

# 단동식 유리온실에서 태양전지의 선별적 적용과 에너지 절감에 관한 조도 시뮬레이션

## Illumination simulation for selective application and energy saving of solar cells in single-span glass greenhouse

정해영\*, 이봉주\*\*★

Hai-Young Jung\*, Boong-Joo Lee\*\*★

### Abstract

In this study, when applying LED light sources within a single-span glass greenhouse for growing crops, the illumination simulation was performed on the ceiling and side of the glass greenhouse to determine the selective placement and effective light transmission of Si series solar cells and dye-sensitive solar cells (DSSC) for supplying LED power source. In addition, energy saving effects of glass greenhouses were analyzed for optimum lighting control when both daylight and LED light sources are considered in glass greenhouses.

### 요약

본 연구에서는 작물재배용 단동식 유리온실 내에 LED 광원을 적용할 때, LED의 전원 공급을 위한 태양전지를 에너지 저감과 광투과율을 고려하여 Si 계열의 태양전지와 염료감응형 태양전지(DSSC)를 유리온실에 선별적 배치하고, 작물 재배에 유효한 태양전지의 광투과율을 결정하기 위해 유리온실의 천정과 측면에 대해 광투과율 변화에 따른 조도 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 유리온실에서 주광과 인공광인 LED 광원을 모두 고려하는 경우 최적 조명제어에 따른 유리온실의 에너지 절감 효과를 분석하였다.

*Key words : Single-span glass greenhouse, Si series solar cells, Dye-sensitive solar cells, LED, Simulation*

### 1. 서론

현대의 시설원예는 일찍부터 온실산업이 성행한 네덜란드와 같은 국가들이 중심이 되어 유럽에서 부터 발달하였고, 최근에는 중국의 시설면적이 급격히 증가하면서 세계에서 가장 넓은 시설면적을

갖고 있다[1]. 국내의 경우 국가 차원에서 온실산업의 국제 경쟁력을 강화하고 표준화, 규격화 및 국산화를 유도하고 있으며, 농가급형 및 한국형 유리온실 표준모델 등을 개발하여 보급하였다[2]. 작물 재배에 이용되는 유리온실은 주로 채소 또는 화훼용 온실이며 최근에는 친환경 농업과 첨단기술이

\* Professor, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Semyung Univ., Korea

\*\* Professor, Dept. of Electronic Engineering, Namseoul Univ., Korea

★ Corresponding author

E-mail : bjlee@nsu.ac.kr, Tel : +82-41-580-2702

※ Acknowledgment

This paper was supported by the seymung University Research Grant of 2019

Manuscript received Dec. 18, 2019; revised Dec. 25, 2019; accepted Dec. 30, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접목된 에너지 절감형 유리 온실에 대한 연구가 주목받고 있다. 유리온실은 일반적으로 작물재배를 위해서는 주로 연동식이 많고, 전시 또는 연구의 목적으로는 단동식으로 유리온실을 제작하여 사용하고 있다. 또한, 유리온실 내의 작물재배를 위해서는 주광과 함께 백열등, 형광등, 메탈할라이드 등의 인공광원을 함께 사용하는데 최근에는 상기 기존 광원보다 발광 다이오드인 LED(Light Emitting Diode)가 재배작물의 생육에 필요한 특정 파장 영역의 광원만을 선택적 방출이 가능하고 적외선(열선)이 없어 식물체에 근접 조사도 가능한 장점이 있어 주로 사용되고 있다[1].

본 연구는 에너지 절감형 유리온실의 연구 목적으로 제작될 단동식 유리온실 구조에 발광 다이오드인 LED(Light Emitting Diode)를 적용하고, LED 전원 공급을 위해 친환경 소재로 각광받고 있는 Si 기준의 태양전지와 염료감응형 태양전지(DSSC : Dye Sensitized Solar Cell)을 유리온실의 천정과 측면에 배치하였을 때 조명 시뮬레이션 프로그램인 Relux simulation program을 이용하여 단동식 유리온실에서 태양전지의 선별적으로 적용하고 소비 전력 측면에서 에너지 절감을 이루는 단동식 유리온실의 최적 설계 구조를 제안하고자 하였다.

## II. 본론

### 1. 유리온실의 설계 및 시뮬레이션 조건

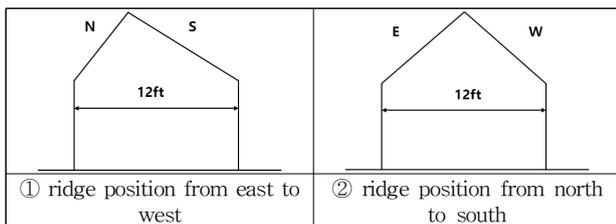


Fig. 1. Ridge position of in the glass greenhouse.

그림 1. 유리온실 시설의 배향(① 동서동 ② 남북동)[1]

일반적으로 유리온실은 그림 1.과 같이 설치방향에 따라 크게 ① 동서동과 ② 남북동으로 구분하고 있다. 겨울에는 태양의 고도가 남쪽에 낮게 위치하기 때문에 동서동으로 지어야 남쪽 지붕면의 수광량이 많아 보온에 좋지만, 남북동은 동서동에 비해 겨울철의 수광량은 적으나 균일하게 빛이 들어와 연중생산에 적당하기 때문에 연동온실의 경우는

일반적으로 남북동으로 설계하고 있다[1]. 한편, 유리온실에 적용되는 광원으로써 LED는 발광효율이 높고 저전류에서 고출력을 얻을 수 있으며, 광출력을 쉽게 변화시킬 수 있다. 또한, LED의 광원은 스펙트럼이 좁아 목적으로 하는 단색광을 발광시킬 수 있으며 방열이 적어 근접 조사가 가능하며 완전 제어형 식물공장과 같은 고도환경제어형 작물재배에서 주목받고 있다[1]. 본 연구에서는 LDE의 전원 공급을 위해 유리온실 천정과 측면에 태양전지를 배치하고자 하였다. 태양전지는 전지 제작에 사용되는 재료, 형태, 원리 등에 따라 분리할 수 있는데 재료에 따라서는 크게 실리콘계, 화합물계, 유기물계 등으로 구분할 수 있고, 형태에 따라서는 결정질 벌크형, 박막형, 집광형 등으로 구분되며 원리에 따라서는 반도체 접합형, 염료감응형 태양전지로 구분된다. 실리콘계 태양전지는 크게 단결정 형태와 다결정 형태의 재료로 나누어지며 단결정은 순도가 높고 높은 효율을 달성할 수 있으나, 고가이고 다결정 재료는 상대적으로 저급한 재료로 상용화가 가능한 정도의 효율의 태양전지이다. 단결정 실리콘을 사용한 태양전지는 최고 효율이 24.7% 수준이며, 염료감응형 태양전지는 제조단가가 저렴하고, 투명성과 다양한 색상 구현이 가능하다는 장점이 있지만, 효율은 약 11%로 실리콘 태양전지에 비해 낮다[3],[4].

본 연구에서는 동서동 단동식 유리온실에 LED 광원을 설치하고 유리온실 천정의 광투과율은 낮지만, 태양전지의 효율이 높은 실리콘 계열의 태양전지를 부착하고, 유리온실 측면에는 상대적으로 높은 광투과율을 갖지만, 태양전지 효율이 낮은 염료감응형 태양전지를 부착한 상태에서 조명 시뮬레이션을 진행하였다[5].



Fig. 2. The structure of glass greenhouse.

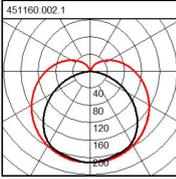
그림 2. 유리온실의 구조

시뮬레이션에 사용된 유리온실의 세부 규격은 다음 각호와 같다.

- ① 가로 : 11.98m
- ② 세로 : 5.63m
- ③ 높이 : 5.4086m
- ④ 지붕 높이 : 3.0045m
- ⑤ 작업면 : 0.75m
- ⑥ 배향각 : 90°
- ⑦ LED조명 설치 높이 : 2m
- ⑧ 조도 계산 바닥면 이격 격차 : 0.75m
- ⑨ 조명 : 32개(3행 12열)
- ⑩ 조명 간격 : x축 : 1m, y축 : 1.68m
- ⑪ 장소 : 강화도
- ⑫ 날씨 : 맑은 날씨
- ⑬ 보수율 : 0.75

Table 1. Product detailed specifications and photometric curves.

표 1. LED 광원의 제품 세부 사양과 배광곡선[6]

	
	
Manufacturer	RZB
Product name	LED Strip-Light
Serial number	451160.002.1
Colour	white
Length L	1,436 mm
Width B	23 mm
Height H	37 mm
Weight	513 g
Colour temperature	4000 K
Colour rendering index (CRI)	80
Lifetime	25000 h (L70/B50)
Beam Angle	138°/96°
System power 1	22 W
Rated luminous flux 1	2,400 lm
Glare evaluation UGR (4H 8H)1	26,6
Luminaire efficacy 1	110 lm/W
	
Light distribution curve	

Relux 조명 시뮬레이션에 사용된 LED 광원의 제품 세부 사양과 배광곡선은 표 1.에서 보여주고 있다.

## 2. 시뮬레이션 항목 및 결과

### 1) Si계열 태양전지의 투과율 변화에 따른 평균 조도 시뮬레이션

유리온실을 설계에 있어서 지붕 투과율에 따른 유리온실의 주광 특성을 알아보기 위해 유리온실의 측면에 배치된 DSSC의 투과율을 40%로 일정하게 유지하고 지붕의 Si계열 태양전지의 투과율을 15%, 30%, 40%, 89%에 변화시켰다. 측정은 오전 6시부터 오후 10시까지 4시간 간격으로 춘분, 하지, 추분, 동지에 대해 수행하였고, 최소 평균 조도 값과 균제도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2. 시뮬레이션 결과를 보면 지붕의 Si계열 태양전지 투과율이 15%, 30%, 40%, 89%로 증가할수록 평균 조도 값은 봄, 여름, 가을, 겨울에 일반적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 천정 투과율이 증가함에 따라 천정으로부터 유입되는 입사광량이 증가했기 때문으로 생각된다.

Table 2. Average illumination values due to the variation of ceiling optical transmittance.

표 2. 유리온실 천장 광투과율 변화에 따른 평균 조도값

Eav[lx]	light transmittance of roof	light transmittance of roof					Ave.
		06:00	10:00	14:00	18:00	22:00	
Spring equinox (21-Mar)	15%	164	17100	3950	1360	0	4514.8
	30%	180	17400	4190	1340	0	4622.0
	40%	189	17600	4360	1380	0	4705.8
	89%	239	18900	5160	1580	0	5175.8
Summer solstice (21-Jun)	15%	1680	13200	1290	4550	0	4144.0
	30%	2120	13600	1570	4750	0	4408.0
	40%	2410	13800	1740	4900	0	4570.0
	89%	3770	15000	2560	5530	0	5372.0
Fall equinox (23-Sep)	15%	257	15700	3630	3090	0	4535.4
	30%	279	16100	3890	1170	0	4287.8
	40%	294	16300	4030	1110	0	4346.8
	89%	377	17600	4860	1250	0	4817.4
Winter solstice (22-Dec)	15%	0	6150	5700	146	0	2399.2
	30%	0	6340	5920	154	0	2482.8
	40%	0	6460	6020	159	0	2527.8
	89%	0	7120	6680	187	0	2797.4

한편 시간대로 보면 10시의 평균 조도값이 가장 큰 값을 나타내고 14시의 값이 작게 나타남을 확인할 수 있다. 특히 여름철 하지 때 14시의 평균조도값이 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 여름철의 태양 고도가 높기 때문으로 생각되는데 태양의 고도가 전체적으로 하지보다 낮은 춘분 및 추분과 동지에서는 태양의 고도가 낮아 유리온실 측면을 통해 유입되는 태양광이 많지만, 여름철 하지의 경우에는 태양의 고도가 높아 상대적으로 유리온실의 측면을 통해 유입되는 태양광량이 감소했기 때문으로 생각된다. 또한, 시뮬레이션 결과를 보면 지붕의 투과율 변화가 15%~40% 사이의 변화 시의 평균조도의 변화량보다 계절의 변화에 의한 태양 고도의 변화 시의 평균조도 변화량보다 작음을 알 수 있었다. 따라서 유리온실로 유입되는 태양광의 양은 유리온실의 지붕 투과율 변화보다 측면 투과율 변화가 더 중요한 인자로 작용한다고 생각할 수 있다. 유리온실의 천정 광투과율에 대해 그림 3.는 시간과 계절에 대해 평균 조도를 막대그래프로 나타내었고 그림 4.는 투과율별로 평균조도를 꺾은 선 그래프로 상세히 나타내었다.

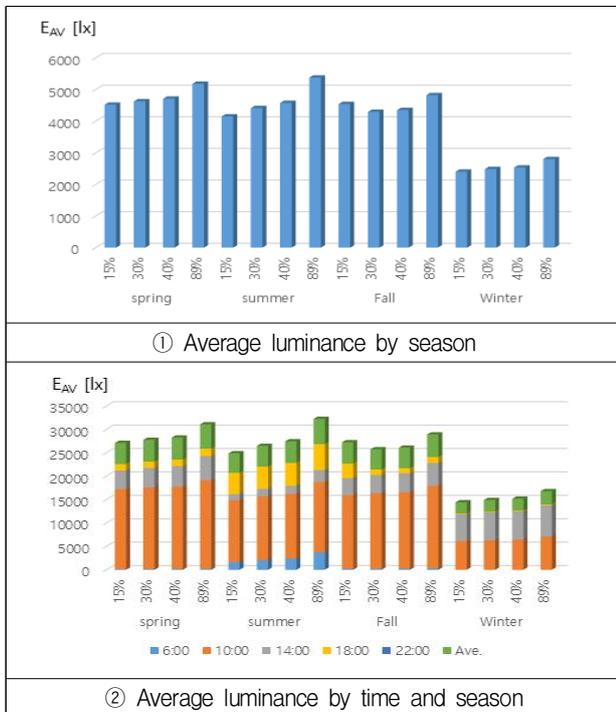


Fig. 3. Average luminance between time and season for the light transmittance of a glass greenhouse ceiling.  
 그림 3. 유리온실의 천정 광투과율에 대한 시간과 계절별 평균 조도

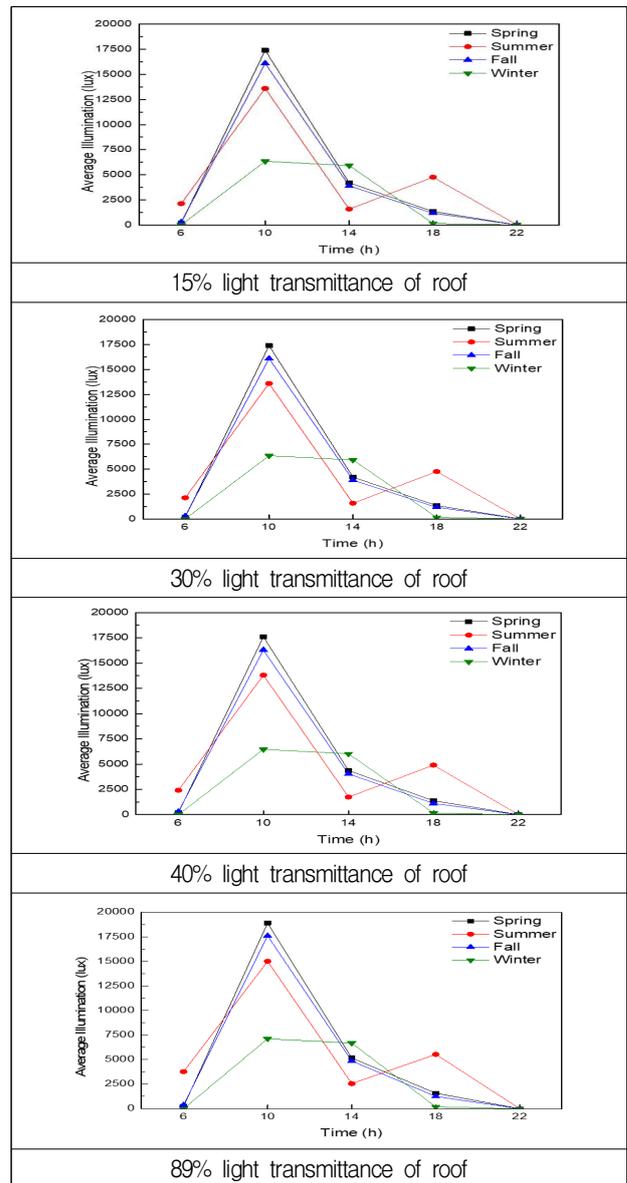


Fig. 4. Average luminance of a glass greenhouse ceiling by the light transmittance ratio.  
 그림 4. 유리온실의 천정 광투과율별 평균 조도

2) 염료감응형 태양전지의 투과율 변화에 따른 평균 조도 시뮬레이션

유리온실의 천정에 배치되는 Si 계열 태양전지의 투과율 변화 시뮬레이션 결과를 통해 유리온실의 유입되는 태양광량은 지붕의 투과율 변화보다 태양 고도의 변화가 더 많은 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 유리온실에 유입되는 태양광은 유리온실의 지붕보다 유리온실의 측면이 더 많다고 생각할 수 있다. 따라서 다음 시뮬레이션 분석으로 유리온실의 천정 투과율을 15%로 일정하게 하고 유리온실의 측면에 배치될 염료 감응형 태양

전지(DSSC : Dye Sensitized Solar Cell)의 투과율을 20%, 30%, 40%로 변화시키고, 오전 6시부터 오후 10시까지 4시간 간격으로 구분, 하지, 추분, 동지에 대해 최소 평균 조도 값과 균제도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3.의 시뮬레이션 결과를 보면 유리온실의 측면 투과율이 20%, 30%, 40% 증가할수록 유리온실 내로 유입되는 태양광의 양이 크게 증가됨을 알 수 있다. 유리온실의 측면 투과율이 20%로 기준 하였을 때, 사계절 중 봄이 모든 시간 대비 평균으로 가장 높은 평균 조도 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Table 3. Average illumination values due to the variation of side light transmittance.

표 3. 유리온실 측면 광투과율 변화에 따른 평균조도 값

$E_{av}$ [lx]	light transmittance of roof	06:00	10:00	14:00	18:00	22:00	Ave.
Spring equinox (21-Mar)	15%	112	13000	3200	834	0	3429.2
	30%	138	15000	3560	1060	0	3951.6
	40%	164	17100	3950	1360	0	4514.8
Summer solstice (21-Jun)	15%	1240	9550	970	2660	0	2884
	30%	1470	11300	1090	3610	0	3494
	40%	1680	13200	1290	4550	0	4144
Fall equinox (23-Sep)	15%	172	12500	2850	674	0	3239.2
	30%	212	14000	3250	860	0	3664.4
	40%	257	15700	3630	1080	0	4133.4
Winter solstice (22-Dec)	15%	0	5800	4480	102	0	2076.4
	30%	0	5160	5110	124	0	2078.8
	40%	0	6150	5700	146	0	2399.2

해가 뜨지 않는 시간인 22시와 겨울에서 6시를 제외하면 10시에서 봄이 가장 높은 평균 조도 값을 가지고 18시에서 겨울이 가장 낮은 평균 조도 값을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 태양 고도가 높지 않은 봄, 가을에는 유리온실의 측면을 통해 유입되는 태양광량이 많고 평균조도 값이 크고, 상대적으로 여름의 경우는 태양 고도가 높아 유리온실의 측면으로 유입되는 태양광량이 적어 평균조도 값이 작게 나타났다. 한편, 겨울의 경우는 다른 계절에 비해 일조시간이 짧아 상대적으로 낮은 평균조도 값을 나타냈다고 생각된다. 또한, 이러한 경향은 유리온실 측면 투과율이 30%와 40%일 경우에도 유사

하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

유리온실의 측면 광투과율에 대해 그림 5.는 시간과 계절에 대해 평균 조도를 막대그래프로 나타내었고 그림 6.는 투과율별로 평균조도를 꺾은 선 그래프로 상세히 나타내었다. 그림 3.에서 처럼 그림 5. 역시 유리온실의 투과율이 증가할수록 유리온실 내로 유입되는 태양광량이 증가함을 알 수 있다. 하지만 그림 7.의 그래프의 비교를 통해 알 수 있듯이 유리온실의 지붕 투과율 변화보다 유리온실의 측면 투과율 변화가 유리온실 내 평균조도 값에 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 따라서 유리온실 설계 시에 유리온실 지붕의 경우 투과율이 불리하더라도 에너지 절감이 큰 태양전지를 배치하고 반면에 유리온실 측면의 투과율 설정은 유리온실 내 평균조도 값에 크게 영향을 주는 인자이므로 다소 에너지 효율에는 불리하더라도 투과율이 좋은 재료를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한, 유리온실 지붕의 투과율 30%와 40% 간에는 평균조도 변화율이 크다고 볼 수 없으므로, 만일 에너지 효율 측면에서 투과율 30%의 재질이 투과율 40% 재질보다 유리하다면 투과율 40% 재질을 선택하는 것이 바람직하다고 판단할 수 있다.

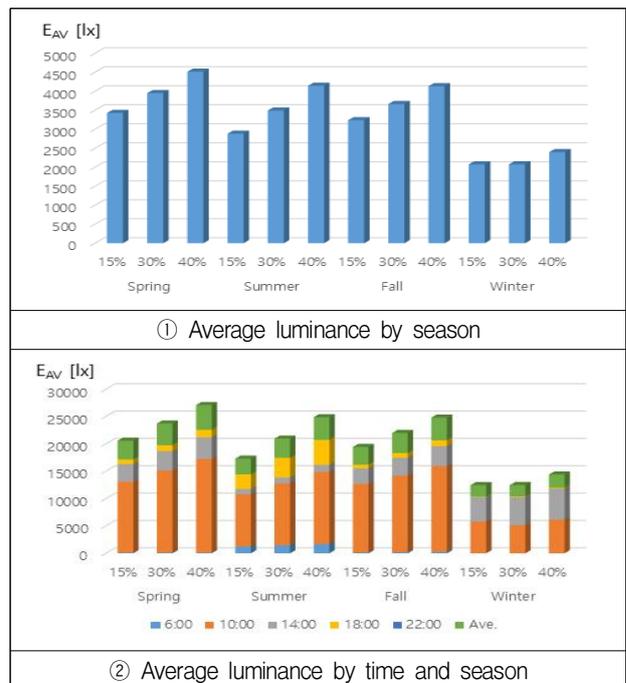


Fig. 5. Average luminance between time and season for the light transmittance of a glass greenhouse side. 그림 5. 유리온실의 측면 광투과율에 대한 시간과 계절별 평균 조도 값

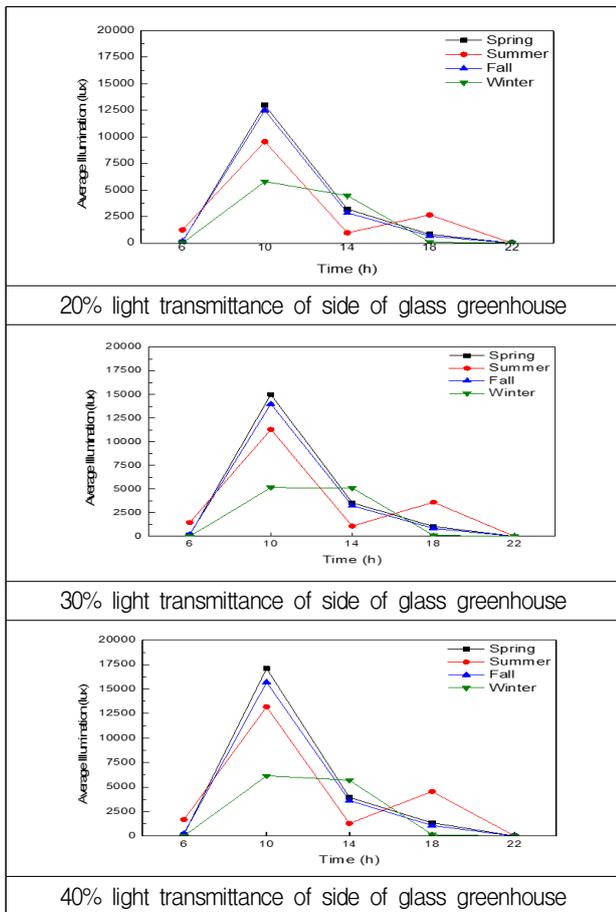


Fig. 6. Average luminance of a glass greenhouse side by the light transmittance ratio.

그림 6. 유리온실의 측면 광투과율 별 평균 조도

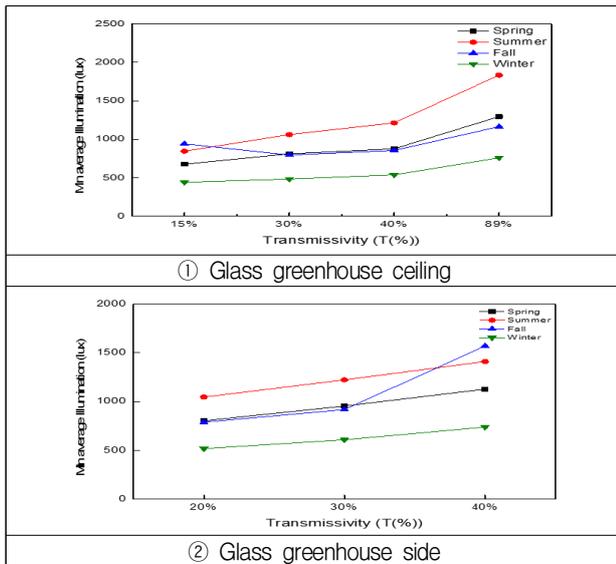


Fig. 7. Minimum average illumination value according to the light transmittance of the glass greenhouse side and ceiling by season.

그림 7. 유리온실 천정과 측면 광투과율 변화에 따른 계절별 최소 평균조도 값

3) 주광과 인공광원을 고려한 상추 재배 유리온실의 조도 시뮬레이션

재배작물에 있어서 빛의 세기는 작물의 생장에 직접적인 영향을 주는 인자로 작용하는데 재배작물은 광보상점 이상의 빛의 세기가 있어야 성장할 수 있다. 본 연구에서는 강화도에 실제 제작될 단동식 유리온실 구조에서 재배작물 상추의 성장을 위해 필요한 빛의 세기를 주광과 LED 광원을 함께 고려할 때 소비전력을 최소화하는 최적 조명제어 형태를 분석하고자 하였다. 유리온실 내 LED 조명의 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- ① LED 조명 적색 청색 비율 : 3:1
- ② LED 조명 설치 높이 : 2 m
- ③ 조도 계산 바닥면 이격 격차 : 0.75 m
- ④ LED 조명 개수 : 132개 (3행 43열)
- ⑤ LED 조명 간격 : x축 0.25 m, y축 1.68 m

Table 4. Light compensation and saturation points in *Lactuca ativa*.

표 4. 상추 작물의 동화특성[1]

Category	Growing degree (°C)	light compensation point (lx)	light saturation point (lx)
Crop			
<i>Lactuca ativa</i>	15~20	1500 lx	25000 lx

Table 5. LED fully illuminated by season and time zone.

표 5. 계절과 시간대별 LED 광원 전체 점등 형태

Solar term	Spring equinox (21-Mar)	Summer solstice (21-Jun)	Fall equinox (23-Sep)	Winter solstice (22-Dec)
Clock				
05~06	All ON	All ON	All ON	All ON
06~07	All ON	All ON	All ON	All ON
07~08	All ON	All ON	All ON	All ON
08~09	All ON	All ON	All ON	All ON
09~10	All ON	All ON	All ON	All ON
10~11	All ON	All ON	All ON	All ON
11~12	All ON	All ON	All ON	All ON
12~13	All ON	All ON	All ON	All ON
13~14	All ON	All ON	All ON	All ON
14~15	All ON	All ON	All ON	All ON
15~16	All ON	All ON	All ON	All ON
16~17	All ON	All ON	All ON	All ON
17~18	All ON	All ON	All ON	All ON
18~19	All ON	All ON	All ON	All ON
19~20	All ON	All ON	All ON	All ON
20~05	All ON	All ON	All ON	All ON

Table 6. Minimum average illumination and power consumption in LED full On.

표 6. LED 전체 점등 시 조도와 소비전력

All ON	Eav [lx]	Emin [lx]	Emax [lx]	Power Consumption [W]
	3140	1880	3720	2904W

표 4.은 상추 작물의 동화특성을 나타내고 있는데 상추 재배를 위한 광보상점은 1500 lx이다.

시뮬레이션에서는 주광의 영향이 전혀 없는 조건에서 조명의 개수와 높이, 조도가 계산될 높이를 조절하여 설치된 LED 광원을 전부 점등할 때 최소 조도 값이 상추의 광보상점인 1500 lx를 넘을 수 있도록 설정을 해주었다. 이렇게 설정한 LED 광원의 개수는 3행 4열로 총 132개이고 사용된 LED 광원의 소비전력이 22 W이므로 LED 전원을 전부 점등할 때 총소비전력은 2904 W이다.

Table 7. Illumination and power consumption in LED full on with daylight.

표 7. 주광과 LED 전체 점등을 함께 고려했을 때 소비전력량, 균제도, 평균조도, 최소조도 값

Solar term	100% Full ON			
	Power Consumption [W]	Illumination uniformity	Eav [lx]	Emin [lx]
Spring equinox (21-Mar)	69.7kWh	0.466	6059	2525
Summer solstice (21-Jun)	69.7kWh	0.496	6782	2807
Fall equinox (23-Sep)	69.7kWh	0.465	5809	2432
Winter solstice (22-Dec)	69.7kWh	0.496	4078	2065

표 5.는 계절과 시간대별 LED 광원 전체 점등한 형태를 나타낸 것이고, 표 6.는 LED 광원 132개를 전부 점등하였을 때 조도와 소비전력 등의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 표 7.은 주광과 LED 전체 점등을 함께 고려했을 때 소비전력량, 균제도, 평균조도, 최소조도 값을 나타내고 있다. LED 광원 132개의 소비전력이 2.904 kW이므로 24시간을 반영하면 대략 69.7 kWh의 소비전력량을 보였다.

Table 8. Optimal LED control by season and time.

표 8. 계절과 시간대별 LED 광원의 최적 점등 형태

Solar term / Clock	Spring equinox (21-Mar)	Summer solstice (21-Jun)	Fall equinox (23-Sep)	Winter solstice (22-Dec)
05~06	All ON	All ON	All ON	All ON
06~07	All ON	All OFF	All ON	All ON
07~08	All OFF	All OFF	All OFF	All ON
08~09	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
09~10	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
10~11	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
11~12	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
12~13	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
13~14	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
14~15	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
15~16	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
16~17	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
17~18	All OFF	All OFF	All OFF	All OFF
18~19	All OFF	All OFF	All OFF	All ON
19~20	All ON	All OFF	All ON	All ON
20~05	All ON	All ON	All ON	All ON

Table 9. Illumination and power consumption in LED optimal control with daylight.

표 9. 주광과 LED 최적 점등을 함께 고려했을 때 소비전력량, 균제도, 평균조도, 최소조도 값

Solar term	scene control			
	Power Consumption [W]	Illumination uniformity	Eav [lx]	Emin [lx]
Spring equinox (21-Mar)	34.8kWh	0.55	3167.5	1734.2
Summer solstice (21-Jun)	29.0kWh	0.56	3239	1797.0
Fall equinox (23-Sep)	34.8kWh	0.55	3168.3	1739.2
Winter solstice (22-Dec)	40.7kWh	0.54	3150.7	1713.6

표 8.은 각 절기에 대해 시간별로 평균 조도값과 균제도의 측면에서 가장 효율이 좋은 점등방법을 사용한 형태를 보여주고 있고, 표 9.은 각 절기별 LED 광원을 최적제어로 점등 시 소비전력량, 균제

도, 평균조도, 최소조도 값을 나타내고 있다. 결과적으로 132개의 LED 광원을 전부 점등 시 소비전력량 69.7 kWh 대비 주광을 고려고 LED 광원을 최적 제어하면 춘분의 경우 50%, 하지의 경우 58%, 추분의 경우 50%, 동지의 경우 42%의 소비전력량 감소 효과를 기대할 수 있다.

### III. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 강화도에 설치되는 작물재배용 단동식 유리온실의 설계에 있어서 LED 광원을 유리온실 내에 적용할 때, LED의 전원 공급을 위한 Si 계열의 태양전지와 염료감응형 태양전지(DSSC)의 광투과율을 선정하고 주광과 LED 광원을 모두 고려하는 경우 소비전력량 감소효과를 분석하고자 하는 연구로 크게 세 가지 항목에 대해 조도 시뮬레이션을 수행하였다.

첫째, 유리온실의 지붕에 배치되는 Si 계열의 태양전지의 광투과율을 15%, 30%, 40%, 89%로 변화시켜가며, 오전 6시부터 오후 10시까지 4시간 간격으로 춘분, 하지, 추분, 동지에 대해 조도 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 지붕의 Si계열 태양전지 투과율이 15%, 30%, 40%, 89%로 증가할수록 평균조도 값은 절기와 무관하게 평균조도 값이 증가하는 결과를 얻었다. 즉, 천정 투과율의 증가로 천정으로 유입되는 광량이 증가 되었다고 생각된다. 하지만, 시간대로 보면 10시의 평균조도 값이 가장 큰 값이 나타났고, 14시의 평균조도 값이 가장 작게 나타났다. 절기적으로는 여름철 하지 때 14시의 평균조도 값이 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 결과는 태양의 고도와 관련이 있다고 생각되는데 여름철의 경우 태양 고도가 높아 유리온실 측면을 통해 유입되는 태양광량이 줄었기 때문이며, 지붕의 투과율이 15%~40% 사이의 변화할 때 평균조도 변화량보다 계절의 변화로 인한 태양 고도의 차이가 평균조도 변화량보다 크게 작용함을 확인할 수 있었다. 유리온실의 천정에 배치되는 Si 계열의 태양전지의 투과율은 40% 수준까지 유리온실 평균조도에 미치는 영향은 적다는 것을 확인하였다.

둘째, 유리온실의 천정 투과율을 15%로 일정하게 하고 유리온실의 측면에 배치될 염료감응형 태양전지(DSSC: Dye Sensitized Solar Cell)의 투과

율을 20%, 30%, 40%로 변화시켜가며, 오전 6시부터 오후 10시까지 4시간 간격으로 춘분, 하지, 추분, 동지에 대해 최소 평균 조도 값과 균제도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 태양 고도가 높지 않은 봄, 가을에는 유리온실의 측면을 통해 유입되는 태양광량이 많아 평균조도 값이 크고, 상대적으로 여름의 경우는 태양 고도가 높아 유리온실의 측면으로 유입되는 태양광량이 적어 평균조도 값이 작게 나타났다. 하지만, 유리온실 지붕의 투과율 변화에 따른 평균조도 변화율이 작고 유리온실의 측면 투과율의 경우 30%와 40% 간에는 평균조도 변화율 상대적으로 크다는 것을 확인하였다. 따라서 위 두 가지 항목의 시뮬레이션 결과를 통해 LED 전원 공급을 위해 유리온실에 배치되는 태양전지는 유리온실의 천정과 측면에 따라 선택적으로 적용하는 것이 평균조도와 에너지 효율 측면에서 유리하다는 것을 확인하였다. 즉, 유리온실의 천정에는 광투과율이 30% 수준으로 낮아도 에너지 효율이 높은 Si 계열 태양전지를 배치하고 유리온실의 측면에는 에너지 효율이 낮은 광투과율이 40% 이상인 염료감응형 태양전지를 배치해야 유리온실 내 높은 평균조도와 에너지 효율을 기대할 수 있다고 생각된다.

셋째, 단동식 유리온실 구조에서 재배작물 상층의 성장을 위해 필요한 빛의 세기를 주광과 LED 광원을 함께 고려할 때 최적 조명제어 시의 유리온실 내 132개의 LED 광원을 전부 점등 시 대비 춘분의 경우 50%, 하지의 경우 58%, 추분의 경우 50%, 동지의 경우 42%의 소비전력량 감소가 가능함을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통해 유리온실의 천정 및 측면에 배치되는 태양전지의 종류와 광투과율을 결정하고 유리온실 내 LED 광원의 최적 제어를 통해 기대할 수 있는 에너지 저감효과를 확인했다. 향후 본 연구의 시뮬레이션 결과인 태양전지의 선별적 적용과 최적제어를 통한 에너지 절감효과와 실제 제작된 유리온실에서의 에너지 절감효과를 비교 분석하고 조도 이외에 에너지 절감형 유리온실의 온도 특성에 관한 연구를 수행하고자 한다.

### References

- [1] W. Moon, Y. B. Lee, J. E. Son "Protected

Horticulture,” Knou press, 2016.

[2] H. Y. Jung, B. J. Lee, S. H. Lee, “Computer Simulation of Daylight Characteristics considering Glass Greenhouse Materials and Structure,” *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol.32, no.3, pp.20–29, 2018. DOI: 10.5207/JIEIE.2018.32.3.020

[3] J. H. Lee, “Current Status and Future Prospects of Solar Cells,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.25, no.10, pp.7–22, 2008.

[4] B. E. Moon, E. G. Choi, “Performance Analysis of the TiO<sub>2</sub> Dye-Sensitized Solar Cell according to Seasonal Changes,” *Protected Horticulture and Plant Factory*, Vol.23, no.3, pp.221–228, 2014. DOI: 10.12791/KSBEC.2014.23.3.221

[5] B. J. Lee, “The Glass Greenhouse’s Lighting Simulation for Ginseng with Solar Cell and LED,” *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, no.2, pp.14–19, 2019. DOI: 10.5762/KAIS.2019.20.2.14

[6] RZB Rudolf Zimmermann, “Strip-Light LED 451160.002.1 | Linear luminaires datasheet,” <https://www.rzb.de/en/products/catalogue/indoor-lighting/ceiling-and-wall-luminaires/strip-light/451160-002-1/>

## BIOGRAPHY

**Hai-young Jung** (Member)



1999 : B.S. degree in Electrical Engineering, Inha University.  
2001 : M.S. degree in Electrical Engineering, Inha University.  
2019 : Ph.D. degrees in Electrical Engineering, Inha University.

Since 2019, he has been a Professor in the Department of Fire and Disaster Prevention, Semyung University, Korea.

**Boong-Joo Lee** (Member)



1996 : B.S. degree in Electrical Engineering, Inha University.  
1998 : M.S. degree in Electrical Engineering, Inha University.  
2003 : Ph.D. degrees in Electrical Engineering, Inha University.

Since 2007, he has been a Professor in the Department of Electronic Engineering, Namseoul University, Korea.  
Professor in the