

식물공장 광원의 색조합에 따른 광합성활성화에 관한 연구

홍지완
신라대학교 건축학부

A Study on The Photosynthesis Accelerate by Light Color Composition in Plant Factory

Ji-Wan Hong

Division of Architecture, Silla University

요약 본 연구는 식물에 대한 LED 광색별 성장을 실험하여 효율적인 식물공장 광원에 대한 기준을 제시하기 위하여 수행되었다. 실험은 Red-LED와 Blue-LED, White-LED 광환경에서 식물의 성장과 이산화탄소 감소를 측정하여 확인하였다. 식물의 성장은 Red-LED에서 성장이 가장 높게 나타났다. White-LED는 Red-LED와 유사한 경향을 보였지만, 시간이 경과 할수록 Red-LED의 성장이 높은 경향을 보였다. Blue-LED는 가장 낮은 성장을 보였다. 그리고 혼합광과 단색광의 광합성정도를 확인한 결과 Red-LED와 Blue-LED를 조합한 광원에서 이산화탄소 감소가 높게 나타났으며 적색광이 많을수록 이산화탄소의 감소도 높게 나타났다. 이와 같은 실험 결과 토대로 혼합광과 백색광에서의 성장을 비교 측정한 결과, 적색 4개, 청색 2개의 비율의 광원에서 식물의 성장이 높게 나타났다. 따라서 식물공장에서 식물의 효율을 높이고 성장을 촉진하기 위해서는 백색의 단색광을 사용하는 것 보다 적색광을 사용하거나, 적색과 청색을 혼합하여 사용하여 파이토크롬 효과를 높이는 것이 바람직하다는 것이 확인되었다. 특히 백색광만 사용하는 경우 성장 초기에는 한해서 사용해야 하며 성장이 잎이 커짐에 따라 적색광이 강한 광을 사용하는 것이 효과적이다.

Abstract This study examined the criteria for efficient LEDs used throughout the experiment of an LED with another light color growth to be used in a plant factory. The experiment was confirmed by measuring the Red-LED, Blue-LED, plant growth, and amount of carbon reduction in a White-LED environment. The white-LED showed a similar growth trend to the Red-LED. Blue-LED showed the lowest growth. Measurements of the carbon dioxide levels, showed that the Red-LED and blue LED produced the lowest levels. The combination of the ratio of the LED showed four Red-LEDs and one blue LED to be the higher of the two. In addition, three Red-LED and one Blue-LED produced equal growth to that of the white-LED. In addition, as much as possible, red is the light color that obtains the result suitable for plant factories.

Keywords : Architecture Plan, Artificial Lighting, LED Lighting Color, Plant Factory, Photosynthesis

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

21세기의 농업은 단순한 식량 생산을 넘어 정보통신과 바이오, 환경, 나노기술 등의 첨단기술과 융합된 농업 생산시스템으로 발전하고 있다. 이 중 식물공장은 차세대 농업을 주목받고 있는 분야이다[1]. 국내에서는 구미

의 ‘수직형 식물공장’과 농업진흥청의 ‘국립과학원 수원 식물공장’, 제주대학교의 ‘완전제어형 식물공장’이 시범적으로 운영되고 있으며, 소수의 기업이 상용화를 목표로 제품개발을 추진하고 있다[2].

식물공장은 식물 광합성 환경을 인공적으로 유지하여 연중재배와 수확을 가능하게 한 재배방식이다.

주요기술은 광원, 수경재배 기술, 환경제어 기술, 시

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

Tel: +82-10-2528-4065 email: scolra@silla.ac.kr

Received September 19, 2016

Revised (1st October 20, 2016, 2nd October 26, 2016)

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

시스템 원격제어기술, 에너지 절감기술, 부산물 이용기술 등으로서 다양한 분야의 인력과 기술적 융복합이 필요하다. 이와 같은 필요성에 의하여 농림축산식품부는 2012년 5개 스마트 주요정책과 16개 세부추진과제를 포함하는 3차 정보화 기본계획을 수립하여 식물공장을 중심으로 하는 스마트 농업에 대한 지원을 높이고 있다[3].

식물공장에서는 식물성장에 직접 관련된 광합성의 24시간 촉진을 위하여 광원의 선택과 사용시간, 재배환경 내의 이산화탄소농도 등이 매우 중요하다. 그러나 현재 식물공장에 개발되고 있는 기술은 인터넷 등의 유무선 통신망을 사용한 원격제어와 단순한 모니터링 프로그램 개발인 소프트웨어 개발이 중심이 되고 있다. 특히, 생산에 직접 사용되는 하드웨어는 대부분이 외국의 수경재배용 제품을 모방한 것을 사용하여 재배하고 있으며, 그에 대한 명확한 표준이 없는 실정이다[4, 5].

이와 같은 식물공장의 시스템 개발 현황을 기초로본 연구는 식물공장에서 일반적으로 사용되고 있는 LED에 대하여 식물 광합성이 활성화되는 색 구성 비율을 실험을 통하여 검증하고 그 기준을 제시하는 것을 목표로 하고 있다.

1.2 선행연구

국내의 식물공장 관련 연구는 1990년도 중반부터 시작되어 1990년대 후반부터 일부 기업에서 LED, 녹색기술, 융복합 기술 등을 중심으로 연구되고 있다. 국외에서는 일본과 유럽을 중심으로 입체형 식물공장과 공정 자동화, 로봇시스템과의 융합, 고휘도 LED광원 등의 개발로 진행되고 있다.

식물공장에 관한 기초적인 연구는 다카치 마사모토의 연구[6, 7, 8, 9]와 손정익의 연구[10, 11, 12]의 연구가 대표적이다. 다카치 마사모토의 연구는 완전밀폐형 식물공장과 태양광형 식물공장의 기본적 연구와 기초적인 정보를 제공하고 있다. 그러나 최근에 시도되고 있는 정보통신분야와의 융복합을 통한 식물공장의 개선에 대한 접근은 없으며, 옆 채소 이외의 다양한 작물 재배에 관한 명확한 기준을 제시하지 못하고 있다. 손정익의 연구는 식물재배에 따른 다양한 변수와 식물의 광합성 효율에 대한 수치적 접근을 이루고 있는 연구이지만, 다양한 작물에 대해 검증을 하지 못하고 있다.

그 밖의 식물공장의 주요한 연구로서 김보경 외 2의 연구[13]의 연구는 인공광에 의한 식물의 생장특성을 고

Table 1. Test Model System Configuration

	System Configuration
Temperature	20°C (Room) 20~25°C (Test Model Inside)
Light System (LED)	Red: 660nm Blue:450nm White:450nm
Brightness (PPE)	70~80μmol·m ⁻² ·s ⁻¹
Nutrient Solution	Normal
Cultivation Method	DFT ^{*1}
Air Flow	0.5m/s
Density of Carbon Dioxide	Normal Condition Air
Type	Full Control

*1. Deep Flow Technique
*2. Nutrient Film Technique

찰하고 있지만, 광원별 특성과 색상별 특성은 고려하지 않고 있다. 차미경 외 2의 연구[14]와 엄영철 외 4의 연구[15]의 연구는 빛의 세기에 따른 식물의 성장률을 검토하고 있지만, 식물이 광합성 주요 인자인 이산화탄소의 농도에 대한 영향을 고려하지 않고 있다.

김재수 외 1의 연구[16], 서광규 외 2의 연구[17], 임계제의 연구[18], 이용웅 외 5의 연구의 연구[19]는 식물공장의 효율적인 관리와 운영에 필요한 CCTV와 센서, 컴퓨터 등을 사용하여 식물공장의 환경 및 성장에 관한 정보와 시스템 제어 프로그램 개발에 관한 연구이다. 그러나 식물 성장에 대한 기본적인 환경유지보다는 CCTV를 사용하여 식물공장 내부를 감시에 국한된 연구이다.

윤지환 외 2[20]의 연구, 박동윤 외 2[21]의 연구 이외의 대부분의 연구는 식물공장 온열 환경 및 공기순환에 관한 시뮬레이션에 관한 연구로서 공기 유동 시뮬레이션 프로그램을 사용한 연구로서 반드시 실증적 검증이 필요한 연구이다.

따라서 본 연구는 기존연구의 성과와 연구현황을 토대로 식물공장의 대표적인 광원인 LED의 색상에 따른 광합성 효과를 실험을 통하여 검증하고 광색의 조합비율을 제시한 식물공장에 관한 기초적인 연구이다.

1.3 연구대상 및 연구방법

본 연구는 인공광을 사용하는 ‘완전제어형 식물공장’을 대상으로 식물 광합성에 대한 광색의 영향과 적합한 광색을 확인하기 위한 연구이다. 실험을 위하여 광색 이외의 식물 광합성에 영향을 줄 수 있는 기기적인 영향을 최소화하기 위하여 식물공장의 대표적인 연구인 다카치 마사모토의 연구[6]를 참고하여 Table. 1의 성능을 가지는 Fig. 1과 같은 모델을 구성하였다.

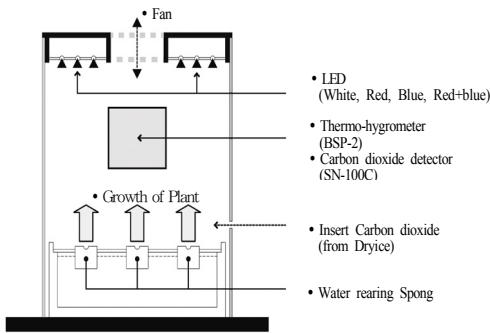


Fig. 1. Plant Factory Test Model

실험에 사용한 모델은 225×225×286mm의 크기로 상부에는 환기용 팬과 광원용 LED가 설치되어 있으며, 하부에는 식물재배용 트레이가 설치되어 있다. 또한, 이산화탄소 도입을 위한 1개소의 유입구를 설치하였다. 모델은 3D 프린터를 사용하여 상부분과 하부 부분을 제작하고 외벽은 투명아크릴로 주문 제작하였다. 광원으로 사용되는 LED는 Red-LED, Blue-LED와 Red-LED + Blue-LED의 조합, White-LED로 구성하여 실험하였다. 기존 연구에서는 형광등을 많이 사용하고 있지만, 실험에는 형광등을 설치할 공간이 협소하므로 실험에서 배제하였다. 광량은 광원의 변환값으로 $1W=4.59\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 사용하여 최저 광량자속밀도 $70\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 기준으로 LED 42개, 총 17W로 구성하였다.

식물에 영양을 공급하는 양액공급방식은 장치가 간단한 ‘담액수경 방식’을 사용하였다. 재배트레이의 크기는 210×210×80mm, 양액통의 크기는 200×200×70mm로 양액 2L를 담을 수 있도록 3D프린터로 제작하였다. 재배트레이 상부덮개는 크기 28×28×30mm의 식물정치용 스펀지를 설치할 수 있는 28mm 크기의 구멍 9개소를 두었다. 양액은 농촌진흥청에서 제공하는 수경재배 양액 제조법에 의하여 시판중인 A액(성분은 질소 2%, 칼리 3.5%, 석회2%, 철 0.05%), B액(성분은 질소 1.3%, 인산 1.5%, 칼리 5%, 고토 0.7%, 붕소 0.05%, 망간 0.01%, 아연 0.002%, 글루타민산, 구연산, 아미노산, 당류, 효력 증진제)을 각 40ml씩 20L의 물에 희석한 양액 2,000ml를 사용하였다[22].

실험은 Fig 2.와 같은 순서로 실험을 하였다. 첫 번째 실험은 LED 색상에 대한 식물의 성장을 확인하기 위하여 Red-LED, Blue-LED, White-LED를 사용하여 광색에 대한 식물성장 정도를 광원별로 1개월 동안 관찰하였

다. 이 실험 결과를 토대로 빛의 교변조사에 따른 파이토크롬(Phytochrome)의 효과적인 발생을 확인하기 위하여 광합성 증가에 따른 24시간 동안의 이산화탄소 감소가 빠른 광원의 조합을 태양광에서의 이산화탄소 감소와 비교하였다. 그리고 첫 번째 실험에서 얻어진 결과로 혼합광의 효과적인 성장이 가능한 광원의 비율을 10일 동안 성장을 관찰하여 측정하였다. 실험은 2015년 10월부터 2016년 6월까지 실험하였다. 실험에 사용된 식물은 비교적 재배가 쉽고 외부환경의 영향을 적은 청경채를 사용하였다. 실험모델의 내부는 식물재배에 적합한 습도 40~60%, 온도 20℃~25℃의 환경을 유지하였다. 그리고 온도 및 습도의 측정은 온도 0~60℃, 습도 5~95%, 이산화탄소 0~5,000ppm까지 복합적으로 측정 가능한 SN-100C 모델을 사용하여 측정하였다. 실험실 내의 습도는 40~60%를 유지하였고 온도와 습도를 동시에 측정 가능한 BSP-2모델을 사용하여 측정하였다. 식물의 성장 측정은 식물의 특성상 잎의 크기가 다양하므로 제일 큰 잎의 길이만을 측정하였다. 식물의 광합성 측정은 공기 중 이산화탄소 농도변화를 측정하여 광합성 정도를 측정하는 방법을 사용하였다[19]. 실험을 위한 이산화탄소 공급은 드라이아이스를 사용하여 고무관을 통하여 공급 하였다. 측정의 드라이아이스에서 공급한 이산화탄소의 농도가 2,000ppm인 것을 확인한 후 시작하였다. 측정 종료는 공기의 이산화탄소 조성인 400ppm을 상한, 300ppm을 하한으로 설정하여 실험하였다.

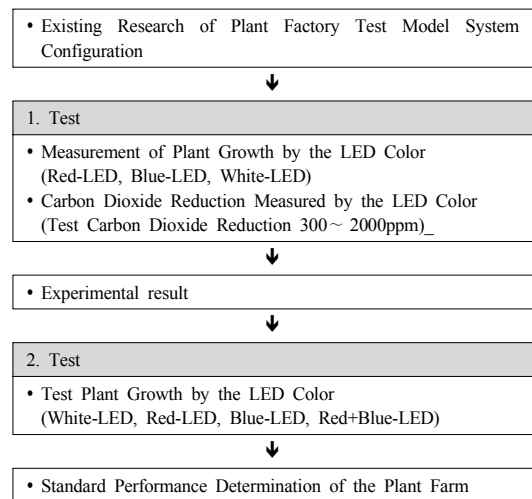


Fig. 2. Test flow of Plant Factory Model

2. 실험 결과 및 고찰

2.1 LED 색상에 따른 성장 변화

LED 광색에 따른 식물의 성장 정도를 확인하기 위하여 실내온도는 20℃, 재배공간은 25℃로 유지하고, Red-LED, Blue-LED, White-LED를 사용하여 청경채의 성장을 관찰하였다. 재배용 스펀지에 씨앗을 넣고 발아가 확인된 후, 잎이 10mm까지 성장한 것을 확인한 후에 실험모델 내에 정치하고 30일 동안 성장을 관찰하였다. 그 결과는 Fig 3.과 Fig 4.와 같다.

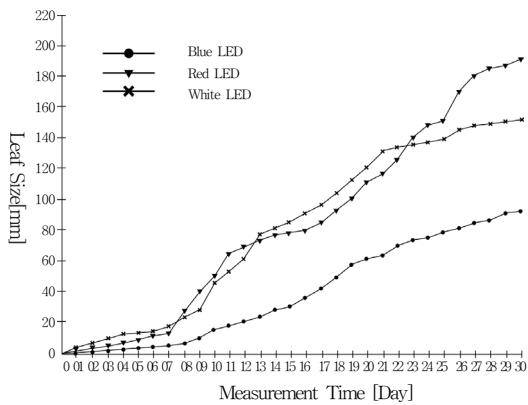


Fig. 3. Measurements Results of Plant Growth by the LED Color

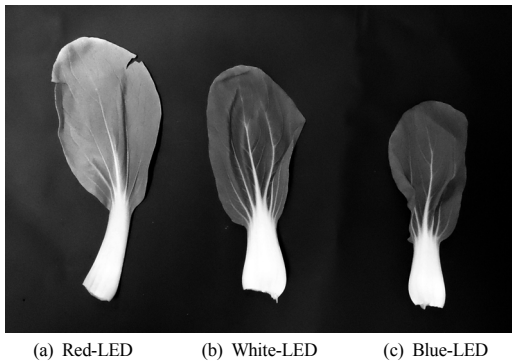


Fig. 4. Measurements Results of Leaf Size by the LED Color

Table 2.와 같이 LED 색상에 따른 30일 동안 청경채의 성장은 Blue-LED 96mm(하루 평균 3.2mm), Red-LED 193mm(하루 평균 6.4mm), White-LED 155mm(하루 평균 5.17mm)의 성장을 보였다. LED 색상 중 가장 성장이 큰 것은 Red-LED로 확인되었다. 최초 실험 시작일 10일

에 Red-LED는 51mm(+41mm), White-LED 46mm(+31mm), Blue-LED 17mm(+13mm)로 Red-LED > White-LED > Blue-LED 순으로 성장이 높게 나타났다. 15일 시점에서는 Red-LED는 78mm(+27mm), White-LED 87mm(+41mm), Blue-LED 32mm(+15mm)로 White-LED > Red-LED > Blue-LED 순으로 White-LED가 높게 조사되었다. 20일이 지난 시점에는 15일 시점과의 차이는 Red-LED 35mm와 White-LED 35mm로 유사한 성장을 보였다. 25일 이후부터는 Red-LED 153mm(+45mm), White-LED 140mm(+18mm), Blue-LED 80mm(+17mm)로 Red-LED > White-LED > Blue-LED 순의 성장을 보였다. 30일 시점에서는 Red-LED 193mm(+40mm), White-LED 155mm(+15mm), Blue-LED 96mm(+16mm)로 Red-LED > Blue-LED > White-LED 순의 성장을 보였다. 전체적인 성장은 Red-LED > White-LED > Blue-LED 순으로 성장을 보이며, Red-LED와 White-LED의 성장이 유사한 경향을 보인다. 또한 Blue-LED는 Red-LED와 White-LED보다 30%에서 60%까지 성장이 낮은 결과를 보였다.

이 실험 결과로부터 식물공장에서 식물의 성장이 빠른 광원은 적색계열의 광이며, 단기간 사용하는 경우 백색광과 차이를 보이지 않지만, 식물이 어느 정도 성장이 된 이후에는 Red-LED가 성장에 유리하다는 것이 확인되었다.

2.2 식물 광합성에 따른 이산화탄소 농도 변화

식물의 광합성 정도를 가장 쉽게 확인하기 위해서는 탄소화합물 발생량 측정, 이산화탄소의 흡수량, 산소의 발생량 측정이 일반적이다[23, 24, 25]. 선행실험에서 얻어진 결과를 토대로 식물성장에 유효한 결과를 보이는 Blue-LED 3개와 Red-LED 3개 비율로 조합한 광원의 이산화탄소 제거 정도를 측정하였다.

Table 2. Growth Test Composition of LED Light Color (Unit : mm)

LED-Type	Day 5	Day 10	Day 15	Day 20	Day 25	Day 30
Red-LED	10 (+0)	51 (+41)	78 (+27)	113 (+35)	153 (+45)	193 (+40)
White-LED	15 (+0)	46 (+31)	87 (+41)	122 (+35)	140 (+18)	155 (+15)
Blue-LED	4 (+0)	17 (+13)	32 (+15)	63 (+48)	80 (+17)	96 (+16)

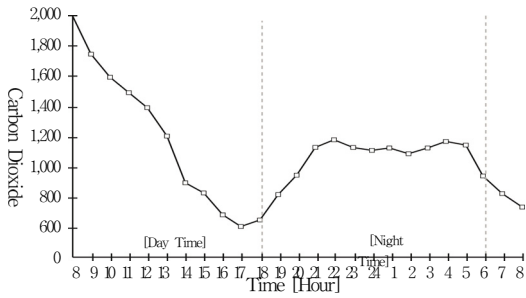


Fig. 5. Day of Carbon Dioxide Change in Natural Light

실험결과 비교를 위하여 실험모델 내에 이산화탄소를 2,000ppm 주입하여 일반적인 환경에서 24시간 동안의 이산화탄소 감소를 측정하였다. 그 결과는 Fig 5.와 같이 주간에서는 명반응에 의하여 공기의 이산화탄소 농도인 600ppm까지 9시간 정도의 시간이 소요되었으며, 시간당 155.6ppm 정도가 제거되는 것이 확인되었다. 그리고 야간에는 암반응에 의하여 12시간 동안 600ppm에서 1,000ppm까지 이산화탄소 농도가 상승하는 것이 확인되었다.

상기의 실험결과를 토대로 각 LED 색상에 따른 이산화탄소 제거 정도를 24시간 동안 측정하였다. 실험에 사용한 LED는 Blue-LED와 Red-LED + Blue-LED, Red-LED, White-LED를 사용하였다. Red-LED + Blue-LED의 조합은 Blue-LED 3개와 Red-LED 3개를 조합하여 사용하였다. 실험 결과는 Fig 6.와 같이 Blue-LED의 이산화탄소 감소가 가장 낮았으며, 최초 2,000ppm에서 24시간 측정된 결과 1,200ppm 영역까지만 감소하는 경향을 보였다. 그 이외의 LED 광은 유사한 결과를 나타내고 있지만, 조합광의 이산화탄소 감소는 빛에 노출되는 시간이 길어질수록 높다는 것이 확인되었다. 그리고 Red-LED와 White-LED 중 이산화탄소의 감소는 동일한 감소 경향을 보이지만, 노출시간이 길수록 Red-LED 쪽이 이산화탄소 감소가 높다는 것을 확인할 수 있었다. White-LED의 경우는 950ppm영역에서 이산화탄소의 감소가 900ppm대를 유지하였다. 그러나 Red-LED의 경우 2,000ppm에서 지속적으로 감소하고 720ppm정도를 유지하였다. 따라서 식물공장의 광원으로는 Blue-LED와 Red-LED를 3:3 정도로 조합한 적색이 강한 광원에서 이산화탄소의 감소효과가 높으며, 적색광만 사용하는 것보다 광합성에 주요한 작용인 피아토크롬의 순환을 활성화하기 위해 청색광을 함께 사용하는 것이 효과적이다. 그리고 White-LED

를 사용하는 경우 광합성에 불필요한 파장이 전체 광장 영역에 포함되어 있으므로 효율적인 면에서 파장대가 450nm 영역인 Blue-LED와 650nm 영역인 Red-LED를 조합하여 사용하는 것이 광합성 활성화에 도움이 된다는 것이 확인되었다.

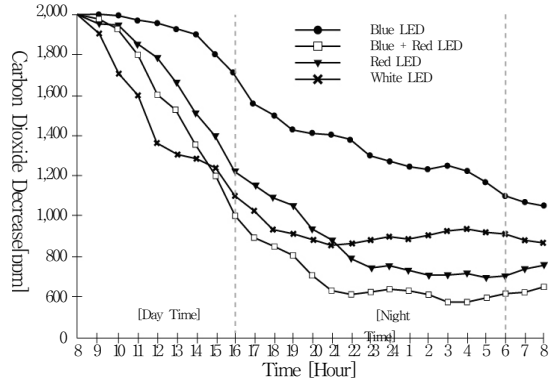


Fig. 6. Day of Carbon Dioxide Change in LED Color

Table 3. Growth Test Composition of LED Light Color

	Test1 (Blue-Red)	Test2 (White)
Composition of LED Light Color	5:1	White Only
	4:2	
	3:3	
	2:4	
	1:5	

2.3 광색조합에 따른 식물성장의 변화

위의 실험결과로부터 LED 색상 조합에 따른 식물의 성장을 확인하기 위하여 Red-LED와 Blue-LED의 조합을 Table 3.과같이 조합하여 2주간 동안의 성장을 관찰하고 White-LED와 비교하였다. 그 결과는 Fig. 7, Fig 8과 같다.

청경채의 성장은 Blue-LED 개수가 많은 ①은 38mm, ②는 51mm, Red-LED가 많은 ④는 95mm, ⑤는 82mm, Blue-LED와 Red-LED의 개수가 동일한 ③은 78mm로 측정되었다. 앞의 실험과 같이 청색광이 강할수록 식물의 성장이 낮으며 적색광이 강할수록 성장이 높다는 것이 확인 되었다. 그리고 ①과 ②의 성장에 대하여 White-LED의 경우는 ①과 ②에 비하여 189%, 141.2% 높으며, Red-LED인 ③, ④, ⑤는 White-LED에 비하여 108.3%, 132%, 114% 높은 결과를 나타내고 있다. 따라서 Fig 9와 같이 파리토크롬의 광전환 과정에서 파리토

크롬이 활성화되는 적색광과 비활성화 되는 청색광을 동일한 3:3의 비율로 하거나 4:2, 또는 5:1의 비율로 적색광을 강하게 유지 하는 것이 식물성장에 효과적인 것이 확인되었다[26].

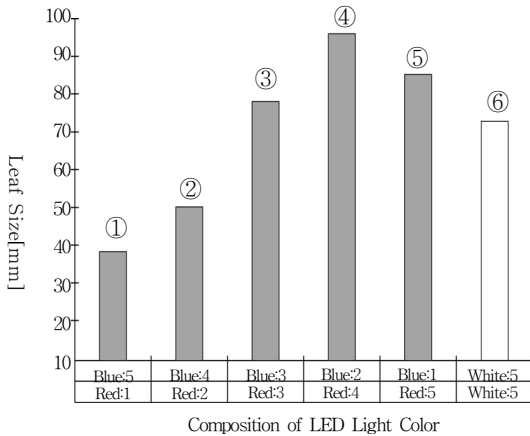


Fig. 7. Measurements of Plant Growth by Combine LED Color



① Blue+Red=5:1, ② Blue+Red=4:2, ③ Blue+Red=3:3
④ Blue+Red=2:4, ⑤ Blue+Red=1:5, ⑥ White-LED

Fig. 8. Plant Growth by Combine LED Color

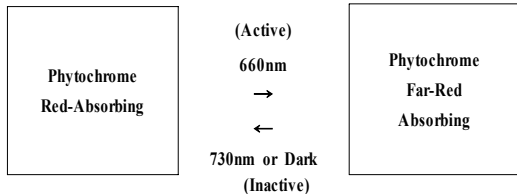


Fig. 9. Phytochrome Photoreversibility System

따라서 식물의 성장에 영향을 주는 광합성과 피아토크롬 효과를 높이기 위하여 광원의 파장을 450nm와 650nm영역에서 선택적으로 사용하거나 혼합하여 사용

하는 것이 바람직하다. 특히, 청색과 적색을 같은 비율로 사용하는 것보다는 적색광과 청색광을 4:2비율로 구성하여 사용하는 것이 식물공장에서는 효과적이다.

3. 결론

본 연구는 인공광을 사용하는 ‘완전제어형 식물공장’을 대상으로 식물 광합성에 대한 광색의 영향과 식물광합성에 적합한 광색을 복수의 실험을 통하여 확인하였다. 첫 번째 실험은 LED 광색별 성장을 확인하여 식물 성장에 효과적인 광색을 확인하였다. 두 번째 실험은 광색의 조합에 따른 이산화탄소 감소 정도를 확인하여 광합성 활성화를 확인하였다. 세 번째 실험은 선행한 실험의 결과로부터 각광색의 조합비율에 따른 식물의 성장 정도를 확인하였다. 상기의 실험 결과로부터 식물공장에 적합한 광색은 적색계열의 LED가 가장 성장이 높았으며, 일반적으로 사용되는 백색광은 적색광보다는 성장이 낮게 나타났다. 그리고 청색광은 가장 낮은 성장을 보였다. 광색의 조합에 따른 공기 중 이산화탄소의 감소 정도를 비교하면 Red-LED + Blue-LED를 혼합한 광에서 이산화탄소의 감소가 가장 많이 감소하는 경향을 보였다. 그리고 Red-LED + Blue-LED의 조합 비율을 5:1, 4:2, 3:3, 2:4, 1:5로 하여 식물의 성장을 확인한 결과, Red-LED + Blue-LED 비율이 4:2 > 5:1 > 3:3 > 2:4 > 1:5의 순으로 높게 나타났다.

따라서 식물의 성장을 위한 광색은 적색계열의 광원을 사용하여 피아토크롬 효과를 증가시키는 파장대인 650nm인 적색광과 암반응을 유도하는 450nm의 청색광의 비율이 3:3 또는 4:2 정도 조합하여 사용하는 것이 매우 효과적이다. 그리고 모든 파장대를 가지는 백색광을 사용하는 경우, 성장 초기에 사용하고 식물이 어느 정도 성장한 뒤에는 혼합광을 사용하는 것이 식물공장의 효율 향상에 바람직하다는 것이 확인되었다.

LED는 에너지 효율이 높지만 형광등보다 열을 많이 발생시키는 단점이 있으므로 사용공간의 열 제거와 냉방이 필수적이다. 따라서 LED사용에 대한 재배공간의 열 분포 및 열 유동을 실증적인 실험을 통하여 확인해야한다. 특히, 향후 식물공장의 기술 표준화와 보급 확산을 위하여, 본 연구의 결과와 함께 재배 면적에 따른 적절한 재배 수량을 추가적인 실험을 통하여 연구해야 할 필요가 있다.

References

- [1] Jong Won Lee, "Overseas Smart Agriculture Case", World Agriculture, Korea Rural Economic Institute, 2016.
- [2] Hyun Hwan Kim, "Study on Environment Optimization in a Plant Factory Using Artificial Light", Rural Development Administration, 2014.
- [3] Young Chul Um, "Research on the Establishment of High Quality Vegetables Production Techniques for the Industrialization of Plant Factories and Their On-Spot Demonstration Abroad", Rural Development Administration, 2014.
- [4] Kong In Lee, "On-farm Research of Element Technologies for Plant Factory", Rural Development Administration, 2016.
- [5] Han Sung Koo, Jea Hong Min, Joo Young Park, "Survey of ICT-Agriculture : 2015 Electronics and Telecommunications Trend", Electronics and Telecommunications Research Institute, 2015.
- [6] Masamoto TAKATSUJI, "The Development to a Plant Factory", J. SHUTA, 24(3), pp. 163-166, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2525/shita.24.163>
- [7] Masamoto TAKATSUJI, "Full Control Plant Farm", pp. 24-37, OHMSHA, 2007.
- [8] Masamoto TAKATSUJI, "The Basis and Practiest for Plant Factories", Shokabo, pp. 38-45, 1996.
- [9] Masamoto TAKATSUJI, Yasuhiro MORI, "LED Plant Farm", pp. 32-33, Nikankouyou Shimbum, 2011.
- [10] Jung Eek Son, Jong Hwa Shin, Tae In Ahn, "Quantitative Measurement of Carbon Dioxide Consumption of a Whole Paprika Plant Using a Large Sealed Chamber", Kor. J. Hort. Sci. Technol, vol. 29, no. 3, pp. 211-216, 2011.
- [11] Jung Eek Son, Mi Kyung Cha, Ju Sung Kim, Jong Hwa Shin, Young Yul Jo, "Practical Design of an Artificial Light-Used Plant Factory for Common Ice Plant", Protected horticulture and Plant Factory, vol. 23, no. 4, pp. 371-375, 2014.
- [12] Jung Eek Son, Jong Suk Park, Han Young Park, Analysis of Carbon Dioxide Changes in Urban-type Plant Factory System, Horticulture Environment and Biotechnology, vol. 40, no. 2, pp. 205-208, 1994.
- [13] Bo Gyoung Gim, Wan Jik Lee, Seok Yeol Heo, "Construction of a Testbed for Ubiquitous Plant Factory Monitoring System Using Artificial Lighting, Korean Institute of Information Technology, Proceeding of KIIT summer Conference, pp. 272-275, 2010.
- [14] Mi Kyung Cha, Ju Hyun Cho, Young Yeol Cho, "Growth of Lettuce as Affected by Light Quality of LED in Closed-Type Plant Factory System", The Korean Society for Bio-Environment Control, Protected Horticulture and Plant Factory, vol. 22, no. 4, pp. 291-297, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12791/KSBEC.2013.22.4.291>
- [15] Yeong-Cheol Um, Sang Seok Oh, Jun Gu Lee, Seoung Yu Kim, Yoon Ah Jang, "The Development of Container-type Plant Factory and Growth of Leafy Vegetables as Affected by Different Light Sources", The Korean Society for Bio-Environment Control, Protected Horticulture and Plant Factory, vol. 19, no. 4, pp. 333-342, 2010.
- [16] Jea Su Kim, Jea Hyun Lim, "A Design of Intelligent Plant Factory Control Structure Based on Ontology for Growth Environment", Korean Society for Internet Information, summer Conference, pp. 107-108, 2010.
- [17] Kwang Kyu Seo, Young shik Kim, Jong Sup Park, "Design of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Automatic Control System for Integrated Environment Management of Ubiquitous Plant Factory", Journal of Bio-Environment control, vol. 20, no. 3, pp. 169-175, 2011.
- [18] Gye Jea Lim, "A Design of IT-Convergence Plant Factory System Using the Renewable Energy", The Journal of The Korea Institute of Communication Sciences, vol. 40, no. 4, pp. 769-779, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/kics.2015.40.4.769>
- [19] Yong Woong Lee, Beom Seok Seo, Chan Woo Kim. Kyung Hee Kim, Yang Ho Park, "Implementation of Facility Management System for Plant Factory", Journal of the Korea Society of Computer and Information, vol. 16, no. 2, pp. 141-151, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9708/jksci.2011.16.2.141>
- [20] Ji Hwan Yoon, Bong Jo Ryu, Young Shik Kim, "Thermal Flow Characteristics of a Hybrid Plant Factory with Multi-layer Cultivation Shelves", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 11, pp. 7990-8000, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7990>
- [21] Dong Yoon Park, Seong Teak Jang, Seong Ju Chang, "Numerical Study on the Thermal Environment of a Natural Light Based Multi-layered", Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, vol. 13, no. 5, pp. 43-50, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2013.13.5.043>
- [22] Rural Development Administration, Agricultural Information, www.rda.or.kr, (Accessed 2016.01.25.)
- [23] David O. Hall, Krishna Rao, "Photosynthesis : 6 edition", cambridge University Press, 1999.
- [24] Toyoki Kozai, Genhua Niu, "Plant Factory : An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production", Academic Press, 2015.
- [25] Christopher H. Sloper, "The LED Grow Book : Better. Easied. Less Watts", Create Space Independent Publishing Platform, 2013.
- [26] John Golbeck, Art Van der Est, "The Biophysics of Photosynthesis : Biophysics for the Life Sciences", Springer, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-1148-6>
- [27] Yojo IWANAMI, "World of Photosynthesis", KODANSHA, 2014.
- [28] Kozai TOYOKI, "Artificial Light use type Plant Factory", World Science, 2015.

홍 지 완(Ji-Wan Hong)

[정회원]



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

<관심분야>

건축환경, 건축설비, 열환경, 식물공장