한국기계가공학회지, 제13권, 제4호, pp.121～129 (2014.8) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.4, pp.121~129(2014.8)ISSN2288-0771 (Online)

http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.4.121

고효율 LED 식물재배 시스템 개발

황종대#, 고동수*

(# 제주관광대학교, * 지디에스주식회사)

Development of a High Efficient LED System for the Plant Growth

Jong-Dae Hwang#, Dong-Su Ko*

(Received 12 August 2014; received in revised form 18 August 2014; accepted 19 August 2014)

ABSTRACT

This study was carried out to develop an efficient plant growth system that can be controlled by altering the wavelength and illumination using a LED module. If it is possible to develop a system that can be controlled in this manner, utilizing different characteristics in the meaningful wavelength band depending on the growth time or type of plant, the plant growth conditions can be optimized. In order to this, red, green, blue and white LEDs are arrayed in a rectangle, consisting of LED modules which can be combined with each other. Consequently, the array can be used to select the optimal light conditions with monochromatic red, green, blue and white LEDs, or mixed LEDs, for plant growth. Experiments on the characteristics of the wavelengths to evaluate the efficiency of the plant growth system were performed. The usefulness of the system was demonstrated through a cultivation test involving several special plants.

Key Words : LED(발광다이오드), Plant Growth(식물재배), Heat Sink(방열판), Light Wavelength(광파장), Illumination(조도)

1. 서 론

기존의 일반적인 식물재배는 토양에 씨를 뿌리고 태양광에 의한 광합성 현상을 이용하며 수분과 양분을 공급함으로써 이루어졌다. 그러나 기후, 환경에 따른 영향요인이 크고 노지에서 이루어지므로 병해충의 유입이 빈번하여 농약살포가 불가피하였다. 이에 대한 대안으로 인공조명을 이용한 폐쇄된 공간에서의 인공 재배법이 도입되고 있다.

Corresponding Author :
Department of Mechatronics, Cheju Tourism College
E-mail : hjd2123@korea.com
* GDS Co., Ltd.

이는 식물의 광합성이 태양광의 일정한 파장대역에서 이루어지는 점에 착안하여 인공광을 광합성에 유효하게 조사하는 방식이다. 이 방식은 기후, 환경에 의한 영향이 적고 다단재배에 따른 높은 생산성과 병해충의 유입 방지로 무농약재배가 가능하며 연중 계획생산이 가능하다. 인공조명으로는 나트륨램프, 메탈할라이드램프, 재배용 형광등 및 발광다이오드(LED) 등이 사용되는데 그 중에서 LED는 소비전력 대비 광합성 유효 광양자속밀도(PPFD)가 가장 높다.[1]

또한 LED 광원의 Red(R), Green(G), Blue(B), White(W) 각각의 단색광은 고유의 광파장 특성을 가지고 있어 개별광원으로 활용하거나 혼합광으로 조합할 경우 식물의 종류나 생장시기에 따라 의미있는

영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 특히 Lee[2]는 단색광의 파장대별로 어린묘의 웃자람 방지 기능, 해충회피, 생육촉진, 발아억제 및 광합성 증진 등 식물의 광반응이 상이한 효과를 제시하였으며 비타민이나 기능성 물질의 함량을 증가시킬 수 있는 것으로 보고하였다. Um[3] 등은 적축면상추를 비롯한 세 가지 종류의 엽채류에 대하여 다양한 광원을 적용한 결과 품종에 따라 생육정도에 차이가 있음을 밝혔으며 Eun[4] 등은 배양묘의 생장 과정 및 형태 형성에 LED 광원이 미치는 효과를 연구한 결과 LED의 단색광과 혼합광 각각에서 유의한 차이를 발견하였다. LED 단색광 중에서도 특히 적색광과 청색광의 파장대역에서 광합성이 가장 활발한 것으로 보고되고 있으며 Lee[5] 등은 적색/청색광의 비율이 생육과 안토시아닌 함량에 중요한 영향을 미침을 보고하였다.

따라서 식물의 종류나 생장시기에 따라 유의한 파장대역이 상이한 특징을 활용하여 파장과 조도 조절이 가능한 식물재배 시스템을 개발한다면 식물 생장 조건을 최적화할 수 있을 것이다. Lee[6] 등은 LED의 색상과 파장 변화에 따른 식물 성장 비교 연구를 통하여 LED 광원의 R, G, B, W 및 혼합 LED 각각을 식물재배 실험에 적용함으로써 실험에 적용한 식물군마다 각 광원에 반응하는 성장속도가 상이함을 제시하였다. 또한 Bang[7] 등은 LED 광원의 각 단색광을 조합한 7가지 경우의 발광색에서의 잎상추의 생장 및 생육상태를 실험한 결과 적색광과 청색광의 혼합광이 가장 유효하였음을 발표하였으며 Hwang[8] 등은 식물 성장 및 재배에 도움이 될 수 있는 균일한 광원배열을 설계하고 광원의 복사조도 및 휘도 분포 특성을 규명하였다.

이상과 같이 LED 광원을 활용한 다양한 연구가 진행되었으나 대부분의 연구가 실험 목적으로 각각의 LED 광원을 개별 제작하였기 때문에 필요에 따라 언제나 선택적으로 단색광 및 혼합광을 제어할 수는 없었으며 원하는 대역의 파장이나 조도를 연구자 및 사용자가 자유롭게 선택할 수 없는 한계가 있었다.

따라서 실험 혹은 재배 목적에 따라 상시적으로 원하는 파장대역의 LED 광원을 선택하여 식물재배에 활용할 수 있는 LED 식물재배 시스템의 개발이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 이를 위하여 R, G, B, W LED를 일정한 형태로 배열한 후 전기제어를 통하여 최대 15 종류의 단색광 혹은 혼합광을 출력할 수 있도록 LED 모듈을 구성하였으며 각각의 광원에서 어떠한 광파장 특성을 나타내는지 평가하였다. 또한 개발한 식물재배 시스템의 성능을 평가하기 위하여 특용작물인 인삼과 퀴노아에 대한 시험재배를 통하여 본 시스템의 유용성을 입증하였다.

2. 식물재배시스템 개발

LED 식물재배기는 가로 1,000mm, 세로 600mm, 높이 1,800mm의 알루미늄 프로파일 프레임으로 제작하였으며 비교 실험 및 재배효율 증대의 목적으로 3단으로 설계하였다. 상단과 중간단은 R, G, B, W LED를 Surface-mount devices(SMD) 형태로 배열하였으며 하단은 R, B LED를 Chip on board(COB) 형태로 배열하였다. Fig. 1은 식물재배 시스템의 개념도를 나타내는 것으로 프레임(1), 3개의 재배용 Tray(2), LED 모듈(3), 방열판(4), 송풍팬(5) 및 제어부와 전원부 등으로 구성하였다.

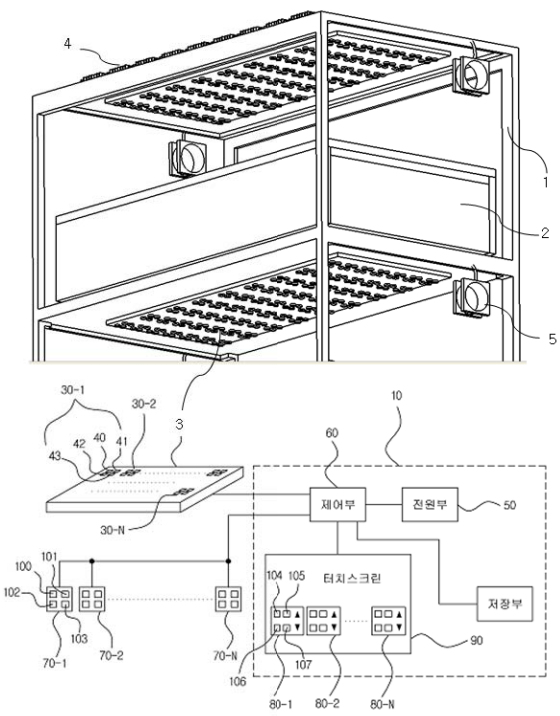
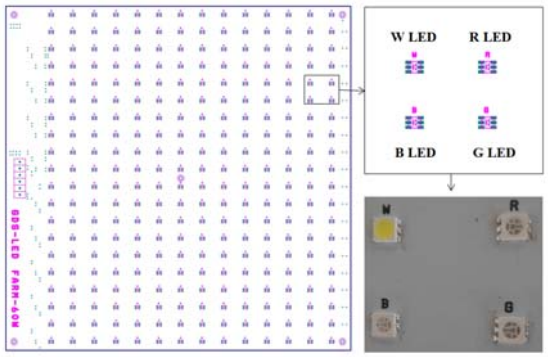


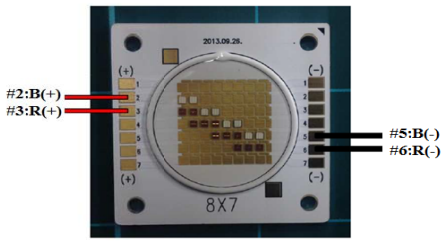
Fig. 1 Schematic of LED system for plant growth

2.1 LED 모듈

식물재배에 유효한 파장 및 조도를 선택적으로 조사하기 위하여 재배단의 상단과 중간단에는 Fig. 2의 (a)와 같이 PCB에 W, R, G, B LED를 SMD 형태로 부착하였으며 하단에는 Fig. 2의 (b)와 같이 광합성에 유효한 B, R LED를 COB 형태로 부착하였다. 구동전압은 22.4~24.4V이고 전류는 210~230mA이며 PWM 구동방식으로 조도 조절을 가능하게 하였다. 조도의 조절과 파장의 선택을 위하여 Fig. 3과 같은 컨트롤러를 장착하였으며 원하는 LED의 색을 개별적으로 혹은 조합하여 선택할 수 있도록 구성하였다. SMD 타입은 총 15종의 단색광 및 혼합광을 구현할 수 있으며 광합성에 유효한 파장 이외에도 해충방지, 웃자람 방지 및 기능성 물질 축적 등 다양한 목적의 파장을 선택할 수 있다. COB 타입은 광합성에 주로 유효한 B LED, R LED 및 B+R LED의 혼합광에 의한 파장을 선택할 수 있으며 SMD 타입에 비하여 PPFD가 높은 특성이 있으므로 성장촉진용으로 사용하면 효과적이다.



(a) SMD type LED module



(b) COB type LED module

Fig. 2 Developed LED module

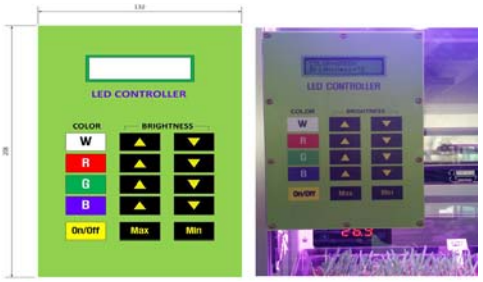


Fig. 3 LED controller for wavelength and illumination

2.2 방열기구

LED는 타 광원에 비하여 효율이 높고 발열이 적은 편이지만 10도 상승 시 수명이 반으로 줄어들고 광효율의 감소, 색온도의 변이, 조명 시스템의 신뢰성 저하 등을 야기하므로 열적 특성을 보완할 수 있는 적절한 방열대책을 마련하여야 한다. Park[9] 등은 LED의 적정 수냉조건 및 열교환량 분석을 통하여 자연냉각식과 수냉식 LED 램프의 발열 특성 실험을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 송풍팬에 의한 강제 공랭식을 적용하였으며 Fig. 4와 같이 온도센서를 부착하여 온도계의 온도가 30℃를 넘으면 프레임의 좌우에 부착된 6개의 송풍팬이 작동하여 일정 온도를 유지한다.

송풍팬에 의한 강제공랭 방식은 LED 광원 전면 및 후면부에 직접 발생하는 복사열의 원활한 방열이 전제되어야 효과가 있으므로 각 재배단의 LED 모듈 후면에 방열판을 부착하였다. 방열판의 효율은 방열핀의 표면적 및 구조에 영향을 받으므로 아래의 Fig. 5와 같이 방열판의 형태를 달리 설계하여 정상상태 열유동해석을 수행하였다. 해석은 ANSYS R14.5의 Steady-State Thermal 모듈을 활용하였으며 초기온도는 20℃이고 열원인 LED 램프의 전면과 후면 온도를 30℃로 설정하였으며 자연대류에 의한 방열로 가정하였다. 이는 온도센서에 의한 송풍팬의 작동 온도가 30℃로 설정되어 있기 때문이다.

해석결과 Fig. 6의 온도장에서는 열원인 LED 모듈이 접촉하는 가운데 부분의 온도가 높고 가장자리 부분의 온도가 낮음을 알 수 있다. 또한 핀의 바닥부에 고온이 집중되고 핀의 상부로 갈수록 온도가

하락하여 방열의 흐름을 파악할 수 있다. 각 경우에 대한 비교 결과 Table 1과 같이 방열판을 사용하지 않은 Case 0에 비하여 Case 1은 2.1℃, Case 2는 2.3℃ 하락하여 각각 초기온도 대비 10.5% 및 11.5%의 온도 하락 효과가 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 방열 효과가 가장 큰 Case 2로 개발된 방열판의 모습이다.

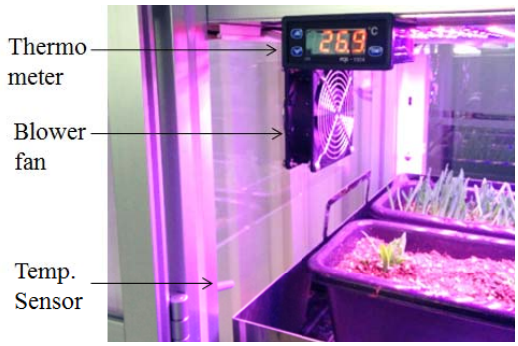


Fig. 4 Forced cooling system by air blower

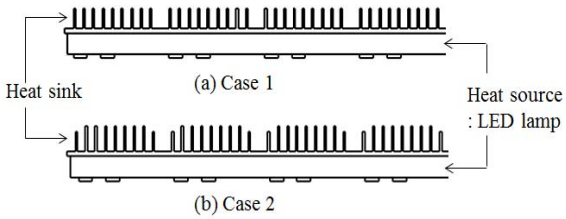


Fig. 5 Heat sink model for thermal analysis

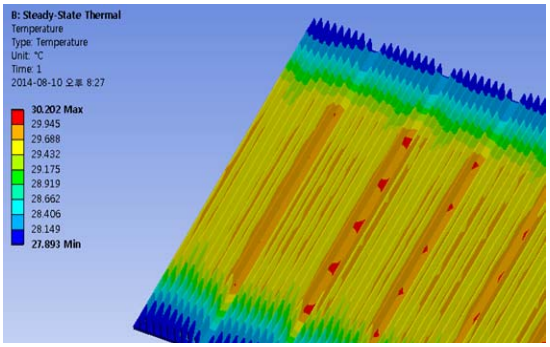


Fig. 6 Thermal analysis by ANSYS R14.5

Table 1 Thermal analysis result of heat sink

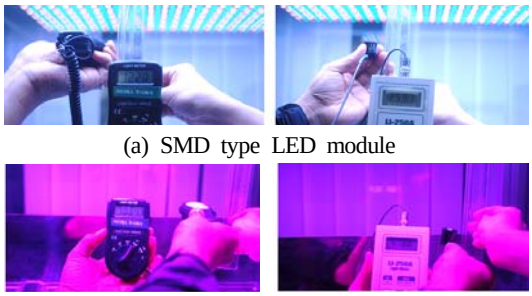
	Temperature(C °)		Heat Flux(W/m^2)	
Case	Min.	Max.	Min.	Max.
0	29.996	30.001	0.10298	47.622
1	28.070	30.175	0.10298	5345.9
2	27.893	30.202	0.10298	6110.3

Fig. 7 Developed heat sink

3. 광파장 특성 및 식물재배 실험

3.1 광파장 특성

광파장 특성에 대한 평가를 수행하기에 앞서 본 식물재배기의 최대 조도 값과 몰 값을 측정하였다. 조도 측정기는 TES사의 1330A 모델이고 몰 측정기는 LI-COR사의 LI-250A 모델이다. Fig. 8은 조도 값과 몰 값을 측정하는 장면으로 SMD LED 모듈에서는 최대 12,200*lux*와 259.7μmol이 측정되었으며 COB LED 모듈에서는 10,640*lux*와 478.8μmol이 측정되었다. 예상한 바와 같이 COB LED 모듈에서 광합성에 유효한 PPFD가 크게 측정되었다. PWM 구동 방식으로 0%에서 100%까지 디밍컨트롤이 가능하므로 재배 목적에 맞게 적정한 조도 범위를 찾는 실험이 필요할 것이다. 또한 조도와 비례하는 광강도의



(a) SMD type LED module

(b) COB type LED module

Fig. 8 Measuring illumination and mol of LED system

세기에 따라 동일한 피크값을 가지는 LED라도 파장의 폭이 달라지므로 조도를 변화시킨 상태에서의 광특성 및 이에 따른 식물의 성장 영향에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서는 식물의 성장 시기 및 생육속도에 직접적인 영향을 미치는 광파장 특성을 파악하기 위하여 15가지 단색광 및 혼합광에서의 파장곡선을 평가함으로써 향 후 해당 파장에서의 식물재배 효과를 분석하는데 유용한 도구로 삼고자 하였다.

Fig. 9는 개발한 LED 식물재배기를 사용하여 광파장을 측정하는 장면으로 15가지 경우의 단색광 및 혼합광에 대하여 측정을 수행하였다. 광파장 측정기는 Spectral products사의 SM-240 Spectrometer

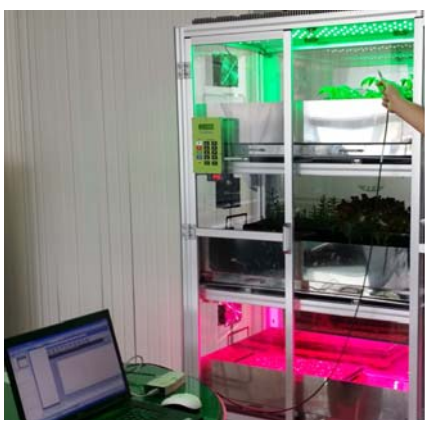
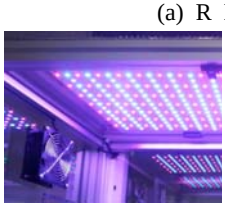


Fig. 9 Measuring wavelength of LED system

(a) R LED



(b) R + G + B LED (c) W + R + G + B LED

Fig. 10 LED light for each case

모델이며 사용 S/W는 SM32-PRO이다.

15가지 경우의 단색광 및 혼합광에 대한 광파장 특성을 평가하기 위하여 Table 2의 LED type과 같이 조합하였다. Fig. 10은 각 경우에 대한 LED 광을 일부 나타낸 것으로 혼합광의 경우 빛의 삼원색에 의한 색의 조합이 이루어지며 Fig. 11과 같이 각각의 LED
광원에 대한 광파장이 상이하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 11의 (a)는 R LED에 대한 광파장 특성 그래프로서 가로축은 광파장(nm)이고 세로축은 광강도를 나타낸다. 광강도는 측정거리에 따라 상이하므로 모든 측정에서 200mm를 유지하였다.

15가지 경우에 대한 광파장 측정 결과 단색광은 하나의 피크파장을 가지나 W LED는 Fig. 11의 (d)와 같이 두 개의 피크파장을 가지고 있다. 개발한 LED 모듈의 경우 R LED는 약 660nm, G LED는 약 520nm, B LED는 약 450nm의 파장특성을 보였다. W LED는 빛의 삼원색이 혼합되어 있으나 파장특성으로 보면 B LED와 G LED의 혼합광으로 분류가능할 것이다. 반도체 소자의 삽입물질 조성에 따라 다소 차이는 있으나 대체로 단색광의 파장대역은 본 실험결과와 유사한 것으로 알려져 있다.

Table 2의 혼합광을 분석하면 크게 4가지로 분류할 수 있다. 즉 광파장 피크값이 ①450nm, 520nm인 경우, ②450nm, 660nm인 경우, ③520nm, 660nm인

Table 2 Peak wave length for each LED light

No.	LED type	Peak wave length(nm)		
a	R			660
b	G		520	
c	B	450		
d	W	450	520	
e	R + G		520	660
f	R + B	450		660
g	G + B	450	520	
h	W + R	450	520	660
i	W + G	450	520	
j	W + B	450	520	
k	W + R + G	450	520	660
l	W + G + B	450	520	
m	W + R + B	450	520	660
n	R + G + B	450	520	660
o	W + R + G + B	450	520	660

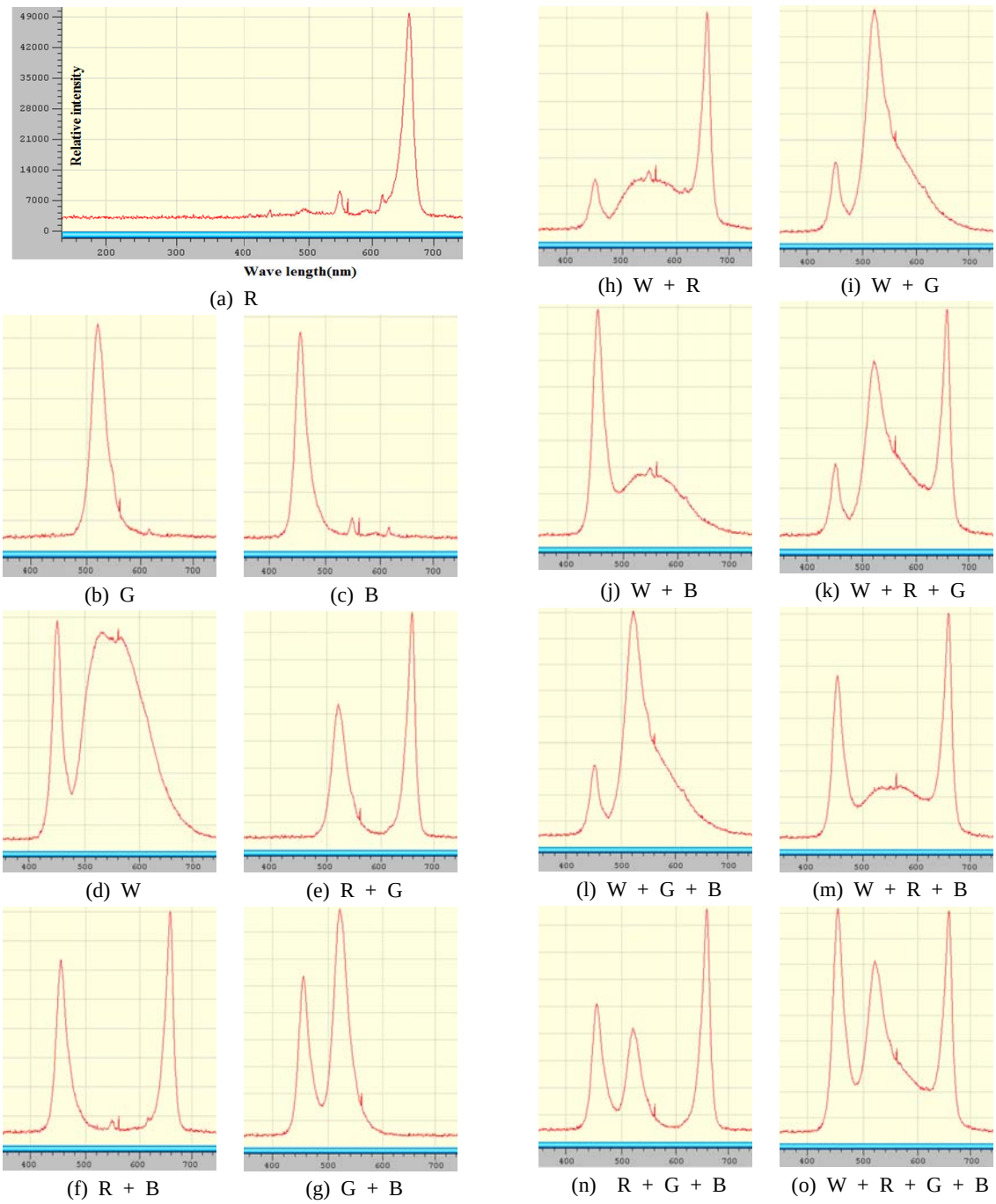


Fig. 11 Wavelength graph for each LED light

경우, ④450nm, 520nm, 660nm인 경우이다. ①은 Table 2 및 Fig. 11의 d, g, i, j, l번 LED에 해당하고 ②는 f번 LED, ③은 e번 LED, ④는 h, k, m, n, o번 LED에 해당한다. 그러나 피크값이 유사하더라도 광파장의 폭이나 형태는 상이함을 알 수 있어 향 후 이러한 광파장 특성과 식물 생장의 관련성을 규명하는 연구가 필요하다.

3.2 식물재배 실험

식물재배 실험에 사용된 특용작물인 인삼은 2014년 4월 22일 파종하여 4월 29일 정식하였으며 5월 27일 까지 7일 단위로 성장과정을 측정하였다. 평균 온도는 약 17.5℃로 Fig. 12와 같이 개발한 재배기의 R,G,B,W LED 혼합광과 기존의 W LED 단색광 및 노지에서의 태양광에 대하여 각각 측정하였다. 측정결과 Table 3 및 Fig. 13과 같이 혼합광, 단색광, 태양광 순으로 성장속도가 빨랐으며 혼합광은 태양광 대비 31% 빠른 성장도를 보였다.

퀴노아는 2014년 6월 2일 파종하여 6월 9일 정식하였으며 7월 7일 까지 7일 단위로 성장과정을 측정하였다. 평균 온도는 약 20.7℃이고 인삼과 같은 방법으로, 개발한 LED 재배기에서의 R,G,B,W LED 혼합광, 기존재배기에서의 W LED 단색광 및 노지에서의 태양광에 대하여 각각 실험하였다. 측정결과 Table 4 및 Fig. 15와 같이 혼합광, 태양광, 단색광 순으로 성장속도가 빨랐으며 혼합광은 단색광 대비 140% 빠른 성장도를 보였다. 이러한 결과로부터 식물 성장에 직접적인 영향을 미치는 R, B 단색광이 혼합되어 있는 혼합광에서 성장도가 가장 높음을 알 수 있다

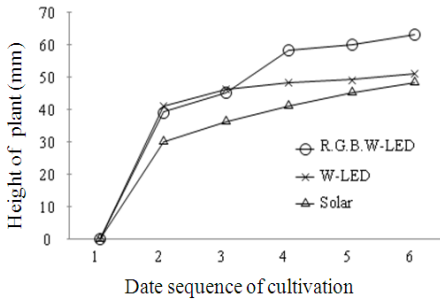


Fig. 13 Comparison of height between each case

(a) R,G,B,W LED (b) W LED (c) Solar

Fig. 12 Measuring height of ginseng for each case

Table 3 Result of the cultivation test to the ginseng

Date of cultivation		R,G,B,W LED(mm)	W LED (mm)	Solar (mm)
Seeding	1	0	0	0
Replanting	2	39	41	30
7 day after	3	45	46	36
14 day after	4	58	48	41
21 day after	5	60	49	45
28 day after	6	63	51	48

(a) R,G,B,W LED (b) W LED (c) Solar

Fig. 14 Measuring height of quinoa for each case

Table 4 Result of the cultivation test to the quinoa

Date of cultivation		R,G,B,W LED(mm)	W LED (mm)	Solar (mm)
Seeding	1	0	0	0
Replanting	2	44	45	46
7 day after	3	90	92	90
14 day after	4	192	104	177
21 day after	5	280	140	280
28 day after	6	360	150	330

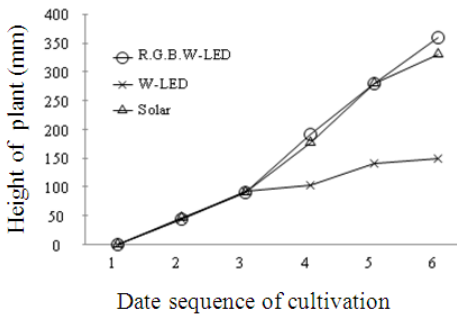


Fig. 15 Comparison of height between each case

광파장을 측정한 Fig. 11의 (d) W 단색광과 (o) W,R,G,B 혼합광 그래프에서 보이는 파장특성을 통하여 재배결과를 분석한 결과 W 단색광에는 광합성에 유효한 B, R 단색광 중 B 단색광의 파장만이 존재하나 혼합광에는 R 단색광에 의한 660nm의 파장이 포함되었음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 식물재배 실험의 광원영향을 해석하는데 본 파장특성 결과는 매우 유용한 도구가 될 것으로 평가된다.

4. 결론

식물의 종류나 성장시기에 따라 유효한 LED 광파장이 상이하므로 사용자가 필요에 따라 최적의 LED 단색광 및 혼합광을 선택하여 식물에 조사할 수 있는 고효율 LED 식물재배 시스템을 개발한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. R,G,B,W 각각의 LED에 개별적으로 전원을 제어하여 최대 15가지 경우의 광원을 구현하였다.
2. 구현된 광원에 대한 광파장 측정 결과 혼합광의 유사파장은 4가지이고 단색광 3가지를 포함하여 7가지의 특이 파장이 구현되며 유사파장 상호간에도 파장 폭 및 형태가 상이하였다.
3. 인삼 및 퀴노아에 대한 재배실험 결과 W 단색광이나 자연광에 비하여 R,G,B,W 혼합광이 생육에 미치는 영향이 컸으며 파장 특성곡선 분석을 통하여 생육에 미치는 원인을 규명할 수 있었다.
4. 사용자가 재배 목적에 맞게 조도 및 광파장을 손쉽게 제어할 수 있고 대조군과의 비교실험 결과 유의한 성장 효과를 보임으로써 고효율 LED 식물재배시스템의 유용성이 입증되었다.

후 기

"이 논문은 2013년 산학연 공동기술개발사업 지원에 의하여 연구되었음."

REFERENCES

(1) Yoon, C. G., and Choi, H. K., 2011. "A Study on the Various Light Source Radiation Conditions and use of LED Illumination for Plant Factory", J. of KIIEE, Vol. 25, No. 10, pp. 14-22.

(2) Lee, S. W., 2010. "Plant Factory and Plant Cultivation Using LED Light", Optical Science and Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 12-19.

(3) Um, Y. C., Oh, S. S., Lee, J. G., Kim, S. Y. and Jang, Y. A., 2010. "The Development of Container-type Plant Factory and Growth of Leafy Vegetables as Affected by Different Light Sources" J. of Bio-Environment Control, Vol. 19, No. 4, pp. 333-342.

(4) Eun, J. S., Kim, Y. S. and Kim, Y. H., 2000. "Effects of Light Emitting Diodes on Growth and Morphogenesis of in vitro Seedlings in Platycodon grandiflorum" J. of Plant Tissue Culture, Vol. 27, No. 1, pp. 71-75.

(5) Lee, J. G., Oh, S. S., Cha, S. W., Jang, Y. A., Kim, S. Y., Um, Y. C. and Cheong, S. R., 2010. "Effects of Red/Blue Light Ratio and Short-term Light Quality Conversion on Growth and Anthocyanin Contents of Baby Leaf Lettuce" J. of Bio-Environment Control, Vol. 19, No. 4, pp. 351-359.

(6) Lee, J. W., Lim, J. W., and Roh, J. Y., 2011. "A Study on Comparative of Plant Growth due to Changes in Color and Wavelength of the LED Grow Light", J. of KIIEE, Fall Conference, pp.

45-48.

(7) Bang, G. W., Kim, Y. H., 2012. "LED for Plant Growth Regulators for the Study of Light on the Device", J. of Digital Policy & Management, Vol. 10, No. 7, pp. 267-272.

(8) Hwang, S. N., Park, H. J. and Ryu, J. R., 2013. "Design and Characteristic of High Functional LED Array used in the Plant Cultivation", J. of KIIT, Summer Conference, pp. 453-460.

(9) Park, J. H., Lee, J. S., Kim, D. E. and Kim, Y. H., 2011. "Analysis of Optimum Water Cooling Conditions and Heat Exchange of LED Lamps for Plant Growth", J. of Biosystems Eng, Vol. 36, No. 5, pp. 334-341.