

식물성장용 사각배광 LED 조명 개발 및 평가

윤중현^{1,a}

¹ 조선이공대학교 광전자정보과

Development and Evaluation of LED Lamp with Rectangular Light Distribution for Growth of Plant

Jung-Hyun Yun^{1,a}

¹ Department of Photoelectronics, Chosun College of Science & Technology, Gwangju 501-744, Korea

(Received January 8, 2014; Revised January 13, 2014; Accepted January 16, 2014)

Abstract: In this paper, plant crops used in the region to grow crops for the LED lighting area of a rectangle to fit the light distribution to maximize the efficiency of a rectangular distribution was made of LED lights. After the fabrication of LED lamps, light distribution, and in the area of 1.2 m × 3 m was the analysis of Illuminance chart. As a result of examining the performance light distribution for total Emin/Eav is 56%, and the target area of the light distribution compared to normal lamps Emin/Eav is improved by about 17%. In addition, plants grown in the area to minimize the outgoing light distribution can be focused on the cultivation area, according to the distance of the plants and be able to have the best luminous efficacy is judged.

Keywords: Plant factory, Plant growth, LED lamp, Rectangular light distribution

1. 서론

현대 농작물은 재배환경의 영향이 매우 중요하게 인식되어 지고 있으며, 식물의 성장과 생육에 가장 큰 영향을 미치는 '빛'의 효율을 높이기 위하여 빛의 파장대에 맞는 LED 조명을 이용하면서 크게 발전되어가고 있다.

식물은 일반적으로 태양광을 통해 성장하지만, 태양광 중에서 광파장 종류에 따라 성장에 미치는 영향은 다르며, 그 예로 660 nm 파장대의 적색광에서는 광합성을 촉진하고, 450 nm 파장대의 청색광에서는

광형태 형성 (phytochrome) 즉, 잎의 형태 형성 촉진이 이루어진다. 즉 식물이 필요로 하는 광파장만을 주사하는 것이 가능하면, 효율 좋은 재배가 가능하여 농업 경쟁력 향상에 있어 핵심 기술이라 할 수 있다 [1].

식물 성장 LED 조명이 내는 빛은 최상의 식물 흡수력에 반응하는 적색과 청색의 파장에 맞춰져 있으며, HID 조명과 같은 기존의 조명에 비하여 적은 에너지 소비만으로도 식물 성장에 꼭 필요한 파장만을 발산하고 이를 이용할 수 있는 장점을 갖게 된다.

식물 성장 및 억제에 관련하여 LED 조명을 응용한 분야가 급속도로 발전하고 있으며, 이를 적용한 제품들이 많이 생산되고 있다. 그러나 현재 생산되는 제품들은 LED 등기구가 bar 형태이거나 원형 광원을 내는 bulb 타입의 원형 등기구이며, 이러한 제품들이 현재 식물 공장이나, 비닐 하우스 농작물 재배 등 현장에서 시범적 구축 등 여러 방면으로 연구되고, 상용화를

a. Corresponding author: jhyun@cst.ac.kr

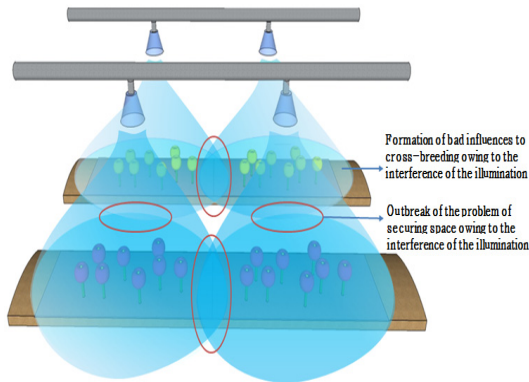


Fig. 1. Defects in LED lighting fixtures for growth of plant.

위해 노력을 하고 있다.

현재, 식물 성장 LED 조명은 단순히 식물 성장에 필요한 빛을 LED를 통해서 농작물에 비추는 개념까지 정립한 상태이고, LED 조명을 좀 더 효과적으로 활용하는 부분은 많이 미숙한 단계이다.

Bar 형태의 제품은 기존에 사용하던 등 및 전원라인들을 재활용하지 못하고, 설치하고자 하는 bar의 형태에 맞추어 다시 시공해야 함으로써 초기 시설비 및 그에 따르는 비용이 많으며, 전체 설치 제품 중 일부가 고장이 발생하였을 시 교체하기가 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. 원형 광원의 렌즈를 사용한 제품들은 작물들의 배열상태에 따라 광원을 설치하더라도 작물들을 벗어나 발산되는 빛의 양이 많아 그림 1과 같이 배지 간 간섭과 광원 손실이 발생하여 전력 대비 효율적이지 못하다는 단점이 있다. 또한, 배지와 배지 사이에 타 재배종을 재배할 경우, 이웃 조명의 간섭으로 인해 재배종 간 악영향이 발생하여, 식물 재배에 애로사항 및 공간 활용에 문제가 발생한다.

적용하려는 식물 또는 식물군 (열매 작물, 잎 작물)에 따라 작물 생육에 효과적인 파장이 구분되어 사용되는데 기존의 제품들은 적색과 청색의 비율이 2:1, 4:1, 6:1 등의 비율로 고정되어 식물군과 식물의 종류에 따라 적절한 종류의 램프를 선정하기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 식물 공장이나 시설 하우스 등 농작물 재배 지역에서 사용되는 LED 조명의 효율을 최대화할 수 있도록 조명을 작물 배지에 맞도록 사각으로 조사할 수 있는 렌즈를 개발하여 광원의 효율을 최대화할 수 있는 사각배광 LED 조명을 제작하여 평가한다.

2. 실험 방법

2.1 사각배광 LED 램프의 구성

기존 적용되고 있는 식물성장 LED 조명들은 원형 광원으로서 실제 직사각형의 작물배지에서 광의 균일도가 떨어지고, 배지 외로 조사되는 광량이 많아 조명의 효율이 좋지 않으며, 옆의 배지에 영향을 미치는 부분이 많아 조명의 효율이 많이 좋지 않았다.

본 논문에서 제안한 LED 램프는 그림 2와 같으며 leading edge 방식을 이용하여 AC전원을 디밍(dimming) 제어할 수 있도록 하였다.

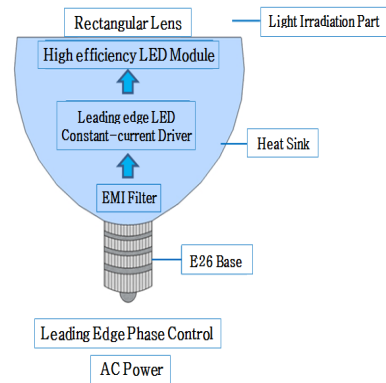


Fig. 2. Structure of LED lamp with rectangular light distribution for growth of plant.

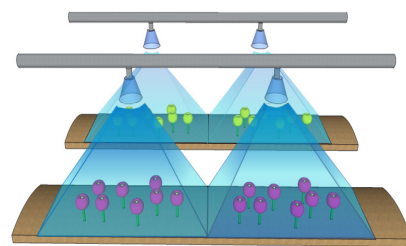


Fig. 3. Rectangular light distribution.

LED 램프는 bulb 타입으로 기존에 사용되던 백열전구, 메탈, 나트륨 등을 LED 등기구로 교체만 함으로써 식물 성장용으로 변환 가능하며, 광원을 그림 3과 같이 직사각형 형태로 집중 조사함으로써, 식물 재배 구역 밖으로 나가는 광원을 줄여 전력 손실을 최소화할 수 있다 [2,3].

2.2 LED 드라이버 설계

본 논문에서 LED드라이버는 PI-Expert사의 LINK 스위치를 이용하여 디밍이 가능하도록 설계하였으며, 보광제어를 사용할 경우 전력량을 조절하여 전력을 절감하여 사용 가능하게 하도록 하였다.

그림 4에서 보면 효율을 88% 정도로 설계한 것을 알 수 있으며, 출력 전력은 안전한 동작을 위하여 7.4 W 정도로 설계하여 충분한 내구성을 갖도록 설계 하였다.

Var	Value	Units	Description
VACMIN	185	V	Minimum Input AC Voltage (Manual Override)
VACNOM	230	V	Normal AC Voltage (For universal design) (w/ the normal voltage is displayed)
VACMAX	265	V	Maximum Input AC Voltage (Manual Override)
FL	60	Hz	Line Frequency (Manual Override)
η	88.0	%	Efficiency Estimate
DIMMING_FLAG	YES	-	Flag indicates Triac dimming is enabled
VMIN_PK	275.77	V	Peak value of voltage at VACMIN
VMAX_PK	374.77	V	Peak value of input voltage at VACMAX

Var	Value	Units	Description
Rfuse	10.00	Ω	Fusible Resistor. See Information section for detail
MOV_VRATED	275	V	MOV Rated Voltage
MOV_ENERGY	23	J	MOV Energy Rating

Var	Value	Units	Description
Device	LN494REG	-	PI Device Name (Manual Override)
Device Mode	Reduced	-	Current Limit mode for device
OVP_FLAG	NO	-	Output Overvoltage Protection Enabled
PO	7.43	W	Total Output Power
VORAIN_Estimated	552.24	V	Actual Estimated Drain Voltage
VDS	380.0	V	On state Drain to Source Voltage
FSNOM	65000	Hz	Nominal Switching Frequency
CP	0.30	-	Continuous/Discontinuous Operating Ratio
LIMITMIN	0.34	A	Minimum Current Limit
LIMITMAX	0.34	A	Maximum Current Limit
IP	0.36	A	Peak Primary Current (at VMIN)
IRMS	0.39	A	Primary RMS Current (at VMIN)
IFD	100.00	μA	Freewheel pin current

Description	Fix	Show me (Ref. #)
Fusible Resistor is used.	Make sure to use a wire-wound, flameproof fusible resistor for	165

Fig. 4. Time constants of LED driver.

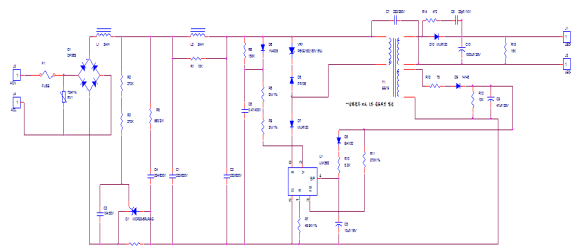


Fig. 5. Circuit diagram of LED driver.

그림 5의 회로도도 LED 드라이버의 회로이다. 디밍시 발생하는 서지전압에 대응하며, 회로의 효율을 높이기 위해서 2가지의 댐핑을 사용한다.

첫 번째는 R-C네트워크를 이용한 패시브 댐핑을 하였으며, 두 번째는 SCR을 이용하여 ACTIVE 댐핑을 사용하였다.

트랜스포머는 삼화전자의 PL-9코어를 이용하여 설계하였다. PL-9의 경우 손실이 약간 큰 편이나, 양산 및 단가를 고려하여 설계하였다.

공극의 경우 고주파 트랜스의 경우 반드시 필요한데, 여기서는 0.3 mm의 갭을 두어 코어가 포화하는 것을 방지하였다. 초기에는 22 mm 코어를 이용하여 설계하였으며, 용량 및 효율은 좋게 나왔으나, 램프 내부의 공간이 부족하여, 19 mm 코어로 변경하여 설계하였다. 이로써 회로에 침투하는 과도적인 써지전압을 효율적으로 차단할 수 있으며, 고전압 MOS-FET을 보호할 수 있도록 하였다.

2.3 LED 램프 설계

본 논문에서 사용될 LED는 품질이 일정하고, 신뢰성이 매우 높은 OSRAM의 제품을 채용하여 LED 램프를 제작하였다. 또한, 360 mA 정도만 흘려주었으나, 최대 1 A까지도 동작이 가능하므로, 출력을 3배 정도로 높일 수 있게 제작되었다. 이 경우 LED드라이버만 설계 변경하여 전류를 높이면 되며, 트랜스포머와 약간의 회로 부품만을 변경하면 출력을 간단히 3배 정도, 즉 20 W급으로 변경하는 것도 가능하도록 하였다.

본 논문에서 LED의 배치는 다양한 수량과 와트 적용을 검토하여 배열하였으며, 사각배광의 형태를 유지하기 위해서 다양한 형태의 등기구를 검토하였으나, 렌즈에서 방사되는 빛을 가리는 그림자가 생성되어 모서리 부분에서 암부가 발생하였다. 따라서 외부에 유리 및 턱을 제거한 그림 6과 같은 형태의 등기구로 최종 제작하였으며, 내부에 LED드라이버를 내장하도록 설계했다.

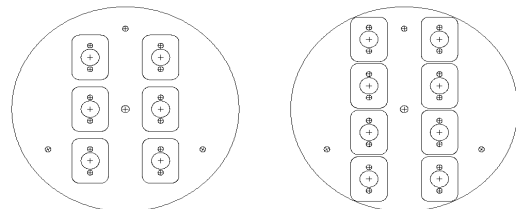


Fig. 6. Arrangement and design of LED.

외부는 충분한 방열이 되도록 개방 형태를 취했으며, 렌즈는 실리콘 방수코팅 마감을 통해서 외부에서 비산되는 먼지나, 수분에 영향이 없도록 하였다.

2.4 렌즈의 설계 및 제작

본 논문에서 사용한 렌즈의 소재는 아크릴 (acryl) 수지라고도 하며 메타크릴 (methacrylic) 산 및 유도체를 중합해서 만든 PMMA (polymethyl methacrylate)를 선정하여 사용하였다. PMMA의 특성은 표면 광택이 좋고, 광선 투과율이 92% 정도인 투명성이 아주 높은 수지이다. 폴리스티렌 수지보다 인장 강도, 굽힘 강도가 우수하며 내약품성, 내유성이 양호하다. 또, 내후성, 내산성, 내알카리성, 내가솔린성이 좋기 때문에 농약을 많이 사용하는 농가에서 사용하기에 적합하다고 고려되어 진다 [4,5]. 그러나 수지를 사용하기 전에 예비 건조가 필요하며 취성이 있다. PMMA 수지는 LG MMA사의 IH830H를 사용하였고, 표 1에 IH830H의 주요 물성치를 나타내었다.

사각배광용 광학렌즈의 설계는 렌즈 설계 전용 S/W인 LightTools (ORA사, USA)를 사용하여 설계하였다. 사각배광용 렌즈는 chip 하나 당 하나의 렌즈가 packaging되는 개별렌즈 형태로 설계하였으며, 사각배광용 LED 모듈이 1미터의 높이에서 종합균제도가 0.4 이상이 나오도록 1.2 × 3 m의 배광면적 가하도록 렌즈를 설계 제작하였다.

Table 1. Main material properties of the IH830H.

Parameter	Value
Total Light Transmittance	92%
Yellow Index	0.4%
HAZE	0.5%
Refractive Index	1.49
Flow Index	2.2 g/10 min
VICAT Softening Point	113℃
Heat Deflection Temperature	94℃
Coefficient of Linear Expansion	6×10^{-5} mm/mm
Specific Gravity	1.18 g/cm ³
Mold Shrinkage	0.2~0.6%

렌즈는 입광부 (inner lens) 설계와 출광부 (outer lens) 설계로 나누어 진행하였다.

기존 LED의 inner 렌즈부는 사각 모양의 배광을 만들기 위해 주로 사각형 형상의 1단으로 설계되어 있으나 1단으로 설계된 렌즈는 사각형 형상으로 광을 조사시킬 수 있으나, LED chip 자체가 가지고 있는 중앙에 집중되어 있는 광을 균일하게 확산 분포시키기에는 역부족 하다. 따라서 본 논문에 적용된 사각배광 렌즈의 광학 설계는 사각형상의 조사 특성을 구

현하는 사각형상의 1단 inner lens부와 균일한 조사 분포를 가질 수 있게 만드는 비구면 형상을 추가하여 2단부를 형성하도록 설계하였다. 또한 outer 렌즈에 있어서는 기존에는 비구면 다항식 일체형의 자유 곡면으로 설계되어 모듈화할 때 자유도에 제약을 받기 때문에 정밀한 배광 제어가 힘들었으나 렌즈 outer부는 베지어 (bezier) 비구면 형상을 활용하여 폭넓은 비구면 형상을 구현함으로써 보다 정밀한 배광제어를 통해 효율성과 조도 균일도를 향상시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 LED 드라이버 제작

본 논문에서 제작한 LED 드라이버는 그림 7과 같다. 역률은 96%이며, 회로 효율은 약 88% 정도로 매우 우수한 효율을 보였다. 역률이 96% 정도면 높은 편이나, 더 높이기엔 디밍에 문제가 발생하였다.

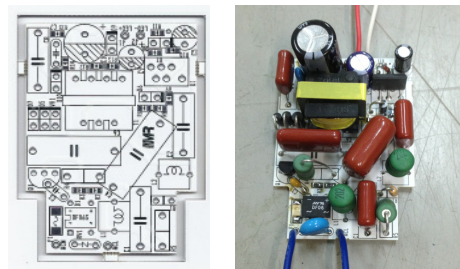


Fig. 7. LED driver.

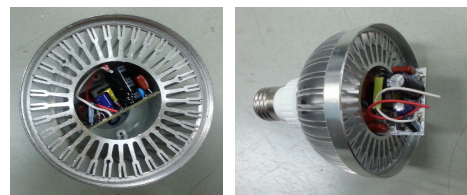


Fig. 8. Assembled LED driver.

LED 드라이버는 LED 등기구 내부에 충분히 수납이 가능한 형태로 제작되었으며, 그림 8과 같이 내부에 간섭이 발생하지 않도록 제작하였다. 특히, 부품 간의 절연 특성을 고려하여 부품사이와 패턴 사이에 공간을 두어 아크 발생에 대한 대비를 하였다.

3.2 LED 램프 제작

그림 9는 본 논문에서 제작한 사각 배광 렌즈가 부착된 LED 램프이다. 사각형 형태의 배광이 자연스럽게 나오는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 9. LED lamp with rectangular light distribution.

3.3 LED 램프의 광학적 특성 및 배광 특성

본 논문에서 제작한 LED 램프의 배광 성능은 최대 조도 (Em)는 88.1[lx]이고 최소 조도 (Emin)는 49.1[lx]이었다.

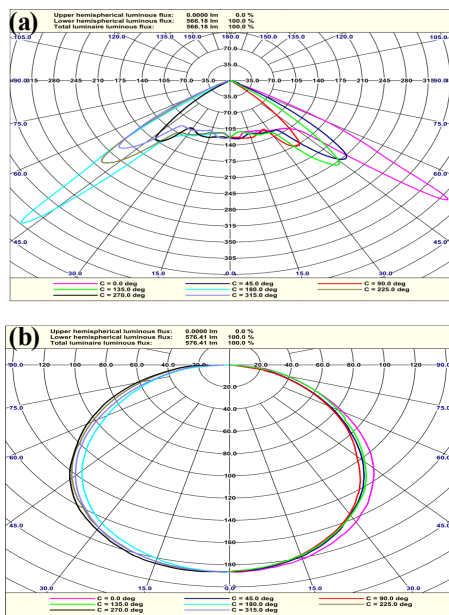


Fig. 10. Light distribution of LED lamp. (a) rectangular LED lamp and (b) general LED lamp.

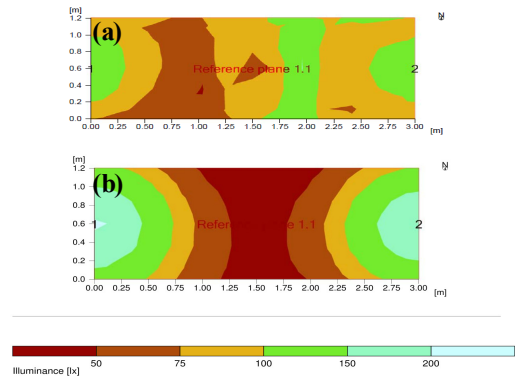


Fig. 11. Illuminance chart of LED lamp. (a) rectangular LED lamp and (b) general LED lamp.

(a)													
[m]	86	80	70	62	71	98	80	97	126	98	93	88	86
1.0	116	95	79	64	54	99	79	99	149	77	84	99	107
0.8	122	98	81	63	53	94	62	80	151	79	90	105	112
0.6	114	90	75	60	49	78	86	84	145	75	85	99	106
0.4	88	76	63	53	53	78	86	101	134	75	73	85	90
0.2													
	Illuminance [lx]												
(b)													
[m]	131	113	88	65	49	40	37	39	47	61	82	105	122
1.0	177	150	112	80	58	46	41	44	55	74	105	140	166
0.8	200	168	125	88	63	50	45	47	59	82	117	157	188
0.6	186	158	119	86	63	50	45	47	59	79	110	146	173
0.4	148	129	102	77	59	48	43	45	53	69	91	116	134
0.2													
	Illuminance [lx]												

Fig. 12. Illuminance table chart of LED lamp. (a) rectangular LED lamp and (b) general LED lamp.

사각배광 종합균제도 (Emin/Eav)는 56%로 일반램프에 비해 목표 면적의 배광균제 정도가 약 17% 향상되어 식물 재배 구역 밖으로 나가는 광원을 최소화하고, 경작 배지 면적에 집중하여 식물들과의 거리에 맞춰 식물들에 최적의 광효율을 가질 수 있는 식물성장용 LED 램프로 사용 가능할 것으로 판단된다. 그림 10에 LED 램프의 배광 분포를 나타내었으며, 그림 11, 12는 1.2 m × 3 m의 분광 분포와 테이블 조도 분포를 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 식물 공장이나 시설 하우스 등 농작

물 재배 지역에서 사용되는 LED 조명을 작물 배지에 맞도록 사각으로 조사할 수 있는 렌즈를 개발하여 광원의 효율을 최대화할 수 있는 사각배광 LED 조명을 제작하였다.

제작된 LED 램프의 배광 분포 및 1.2 m × 3 m의 테이블 분광 분포와 테이블 조도 분포를 분석한 결과 배광 성능은 사각배광 종합균제도 56%로 일반 램프에 비해 목표 면적의 배광균제 정도가 약 17% 향상되었다. 또한, 식물 재배 구역 밖으로 나가는 광원을 최소화하여 경작 배지 면적에 집중시킬 수 있으며, 식물들과의 거리에 맞춰 최적의 광효율을 가질 수 있는 식물 성장용 LED 조명으로 사용 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] J. H. Kim, B. K. Moon, and I. H. Ryu, *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **13**, 4725 (2012).
- [2] W. Chen, T. Lai, M. Wang, and H. Hung, *Expert Systems with Applications*, **38**, 11976 (2011).
- [3] Y. S. Kim and A. S. Choi, *Journal of KIEE*, **25**, 60 (2011).
- [4] Y. J. Chae, M. J. Lee, J. H. Kim, J. H. Hwang, T. Y. Lim, H. S. Jeong, Y. S. Lee, and D. J. Kim, *J. KIEEME*, **26**, 614 (2013).
- [5] I. T. Shin, J. K. Yang, D. J. Lee, and D. H. Park, *J. KIEEME*, **23**, 471 (2010).