

사업명	지역대학우수과학자지원사업
과제번호	R05-2000-000-00389-0

온실의 일일적산광합성유효복사량 조절기술 개발

Development of control technology of daily
integral photosynthetic active radiation in greenhouse

2003. 10. 31.

총괄(주관)연구책임자 소속 경북대학교 성명 이현우

한국과학재단

〈 목 차 〉

I. 연구계획 요약문

1. 국문요약문 -----2

II. 연구결과 요약문

1. 국문요약문 -----3
2. 영문요약문 -----4

III. 연구내용

1. 서론 -----5
2. 연구방법 및 이론 -----5
3. 결과 및 고찰 -----9
4. 결론 -----18
5. 인용문헌 -----19

〈 연구계획 요약문 〉

중심어	핵심중심어	관련중심어
	일일적산광합성유효복사량	광환경 제어
	차광스크린	차광량
	인공광	보광량
연구목표	<p>농산물은 기후와 시장동향에 따라 물량, 품질, 가격이 변동하고 산지에 따라 상품규격이나 품종이 다양하기 때문에 적기에 수출물량을 공급하고 지속적으로 확보하는 것이 어려운 문제로 대두되고 있다. 따라서 앞으로 농산물의 국제 경쟁력은 상품의 고품질화와 시장의 변화에 따른 상품의 안정적 공급에 달려 있다고 할 것이다. 연구결과에 의하면 작물이 안정적으로 생장하고 고품질의 수확물을 지속적으로 생산하기 위해서는 적정 일일적산광합성유효복사량을 일정하게 공급할 수 있어야 한다. 일반적으로 겨울에 비해 여름에 일사량이 훨씬 많은 것으로 알려져 있지만 실제로 일일적산일사량은 여름철에도 많은 날이 겨울철과 비슷한 값을 나타내고 있기 때문에 연중 일일적산일사량의 변화는 상당히 크다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 고품질의 농산물을 년중 안정적으로 공급하는데 필요한 기술을 제공하기 위하여 온실에서 일일적산광합성유효복사량을 작물의 생육조건에 적합하게 유지시킬 수 있는 방법을 개발하고자 한다.</p>	
연구내용	<p>본 연구의 주내용은 자연광의 변화에 따른 온실 내부의 광합성유효복사량 년중 변화 구명, 공시작물의 재배를 위한 필요 보광량 및 차광량의 변화 구명, 적정 일일적산광합성유효복사량의 공급을 위한 인공광 및 차광스크린의 제어 알고리즘 구축 및 생장실험을 통한 광환경 조절성능 검증을 실시하여 온실에 일일적산광합성유효복사량을 적절하게 공급할 수 있는 인공광 및 차광스크린의 설계자료를 제시하는 것이다.</p>	
기대효과 (응용분야 및 활용범위 포함)	<p>자연광의 변화에 따라 광환경을 조절할 수 있는 온실설계에 필요한 자료가 부족한 현실을 감안할 때 본 연구에서 개발될 인공광 및 차광스크린을 이용한 광환경 조절방법은 온실의 광환경 조절기술의 발전에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 조절이 비교적 어렵다고 하는 온실의 통합환경조절을 위한 기술개발에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.</p>	

〈 연구결과 요약문 〉

중심어	핵심중심어	관련중심어	
	일일적산 광합성유효광량자속	광량조절	기상조건
	차광스크린	차광율	차광시간
	인공광	광강도	보광시간
연구목표	본 연구의 목표는 차광스크린 및 인공광을 이용하여 상추재배 온실에 적절한 일일적산 광합성유효광량자속을 안정적으로 공급하는 방법을 제시하는 것이다.		
연구내용	<p>본 연구의 내용은 기상조건에 따른 전천일사 및 광합성유효광량자속의 온실에 대한 평균투과율을 분석하고 전천일사와 광합성유효광량자속의 상관관계를 분석한다. 온실에 재배되는 상추에 적절한 일일적산 광합성유효광량자속을 공급하기 위해 필요한 필요보광량 및 필요차광량의 변화를 분석한다. 차광을 통하여 목표광량을 얻는데 소요되는 차광율별 차광시간을 분석하고, 보광을 통하여 목표광량을 얻는데 필요한 인공광의 광강도에 따른 보광시간을 분석한다. 얻어진 결과를 토대로 온실에서 일일적산 광합성유효광량자속을 안정적으로 공급할 수 있는 차광스크린 및 인공광의 설계기술을 구명한다. 목표광량을 공급하기 위한 차광 및 보광 제어알고리즘을 구축하고 성능을 검증한다.</p>		
연구성과	<p>산란광이 많은 흐린 날과 직달광이 많은 맑은 날의 온실 투과율 변화는 상당한 차이가 있기 때문에 온실의 투과율은 기상조건에 따라 다르게 적용되어야 할 것으로 판단되었다. 시간당 광합성유효광량자속과 전천일사량과의 상관식을 유도하였으며, 이러한 상관식을 이용한다면 시간당 전천일사량을 이용하여 시간당 광합성유효광량자속을 추정하는데 적절히 이용할 수 있을 것이다.</p> <p>조절하고자 하는 목표광량의 크기에 따라 적절한 차광율을 가진 차광재를 선택할 필요가 있었으며, 차광스크린을 이용한 일일적산 광합성유효광량자속조절 성능은 대체로 우수하였다. 보광을 위한 인공광원의 적절한 배치를 결정하는데 광분포 분석용 시뮬레이션을 효율적으로 이용할 수 있었다. 차광스크린 및 인공광원을 동시에 이용하여 일일적산 광합성유효광량자속 조절실험을 실시한 결과 약간의 오차($3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)가 발생하였으나, 기상조건에 따른 일별 최대 일일적산 광합성유효광량자속의 차이($30 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)에 비해 미미한 정도임을 감안하면 조절성능은 만족할 만한 결과이다.</p> <p>생장상에서의 상추재배실험 결과 일일적산 광합성유효광량자속이 증가할수록 건물 중량이 증가하였으나 광량이 지나치게 많게 되면 건물중량이 오히려 줄어들었다. 따라서 상추재배를 위한 적정 일일적산 광합성유효광량자속의 범위가 있음을 알 수 있었으며, 차광스크린 및 인공광을 이용하여 온실내부의 일일적산 광합성유효광량자속을 조절하므로서 작물생육에 적절한 광량을 공급하고자 하는 본 연구의 목적이 타당함을 확인할 수 있었다. 온실에서의 상추재배실험 결과 광량이 조절된 온실의 경우 대체로 상추생장이 순조롭게 진행되었으며 비조절 온실의 경우보다 건물중량이 더 크고 생장이 균일한 것으로 나타나 광조절 효과가 탁월하다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과들을 종합해 볼 때 본 연구에서 개발한 일일적산 광합성유효광량자속 조절을 위한 차광 및 보광 제어알고리즘의 성능이 우수함을 알 수 있었다.</p> <p>본 연구의 결과는 비록 상추재배를 위한 광량조절기술이지만 다른 작물에 대해서도 본 연구에서 제시한 자료 및 조절방법을 동일하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 자연광의 변화에 따라 광환경을 조절할 수 있는 온실설계에 필요한 자료가 부족한 현실을 감안할 때 본 연구에서 개발된 인공광 및 차광스크린을 이용한 광환경 조절방법은 온실의 광환경 조절기술의 발전에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 조절이 비교적 어렵다고 하는 온실의 복합환경제어를 위한 기술개발에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.</p>		

〈 EXECUTIVE SUMMARY 〉

Keyword	Pointed Keyword	Related Keyword	
	daily integral photosynthetic photon flux(PPF)	PPF control	weather condition
	shading screen	shading rate	shading time
	artificial lighting	light intensity	supplemental irradiation time
Purpose of Research	The purpose of this study was to develop the control technology to supply the stable daily integral photosynthetic photon flux(PPF) for greenhouse by using the artificial lightings and shading screen.		
Contents of Research	<p>The main research contents were the investigation of the average transmittance of total solar radiation and PPF in greenhouse at the different weather conditions, the derivation of the correlation between total solar radiation and PPF, the analysis of shading and supplemental PPF values needed to grow lettuce, the analysis of the shading and supplemental irradiation time needed to acquire the target daily integral PPF at different shading ratio and supplemental light intensity respectively, the development of artificial lighting and shading screen design technology to assure the target PPF in the greenhouse, and the development and verification of the control algorithm which could supply the optimum PPF.</p>		
Effectiveness of Research	<p>Since the PPF transmittance of greenhouse at clear day was very different from that at cloudy day, the proper transmittance, depending on the weather condition, should be adopted in order to calculate the accurate total solar radiation and PPF in greenhouse. The correlation between the hourly total solar radiation and PPF was derived. Because the data of total solar radiation could be easily acquired from the Meteorological Administration, the PPF could be simply calculated by this relationship.</p> <p>The variation of shading time needed to get the target PPF was analyzed by using two types of shading screen. The results showed that the shading ratio of screen to be installed in greenhouse should be decided depending on the amount of target PPF to control. The simulation result about PPF distribution pattern shortened the time which was spent to find the proper arrangement of artificial lightings in greenhouse. The result of performance test of PPF control by using the artificial lightings and shading screen showed that the maximum difference between target and measured value was about $3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$. If we consider that the maximum difference of the daily integral PPF depending on weather condition was $30 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, the control effect was acceptable.</p> <p>The results obtained from lettuce growing experiment conducted in the growth chamber showed that the dry weight of lettuce was decreased as the daily integral PPF was exceeded some value. This result confirmed that the optimum daily integral PPF level for lettuce growing existed and the objective of this study was feasible. The results of lettuce growing experiment performed in the greenhouse showed that the lettuce grown at the PPF controlled greenhouse was heavier and more uniform than the uncontrolled greenhouse. This result confirmed that the control effect of daily integral PPF on lettuce growing was excellent. From these results, we could conclude that the performance of the shading and supplemental irradiation control algorithm acquired from this study was satisfiable.</p> <p>Although the result of this study was the PPF control technology for growing lettuce, the data and control method could be applied for other crop production. Considering insufficient design knowledge for light environmental control in greenhouse presently, we can conclude that the research results will contribute to development of sophisticated PPF control technology in the future. This study will make development of the total environmental control technology in the greenhouse earlier in our country.</p>		

〈 연구내용 및 결과 〉

1. 서론

농산물은 기후와 시장동향에 따라 물량, 품질, 가격이 변동하고 산지에 따라 상품규격이나 품종이 다양하기 때문에 적기에 수출물량을 공급하고 지속적으로 확보하는 것이 어려운 문제로 대두되고 있다. 따라서 앞으로 농산물의 국제 경쟁력은 상품의 고품질화와 시장의 변화에 따른 상품의 안정적 공급에 달려 있다고 할 것이다. 연구결과에 의하면 작물이 안정적으로 생장하고 고품질의 수확물을 지속적으로 생산하기 위해서는 적정 일일적산 광합성유효광량자속을 적절하게 공급할 수 있어야 한다.

우리가 잘 알고 있는 바와 같이 겨울철과 여름철의 일일적산 광합성유효광량자속은 큰 차이가 있다. 그러나 특이한 것은 여름철에도 많은 날이 겨울철과 비슷한 일일적산량을 나타내고 있다는 것이다(Lee et al., 2002a). 이는 생육기간이 짧은 작물들의 경우, 겨울철뿐만 아니라 여름철에도 일사량이 적은 날이 계속되어 광부족으로 인한 생산량의 감소나 수확시기에 좋지 않은 영향을 줄 가능성이 있기 때문에 추가적인 광공급이 필요하다는 것을 의미한다. 또한, 여름철에 광량이 작물의 광합성에 필요한 적정광량을 초과할 경우에는 온도조절 목적이 아닌 작물의 생장조절을 목적으로 차광을 실시해야 할 필요가 있다. 따라서 온실에서 고품질의 농산물을 연중 안정적으로 공급하기 위해서는 일일적산 광합성유효광량자속을 작물의 생육조건에 적합하게 유지시킬 수 있는 기술의 개발이 필요하다(Albright, 1999).

최근 세계적으로 고품질의 농산물을 안정적으로 생산하기 위하여 광환경 조절기술에 관심이 높아지고 있으며, 국내 온실에서도 보다 적극적인 작물의 광환경 조절을 위하여 인공광이나 차광스크린의 설치가 점점 확산되고 있는 실정이다. 우리나라의 경우, 온실에서의 인공광 사용에 관한 연구는 인공광을 이용한 작물의 생장조절효과에 관하여 많이 이루어지고 있으며(Kim and Kim, 2000; Lee et al., 1999; Park et al., 1992; Park and Lee, 1999), 차광스크린에 관한 연구는 생장조절의 목적보다는 온도조절과 관련하여 최근 활발하게 이루어지고 있다(Lee, 1997; Lee et al., 2001). 일본의 경우, 인공광을 이용하여 광합성유효광량자속의 변화에 따른 생장량의 변화를 분석한 연구(宇野 등, 1991; 佐藤와 石田, 1991), 차광재의 투과율을 달리하여 광합성유효광량자속을 제어하는 연구(仁科 등, 1994) 및 차광재를 이용한 온도제어에 관한 연구(中屋 등, 1994)가 수행된 바 있다. 미국의 경우, 겨울철에 부족한 적산일사량을 인공광을 사용하여 보충하는 방법과 그 효과에 관한 연구가 다수 수행된 바 있고(Both and Albright, 1997, 1998), 차광 스크린을 이용하여 온도를 제어하는 연구가 수행된 바 있다(Roberts, 1993). 국내·외의 연구동향을 분석한 결과 인공광과 차광스크린을 이용하여 연중 광합성유효광량자속을 적절하게 공급할 수 있는 제어방법에 관한 연구결과는 찾아보기 어려웠으며 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 실험을 통하여 온실의 수관부에서의 기상조건에 따른 광합성유효광량자속의 투과율을 산정하고 전천일사량과 광합성유효광량자속과의 상관관계를 구하여 자연광의 변화에 따른 온실 내부의 광합성유효광량자속 연중 변화와 상추재배를 위한 필요 보광량 및 차광량의 변화를 구명하고, 기상조건과 차광 및 보광시간에 따른 일일적산 광합성유효광량자속의 변화를 분석하여, 차광스크린 및 인공광을 이용하여 온실의 일일적산 광합성유효광량자속을 조절하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 연구방법 및 이론

가. 투과율 및 전천일사와 광합성유효광량자속의 상관관계

본 실험에 사용된 2동의 실험온실은 크기가 7m(폭)×11m(길이)×2.2m(층고)이고 동고가 4m이며 동간격

이 5m인 양지붕형 단동유리온실이다. 온실의 건설방위는 동서동이며, 자연환기를 위해 천창과 3-way 방식의 측창이 설치되어 있다.

온실내의 전천일사량과 광합성유효광량자속의 변화를 계측하기 위하여 Delta-T data-logger 및 CR10X micro-logger를 사용하였다. 전천일사량은 GS1 전천일사센서(305~2,800nm)를 사용하였고 광합성유효광량자속은 LI190SB 광량자센서(400~700nm)를 사용하여 측정하였다. 온실내의 센서는 지면으로부터 0.8m 높이에 설치하였다. 온실외부의 기상자료는 부속농장내에 설치된 종합기상관측장비를 이용하여 측정하였다.

기상청에서 제시하는 기상조건은 전운량(1~10, 全雲量)을 기준으로 하여 크게 4종류(맑음, 구름조금, 구름많음, 흐림)로 분류하고 있으나, 본 연구에서는 기상조건을 맑음(운량 < 5)과 흐림(운량 > 5)으로만 구분하였다.

전천일사량과 광합성유효광량자속의 투과율을 비교하기 위하여 기상조건별로 일평균투과율을 산정하였다. 또한, 전천일사량과 광량자속과의 상관관계를 구명하기 위하여 기상조건별로 시간당 전천일사량과 시간당 광합성유효광량자속의 상관관계식을 구하였다.

나. 실험온실 내부의 광합성유효광량자속

1981년부터 2000년까지 20년간의 대구지역 전천일사량(total solar radiation, RAD)을 이용하여 기상조건에 따른 온실 내부의 광합성유효광량자속(photosynthetic photon flux, PPF)을 계산하였다. 이 때 온실 외부의 광합성유효광량자속은 전천일사량으로부터 본 연구에서 유도된 상관식(1)을 이용하여 산정하였다. 온실 내부의 광합성유효광량자속은 계산된 온실 외부의 광합성유효광량자속과 Table 1의 투과율을 이용하여 계산하였다(Lee et al., 2001). 기상조건은 기상청에서 사용하고 있는 구분방법을 이용하였으며, 강수현상이 없는 날 운량(雲量)이 0~2.4는 맑음, 2.5~5.4는 구름조금, 5.5~7.4는 구름많음, 7.5~9.9는 흐림 그리고 10이면 비로 구분하였다. 동일한 달에서는 동일한 기상조건하에서 일일적산 광합성유효광량자속의 차이가 크지 않았기 때문에 각 월마다 일일적산 광합성유효광량자속을 기상조건별로 평균하여 그 달의 기상조건별 대표값으로 하였다.

$$PPF = 2.0668 \times RAD \quad (1)$$

여기서, PPF : 광합성유효광량자속($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

RAD : 전천일사량($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 1. Transmittance of experimental greenhouse depending on shading conditions.

Shading conditions	Without shading screen	55% shading screen	85% shading screen
Transmittance of experimental greenhouse(%)	70.5	25.7	8.3

다. 필요 차광량 및 보광량

작물의 종류에 따라 생육에 필요한 적정 광량은 다른 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 일상추를 공시작물로 선정하여 목표광량을 유지하는데 필요한 필요보광량과 필요차광량을 산정하였다. Both and Albright(1997)는 보광을 이용한 상추재배 연구에서 광합성유효광량자속이 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 이하인 경우 잎끌마름이 발생하지 않고 빠른 생장을 하였다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 11 및 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 의 두 가지 적산량을 목표광량으로 가정하고 필요 차광량 및 보광량을 계산하였다.

라. 차광 실험

기상조건별로 광량이 다르고 차광재의 차광율에 따라 온실내부로 투과되는 광량이 다르기 때문에 Table 1에서의 2가지 차광재 및 5가지의 기상조건별로 여러 가지 차광시간대에 대한 일일적산 광합성유

효광량자속을 계산하였다. 최소 차광시간은 차광재를 펴고 거두는데 소요되는 시간을 고려하여 1시간으로 하였으며, 무차광에서부터 1시간 간격으로 차광시간의 차이를 두어 종일차광까지 차광시간대를 변화시켰다. 계산된 결과를 이용하여 차광재 및 월별로 목표광량을 얻는데 필요한 차광시간대를 결정하였다. 또한, 결정된 차광시간대를 검증하기 위하여 광량조절을 위한 차광실험을 실시하였으며, 기상조건 및 차광시간대에 따른 광량의 측정값과 계산값을 비교하였다.

마. 보광 실험

광환경 분석용 소프트웨어인 Lumen-Micro(Lighting Technologies, Inc., USA)를 이용하여 다양한 광원의 배열 및 높이에 대한 광분포를 분석하여 균일한 광공급을 위한 적절한 광원배치를 Fig. 1과 같이 결정하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 온실 바닥으로부터 0.8m 높이에 수경재배용 베드를 설치하였고, 시뮬레이션을 통한 광원배치 분석결과를 이용하여 베드로부터 1.9m 높이에 400W 고압나트륨램프를 설치하였다. 광합성유효광량자속을 측정하기 위하여 온실 내부의 여러 점에 광량센서(LI1908B, LI-COR, USA)를 설치하였다. 광강도 및 기상조건에 따른 목표광량을 얻기 위한 보광시간을 월별로 계산하였다.

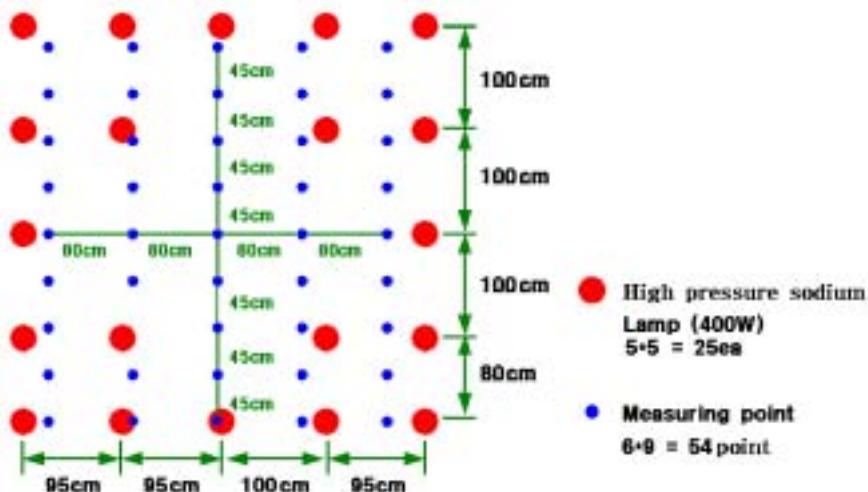


Fig. 1. Arrangement of artificial lightings and PPF measuring points.



Fig. 2. Beds and artificial lightings for the hydroponics in greenhouse.

바. 차광 및 보광 제어알고리즘의 성능 검증

온실내부의 일일적산 광합성유효광량자속 조절 목표량을 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 하고, 55% 차광재 및 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 보광강도를 사용하여 광조절 성능실험을 실시하였다.

사. 생장실험

1) 생장상 실험

광합성유효 광량자속의 변화에 따른 생장변화를 분석하기 위한 기초실험을 Fig. 3과 같은 생장상에서 수행하였다. 잎상추(청치마)를 파종 후 28일째 본엽이 4~5매인 균일한 상추를 정식판에 20cm X 20cm 간격으로 수경재배시스템에 정식하였다. 실내온도를 주간은 20°C, 야간은 17°C로 유지하였고, 상대습도는 주·야간 모두 60%로 유지하였으며, 탄산가스농도는 400ppm 전후로 조절하였다. 상추의 배양액은 물 1,000ℓ 당 한국의 원득상씨 처방인 아래의 Table 2와 같이 처방하였으며, pH는 평균 6.0, EC는 1.3~1.5mS/cm로 유지하였다. 광주기는 400W 고압나트륨등을 이용하여 주간 16시간 및 야간 8시간으로 조절하였다. 광강도는 높이별로 각각 평균 약 100, 200, 260, 470 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유지시켰으며, 높이별 일일 적산 광합성유효광량자속은 Table 3과 같다. 정식 후 30일째 광강도별로 무작위로 10포기의 상추를 선택하여 건물중량을 측정하고 평균값을 구하여 비교하였다.



Fig. 3. Inside of growth chamber.

Table 2. Nutrients of the fertilizer solution(per 1,000 ℓ of water)

Nutrient	Weight(g)
5[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O]	400
KNO ₃	600
NH ₄ H ₂ PO ₄	90
MgSO ₄ ·7H ₂ O	250
Fe-EDTA	25
H ₃ BO ₃	3
MnSO ₄ ·5H ₂ O	2

Table 3. Daily integral PPF for four benches with different height.

Benchs	First	Second	Third	Fourth
Daily integral PPF($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	5.8	11.5	15.0	27.0

2) 온실 실험

온실에서의 일일적산 광합성유효광량자속 조절 성능을 알아보기 위하여 온실에서 상추재배 실험을 실시하였다. 잎상추(적치마)를 파종 후 28일째 본엽이 4~5매인 균일한 상추를 정식판에 20cm X 20cm 간격으로 Fig. 4와 같은 실험유리온실의 수경재배시스템에 정식하였다. 광량을 조절한 실험온실과 조절하지 않은 실험온실 각각에 0.6m X 4m 크기의 수경베드를 3개씩 설치하였다. 광량조절용 온실의 일일적

산 광합성유효복사량의 목표값을 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 하여 55% 차광재 및 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 보광강도를 사용하여 광량조절을 실시하였다. 반면에 비조절 온실에서는 자연 상태의 광강도하에서 재배하였다. 주간에는 실내온도를 20°C , 야간에는 17°C 로 설정하였다. 상추의 배양액 조성은 생장실에서와 동일한 방법으로 하였다. 정식 후 30일째 두 개의 온실에서 무작위로 10포기씩의 상추를 선택하여 건물중량을 측정하여 평균값을 구하였으며 세 번 반복측정을 실시하여 평균하였다.



Fig. 4. Lettuce growing on the hydroponics beds in greenhouse.

3. 결과 및 고찰

가. 투과율

Fig. 5와 Fig. 6은 하루 중 09:00~17:00시 사이의 기상조건에 따른 광합성유효광량자속의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5는 맑은 날의 광합성유효광량자속의 변화를 나타낸 것이며, 투과율이 41.6~85.9 %(평균 70.4 %)로 골조재 및 태양입사각의 영향으로 인하여 온실내부에 입사되는 량의 시간에 따른 변동이 큰 것으로 나타났다. 반면에 Fig. 6은 흐린 날의 광합성유효광량자속의 변화를 나타낸 것이며, 투과율이 59.1~78.3 % (평균 67.3 %)로 맑은 날에 비해 골조재의 영향을 그다지 받지 않아 입사되는 량의 변동이 훨씬 적은 것으로 분석되었다. 따라서, 산란광이 많은 흐린 날과 직달광이 많은 맑은 날의 투과율 변화는 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었으며, 온실의 투과율은 기상조건에 따라 다르게 적용되어야 할 것으로 판단되었다.

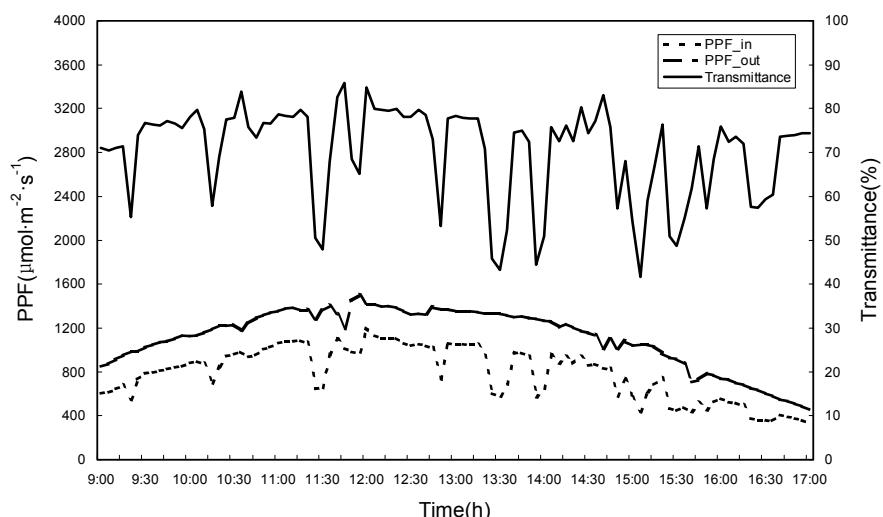


Fig. 5. Transmittance of solar PPF in glasshouse at a clear day.

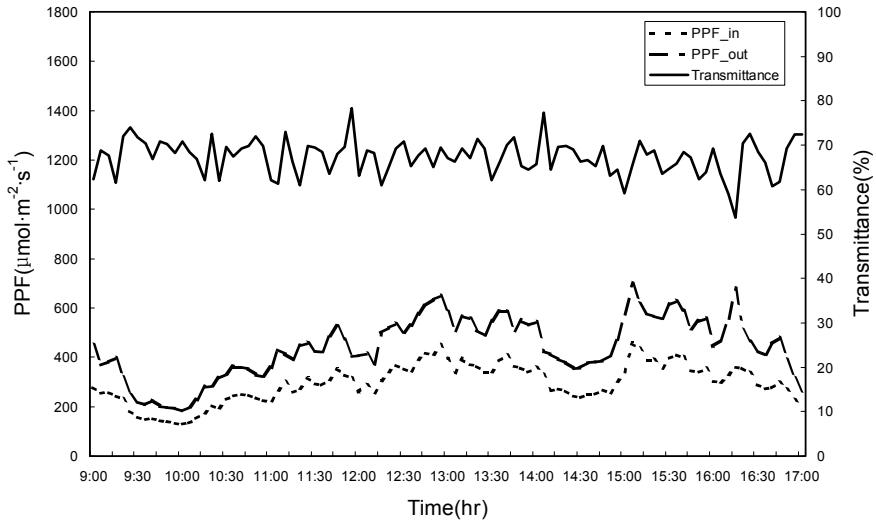


Fig. 6. Transmittance of solar PPF in glasshouse at a cloudy day.

Table 4는 기상조건에 따른 전천일사 및 광합성유효광량자속의 일일 평균투과율을 나타낸 것으로, 전체 평균값은 맑은 날이 각각 70.9% 및 70.5%, 흐린 날이 각각 67.7% 및 68.1% 이었다. 일일 평균투과율은 09:00~17:00까지 온실내부로 투과되는 전천일사량 및 광합성유효광량자속에 대한 투과율을 평균한 것으로 온실의 설치방향과 구조에 따라 다소 달라질 수 있을 것으로 판단되지만, 흐린 날 보다 맑은 날이 투과율이 약간 높았고 전천일사와 광합성유효광량자속의 투과율 사이에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 온실의 전천일사량 투과율을 광합성유효광량자속의 투과량을 산정하는데 그대로 이용할 수 있을 것이다. Kim과 Lee(1999)는 산란일사 투과율에 미치는 골조율의 영향은 작다고 하였고, 직달일사의 투과율은 골조율의 영향을 많이 받기 때문에 산란일사가 많은 흐린 날보다 직달일사가 많은 맑은 날이 투과율이 약간 더 높았다는 본 연구의 결과는 실험온실의 골조율에 따라 차이가 발생할 수 있을 것으로 분석되었다.

Table 4. Transmittance of total solar radiation and PPF according to weather condition.
(Unit: %)

Date	Weather condition				Cloud amount	
	Clear		Cloudy			
	Total rad.	PPF	Total rad.	PPF		
Mar. 31	72.8	71.0			4.8	
Apr. 4			67.4	69.4	9.3	
Apr. 5			69.2	68.3	6.0	
Apr. 6	72.1	71.8			0.0	
Apr. 17	70.0	70.4			1.3	
Apr. 20	70.6	70.2			5.0	
Apr. 21			67.9	67.6	6.8	
Apr. 26			67.4	68.1	9.0	
Apr. 27			66.7	67.3	9.3	
May 7	71.4	69.4			0.0	
Aug. 14	70.5	71.0			4.8	
Aug. 15	70.0	69.3			3.5	
Aug. 23	70.2	71.2			1.5	
Average	70.9	70.5	67.7	68.1		

나. 전천일사와 광합성유효광량자속의 상관관계

Fig. 7과 Fig. 8은 온실외부에서 시간당 전천일사량과 광합성유효광량자속의 상관관계를 나타낸 것이다. 맑은 날의 경우 상관식은 $PPF = 1.9998 \times RAD$ 로 나타났으며 상관계수는 0.9582였다. 또한, 흐린 날의 경우 상관식은 $PPF = 2.1948 \times RAD$ 로 분석되었으며 상관계수는 0.9346이었다. Blackburn과 Proctor(1983)은 시간당 전천일사량과 광합성유효광량자속 사이의 상관관계는 하늘의 청명상태에 의존한다고 하였으며 운량의 증가와 더불어 광합성유효광량자속은 증가한다고 보고하였다. 이는 본 연구 결과와 비교해 볼 때, 비록 맑은 날에 비하여 흐린 날의 상관도는 낮지만 상관식의 기울기는 큰 것으로 나타나 운량의 증가와 더불어 전천일사량 중에서 광합성유효광량자속의 비율이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 외부의 시간당 광합성유효광량자속과 전천일사량의 상관식은 $PPF = 2.0668 \times RAD$ 이었고 상관계수는 0.9446이었다. 이 식은 Ting과 Giacomelli(1987)가 위도 40.4도 경도 74.5도W인 위치에서 1986년 여름과 가을에 측정한 결과를 이용하여 제시한 $PPF = 2.0699 \times RAD$ 와 유사한 기울기를 나타내어 타당성을 입증할 수 있었다. 따라서, 이러한 상관식을 이용한다면 시간당 전천일사량을 이용하여 기상조건에 따른 시간당 광합성유효광량자속을 추정하는데 적절히 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

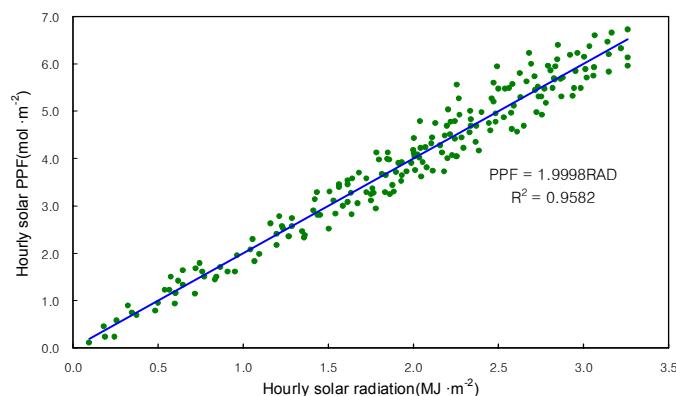


Fig. 7. Relationship between hourly total solar radiation and PPF in outside at clear days.

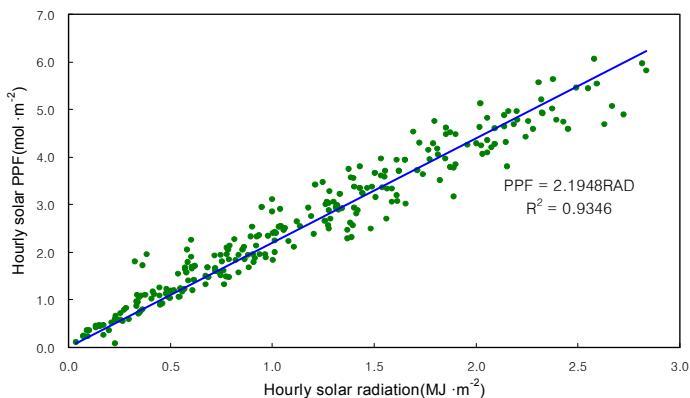


Fig. 8. Relationship between hourly total solar radiation and PPF in outside at cloudy days.

Table 5는 온실내부와 외부에서의 전천일사와 광합성유효광량자속의 상관관계를 비교한 것이다. 기상 상태별로 온실내부와 외부에 대한 상관식의 기울기가 거의 같게 나타났기 때문에 온실외부에서의 상관식이 얻어지면 온실내부에 그대로 적용이 가능할 것으로 분석되었다. 온실내부와 외부의 상관식 기울기의 차이가 맑을 때가 흐릴 때보다 더 큰 이유는 맑은 날이 흐린 날보다 온실내부의 광량이 골조재의 영향으로 변화가 커서 두 식의 상관계수 차이가 많기 때문인 것으로 판단된다.

Table. 5. Comparison of correlation equations between hourly total solar radiation and PPF.

Weather condition	Outside		Inside		Difference of slope of regression lines
	Regression equation	Correlation coefficient (R^2)	Regression equation	Correlation coefficient (R^2)	
Clear	PPF=1.9998 X RAD	0.9582	PPF=2.0454 X RAD	0.9416	0.0456
Cloudy	PPF=2.1948 X RAD	0.9346	PPF=2.1746 X RAD	0.9365	0.0202
Total	PPF=2.0668 X RAD	0.9446	PPF=2.0913 X RAD	0.9413	0.0245

다. 필요 차광량 및 보광량

Table 6은 상추재배를 위해 공급해야 할 일일적산 광합성유효광량자속의 목표값을 $11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 과 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 하였을 경우의 기상조건별 필요차광량 및 필요보광량을 계산한 결과이다. 목표값이 $11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 인 경우 년중 차광 및 보광이 필요한 것으로 나타났으며, 겨울철에 최대 약 $9 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도의 보광이 필요한 것으로 분석되었다. 목표값이 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 인 경우는 년중 보광이 필요한 것으로 나타났고, 11월부터 1월까지는 모든 날에 보광이 필요한 것으로 분석되었으며, 이 기간 중 최대 필요보광량은 약 $15 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도인 것으로 나타났다. 그러나 차광은 11월부터 1월까지는 필요하지 않은 것으로 나타났고, 6월 경에 가장 높은 약 $19 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도의 차광이 필요한 것으로 분석되었다.

Table 6. Shading and supplemental values needed for gaining target PPF(unit: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

Target PPF ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	Cloud amount	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11	0.0 ~ 2.4	-4.0	-8.8	-14.9	-20.6	-24.3	-24.9	-24.6	-20.5	-15.5	-9.8	-4.5	-2.1
	2.5 ~ 5.4	-1.6	-5.9	-12.3	-17.5	-21.6	-21.5	-20.1	-17.9	-13.6	-7.7	-2.5	0.0
	5.5 ~ 7.4	+0.7	-3.1	-8.9	-13.1	-16.3	-17.4	-15.5	-13.8	-10.1	-5.2	-0.2	+1.8
	7.5 ~ 9.9	+3.8	+1.0	-2.0	-5.5	-8.6	-9.8	-7.5	-5.0	-2.8	0.0	+3.4	+4.4
	10.0	+7.2	+5.9	+4.6	+4.3	+2.6	+2.8	+2.8	+3.6	+5.1	+5.6	+7.7	+8.8
17	0.0 ~ 2.4	+2.0	-2.8	-8.9	-14.6	-18.3	-18.9	-18.6	-14.5	-9.5	-3.8	+1.5	+3.9
	2.5 ~ 5.4	+4.4	+0.1	-6.3	-11.5	-15.6	-15.5	-14.1	-11.9	-7.6	-1.7	+3.5	+6.0
	5.5 ~ 7.4	+6.7	+2.9	-2.9	-7.1	-10.3	-11.4	-9.5	-7.8	-4.1	+0.8	+5.8	+7.8
	7.5 ~ 9.9	+9.8	+7.0	+4.0	0.5	-2.6	-3.8	-1.5	+1.0	+3.2	+6.0	+9.4	+10.4
	10.0	+13.2	+11.9	+10.6	+10.3	+8.6	+8.8	+8.8	+9.6	+11.1	+11.6	+13.7	+14.8

- : Shading value, + : Supplemental value

라. 광량조절을 위한 차광시간

55% 차광율과 85% 차광율을 가진 두 가지 종류의 차광스크린을 이용하여 $11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 과 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 의 목표광량을 얻는데 필요한 차광시간대를 기상조건 및 월별로 계산한 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Shading time to get target PPF(unit: hour).

Shading ratio of shading screen (%)	Target PPF (mol·m ⁻² ·d ⁻¹)	Cloud amount	Month											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	11	0.0	11	10	10	A	A	A	A	A	10	10	11	12
		2.4	13	14	17						18	14	13	13
		2.5	12	10	11	8	A	A	A	8	10	11	12	W
		5.4	13	13	17	18				18	17	14	13	
		5.5	S	11	10	10	8	8	9	10	10	11	W	S
	17	7.4		13	14	16	18	18	17	18	15	13		
		7.5	S	S	12	10	11	11	10	10	10	11	W	S
		9.9		13	13	16	17	14	14	13	13		S	S
		10.0	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
		0.0	S	12	10	10	10	10	10	10	10	11	11	S
85	11	2.4	13	13	14	15	17	17	17	15	14	13	S	S
		2.5	W	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	W
		5.4		13	14	16	17	17	17	16	15	13	W	W
		5.5	S	12	10	10	11	10	11	10	10	11	11	S
		7.4		13	13	14	16	15	16	14	14	13	W	
	17	7.5	S	S	W	11	11	11	10	11	W	W	S	S
		9.9		13	13	14	14	13	13	13	13		S	S
		10.0	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
		0.0	S	12	11	11	10	10	10	10	11	12	13	S
		2.4	13	13	14	14	14	14	14	14	13			

W: Without shading, S: Supplemental lighting, A: All day shading

W는 차광이 필요 없는 날, S는 보광이 필요한 날, A는 종일차광이 필요한 날을 의미한다. 차광율이 55%인 차광재를 사용할 경우 4~8월의 맑은 날에는 하루 종일 차광을 하여도 11 mol·m⁻²·d⁻¹을 초과하는 것으로 나타났다. 이와 같이 광량이 초과하여 광조절이 불가능한 경우에는 차광율이 더 높은 차광재를 사용하여야 할 것이다. 반면에 차광율이 85%인 차광재를 사용할 경우에는 광량이 초과하여 광량조절이 불가능한 경우는 발생하지 않았으나, 조절해야 할 광량이 적은 날(목표광량이 11 mol·m⁻²·d⁻¹인 경우 1월의 구름조금 날, 3월의 흐린 날, 9월의 흐린 날, 11월의 구름조금 날, 12월의 맑은 날)에는 1시간의 차광으로는 조절이 불가능한 것으로 나타났다. 이와 같은 경우에는 차광율이 더 낮은 차광재를 사용할 필요가 있을 것이다. 따라서, 조절하고자 하는 목표광량의 크기에 따라 적절한 차광율의 차광재를 설치할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

마. 차광시간에 따른 광량의 실측값 및 계산값의 비교

Fig. 9는 55%의 차광재를 이용하여 광량조절을 실시한 결과로서 기상조건에 따라 광량변화가 많은 7월과 8월에 대하여 기상조건별로 차광시간대에 따른 광합성유효광량자속의 변화를 계산한 결과와 실험한 결과를 비교한 것이다. 실측값이 계산값에 대부분 근접하였으나, 무차광시 최대 약 $5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도의 차이가 발생한 날도 있었다. 이러한 차이는 하루 중의 빈번한 기상변화, 운량판독의 부정확 등 여러 가지 요인에 의해 발생된 것으로 판단된다. 그러나 7월과 8월에 무차광시 온실내부의 일일적산 광합성유효광량자속이 비오는 날에는 $7.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 이고 맑은 날에는 $35.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 기상조건에 따른 큰 차이가 있음을 감안하면 계산값과 실측값의 이러한 차이는 대체로 만족할 만한 결과로 판단된다. 앞으로 기상조건을 보다 더 정확하게 관측하고 예보할 수 있는 기술이 개발된다면 차광에 의한 광조절량의 오차를 더 줄일 수 있을 것이다.

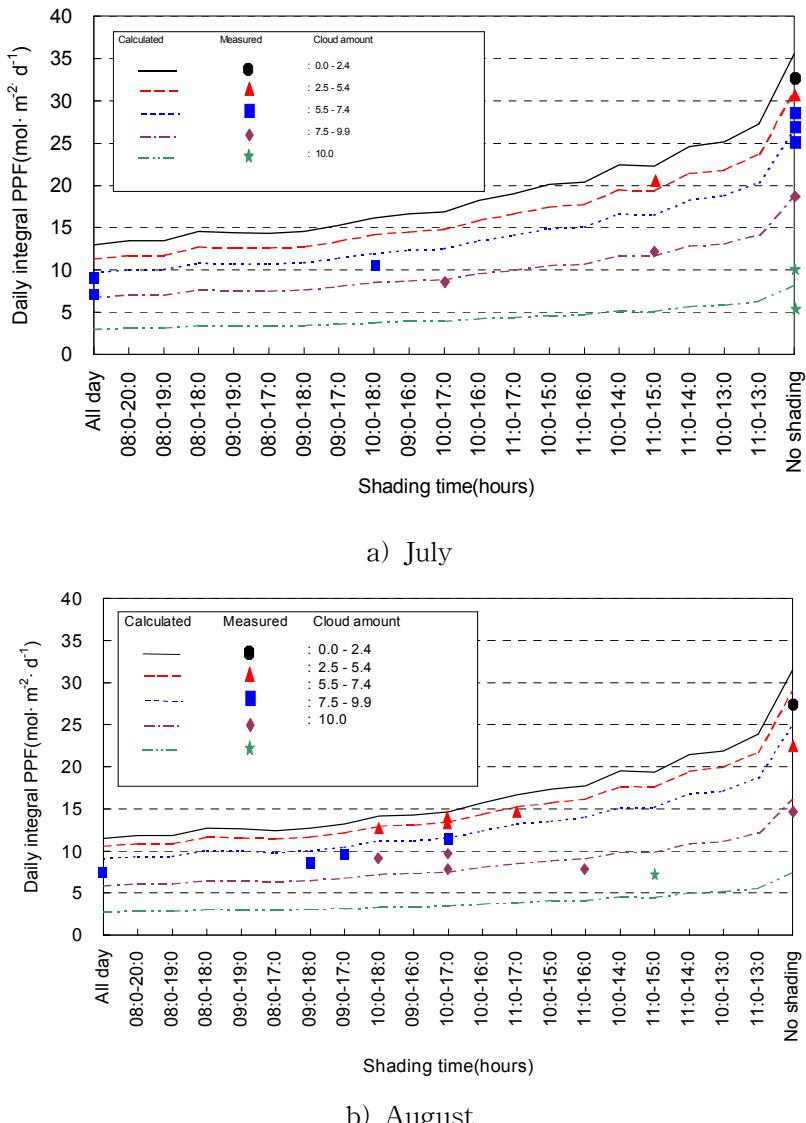


Fig. 9. Comparison of calculated daily integral PPF with measured value along the shading time in July and August.

바. 인공광의 배치에 따른 광합성유효광량자속의 수평분포

Fig. 10은 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 및 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광합성유효광량자속을 공급하기 위해 시뮬레이션을 실시하여 얻은 광분포도와 이를 결과를 토대로 실제 인공광을 배치하였을 때의 광분포도를 각각 나타낸

것이다. 시뮬레이션을 이용하여 적절한 광배치를 찾을 수 있었기 때문에 실제 인공광을 배치하는데 소요되는 시간을 많이 단축할 수 있었다. 그러나 Fig. 10에서 보는 바와 같이 정확하게 목표한 광강도를 고르게 분포하도록 할 수 있는 광배치를 찾기가 쉽지 않았으며, 이에 대한 보다 더 많은 분석이 요구된다. 이러한 시뮬레이션으로부터 얻어진 광분포도는 균일한 분포의 광공급을 위한 광원의 적절한 배치를 결정하는데 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 적정 광량을 공급하기 위한 광원의 높이 및 보광시간을 결정하는데도 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

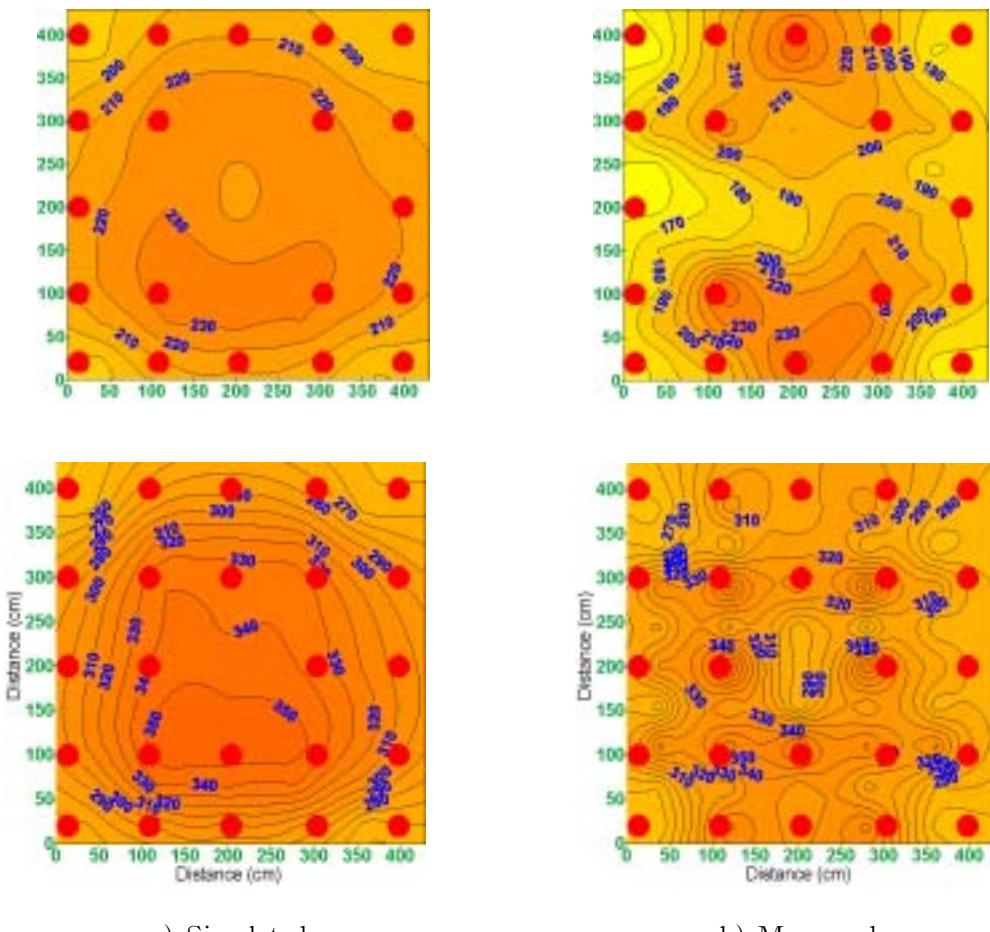


Fig. 10. PPF distribution patterns under the illumination of HPS lamps(unit: $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

사. 광량조절을 위한 보광시간

Table 6에서 제시한 필요보광량을 인공광을 이용하여 공급하기 위한 보광강도별 보광시간을 산정한 결과는 Table 8과 같다. 이것은 평균 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 및 $400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 보광강도로 보광하여 목표값인 $11\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 및 $17\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 의 일일적산 광합성유효광량자속을 얻는데 필요한 기상조건별 보광시간을 월별로 계산한 결과이며, $1\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 이하는 무시하였다. 비오는 날의 경우 10월~1월에는 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 보광강도로는 보광시간이 너무 길기 때문에 $400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 강도로 보광하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 이와 같이 보광시간의 결정은 Table 8과 같은 계산 결과를 기초로 하고 전기료, 전구의 수명, 작업의 편리성, 생장효과 등을 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

Table 8. Supplemental irradiation time for each month(unit: $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$).

Supplemental irradiation ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Target PPF ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	Cloud amount	Month											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
200	11	0.0~2.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.5~5.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5.5~7.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5
		7.5~9.9	5.3	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	4.7	6.1
		10	10.0	8.2	6.5	6.0	3.6	3.9	3.9	5.0	7.0	7.8	10.7	12.2
	17	0.0~2.4	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5	3.9
		2.5~5.4	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	6.0
		5.5~7.4	6.7	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	5.8	7.8
		7.5~9.9	9.8	7.0	4.0	-	-	-	-	1.4	3.2	6.0	9.4	10.4
		10	18.3	16.5	14.7	14.3	11.9	12.2	12.2	13.3	15.4	16.1	19.0	20.6
300	11	0.0~2.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.5~5.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5.5~7.4	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7
		7.5~9.9	3.5	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	3.1	4.1
		10	6.7	5.5	4.3	4.0	2.4	2.6	2.6	3.3	4.7	5.2	7.1	8.1
	17	0.0~2.4	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.4	3.6
		2.5~5.4	4.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	5.6
		5.5~7.4	6.2	2.7	-	-	-	-	-	-	-	-	5.4	7.2
		7.5~9.9	9.1	6.5	3.7	-	-	-	-	1.0	3.0	5.6	8.7	9.6
		10	12.2	11.0	9.8	9.5	8.0	8.1	8.1	8.9	10.3	10.7	12.7	13.7
400	11	0.0~2.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.5~5.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5.5~7.4	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3
		7.5~9.9	2.6	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	2.4	3.1
		10	5.0	4.1	3.2	3.0	1.8	1.9	1.9	2.5	3.5	3.9	5.3	6.1
	17	0.0~2.4	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	2.7
		2.5~5.4	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.4	4.2
		5.5~7.4	4.7	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0	5.4
		7.5~9.9	6.8	4.9	2.8	-	-	-	-	0.7	2.2	4.2	6.5	7.2
		10	9.2	8.3	7.4	7.2	6.0	6.1	6.1	6.7	7.7	8.1	9.5	10.3

아. 차광 및 보광 제어 알고리즘의 성능 검증

Fig. 11은 온실내부에 $17 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 의 목표 광량을 공급하기 위하여 55% 차광재 및 $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 보광강도를 이용하여 Table 7과 Table 8의 차광시간 및 보광시간에 의거 제어를 실시한 결과이다.

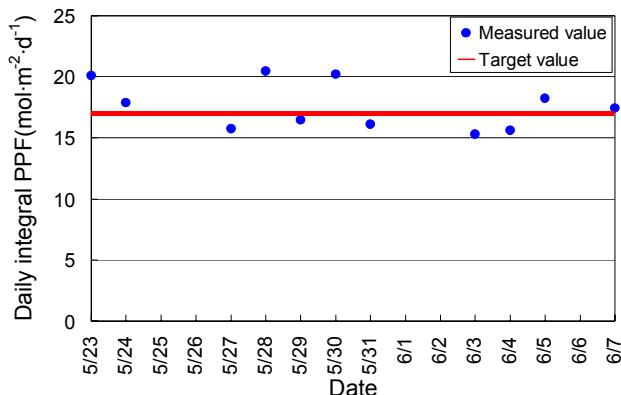


Fig. 11. Performance of PPF control algorithm.

제어결과 최대 약 $3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도의 오차를 보여주고 있으며, 이러한 차이는 동일한 달에 같은 기상 조건에서도 일일적산 광량이 차이가 있고 하루 중 기상상태도 많은 변화가 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 기상조건에 따른 일별 적산광량의 최대차이가 $30 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도임을 감안하면 조절효과는 만족할 만한 결과로 판단되며, 오차의 폭을 더 줄일 수 있는 방법의 개발이 요구된다.

자. 생장실험 결과

Table 9는 생장실에서 재배된 상추의 광강도에 따른 건물중량을 나타낸 것이다. 일일적산 광합성유효 광량자속의 변화에 따른 건물중량의 변화를 분석한 결과 대체로 광량이 증가할수록 건물중량이 증가하였으나 광량이 지나치게 많게 되면 건물중량이 오히려 줄어들었다. 따라서 상추재배를 위한 적정 일일 적산 광합성유효광량자속의 범위가 존재함을 알 수 있었으며, 차광스크린 및 인공광을 이용하여 온실내부의 일일적산광합성유효광량자속을 조절하므로서 작물생육에 적절한 광량을 공급하고자 하는 본 연구의 목적이 타당함을 확인할 수 있었다.

Table 9. Dry weight of lettuce grown in the growth chamber.

Benchs	First	Second	Third	Fourth
Daily integral PPF($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	5.8	11.5	15.0	27.0
Dry weight($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	1.3	1.9	5.1	3.0

Table 10은 온실내부의 일일적산 광합성유효광량자속의 조절목표를 $17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 하여 광량을 조절한 온실과 조절하지 않은 온실에서 재배된 두 가지 상추에 대한 건물중량을 월별로 비교한 결과이다. 4월과 5월은 차광만으로 광조절이 이루어졌고, 10월에는 차광 및 보광이 함께 이루어졌으며 11월과 12월은 보광만으로 광조절이 이루어졌다. 비조절 온실에서는 4월과 5월에 재배에 실패하였고, 광량이 조절된 온실의 경우 대체로 상추생장이 순조롭게 진행되었으며 비조절 온실의 경우보다 건물중량이 더 많은 것으로 나타나 광조절 효과를 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과들을 종합해 볼 때 본 연구에서 개발한 일일적산 광합성유효광량자속 조절을 위한 차광 및 보광 제어알고리즘의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 비록 상추재배를 위한 광량조절기술이지만 다른 작물에 대해서도 본 연구에서 제시한 자료 및 조절방법을 동일하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 자연광의 변화에 따라 광환경을 조절할 수 있는 온실설계에 필요한 자료가 부족한 현실을 감안할 때 본 연구에서 개발될 인공광 및 차광스크린을 이용한 광환경 조절방법은 온실의 광환경 조절기술의 발전에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 조절이 비교적 어렵다고 하는 온실의 복합환경제어를 위한 기술개발에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

Table 10. Dry weight of lettuce grown in the greenhouse.

(Unit: $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)

Month	Target of daily integral PPF	
	Control	$17 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$
Apr.	-	6.9
May	-	-
Oct.	6.1	7.3
Nov.	5.1	7.9
Dec.	4.8	7.5

4. 결론

실험을 통하여 온실의 수관부에서의 기상조건에 따른 광합성유효광량자속의 투과율을 산정하고 전천일사량과 광합성유효광량자속과의 상관관계를 구하여 자연광의 변화에 따른 온실 내부의 광합성유효광량자속년중 변화와 상추재배를 위한 필요 보광량 및 차광량의 변화를 구명하고, 기상조건과 차광시간에 따른 일일적산 광합성유효광량자속의 변화를 분석하여, 상추재배시 차광스크린 및 인공광을 이용한 온실의 일일적산 광합성유효광량자속을 조절하는 방법을 제시하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

산란광이 많은 흐린 날과 직달광이 많은 맑은 날의 투과율 변화는 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었으며, 온실의 투과율은 기상조건에 따라 다르게 적용되어야 할 것으로 판단되었다. 온실의 전천일사량 투과율을 광합성유효광량자속의 투과량을 산정하는데 그대로 이용할 수 있을 것으로 분석되었다. 비록 맑은 날에 비하여 흐린 날의 상관도는 낮지만 상관식의 기울기는 큰 것으로 나타나 운량의 증가와 더불어 전천일사량 중에서 광합성유효광량자속의 비율이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 시간당 광합성유효광량자속과 전천일사량의 상관식을 유도하였으며, 이러한 상관식을 이용한다면 시간당 전천일사량을 이용하여 시간당 광합성유효광량자속을 추정하는데 적절히 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

차광율이 55%와 85%인 두 가지 종류의 차광스크린을 이용하여 목표광량을 얻는데 필요한 차광시간대를 분석한 결과, 조절하고자 하는 목표광량의 크기에 따라 적절한 차광율을 가진 차광재를 선택할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 기상조건에 따라 광량변화가 많은 7월과 8월에 대하여 55%의 차광재를 이용하여 광조절 실험을 실시한 결과 무차광시의 실측값과 계산값의 차이가 최대 $5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도로 나타났다. 이러한 차이는 기상조건에 따라 일일적산 광량이 큰 차이가 있음을 감안하면 대체로 만족할 만한 결과로 판단된다. 광분포 시뮬레이션을 이용하여 적절한 광배치를 찾을 수 있었기 때문에 실제 인공광을 배치하는데 소요되는 시간을 많이 단축할 수 있었지만, 목표한 광강도를 정확하고 고르게 분포하도록 할 수 있는 광배치를 찾기가 쉽지 않았으며, 이에 대한 보다 더 많은 분석이 요구되었다. 목표한 일일적산 광합성유효광량자속을 얻는데 필요한 보광강도별 보광시간을 기상조건 및 월별로 계산하여 분석한 결과 보광강도는 필요보광량의 크기에 따라 적절한 값을 선택하여야 할 것으로 판단되었다. 55% 차광재 및 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 보광강도를 이용하여 5월말에서 6월초까지 광량 제어실험을 실시한 결과 최대 $3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도의 오차를 보여주었다. 이러한 차이는 동일한 달에 같은 기상조건에서도 일일적산 광량의 차이가 있고 하루 중 기상상태도 많은 변화가 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 기상조건에 따른 일별 최대차이가 $30 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 정도임을 감안하면 조절효과는 만족할 만한 결과로 판단된다.

생장상에서의 상추재배실험 결과 일일적산 광합성유효광량자속이 증가할수록 건물중량이 증가하였으나 광량이 지나치게 많게 되면 건물중량이 오히려 줄어들었다. 따라서 상추재배를 위한 적정 일일적산 광합성유효광량자속의 범위가 있음을 알 수 있었으며, 차광스크린 및 인공광을 이용하여 온실내부의 일일적산 광합성유효광량자속을 조절하므로서 작물생육에 적절한 광량을 공급하고자 하는 본 연구의 목적이 타당함을 확인할 수 있었다. 온실에서의 상추재배실험 결과 광량이 조절된 온실의 경우 대체로 상추생장이 순조롭게 진행되었으며 비조절 온실의 경우보다 건물중량이 더 크고 균일한 것으로 나타나 광조절 효과가 탁월하다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과들을 종합해 볼 때 본 연구에서 개발한 일일적산 광합성유효광량자속 조절을 위한 차광 및 보광 제어알고리즘의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 비록 상추재배를 위한 광량조절기술이지만 다른 작물에 대해서도 본 연구에서 제시한 자료 및 조절방법을 동일하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 자연광의 변화에 따라 광환경을 조절할 수 있는 온실설계에 필요한 자료가 부족한 현실을 감안할 때 본 연구에서 개발될 인공광 및 차광스크린을 이용한 광환경 조절방법은 온실의 광환경 조절기술의 발전에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 조절이 비교적 어렵다고 하는 온실의 복합환경제어를 위한 기술개발에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

5. 인용문현

1. Alados I., F.J. Olmo, I. Foyo-Moreno, and L. Alados-Arboledas. 2000. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. Agricultural and Forest Meteorology 102:39–50.
2. Albright, L.D., 1999. Environment control for plant production. ACESYS III Conference – From protected cultivation to phytomation – p. 47–60.
3. Blackburn W.J. and J.T.A. Proctor. 1983. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. Solar Energy Vol. 31(2):233–234.
4. Both, A.J. and L.D. Albright, 1997. Hydroponic lettuce production influenced by integrated supplemental light levels in a controlled environment agriculture facility. Acta Horticulturae 418:45–51.
5. Both, A.J. and L.D. Albright, 1998. Coordinated management of daily PAR integral and carbon dioxide for hydroponic lettuce production. Acta Horticulturae 456:45–51.
6. Giacomelli G.A., K.C. Ting, and S. Panigrahi. 1988. Solar PAR vs. solar total radiation transmission in a greenhouse. Trans. of the ASAE Vol 31(5):1540–1543.
7. Kim, H.J. and Y.S. Kim. 2000. Effects of irrigation control by time and integral solar radiation on muskmelon quality in perlite culture. J. Bio-Env. Con. 9(1):66–72(in Korean).
8. Kittas C. and A. Baille. 1998. Determination of the spectral properties of several greenhouse cover materials and evaluation of specific parameters related to plant response. Journal of Agricultural Engineering Research Vol.(71):193–202.
9. Lee, H.W., K.C. Ting, and S.G. Lee. 1999. Productivity analysis of single truss tomato production system for Korean locations. J. Bio-Env. Con. 8(3):164–171(in Korean).
10. Lee, H.W., S.G. Lee, J.W. Lee, and K.S. Son. 2002a, Control of photosynthetic photon flux by the artificial lighting in greenhouse. Proceedings of Bio-Env. Con. 11(1):20–24(in Korean).
11. Lee, H.W., S.G. Lee, and S.H. Lee. 2002b. Relationship between total solar radiation and PPF, and transmittance in greenhouse at different weather conditions. J. Bio-Env. Con. 11(2):56–60(in Korean).
12. Lee, J.S. 1997. Studies on the dropping method of air temperature in the protected house for summer culture of flower crops. Ministry of Agriculture and Forestry.
13. Lee, S.G., H.W. Lee, G.D. Kim, and J.W. Lee. 2001. Effects of shading ratio and method on inside air temperature change in greenhouses. J. Bio-Environment Control 10(2):80–87 (in Korean).
14. Park, K.W., Y.J. Shin, and Y.B. Lee. 1992. Studies on the modeling of controlled environment on leaf vegetable crops. J. Bio-Env. Con. 1(2):135–141(in Korean).
15. Park, M.H. and Y.B. Lee. 1999. Effects of light intensity and nutrient level on growth and quality of leaf lettuce in a plant factory. J. Bio-Env. Con. 8(2):108–114(in Korean).
16. Roberts, W.J. 1993. Movable thermal insulation for greenhouse, Research paper NO. PO3130–01–81. Rutgers University. New Brunswick, New Jersey.
17. Royal D. Heins, and Richard W. Thimijan. 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure. HortScience Vol. 18(6):818–822.
18. Ting K.C., and G. A. Giacomelli. 1987. Availability of solar photosynthetically active radiation. Trans. of the ASAE Vol 30(5):1453–1457.
19. 宇野 浩, 奥野向志, 鈴木皓三. 1991. 人工光を用いた制御環境下におけるトマトの生育. 日本農業氣象學會講演要旨 p. 92–93.
20. 仁科弘重, 馬越勝也, 橋本 康. 1994. 自然光利用型苗生産システムにおける環境制御. 日本生物環境調學會第32回集會 p. 172–173.
21. 中屋耕, 岡野利明, 寺添齊 外. 1994. 自然光利用野菜工場の開発. 日本生物環境調節學會第32回集會 p. 168–169.
22. 佐藤展之, 石田伸治. 1991. 冬期日照不足時における補光がメロンの生育に及ぼす影響. 日本農業氣象學會 講演要旨 p. 94–95.