



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

경북대학교 공학석사학위논문

균일한 PPFD 공급이 가능한 가정용 식물 재배기

대학원 전기공학과

이성원

2013년 12월

경북대학교 대학원

균일한 PPFD 공급이 가능한 가정용 식물 재배기

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

대학원 전기공학과

이 성 원

지도교수 박 세 광

이성원의 공학석사 학위论문을 인준함

2013년 12월

위원장

인

인

인

경북대학교 대학원위원회

목 차

목 차	i
그림 목차	iii
표 목차	iv
기호와 약어 설명	v
1. 서 론	1
1.1 연구의 배경과 필요성	1
1.2 연구내용	4
1.2.1 식물의 최적 파장 조합	5
1.2.2 재배 작물의 최적 조도	8
2. 광환경 제어 설계	11
2.1 가정용 식물 재배기 구성도	11
2.2 광환경 제어 회로	12
2.3 광환경 측정을 위한 조도센서 위치 및 방향 설계	13
3. 최적 식물 재배를 위한 LED 배열	15
3.1 최적 LED 배열 구조	15
3.1.1 LED 색상 구조 설계	16
3.1.2 광원 균일도 실험	17
3.2 인공광원과 입사면 거리 설계	19
3.3 식물 재배 외형 구조 설계	21
4. 실험과 결과분석	22
4.1 실험조건	22

4.2 광환경 제어 상추 재배 실험	23
4.2.1 일중 태양광 변화에 의한 LED 전력 소모 실험	23
4.2.2 태양광 변화에 따른 전력효율	26
4.2.3 조명방식에 따른 상추 성장 실험	28
4.2.4 듀티비 실험	29
4.2.5 기존 가정용 식물 재배기와 전기요금 비교	31
5. 결 론	33
참고문헌	34
Abstract	36
부록	38

그림 목차

그림. 1 가정용 식물 재배기의 종류	1
그림. 2 엽록소 a와 b의 광 흡수 스펙트럼	6
그림. 3 엽록소 비율이 적용된 광 흡수 스펙트럼	7
그림. 4 가정용 식물 재배 시스템 구성도	11
그림. 5 광환경 제어를 위한 회로 설계	12
그림. 6 광환경 측정을 위한 조도센서의 위치와 방향	13
그림. 7 온습도 센서 및 ATmega128 칩	14
그림. 8 파장 조합을 위한 LED 제원	15
그림. 9 LED 배열 구조	16
그림. 10 광원 균일도 측정을 위한 위치 지정	17
그림. 11 LED와 입사면 거리 차에 따른 조도 값 및 PPFD 값 변화	20
그림. 12 식물 재배 실험 장치	21
그림. 13 실험 중인 수확기의 상추 성장 모습	22
그림. 14 태양광에 의한 LED 전압 변화	24
그림. 15 태양광에 의한 총 PPFD 변화	25
그림. 16 태양광 변화에 따른 소모 전력량	26
그림. 17 태양광에 따른 전력 효율 변화	27

표 목차

표 1 PPFD에 해당되는 광원 별 조도 값	9
표 2 광원 입사 위치에 따른 조도 값	18
표 3 조명방식에 따른 상추 생장 변화	28
표 4 듀티비에 따른 상추 재배 실험	30
표 5 기존 제품과의 전기요금 비교	32

기호와 약어 설명

lx 빛의 조명도를 나타내는 단위

L_B 청색 LED 조도 값

L_R 적색 LED 조도 값

L_T 총 조도 값

L_W 백색 LED 조도 값

P_B 청색 LED PPFD

P_R 적색 LED PPFD

P_T 총 PPFD

P_W 백색 LED PPFD

LED 발광다이오드(Light emitting diode)

PPFD 광합성광량자속밀도(Photosynthesis photon flux density)

PWM 펄스 폭 변조(Pulse width modulation)

1. 서 론

1.1. 연구의 배경과 필요성

가정용 식물공장은 광, 온도, 이산화탄소, 상대습도, 배양액 온도 등의 지상부와 지하부 환경을 최적상태로 제어 및 재배 공정을 자동화하여 식물을 일정하고, 연속적으로 계획 생산하는 기술을 가정에서 가능하도록 하는 시스템이다. 이는 잔류농약, 환경오염 등의 위험으로부터 안전하게 가정에서 직접 작물을 재배 할 수 있어 보급화의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 식물 재배 시스템의 지속적인 운영비 문제가 크게 대두되어 수확기간 및 수확량과 작물 재배 비용간의 비효율 문제로 인해 대중화에 어려운 상황에 놓여있다. 전기 요금을 줄이면서도 폐쇄형 식물공장과 유사한 식물 재배 성능을 위해서는 자연에너지인 태양광을 인공광과 병행 사용하는 연구를 필요로 한다.



- Lighting scheme: Daylight
- Size: 1000 × 300 × 600(mm)
- Harvest time: 16 weeks
- Total power consumption: 26.8 kWh

<Open Type>



- Lighting scheme: LED
- Size: 530 × 340 × 900(mm)
- Harvest time: 10 weeks
- Total power consumption: 60.4 kWh

<Sealed Type>



- Lighting scheme: LED
- Size: 1200 × 800 × 2200(mm)
- Harvest time: 10 weeks
- Total power consumption: 504 kWh

<Sealed Type>

그림 1. 가정용 식물 재배기의 종류

Fig. 1 Types of household plant factory

농업은 기후와 토지 그리고 환경의 영향을 받기 때문에 계절에 따른 제한적인 재배와 농약 사용에 의한 식품 안정성의 결여 등의 문제점으로 인해 인공광을 이용한 식물공장이 부각되고 있으며, 대부분의 식물공장은 생산성 향상을 목적으로 식물의 성장에 최적조건이 되는 광, 온도, 수분, 양분 등을 조절하고, 기후변화와 병해충에 대응하여 안정적 식물 공급이 가능한 완전 밀폐 형태를 갖추고 있다[1]. 형광등, 백열등, 할로겐램프 등 다양한 종류의 광원을 사용하는 식물 재배 기술이 각광받고 있다[2]. 식물 공장 연구에 사용되는 상추는 생육 기간이 짧고, 우리나라에서 소비가 많은 채소이며, 생산적인 면에서 계절적 영향을 받지 않기 때문에 재배 연구에 적합한 작물이다. 따라서 가정용 식물 재배기의 작물 생산을 위한 각종 연구에서 다른 채소류보다 실험 대상작물로 삼는 경우가 많고, 식물공장에서 상추를 재배할 때 그 생장율은 시설재배를 할 경우보다 약 8배 정도 더 빠른 것으로 보고되고 있다[3]. 상추는 청색광의 혼합비율이 43 %까지 높아짐에 따라 생육이 감소된 반면, 엽록소 함량 및 안토시아닌 함량은 크게 증가하였다[4]. 그리고 청경채는 청색광의 비율이 증가할수록 잎몸 길이가 증가하였다[5]. 이처럼 인공광원을 이용하여 재배 시 작물의 따라 적색과 청색을 적절히 혼합하여 사용하는 것이 중요하다[6]. 원하는 파장 조합을 통해 다양한 종류의 식물과 환경에 따른 변화에 효과적으로 대응할 수 있기 때문에 LED를 주 광원으로 하는 기술이 조명 받고 있다. 이에 반해 시간과 계절에 따른 광량의 변화와 불필요한 파장영역 등 균일한 광량 공급이 힘든 큰 단점을 가지고 있는 태양광은 지금껏 식물 공장에서 배제되어 왔다. 연중 환경 변화와 함께 일중 청천공, 담천공 등 구름의 양에 따른 일광의 변화 폭이 커 균일한 식물 재배를 목적으로 하는 식물 재배 시스템에는 적합하지 않았기 때문이었다. 하지만 차양 및 채광시스템의 실내조명 보광 형태로 연구되던 조도 제어 시스템을 식물공장에 적용시킴으로 인공광의 효율적 사용으로 인한 에너지 절감 효과를 높이하고자 한다[7]. 또한 LED의 순간 점멸방식을 통해 재배 작물의 암반응과 명반응을 짧은 시간동

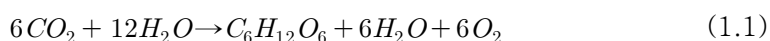
안 반복하여 추가적으로 전력 효율을 높이는 연구를 진행하였다. 이 논문에서는 외부 자연광의 변화에도 항상 일정한 PPFD(광합성광량자속밀도)를 재배작물에 공급하기 위해 조도 센서를 이용한 조도 제어와 LED의 순간 점멸방식에 의한 전력 효율 향상을 높인 조도 제어에 대한 연구를 진행하였다.

1.2. 연구내용

이 연구에서는 조도센서를 이용하여 광환경 제어 및 펄스 폭 변조(PWM)를 이용한 LED 순간 점멸방식의 전력 효율을 높인 가정용 식물 재배 시스템에 대한 연구를 수행하였다. LED 광환경 제어 시스템은 태양광의 세기에 따라 변화하는 조도 센서의 출력 전류를 이용하여 인공광원의 전류를 제어하도록 설계되었다. 식물의 최적 재배 조건을 위한 파장 조합을 위해 적색, 청색, 백색 LED를 조합하였으며, 최대 광포화점을 기준으로 일정한 광량이 공급될 수 있도록 설계하여 유입되는 광량에 따라 인공광원의 광량을 측정하여 실내 조도를 광량의 유입량에 관계없이 설정되어 있는 조도 값으로 일정하게 유지시켜 인공광원의 에너지를 절감하도록 설계하였다[8]. 인공광원과 식물의 재배 면과의 거리 차는 최대 광량에 크게 비례하므로 이를 고려하여 설계하였다. 차양 및 채광시스템에서 사용하는 인공광원 제어 시스템은 빛의 밝기를 기준으로 조도를 일정하게 유지함을 목적으로 하고 있지만 식물 재배를 위해서는 식물의 성장에 실질적으로 관여하는 PPFD로 인해 태양광과 색 종류에 따른 인공광원을 고려하여 설계하였으며, 태양광의 변화에도 일정한 PPFD가 유지되었음을 실험을 통해 확인하였고, 식물의 명반응과 암반응을 인공광원의 순간 점멸 방식을 이용하여 전력 절감효과를 높이기 위한 식물 재배 시스템을 고안하였다[9]. 또한 가정용 식물 재배 시스템에 적합하도록 4인 가족 기준 엽채류 채소의 일일 섭취량인 280 g을 기준으로 수확량과 소비량을 맞추어 1회 수확 시 생산되는 채소의 개체를 결정하고, 전력 대비 채소 생산성을 높이도록 전력요금을 계산하여 연구를 진행하였다[한국영양학회]. 이 연구에서 설계된 광환경 제어형 식물 재배 시스템은 태양광의 변화에도 일정한 PPFD를 공급하여 식물의 성장 영향을 최소화하면서 전력효율을 높여 전력 대비 재배 작물 생산량을 높이는 시스템으로 향후 연구 방안 및 가능성과 기대효과를 이 연구에서 제시하였다.

1.2.1. 식물의 최적 파장 조합

식물이 성장하는데 필요한 매개체에는 여러 가지가 있지만 가장 핵심적인 요소로 빛, 물, 이산화탄소, 영양분들이 있다. 이 중 식물의 종류에 따라 달라지는 영양분을 제외하면 공통적으로 빛과 물, 이산화탄소가 가장 핵심적인 요소로 지적된다. 이 중 식물의 성장 속도와 가장 밀접한 관련이 있는 빛은 광합성에 중요한 요소로 엽록체를 통해 명반응으로 포도당과 산소를 생성하고, 암반응에서 포도당을 합성하여 물이 생성된다.



광합성의 전체 식은 식 1.1과 같다. 광합성이 일어나는 엽록체에는 그라나(grana) 속에 함유된 엽록소가 있는데 엽록소에는 a, b, c, d, e와 박테리오클로필 a와 b 등이 포함되어 있다. 이 중 엽록소 a와 b의 개체가 가장 많으며 약 3:1의 비로 존재하고 있다. 이로 인해 식물 재배에 쓰이는 광원들은 이 엽록소 a와 b가 흡수할 수 있는 파장대를 기준으로 제품화되고 있으며, 식물 재배에 사용되는 광원에는 할로겐등, 형광등, 백열등 LED 등 많은 종류의 등이 사용되지만 특정 침두 값 파장을 가지는 LED가 보편적으로 사용되고 있다[10]. 특히 가장 높은 흡수율을 가지는 적색 LED와 청색 LED를 혼합하여 사용되는데 이 최적 LED 파장 조합에 대한 기존 식물 재배 기술들의 식물 재배용 조명 시스템은 광합성 반응 스펙트럼의 침두 값 파장에만 초점을 맞추어 전 가시영역에 걸쳐 분포된 광합성 반응 스펙트럼을 고려하지 않는 방식으로 단지 식물의 빠른 성장만을 위해 설계된 방법이기 때문에 식물의 최적 성장에 적합하지 않다. 최대 침두 값을 제외하고 약 500 nm에서 650 nm 사이의 값들은 일반적으로 식물들이 90% 이상 반사하는 파장대로 보색 대비로 인해 녹색의 형태를 띠는 이유가 이 때문이다. 생산성 및 상품성에만 초점을 맞추기 때문에 낮은 흡수 영역의 파장대가

고려되지 않고 있다. 하지만 균일한 성장과 생산성 향상을 목적으로 하는 식물공장과는 달리 가정용 식물 재배기에서는 4인 가족 기준 채소 공급량을 유지하면서 최적 성장이 필요하므로 이에 대한 추가적인 설계가 필요하다.

식물의 광 흡수 스펙트럼은 그림 2와 같이 440 nm, 470 nm, 650 nm, 680 nm에서 첨두 값 파장의 흡수율에 의해 일반적인 식물 재배용 인공광원들은 이 첨두 값 파장을 조합하여 사용되고 있다. 그러나 실제로는 가시광선 전 영역에 걸쳐 광 흡수가 일어나고 있으므로 첨두 값 파장 조합만으로는 식물의 성장 저해 현상이나 결핍 영양소 문제를 야기 할 수 있기 때문에 이 연구에서는 백색 LED를 추가로 사용하여 가시영역에 고루 분포된 광 흡수 스펙트럼에 일치시키도록 하였다[11].

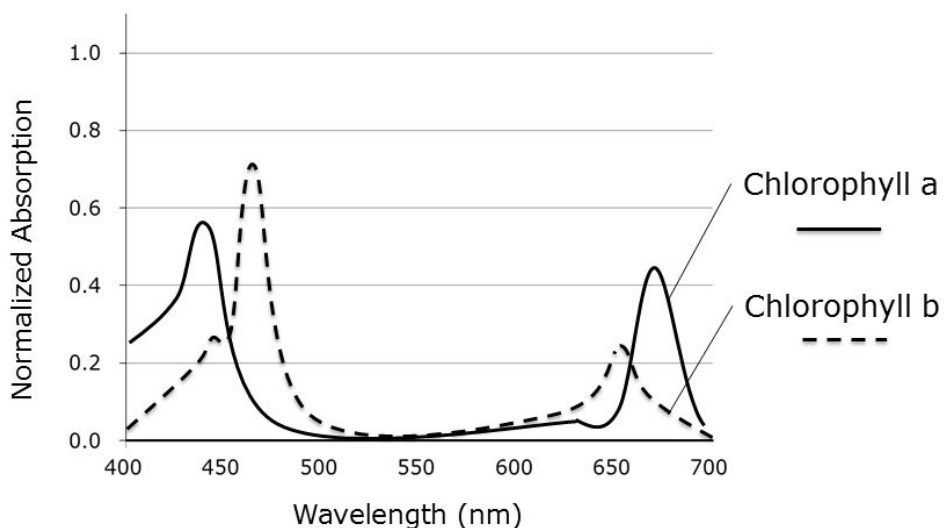


그림 2. 엽록소 a와 b의 광 흡수 스펙트럼

Fig. 2 Optical absorption spectra of chlorophyll a and b

그림 3은 침두 값 파장인 450 nm 파장과 660 nm 파장을 갖는 적색과 청색 LED를 식물의 엽록소 a와 b의 3:1 비율에 따라 결합 사용한 그림이다. LED의 침두 값이 협소하여 5 ~ 10 nm 파장 변화만 발생하여도 식물 성장에 큰 영향을 받는데 엽록소 a와 b의 비율에 맞춘 광합성 반응 스펙트럼의 경우 660 nm의 적색 LED와 거의 일치하는 반면, 청색 파장 영역의 경우 침두 값이 2군데로 분산되는 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위해 440 nm의 침두 파장 값과 470 nm 침두 파장 값의 중간 값을 취하면서, 광합성 반응 스펙트럼과 최대한 중첩되어 효율성이 높도록 청색 LED 파장의 침두 값을 조정하여 적색 LED와의 비율을 맞춰 설계하였다.

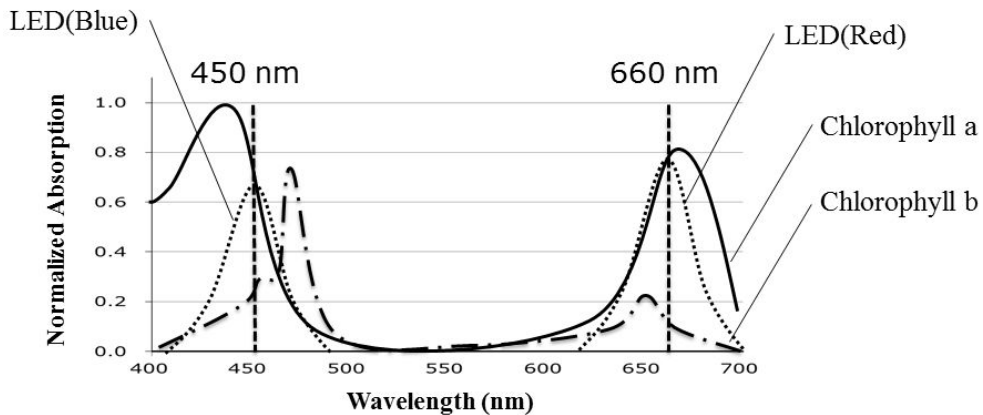


그림 3. 엽록소 비율이 적용된 광 흡수 스펙트럼

Fig. 3 Optical absorption spectrum of chlorophyll ratio is applied

1.2.2. 재배 작물의 최적 조도

재배작물은 표 1과 같이 종류에 따라 5,000 lx에서 70,000 lx까지 다양한 광량을 요구한다. 가정용 식물 재배에 적합한 작물을 선별하기 위해 성장시간과 광량, 상품성을 고려하여 엽채류 중에서 상추를 선택하였다. 상추의 성장에 최대 필요한 광포화점이란 식물의 잎에 빛을 쏘이면 빛의 세기에 비례해 증가하는 광합성의 속도가 더 이상 증가하지 않을 때의 빛의 세기를 말한다. 그 이상의 광량에서는 상추의 추가적인 성장효과가 없으며, 보다 높은 빛의 조사는 고사될 위험성이 있다. 식물의 성장에 최소한의 광량을 나타내는 광보상점의 경우 식물에 의한 이산화탄소 흡수량과 방출량이 같아져서 식물체가 외부 공기 중에서 실질적으로 흡수하는 이산화탄소의 양이 0이 되는 광의 광도를 말하며, 광보상점 이하의 광량은 광합성을 일으키지 못해 식물의 성장 저해를 받는다. 식물 재배 연구의 주체인 상추가 최적 성장을 하기 위해서는 300 PPFD가 항시 일정하게 공급받아야 하지만 전력 대비 최적의 성장을 위해서는 260 PPFD의 광량이 공급되어야 한다[부록 2]. 이는 광포화점을 항시 유지하는 것으로 발생하는 전력 손실량과 작물의 재배량에 큰 차이가 없는 것과 일광이 0 lx에서 최대 150,000 lx (2,777 PPFD)까지 변화폭이 크고, 상추의 최적 광량 이상을 유지하는 시간이 하루 평균 8시간 이상이기에 최적 PPFD 값의 기준으로 260 PPFD를 설계하였다.

표 1은 광원 종류에 따른 1 PPFD에 해당되는 조도를 나타낸다[12]. PPFD의 단위는 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 를 사용하며 1 m^2 면적에서 1 초 동안 통과하는 mol량을 나타내는 수치이다. 태양광의 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 PPFD에 해당하는 조도는 54 lx이므로 한국인에게 가장 많이 섭취되는 엽채류 중 하나인 상추의 최대 광포화점인 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이 되기 위한 태양의 조도는 16,200 lx이다. 그러므로 태양광의 조도가 16,200 lx 이상에서는 더 이상 광합성 작용이 증가하지 않아

비효율적이다. 또한 지속적으로 광포화점을 유지하는 것 역시 생산 대비 효율이 낮기 때문에 최대 광포화점에서 약 10 % 정도 감소된 $260 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 을 기준으로 하여 14,040 lx를 최적의 광량으로 설정하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 상추의 광포화점을 기준으로 인공 광인 백열등의 조도는 14,500 lx이고, 형광등의 조도는 22,000 lx이다. 이에 반해 LED의 경우에는 2,982 lx(적색), 3,570 lx(청색)로 백열등과 4.06 ~ 4.86배, 형광등과 6.16 ~ 7.37배의 조도 차이를 보인다. 이는 식물재배에 있어 LED가 광 효율 및 전력효율에 우수함을 나타낸다. 또한 적색광과 청색광의 혼합은 앞서 제시한 광합성 반응 스펙트럼에 의해 유리한 식물 성장 효과를 나타내며, LED의 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 PPFD에 대한 조도는 혼합 광 비율에 따라 달라지므로 이를 고려해야 한다[13].

표 1 PPFD에 해당되는 광원 별 조도 값

Table 1 Amount of PPFD according to the type of light

	Daylight	Incandescent	Fluorescent lamp	LED		
				red	blue	white
Illumination (lx)	54.0	50.0	74.0	9.9	11.9	68.2

사용되는 LED의 개별적인 조도 값을 통해 PPFD를 구하고 합산하는 방식을 사용한다.

$$L_T = L_R + L_B + L_W \quad (1.2)$$

$$P_T = P_R + P_B + P_W \quad (1.3)$$

식 (1.2)에서 L_T 는 합산된 LED 바의 총 조도를 의미하며, L_R , L_B , L_W 는 각

적색, 청색, 백색 LED에 대한 각 조도를 의미한다. 식 (1.3)에서 P_T 는 합산된 LED 바의 총 PPFD를 나타내며, P_R , P_B , P_W 는 각 적색, 청색, 백색 LED에 대한 각 PPFD를 의미한다. 상추의 최적 조도 값을 기준으로 L_T 를 14,040 lx로 하게 되면 광원의 종류뿐만 아니라 LED 색 종류에 따른 PPFD가 다르기 때문에 실제 260 PPFD와 다르게 된다. 그러므로 최적 광량을 설정하기 위해 P_T 에 적용하여 적색, 청색, 백색 LED의 각 PPFD 값을 구하여 합산된 총합이 260 PPFD가 되도록 하였다.

2. 광환경 제어 설계

2.1. 가정용 식물 재배기 구성도

그림 4는 가정용 식물 재배기의 전체 구성도이다. 인공광과 태양광을 함께 측정하도록 조도센서를 배치할 수 있으나 인공광의 경우 색 종류에 따른 PPFD가 다르므로 조도센서는 태양광의 정보만 받도록 배치하였다. 또한 상추의 최적 광량을 기준으로 태양광과 인공광을 항상 일정하게 유지하도록 인공광의 배열 구조 설계와 컨트롤러 회로 설계, 인공광과 재배 면과 거리 차 설계, 온습도 센서를 통한 최적 환경 제어를 설계하였다. 앞으로 산소센서, 이산화탄소 센서를 적용하여 통신장치를 통해 사용자의 휴대기기로 항상 식물의 성장환경을 파악할 수 있는 시스템 구현이 가능하다.

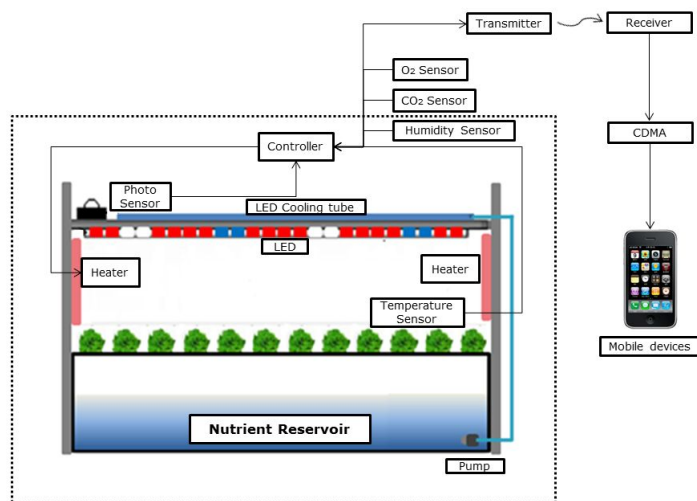


그림 4. 가정용 식물 재배기 구성도

Fig. 4 Configuration of household plant cultivation

2.2. 광환경 제어 회로

그림 5는 광환경 제어를 위해 설계된 회로 그림이다. 외부 광 정보에 의한 LED의 조도 제어를 위해 BJT와 조도센서(ST-1KLB)를 사용하였다. 조도센서의 경우 약 120° 의 광 흡수각을 가지고 있으며 수직방향에서 가장 높은 광 흡수율을 보였다. 조도센서를 통해 제공된 광 정보에 의해 Q_1 의 base단 값이 바뀌고, BJT에 의한 I_Q 의 값이 LED에 공급되는 전류를 변화시켜 조도를 조절하도록 하였다. LED의 구동을 위해 정격전압인 DC 12 V를 인가하였으며, 555 타이머를 통해 특정 듀티비를 갖는 구형파로 변환하였다. 일광의 변화가 0 lx에서 150,000 lx인데 반해 조도센서를 통해 입력되는 값이 0 mA에서 10 mA로 LED를 구동하기에 용이하지 않아 달링턴 회로를 이용하여 LED 변화 폭을 증폭시켰다.

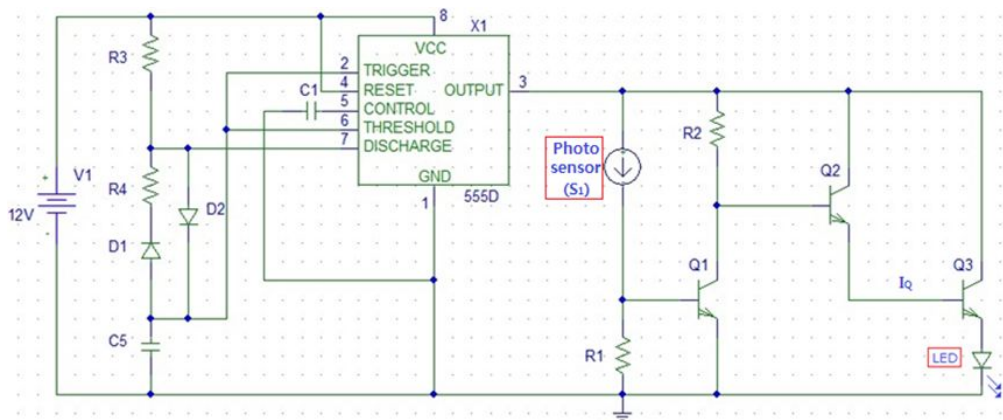


그림 5. 광환경 제어를 위한 회로 설계

Fig. 5 Circuit design for photo-environment control

2.3. 광환경 측정을 위한 조도센서 위치 및 방향 설계

태양광은 연중, 일중에 따라 위치가 달라지므로 조도센서에 입사되는 입사각 역시 달라진다. 1개의 조도센서 사용으로는 수직 상태의 태양광만이 유효하게 측정되므로 복수의 조도센서가 필요하였으며, 수직 방향의 조도센서를 제외하고 4개의 조도센서를 동서남북 4 방향으로 각 지면과 60°의 각도를 유지하도록 그림 5와 같이 설계하였다. 조도센서의 측정범위는 120°의 각도 내에서 유효하기 때문에 각기 다른 방향으로 설치되어 있어도 중복으로 빛 검출이 가능하다. 5개의 조도센서 중 기준 값 이상의 빛이 검출되는 것을 기준으로 광량 정보가 입력되고, 이를 통해 LED에 공급되는 전류를 제어하도록 설계하였다. 또한 그림 7에서처럼 온습도 센서를 추가하여 식물의 재배 환경을 일정하게 유지하도록 설계하였다.

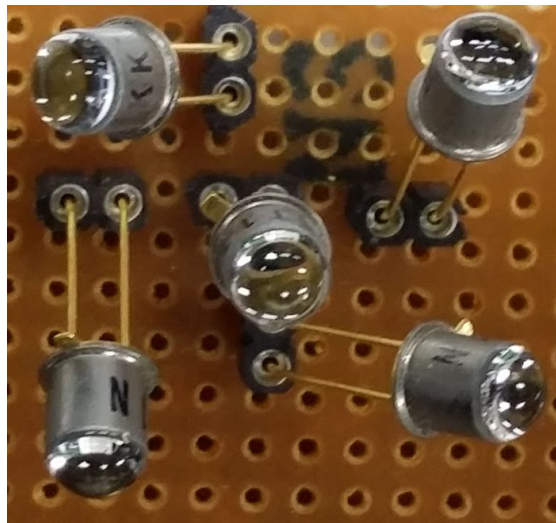


그림 6. 광환경 측정을 위한 조도센서의 위치와 방향

Fig. 6 Measurement for the optical environment of the location and direction of the ambient photo sensor

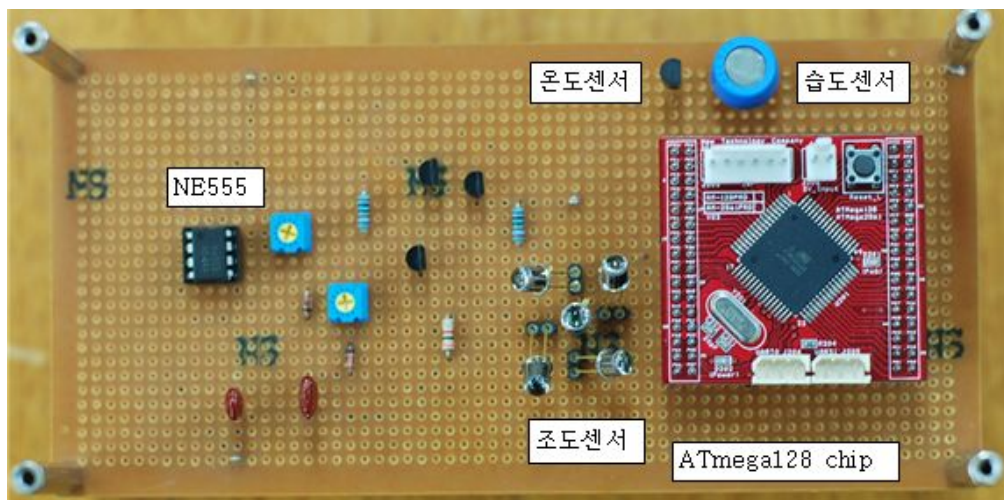


그림 7. 온습도 센서 및 ATmega128 칩

Fig. 7 Humidity and temperature sensors, ATmega128 chip

3. 최적 식물 재배를 위한 LED 배열

3.1. 최적 LED 배열 구조

그림 8과 같이 인공광원으로 사용된 LED는 표면 실장 소자(SMD) 3개로 구성된 LED 칩 12개를 병렬로 연결한 LED 바를 사용하였다. 재배 효율을 높이기 위해 3열 15개체 구조의 LED 배열과 성장 작물의 잎으로부터 수직으로 빛이 발산하도록 LED를 배열했으며, LED 칩 고유의 광조각을 가지고 있어 재배 면과의 거리에 따른 광 균일도를 고려하였다. 1열 5개체 상추를 병렬형태로 3열 구성하여 재배 면적 공간 대비 집약적인 광량으로 성장 효율을 높이하고자 하였다. 또한 4인 가족 기준 상추 섭취량에 맞추어 상추의 재배시기와 상추의 수확량이 맞도록 설계하였다. LED 바의 3열 구조 형태에 따라 광량의 분포 범위가 변하게 되므로 적색, 청색, 백색 LED의 위치를 병렬 구조에 적합하도록 구성하였다.

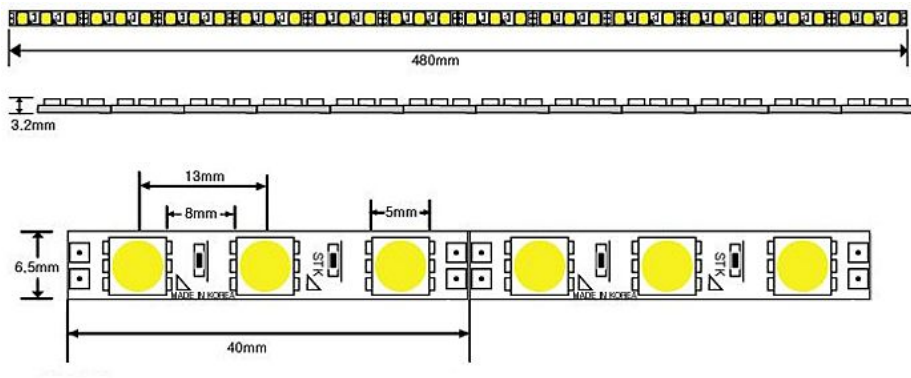


그림 8. 파장 조합을 위한 LED 제원

Fig. 8 Specifications for LED the wavelength combination

3.1.1. LED 색상 배열 구조

그림 9와 같이 3개의 LED로 구성된 SMD 칩 12개를 기준으로 적색 LED 8개, 청색 LED 2개, 백색 LED 2개 비율로 3열의 병렬구조 형태인 B1, B2, B3로 구성하였으며, 청색 LED와 백색 LED 간 반복적으로 위치하도록 설계하였다. 상대적으로 청색과 백색에 비해 많은 적색 LED의 경우 2 쌍씩 연속으로 배열하고, 마디에 청색과 백색 LED를 삽입하도록 구성하였으며 120°로 방사되는 LED 광원들이 서로 중첩되어 최적의 파장을 유지하도록 하였다. LED 칩의 조사각이 120°이므로 3열 병렬 구조의 형태에서 각 LED 바 간의 거리 차에 의해 빛의 중첩되는 지점의 거리가 수직과 약 80 mm 지점이므로 그 이상 입사면을 유지하여야 한다.

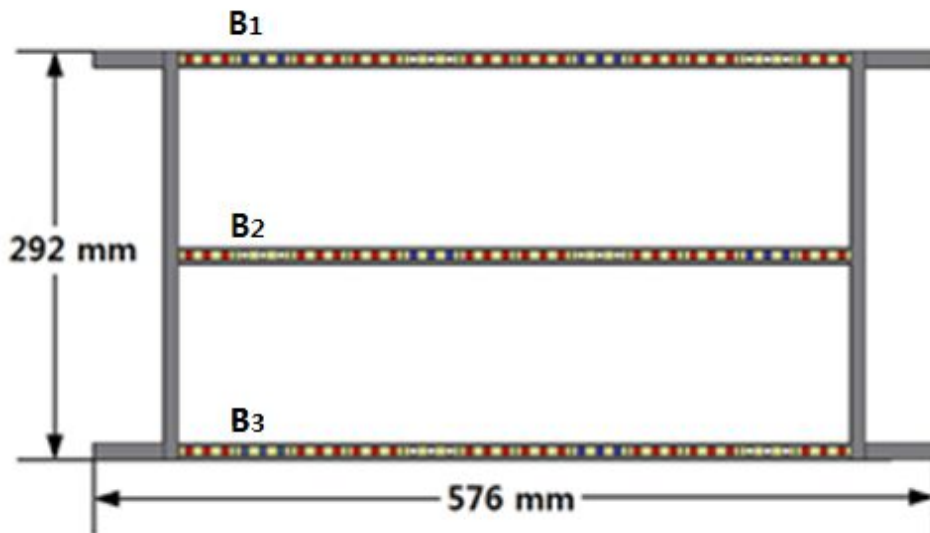


그림 9. LED 배열 구조

Fig. 9 LED array structure

3.1.2. 광원 균일도 실험

그림 10은 설계된 LED 배열 구조의 광원 균일도를 실험한 그림이다. 99,000 lx까지 관측 가능한 조도계(LX-1010BS)를 사용하여 LED 광원 조도 값을 측정하였다. 실제 식물과 광원의 최적 성장 거리로 고정한 상태에서 1 지점, 2 지점, 3 지점 각 3개의 LED 바 B1, B2, B3 지점에 위치한 총 9 곳을 측정하여 평균 측정 조도 값인 2,490 lx를 기준으로 균일도를 확인하였다. 조도 값 오차 범위는 최소 5 lx에서 최대 509 lx로 광원 균일도가 평균 87.9 %에 해당됨을 확인 할 수 있었다.

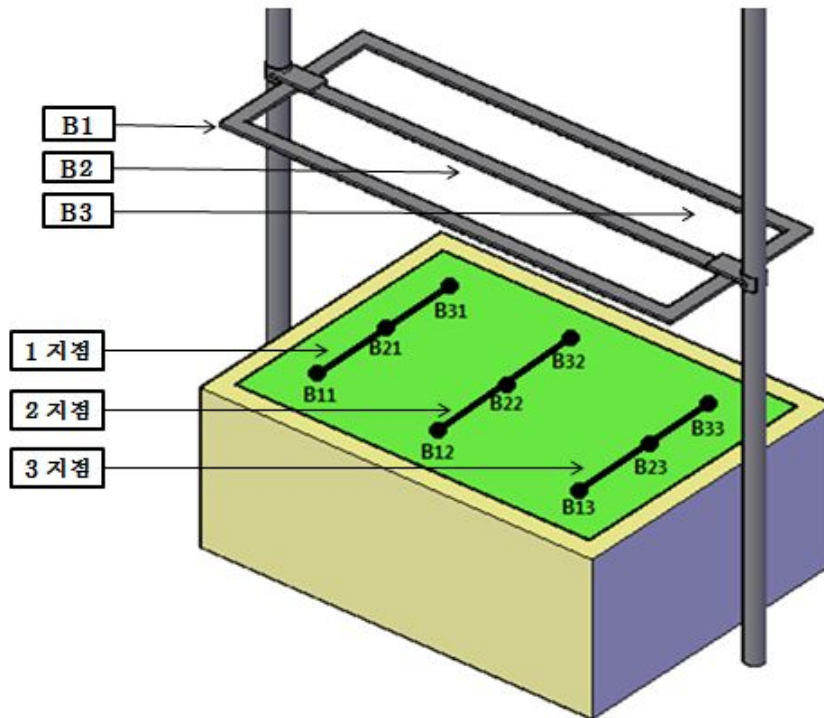


그림 10. 광원 균일도 측정을 위한 위치 지정

Fig. 10 Positioning the light source for the measurement of uniformity

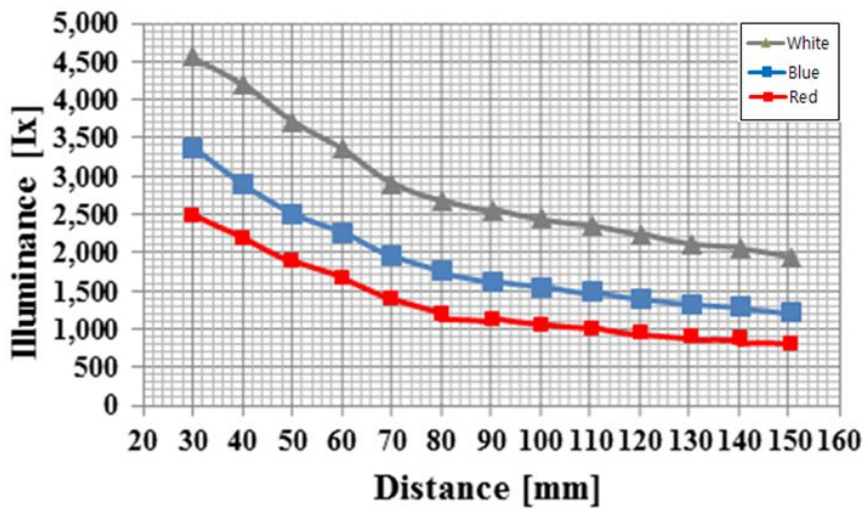
표 2 광원 입사 위치에 따른 조도 값

Table 2 Incident light illumination values according to the position

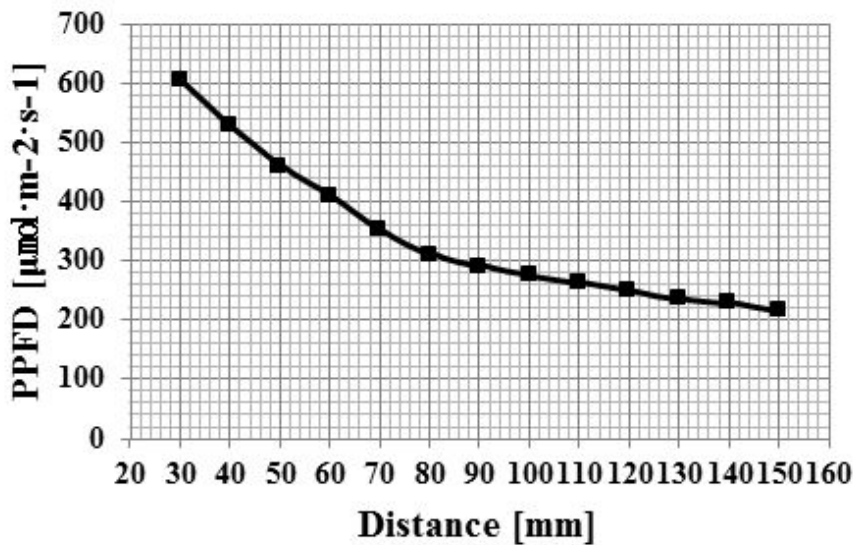
	1 지점 [lx]	2 지점 [lx]	3 지점 [lx]
B1	1,990	2,495	1,985
B2	2,580	2,991	2,555
B3	1,981	2,518	1,986

3.2. 인공광원과 입사면의 거리

빛의 세기는 거리의 제곱에 반비례하기 때문에 LED와 재배 작물 간의 거리에 따라 조도 값에 큰 영향을 미치며, 파장 조합된 LED의 총 조도 변화에 맞춰 최적 거리를 설계하였다. 3열 병렬로 구성된 LED 바의 중심점을 기준으로 측정기와 LED 간 거리에 따라 조도 값을 측정하였다. 실험 중 약 80 mm 이상의 거리에서는 조도 값이 기울기 변화량 감소폭이 낮아졌는데 반복된 실험의 결과에서도 동일한 값이 도출되었다. 이는 3열 병렬 배열로 구성된 LED 바에 기인하는 것으로 확인하였다. 각 LED 바 간의 거리는 140 mm를 유지하고 있는데 이때 LED 칩의 조사각은 120 °를 이루고 있다. 즉 3열 구성된 LED 바의 경우 각 열마다 LED 바의 조사각이 겹치는 입사면과의 최소 거리가 필요하기 때문이었다. 약 81.52 mm 이상 입사면과의 거리 차가 있어야 3열로 구성된 LED 바의 모든 광원이 한 점에 조사되는 것이다. 그러므로 약 80 mm이상부터 측정되는 광량의 감소폭이 급격히 낮아짐을 확인할 수 있었다. 유효 광포화가 가능한 LED 조도 값의 범위는 5,670 lx에서 4,200 lx로 220 PPFD에서 300 PPFD에 해당되며 유효거리는 80 mm에서 143 mm이다. 최적 광포화 LED 조도 값은 4,890 lx로 실험에 의해 최적 거리는 111 mm로 확인하였다.



(a) 거리 차에 따른 색상 별 LED 조도 값 변화(백색, 청색, 적색)



(b) 거리 차에 따른 LED의 PPFD 값 변화

그림 11. LED와 입사면 거리 차에 따른 조도 값 및 PPFD 값 변화

Fig. 11 Illumination of PPFD change in distance between the LED and the incident surface

3.3. 식물 재배 외형 구조

상추의 성채를 기준으로 80 mm 간격으로 총 재배포트 15개로 제작하였다. 이는 4인 가족 기준 일일 상추 섭취량 280 g을 기준으로 약 10 주에 걸쳐 재배되는 상추 수확량이 조건에 만족하도록 설계하였다. 양액을 공급하게 될 저장부의 역할 및 상추 근간부의 보온효과를 위해 스티로폼 재질을 사용하였으며, 외형부의 경우 4개의 바퀴가 달린 이동성이 높은 형태로 지지대를 이용한 LED 바의 높낮이 조절에 용이한 구조로 설계하였다. 높이 880 mm에서 1,500 mm까지 조절이 가능해 2단 식물 재배 실험도 가능한 구조로 설계하였으며 가로 590 mm, 세로 440 mm, 높이 880 mm의 소형 구조를 통해 공간 대비 생산량을 높였다.

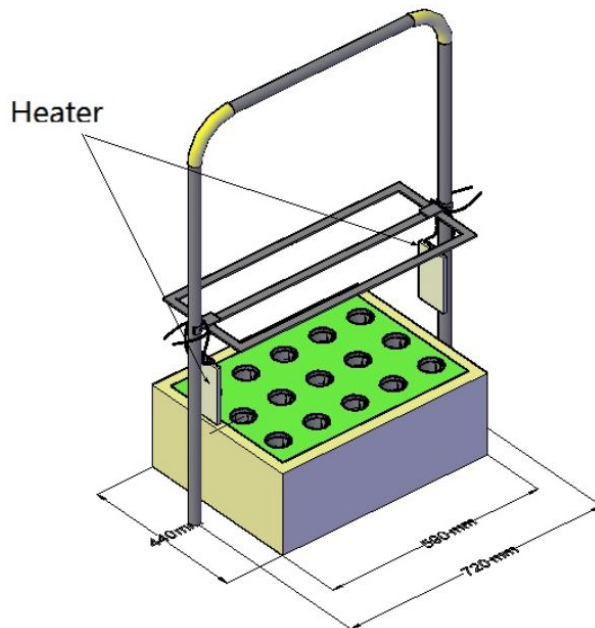


그림 12. 식물 재배 실험 장치

Fig. 12 Experimental setup of plant cultivation

4. 실험과 결과분석

4.1. 실험조건

채배 작물의 생장 변화와 실험 시간을 위한 생장 시기를 고려하여 엽채류 상추 중 시저스그린 로메인상추와 붉은 로메인상추 2가지를 채배 작물로 선택하였으며, 식물 생장의 최적 조건을 위해 온도는 20 ℃에서 22 ℃, 습도는 60 %에서 80 %를 항상 유지하도록 하였다[14]. 전력 효율 시험을 위해 일중 태양광 변화에 따른 LED 전력 소모량을 측정하였으며, 청천공, 부분 담천공, 담천공 등 하늘의 상태에 따른 전력 효율 실험도 병행하였다[15]. 상추의 발아시기부터 수확기까지 1주일 간격으로 상추 잎 크기와 생체중을 측정하여 조명방식에 따른 상추 생장 변화와 듀티비 변화에 따른 전력 대비 생산성을 비교 실험하였다.

그림 13은 실험중인 수확기에 이른 생장한 상추의 모습이다.



그림 13. 실험 중인 수확기의 상추 생장 모습

Fig. 13 Lettuce growth figure for harvest

4.2. 광환경 제어 상추 재배 실험

4.2.1. 일중 태양광 변화에 의한 LED 전력 소모 실험

그림 14와 그림 15는 태양광 변화에 의한 특성 실험을 나타낸 그림이다. 일광 변화 폭이 0 lx에서 150,000 lx까지 큰 폭으로 변화하기 때문에 상추의 최적 광량인 300 PPFD를 기준으로 설계하였다면 일 중 상추의 최적 광량을 컨트롤 할 수 있는 범위와 시간이 급격하게 줄어들며 300 PPFD 이상의 광원에서 불필요한 전력 손실량이 발생하므로 상추의 최적 광량을 260 PPFD를 설계하였다. 외부로부터 태양광이 공급될수록 LED로 공급되는 전류량이 감소함을 확인 할 수 있었다. 0 lx에서 1,000 lx 구간의 태양광 변화에 가장 민감한 반응을 보였는데 이는 조도센서의 성능에 기인하는 것으로 낮은 광 변화에서 조도센서가 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 2,000 lx 이후 구간에서는 선형적인 감소폭을 확인 할 수 있었다. 외부 광이 공급되지 않는 상황에서 LED 광원만으로 식물을 재배한다고 가정하였을 때 260 PPFD가 공급되도록 하였기에 외부 광원이 0 lx 일 때 상추에 공급되는 PPFD가 260임을 확인할 수 있다. 상추에 조사되는 LED 외의 외부 광이 추가로 공급되면서 LED에 공급되는 전력이 낮아지는데 조도센서의 특성에 기인하여 4,000 lx에서 가장 낮은 광합성광량자속밀도 값인 220 PPFD가 상추에 공급되었다. 이후 외부 광량이 증가함에 따라 LED 전력은 선형적으로 감소하여 외부 광원이 약 13,000 lx가 되는 지점에서 상추의 최적 광량인 300 PPFD가 됨을 확인 할 수 있었다. 인공광과 태양광의 총 PPFD의 변화는 최대 오차범위 약 5.5 %내에서 200 PPFD ~ 300 PPFD를 유지함을 확인 할 수 있었다.

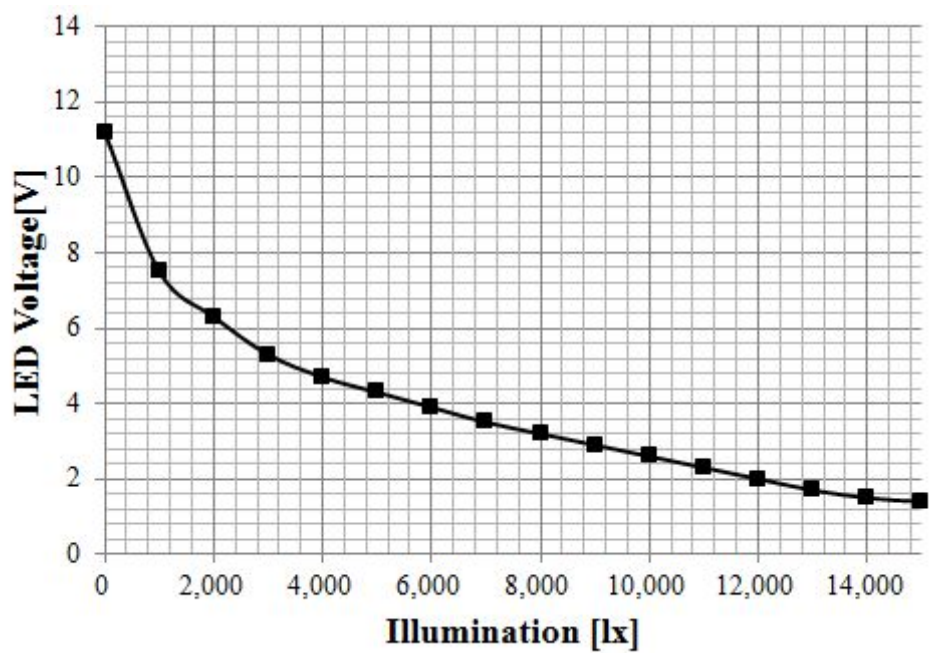


그림 14. 태양광에 의한 LED 전압 변화

Fig. 14 Changes in the LED voltage by daylight

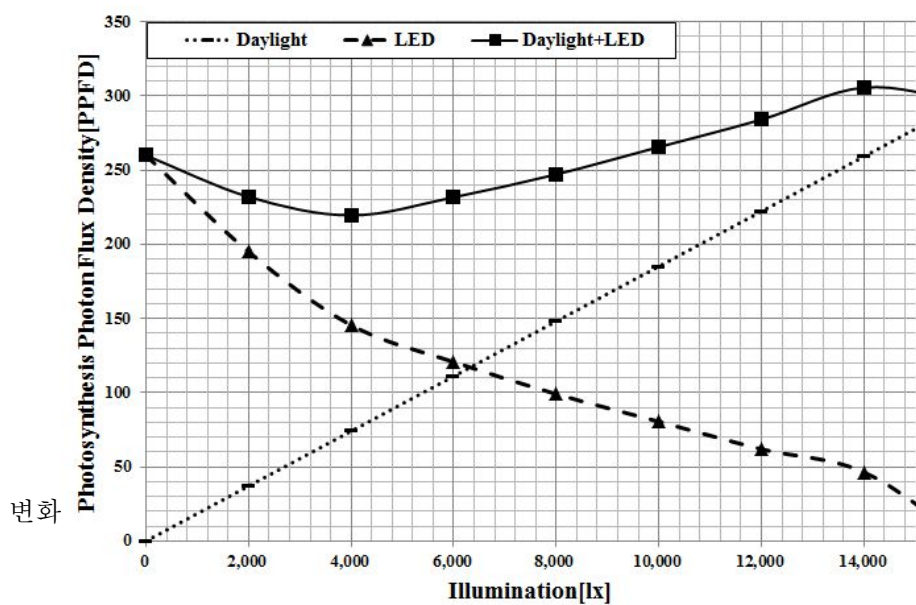


그림 15. 태양광에 의한 총 PPFD 변화

Fig. 15 Changes in total PPFD by daylight

4.2.2. 태양광 변화에 따른 전력효율

그림 16은 연중 가장 낮 시간이 짧은 동지 때와 낮 시간이 가장 긴 하지 때의 전력 소모량 비교 그림이다. 동지의 경우 낮 시간은 9시간으로 하루 중 37.5 % 밖에 조도 제어를 할 수 없어 전력 효율이 낮았으며, 하지의 경우 낮 시간이 15시간으로 하루 중 62.5 % 조도 제어가 가능하였다. 동지의 경우 평균 소모 전력량이 14.32 Wh로 33.7 %의 전력 소모량이 절감되었으며, 하지의 경우 평균 소모 전력량이 10.1 Wh로 52.9 %의 전력 소모량이 절감되었다.

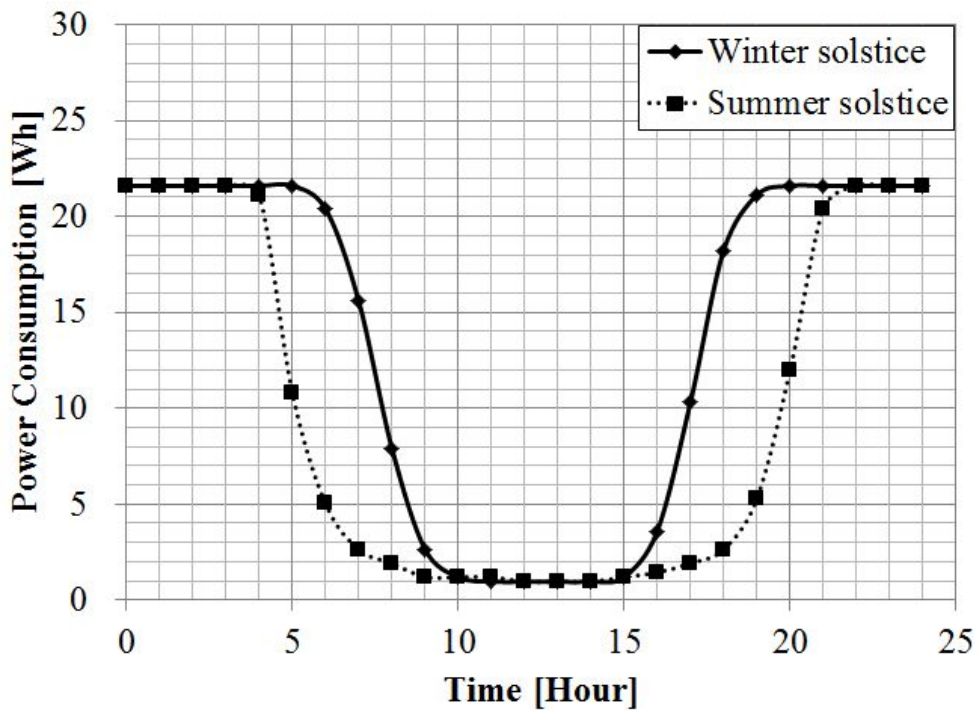


그림 16. 태양광 변화에 따른 소모 전력량

Fig. 16 Power consumption due to changes in solar

그림 17은 태양광 조도 변화에 따른 전력 효율을 나타낸다. 태양광의 조도가

증가할수록 인공광의 소모 전력이 감소하지만 부족한 PPFD는 태양광에 의해 보충되므로 에너지 절감효과는 증대된다. 0 lx ~ 3,000 lx 에서는 1,000 lx 당 15.2 %의 증가율을 보였으며, 3,000 lx ~ 6,000 lx 에서는 1,000 lx 당 7.1 %의 증가율, 6,000 lx ~ 12,000 lx 에서는 1,000 lx 당 4.8 %의 증가율, 12,000 lx ~ 14,000 lx 에서는 1,000 lx 당 1.6 %의 증가율을 보였다. 일중 태양광을 기준으로 평균 43 %의 전력 소모가 절감된다.

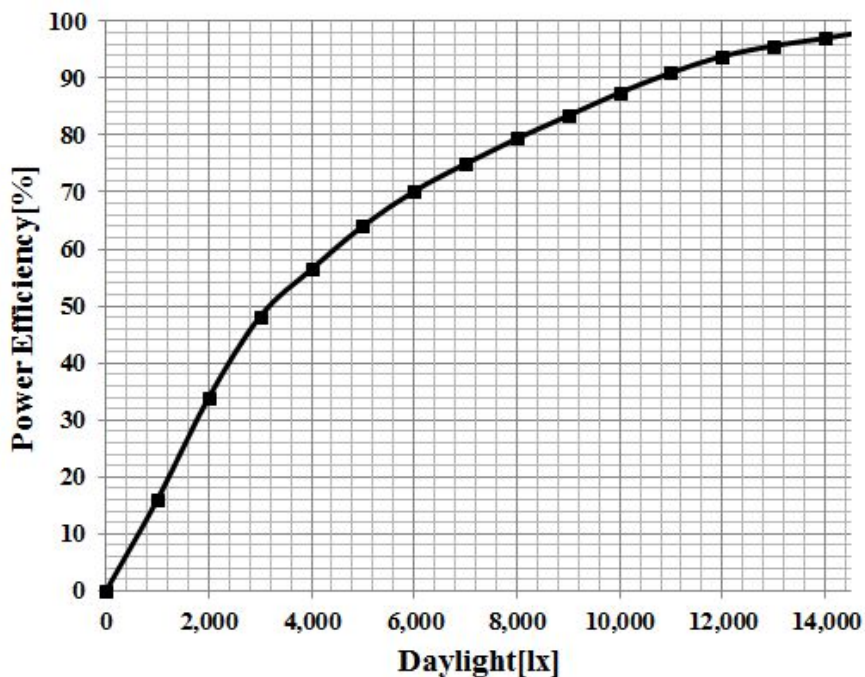


그림 17. 태양광에 따른 전력 효율 변화

Fig. 17 Power efficiency changes due to solar illumination

4.2.3. 조명방식에 따른 상추 성장 실험

15개체의 상추를 LED만 조사하는 방식과 태양광과 LED 병합 방식으로 각각 재배 실험을 진행하였다. 발아기의 상추는 빛을 필요로 하지 않기 때문에 암실의 동일한 조건에서 실험하였으며, 성장기에 돌입하면서 각자 지정된 환경에서 재배 실험을 진행하였다. 15개체의 상추 잎 크기 및 생체중을 측정하여 평균값을 구하였다. LED만으로 상추를 재배했을 때 기준으로 태양광 병행 사용 시 약 96 %의 성장률을 확인하였다. 온도는 20 ℃에서 22 ℃, 습도는 60 %에서 80 %를 유지하였다.

표 3 조명방식에 따른 상추 성장 변화

Table 3 Lettuce growing in the way the lighting changes

		LED		태양광+LED	
		잎 크기 [mm]	생체중 [g]	잎 크기 [mm]	생체중 [g]
발아기	1주	18	1.8	18	1.8
	2주	35	3.5	35	3.5
	3주	44	4.4	44	4.4
성장기	4주	64	6.3	62	6.1
	5주	89	9.0	82	8.2
	6주	123	12.5	111	11.3
	7주	135	13.7	127	12.6
	8주	157	16.0	145	14.6
	9주	202	19.8	188	19.1
수확기	10주	240	20.6	231	23.5
	11주	248	25.5	240	24.6

4.2.4. 듀티비 실험

듀티비를 이용하여 LED의 온/오프 시간을 제어 하는 방식을 사용하였으며, 각 듀티비 차이에 따른 식물군의 상장 차이를 조사하였다. 이 실험에서는 태양광을 배제하고, LED만으로 재배했을 경우를 기준으로 하였으며, 상추 재배 시 가장 효율이 높은 A1 실험군의 연속조명을 기준으로 나머지 실험군 역시 동일한 재배 기간을 두고 상추의 생체중을 측정하였다. 항시 LED가 켜진 상태인 A1 실험군의 상추 생체중이 가장 높았으나 소비전력 대비 상추의 재배효율이 가장 높은 경우는 표 5와 같이 A4 실험군이었다. 듀티비가 낮아질수록 소비전력량이 낮아지고, 상추의 생체중 역시 낮아지지만 A4 실험군에서 상추 생체중이 A3 실험군보다 높게 측정되었다. 이는 상추의 명반응과 암반응의 작용에 기인하는 것으로 약 100 μ s/ 300 μ s 의 25 % 듀티비 부근에서 상추의 명반응과 암반응 시간에 유사함을 확인할 수 있었다. A4의 듀티비는 25 %로 연속조명에 비해 1/4에 해당하는 전력으로 태양광 병용 사용 및 A4의 듀티비를 추가 적용 시 최종적으로 89 %의 전력 효율을 확인 할 수 있었다.

표 4 듀티비에 따른 상추 재배 실험

Table 4 Lettuce growing in the way the duty ratio changes

시험항목	A1	A2	A3	A4	A5
듀티비[%] (on/off)	100 (연속조명)	50 (200 μ s /200 μ s)	33 (133 μ s /266 μ s)	25 (100 μ s /300 μ s)	0 (태양광 재배)
소비전류[A]	1.8	0.9	0.6	0.45	0
소비전력[wh]	21.6	10.8	7.2	5.4	0
상추 생체중[g]	382	362	318	347	231
상추 100 g당 소비전력량[kWh]	5.65	2.98	2.26	1.55	—
태양광 병용 시 전력 효율[%]	43	78	85	89	—

4.2.5. 기존 가정용 식물 재배기와 전기요금 비교

표 5는 기존 가정용 식물 재배기와 제안하는 가정용 식물 재배기의 수확기간, 수확량, 소모 전력량, 전기요금을 비교한 표이다. 기존 가정용 식물 재배기와 외형 구조를 비롯하여 총 수확량 및 전력 소모량이 차이가 있어 0.2 m² 면적의 3단 기준으로 동일하게 적용하여 기존 제품화된 가정용 식물 재배기와 비교하였다. LED 월 전력 사용 시간을 24시간으로 하여 한 달 30일을 기준으로 계산하였으며, 일반 가정에서 평균 소모 전력 대인 200 kWh 기준으로 전기요금을 계산하였다. 4인 가족 기준 상추 일일 섭취량인 280 g에 맞췄으며, 상추 4 kg 가격 14,300 원(2013년 11월 19일 기준) 중 상추 1개체 가격을 536 원으로 보았다. 기존 가정용 식물 재배기와 동일한 수확기간을 갖는 제안한 가정용 식물 재배기는 96 % 이상의 수확량을 확인 할 수 있었으며, 소모 전력량이 기존 15.5 kWh인데 반해 제안하는 가정용 식물 재배기는 1.7 kWh로 약 89 %의 전기 소모량이 감소되었다. 이때 상추 1개체 당 전기요금을 계산하였을 때 기존 제품의 경우 469 원/lettuce로 상추 가격의 87.5 %가 전기요금에 해당되었으며, 제안한 가정용 식물 재배기로 재배된 상추의 1개체 당 전기요금은 51 원/lettuce로 상추 가격의 9.5 %가 전기요금이 포함됨을 확인하였다. 총 전기요금에서도 기존 제품이 21,130 원임에 반해 제안하는 가정용 식물 재배기의 경우 2,324 원으로 약 9 배의 전기요금 차이가 남을 확인하였다.

표 5 기존 제품과의 전기요금 비교

Table 5 Compared with conventional electricity rates

	기존 가정용 식물 재배기	제안하는 가정용 식물 재배기
수확기간	10 주	10 주
수확량	6,750 g	6,410 g
소모 전력량	15.5 kWh	1.7 kWh
상주 1개체 당 전기요금	469 원/lettuce	51 원/lettuce
총 전기요금	21,130 원	2,324 원

5. 결 론

이 논문에서는 적은 전기에너지로 외부환경 변화에 무관하게 균일한 상추 재배 생산량을 가지는 가정용 식물 재배기의 기초연구를 하였다. 이는 조도센서를 사용하여 광환경 제어가 가능하고, 듀티비를 병행하여 전력 효율을 높이는 연구였다. 광원의 밝기를 유지하는 기존의 조도 제어 시스템과 달리 식물에게 필요한 PPFD를 일정하게 공급하면서 태양광을 이용하는 LED 제어 회로 시스템 설계로 가정용 식물 재배기의 보급화 및 대중화를 위해 상추 생산 대비 소모 전력량을 줄였다. 태양광의 변화에도 인공광인 LED의 공급 전류를 제어하여 항상 일정한 PPFD가 공급되고, 식물의 성장률이 단일 광원을 사용했을 때와 96 % 이상 일치함을 확인하였으며, 기존 폐쇄형 식물공장의 단일 광사용에서 태양광을 사용함으로써 얻게 되는 전력 소모 절감 효과를 43 % 이상 향상 시킬 수 있었다. PWM 회로를 추가하여 상추의 명반응 및 암반응에 유사한 듀티비를 확인하였으며, 최종적으로 약 89 %의 전력 효율을 높일 수 있었다. 결과적으로 이 연구에서 제시한 광환경 식물 재배 시스템의 상추 생산량 대비 소비전력은 항상 인공광을 사용하는 방식에 비해 상추 1개체 재배에 사용되는 전력요금이 130 원/lettuce에서 14 원/lettuce로 전기요금은 89 % 감소하였다. 이는 상추 150 g 가격이 997 원(2013년 11월 23일 현재)인 것으로 감안할 때 전기요금의 절약으로 가정용 식물 재배기의 전력 효율 향상 효과를 확인할 수 있었다. 온도센서 및 습도센서 등 재배 작물의 최적 환경을 모니터링하고 일정하게 유지하는 컨트롤 시스템을 추가한다면 보다 생장 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한 재배 작물별 특화된 LED 조명 설계 및 조명 배열 설계와 식물의 성장 시기에 따른 적정 PPFD 제어를 통해 에너지 절감 효율을 높이고, 전력 소모에 가장 크게 영향을 받는 가정용 식물 재배기 응용분야를 기대할 수 있다.

참고문헌

- [1] S.W Lee, “Plant Factory and plant cultivation using the LED artificial Light” , Optical science and technology, vol. 2, 2010, pp.12-19.
- [2] G. Tamulaitis, et al., "High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation", J. Physics D: Applied Physics, 38, 2005, pp.3182-3187.
- [3] 차미경, 김주성, 조영열, “배양액 농도와 광도가 식물공장에서 재배되는 적측면 상추의 생장에 미치는 영향, 생물환경조절학회지, 2012, pp.169-175.
- [4] 이준구, 오상석, 차선화, 장윤아, 김승유, 엄영철, 정승룡, “적색/청색광의 비율 및 수확 전 광질 변환이 어린잎상추의 생육 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향”, 생물환경조절학회지, 2010, pp.351-359.
- [5] 남민우, “식물공장 내 인공광원으로서 청색과 적색 LED 조사가 청경채 생육과 품질에 미치는 영향”, 충북대학교, 2011.
- [6] 박종석, 임종태, 윤수원, 황보준권, “적색/청색 LED 조사광 비율이 몇 가지 원예작물의 유묘 생장에 미치는 영향”, 원예과학기술지, vol. 29, 2011, pp.84-84.
- [7] N. Khan, N. Abas, “Comparative study of energy saving light sources”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, January 2011, pp.296-309.
- [8] Moncef Krarti, Paul M. Erickson, Timothy C. Hillman, “A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting” , Building and Environment, vol. 40, June 2005, pp.

747-754.

- [9] 한상필, “채광과 인공조명을 조화시키기 위한 조명제어방법에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 2010, pp. 317-324.
- [10] 홍성창, 이덕배, “혼합광 처리에 의한 상추의 생장반응”, 한국토양비료학회 학술발표회 초록집, 2010, pp. 201-202.
- [11] 김해란, 유영한, “식물공장에서 적색, 청색, 백색 및 원적색 LED 처리에 따른 고추냉이의 생육반응”, 원예과학기술지, 2013, pp. 415-422.
- [12] Won-Sub Lee, Sung-Gaun Kim, “Development of Rotational Smart Lighting Control System for Plant Factory”, World Academy of Science, Engineering and Technology, February 2012, pp. 741-744.
- [13] Hyeon-Hye Kim, “Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red and Blue and Blue-light-emitting Diode”, Hortscience, 2004, pp. 1617-1622.
- [14] 김문기, 남상운 “광합성효율 모델을 이용한 밀폐형 식물 생산시스템의 재배 환경 최적화”, 한국생물환경조절학회지, 2004, pp. 209-216.
- [15] 최안섭, 황민구 “천공상태에 따른 광센서 조광제어시스템의 성능 및 정확성 향상에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 2004, pp. 694-697.

Household plant factory supplying a constant PPFD

Sung-won Lee

*Department of Electrical Engineering
Graduate School, Kyungpook National University
Daegu, Korea
(Supervised by Professor Sekwang Park)*

(Abstract)

In this paper, we study the energy-saving technology using sunlight and the LED design and in a form suitable for domestic household plant factory. Household plant factory, it is an object to obtain a plant of a fixed amount within a period of constant to changes in the external environment, such as daylight hours. The problem of maximum power consumption of the household plant factory is too large, did not have much relative benefit than buying the actual spread of household plant factory, or non-agricultural chemicals friendly to the recently the need is rise by growing interest in. In order to solve this problem, we adopted a method used by combining the LED and the light in this paper. We maintained constant photosynthetic photon flux density (PPFD) of sunshine, while reducing power consumption in particular, and, to improve plant growth. Utilizing the information of the optical environment illuminance sensor, it is arranged to supply a constant PPFD.

* A thesis submitted to the Council of the Graduate School of Kyungpook National University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering in December, 2013

We experiment with household plant that is designed to be applied to "Romaine lettuce" who take most Koreans. The amount of lettuce that average intake family of four criteria is 280 g, so that three columns optimal placement LED light blue, red, white with artificial lighting, and design the plant, was produced for the plant. It is a 10-week period consumed to obtain the lettuce family of four criteria, total power consumption compared to when it is grown in only the LED by combined use of LED and photovoltaic as 1.7 kWh cultivation period is the same, it was possible to save the electricity bill 43%.

부록

부록 1 주택용 전력량 요금

부록표 1 주택용 전력량 요금(저압) (2013년 11월 21일 적용)

Appendix table 1 Residential electricity cost(low voltage)

기본요금(원/호)		전력량 요금(원/kWh)	
100 kWh 이하 사용	410	처음 100 kWh 까지	60.7
101 ~ 200 kWh 사용	910	다음 100 kWh 까지	125.9
201 ~ 300 kWh 사용	1,600	다음 100 kWh 까지	187.9
301 ~ 400 kWh 사용	3,850	다음 100 kWh 까지	280.6
401 ~ 500 kWh 사용	7,300	다음 100 kWh 까지	417.7
500 kWh 초과 사용	12,940	500 kWh 초과	709.5

부록 2 일중과 연중 작물의 최적 조도

부록표 2.1 일중 작물의 최적 조도

Appendix table 2.1 Optimal illuminance of crops for daylight

(농촌진흥청)

Crops		light saturation point lx (PPFD)	light compensation point lx (PPFD)
Vegetables	Tomatoes	70,000(1,296)	3,000(55)
	Cucumber	55,000(1,018)	2,000(37)
	Lettuce	16,200(300)	1,500(27)
	Celery	40,000(740)	2,000(37)
	Sesame leaves	12,000(222)	5,000(92)
Fruit tree	Pear	40,000(740)	300(5)
	Tangerine	40,000(740)	200(3)
	Peach	40,000(740)	400(7)
	Grapes	40,000(740)	400(7)
	Figs	40,000(740)	1,000(18)
Flower	Cymbidium	10,000(185)	300(5)
	Cyclamen	15,000(277)	300(5)
	African violet	5,000(90)	500(9)

부록표 2.2 연중 날씨 환경에 따른 태양광 변화

Appendix table 2.2 All weather conditions according to solar changes

날씨 환경	겨울			여름		
	청천공	부분 담천공	담천공	청천공	부분 담천공	담천공
Daytime [Hour]	14	14	14	9	9	9
Effective daytime [Hour]	13	12	9	8	7	4
Power efficiency [%]	55.9	53.5	46.4	35.1	32.7	25.6