

자연광 다층 작물재배를 위한 광선반 시스템에 관한 연구

Exploration of a Light Shelf System for Multi-Layered Vegetable Cultivation

장 성 택*

장 성 주**

Jang, Seong-Teak

Chang, Seong-Ju

Abstract

This study is to eliminate the need for conventional high density plant factory's artificial light source such as LED to reduce the initial investment of the light source installation as well as the operation cost. Use of solar light could enhance the quality of the vegetables similar to those grown in the natural environment. Provision of solar light into the multilayer vegetable cultivation facilities and collecting maximum and sustainable sunlight without too much loss by tracing solar path and properly distributing it through careful control during daytime are crucial for realizing the investigated rooftop light shelf system for multi-layered vegetable cultivation. In this study, we developed an innovative way of effectively allocating sunlight inside even to otherwise shaded zone of a multi-layer vegetable cultivation facility. To prove the effectiveness of the system's sunlight collection and distribution capability, both simulation and experiment in Daejeon are performed and the outcome is analyzed.

키워드 : 태양광, 다층형 식물공장, 광선반, 태양추적

Keywords : sunlight, multi-layered, plant factory, light shelf, solar path tracking

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

온실이나 비닐하우스와 같은 시설재배는 도시인구의 증가와 유통구조의 개선을 위해 로컬 푸드의 개념을 도입하여 자급자족이 가능한 도농 복합형 적층밀식 식물공장 재배형태로 진화할 것으로 예측된다. 기존 식물공장의 광환경에 관한 연구동향을 보면 유럽은 단층-태양광 및 인공광 병용형, 일본 및 미국은 적층-완전 인공광형으로 연구가 진행되고 있다. 유럽형은 생산효율이 낮고 국내에 적합하지 않으며, 일본-미국형은 높은 생산효율을 얻기 위한 초기 인공광원 투자비가 높아 보급이 어렵다.[1][2][8]

따라서 기존의 식물공장의 에너지 효율과 경제성 문제를 해결하기 위해 지속가능하고 초기투자비가 낮은 작물인공재배시설의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 시설내부 조명에너지 절약과 생육공간의 조도확보를 위해 효과적인 태양광 배분이 가능한 건축 자연채광 요소인 광선반[4]을 도입하여 다층 밀식재배설비의 암영대로 인한 자연광공급

문제해결은 물론, 기존 밀식재배시설의 인공광원을 자연광으로 대체하여 광원설치의 초기투자비와 전력을 포함한 운영비를 줄이며 자연환경에 가까운 인공 환경 구축으로 생산 작물의 품질확보를 목적으로 하였다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 국내 광환경을 중심으로 적층형 밀식재배공간에 적용 가능한 태양광 분배 시스템을 도출하고 적용된 광선반 설비의 형태, 재질 및 구동요소에 따른 태양광 분배 효과를 작도와 시뮬레이션 연구를 기초로 유효광량을 예측하여 식물재배 가능성 여부를 분석하였다.

광선추적기법을 활용하여 확산광의 실내유입을 극대화할 수 있는 가변적인 천장 설치용 광선반을 설계하고, 자연채광 해석시뮬레이션을 활용한 사례들[5][6][7]을 토대로 적층형 밀식재배공간의 실내조도수준 및 균제도를 실제 기상데이터 기반으로 분석하여 결과를 도출하였다. 또한 1/2 스케일의 실제 생육재배대 광환경 테스트 설비를 구축하여 시뮬레이션 결과의 타당성을 확보하였다.

시설 특성상 시뮬레이션 연구는 연간 절기별 상황에 맞추어 국내기준으로 한정하여 절기별 일사량, 분배효율 및 시설 내 조도수준과 균제도 값을 분석하고, 실증 실험은 광환경이 가장 열악한 동절기를 중심으로 진행하였다.

* 주저자, KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정 jangst@kaist.ac.kr
** 교신저자, KAIST 건설 및 환경공학과 교수 (chang@kaist.ac.kr)
본 논문은 2011년도 국토해양부의 '지역기술혁신사업'에 의해 수행된 연구임.(11지역기술혁신D06)

2. 자연광 활용 적층형 밀식재배 식물공장의 특성

본 연구에서 개발 중인 식물공장은 태양 일주 및 연중운동을 고려한 지속적이고 표준화된 자연광 공급설비와 다양한 작물을 수요에 맞추어 독립적으로 생산할 수 있는 가변형 양액공급설비 및 작물재배작업 공간을 받아, 과종, 생육, 수확으로 분할하고 생육설비 자동화를 통하여 적은 에너지와 노력을 통해 다양한 작물을 효율적으로 생산할 수 있다.

우수, 지하수, 상수도 설비를 통한 수원의 연중 일정수준 확보를 위해 수로식 수평형 지중 열교환 설비를 지하 3m 이상 깊이로 설치하여 안정된 양액온도와 실내 적정온도 유지를 위한 열원으로 활용하며, 미스트, 팬코일, 외부환기 유닛 및 CO₂ 설비의 동시제어를 통해 단일 지중기류관로를 이용한 내부환경의 항상성 유지가 가능하다.

한편, 풍, 설하중에 대한 대응과 내부공간 확보를 위해 생육설비의 구조프레임과 연계하여 효과적인 하중 분산설계를 통해 구조의 단순화를 구현하고자 하며, 유리의 발수코팅 및 나노기술을 도입하여 채광효율을 확보하고 고효율 단열유리를 활용한 열손실 방지와 우수확보 및 제설, 설비관로 연계가 가능한 다기능 구조를 가진다.

3. 자연광 실내분배 극대화 반사패널 시스템

본 적층형 밀식재배 식물공장에 도입된 기술인 태양궤도 추적형 자연광 실내공간 인입 및 분배 극대화 반사패널 시스템은 천장을 통하여 실내로 유입되는 자연광을 곡선과 직선의 조합으로 이루어진 반사패널을 활용하여 효과적으로 실내 깊숙한 곳까지 도달하도록 하여, 상층부 주광조도를 감소시키는 대신 천장과 멀리 떨어진 곳의 조도를 증가시켜 실내의 조도가 균일해지도록 하는 광선반 설비에 관한 것이다.

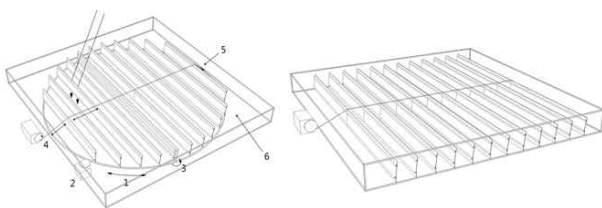


그림 1. 자연광 실내분배 극대화 반사패널 시스템(천장부 설치)

본 기술을 통하면 다층구조물의 실내에 효과적인 자연광 공급이 가능하다. 이러한 장치는 건축공간에 구비된 천장에 원형이나 사각형으로 설치되며, 태양광을 실내로 반사시키는 광선반을 구비하고 있다. 광선반은 건축물의 방위에 따라 천장 고정형, 혹은 회전할 수 있는 형태로 설치되어 태양의 방향에 따른 광선반의 방향을 구동 및 제어할 수 있으며, 도입된 설비는 온실 건축물의 장변이 남향으로 고정되어 수평방향의 회전 없이 태양의 고도 변화에 따른 자연광 인입각도 조절을 위하여 반사판의 각도만 조절하는 방식으로 동작한다. 이를 통해 주간 일정한 방향으로 최대

의 태양광을 각 적층 재배트레이에 공급한다.

4. 국내 광환경 분석

국내 광환경 분석을 위해 절기별 주간 광량, 태양 방위 및 고도 변화를 고찰하여 태양광 분산시스템 채광설비 및 시설 설계 요구조건으로 활용하였다. 4계절이 뚜렷한 국내 환경 특성상 여름, 겨울, 봄-가을 3시기로 나누어 천공일사량과 태양 방위 및 고도 변화를 조사하였다.

재배설비가 설치될 장소에 얼마나 많은 일사량이 입사되며 입사된 일사량이 채광부에서 얼마까지 확보 가능한지에 대한 정확한 예측을 위해 절기별 천공일사량을 활용하였다. 지표에 도달하는 일사량은 공기밀도, 위도, 태양의 적위를 토대로 직달일사와 천공일사로 구분된다. 또한 천공일사는 운량 및 대기청정도 등의 요소로 인해 청천공, 부분담천공, 담천공으로 구분된다. 이렇게 구분된 일사량은 광분산시스템 채광부의 설치 방법 및 각도 제어에 영향을 미치므로 위의 요소를 고려하면 보다 신뢰성 높은 채광량을 예측할 수 있다.

지표면으로 입사되는 일사량의 분석은 대기권 밖 일사량 I_0 로부터 산출가능하다. 다음의 식 (1)에서 I_0 는 위도, 일적위, 시간각에 관한 함수이며 대기권 통과 전 일사량이다. 식(2)에서 계수 K_T 는 구름의 양에 관한 계수이며 대기권 통과 전 일사량 I_0 과 지표에 도달하는 일사량 I 의 비로 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} (1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}) \times [\cos \phi \cos \sigma (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \times \sin \phi \sin \sigma] \quad (1)$$

여기서 ϕ : 해당지역의 위도(°, degree)
 σ : 일적위 ($\sigma = 23.45 \sin(360 \times \frac{284+n}{365})$)
 n : Julian date
 ω_1, ω_2 : 시간각 ($15^\circ/h$)
 G_{sc} : 태양상수 ($1367 Wh/m^2$)
 I_0 : 대기권 통과 전 일사량 (MJ/m^2)

$$K_T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09K_T & 0 < K_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 & 0.22 < K_T \leq 0.8 \\ -16.638K_T^3 + 12.336K_T^4 & K_T > 0.8 \\ 0.165 & \end{cases} \quad (3)$$

여기서 I : 해당지역에서 측정된 일사량 (MJ/m^2)
 I_d : 천공일사량 (MJ/m^2)
 K_T : Clearness

지표면 일사량 I 는 일반적으로 태양 에너지에 대한 상세한 표준 데이터인 표준 일사량을 이용한다. 하지만 표준기상데이터는 시간별 자료가 없으므로 지표에서 측정된 데이터를 이용하고 측정 일사량 데이터는 기상청에서 제공하는 대전시(북위 36도 22분)의 시간별 일사량 데이터를 사용하

었다. 본 데이터의 측정기간은 2010년 5월 1일부터 2011년 4월 31일까지 1년간 오전 9시부터 오후 6시 까지 매 시간마다 대기권을 통과하여 지표로 입사된 일사량을 측정 한 값이다.

위의 식에서 구한 K_T 는 값이 클수록 구름량이 적은 청명한 날씨이며 크게 청천공, 부분담천공, 담천공으로 분류한다. K_T 를 이용하여 지표로 도달하는 측정일사량과 천공 일사량의 관계는 식 (3)과 같다. 직달일사가 입사하는 청천공의 상태에서는 채광부에 도달하는 일사가 최대가 되고 담천공의 상태에서는 최소가 된다.

본 연구에서는 채광부의 연중 채광량이 식물생육에 충분한지의 여부를 판단하는 것이 목적이므로 연중 일사량의 변화를 고려하여 작물의 생육가능 여부를 판단하였다. 연중 각 계절의 일일평균 운량과 가장 비슷한 날을 선정하여 온실 내 채광부에 도달하는 일사량은 식 (3)과 같은 천공 일사량과 지표 측정일사량과의 관계에 온실 외피투과율 85%를 고려하여 계산하였다.

태양고도 및 방향의 변화에 따라 요구되는 채광부 액티브 요소의 최소화를 위해 최적화된 재배시설 배치와 채광설비의 디자인이 중요하다. 국내 충청권 지역(북위 36도 22분)의 태양고도는 4계절의 변화가 뚜렷하다. 각 절기별 태양고도 및 방향의 분석을 통해 광원의 방향 변화에도 항상 최적의 채광이 가능한 시설 방향을 결정하고 최선의 배치를 제시할 수 있다.

본 시스템의 설치 대상 시설인 박스형 재배시설을 구축 시 폭 25m, 길이 75m, 높이 3m의 시설을 기준으로 천창으로 입사되는 태양광량이 90% 이상이며, 시설 내 광공급 균일화를 위해 본 시설에서는 천창으로 입사되는 광원만을 활용한다.

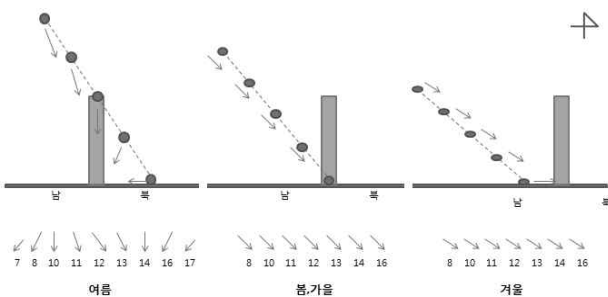


그림 2. 동쪽에서 바라본 계절별 태양 방위각 및 고도의 주간 시간에 따른 변화

천창으로 입사되는 광원의 절기별 태양 방위각 및 고도의 주간 시간에 따른 변화를 보면 국내 충청권(위도 36도 22분)을 기준으로 봄가을 및 겨울은 남향에 주로 작용하지만 여름철에는 시간에 따라 남향에서 북향으로 변화함을 알 수 있다. 북반구에 위치한 우리나라는 대체적으로 양지방향이 남향이다. 하지만, 여름철 하지의 경우 오전 10시 이전과 오후 2시 이후는 태양의 방향이 북향으로 일반적인 고정형 광선반으로는 채광이 불가능하다. 따라서 태양의 방향에 따라 움직일 수 있는 액티브 채광요소가 필요하며

기존의 태양추적시스템의 대형화가 가능한 대안을 모색해야 한다.

5. 작물의 광 요구조건 분석

광 조건은 작물에서 생육에 가장 많은 영향을 끼친다.[9] 대상작물인 상추종자의 발아조건에서 광은 필수적 요인으로 적색광(660nm)에서 촉진되고 근적색광(760nm)에서는 오히려 억제된다. 이때 광에 감응하는 부분은 씨겉질로 발아 후 생육과정의 광 보상점은 1,500Lux이고 광 포화점은 25,000Lux이다.

표 1. 여름철 수경재배 상추의 별가림 조건과 생육상태

| 별 가림 정도 (%) | 풀길이 (cm) | 줄기 길이 (cm) | 잎수 (매) | 잎길이 (cm) | 잎너비 (cm) | 클로로필 함량 (SPAD) | 생체중 (g/주) |
|-------------|----------|------------|--------|----------|----------|----------------|-----------|
| 대조구 | 22.1 | 13.5 | 16.6 | 18.0 | 18.1 | 21.1 | 90.2 |
| 35 | 29.4 | 20.7 | 14.6 | 19.5 | 17.5 | 17.8 | 75.7 |
| 55 | 28.6 | 19.2 | 14.4 | 19.8 | 17.6 | 19.2 | 78.2 |
| 75 | 33.6 | 20.2 | 10.0 | 19.1 | 18.0 | 18.0 | 47.4 |

광의 세기가 약하여 광 보상점 쪽에 치우치면 잎이 웃자라 잎의 길이가 길어지며, 이때 온도가 높으면 이러한 현상은 더욱 심화된다. 꽃눈 분화 후 꽃대의 신장은 일장이 길어질수록 빨라지고 일장이 짧으면 신장이 억제된다.

광량에 따른 재배영향을 관찰하기 위해 여름철 상추 수경재배에서 흑색 별 가림망으로 별 가림 정도를 달리했을 때, 별 가림율이 높아질수록 초장(풀길이)과 경장(줄기길이)은 길어지는 반면 전체 수확 잎수는 적어져서 별 가림을 하지 않은 대조구의 수량이 가장 높았으며 별 가림률을 높일수록 수량이 적고 생육요소인 클로로필 함량이 낮아진다.

6. 광환경을 고려한 광공급부 설계

본 연구를 통해 개발된 광 공급시스템은 자연광 효율 극대화를 위해서 다단 적층형 트레이에 고품태 태양광을 분산시키기 위한 천장 설치형 반사판으로 이루어진 채광부와 이를 통해 반사된 빛을 분산시켜 트레이의 작물들에 전달하는 광분산판으로 이루어진 산광부로 구성된다. 이는 재배표면적 증가뿐만 아니라 실제 식물이 활용하는 광원의 효율적인 분산을 통한 한정된 자연광원활용의 극대화를 목적으로 한다. 채광부 천장 설치형 반사판은 고도의 반사율을 가진 금속판재를 고도와 방향에 따른 태양궤적에 기반하여 항상 실내의 작물 트레이에 자연광 공급을 극대화 할 수 있도록 그 간격과 각도 및 설치형식을 설정한다.

천장 설치형 반사판은 방위각의 영향에 따른 액티브 시스템을 도입하고 구성요소 최소화를 위해 태양 방위각 변화의 영향을 상대적으로 적게 받는 동서로 긴 형태로 설치하여 오전 동쪽광원이 오후에 서쪽광원으로 변화하여도 동서로 설치된 생육설비는 광원의 방향에 대한 영향을 받지 않도록 하였다. 이 때, 동서 말단부에 재배설비 규모를 고려하여 채광패널의 추가설치가 필요하며 트레이의 전면부

에 설치되는 광분산패널은 최대한 많은 빛을 받아 높은 효율로 분산시킬 수 있는 재질과 색채를 활용한다.

6.1 광공급부 채광부 시스템 설계

본 연구의 개발대상은 태양열 회수가 가능한 태양궤도 추적형 자연광 실내공간 인입 및 분배 극대화 반사패널 시스템으로, 천장을 통하여 실내로 유입되는 자연광을 곡면의 반사패널을 활용하여 반사시킨다. 이를 통해 재배시설 내의 조도가 균일해지도록 하여 표준화된 작물 생산이 가능하며 공장형 확장설비 구축을 도모한다. 반사패널 시스템은 생육설비 상단에 설치되며 소경 각도로 경사진 곡면으로 이루어진 형상의 반사패널과 이의 각도와 방향을 조절할 수 있는 구동부 일체로 구성된다.

기존의 광선반 반사패널은 대부분 평면형태로 측창에 설치되어 건축공간 실내 조도의 보조광원으로 활용하고 있다. 최근 효과적으로 실내 깊숙한 곳까지 균일하게 광원을 보낼 수 있도록 곡면형 광선반의 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 광선반 패널을 본 재배시스템에 적용하기 위해 다양한 형태의 광선반을 도입하여 그 효과를 분석하였다.[3][12][13]

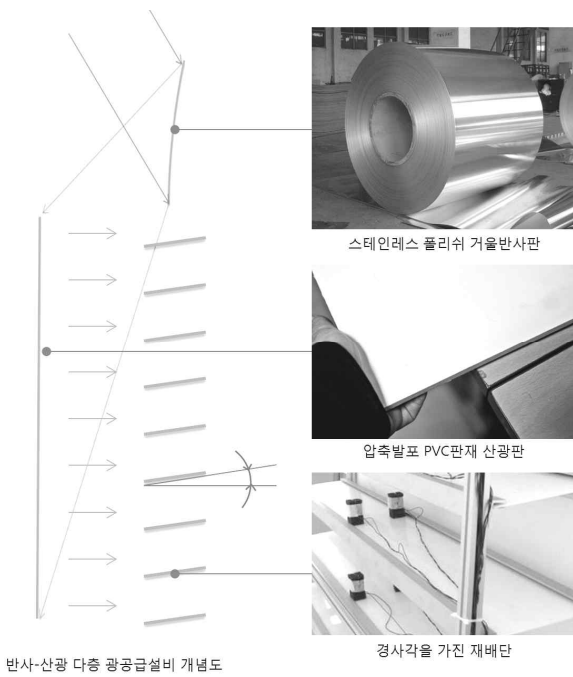


그림 3. 재배시스템에 적용된 광공급 시스템 개요도

평면 반사패널은 입사광을 그대로 반사하며 곡면패널은 입사광을 확산시킬 수 있다. 입사광원을 적층형 재배공간에 확산할 수 있도록 하기 위해서는 평면패널보다는 곡면패널이 적합하다. 따라서 재배시설 각 층에 균일한 반사광을 공급할 수 있도록 반사패널을 <그림 3>과 같은 타입으로 구성하였다.

반사된 태양광은 <그림 3>의 좌측 하단 산란부 난반사 패널에 광을 제공하며 여기서 산란된 간접광원이 각 식물 재배 트레이에 공급되어 작물은 이 산란광을 활용하여 생육한다.

6.2 광공급부 산광부 시스템 설계

방향성을 갖는 직사광선만으로 생육설비 내 적층형 트레이에 균일화된 밝기의 광을 공급하기 어렵기 때문에 채광부에서 반사된 직사광을 간접조명과 같이 난반사패널을 통해 산란시킴으로써 작물 재배트레이 어디에서나 같은 밝기의 빛을 공급받을 수 있도록 산광부 시스템을 설계하였다.

표 3. 태양광 채광부의 반사패널, 산광패널의 작용 개요도

| | 사선형 광공급 구조 | 수직형 광공급 구조 |
|----------------|--|--------------------------------------|
| 반사패널 태양광 전달 방식 | | |
| 평가 | 광공급 효율은 높으나 구조적으로 불안정하고 재배 및 유지보수를 위한 공간 활용이 어려움 | 광공급 효율은 다소 낮으나 구조적으로 안정적이고 공간 활용이 쉬움 |

난반사체는 물체의 전면에서 시점광과는 무관하게 주어진 환경에서 광원의 영향으로만 산란성을 결정지을 수 있다. 이는 시점과는 독립적으로 수행될 수 있음을 의미하며 산란광에 의한 조도효과를 분석하기 위해 람버트 난반사체 반사에 관한 반사 모델을 이용한다. 람버트 에너지 계산식은 다음과 같다.

$$I_{out} = R \int_{2\pi} I(\theta) \cos\theta dw \quad (4)$$

본 연구에서는 람버트 식을 광원과 물체와의 기하학적 관계로 해석하여 시스템 설계에 적용하였다. 이를 통해 산란광의 효과를 시뮬레이션 분석하여 재배 트레이의 작물 재배가능성을 평가하고 이를 바탕으로 채광부의 효과적인 운영 스케줄을 결정한다.[10][11]

7. 광환경 구축 설비 실험 및 시뮬레이션 평가

본 연구에서는 태양광 공급시스템의 적용가능성 검증과 광환경 성능평가를 위해 실제 크기의 절반인 정남향의 단동 유리온실을 구축하고 내부에 1/2스케일의 10단 적층 생육재배대와 식생트레이를 설치하였다. 광공급설비는 생육재배대의 상단에 반사패널과 하단에 산란패널을 설치하고 시뮬레이션 결과 유도된 운영스케줄에 따라 오전 9시부터 오후 5시까지 절기별 태양고도를 추적하고, 온실로 유입되는 전천일사량과 생육설비 재배대 식생트레이 각 층에 공급되는 광합성유효광량자속의 변화를 측정하기 위해 데이터로거와 GSI 전천일사센서 및 LI190SB 광량자 센서를 사용하였다. 본 실험의 목적은 다음과 같다.

- 상층부와 하층부의 광공급 분포 확인(층별 센서배치)
- 재배대 내측과 외측 조도분포 확인(내외측 센서배치)
- 층별 광합성 광요구조건 25,000lux 이상 분포 확인
- 누적 조도량 분포분석을 통한 재배 가능 여부 분석

- 대조군과의 비교를 통한 광분산 효과 입증



그림 4. 자연광 적응형 작물재배 테스트베드

작물 재배시 생육으로 인한 빛 가림의 효과를 고려한 다층 작물재배 트레이의 전후열 광분포를 측정할 수 있도록 실제 작물 1/2 스케일의 CDS 센서모듈을 제작하고 각 센서모듈을 실험군 외측 A열, 내측 B열, 대조군 외측 C열, 내측 D열로 구분하여 배치하고 각 열의 층간 조도분포와 열간의 층별 조도분포 경향 분석을 통해 광 공급설비의 광분산 효과로 인한 조도의 세기와 편차를 확인하였다.

실험결과 온실내 입사되는 일사량의 변화는 정오를 기준으로 조도가 높아졌다가 낮아지며 광공급설비에 의한 다층 트레이의 조도도 비슷한 경향으로 변화하였다. 또한 온실내 입사 일사조도는 8만lux 수준에 비해 광공급설비에 의한 각 층의 조도는 1만5천lux 수준으로 대상작물인 상추재배에 적합한 2만5천lux에 못 미치는 광량이 확보되었다.

정오시점의 A, B, C, D각 열의 층별 조도분포 경향을 보면 광공급설비를 설치한 실험군의 내외측은 층별 조도편차가 비교적 낮으며 각 열간 조도 차이도 크지 않아 광배분 시스템을 설치하지 않은 대조군보다 균일한 광이 공급되는 경향을 보였다. 또한 실험군과 대조군의 시간에 따른 하루 층별 조도변화를 보면 실험군이 각 층별 조도편차가 더 낮아 다층 재배트레이 상, 하단에 균일한 광이 공급되는 경향을 보였다.

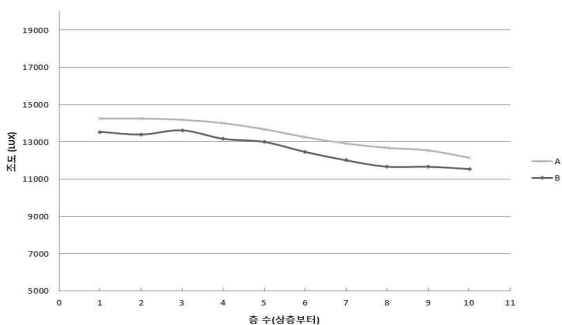


그림 5. 정오(12시)시 재배시설 테스트베드 각 열의 층별 조도분포경향

작물재배 가능성 여부를 판단하기 위해 2010년 충청남도 대전지역 전천일사량(total solar radiation, RAD)을 이용해 시뮬레이션을 진행하여 실험결과와 비교하고, RAD

대비 생육설비 재배대 식생트레이 각 층의 광합성유효광량자속(photosynthetic photon flux, PPF)과의 관계를 도출하였다. 국내 천공 일사량을 포함한 광환경 요소들은 앞서 조사한 국내 대전을 기준으로 적용하였으며 산란패널은 흰색 포맥스 재질을 활용하여 백색도 85%, 난반사율 70%로 적용하여 분석하였다.

시뮬레이션 결과 상관식은 $PPF=2.1842 \times RAD$, 실험결과 상관식은 $PPF=1.6595 \times RAD$ 로 도출되었으며, 측정 포인트내, 외부 및 상, 하단의 조도 분포도는 일정한 광분포를 보였다. 각 층 재배부의 지엽적 위치에 비해 확산패널의 크기가 비교적 크기 때문에 중앙부 재배 트레이에서 광량 손실이 최소화되었으며 확산패널에 의해 상 하단 낮은 편차의 조도분포를 보이며 효과적으로 암영대 제거가 이루어지며 재배트레이 내부까지 조도가 확보되었다.

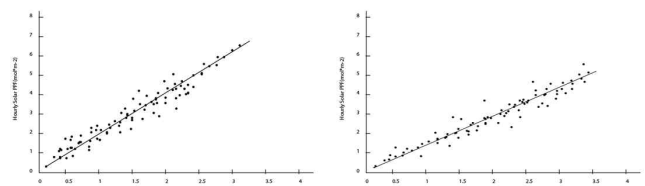


그림 6. 시간당 총 누적 RAD에 대한 각 층별 PPF (좌: 시뮬레이션, 우: 실증실험)

시간당 누적 RAD에 대한 각 층별 PPF 값의 분석결과 시뮬레이션 대비 실증실험에서도 유사한 경향을 나타내었으나 입사 광량이 요구 광량보다 부족한 문제가 발생되었으며 이는 채광 반사패널의 반사효율이 대형화 및 제작으로 예상한 90% 수준보다 낮은 60% 이하 수준으로 표면가공에 의한 효율저하가 낮은 광량확보의 원인으로 보인다. 따라서 엔지니어링 테스트베드 구축 및 실증실험 결과 광환경 공급설비로 각 층별 표준화된 광 공급이 가능하나 광공급효율을 높이기 위한 채광 반사패널의 반사율을 높일 수 있는 방안 모색이 필요하다.

또한 연중 대전지역 월별 전천일사량에 온실 외피투과율(85%)을 적용한 시뮬레이션을 통해 최하단 층 PPF를 산정하면 작물재배를 위한 목표 PPF 요구조건인 11~17mol/m² 조건을 <그림 7>과 같이 만족하므로 포기형 상추를 포함한 다양한 엽채류의 연중재배가 가능함을 알 수 있다.

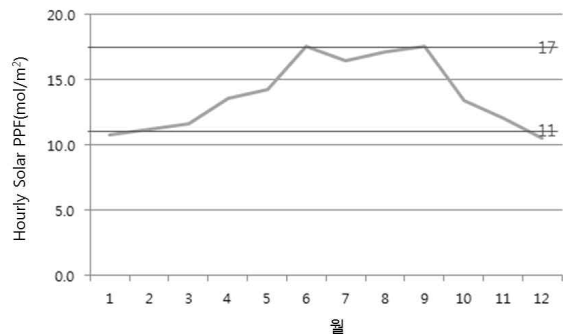


그림 7. 절기별 온실내 RAD 및 적층 재배대 식생트레이의 PPF 상관관계 시뮬레이션 결과

8. 결론

본 연구는 국내 광환경을 중심으로 적층형 밀식재배공간에 적용 가능한 태양광 분배 시스템을 설계하고 도출된 광선반 설비의 형태 및 구동요소에 따른 태양광 분배 효과를 예측하기 위한 선행적 연구이며 시뮬레이션 결과를 통한 절기별 일사량, 분배효율 및 시설 내 조도수준에 관한 결론은 아래와 같다.

1. 광 배분시스템은 자연광 효율 극대화를 위해서 다단 적층형 트레이 골고루 태양광을 분산시키기 위한 천장 설치형 반사판으로 이루어진 채광부와 이를 통해 반사된 빛을 분산시켜 트레이의 작물들에 전달하는 광분산판으로 이루어진 산광부로 구성된다.
2. 절기별 일사량 분석에 의거하여 광분산 시스템을 통한 생육설비 내 각 층별 연중 광공급량이 식물생육에 충분한지의 여부를 시뮬레이션을 해 보면, 대표 작물의 광포화점에 가까운 조도가 확보되어 본 설비를 통한 연중 작물재배가 가능함을 알 수 있다.
3. 태양고도 및 방위각의 변화에 따라 요구되는 채광부 액티브 요소의 최소화를 위해 최적화된 재배시설의 배치와 채광 설비 디자인이 중요하며 시간에 따라 남향에서 북향으로 변화하는 태양광의 방향을 효과적으로 채광하기 위해서는 액티브 요소가 도입되어야 한다. 따라서 기존의 태양추적시스템의 대형화가 가능한 대안을 모색하여 단일 축 남향 광선반 패널을 활용한 채광 시스템이 고려되어야 한다.
4. 반사패널과 산란패널의 조합을 통한 엔지니어링 프로토타입 실험에서 다단 작물재배 트레이에 대한 비교적 균등한 자연광 배분의 효과를 검증하였으며 반사율이 높은 반사판의 제작이 본 연구에서 지향하는 시스템의 구현에 가장 큰 요건임을 확인하였다.

참고문헌

1. 강승원 역 (2008), 식물공장, 월드사이언스
2. 강희찬 (2009), SERI경제포커스 제255호: 기후변화에 대응한 농업의 진화-식물공장, 삼성경제연구소
3. 김동수, 윤종호, 신우철, 이광호 (2011). 광선추적기법을 활용한 곡면형 광선반 시스템 설계 및 채광성능 평가, 한국태양에너지학회논문집, 30(4), 136-141.
4. 김봉균, 김정태 (2005). 광선반 유형에 따른 실내 채광특성에 관한 축소모형 실험적 연구, 한국생태환경건축학회 학술발표대회논문집, 5(2), 43-50.
5. 정인영, 김정태 (2004). 가변 유리투과체로 구성된 실내공간의 채광 성능평가, 한국조명전기설비학회 학술발표대회논문집, 2004.11.3, 63-68.
6. 김정태, 김기철, 김곤 (2004). Mock-up model을 이용한 경사형광선반 채광시스템의 개발 및 채광성능평가에 관한 연구, 한국태양에너지학회논문집, 24(2), 39-50.
7. 김정태, 신현구, 김곤 (2003). 광반사를 이용한 광선반 채광시스템의 기본형상 설계 및 성능평가에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 19(3), 177-184.

8. 김정호 (2009), 농정연구속보 제61호: 식물공장의 동향과 전망, 한국농촌경제연구원
9. 농촌진흥청 고령지농업연구소 (2007), 표준영농교본-161: 상추재배, 농촌진흥청
10. 배종국, 강기환, 김경수, 유권중, 안형근, 한득영 (2011). Lambert W 함수를 이용한 태양전지 모델링, 한국태양에너지학회 학술발표대회논문집, 31(2), 278-281.
11. 정연철, 김제정 (1994), 광선 추적법을 이용한 분할 알고리즘, 한국정보과학회 학술발표대회논문집, 21(2), 543-546.
12. 조일식, 김병수, 이진숙 (2004). 조명해석 프로그램을 이용한 광선반의 적정크기 선정 및 채광성능분석에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 20(6), 231-238.
13. Beltran, L.O, E.S. Lee, Selkowitz (1997). Advanced Optical Daylighting Systems: Light Shelves and Light Pipes, Journal of the Illuminating Engineering Society, 26(2), 91-106.

투고(접수)일자: 2013년 3월 13일

수정일자: (1차) 2013년 4월 8일

게재확정일자: 2013년 4월 8일