

식물공장의 LED 광강도 변화에 따른 식물성장 변화에 관한 연구

홍지완
신라대학교 건축학부

Study on the Plant Growth Variation According to Change of Luminous Flux LED Light in Plant Factory

Ji Wan Hong
Division of Architecture, Silla University

요약 본 연구는 식물공장 요소 기술의 표준화를 위하여 LED 광원의 광강도에 따른 식물의 성장변화와 최적 LED 광강도 범위를 확인하였다. 1400 lx와 1600 lx 영역에서 비교적 안정적인 성장을 확인하였고 광강도 증가에 따라 성장과 둔화가 반복되며 성장을 지속하지만, 잎의 성장이 없으면 웃자라는 현상과 함께 성장은 둔화하는 것이 확인되었다. 400 lx에서 800 lx까지의 성장 특징은 실험 기간 어느 정도 성장이 지속하였지만, 웃자라는 현상은 7일까지 유지되었고, 잎이 성장하지 않아 일간 평균 성장차가 현저히 낮아진다는 것을 확인하였다. 1,000 lx에서 1,400 lx까지의 성장은 광강도가 높아짐에 따라 잎의 성장과 일별 성장이 확인되었고 성장증가와 성장둔화가 반복되는 것이 확인되었다. 1,600 lx와 1,800 lx는 1,400 lx 영역과 유사한 성장을 보였지만, 잎의 성장은 높았다. 그러나 1,800 lx에서는 1,400 lx보다 높은 성장을 보였고, 시간 경과에 따라 성장이 둔화하는 것이 확인되었다. 또한, 광강도가 강할수록 광원으로부터 발산되는 열로 인하여 식물 주변의 온도상승이 수반되어 잎의 열화현상이 발생한다. 이러한 실험 결과를 토대로 식물의 성장에 따른 재배 트레이의 공간설정과 재배용 광원과의 거리 조절이 필요하며, 광원의 최대강도 사용에 따른 재배공간의 능동적인 공기조화 계획이 필요하다.

Abstract The purpose of this study is to change plant growth according to the light quantity of LED light source and to standardize plant factories technology according to the optimal LED light range. Growth was relatively stable at the 1,400 lx and 1,600 lx intensities, and growth continued with increasing light intensity, but growth slowed down with growth without leaves (Ed- I don't understand). The growth characteristics at 400 lx to 800 lx were sustained to some extent during the experimental period, but the growth of the larvae was maintained until the 7th day and the growth of leaves was not developed. From 1,000 lx to 1,400 lx, brightness, leaf growth and daily growth increased, and the growth cycle exhibited a repeating cycle of growth and slowdown. In addition, 1,600 lx and 1,800 lx showed similar growth to that at 1,400 lx, but leaf growth was high. However, at 1,800 lx, the growth was slightly higher than at 1,400lx and it slowed down over time. In addition, the stronger the light, the higher the temperature around the plant and the greater the dryness of the leaves due to the heat emitted from the light source.

Keywords : Architecture Plan, Luminous Flux, Plant Factory, LED Light, Photosynthesis

*Corresponding Author : Ji-Wan Hong(Silla Univ.)

email: scolra@silla.ac.kr

Received October 25, 2019

Accepted March 6, 2020

Revised November 22, 2019

Published March 31, 2020

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

식물공장은 식물성장에 필요한 요소인 빛, 온도, 습도, 이산화탄소, 영양분 등의 광합성 조건을 최적화하여 밀폐된 공간에서 작물을 상시 재배하는 시스템으로 정의하고 있다[1]. 국내 식물공장은 기존 수경재배 및 양액재배 기술에 LED, IoT기술을 결합한 형태로 구미의 ‘수직형 식물공장’과 농업진흥청의 ‘국립과학원 수원 식물공장’, 제주대학교 ‘완전제어형 식물공장’이 대표적이며, 바이오웍스, 미래원, Next A, 만나 CES, 애그로닉스 등의 민간회사가 식물공장 기술발전에 기여하고 있다. 그러나 식물공장의 LED 광원 기술은 식물 광합성에 필요한 기술임에도 불구하고 빛의 세기와 재배트레이 내의 필요 광원 개수, 식물과 광원 간의 거리 등에 관한 기술 표준이 없이 최대 광도에서 사용되고 있다[2]. 이러한 식물공장 기술의 비표준화는 국내 식물공장 기술을 고비용 저효율로 고착시켜 기술발전과 보급을 정체시키고 있다. 따라서, 식물공장의 요소 기술 표준화는 국내외 식물공장 기술의 경제성 확보와 기술보급, 경쟁력 확보에 필요한 부분으로 요구되고 있다[3].

본 연구는 이러한 식물공장 기술의 표준화의 필요성을 토대로 대표적 요소 기술인 LED의 광강도에 따른 성장 변화를 실험을 통하여 식물공장의 LED 광강도 범위와 그 특징에 기초한 식물공장 기술 표준화를 목적으로 하고 있다.

1.2 선행연구

국내외의 식물공장에 관한 연구는 Takatsuji의 연구 [1], [3], [4], [5], [6] 와 Son의 연구[7], [8], [9]를 기본으로 하고 있다. Takatsuji의 연구의 연구는 완전밀폐형 식물공장을 시작으로 태양광형 식물공장 시스템과 요소 기술을 소개하고 있지만, IoT 등과의 기술 융복합에 대한 접근과 잎채소 이외의 뿌리채소에 관한 재배기준을 제시하지 못하고 있다. Son의 연구는 시설재배와 수경재배를 기본으로 식물공장 기술의 기본적인 구성만을 소개하는 있는 연구이다.

식물공장에 관한 최근의 연구로는 생육 시기에 따른 식물공장 모듈의 광합성 모델을 검증하고 있는 Dae의 연구[10], 식물공장 내 빛이 식물의 생육에 미치는 영향을 고찰한 Hwang의 연구[11], 식물공장의 인공광원이 케일의 성장에 미치는 영향을 고찰한 Lee의 연구[12]가 대표적이다. 그러나 이 연구들은 빛의 역할을 중심으로 검

증하고 있는 연구이지만, 식물 광합성에 관련되는 단순한 LED 광원의 특징만을 고려한 연구이며, 광합성 활성화에 대한 추가적인 검증이 필요하다. 그리고 식물공장 광원에 관한 연구로는 LED 광색에 따른 채소류의 생육정도를 실험한 Lee의 연구[13], Park의 연구[14], Lee의 연구[15], 식물공장 광원에 대한 특성을 비교한 Yoon의 연구[16], 인삼 등의 특용작물에 대한 LED 광원의 특성을 조사한 Kwon의 연구[17]가 대표적이다. 이들의 연구는 Takatsuji의 연구결과로 일반적인 식물공장 기술로 파악되고 있는 식물 광합성에 적합한 400~700 nm 파장이 LED의 파장과 일치한다는 개념에 기초한 LED 광원을 채용한 식물공장 기술을 제안하고 있다. 그러나 Takatsuji는 자신의 연구[1]에서 식물공장 광원은 ‘스펙트럼의 질’, ‘빛의 성질’은 만족스럽지만 ‘빛의 양’은 태양광보다 부족하다고 지적하고 있는 것과 같이, 식물공장의 LED 광원사용에 따른 식물성장에 효과 ‘빛의 양’을 만족시키는 광강도 범위를 추정하는 연구가 필요하다.

1.3 연구대상 및 연구방법

본 연구는 형광등 및 LED 등의 인공광을 사용하는 ‘완전제어형 식물공장’의 식물재배에 효과적인 광강도 범위를 확인하기 위해, Table 1의 사양을 가지는 광강도 조절이 가능한 Fig. 1의 실험장치를 제작하여 Fig. 2의 순서로 실험을 하였다.

Table 1. Test Model Specifications or Configuration

Classification	Specification
Temperature	25 [°C]
Humidity	60 [%]
Air Flow	0.5 [m/s]
Light System	LED : RED 55, Blue 16
Light Power	0~1800[lux]
Brightness (PPE)	0~156[μmol/s]
Hygrometer	BSP-2
Test Plant	Pak-Choi
Size(cm)	21×21×28

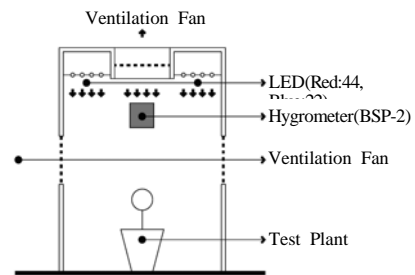


Fig. 1. Plant Factory Test Model

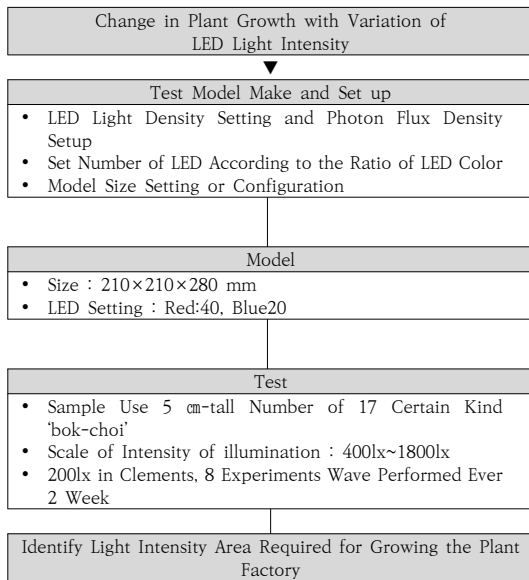


Fig. 2. Research Method and Test Flow

장치의 크기는 210×210×280 mm로 상부에는 Red-LED와 Blue-LED를 설치하고, 환기를 위한 환기용 팬을 상부 1곳과 하부 200 mm 위치에 80×80 mm 크기의 환기구 2곳을 설치하였다. 환기는 0.5 m/s를 유지하였다. 그리고 식물 광합성에 관여되는 빛, 온도, 습도, 빛, 이산화탄소, 영양분 중 빛에 대한 영향만을 고려하기 위하여 내부환경을 온도 25℃, 습도 60%, 이산화탄소 농도 1,200 ppm, 공기속도 0.5 m/s를 유지하고, 광강도 0~1,800 lx의 범위의 수직 성장률과 잎의 가로 세로의 성장을 측정하였다. 실험에 사용한 식물은 비교적 성장이 안정적이며, 외부요인에 변화가 적은 청경채를 사용하였다. 청경채는 씨앗으로부터 발아시킨 28개의 시험체를 스펀지 배지 윗면부터 2 cm 정도 성장한 것을 확인한 후부터 14일 동안의 성장을 관찰하였다. LED의 구성은 기존연구에 근거하여 Red-LED와 Blue-LED의 최적 비율이 4:2인 결과를 토대로 Red-LED 40개, Blue-LED 20개를 조합하여 실험 모델 상부분에 설치하였다[17].

광강도는 최저 400 lx, 최고 1,800 lx로 하고 200 lx 간격으로 광도별 4회 실험하였다. 광합성에 필요한 이산화탄소농도는 실험환경의 평균 농도인 1,000~1,200 ppm으로 하였다. 이산화탄소농도 측정은 0~5,000 ppm까지 측정 가능한 SN-100C를 사용하였다. 광강도 측정은 50,000 lx까지 측정 가능한 조도계인 LX-1010B를 사용하였다. 양액은 수경재배용 시판 양액 A액(질소 2%, 수용성 칼리 3.5% 등)과 B액(질소 1.3%, 인산 1.5%

등)을 각각 10 ml를 1,000 ml 물에 희석한 1% 용액을 2일 간격으로 10 ml를 주입하였다.

2. 실험 결과 및 고찰

2.1 광강도에 따른 식물성장변화

2.1.1 각 광강도별 식물의 성장변화

광강도를 400 lx, 600 lx, 800 lx, 1,000 lx, 1,200 lx, 1,400 lx, 1600 lx 범위로 설정한 청경채의 성장을 14일 동안 관찰한 결과는 Table 2와 같다.

400 lx의 성장 평균은 28.09 mm 와 600 lx의 청경채 성장 특징은 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 성장 초기는 400 lx는 4.87 mm, 600 lx 3.37 mm로 800 lx 2.36mm 로 400 lx가 높은 결과를 보였다. 그러나 최종(14일차) 성장 평균은 28.09 mm로 광강도 중 가장 낮은 결과를 보였고, 1일과 2일의 평균 성장차는 6.08 mm로 가장 높았다. 이후 3일 정도에서는 성장이 600 lx 이상의 광강도의 성장과 비교하면 현저히 낮은 성장 차를 보였다.

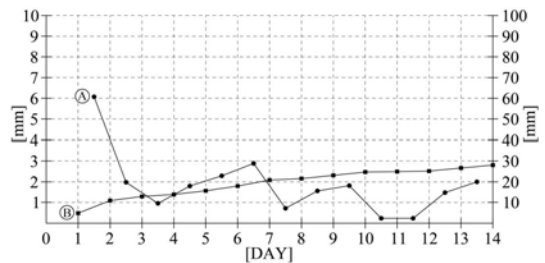


Fig. 3. Average Growth Change of Plants at 400 lx
 A: Growth of plant, B: Length Difference

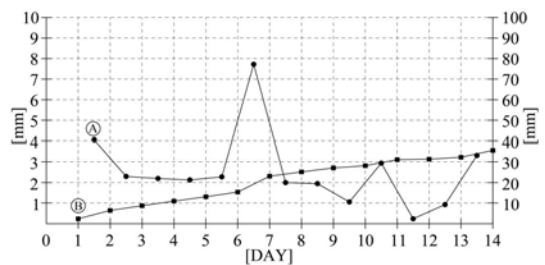


Fig. 4. Average Growth Change of Plants at 600 lx
 A: Growth of plant, B: Length Difference

Table 2. Growth Rate of Plant by Date on 14 Day

lighting Intensity (lx)	Growth Rate (mm)	Day													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
400	Ⓐ	4.87	10.95	12.93	13.89	15.69	17.98	20.87	21.59	23.15	24.73	24.96	25.21	26.69	28.09
	Ⓑ	1.92	3.06	3.35	3.57	4.19	5.10	5.32	6.11	6.37	6.78	7.15	7.33	7.88	8.56
	Ⓒ	0.5	0.67	0.70	1.10	2.02	2.05	2.07	3.15	3.17	3.25	3.91	4.57	5.04	5.35
600	Ⓐ	2.37	6.44	8.74	10.98	13.11	15.59	23.12	25.21	27.16	28.22	31.17	31.41	32.34	35.66
	Ⓑ	2.36	3.52	4.81	5.81	6.35	7.87	8.41	9.02	9.24	10.01	10.63	10.96	11.96	12.24
	Ⓒ	0.0	0.1	0.1	0.2	0.58	1.63	3.31	3.37	4.08	4.59	4.64	4.66	4.71	5.07
800	Ⓐ	2.36	4.26	5.05	6.11	8.55	10.77	13.35	18.88	21.45	24.33	27.99	33.23	35.44	40.79
	Ⓑ	1.52	2.62	3.69	4.42	9.57	12.45	14.01	15.21	15.88	17.02	18.86	21.43	22.39	23.35
	Ⓒ	1.07	1.07	1.07	1.34	3.06	4.11	6.25	6.56	7.06	7.54	8.26	8.27	10.11	10.56
1000	Ⓐ	7.02	8.30	10.04	11.54	15.54	16.32	17.94	21.75	24.92	31.30	35.23	41.04	42.68	44.26
	Ⓑ	5.04	7.25	8.99	12.89	13.91	15.08	16.47	19.02	21.52	25.37	26.69	28.14	28.76	30.69
	Ⓒ	1.07	2.50	2.90	3.57	4.33	6.50	7.75	8.07	8.79	9.31	10.82	12.10	13.02	13.02
1200	Ⓐ	5.29	7.89	10.28	11.77	15.73	16.46	18.32	21.66	26.05	32.96	36.09	40.86	47.83	51.46
	Ⓑ	2.51	4.52	6.72	7.80	10.62	12.44	15.51	18.21	22.57	28.21	37.55	45.01	47.79	49.99
	Ⓒ	1.06	2.81	2.81	4.32	5.49	5.89	7.32	9.33	9.33	10.07	10.78	13.74	15.58	10.02
1400	Ⓐ	6.85	10.89	11.40	14.07	17.41	19.31	23.87	27.90	33.65	37.30	41.63	48.79	55.22	59.12
	Ⓑ	2.51	4.00	4.95	7.01	7.48	10.68	15.54	22.52	24.37	31.98	38.19	43.32	49.23	52.12
	Ⓒ	2.61	3.31	3.64	6.41	8.79	10.41	10.74	13.95	15.21	17.04	21.28	26.28	28.35	31.80
1600	Ⓐ	3.07	6.08	11.34	13.68	18.91	23.31	28.25	29.72	32.19	39.10	41.03	45.60	53.24	58.82
	Ⓑ	3.07	4.67	8.36	9.73	13.15	15.34	21.06	24.57	28.66	30.46	35.50	40.38	46.67	52.11
	Ⓒ	1.04	1.52	3.17	5.60	7.98	10.35	11.00	12.77	13.74	17.33	17.40	18.48	19.51	21.19
1800	Ⓐ	8.06	11.60	15.91	20.26	22.99	28.22	29.17	33.17	38.48	42.86	48.59	56.93	66.80	66.03
	Ⓑ	2.73	4.46	6.28	8.11	11.33	17.65	24.79	29.61	35.70	39.17	44.41	49.70	55.32	58.69
	Ⓒ	3.12	6.06	7.26	9.43	10.67	11.53	12.60	15.43	18.21	19.25	21.28	23.31	26.15	26.74

Ⓐ : Growth of plant, Ⓑ : Length of Leaf, Ⓒ : Width of Leaf

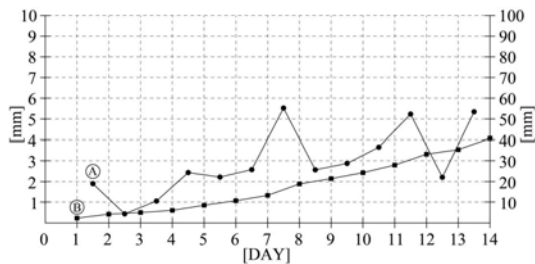


Fig. 5. Average Growth Change of Plants at 800 lx
Ⓐ : Growth of plant, Ⓑ : Length Difference

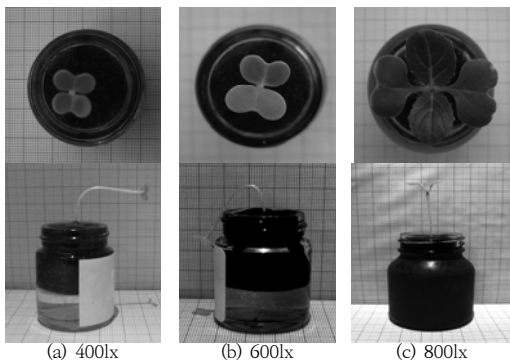


Fig. 6. Day 14 Growth of 400lx and 600lx, 800lx

광강도 800 lx는 400 lx와 600 lx와 비교하여 1일의 성장 평균은 2.36 mm로 초기 성장을 높지 않지만, 2일 4.26 mm, 3일 5.05 mm, 14일 40.79 mm로 Fig. 5와 같이 점진적인 성장을 보였다. 이후, 4일 6.11 mm, 5일 8.55 mm, 6일 10.77 mm로 4일 이후 성장이 현저히 증가하는 것이 확인되었다. 11일까지의 전반적인 성장은 600 lx보다 낮으며, 12일 이후의 성장은 10% 정도만 높다는 것이 확인되었다. 그리고 잎의 성장을 보면 800 lx는 400 lx와 600 lx는 보다 2배 이상(길이 평균 150%, 너비 평균 212.53%) 높다. 따라서 400 lx에서는 Fig. 6과 같이 낮은 광강도에서는 초기에 웃자라는 현상이 발생하였고, 이것은 잎의 전체적인 성장을 낮추는 원인이 되고 있다.

1,000 lx에서의 성장은 Fig. 7과 같이 44.26 mm 성장 평균을 보였다. 초기 성장에서는 800 lx와 유사한 성장을 보였고, 3일~5일, 7일~12일 범위에서 성장이 증가하는 것이 확인되었다. 1,200 lx의 성장 평균은 Fig. 8과 같이 51.46 mm로 1,000 lx에 비해 116.30% 성장한 결과를 보였다. 이것은 1000 lx의 1일 성장 평균과 비교하면 1,200 lx의 1일 성장 평균은 5.29 mm로 낮고 10일 까지의 성장은 1000 lx와 유사한 경향을 보였고, 1,000 lx보다 1.15배(115.8%) 높은 평균 성장을 보였다. 광강

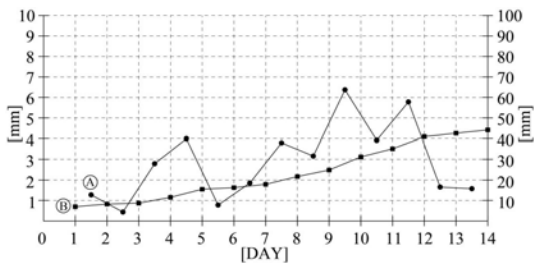


Fig. 7. Average Growth Change of Plants at 1,000lx
 ① Growth of plant, ② : Length Difference

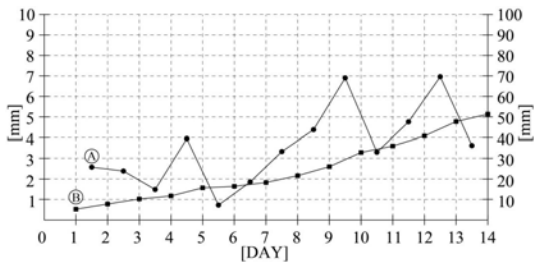


Fig. 8. Average Growth Change of Plants at 1,200 lx
 ① Growth of plant, ② : Length Difference

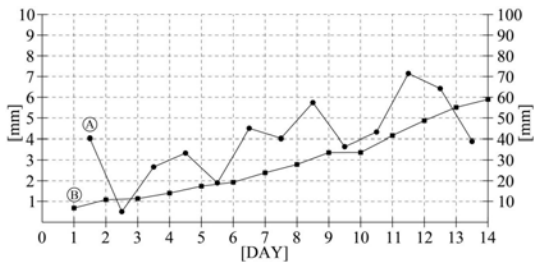


Fig. 9. Average Growth Change of Plants at 1,400 lx
 ① Growth of plant, ② : Length Difference

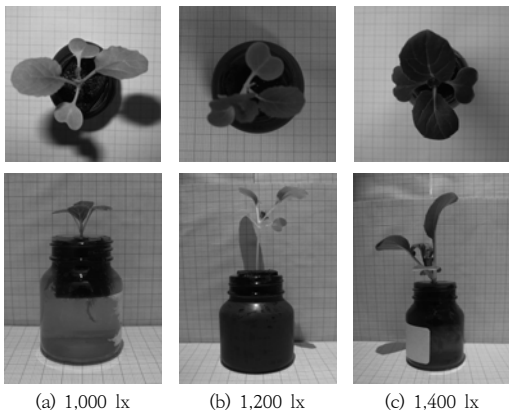


Fig. 10. Day 14 Growth of 1,000 lx, 1,200 lx, 1,400 lx

도 1400 lx의 전체적인 평균은 Fig. 9와 같이 59.12 mm로 1,200 lx에 비하여 1.3배(132%) 성장이 확인되었다. 1400 lx의 초기 성장은 1200 lx의 1일의 성장 평균인 5.29 mm와 비교하여 1.6 mm 증가한 6.85 mm로 1000 lx의 7.02 mm보다 0.2 mm 작은 결과를 보였지만, 5일 이후 전반적인 1,200 lx 이하의 광강도 보다 높은 평균 성장이 확인되었다. 전반적인 성장은 Fig. 10과 같이 1,000 lx보다는 크기와 잎의 개수, 넓이가 넓고 1,200 lx에 비하여 비교적 크기는 작지만, 전체적인 성장은 최소 15% 최대 38% 정도로 높은 결과를 보였다. 1,600 lx의 성장은 Fig. 11과 같이 평균적인 성장은 58.82 mm로 1400 lx에 비해 99.49%로 0.51%로 낮은 결과를 보였다. 그러나 1~4일과 11~14일을 제외한 기간의 성장은 1,400 lx와 비교하면 20% 이상 높게 나타났다. 그리고 잎의 성장은 1,400 lx와 비교하면 수평은 20.76%로 성장이 크지만, 9일 이후에는 1400lx에 비해 4.8% 낮은 결과를 보였다. 따라서 잎의 수평 성장은 Fig. 12와 같이 1400 lx에 비하여 17.45%로 전반적인 성장이 낮게 나타나고 있다.

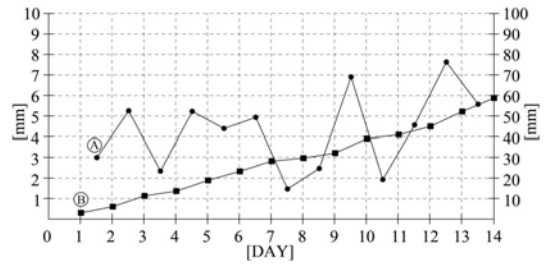


Fig. 11. Average Growth Change of Plants at 1,600 lx
 ① Growth of plant, ② : Length Difference

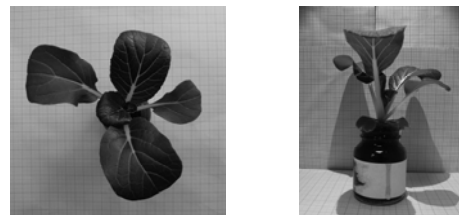


Fig. 12. Day 14 Growth of 1,600 lx

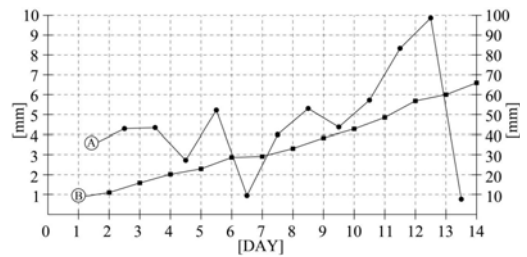


Fig. 13. Average Growth Change of Plants at 1,800 lx
 ① Growth of plant, ② : Length Difference

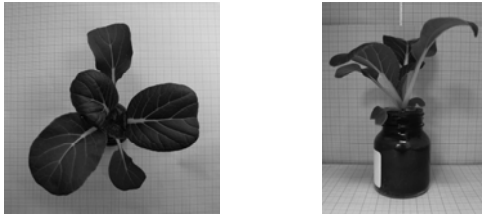


Fig. 14. Day 14 Growth of 1,800 lx

광강도 1800 lx의 성장은 Fig. 13과 같이 66.03 mm로 전체 중 가장 높은 성장 평균을 보였다. 1일의 성장은 8.06 mm로 Fig. 14와 같이 다른 광강도에 비하여 가장 높은 성장을 보였고, 5일까지 높은 성장이 계속되다가 점차 그 비율이 낮아지지만, 7일 이후 성장은 증가 되었다. Fig. 13의 ㉠의 성장차 곡선을 보면 성장 부분과 둔화 부분이 다른 광강도와는 상이하게 상승 기간은 길고 둔화 기간은 짧게 나타났다. 또한, 광합성과 관련된 잎의 성장을 사각형 면적으로 환산하면 1,540 mm²로 400 lx에 34배, 1000 lx의 3.9배, 1600 lx의 1.4배 정도 높은 수치이다. 그리고 전체적인 성장은 1600 lx에 비해 12.26% 높은 성장을 보였다(Table 3 참조).

Table 3. Final Measure of Leaf Growth 400 lx~1,800 lx

lx	400	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800
Area (mm ²)	45.79	62.05	246.58	399.58	500.90	1,657.42	1,104.21	1,569.37

2.1.2 광강도 변화에 따른 식물성장 특징

광강도 400 lx에서 1,800 lx까지의 청경채의 성장은 400 lx와 800 lx 정도의 낮은 광강도에서는 1일에서 3일 사이에는 잎의 성장이 없이 줄기의 성장이 높은 옷자라는 현상이 나타났으며, 잎의 성장은 다른 광강도의 잎에 비하여 작은 결과를 보였다. 이와 같은 잎의 낮은 성장은 식물 광합성에 영향을 주어 어느 정도 성장한 이후 Fig. 15과 같은 시들어 버리는 현상이 발생하였다. 1,000 lx 이상의 광강도에서는 초기 성장은 낮은 광강도 보다는 낮은 성장을 보이지만, 시간이 경과 할수록 성장은 광강도에 비례하여 증가하는 것이 확인되었고, 잎의 성장도 증가하였다. 그러나 광강도가 1,400 lx 이상이 되면 성장이 1,400 lx와 비슷하거나 약간 낮아지는 것이 확인되었다. 그리고 일일 성장을 비교하면, 모든 광강도에서 성장이 높아지고 낮아지는 구간이 반복되는 성장 사이클이 있다는 것이 확인되었다. 이 성장 사이클은 낮은 광강도에서는 사이클의 반복이 느렸고 광강도가 높을

수록 성장이 빠르게 나타났다.

또한, LED의 특성상 LED 노출부의 발열은 소자의 수명과 주변 온도상승에 직접적인 영향을 준다[19]. 일반적으로 온도 25℃에서 조도는 100%를 보인다. 그리고 사용 환경에 따라 LED 온도가 50~60℃로 상승하면 4~6% 정도로 조도가 감소하고, 수명은 급격히 감소한다. 이와 같은 LED의 특성으로 인하여 광강도가 변화에 따라 LED 광원 주변의 온도가 25~30℃ 정도로 유지되고 시간이 경과 할수록 온도는 점차 상승한다. 이러한 이유로 인하여 Fig. 16과 같이 광강도 증가에 따라 LED 소자로부터 발산되는 열은 식물 주변 온도에 어느 정도 성장에 도움을 주지만, 식물공장 특성상 24시간 동안 지속해서 빛을 비추는 경우, Fig 15와 같이 재배공간 열 누적으로 인하여 열화현상이 발생한다는 것이 확인되었다.



Fig. 15. LED Heat Damage of Plant on 1,800lx

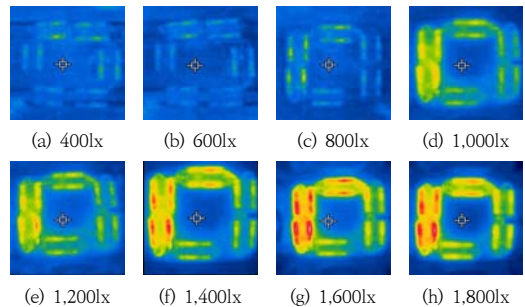


Fig. 16. Heat Distribution on Light Intensity

실험을 통하여 식물공장의 환경을 구성하는 환기, 영양분, 공기조화의 환경조건을 배제한 빛만을 고려한 식물공장 환경에서 성장이 가장 높은 광강도는 58.82 mm 성장한 1,600 lx와 66.03 mm 성장한 1,800lx로 확인되었다. 400 lx~800 lx 정도의 낮은 광강도 환경에서는 초기 성장에서 옷자라는 현상이 확인되었고, 잎의 성장이 낮아 식물 광합성에 영향을 주어 성장이 낮다는 결과를 얻었다. 그리고 열화현상이 발생하는 1,800 lx를 제외하면 1,400 lx와 1,600 lx 정도의 광강도 영역이 식물성장에는 적당하다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구는 식물공장 기술의 표준화를 위하여 LED의 광강도에 따른 성장변화를 실험을 통하여 확인하고 성장에 필요한 최적 LED 광강도 범위를 확인하였다. 그 결과는 다음과 같다. 첫 번째 400 lx~800 lx의 성장 평균은 400 lx, 28.09 mm, 600 lx, 35.66 mm, 800 lx, 40.79 mm까지 성장하였다. 성장은 옷자라는 현상이 7일 정도까지 유지되었고, 잎이 성장하지 않아 일간 평균 성장차가 현저히 낮다는 것이 확인되었다. 두 번째 1,000 lx~1,400 lx의 성장 평균은 1,000 lx, 44.26 mm, 1,200 lx, 51.46 mm, 1,400 lx, 59.12 mm까지 성장하였다. 전반적인 성장은 광강도가 높아짐에 따라 잎의 성장이 확인되었고 일별 성장 또한, 현저히 증가하는 것이 확인되었다. 광강도 증가할수록 일별 성장증가와 성장둔화 사이클이 일정하게 반복되는 것이 확인되었다. 세 번째 1,600 lx와 1,800 lx의 성장 평균은 1,600 lx, 58.82 mm, 1,800 lx, 66.03 mm 성장하였고 전체적인 성장은 1,400 lx 영역과 유사한 성장을 보였다. 1,600 lx의 잎의 성장은 1,400 lx보다 17.45% 정도 낮게 나타났고 성장도 유사한 결과를 보였다. 1,800 lx는 1,400 lx보다 다소 높은 성장을 보였지만, 시간 경과에 따라 성장이 둔화하는 것이 확인되었다. 따라서 잎의 성장이 없으면 옷자라며 성장둔화가 확인되었고, 1,400 lx와 1,600 lx 영역에서 성장이 비교적 안정적인 성장이 확인되었다. 또한, 빛이 강할수록 식물 광합성이 증가하지만, 광원에서 발산되는 열로 인하여 재배공간 온도를 상승시켜 잎의 열화현상이 발생하는 것이 확인되었다.

본 연구결과를 토대로 현재 식물공장에서 일반적으로 채용하고 있는 최대 광강도의 유지하여 대도록 많은 빛을 식물에 비추는 방식은 LED로 대표되는 인공광원의 과도한 사용과 재배공간 내의 온도상승을 만들어, 재배 식물의 열화현상을 발생시킨다는 것이 확인되었다. 그리고 식물공장 내의 식물성장에 따른 광강도의 적절한 조절이 필요하다는 것이 확인되었다. 또한, 본 결과를 토대로 식물공장의 적절한 조명계획과 함께 식물 주변의 열을 적절히 제거해주는 공기조화 계획이 설계 및 계획단계에서 필요하며, 식물재배 시 식물성장에 따른 식물과 LED 간의 적절한 거리 조절에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] M. Takatsuji, Fully Controlled Plant Farm, Ohmsha, 2010, P.125
- [2] Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, A Study on the Establishment of Medium and Long-Term Policies for Plant Factory, Korea, 2016.
- [3] M. Takatsuji, Cost down Method of Fully Controlled Plant Farm, Ohmsha, 2012, pp.60-62.
- [4] M. Takatsuji, The Development to a Plant Factory, J. SHUTA, n24(3), pp. 2012, 16.-166, DOI:<http://dx.doi.org/10.2525/shita.24.163>
- [5] M. Takatsuji, The Basic and Practiest for Plant Factories, Shokabo, 1996, pp.38-45.
- [6] M. Takatsuji, Y. Mori, LED Plant Farm, Nikankougyou Shinbun, 2011, pp.32-33.
- [7] J. E. Son, J. H. Shin, T. I. Ahn, Quantitative Measurement of Carbon Dioxide Consumption of a Whole Paprika Plant Using a Large Scale Chamber, *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, Kor. J. Hort. Sci. Technol, Vol. 29, no. 3, pp.211-216, 2011.
- [8] J. E. Son, M. K. Cha, J. S. Kim, J. H. Shin, Y. Y. Jo, Practical Design of an Artificial Light-Used Plant Factory for Common Ice Plant, Protected Horticulture and Plant Factory, *The Korean Society for Bio-Environment Control*, Protected Horticulture and Plant Factory Vol. 23, no. 4, pp.371-375, 2014.
- [9] J. E. Son, J. S. Park, H. Y. Park, Analysis of Carbon Dioxide Change in Urban-Type Plant Factory System, *Korean Society For Horticultural Science, HORTICULTURE ENVIRONMENT and BIOTECHNOLOGY*, 40(2), pp.205-208, 1999.
- [10] D. H. Jung, H. I. Yoon, J. E. Son, 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, *The Korean Society for Bio-Environment Control*, Protected Horticulture and Plant Factory 26(4), pp.268-275, 2017. DOI: <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2017.26.4.268>
- [11] Y. H. Hwang, J. E. Park, Y. H. Chang, J. U. An, H. S. Yoon, K. P. Hong, Effects of LED(Light Emitting Diode) Photoperiod and Light Intensity on Growth and Yield of *Taraxacum coreanum* Nakai in a Plant Factory, *The Korean Society for Bio-Environment Control*, Protected Horticulture and Plant Factory 25(4), pp.232-239, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2016.25.4.232>
- [12] G. J. Lee, J. W. Heo, C. R. Jung, H. H. Kim, J. S. Jo, J. G. Lee, G. J. Lee, S. Y. Nam, E. Y. Hong, Effects of Artificial Light Sources on Growth and Glucosinolate Contents of Hydroponically Grown Kale in Plant Factory, *The Korean Society for Bio-Environment*

- Control, Protected Horticulture and Plant Factory* 25(2), pp.77-82, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2016.25.2.77>
- [13] S. M. Park, E. K. Cho, J. H. An, B. H. Yoon, K. Y. Choi, E. Y. Choi, Plant Growth and Ascorbic Acid Content of Spinacia oleracea Grown under Different Light-emitting Diodes and Ultraviolet Radiation Light of Plant Factory System, *The Korean Society for Bio-Environment Control*, Protected Horticulture and Plant Factory 28(1), pp. 1-8, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2019.28.1.1>
- [14] G. J. Lee, J. W. Heo, H. H. Kim, C. R. Jung, D. E. Kim, S. Y. Nam, Effects of Artificial Light Sources on Growth and Yield of Peucedanum japonicum Hydroponically Grown in Plant Factory, *The Korean Society for Bio-Environment Control*, Protected Horticulture and Plant Factory 25(1), pp.16-23, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2016.25.1.16>
- [15] C. G. Yoon, H. K. Choi, A Study on the Various Light Source Radiation Conditions and use of LED Illumination for Plant Factory, *The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers*, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 25(10), pp.14-22, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2011.25.10.014>
- [16] T. R. Kwon, J. K. Choi, T. S. Ryu, D. J. Ahn, W. K. Jung, M. H. Jang, Characteristics of LED Combination for Ginseng(Panax ginseng C. A. Meyer) Cultivation, *Korean Society For Horticultural Science*, HORTICULTURE ABSTRACTS, pp.116-116, 2015.
- [17] J. W. Hong, A Study on The Photosynthesis Accelerate by Light Color Composition in Plant Factory, *The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Journal of the Korea Academia-Industrialcooperation Society Vol. 17, No. 11 pp. 368-375, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.368>
- [18] L. Taiz, E. Zeiger, Plant Physiology, Sinauer Associates, 3/E, pp.107-138, 2002.
- [19] D. K. Kim, G. S. Kil, A Study on The Heat Radiation of LED Luminaries and the Indoor Temperature Increase, *The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng. Vol.25, No.9, pp.738-742, 2012.
DOI: <http://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.9.738>
- [20] Y. H. Hwang, J. E. Park, Y. H. Chang, J. U. An, H. S. Yoon, K. P. Hong, Effects of LED(Light Emitting Diode) Photoperiod and Light Intensity on Growth and Yield of Taraxacum coreanum Nakai in a Plant Factory, *The Korean Society For Bio-Environment Control*, Protected Horticulture and Plant Factory 25(4), 232-239, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2016.25.4.232>
- [21] D. S. Kim, B. O. Kim, S. O. Kim, Ubiquitous sensor network-based LED lighting plant system deployment and integration of research on the operation, *The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers*, Proceedings of KIIEE Annual Conference , 13-15, 2012.
- [22] H. R. Kim, Y. H. You, Effects of Red, Blue, White, and Far-red LED Source on Growth Responses of Wasabia japonica Seedlings in Plant Factory, *Korean Society For Horticultural Science*, Korean Journal of Horticultural Science & Technology 31(4), 415-422, 2013.

홍 지 완(Ji-Wan Hong)

[정회원]



- 2006년 3월 : 일본 큐슈대학교 환경시스템 전공 (공학석사)
- 2009년 3월 : 일본 큐슈대학교 환경시스템 전공 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2015년 2월 : 동서대학교 건축토목학부 교수
- 2015년 3월 ~ 현재 : 신라대학교 건축학부 교수

<관심분야>

건축환경, 건축설비, 열환경, 식물공장