

## 열펌프 - 잠열축열 시스템의 온실 난방 특성 연구

# Greenhouse Heating Characteristics of Heat Pump-Latent Heat Storage System

강 연구

정회원

Y. K. Kang

송 현 갑

정회원

H. K. Song

### SUMMARY

In order to use the natural thermal energy as much as possible for greenhouse heating, the air-air heat pump system involved PCM(phase change material) latent heat storage system was composed, and three types of greenhouse heating system (greenhouse system, greenhouse-PCM latent heat storage system, greenhouse-PCM latent heat storage-heat pump system) were recomposed from the greenhouse heating units to analyze the heating characteristics.

The results could be concluded as follows;

1) In the greenhouse heated by the heat pump under the solar radiation of  $406.39\text{W/m}^2$ , the maximum PCM temperature in the latent heat storage system was  $24^\circ\text{C}$  and the accumulated thermal energy stored in PCM mass of 816kg during the daytime was 100,320kJ.

In the greenhouse without heat pump under the maximum solar radiation of  $452.83\text{W/m}^2$ , the maximum PCM temperature in the latent heat storage system was  $22^\circ\text{C}$  and the accumulated thermal energy stored during the daytime was 52,250kJ.

2) In the greenhouse-PCM system without heat pump the heat stored in soil layers from the surface to 30cm of the soil depth was  $450\text{ kcal/m}^2$  and in the greenhouse-PCM- heat pump system  $460\text{ kcal/m}^2$ .

3) In all of the greenhouse heating systems, the difference between the air temperature in greenhouse and the ambient temperature was about  $20\sim 23^\circ\text{C}$  in the daytime. In the greenhouse without heat pump and PCM latent heat storage system the difference between the ambient temperature and the air temperature in the greenhouse was about  $6\sim 7^\circ\text{C}$  in the nighttime, in the greenhouse with only PCM latent heat storage system the temperature difference about  $7\sim 13^\circ\text{C}$  in the nighttime and in the greenhouse with the heat pump and PCM latent heat storage system about  $9\sim 14^\circ\text{C}$  in the nighttime.

**주요용어(Key Words)** : 온실난방(Greenhouse heating), 잠열축열시스템(PCM latent heat storage system), 열펌프(Heat pump), 자연열에너지(Natural thermal energy)

---

This study was conducted by the research fund supported by the Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication in June 2000, reviewed in July 2000, and approved for publication by the editorial board of KSAM in September 2000.

The corresponding author is H. K. Song, Professor, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea. E-mail: <hksong@cbuucc.chungbuk.ac.kr>

### 1. 서 론

1950년대 중반부터 우리 나라에 보급되기 시작한 온실은 1990년대 중반부터 기술 집약적인 기업형 대형시설농업으로 발전하였으며, 우리 나라의 온실규모는 1998년 현재 약 48,600 ha이며, 정부에서 제시한 자료에 의하면 지속적인 증가가 예상된다고 한다. 그러나 겨울철 온실의 온도 조절을 위한 난방에너지로서 화석에너지를 이용하고 있기 때문에 생산비의 증가뿐만 아니라 농촌과 농업환경을 오염시키고 있으며, 생산비중 난방에너지로 투입되는 비용이 지나치게 높은 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 주간 태양에너지를 저장할 수 있는 잠열축열시스템과 연계한 열펌프를 이용하여 온실을 난방함으로써 시설원예작물의 가격경쟁력 제고는 물론, 화석에너지의 이용을 줄임으로써 농촌과 농업환경 보존에 기여할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

### 2. 이론 분석

본 연구에서 구성한 온실난방시스템의 열평형은 다음 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$q''_{solar} + q''_{heat\ pump} = q''_t + q''_r \pm q''_{soil} \pm q''_{PCM} \quad \dots\dots\dots (1)$$

PCM에 저장되는 열량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q''_{PCM} = \left\{ \int_{T_1}^{T_2} m_{PCM} \cdot C_{p, s} \cdot dT + (m_{PCM} \cdot LH_{PCM}) + \int_{T_3}^{T_4} m_{PCM} \cdot C_{p, i} \cdot dT \right\} / \Delta t \cdot A_{ground} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $T_1$ 과  $T_2$ 는 PCM이 고상인 경우 초기 및 최종 시간의 온도이며,  $T_3$ 과  $T_4$ 는 PCM이 액상인 경우의 초기 및 최종 시간의 온도이다.

토양의 층별 온도변화 특성을 고려하여 단위 면

적당, 단위 시간당 토양 중에 저장되는 열량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q''_{soil, layer} = \left( \int_{T_1}^{T_2} m_{soil} \cdot C_{p, soil} \cdot dT \right) / \Delta t \cdot A_{ground} \quad \dots\dots\dots (3)$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 가. 실험장치

그림 1은 전체적인 온실 난방 시스템과 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 온실 내에 4개가 1조인 잠열축열조 cart를 열펌프 앞에 설치하였으며, cart의 후면에는 잠열축열조내의 공기의 유동을 원활히 할 목적으로 송풍팬을 설치하였다. 또한 토조를 설치하여 토양의 온도 및 열적 변화를 측정하였다. 본 실험에 사용된 토양은 사질토양으로 밀도는 1,230 kg/m<sup>3</sup>이며, 비열은 0.974 kJ/kg°C이었다. 표 1은 공시 온실과 온실난방시스템을 구성하고 있는 열펌프와 PCM잠열축열조의 제원, 재료 및 PCM의 열적특성 등을 보여준다.

#### 나. 실험방법

본 연구에 공시한 온실난방실험시스템은 온실, PCM 잠열축열조와 열펌프의 3가지요소로 구성되었으며, 이들 요소들의 난방특성을 분석하기 위하여 단일 온실, 온실-PCM잠열축열조, 온실-PCM

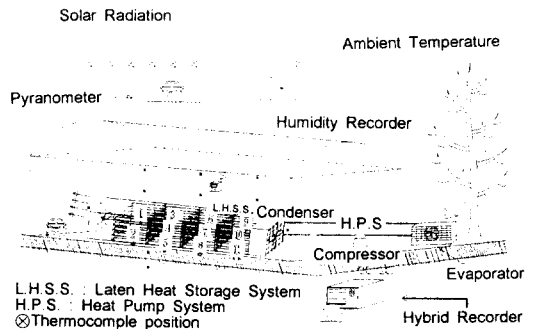


Fig. 1 Experimental equipment of greenhouse heating system.

Table 1 Specifications of greenhouse heating system

Main Parts	Greenhouse	Heat Pump	PCM Storage System
Dimension	Width × Length × Height = 7m × 14m × 3.4m	2.21 kW (Air to Air)	- PCM storage cart: = 700mm(W) × 700mm(D) × 900mm(H) - Carts No. : 4ea - PCM mass : 68ea × 12kg/ea = 816kg
Material and Thermal Properties.	- Vinyl film - Steel pipe $\frac{A_{wall}}{A_{ground}} = 0.65$	Refrigerant 22 - COP = 2~4.0	PCM : Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O PCM container : Al+polyethylene film PCM storage cart : Stainless Phase change temp. of PCM: 18~22℃ Specific heat of solid phase : 2.245kJ/kg℃ Specific heat of liquid phase : 3.06kJ/kg℃ Latent heat : 160.93kJ/kg

Table 2 Combination of experimental variables and measuring items

Measuring Items	Greenhouse Heating Models	Greenhouse Only	Greenhouse - PCM System	Greenhouse - PCM - Heat Pump System
	Ambient temperature	⊙	⊙	⊙
Air temperature in the greenhouse	⊙	⊙	⊙	⊙
Air humidity in the greenhouse	⊙	⊙	⊙	⊙
Inlet and outlet air temperature of PCM heat storage system	×	⊙	⊙	⊙
Inlet and outlet air temperature of heat pump condenser	×	×	×	⊙
Energy consumption of heat pump	×	×	×	⊙
Temperature of soil bath	⊙	⊙	⊙	⊙
Data acquisition interval(min)		30	30	30

잠열축열조 - 열펌프의 3가지 조합으로 구성하여 오전 9시에서 다음 날 오전 9시까지 1가지 조합에 대하여 실험을 행한 후, 이것을 다시 1회 더 행한 후 다른 조합의 실험을 행하는 것으로 하였으며, 이때의 측정항목은 표 2와 같다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 잠열축열재의 열적 분석

##### (1) 열펌프를 가동하지 않는 경우 잠열축열재의 온도 변화

그림 2는 열펌프를 작동시키지 않은 경우에 잠열축열재의 온도 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 최대 태양강도가 452.83 W/m<sup>2</sup>로서 태양강도가 높음에도 불구하고 잠열은 도구간

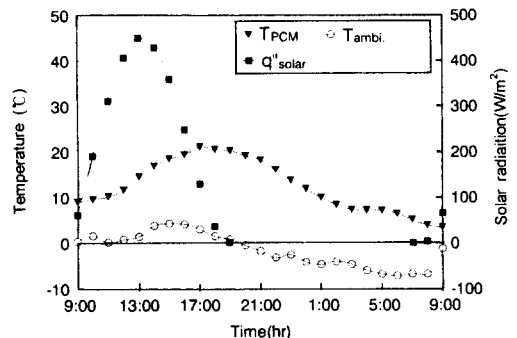


Fig. 2 The temperature variation of PCM in the greenhouse without heat pump operation.

이 18~22℃인 잠열축열재임에도 불구하고 이 온도구간에서 잠열구간을 보이지 않고 있다. 이것으로 잠열축재가 충분히 녹아 있지 않음을 볼 수 있

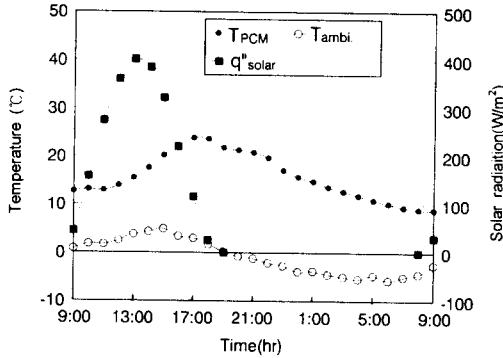


Fig. 3 The temperature variation of PCM in the latent heat storage system in case of heat pump operation in the greenhouse.

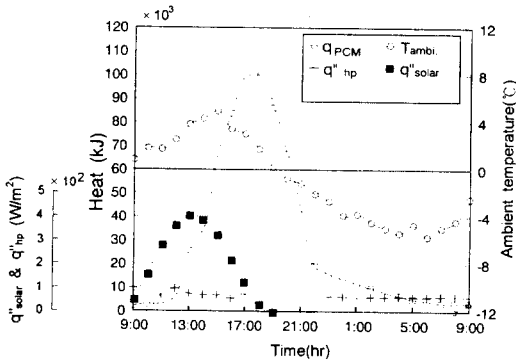


Fig. 4 The variation of heat stored in PCM latent heat storage unit with time in case of heat pump operation in the greenhouse.

으며, 17시에 22°C 수준이었다. 이 결과는 태양에너지에만으로는 PCM 잠열축열조 내에 충분한 열에너지 저장이 어려움을 시사하는 것으로 주간에도 열펌프를 가동시켜 충분한 열을 저장하였다가 야간이나 태양강도가 낮은 주간에 저장된 에너지를 사용하여야 할 것으로 사료된다.

(2) 열펌프를 가동시킬 때의 잠열축열조 내의 온도 변화

그림 3은 열펌프를 가동시킨 경우 잠열축열재의 온도 변화이다. 잠열축열재의 온도는 태양 강도 276.2W/m<sup>2</sup>인 11시부터 상승하기 시작하였으며, 17시에 21.1°C로 가장 높았으며 그 이후로 온도가 서서히 떨어지고 있어 열이 방출되고 있음을 알

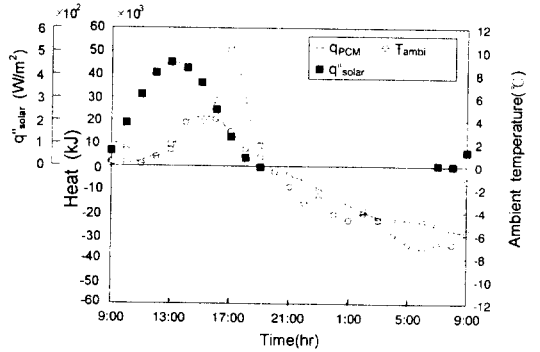


Fig. 5 The variation of heat stored in PCM latent heat storage with time without heat pump in the greenhouse.

수 있다. 이는 잠열축열조에 축열된 열을 방출하여 온실을 난방하므로써 일어나는 현상이며, 21°C 수준에서 잠열구간이 발생하므로 잠열재가 충분히 녹아 있었음을 알 수 있으며, 이날의 최대 태양강도가 406.39 W/m<sup>2</sup>이었다.

(3) 열펌프가 가동하는 경우 잠열축열재의 축열량 변화

그림 4는 열펌프를 가동시킨 경우 1일간 잠열축열재에 저장된 열을 적산한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 9시부터 18시까지 100,320 kJ이 축열되었으며, 그 이후부터 다음날 9시까지 973,940 kJ이 방열되어 온실을 난방하는데 이용되었으며, 18시에서 22시까지 열펌프의 가동을 중지하여 잠열축열재가 충분히 방열할 수 있도록 하였으며, 2,926 kJ의 잉여에너지가 발생하였다. 축열되는 기간중 외기온은 1~5°C이었으며 방열되는 기간중 외기온은 -6~2°C이었다.

(4) 열펌프를 가동하지 않는 경우 잠열축열재의 축열량 변화

그림 5는 열펌프를 가동하지 않은 경우의 잠열축열재에 하루동안 누적된 열량을 나타낸 그림이다. 축열과 방열시간은 열펌프를 가동한 경우와 동일하며, 최대 누적열량은 52,250 kJ로서 열펌프를 가동한 경우의 절반정도의 수준이었다. 또한 이 그림에서 21시 이후에는 축열된 열량이 모두 소진되어 이전에 축열된 열량까지도 방출하는 현상을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 축열량이 적기 때문이기도 하지만 방열시간동안 외기온이 3°C

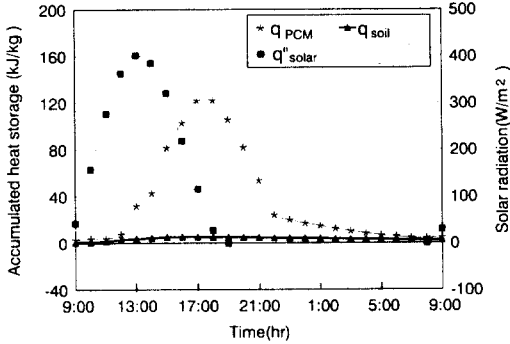


Fig. 6 The variation of heat stored in soil layers (from surface to 30 cm depth) in the case of the heat pump and PCM storage system in the greenhouse.

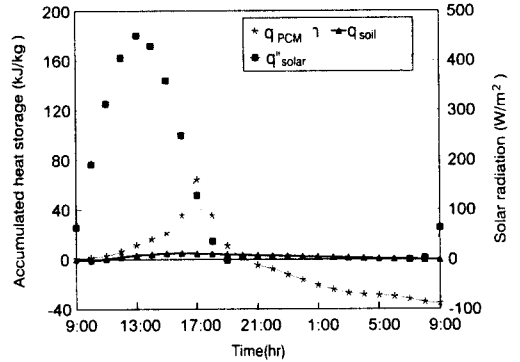


Fig. 7 The variation of heat stored in soil layers (from surface to 30 cm depth) in the greenhouse with PCM storage system.

에서  $-7^{\circ}\text{C}$  까지 급격히 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

나. 온실내 토양 축열량 분석

(1) 온실-열펌프-PCM의 복합난방 시스템의 경우 온실내 토양 축열특성 분석

온실 피부를 통한 태양복사열에너지는 온실 내의 모든 물체에 축열된다. 그 중 토양은 태양복사열을 직접 접하게 되고, 이때 토양 내에 저장되는 열량은 그림 6에서 보는 바와 같으며, 이 그림에서 삼각형으로 나타낸 곡선은 토양의 표면에서 30 cm 깊이까지의 토양층 축열량 및 방열량의 누적치를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 토양에 저장된 최대 누적열량은  $5.434 \text{ kJ/kg}$ 이며, 이때 태양강도는 13시에  $406.39 \text{ W/m}^2$ 로 최대 값을 보였다. 다음날 8시까지  $2.215 \text{ kJ/kg}$ 의 열량이 남아 있는 것으로 나타났으며, PCM 잠열축열조 내에 저장된 누적열량은 17시 30분에  $123.31 \text{ kJ/kg}$ 으로 최대 값을 나타냄으로서 토양에 저장된 누적열량보다 22.7배 큰 값을 보였다. 이 결과는 PCM 잠열축열조의 개발이용이 온실난방을 위하여 바람직한 축열시스템임을 시사해 주었다.

(2) PCM-온실 시스템의 경우 온실내 토양 축열특성 분석

그림 7은 토양표면에서 30 cm 깊이까지의 단위 질량당 토양에 저장된 누적열량을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 9시부터 16시까지 누

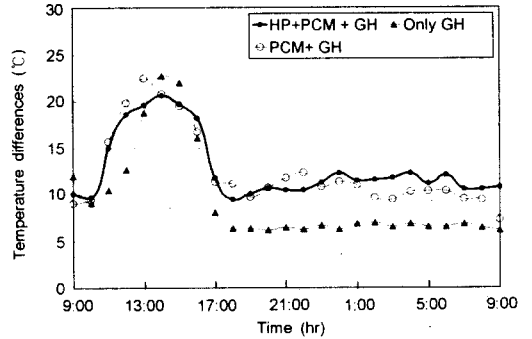


Fig. 8 The variation of the temperature differences between the greenhouse air temperature and ambient temperature for greenhouse heating systems.

적열량은  $5.016 \text{ kJ/kg}$ 이었으며, 16시부터 방열을 시작하여 다음날 8시까지 토양에 축열되는 모든 열이 온실난방에 쓰여짐을 볼 수 있다. 이 그림에서는 축열과 방열이 거의 같은 축, 방열의 평형상태를 보여주고 있다. 잠열축열조에 비하여 토양내 축열은 작지만 토양도 축열재의 역할을 하고 있다는 것을 잘 보여주고 있다.

다. 그린하우스내 온도특성 분석

그림 8은 각각의 온실난방 시스템에서 실내온도와 외기온과의 온도차를 분석한 것으로서 그린하우스 난방특성을 나타내고 있다. 열펌프와 잠열축열재가 없는 온실의 경우, 주간에는 외기온과 실

온차가 9.5~23℃, 야간에는 6~7℃이었고, PCM만을 가동한 경우, 주간에는 외기온과 실온과의 차가 9~23℃, 야간에는 7~13.5℃이었으며, 열펌프와 PCM을 동시에 가동한 경우에는 주간에는 외기온과 실온차가 9~20℃, 야간에는 9~14℃였다. 열펌프와 PCM을 동시에 가동한 경우, 주간에는 다른 경우보다 실온이 낮고 야간에는 다른 경우보다 실온이 높은 것은 주간에는 잉여 열에너지가 PCM 축열조에 많이 저장되고 야간에는 이 열이 온실난방을 위하여 다른 경우보다 많이 방출되기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로 보아 보다 효율적인 온실난방을 위해서는 열공급과 동시에 축열시스템을 겸용하여야 함을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

자연에너지를 온실 난방에 이용하기 위하여 PCM 잠열축열시스템과 대기중의 저온 열에너지를 열원으로 하는 열펌프를 연계한 시스템을 구성하고 PCM과 토양축열에 의한 온실난방 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 열펌프를 가동한 경우, 최대 태양강도 406.39 W/m<sup>2</sup>인 수준에서 PCM 축열조 내에 축열매체로 사용한 잠열축열재(상변화온도: 18~22℃) 온도가 24℃까지 상승하였으며, 축열량은 122.934 kJ/kg이었고, 열펌프를 가동하지 않은 경우, 최대 태양강도 452.83 W/m<sup>2</sup>인 수준에서 잠열재는 22℃까지 가열되어, PCM 축열조에 저장된 열량은 64.04 kJ/kg이었다.

2) 토양의 표면에서 30 cm 깊이까지의 누적열량은 잠열 축열 시스템을 가동한 경우, 최대 태양강도 452.83 W/m<sup>2</sup>인 수준에서 5.016 kJ/kg이었으며, 잠열 축열 시스템과 열펌프를 동시에 가동한 경우 최대 태양 강도 406.39 W/m<sup>2</sup> 수준에서는 5.434 kJ/kg이었다.

3) 온실자체만으로 보온하는 경우, 주간에는 외기온과 실온과의 차가 9.5~23℃, 야간에는 6~7℃를 보였으며, PCM 축열조를 가동하는 경우, 주간에는 외기온과 실온과의 차가 9~23℃, 야간에는 7~13.5℃이었고, 열펌프와 PCM 축열조를 동시에 가동한 경우에는 주간에는 외기온과 실온과의 차가 9~20℃, 야간에는 9~14℃였다. 이와 같은 결과에서 온실 난방은 가열장치 뿐만 아니라 축열장치를 사용하는 것이 바람직한 것임을 알 수 있었다.

## Nomenclature

$A_{ground}$  : Area of greenhouse floor(m<sup>2</sup>)

$A_{wall}$  : Surface area of greenhouse(m<sup>2</sup>)

$C_p$  = Specific heat at constant pressure (kJ/kg · °C)

$LH_{PCM}$  = Latent heat of PCM (kJ/kg)

$m_{soil}$  = Mass of soil layer per unit area(kg/m<sup>2</sup>)

$m_{PCM}$  = Mass of PCM per unit area (kg/m<sup>2</sup>)

$q''_t$  = Heat loss through the greenhouse cover (W/m<sup>2</sup>)

$q''_v$  = The ventilation heat loss of the greenhouse(W/m<sup>2</sup>)

$q''_{heat\ pump}$  = Heat gained from heat pump (W/m<sup>2</sup>)

$q''_{PCM}$  = Heat stored in PCM(W/m<sup>2</sup>)

$q''_{soil}$  = Heat stored in soil(W/m<sup>2</sup>)

$q''_{solar}$  = Solar radiation(W/m<sup>2</sup>)

$dT$  = Temperature difference(°C)

$dt$  = Time interval(hr)

## 참 고 문 헌

1. Yang. Y. S etc 5. 1996. "Energy Modeling for the Glasshouse". Journal of The Korean Solar Energy Society. Vol. 16, No. 3. (in Korean)
2. Kim. Y. H. 1990. "Development of Thermal Storage System in Plastic Greenhouse". Paper of Doctor, Seoul Nat. Uni. (in Korean)
3. Ryou. Y. S. 1992. "Development of Solar Energy-Latent Heat Storage System for Greenhouse Heating". Paper of Doctor, Chung buk Nat. Uni. (in Korean)
4. Song. H. K. 1995. "Development of Greenhouse System Using Natural Energy Resources.", Report of Ministry of Agriculture and Forestry. (in Korean)