

과제구분	기본연구	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제명	연구분야	수행기간	연구실	책임자	
식물공장 작물재배기술 개발	채소	'13~	농업기술원 원예연구과	이수연	
농가보급형 식물공장 재배모델 개발	채소	'13~'14	농업기술원 원예연구과	박주현	
색인용어	태양광병용 식물공장, 엽채류, 다단재배, 수경재배, 저비용				

ABSTRACT

This experiment was carried out to construct plant factory for supplying a farm and study of productivity and economic analysis of plant factory. A plant factory for supplying a farm (Korean type glasshouse, 9.6×16m) had been constructed with multi layer bed systems for vegetables, fluorescent lights, the cooling system for nutrient solution, and low pressure fogging system for air cooling. Three experiments were conducted for this thesis as follows: In the first experiment to examine the optimum type of multi layer bed system for growth of leafy vegetables. The productivity of romain lettuce cultivated two types of multi layer bed systems were 2.5 (A type) and 3.3 (3-layer type) times promoted, respectively, compare to conventional 1-layer bed system consider as a control. In the second experiment to examine the optimum photoperiod of supplemental light for growth of leafy vegetables. The greatest leaf length, fresh weight, and leaf area were obtained in the 16-h photoperiod. But 10% of tipburned plants were found in the 16-h photoperiod treatment. This disorder causes significant economic losses to the final plant products. This study showed that 12-h photoperiod treatment is more effective than 16-h photoperiod treatment in decreasing tipburn symptoms in a multi layer bed system. In the third experiment to examine the productivity and economic analysis of plant factory system. The productivity of lollo rossa and romain lettuces cultivated 3-layer bed system were 4.6 and 3.6 times increased, respectively, compare to conventional 1-layer bed system. Only 85% cost was saved when plant factory for supplying a farm was constructed as compared to closed type plant factory. Also, operating costs was reduced to 70% than closed type plant factory.

Key word : semi-closed plant factory, leaf vegetables, multi layer bed system, hydroponic culture, low-cost



1. 연구목표

식물공장은 태양광 식물공장, 인공광 식물공장, 그리고 태양광·인공광 병용 식물공장으로 분류할 수 있다. 태양광 식물공장은 네덜란드에서 발달한 형태로 유리온실에서 IT기술을 활용하여 환경제어와 자동화 시설을 설치하여 태양광으로만 식물을 재배하는 시설이다. 인공광 식물공장은 완전밀폐형 식물공장으로 건물에서 인공광만으로 식물을 재배하는 시설로 주위 환경과 관계없이 안정적으로 식물의 계획생산이 가능하지만 설치비용과 운영비용등 높은 초기투자비용에 대한 부담으로 일반농가로의 보급이 어려운 실정이다. 태양광·인공광 병용 식물공장은 자연광을 이용하면서 부족한 광을 인공광을 이용하여 계획적으로 작물을 재배할 수 있는 시설로서 일반 유리온실 등 자연광을 이용하는 시설에 인공조명을 설치하여 식물을 재배하는 시설이다. 이러한 태양광·인공광 병용 시설은 인공광 식물공장에 비해 재배환경이 안정적이지 못한 단점이 있지만 구축비용이 상대적으로 저렴하다는 점에서 일반농가로의 보급이 쉬운 장점이 있다. 따라서 식물공장의 보급을 위해 기존 온실을 활용한 저비용 태양광병용 식물공장을 개발하고자 하였으며, 태양광·인공광병용 식물공장에서의 식물재배 특성과 농업적용 효과를 검정하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 농가보급형 식물공장 재배시스템 개발

기존의 한국형유리온실(9.6×16m)을 재사용하여 농가보급형 식물공장을 구축하였다. 단위면적당 생산량을 높이기 위해 NFT식 gully를 이용하여 3단(다단1)과 A자형(다단2), 2가지 형태의 다단 재배장치를 설치하였고, 대조구로 평면 재배장치를 설치하였다 (그림 1). 다단 재배장치에는 상단부를 제외한 하층부에 식물재배용 형광등(38W)를 설치하여 16시간(06:00~21:00) 보광하였다. 여름철 고온기를 극복하기 위해 경기도농업기술원에서 개발한 저압에어포그를 설치하여 온도강하 효과가 나타날 수 있도록 하였으며, 양액냉각기를 이용하여 근권부 온도를 20°C로 유지하였다. 재배장치 형태에 따른 생육 및 수량을 비교하기 위해 공시작물로 청로메인을 이용하였다. 양액의 공급은 원예연구소 상추양액을 이용하여 EC 2.0dS·m⁻¹수준으로 조정하여 주간 10분 간격으로 10분, 야간 1시간 간격으로 10분 공급하였다. 양액은 순환식으로 재활용되었으며, 각 양액탱크의 수위가 일정비율 이하로 낮아졌을 때 초기와 동일한 양액을 재보충하여 공급하였다. 과종 후 10~14일된 묘를 온실 내 재배장치에 정식 후 약 4주간 재배하였으며, 지상부 생체중, 초장, 엽수, 엽면적, 엽록소 함량을 조사하였다.



그림 1. 다단 재배장치와 평면 재배장치

나. 다단 재배장치 보광시간에 따른 엽채류 생육비교

다단 재배장치에서 엽채류 재배 시 적정 보광시간을 알아보고자 3단(다단1)에서 형광등을 이용하여 16시간(06:00~21:00), 12시간(07:00~19:00)으로 나누어 실시하였고 평면 재배장치도 보광을 제외한 동일조건에서 실험하였다. 보광시간에 따른 생육 및 수량을 비교하기 위해 공시작물로 청로메인을 이용하였으며 원예연구소 상추 양액($EC\ 2.0dS\cdot m^{-1}$)을 주간 10분 간격으로 10분, 야간 1시간 간격으로 10분 공급하였다. 과종 후 10~14일된 묘를 온실 내 재배장치에 정식 후 약 4주간 재배하였으며, 지상부 생체중, 초장, 엽수, 엽면적, 엽록소 함량을 조사하였다.

다. 농가보급형 식물공장 연중 생산량 및 경제성 분석

농가보급형 식물공장에서 엽채류 시기별 생육 및 생산량을 분석하기 위해 상추 2 품종을 이용하여 실험하였다. 롤로로사의 경우 2014년 5월부터 10월까지 6회 수확하였고, 청로메인은 2014년 2월부터 10월까지 9회 수확하였다. 다단 재배장치는 12 시간(07:00~19:00) 형광등으로 보광하였고, 평면 재배장치에서도 보광을 제외한 동일조건에서 재배하였다. 원예연구소 상추양액($EC\ 2.0dS\cdot m^{-1}$)을 주간 10분 간격으로 10분, 야간 1시간 간격으로 10분 공급하였다. 과종 후 10~14일된 묘를 온실 내 재배장치에 정식 후 약 4주간 재배하였으며, 지상부 생체중, 초장, 엽수, 엽면적, 엽록소 함량을 조사하였다. 경제성 분석을 위해 기존의 인공광 식물공장과 보급형 식물공장의 연간 생산량과 시설투자비용, 운영비를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 농가보급형 식물공장 재배시스템 개발

재배장치 형태에 따른 청로메인의 생육특성 및 수량은 표 1과 같다. 2가지 형태의 다단 재배장치에서 공간이용 효율성이 높아져 평면 재배장치 대비 전체수량이

2.5~3.3배 증가하였다. 다만 재배장치에서 단수에 따른 생육 차이가 있었다. 각 다단장치에서 상단부인 3단(다단1)과 4단(다단2)에서의 생육에 비해 최하단부인 1단에서 생체중이 22%(다단1), 43%(다단2) 감소하였다. 이러한 생육차이는 상단부의 그림자 간섭에 의한 하단베드의 광환경 저하로 광합성이 원활하지 못해 생육속도가 저하된다는 보고와 일치하였다(심, 2004). 생산량과 작물의 생육 균일성을 고려하여 태양광 이용형 농가보급형 식물공장에는 3단과 A자형 재배장치에서 생육 및 수량이 우수한 것을 알 수 있었다.

표 1. 재배장치에 따른 청로메인 생육특성

구 분	초장 (cm)	엽수 (매/주)	엽면적 (cm ² /주)	엽록소 (SPAD)	생체중 (g/주)	수량 (kg/10a)
다 단 1	1단	30.6	23.4	b	1,075	a
	2단	30.4	23.5	ab	1,151	a
	3단	25.6	25.8	ab	1,211	a
다 단 2	1단	30.1	20.1	c	788	b
	2단	30.8	23.6	ab	1,166	a
	3단	25.2	26.4	a	1,179	a
	4단	28.6	26.1	ab	1,282	a
평면		25.3	24.1	ab	1,116	a
						2,170
						839

♪ DMRT at 5% level

♪ 과종 6.27, 정식 7.17 조사 8.8, 조명시간 16시간 (06:00~21:00)

나. 다단 재배장치 보광시간에 따른 엽채류 생육비교

다단재배장치 하단부의 광환경 저하를 보완하기 위한 형광등 보광시간 실험결과는 표 2와 같다. 광주기에 따른 청로메인의 생육은 뚜렷한 차이를 보였다. 16시간으로 보광을 한 처리구에서 가장 좋은 생육을 보였다. 이러한 결과는 국화와 상추에서 광주기가 길어지면 엽면적과 엽수가 증가한다는 보고와 일치하였다(Lee et al., 2001; Park et al., 2013). 하지만 16시간 처리구에서 하단부인 1단과 2단에서 10%의 텁번이 발생해 수량 손실이 있었다. 엽채류 재배 시 주로 나타나는 텁번은 생육속도의 증가와 정의 상관관계에 있으며(Lee et al., 2013), 본 실험에서는 16시간 보광처리로 생육속도 증가하여 나타난 현상으로 사료된다.

표 2. 보광시간에 따른 청로메인 생육특성

일장 (hr)	구분	초장 (cm)	엽수 (매/주)	엽면적 (cm ² /주)	엽록소 (SPAD)	팁번 (%)	생체중 (g/주)	수량 (kg/10a)
12	1단	21.32	18.8	c	822	cd	32.6	- 40.1 cd
	2단	21.47	19.7	bc	871	cd	32.4	- 43.7 c 1,911
	3단	21.91	19.8	bc	907	c	39.5	20 46.1 c
16	1단	22.25	20.9	ab	1,025	b	32.5	10 52.9 b
	2단	23.09	21.9	a	1,147	a	32.8	10 64.3 a 2,386
	3단	22.57	21.4	a	1,055	ab	39.5	20 56.1 b
평면		21.27	18.7	c	789	d	31.1	20 35.9 d 454

♪ DMRT at 5% level

♪ 파종 9.6, 정식 9.24 조사 10.28

다. 농가보급형 식물공장 연중생산량 및 경제성 분석

다단재배와 평면재배의 연중 총생산량을 비교하면 롤로로사 4.6배, 청로메인 3.6배로 향상되었다. 시기별 생산량에서는 두 품종 모두 봄과 가을철이 여름에 비해 높았으며 그 중에서도 가을이 가장 높았다(표3, 4). 이러한 결과는 계절에 따라 적위가 봄과 가을철에 0°C, 여름철에 23°C로 변화하고, 여름의 경우 적위에 의해 그림자가 가장 높이 올라가 상단부가 하단부에 주는 그림자의 영향이 커서 생산량이 떨어진다는 보고와 일치하였다(심, 2004).

식물공장 형태별 설치비용과 운영비를 조사한 결과는 표 5, 6과 같다. 농가보급형 식물공장은 기존 온실구조를 이용하고, 보조광원으로 형광등을 설치하여 설치비가 인공광 식물공장에 비해 85% 절감되었다. 1주의 상추 생산 시 소요되는 운영비용은 농가보급형 식물공장의 경우 210원, 인공광 식물공장은 약 600원으로 약 70% 절감되었다.

표 3. 롤로로사의 생육시기별 생산량

처리	5월	6월	7월	8월	9월	10월	계
다단	1 790	958	923	646	1,088	922	5,327
	2 776	948	963	668	1,229	1,183	5,767
	3 866	1,215	925	392	826	1,413	5,637
계	2,432	3,121	2,811	1,706	3,143	3,518	16,731
평면	687	907	392	118	430	1,096	3,630
수량지수	354	344	717	1,445	730	320	460

♪ 수량지수=다단식수량/관행수량*100

표 4. 청로메인의 생육시기별 생산량

처리	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	계
다단	1,082	1,262	1,063	987	957	553	486	700	1,953	9,043
	2,124	1,420	1,139	1,038	998	802	705	730	2,130	10,176
	865	1,094	1,391	796	1,632	818	754	1,031	2,219	10,600
	3,161	3,776	3,593	2,821	3,587	2,173	1,945	2,461	6,302	29,819
평면	575	683	1,231	668	1,248	780	887	870	1,228	8170
수량지수	549	552	291	422	287	278	219	282	513	364

↳ 수량지수=다단식수량/관행수량*100

표 5. 식물공장 형태에 따른 설치비 비교

종류	농가보급형		식물공장A	식물공장B	식물공장C
	다단(3단)	평면			
면적(m ²)	1,000	1,000	660	225	1,650
설치비(천원)	183,752	57,800	810,000	453,000	2,208,658
설치비(천원/평)	606	190	4,050	6,644	4,417

표 6. 식물공장 형태에 따른 운영비 비교

(단위 : 천원)

항목	농가보급형		식물공장A	식물공장B	식물공장C
	다단(3단)	평면(1단)			
면적(m ²)	1,000	1,000	660	225	1,650
연간생산량(주)	384,912	128,304	378,000	196,560	770,877
전기료	7,377	1,165	54,000	9,000	54,051
수도	-	-	2,400	-	-
난방비	6,011	6,011			
양액	5,071	1,690	8,400	780	10,284
스펀지	8,904	2,968	7,200	7,200	10,578
종자료	10,302	3,434	1,200	3,600	45,333
인건비	36,000	24,000	156,000	48,000	309,600
이산화탄소	-	-	9,000	600	5,520
기타	6,031	2,010	12,000	3,000	
운영비 합계	79,696	41,280	250,200	72,180	606,170
운영비(원)/주	210	320	660	370	790

↳ 연간생산량 (농가보급형) : 30일×9회/년 재배, loss 10%

↳ 난방 : 중유온수난방 , 수도 : 지하수

4. 적요

농가보급형 식물공장의 개발을 위하여 엽채소의 생산성 향상에 효과적인 재배시스템과 식물공장의 경제성을 규명하고자 시험한 결과는 다음과 같다.

- 가. 평면재배장치 대비 다단재배장치에서 수량이 2.5~3.3배 증가하였다. 3단 재배장치 시스템이 A자형 재배장치에 비해 균일성이 높아 엽채류 생육에 적합하다고 할 수 있다.
- 나. 16시간으로 보광을 하였을 때, 엽면적과 엽수가 증가하였다. 하지만 생육속도 증가로 인해 하단부에서 10%의 팁번이 나타나 수량 손실이 있었다. 상품성과 경제성을 고려하였을 때 12시간 보광이 적합하다고 할 수 있다.
- 다. 롤로로사와 청로메인을 연중재배 하였을 때, 여름철에 재배장치 상단부의 그림자에 의한 하단부 광환경 저하로 봄과 가을철에 비해 생육이 떨어지는 경향이 있었다. 연중 총생산량이 평면재배에 비해 3.6~4.6배 증가하였다.
- 라. 농가보급형 식물공장형태인 태양광병용 다단재배시스템은 인공광 식물공장에 비해 설치비 85%와 운영비용 70% 절감되어 농가로의 보급에 적합한 시스템이라 할 수 있다.

5. 인용문헌

- 심상원. 2004. 광환경을 고려한 온실 다단재배 시스템의 최적설계. 서울대학교대학원. pp.9-13, 41-42
- Lee, B.J., M.K. Won, D.H. Lee, and D.G. Shin. 2001. Changes in SPAD chlorophyll value of chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* Tzveley) by photoperiod and light intensity. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 19:555-559
- Lee J.G., C.S. Choi, Y.A Jang, S.W. Jang, S.G. Lee, and Y.C. Um. 2013. Effects of air temperature and air flow rate control on the tipburn occurrence of leaf lettuce in a closed-type plant factory system. Hort. Environ. Biotechnol. 54(4):303-310
- Park, J.E., Y.G. byoung, B.R. Jeong and S.J. Hwang. 2013. Growth of lettuce in closed-type plant production system as affected by light intensity and photoperiod under influence of white LED light. Hort. Environ. Biotechnol. 3:228-233

6. 연구결과 활용제목

- 농가보급형 식물공장 재배모델 (영농활용)

7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도	
						'13~'14	
	책임자	농업기술원 원예연구과	농업연구사	박주현	세부수행총괄	○	○
농가보급형 식물공장 재배모델 개발	공동연구자	“ “ “ “	농업연구관 농업연구사 농업연구사 계약직	이수연 이상우 황규현 고명희	결과검토 자료조사 자료조사 시험보조	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○