

열펌프-잠열축열 시스템의 온실 난방 특성 연구

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

강 연구**

송 현 갑*

정회원

정회원

Y.K.Kang

H.K.Song

1. 서론

1950년대 중반부터 우리 나라에 보급되기 시작한 온실은 1990년대 중반부터 기술 집약적인 기업형 대형시설농업으로 발전하였다. 그런데 겨울철 온실의 열 환경 조절을 위한 난방에너지로서 화석에너지를 이용하고 있기 때문에 생산비의 증가뿐만 아니라, 농촌과 농업환경을 오염시키고 있다.

우리 나라의 온실규모는 1998년 현재 약 48,600ha이며, 정부에서 제시한 자료에 의하면 지속적인 증가가 예상된다고 하였다.

그런데 지금까지 나타나고 있는 시설농업의 어려움은 생산원가가 높고, 연간 생산비중 난방에너지로 투입되는 비용이 지나치게 높다는 점이다.

그러므로, 본 연구에서는 주간의 태양에너지를 저장할 수 있는 잠열축열시스템과 연계한 열펌프를 이용하여 온실을 난방하므로써 시설원예작물의 가격경쟁력제고는 물론, 화석에너지의 이용을 줄임으로써 농촌과 농업환경보존에 기여할 수 있는 기초자료를 제공하려 하였다.

2. 이론분석

본 연구에서 구성한 온실난방시스템의 열평형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{q}_{solar} + \dot{q}_{heat\ pump} = \dot{q}_t + \dot{q}_v \pm \dot{q}_{soil} \pm \dot{q}_{crop} \pm \dot{q}_{air} \pm \dot{q}_{PCM} \quad \text{-----}(1)$$

PCM에 저장되는 열량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q}_{PCM} = \left\{ \int_{T_1}^{T_2} m_{PCM} \cdot C_{p, s} \cdot dT + (m_{PCM} \cdot LH_{PCM}) + \int_{T_3}^{T_4} m_{PCM} \cdot C_{p, l} \cdot dT \right\} / dt \quad \text{-----}(2)$$

토양의 층별 온도 변화 특성을 고려하여 단위 면적당, 단위 시간당 토양 중에 저장되는 열량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{q}_{soil, layer} = \left(\int_{T_1}^{T_2} m_{soil} \cdot C_{p, soil} \cdot dT \right) / dt \quad \text{-----}(3)$$

* 충북대학교 농업기계공학과

** 충북대학교 농업기계공학과 대학원

† 본 연구는 농림부지원에 의하여 수행되었음.

Nomenclature

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

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

m_{soil} = Heating mass of soil layer per unit area(kg/m²)

m_{PCM} = Melting mass of PCM per unit area (kg/m²)

\dot{q}_t = Heat loss through the greenhouse cover (kcal/m² · hr)

\dot{q}_v = The ventilation heat loss of the greenhouse(kcal/m² · hr)

$\dot{q}_{heat\ pump}$ = Heat gained from heat pump(kcal/m² · hr)

\dot{q}_{air} = Heat stored in the air (kcal/m² · hr)

\dot{q}_{PCM} = Heat stored in PCM(kcal/m² · hr), \dot{q}_{soil} = Heat stored in soil(kcal/m² · hr)

\dot{q}_{crop} = Heat stored in crop (kcal/m² · hr), \dot{q}_{solar} = Solar radiation(kcal/m² · hr)

dT = Temperature difference(°C) , dt = Time interval(hr)

3. 실험장치 및 방법

가. 실험장치

그림 1은 전체적인 온실 난방 시스템과 실험장치의 구성을 보여주고 있다.

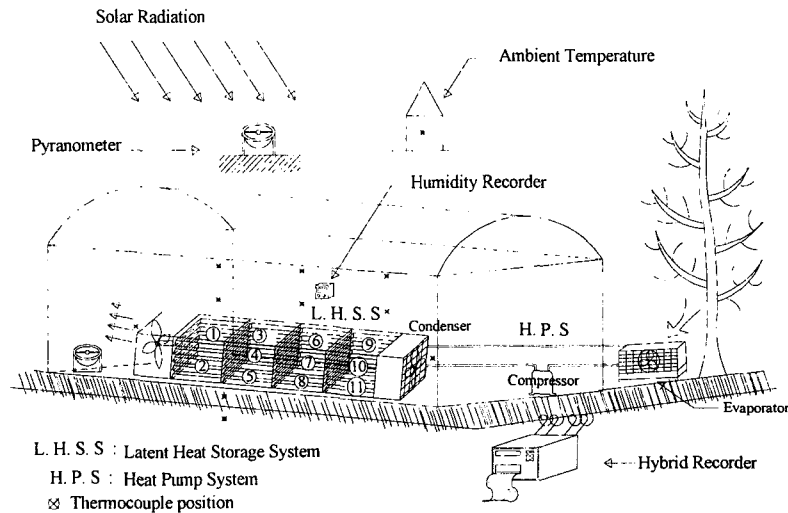


Fig. 1. Experimental equipment of greenhouse heating system.

표 1은 온실난방시스템을 구성하고 있는 온실, 열펌프 그리고 PCM잠열축열조의 치수 및 재료와 열적특성을 보여준다.

Table 1. Dimensions of greenhouse heating system.

| Main parts | Greenhouse | Heat Pump | PCM storage system |
|------------|---|---------------------|--|
| Dimension | Width×Length×Height = 7m×14m×3.4m $\frac{A_{Wall}}{A_g} = 0.65$ | 3Ps (Air to Air) | - PCM storage cart: Width×Depth× Height =700mm×700mm× 900mm - Total carts : 4EA - PCM mass : 68EA×12kg/bag = 816kg |
| Material | - Vinyl film - Steel pipe | R22 | PCM container : Al+polyethylene film PCM storage cart : Stainless PCM : Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O |

나. 실험방법

본 연구의 온실 난방 실험 시스템은 온실, PCM잠열축열조와 열펌프의 3가지요소로 구성되었으며, 이들 요소들의 난방특성을 분석하기 위하여 단일 온실, 온실-PCM잠열축열조, 온실-PCM-열펌프의 3가지 조합으로 구성하여 실험하였다.

Table 2. Combination of experimental variables and measuring items.

| Greenhouse heating models Measuring items | Greenhouse only | Greenhouse - PCM System | Greenhouse - PCM - Heat Pump System |
|---|-----------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Ambient Temperature | ◎ | ◎ | ◎ |
| Air Temperature in the Greenhouse | ◎ | ◎ | ◎ |
| Air Humidity in the Greenhouse | ◎ | ◎ | ◎ |
| Floor Temperature in the Greenhouse | ◎ | ◎ | ◎ |
| Inlet and Outlet temperature of PCM heat Storage System | × | ◎ | ◎ |
| Inlet and Outlet Temperature of Heat Pump Condenser | × | × | ◎ |
| Power Consumption of Heat Pump | × | × | ◎ |
| Temperature of soil bath | ◎ | ◎ | ◎ |
| Data Acquisition Interval(min) | 30 | 30 | 30 |

◎ : 측정된 경우, × : 측정하지 않은 경우

4. 결과 및 고찰

가. 잠열축열재의 열적분석

(1) 열펌프가 가동하는 경우 잠열축열재의 축열량변화

그림 2는 열펌프를 가동하는 경우 1일간 잠열축열장치내에 저장된 열을 적산한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 9시부터 18시까지 24,000kcal가 축열되었으며, 다음날 9시까지 23,300 kcal가 방열되어 온실을 난방하는데 이용된 것으로, 700kcal의 잉여에너지가 발생하였다. 축열되는 기

간중 외기온은 1~5°C이었으며 방열되는 기간중 외기온은 -6~2°C이었다.

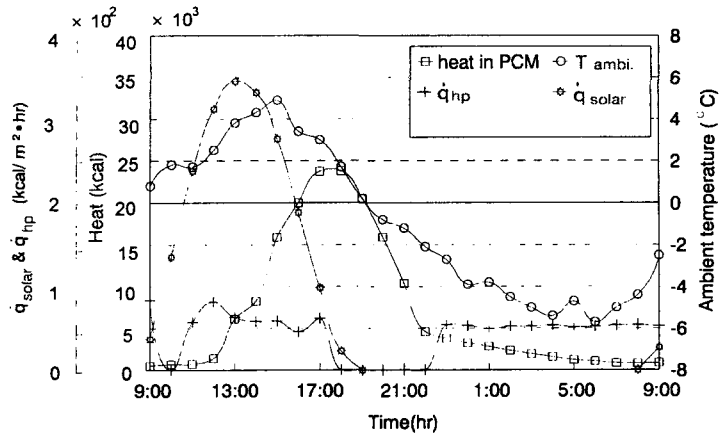


Fig. 2. The variation of heat stored in PCM latent heat storage unit with time in case of heat pump operation in the greenhouse.

(2) 열펌프를 가동하지 않는 경우 잠열축열재의 축열량 변화

그림 3은 열펌프를 가동하지 않은 경우의 PCM 잠열축열조내에 하루동안 누적된 열량을 나타낸 그림이다. 축열과 방열시간은 열펌프를 가동한 경우와 동일하며, 최대 누적열량은 12,500kcal로서 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°C에서 -7°C까지 급격히 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

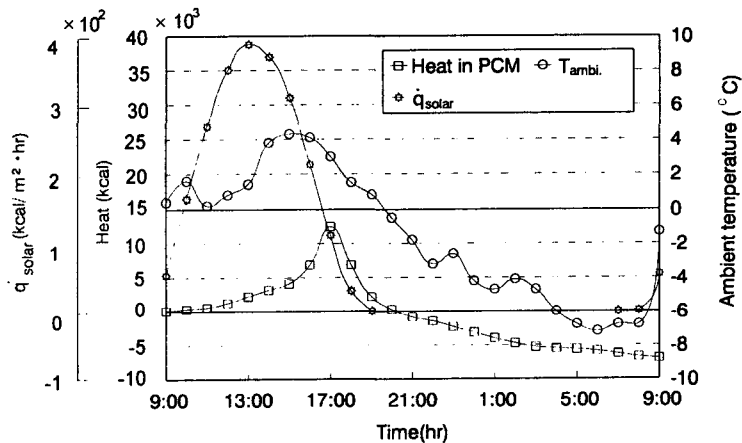


Fig. 3. The variation of heat stored in PCM latent heat storage with time without case of heat pump in the greenhouse.

나. 온실내 토양 축열량 분석

본 실험에 사용된 토양은 사질토양으로 밀도는 $1,230\text{kg/m}^3$ 이며, 비열은 $0.233\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ 이었다.

(1) PCM - 온실 시스템의 경우 온실내 토양 축열특성분석

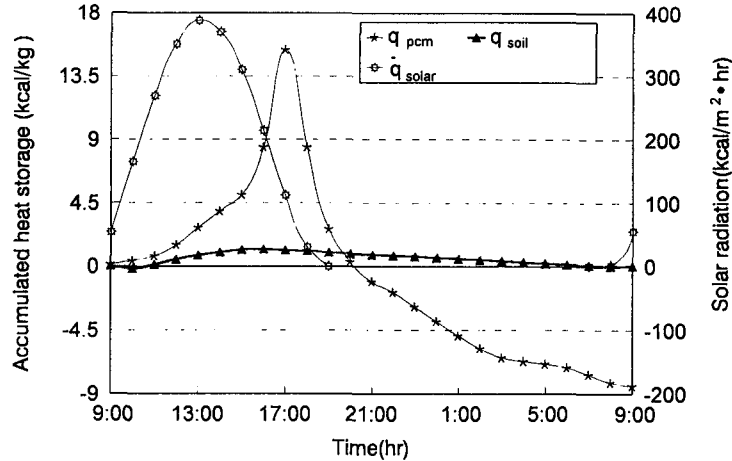


Fig. 4. The variation of accumulated heat storage in soil layers (from surface to 30cm depth) in the greenhouse with PCM storage system.

그림 4는 토양표면에서 30cm깊이까지의 단위 질량당 토양의 누적열량을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 9시부터 16시까지 누적열량은 1.2kcal/kg 이었으며, 16시부터 방열을 시작하여 다음날 8시까지 토양에 축열되는 모든 열을 온실난방에 쓰여짐을 볼 수 있다. 이 그림에서는 축열과 방열이 거의 같은, 축, 방열의 평형상태를 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 열펌프와 잠열 축열조를 사용하지 않은 온실 시스템보다 개선되었음을 단적으로 보여주고 있다. 잠열축열조에 비하여 토조내 축열은 작지만 토양도 축열재의 역할을 하고 있다는 것을 잘 보여주고 있다.

(2) 온실-열펌프 - PCM의 복합난방 시스템의 경우 온실내 토양 축열특성분석

온실 피복을 통한 태양복사열에너지는 온실 내 모든 물체에 축열된다. 그 중 토양은 태양복사열을 직접 접하게 되며 이때 토양내에 저장되는 열량은 그림 5에서 보는 바와 같으며, 이 그림에서 삼각형으로 나타낸 곡선은 토양의 표면에서 30cm 깊이까지의 토양 층에 축열 및 방열량의 누적치를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 토양에 저장된 최대 누적열량은 1.3kcal/kg 이며, 이때 태양강도는 13시에 $350\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 최대 값을 보였다. 다음날 8시까지 0.53kcal/kg 의 열량이 남아있는 것으로 나타났으며, PCM잠열축열조내에 저장된 누적열량은 17시 30분에 최대치 29.5kcal/kg 을 나타냄으로서 토양에 저장된 누적열량보다 22.7배의 큰 값을 보였다. 이 결과는 PCM잠열축조의 개발이용이 온실난방을 위하여 바람직한 축열시스템임을 시사해주었다.

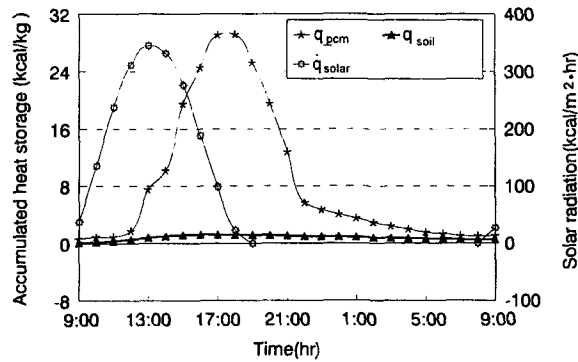


Fig. 5. The variation of accumulated heat storage in soil layers (from surface to 30 cm of depth) in the case of the heat pump and PCM storage system in the greenhouse.

다. 그린하우스내 온도특성분석

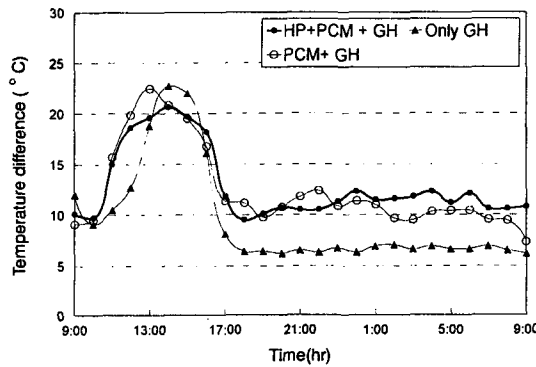


Fig. 6. The variation of the temperature differences between the greenhouse air temperature and ambient temperature in accordance with the greenhouse heating systems.

그림 6은 각각의 온실난방 시스템에 대하여 실내온도와 외기온과의 온도차이로 그린하우스 난방 온도특성을 나타내고 있다. 열펌프와 잠열축열재가 없는 온실만으로 된 경우, 주간에는 외기온과 실온차가 9.5~23°C, 야간에는 6~7°C이었고, PCM만을 가동한 경우, 주간에는 외기온과 실온과의 차가 9~23°C, 야간에는 7~13.5°C이었고, 열펌프와 PCM을 동시에 가동한 경우에는 주간에는 외기온과 실온차가 9~20°C, 야간에는 9~14°C였다. 열펌프와 PCM을 동시에 가동한 경우, 주간에는 다른 경우보다 실온이 낮고 야간에는 다른 경우보다 실온이 높은 것은 주간에는 잉여 열에너지가 PCM축열조에 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 PCM잠열축열시스템과 대기중의 저온열에너지를 열원으로하는 열펌프를 연계한 시스템을 구성하고 PCM과 토양축열에 의한 온실난방특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 열펌프를 가동한 경우, 최대 태양강도 $350 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ 인 수준에서 PCM 축열조내에 축열매체로 사용한 잠열축열재 (상변화온도: $18\sim 22^\circ\text{C}$)온도가 28°C 까지 상승하였으며, 축열량은 29.41 kcal/kg 였고, 열펌프를 가동하지 않은 경우, 최대 태양강도 $390 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ 인 수준에서 잠열재는 22°C 까지 가열되어, PCM 축열조에 저장된 열량은 15.32 kcal/kg 이었다.
- 2) 토양의 표면에서 30cm깊이까지의 누적열량은 잠열 축열 시스템을 가동한 경우, 최대 태양 강도 $390 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ 인 수준에서 1.2 kcal/kg 이었으며, 잠열 축열 시스템과 열펌프를 동시에 가동한 경우 최대 태양 강도 $350 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ 수준에서는 1.3 kcal/kg 이었다.
- 3) 온실자체만으로 보온하는 경우, 주간에는 외기온과 실온과의 차가 $9.5\sim 23^\circ\text{C}$, 야간에는 $6\sim 7^\circ\text{C}$ 를 보였으며, PCM축열조를 가동하는 경우, 주간에는 외기온과 실온과의 차가 $9\sim 23^\circ\text{C}$, 야간에는 $7\sim 13.5^\circ\text{C}$ 였고, 열펌프와 PCM축열조를 동시에 가동한 경우에는 주간에는 외기온과 실온과의 차가 $9\sim 20^\circ\text{C}$, 야간에는 $9\sim 14^\circ\text{C}$ 였다. 이와 같은 결과에서 온실난방은 가열장치뿐만 아니라 축열장치를 사용하는 것이 바람직한 것임을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

1. 양운섭, 백남춘, 송인춘, 손창욱. 1996. “온실의 에너지 모델링”. 한국태양에너지. 제16권, 제3호.
2. 김용현. 1990. “플라스틱온실의 열저장 시스템 개발에 관한 연구”. 서울대학교 박사논문.
3. 유영선. 1992. “그린하우스보온을 위한 태양에너지-잠열축열 시스템의 개발”. 충북대학교 박사논문.
4. 송현갑. 1995. “ 자연에너지를 이용한 온실난방 시스템 개발”, 농림수산부 연차보고서.