

태양열-잠열축열시스템의 온실보온특성

宋鉉甲, 柳瑩善*

충북대학교 농업기계공학과, *충북대학교 대학원 농공학과

A Study on the Greenhouse Heating of Solar Energy

- Latent Heat Storage System -

Song, Hyun-Kap and Ryou, Young-Sun*

Dept. of Agr. Machinery, Chungbuk Nat'l Univ. and *Dept. of Agr. Eng., Graduate School, Chungbuk Nat'l Univ., Cheongju 360-763

Summary

For the high quality and low cost agricultural crops in greenhouse cultivation, it is necessary to use natural energy as much as possible. In order to reduce the fossil fuel consumption and maximize the solar energy utilization in greenhouse heating, a latent heat storage material was developed as a relatively highly concentrative solar energy storage medium. And a solar energy-latent heat storage system was designed and constructed. The experimental research on greenhouse heating effect of the system was performed.

緒 論

저온잠열재($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)에 태양에너지를 저장·이용하는 겨울철 그린하우스 보온용 시스템을 구성하고, 그 특성을 분석하므로써 현재 그린하우스 보온에 이용되고 있는 고가이며, 환경오염원인 화석 에너지를 저가이며, 깨끗한 태양에너지로 대체할 수 있는 기초자료를 제공하려 하였다.

누어 두개의 그린하우스를 설치하여 잠열축열효과를 실험적으로 비교·분석할 수 있도록 하였다.

實驗裝置 및 方法

1. 실험장치

본 연구에서 구성한 태양열-잠열축열시스템-Greenhouse로 이루어진 온실보온시스템은 Fig.1과 같으며, 전체시스템을 구성하고 있는 각 부위의 상세한 내용은 Table 1과 같다. Fig.1에서 보는 바와 같이 잠열축열장치가 있는 경우와 없는 경우로 나

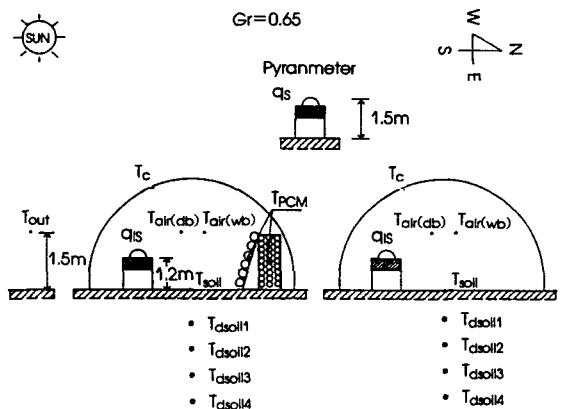


Fig.1 Greenhouse-latent heat storage system and experimental measuring positions.

본 연구는 과학기술처에서 시행한 1991년도 UR대응농업기술개발연구비지원으로 수행되었음.

Table 1. Details of solar energy-latent heat storage-geenhouse system.

Parts	Item	Materials and dimension
Greenhouse	Greenhouse cover	PVC film 0.05mm
	Bed area(A_b)	7m×5m=35m ²
	Wall area(A_w)	7.7m×7m=53.9m ²
	보온비($\frac{A_s}{A_w} = R_g$)	$R_g = \frac{35}{53.9} = 0.65$
	Structural pipe (Al+Zn)	$\Phi_i = 18\text{mm}$ $\Phi_o = 22\text{mm}$
	Thermal curtain	PVC film 0.10mm
Phase change material (PCM) (Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O +N.A+T.A +T.C+L.H.C	Thermo-physical Properties	$C_{ps} = 0.816\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$
		$C_{pl} = 0.829\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$
		$k_s = 0.130\text{cal/sec} \cdot \text{m}^\circ\text{C}$
		$kl = 0.194\text{cal/sec} \cdot \text{m}^\circ\text{C}$
		LH=44.0kcal/kg
		$T_m = 13 \sim 15^\circ\text{C}$
		$\rho_s = 1,460\text{kg/m}^3$
	$\rho_l = 1,330\text{kg/m}^3$	
	Total PCM mass in tube	602.8kg
	Total number of small size unit	244ea.
	PCM mass in small size unit	458.8kg
Total number of large size unit	36ea.	
PCM mass in large size unit	144kg	

2. 實驗方法

본 실험은 자연상태의 기후조건변화속에서 Table 2

와 같은 변수요인들을 측정하는 것으로 반복실험을

수행하였다.

Table 2. Experimental factors and its measuring instruments.

Measuring factors	Symbol	Instrument	Measuring position
Ambient temp.	$T_{out} (^\circ\text{C})$	Hybrid recorder 12ch - TM-B, Thermocouple	1.5m height from ground
Air temperature in greenhouse	$T_{air} (^\circ\text{C})$	〃	1.5m height from bed soil in side greenhouse
Solar radiation outside greenhouse	q_s (kcal/m ² hr)	Solar radio meter	1.5m height from ground
Solar radiation in side greenhouse	q_{is} (kcal/m ² hr)	〃	1.5 height from bed soil in side greenhouse
PCM temperature in storage unit	$T_{PCM} (^\circ\text{C})$	Hybrid recorder - TM-B, Thermocouple	- Tube surface - PCM in tube
Bed soil tempereare	$T_{soil} (^\circ\text{C})$	〃	3mm under the bed soil
Under the bed soil temperature	$T_{d,soil} (^\circ\text{C})$	〃	50mm, 40cm, 30cm, 20cm 10cm, under the bed soil
Dry-wet temperature	$T_{D,w} (^\circ\text{C})$	Dry-wet bulb temp. measuring system	1.2m height from bed soil
Greenhouse cover temp.	T_c	Hybrid recorder 12ch. - TM-B, Thermocouple	on the cover film

數學的 模型

태양열을 잠열축열재(Na₂SO₄·10H₂O)에 저장하여 온실보온에 이용할 수 있도록 구성된 태양열-잠열축열장치의 온실보온특성 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

잠열축열장치가 설치된 온실에 대한 청명한 날씨의 주간 열평형은 다음과 같이 표시된다.

$$q_{1S} = q_{air} + q_{soil} + q_{LH} + q_L \quad (1)$$

(1)식의 각 항을 계산가능한 상세식으로 표현하면 다음과 같다.

- 온실내 투과입사된 태양에너지: q_{1S}

$$q_{1S} = q_{solar.E} \times \tau \quad (a)$$

$$q_{solar.E} = \sum_{i=1}^n q_{s,i} \times \Delta t_i$$

τ = Greenhouse cover의 투과율(85%)

- 온실내 공기와 토양에 저장된 에너지: q_{air} , q_{soil}

$$q_{air} = \sum_{i=1}^n (hair_2 - hair_1)_i \quad (b)$$

$$q_{soil.E} = \sum_{i=1}^n (m_{soil.0} C_{psoil.0} \Delta T_{0,i} + m_{soil.5} C_{psoil.5} \Delta T_{5,i} + m_{soil.15} C_{psoil.15} \Delta T_{15,i}) \quad (c)$$

- 잠열축열재에 저장된 에너지: q_{LHSS}

$$q_{LHSS} = \sum_{i=1}^n m_{pcm} (C_{pL} \Delta T_L + C_{pS} \Delta T_S + LH)_i \quad (d)$$

- 온실로부터의 손실에너지: q_L

$$q_L = \sum_{i=1}^n (q_t + q_{vent})_i = \sum_{i=1}^n (h_t + h_{vent}) (T_C - T_{out})_i \quad (e)$$

(a)~(e)식에 실험결과를 대입하므로써 온실내에 투과되어 저장되고, 손실되는 에너지를 계산할 수 있었다.

그 결과를 간단히 제시하면 다음과 같다.

$$q_{solar.E} = 4,114.8 \text{ kcal/m}^2, \quad q_{soil.E} = 200.0 \text{ kcal/m}^2$$

$$q_{LH} = 1,000.0 \text{ kcal/m}^2, \quad q_{air} = 103.0 \text{ kcal/m}^2$$

$$q_L = 2194.8 \text{ kcal/m}^2$$

여기서, i = 시간간격수

$q_{solar.E}$ = 그린하우스 외부의 단위 면적당 태양에너지 (kcal/m²)

q_{1S} = 그린하우스 외부의 각 시간대별 태양강도 (kcal/m²)

Δt = 차분된 시간간격(sec)

q_{air} = 온실내 공기에 저장된 에너지(kcal/m²)

$(hair_2 - hair_1)$ = 공기의 엔탈피 변화량 (kcal/m²)

$q_{soil.E}$ = 그린하우스 내부의 단위 상면적당 토양에 저장된 열에너지(kcal/m²)

$m_{soil.0}$ = 1.0m²의 상면적과 표토층을 고려한 토양질량

V_{soil} = 고려대상의 토양체적 (m³)

ρ_{soil} = 고려대상 토양밀도 2,050 (kg/m³)

$m_{soil.5}$ = 1.0m²의 상면적과 5.0cm 토층이 차지하는 토양질량(kg)

$m_{soil.15}$ = 1.0m²의 상면적과 15.0cm 토층이 차지하는 토양질량(kg)

$C_{psoil.0.5.15}$ = 표토 5.0cm, 15.0cm의 토층별 토양비열: 0.44(kcal/kg°C)

$\Delta T_{0.5.15}$ = 시간대별 토층간의 토양 온도 차

q_{LHSS} = 그린하우스의 상면적당 잠열축열 시스템에 저장된 저장된 에너지 (kcal/m²)

m_{pcm} = 온실의 단위 상면적당 PCM질량(kg/m²)

q_t, q_{vent} = 그린하우스 피복재를 통하여 손실된 에너지, 온실환기에 의하여 손실된 에너지(kcal/kg°C·hr)

h_t, h_{vent} = 그린하우스 피복재의 열손실계수, 온실환기에 의한 열손실계수 (kcal/kg°C·hr·°C)

T_C, T_{out} = 그린하우스 피복재의 온도, 주위 공기의 온도 (°C)

q_L = 온실로부터의 손실에너지(kcal/m²)

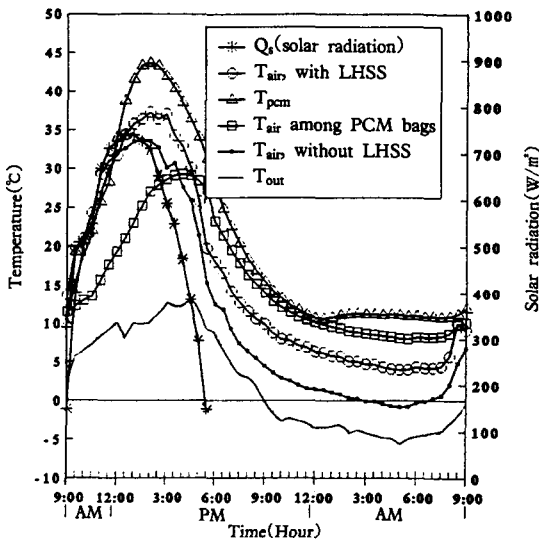
結果 및 考察

1. 청명일의 축열 및 보온효과

실험기간 중 3월 3일은 청명한 날씨였으며, 주간의 최대태양강도는 13시에 750 W/m^2 로 나타났다.(Fig. 2 참고) 일정한 시간간격으로 측정된 태양강도를 (a)식에 대입하여 적산한 수평면 태양에너지는 17.2 MJ/m^2 ($4,114.8 \text{ kcal/m}^2$)이었다.

Fig.2에서 보는 바와 같이 잠열축열재의 온도변화는 태양강도와 외기온의 변화에 따라 액상최고온도가 44°C 까지 상승하였으며, 밤 12시부터 아침 9시까지는 잠열온도인 13°C 를 유지하였다. 주간에 잠열축열재에 저장된 에너지는 (d)식에 의하여 $1,000 \text{ kcal/m}^2$ 인 것으로 분석되었다.

상면적의 80%가 작물에 의하여 덮여있는 경우의 토양에 축열된 에너지량은 (c)식에 의하여 200 kcal/m^2 인 것으로 분석되었다. 그리고 온실내 공기가 함유하는 엔탈피(enthalpy) 차에 의한 열에너지가 103 kcal/m^2 이었으며, 나머지는 주간의 열손실로 나타나게 되어, 온실피복재의 투과율을 85%로 할 경우, 청명한 날 태양에너지 저장은 38.3%가 됨을 알 수 있었다.



LHSS : Latent heat storage system
 $T_{\text{air, with LHSS}}$: Inner air temperature of greenhouse with LHSS
 $T_{\text{air, without LHSS}}$: Inner air temperature of greenhouse without LHSS

Fig. 2 Temperature variation of ambient air, greenhouse air and PCM storage unit and solar radiation during the fine day and night.(March 3th~4th, 1991)

이상과 같이 축열된 태양에너지에 의하여 그림 2에서 보는 바와 같이 잠열축열온실의 최저기온은 새벽 5시 30분에 나타났으며, 외기온 -5.2°C 보다 9°C 높은 4°C 이었으며, 잠열축열장치가 없는 그런 하우스의 최저실온보다 5°C 정도 높게 나타났다.

2. 비청명일의 보온효과

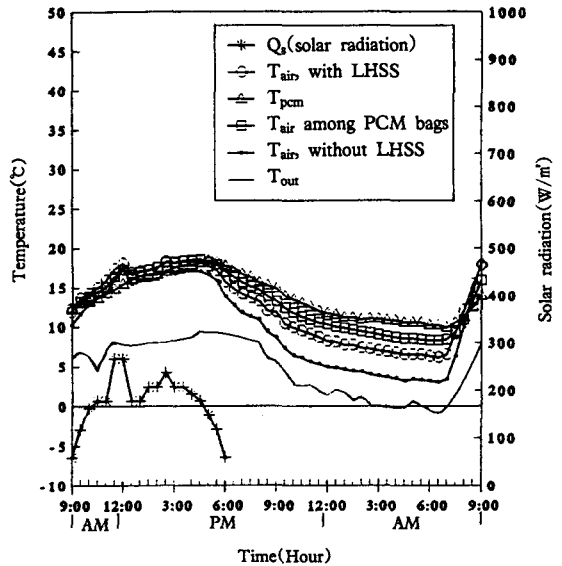


Fig. 3 Temperature variation of ambient air, greenhouse air and PCM storage unit and solar radiation during the cloudy day and night.(March 22th-23th, 1991)

Fig.3에서 보는 바와 같이, 3월 22일은 구름낀 비청명일이었으며, 태양강도는 $90 \sim 270 \text{ W/m}^2$ 으로 이를 積算한 전태양에너지는 5.3 MJ/m^2 ($1,267.9 \text{ Kcal/m}^2$)이었다. 최저 외기온은 -1°C 이었으며, 이때 잠열축열장치가 있는 온실내 최저기온은 6.3°C 로 외기온보다 7.3°C 높게 나타났으며, 축열장치가 없는 온실내 최저기온은 3°C 로 외기온보다 4°C 높게 나타나 온실에 설치된 잠열축열 장치는 구름낀 날에도 3.3°C 室溫 상승효과를 보여주었다.

구름낀 비청명일의 온실최고온도는 16시에 $17 \sim 18^\circ\text{C}$ 를 보여 잠열재의 상변화 온도보다 약간 높게 나타나므로서 구름낀 날에도 적은 양이지만 잠열재에 태양열축열이 일어나고 있음을 보여주었다.

3. 재배기간중 최저실온차로 표시한 태양열-잠열 축열시스템의 온실풍온효과

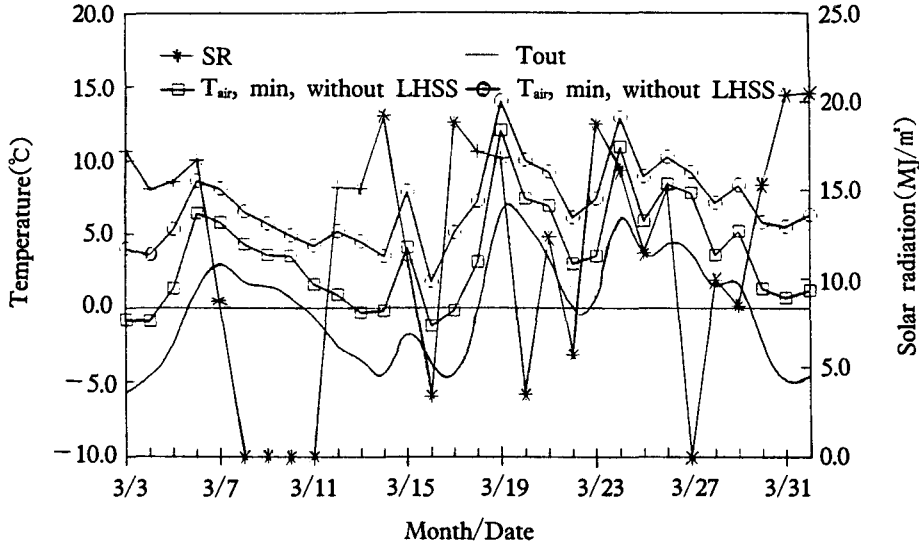


Fig. 4 Comparison of minimum air temperatures in greenhouse with and without LHSS.

겨울철 시설재배에서 최저실온이 문제가 되기 때문에 재배기간중 잠열축열시스템의 온실보온효과를 최저실온차로 나타내는 것이 합리적이다.

Fig.4의 횡축은 3월 3일에서 4월 1일까지의 날짜를 표시하였고, 왼쪽 종축은 온도를 나타내었으며, 오른쪽 종축은 온실외부의 태양에너지를 나타내었다. 이 그림에서 30일간의 실험결과를 종합하기 위하여 매일의 최저외기온, 태양강도, 잠열축열시스템이 설치된 온실내 최저기온과 잠열축열시스템이 없는 온실내 최저기온별로 연속해서 나타내었다.

이 그림에서 보는 바와 같이 최저외기온은 -5.2°C , 최고외기온은 8.5°C 로 30일간 4번의 반복을 보였고, 태양강도 역시 최고 $21\text{MJ}/\text{m}^2$ 을 나타내면서 주기적인 현상을 보였다. 이와 같은 외기온과 태양강도의 변화조건에서 잠열축열시스템이 설치된 온실내 최저기온은 축열시스템이 없는 온실내 최저기온보다 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 높게 나타났다.

4. 최저외기온이 잠열축열시스템의 온실보온효과에 미치는 영향

잠열축열장치가 있는 경우와 없는 경우의 온실내 최저기온차로 표시한 보온효과에 최저외기온이 주는 영향을 Fig.5에 나타내었다. 이 그림에서 횡축은 실험기간 중 최저외기온을 표시하였고, 종축에는 잠열축열장치가 있는 경우와 없는 경우의 온실내 최저기온차를 나타냈다. Fig.5에서 보는 바와 같이 최저외기온이 낮을수록 온실내 최저기온차는 크게 나타났으며, 최저외기온이 높을수록 온실내 최저기온차가 적게 나타나는 뚜렷한 경향을 보였다. 이와 같은

결과는 주간에 태양열이 잠열축열재에 많이 저장되어있는 경우에는 온실온도와 외기온의 차가 클수록 자연적으로 온실내 최저기온과 잠열축열재 온도차가 커지게 되므로 축열재로부터 더 많은 열이 온실내에 방출되기 때문에 저장되었던 에너지가 온실보온에 더 큰 역할을 하는 것으로 판단되었다.

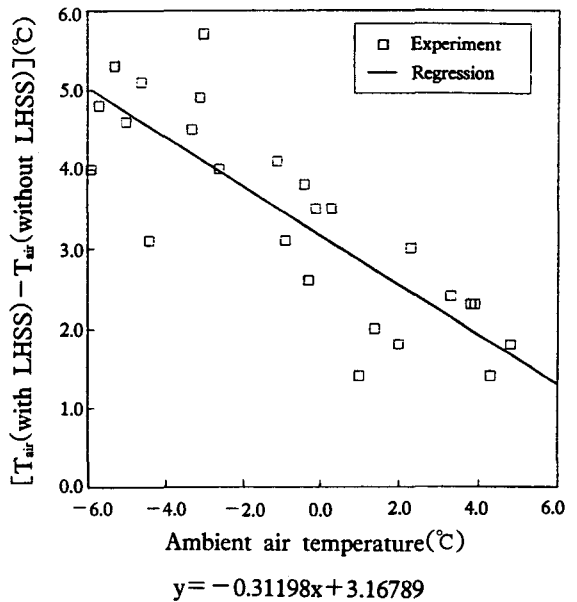


Fig. 5 Ambient air temperature effect on the temperature difference between the minimum temperatures of greenhouse with and without LHSS.

5. 태양강도가 잠열축열시스템의 온실보온효과에 미치는 영향

잠열축열장치가 있는 경우와 없는 경우의 온실내 최저기온차, $\Delta T = T_{air, min. (with LHSS)} - T_{air, min. (without LHSS)}$ 에 미치는 태양강도의 영향을 분석하여 Fig.6에 표시하였다. 이 그림에서 횡축은 실험 기간중 태양강도를 표시하였고, 종축은 ΔT 를 나타냈으며, 태양강도가 높을수록 잠열축열장치가 있는 경우와 없는 경우의 온실내 최저온도차, ΔT 가 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 주간에 태양강도가 높은 경우에 잠열축열장치내에 더 많은 양의 태양열이 저장되었다가 기온이 내려갈 때 더 많은 양의 열에너지가 온실보온에 이용되었기 때문인 것으로 판단되었다.

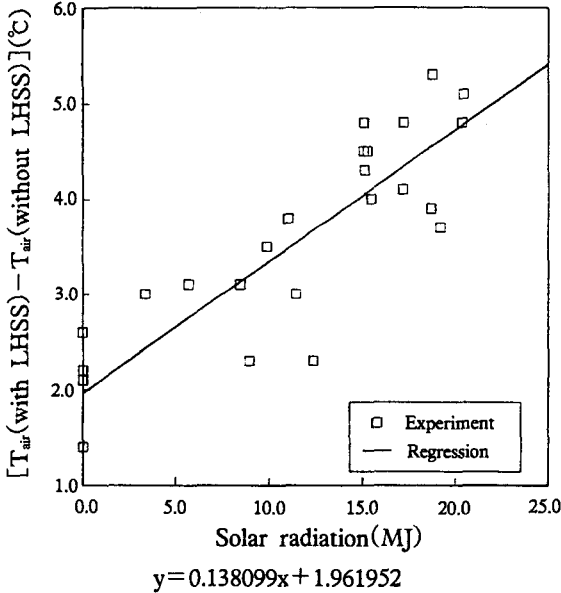


Fig. 6 Solar radiation effect on the temperature differences between the minimum temperatures of greenhouse with and without LHSS.

要約 및 結論

시설농업에서 자연에너지를 최대한으로 이용하여야 고품질, 저가 농산물을 생산할 수 있다는 근원적 개념에서 그린하우스 보온에 태양에너지 이용을 극대화 하여 고가의 화석에너지를 절약하고, 농촌 및 농업환경을 깨끗하게 보존하기 위하여 태양열을 고

농축 저장할 수 있는 잠열재를 선택·개발하고, 이를 매체로 태양열-잠열축열시스템을 구성하였으며, 이 시스템의 온실보온효과를 분석·정리하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 저온 상변화 물질인 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 를 태양열 저장매체로 선택·이용하였다.
2. 청명한 날에 태양열-잠열축열시스템을 설치한 온실은 최저외기온보다 9.0°C , 그리고 잠열축열시스템이 없는 온실내기온보다는 5.0°C 온도상승효과를 보였다.
3. 비청명일에도 잠열축열시스템을 설치한 온실은 최저외기온보다 7.3°C , 잠열축열시스템이 없는 온실보다는 4.0°C 온도상승효과를 나타내었다.
4. 청명한 날에 온실내 토양면이 나지인 경우에는 700 kcal/m^2 , 토양면이 80% 작물로 덮여있는 경우에는 126 kcal/m^2 의 토양축열을 보였으며, 같은 조건에서 잠열축열재에 저장된 열량은 $1,000 \text{ kcal/m}^2$ 이었다.
5. 겨울철 온실재배기간중 연속 30일간 잠열축열시스템이 설치된 온실의 최저외기온은 최저외기온보다 $5.0 \sim 9.0^\circ\text{C}$ 높게 나타났고, 축열장치가 없는 온실의 최저실온보다 $3.0 \sim 5.0^\circ\text{C}$ 높게 나타났다.
6. 태양열-잠열축열시스템의 온실보온효과는 외기온에 반비례하고, 태양강도에 비례하였다.
7. 이상의 결과로 보아 본 연구에서 개발한 잠열축열시스템은 겨울철 그린하우스 난방을 위한 보조열원으로서 이용가능하며, 연속되는 비청명일을 고려하여 보조열원의 설치가 병행되어야 한다.

參考文獻

1. A. E. Fouda, G. J. G. Despault, J. B. Taylor, C. E. Capes. 1984. Solar storage systems using salt hydrate latent heat and direct contact heat exchange-II. Solar Energy Vol.32(1) : 57-65.
2. Ana Maria Silva, Rui Rosa. 1987. Radiative heat loss inside a greenhouse. J. agric. Engng. Res. Vol. 37 : 155-162.
3. G. Paradakis, A. Frangoudakis, S. Kyritsis. 1989. Soil energy balance analysis of a solar greenhouse. J. agric. Engng. Res. Vol.43 : 231-243.
4. T. Boulard, E. Razafinjohany, A. Baille, A. Jaffrin, B. Fabre. 1990. Performance of a greenhouse heating system with a phase change material. Agricultural and Forest Meteorology Vol.52 : 303-318.

5. 仁科弘重, 高倉直. 1985. 潜熱蓄熱方式たよる太陽熱暖房温室た關する研究(3), 實用規模温室での暖房實驗. 農業氣象 40(4) : 313-321.
6. 古在豊樹. 1985. 施設園藝の環境調節 新技術.
7. 日本施設園藝協會. 1989. 施設園藝新技術 實用化促進事業. 第3分冊 : 35-49.
8. 階川秀夫, 立花一雄. 1989. PE, PVC 一重被覆ハウスの熱貫流-温室の 保温性と 被覆材(1). 農業氣象 38(10) : 13-24.
9. 權在永, 高倉直. 1989. 温室期間冷暖房負荷の 簡易算定法. 農業氣象, 44(4) : 287-294.

신 간 소 개

수경재배의 이론과 실태

발 행 : 고려대학교 출판부

발행년도 : 1991년

저 자 : 박권우, 김영식

< 내 용 >

우리나라의 수경재배는 역사가 짧으며, 재배면적도 10ha 정도로 좁고, 재배형태도 역경, 담액재배에 집중하고 있어 재배방식에도 낙후성을 보이고 있다. 그러나 수경재배는 발전속도가 상당히 빠른 기술집약적 재배법으로 각광을 받고 있으며, 이 재배법을 기초로 식물공장으로서의 시도로 이루어 지고 있는 시점에 우리는 접해 있다.

본 서적은 많은 수경재배 방식중에서 실용성이 문제시 되어 재배면적이 줄어가는 방식은 제외하였으며, 미래지향적인 수경재배 방식에 한하여 이론과 실제적인 측면을 기술한 것으로, 특히 배양액 관련에 많은 부분을 할애하였고, 식물공장에 관하여서도 개략적인 내용을 가미하여 미래에 부응하려는 시도에서 저술하였다.

본 서적을 집필하는 데 있어서 M.Resh의 Hydroponic food production(1978)과 山崎의 養液栽培全編(1982) 등에서 중요한 부분은 원문을 인용하기도 하였으나, 가능한 최근의 논문들을 중심으로 실용적, 학술적인 접근에 주의를 기울였다. 또한 현재 세계적으로 생산되고 있는 수경재배장치들을 제작회사의 협조로 수록하여 수경재배방식의 이해에 도움을 주고자 하였다. 내용의 전개에 있어서는 가급적 모식도를 많이 하여 전체 흐름을 쉽게 이해시키기에 노력하였으며, 그림과 표로 논문의 결과가 쉽게 이해되게 하였다. 제2장 식물영양편에서는 배양액을 이해하는 데 필요한 기초적인 내용을 수록하였다. 제3장 배양액에서는 예를들어 관련된 수식을 풀이하여 기존에 배양액을 조제할 때의 의문점을 해소시키고자 하였다. 제3부 수경재배의 실제에서는 일차적으로 토마토, 오이, 딸기편을 기술하여, 현재 우리나라에서는 그 재배면적이 적으나 세계적으로는 비율이 높은 작물을 우선적으로 수록하였다.

본 서는 연구자, 학생 및 전문가들을 대상으로 집필되었으나, 깊이있는 내용을 요구하는 농가에서도 도움이 되리라 믿는다.

(편집위원회)