measured under the light source with clear top chamber at a photosynthetic photon flux density of 250µmol·m⁻²·s⁻¹. Letters on the bars indicate mean separation by Duncan's new multiple range test ($\alpha < 0.05$, n = 3). Means with the same letter are not significantly different.

(Hogewoning 등, 2010a; Hernández와 Kubota 등, 2016), AS의 청색광 비율이 HPS+FR에 비해 5배 가량 높은 조건에서(Table 1)의 본 실험의 결과 역시 이러한 경향성이 반영된 것으로 보인다. AS에서 재배된 오이의 엽온이 HPS+FR과 HPS에 비하여 약 5°C 가량 높은 것으로 확인되었는데(Table 2), 상대적으로 높은 엽온에 의해 잎의 광합성과 관련된 효소의 활성이 변화하여 광합성 속도가 증가하였을 가능성이 있다고 판단된다(Kobza and Edwards, 1987; Jung 등, 2017).

본 연구를 통해 기존 인공광원에 원적색광을 추가함으로써 오이 식물체의 형태와 생육에 변화가 생기는 것을 확인하였고, 이러한 형태적 변화는 같은 광도 조건의 태양광 하에서 재배된 오이의 형태 형성 및 생육과 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 온실과 식물공장에 인공광원을 이용할 때 광원의 에너지 효율성과 광합성 효율을 고려함과 동시에 원적색광에 의한 각 작물의 광형태형성의 특성을 함께 고려해서 설계할 필요가 있다.

적 요

식물의 생육과 형태는 광 환경에 영향을 받는다. 식물 공장에서 재배되는 작물의 형태형성과 생육은 태양광과 다른 양상을 보이며 이는 태양광에 존재하는 원적색광 영역에 의한 영향으로 유추된다. 본 연구의 목적은 태양

광 파장 유사 조합광(AS), 고압나트륨등(HPS) 및 원적색광을 추가한 고압나트륨등(HPS+FR)에서 재배된 오이의 형태형성과 생육을 비교하는 것이다. AS는 황 플라즈마 광원과 백열등, 녹색 광 차단 필름을 이용하여 제작하였다. 인공광원은 HPS를 이용하였고, 여기에 원적색광 LED를 추가하여 각 광원의 특성 및 식물의 형태형성, 생육 및 광합성 속도를 비교하였다. R/FR 값과 PSS는 AS와 HPS+FR이 유사하였다. 식물의 형태와 생육은 HPS와 HPS+FR 간에는 유의한 차이가 있었지만 AS와 HPS+FR간에는 유의한 차이가 없었다. SPAD는 HPS에서 높았으며 광합성속도는 AS와 HPS에서 높았다. HPS+FR의 광합성 속도는 HPS에 비해 낮았지만 원적색광에 의한 엽면적과 엽병 길이 증가로 인해 수광 면적이 증가하였고, 결과적으로 AS와 유사한 생육이 나타난 것으로 판단되었다. 인공광원에 원적색광을 추가하였을 때 태양광 하에서와 유사한 광형태형성 및 생육이 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터 식물공장에서 기존의 인공광원에 원적색광을 추가하면 동일한 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

추가주제어: 광합성, 식물공장, 엽면적, 피토크롬 광평형 상태

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ012789012018)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Bae, J.H. S.Y. Park, and M.M. Oh. 2017. Supplemental irradiation with far-red light-emitting diodes improves growth and phenolic contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a plant factory with artificial lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 58:357-366.

Barreiro, R., J.J. Guiamét, J. Beltrano, and E.R. Montaldi. 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.

Casal, J.J., V.A. Deregibus, and R.A. Sanchez. 1985. Variations in tiller dynamics and morphology in *Lolium multiflorum* Lam. vegetative and reproductive plants as affected by differences in red/far-red irradiation. *Ann. Bot.* 56:553-559.

Demotes-Mainard, S., T. Péron, A. Corot, J. Bertheloot, J. Le Gourrierc, S. Pelleschi-Travier, L. Crespel, P. Morel, L. Huché-Théliér, and R. Boumaza. 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environ. Exp. Bot.* 121:4-21.

- Franklin K.A. 2008. Shade avoidance. *New Phytol.* 179:930-944.
- Heraut-Bron, V., C. Robin, C. Varlet-Grancher, D. Afif, and A. Guckert. 2000. Light quality (red: far-red ratio): does it affect photosynthetic activity, net CO₂ assimilation, and morphology of young white clover leaves? *Can. J. Bot.* 77:1425-1431.
- Hernández, R. and C. Kubota. 2016. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environ. Exp. Bot.* 121:66-74.
- Hogewoning, S.W., G. Trouwborst, H. Maljaars, H. Poorter, W. van Ieperen, and J. Harbinson. 2010a. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J. Exp. Bot.* 61:3107-3117.
- Hogewoning, S.W., G. Trouwborst, E. Meinen, and W. Van Ieperen. 2012. Finding the optimal growth-light spectrum for greenhouse crops. *Acta Hort.* 956:357-363.
- Hogewoning, S.W., P. Douwstra, G. Trouwborst, W. van Ieperen, and J. Harbinson. 2010b. An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *J. Exp. Bot.* 61:1267-1276.
- Huq, E., B. Al-Sady, M. Hudson, C. Kim, K. Apel, and P.H. Quail. 2004. Phytochrome-interacting factor 1 is a critical bHLH regulator of chlorophyll biosynthesis. *Science* 305:1937-1941.
- Jung, D.H., H.I. Yoon, and J.E. Son. 2017. Development of a three-variable canopy photosynthetic rate Model of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in plant factory modules using light intensity, temperature, and growth stage. *Protected Hort. Plant Fac.* 26:268-275.
- Kang, W.H., F. Zhang, J.W. Lee, and J.E. Son. 2016. Improvement of canopy light distribution, photosynthesis, and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in plant factory conditions by using fitters to diffuse light from LEDs. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 34:84-93.
- Kobza, J. and G.E. Edwards. 1987. Influences of leaf temperature on photosynthetic carbon metabolism in wheat. *Plant Physiol.* 83:69-74.
- Lee, M.J., K.H. Son, and M.M. Oh. 2016. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 57:139-147.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, and C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *Hort-Science* 43:1951-1956.
- Matsuda, R., K. Ohashi-Kaneko, K. Fujiwara, and K. Kurata. 2007. Analysis of the relationship between blue-light photon flux density and the photosynthetic properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves with regard to the acclimation of photosynthesis to growth irradiance. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53:459-465.
- Park, Y. and E.S. Runkle. 2017. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. *Environ. Exp. Bot.* 136:41-49.
- Sager, J.C., W.O. Smith, J.L. Edwards, and K.L. Cyr. 1988. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. *Trans. ASAE.* 31:1882-1889.
- Shibuya, T., R. Endo, Y. Kitamura, Y. Kitaya, and N. Hayashi. 2010. Potential photosynthetic advantages of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings grown under fluorescent lamps with high red: far-red light. *HortScience* 45:553-558.
- Skinner, R.H. and S.R. Simmons. 1993. Modulation of leaf elongation, tiller appearance and tiller senescence in spring barley by far-red light. *Plant Cell Environ.* 16:555-562.
- Terashima, I., T. Fujita, T. Inoue, W.S. Chow, and R. Oguchi. 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiol.* 50:684-697.
- Trouwborst, G., J. Oosterkamp, S.W. Hogewoning, J. Harbinson, and W. van Ieperen. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED?lighting within the canopy. *Physiol. Plant.* 138:289-300.
- Tucker D.J. 1981. Phytochrome regulation of leaf senescence in cucumber and tomato. *Plant Sci. Lett.* 23:103-108
- Zhen, S. and M.W. van Iersel. 2017. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *J. Plant Physiol.* 209:115-122.