

그린하우스 난방을 위한 열펌프 - 잠열축열 시스템 연구⁺

A Study on the Heat pump-Latent Heat Storage System for the Greenhouse Heating

송현갑*	노정근**	박종길**	강연구**	김현철**
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
H. K. Song*	J. G. Ro**	J. K. Park**	Y. K. Kang**	H. C. Kim**

ABSTRACT

It is desirable to use the renewable energy for the greenhouse heating in winter season, it make possible not only to save fossil fuel and conserve green environment but also to promote the quality of agricultural products and reduce the agricultural production cost.

In this study the heat pump - PCM latent heat storage system has been developed to use the natural energy as much as possible for the thermal environment control of greenhouse.

The coefficient of performance (COP) of the heat pump system was 3~4 with the ambient temperature ranging from 8°C to -8°C, and greenhouse heating effect of the heat pump - PCM latent heat storage system on the basis of the ambient temperature was about 12~15°C.

주요용어(Key Words): greenhouse, heat pump, latent heat, natural energy

1. 서 론

우리나라 겨울철 시설 농업에 필요한 평균 난방 열량은 약 100 kcal/hr · m²으로 1,650m²의 시설 농업을 하는 경우 난방 열량이 150,000 kcal/hr로서 겨울철 그린하우스 재배기간을 5개월로 할 경우 1,650m²에 소요되는 열량을 석유로 환산하면 약 40,000ℓ 해당되며, 요즈음 석유 가격으로 환산하면 약 12,000천 원이 소요된다. 뿐만 아니라, 자연에너지가 아닌 화석에너지로 농사를 하게 됨에 따라 농업의 자연친화적인 본래의 모습을 일그러지게 하고 있다.

그래서 본 연구에서는 겨울철 그린하우스 난방을 가능한 한 자연에너지에 많이 의존하고, 반면에 화석에너지 의존도를 될 수 있는대로 줄이기 위하여 주열원으로 성능계수가 3이상 되는 열펌프와 열에너지 저장능력이 큰 잠열축열재를 이용한 그린하우스 난방시스템 개발연구를 수행하였다.

2. 그린하우스 난방시스템의 열 평형

그림 1에서 보는 바와 같이 태양 복사에너지와 열펌프로부터 얻은 열에너지는 그린하우스 난방을 위

⁺ 본 연구는 '95년도 농수산 현장애로 기술개발사업 연구비로 수행되었음.

* 충북대학교 농업기계공학과

** 충북대학교 대학원 농업기계공학과

한 열원이며, 이 열원은 그린하우스내 공기, 토양, 작물과 상변화 잠열축열조(PCM storage unit)에 저장되고, 나머지 열은 그린하우스 필름을 통하여 손실된다.

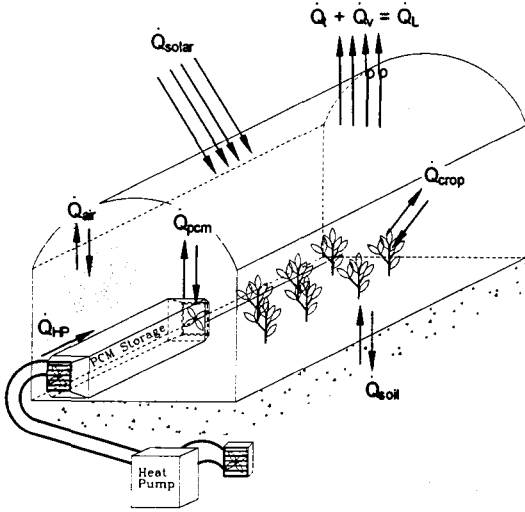


Fig. 1 Energy balance model in the greenhouse heating system equipped with PCM storage unit and the heat pump.

이와 같은 열흐름 평형을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{solar} + \dot{Q}_{heat\ pump} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{soil} + \dot{Q}_{crop} + \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{PCM} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{solar} &= \tau \times I_s \times A_g \\ \dot{Q}_{heat\ pump} &= COP \times \text{Electronic power consumption} \\ \dot{Q}_l &= A_g \cdot h_l (1-f_r) (T_{in} - T_{ambi}) \\ \dot{Q}_v &= A_g \cdot h_v (T_{in} - T_{ambi}) \\ \dot{Q}_{soil} &= \alpha_{soil} \times A_g \times R_g \times \tau \times I_s \\ &= \sum_{i=1}^n m_{soil,i} C_{p,soil} \frac{\Delta T_i}{\Delta \tau} \\ R_g &= \left(\frac{A_g - A_{crop}}{A_g} \right) \\ \dot{Q}_{crop} &= R_{crop} \times \alpha_{crop} \times \tau \times I_s \\ &= (1 - R_g) \times \alpha_{crop} \times \tau \times I_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air} &= (h_a + x \cdot h_v) \times \dot{m}_{air} \\ &= \{C_p t + x (LH + C_v t)\} \times \dot{m}_{air} \\ &= \{C_p t + 0.6220 \frac{p_v}{p_a} (LH + C_v t)\} \times \dot{m}_{air} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{pcm} = \frac{1}{\Delta \tau} \{m_{pcm, solid} \times C_{p, solid} \times (T_s - T_i) + LH_{pcm} \times m_{pcm} + m_{pcm, liquid} \times C_{p, liquid} \times (T_i - T_i)\}$$

- 열펌프의 성능계수 (COP)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} COP &= \frac{\dot{m}_{r,e} (h_2 - h_3) \cdot \eta_{motor}}{\dot{m}_{r,e} (h_2 - h_1)} \\ &= \frac{\dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{w,out} - T_{w,in}) \cdot \eta_{motor}}{\dot{m}_{r,e} (h_2 - h_1)} \\ &= \frac{\dot{m}_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{w,out} - T_{w,in})}{(h_2 - h_1) \cdot \left(\frac{\eta_{s,comp}}{60V_c} \right) \cdot \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \cdot D_p \cdot Z_p \cdot \frac{\eta_v}{\eta_{comp} \eta_{me}}} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

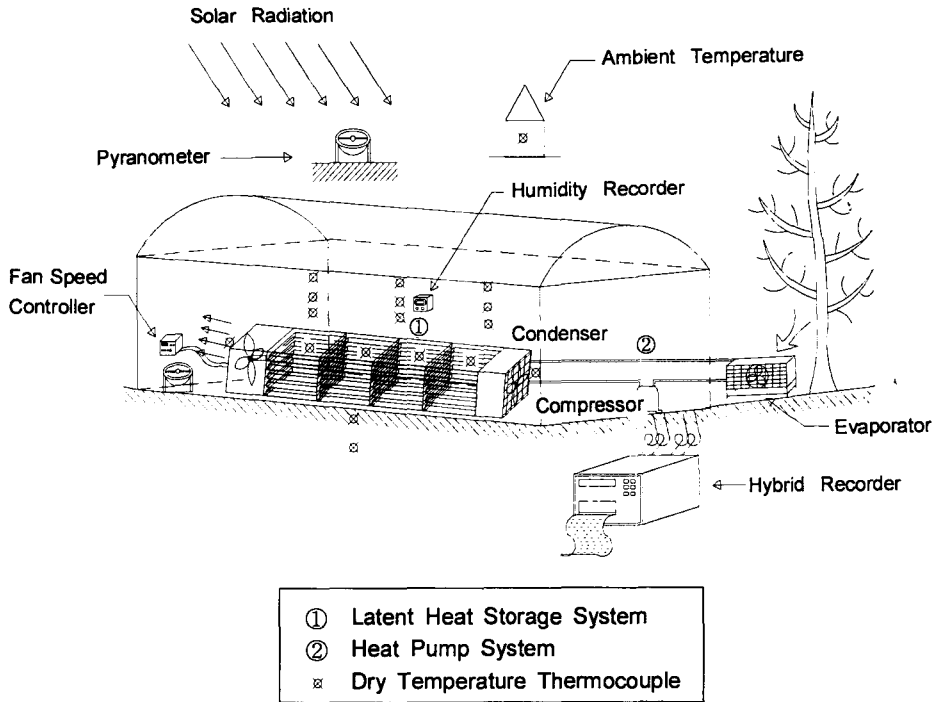
3. 재료 및 방법

가. 실험 장치

그린하우스 효과(Greenhouse effect)를 이용하여 집열된 잉여 태양에너지를 축열용량(35~40 kcal/kg)이 큰 PCM에 축열하여 그 에너지를 태양강도가 충분하지 못한 경우에 그린하우스 난방에 사용하고, 태양에너지의 절대량이 부족한 경우에는 열펌프로 난방열을 공급할 수 있도록 하기 위하여 그림 2와 같은 그린하우스 난방 시스템과 실험장치를 구성하였으며, 그 상세한 치수는 표 1과 같다.

그린하우스내에 설치한 열펌프회로의 p-h선도는 그림 3(a)와 같고, 열펌프의 외형은 그림 3(b)와 같다.

그림 2에서 보는 바와 같이 그린하우스 내·외기온과 PCM 축열조내 온도변화 그리고 토양온도를 측정하기 위하여 26개의 열전대를 설치하여 온도기록계에 기록되도록 하였으며, 1개의 온습도계를 설



Bemark : Automatic control system was involved between ① and ②

Fig. 2 Greenhouse heating system and the experimental equipment.

Table 1 Dimensions of greenhouse heating system and the thermal properties

Main parts	Dimension	Material	Thermal properties
Greenhouse	7,000mm (W) × 14,000mm (L) × 3,400mm (H)	- P. E. film - Steel pipe	$\frac{A_g}{A_{wall}} = 0.65$ where A_{wall} : greenhouse cover area A_g : floor area
Heat pump (air to air)	Compressor : 3PS Evaporator : forced type for 3PS Condenser : air heating type for 3PS	R_{22} { Boiling point : 232.4 K Latent heat of evaporation : 205 kJ/kg	- COP = 2~4.5 - Heated air Temperature = 35~50°C
PCM storage system	- PCM storage cart: = 700mm (W) × 700mm (L) × 900mm (H) - Total carts : 4EA - PCM mass : 68 EA × 12 kg/bag = 816 kg Power of fan motor : 0.25kW	- Al + polyethylene film - Stainless - Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	- Latent heat = 38.5 kcal/kg - Phase change Temperature = 18~22°C - Available phase change cycle = 1,500~2,000

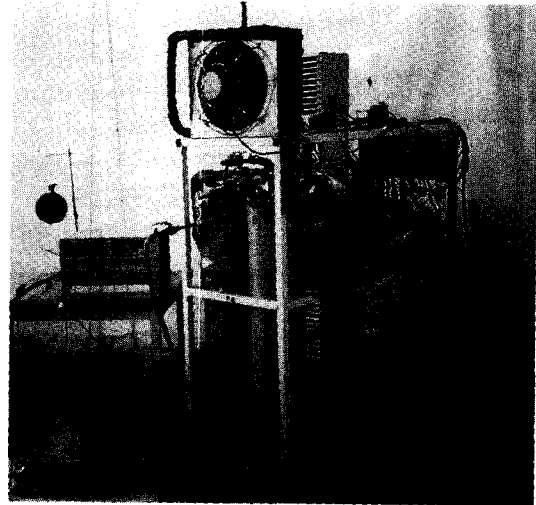
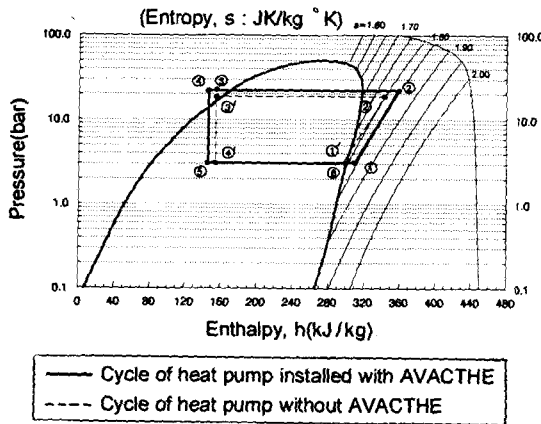


Fig. 3(a) The p-h diagram of heat pump composed in this study.

Fig. 3(b) Photo of heat pump.

치하여 실내 습공기의 엔탈피(enthalpy)를 분석할 수 있게 하였다.

또한 그린하우스 안과 밖에 1개씩 2개의 일사계를 설치하여 그린하우스 내외의 태양강도를 측정하였

으며 그린하우스 피복재의 태양열 투과율을 분석할 수 있도록 하였고, 토양온도를 측정하여 지중 축열량을 분석할 수 있도록 하였다.

Table 2 Combination of four types of greenhouse heating systems composed of 3 main parts and the measuring items

Greenhouse heating models	Solar greenhouse	Solar greenhouse-PCM heat storage system	Solar greenhouse-heat pump system	Solar greenhouse-PCM heat storage-heat pump system
Measuring items				
Ambient temp.	○	○	○	○
Air temp. in the greenhouse	○	○	○	○
Air humidity in the greenhouse	○	○	○	○
Floor temp. in the greenhouse	○	○	○	○
Solar energy flux	○	○	○	○
Inlet and outlet temp. of PCM heat storage system	×	○	×	○
Inlet and outlet temp. of heat pump condenser	×	×	○	○
Air flow rate of heat pump condenser and the PCM storage system	×	○	○	○
Power consumption of heat pump	×	×	○	○
Data acquisition interval (min)	30	30	30	30

* ○ : Remark of measuring cases
 × : Remark of no measuring cases

나. 실험 방법

실험장치 구성에서 보여준 바와 같이 본 연구의 그린하우스 난방 시스템은 3개의 주요 단위요소로 구성되어 있으며, 이들 3개의 단위요소는 4개의 난방 시스템으로 조합된다.

이와 같이 구성되는 4가지 형태의 그린하우스 난방 시스템의 난방 성능특성을 실험하기 위하여 표 2와 같이 시스템별 측정항목을 조합하여, 1997년 1월 15일에서 3월 25일까지 충청북도 청주지방에서 실험을 수행하였다.

이 실험기간 중 외기온은 -12°C 에서 15°C 이었던 때문에 주위 공기온도의 인위적 조절없이 그린하우스 난방실험을 수행할 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

가. 열펌프 성능 분석

그린하우스 난방에 사용된 열펌프의 성능계수는 그림 4와 같이 실험적으로 분석할 수 있었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 외기온이 0°C 이상인 경우에는 성능계수가 4.0 수준이었고 외기온이 0°C 이하인 경우에는 성능계수가 3.0 수준으로 열원인 외기온에 영향을 크게 받고 있음을 쉽게 알 수 있다.

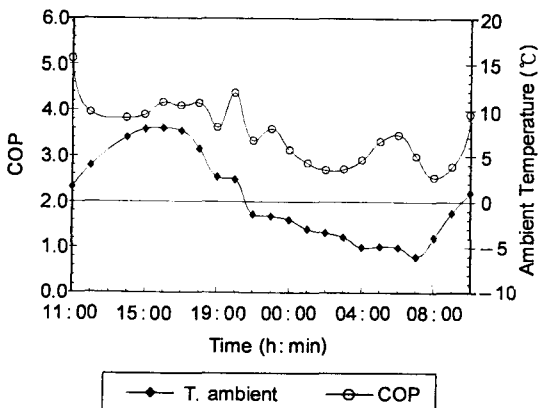


Fig. 4 COP of the heat pump with ambient temperature.

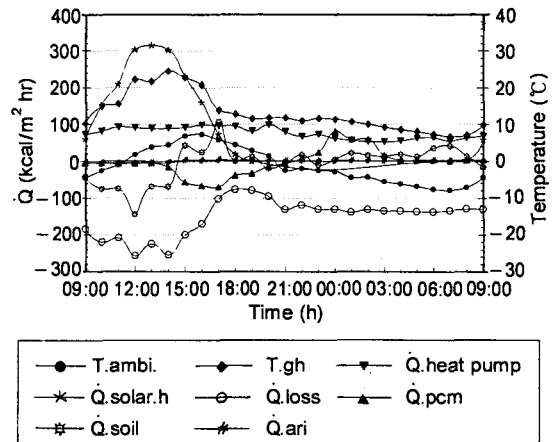
나. 그린하우스 -PCM- 열펌프 시스템에서의 열 흐름 특성 분석

그림 5는 잠열축열조와 열펌프가 설치된 그린하우스내에 공급되고 있는 열, 축열매체에 저장되고 있는 열과 그린하우스로부터 손실되고 있는 열흐름을 나타내고 있으며, 외기온도 변화를 보여주고 있다. 동시에 이들 열에너지 흐름과 외기온에 의하여 결과된 그린하우스 내부온도 변화를 나타내고 있다.

$50\sim 310 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2$ 의 태양열이 9시간 동안 그린하우스내에 공급되었고, $60\sim 100 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2$ 의 열이 열펌프에 의하여 24시간 동안 계속해서 그린하우스내에 공급되었다.

이 공급되는 열에너지 중 주간에는 $80\sim 140 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2$ 의 열이 토양과 PCM, 그리고 공기중에 저장되고 있었으며, $200\sim 240 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2$ 가 그린하우스 밖으로 손실되고 있었다.

야간에는 열펌프에서 $60\sim 70 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2$ 의 열에너지가 방출되어 그린하우스 난방열원으로 활용되고 있었다.



Q_{loss} : Heat loss through the greenhouse cover (kcal/h)

Fig. 5 The thermal energy flow in the greenhouse -PCM- Heat pump system with the legal time and the variation of the inside and outside air temperature of the greenhouse.

그리고 130~140 kcal/hr · m²의 열에너지가 그린하우스 밖으로 손실되고 있음으로서 야간보다 주간 열손실이 70~100 kcal/hr · m² 더 크게 나타났고, 이때 외기온은 주간에 -4~8℃였으며 야간에는 0~-8℃이었다. 이와 같이 그린하우스 내 열흐름에 힘입어 낮은 외기온을 이기고 그린하우스 내부 공기온도는 주간에는 14~25℃로 유지되었으며, 야간에는 7~14℃로 보온되는 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 실험 분석 결과로 주간 그린하우스의 열손실이 야간의 열손실보다 2~3배 크게 나타남을 알 수 있었으며, 이 결과는 가능한 한 주간 잉여 에너지를 많이 축열하므로써 주간 열손실을 줄이는 것은 물론이고, 저장열을 야간에 난방열로 많이 사용할 수 있는 2중 효과를 얻을 수 있음을 시사해 주었다.

이상과 같은 에너지 분석결과 잠열축열과 열펌프 시스템의 난방효과에 의하여 야간(19시~7시)에 60~80%의 에너지 절감효과를 얻었음을 확인할 수 있었다 (그림 8).

다. 외기온을 기준으로 한 그린하우스 난방 효과

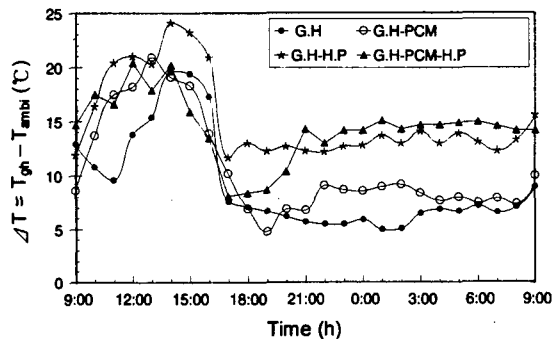
본 연구에서 그린하우스 난방시스템의 난방효과를 외기온을 기준으로 한 그린하우스의 실온과 외기온과의 차로 나타내는 한편 그린하우스 설정실온을 기준으로 한 실온과 설정온도와의 차로 그린하우스 난방 효과를 분석하였다.

그림 6에서는 외기온을 기준으로 4가지 형태로 된 각 시스템의 그린하우스 난방 효과를 분석한 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 주간에는 4가지 형태의 시스템(단일 그린하우스 시스템, 그린하우스 - PCM 축열시스템, 그린하우스 - 열펌프 시스템 그리고 그린하우스 - PCM - 열펌프 시스템) 모두에서 난방효과가 좋았으나, 주간에서 야간으로 전환되는 시간인 17시에서 21시 사이 4시간 동안에는 난방효과가 그린하우스 - 열펌프 시스템을 제외한 3가지 난방 모델에서는 5~8℃로 대단히

낮게 나타났다.

그러나 21시 후 다음날 아침 9시까지의 그린하우스 - PCM - 열펌프 시스템에서는 난방효과가 12~15℃로 비교적 높은 편이었으나, 그린하우스 난방을 저장열에서 나오는 방열에만 의존하고 있는 그린하우스 - PCM 시스템과 열원이 전혀 없는 단일 그린하우스의 난방효과는 상대적으로 낮게 나타났다.

이 분석 결과로 보아 가능한 한 PCM 축열용량을 늘리고 열펌프의 용량과 성능계수인 COP를 증진하여야 야간의 그린하우스 난방효과가 상승될 것으로 판단되지만 열공급과 열 저장시스템을 잘 조화되게 하는 적정 규모 결정이 대단히 중요한 것으로 판단되었다.



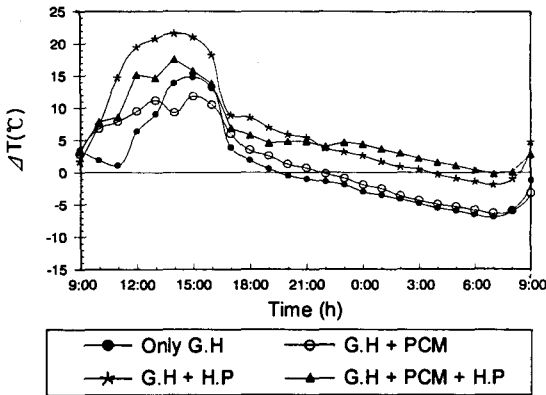
Air temperature inside the greenhouse-Ambient air temperature

- ※ Tgh : Air temperature in greenhouse, Tambi : Ambient air temperature
- ※ G.H. : Only greenhouse, G.H-PCM : Greenhouse - PCM heat storage system
- G.H-H.P. : Greenhouse-Heat Pump system
- G.H-PCM-H.P. : Greenhouse - PCM heat storage system - heat pump system

Fig. 6 Greenhouse heating effect on the basis of the ambient air temperature.

라. 그린하우스 설정실온을 기준으로 한 그린하우스 난방효과

그림 7은 그린하우스 설정온도, 7℃를 기준으로 4가지 형태의 그린하우스 난방시스템에 대한 난방효



G. H, Heating Effect on the basis of greenhouse setting temperature of 7°C
(T = Air temperature inside the greenhouse-setting temperature of 7°C)

Fig. 7 Greenhouse heating effect on the basis of the greenhouse setting air temperature.

과를 분석한 결과이며, 이 난방효과는 그린하우스 내 공기온도와 설정온도와의 차로 나타내었다.

이 그림에서 보는 바와 같이 주간에는 4개의 시스템 모두에서 난방효과가 설정온도 7°C 보다 2~21°C 높게 나타났으나, 주간에서 야간으로 넘어가는 전환기에는 급격히 난방효과가 하강하는 현상을 보였다.

오전 10시부터 저녁 21시까지는 그린하우스 - PCM - 열펌프로 구성된 난방시스템이 그린하우스 - 열펌프로 구성된 난방시스템보다 난방효과가 낮았으나, 21시 이후부터는 그린하우스 - PCM - 열펌프로 구성된 시스템이 그린하우스 - 열펌프시스템보다 그린하우스 난방효과가 높게 나타났다.

주간에는 태양에너지와 열펌프에서 공급되는 열에너지가 PCM 열저장조에 축열되기 때문에 낮게 나타났고, 주간에서 야간으로 전환되는 시간인 18시에서 21시까지는 아직 PCM에 축열된 열이 방열되지 않은 상태이기 때문에 그린하우스 - PCM - 열펌프시스템의 난방효과가 그린하우스 - 열펌프시스템의 경우보다 낮게 나타난 것으로 판단되었다.

이 그림에서 보는 바와 같이 단일 그린하우스 시스템과 그린하우스 - PCM 축열시스템 간의 난방

효과 차이가 비교적 적게 나타난 것으로 보아 이 경우 PCM 축열조가 난방효과에 준 영향은 적었으나, 그린하우스 - 열펌프시스템과 그린하우스 - PCM - 열펌프시스템간의 난방효과 차이가 비교적 크게 나타난 것은 열원이 풍부한 경우에만 PCM 축열조가 난방효과에 큰 영향을 준다는 사실을 분명히 나타낸 것이라 하겠다.

이와 같은 결과로 보아 열원규모와 PCM 축열조 규모간의 관계를 수식화하고 이에 준하여 PCM 축열조 규모를 적절히 결정하여야 할 것으로 판단되었다.

앞으로 연구에서는 열원규모와 축열조 규모간의 관계에 관한 이론 및 실험적 분석이 심도있게 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

마. 그린하우스 난방시스템의 자연에너지 의존을 분석

그린하우스 난방에너지의 절감율은 난방부하의 자연에너지(태양에너지) 의존율과 같으며, 다시 말하면 그린하우스 난방부하에 대한 흡수, 저장, 이용된 태양에너지와 열펌프에서 순수하게 얻은 자연에너지의 비로 계산할 수 있으며, 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{에너지 절감율} = \frac{\text{흡수, 저장, 이용된 태양에너지} + \text{열펌프에서 순수하게 얻은 열량}}{\text{그린하우스 난방부하 (설정온도 7°C 기준)}}$$

$$E.S.R = \frac{E_{soil}^{solar} + E_{PCM}^{solar} + E_{air}^{solar} + E_{crop}^{solar} + EPC(COP-1)}{G.H.L} \quad (3)$$

여기서 :

E.S.R = Thermal energy saving rate

E_{soil}^{solar} = Solar energy stored in soil (kcal/m²)

E_{PCM}^{solar} = Solar energy stored in the PCM latent heat storage system (kcal/m²)

E_{air}^{solar} = Solar energy stored in the air in greenhouse (kcal/m²)

E_{crop}^{solar} = Solar energy stored in the crops (kcal/m²)

EPC = Electric power consumption of heat pump compressor and fan motor of condenser, evaporator, and PCM storage system (kcal/m²)

G.H.L = Greenhouse heating load (kcal/m²)

COP = Coefficient of performance of heat pump

실험과 이론분석에 의하여 (3)식 우측 각 항을 구하여 대입하고, 그린하우스 설정온도 7℃를 기준으로 그린하우스 난방부하(G. H. L)를 분석하므로써 그림 8과 같이 시간에 따른 난방부하의 변화추이와 본 연구에서 구성한 그린하우스 난방시스템(그린하우스 - PCM - 열펌프시스템)의 자연에너지 의존율을 분석할 수 있었다.

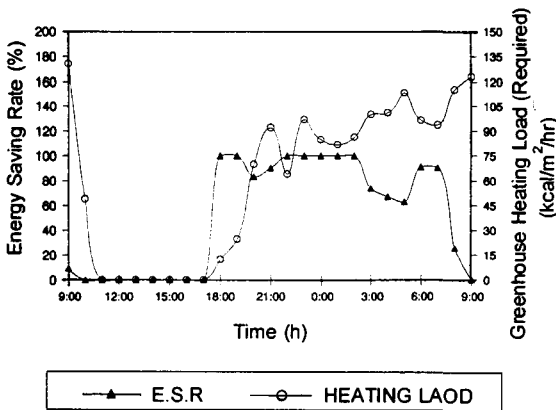


Fig. 8 Energy saving rate with legal time in the greenhouse - PCM - heat pump system in the night and sunny day.

이 그림에서 보는 바와 같이 쾌청한 낮의 난방부하는 거의 없었으며, 일몰 후부터 증가하여 새벽 5~9시에 가장 큰 값을 보였다.

난방시스템의 절감율도 주간에는 난방부하가 대단히 적었기 때문에 난방에너지를 공급할 필요가 없게 되어 에너지 절감율을 고려할 필요가 없었으나,

일몰 후부터는 주간에 저장되었던 태양에너지가 자연스럽게 공급되기 때문에 에너지 절감율이 60~80%로 증가하였으며, 열펌프 작동과 난방부하의 증감에 따라 25~60%를 한계로 증가, 감소현상을 보였으나, 새벽 8~9시에 25~40%로 가장 낮게 나타났다.

이와 같이 에너지 절감율의 기복을 없애기 위하여 PCM 저장시스템과 열펌프시스템을 조화있게 연계하여 작동할 수 있도록 자동제어시스템을 고안, 설치하여야 할 것으로 사료된다.

5. 요약 및 결론

겨울철 그린하우스 난방의 화석에너지 의존도를 줄이고, 그 대신 자연에너지 이용률을 높이기 위하여 그린하우스, PCM 축열조, 그리고 열펌프를 그린하우스 난방시스템의 3개 단위요소로 하고, 이들 3요소를 조합하여 4개 모델(단일 그린하우스, 그린하우스 - PCM시스템, 그린하우스 - 열펌프 시스템, 그린하우스 - PCM - 열펌프 시스템)의 난방 시스템을 구성하여 단계별로 실험 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

가. 본 연구에서 구성한 열펌프의 성능계수는 외기온의 0℃ 이상에서 4.0 이었고, 0℃ 이하에서는 3.0 이었다.

나. 4단계 난방시스템 모두에서 주간 열손실이 야간의 열손실보다 2~3배 더 큰 것으로 분석되었으며,

다. 그린하우스 설정온도, 7℃를 기준으로 한 난방 효과는 주간에는 5~21℃, 야간에는 7~8℃로서 그린하우스 -PCM- 열펌프시스템만이 설정온도 이상의 난방효과를 보였고,

라. PCM 축열조 규모와 공급 열원 규모가 적정한 그린하우스 -PCM- 열펌프시스템 PCM 축열조의 난방효과가 가장 높게 나타났다.

마. 그린하우스 - PCM - 열펌프로 된 그린하우스 난방시스템의 에너지 절감효과는 60~80% 있었다.

◆ Nomenclature

$\dot{Q}_{solar, in}$ = Solar radiation in the greenhouse. (kcal/hr)
 $\dot{Q}_{heat\ pump}$ = Heat gained from heat pump (kcal/hr)
 COP = Coefficient of performance of heat pump.
 \dot{Q}_l = Heat loss through the greenhouse cover (kcal/hr)
 \dot{Q}_v = Heat loss by the ventilation from the greenhouse (kcal/hr)
 \dot{Q}_{soil} = Heat absorbed or released by the soil in greenhouse (kcal/hr)
 \dot{Q}_{crop} = Heat absorbed or released by the crops (kcal/hr)
 \dot{Q}_{air} = Air enthalpy in greenhouse (kcal/hr)
 \dot{Q}_{pcm} = Heat storage in PCM (kcal/hr)
 τ = Transmissivity of greenhouse cover
 I_s = Solar radiation on the horizontal surface (kcal/m² · hr)
 h_l = Heat transfer coefficient of greenhouse cover (kcal/m² · hr · °C)
 h_v = Ventilation heat transfer coefficient of greenhouse (kcal/m² · hr · °C)
 A_g = Floor area of greenhouse (m²)
 f_r = Energy saving rate by the thermal curtain
 α_{soil} = Heat absorption rate of soil
 R_g = Ratio of soil area no covered by the crops = $\left(\frac{A_g - A_{crop}}{A_g}\right)$
 R_{crop} = Ratio of soil area covered by the crops = $\left(\frac{A_{crop}}{A_g}\right)$
 h_a = Enthalpy of dry air (kcal/kg)
 h_v = Enthalpy of vapor in the air (kcal/kg)
 x = Absolute humidity in greenhouse
 LH = Latent heat of water vaporization (kcal/kg)
 LH_{pcm} = Latent heat of PCM (kcal/kg)
 $\dot{m}_{r, e}$ = Mass flow rate of freon gas (kg/hr)
 \dot{m}_w = Mass flow rate of water (kg/hr)
 p_v = Partial pressure of water vapor in the moist air

(kg/cm³)
 p_a = Partial pressure of the dry air (kg/cm³)
 h_1 = Enthalpy of R₂₂ at the compressor inlet (kcal/kg)
 h_2 = Enthalpy of R₂₂ at the compressor outlet (kcal/kg)
 h_3 = Enthalpy of R₂₂ at the condenser inlet (kcal/kg)
 η_{motor} = Efficiency of compressor motor
 η_{comp} = Compression efficiency
 η_{scmp} = Compressor motor speed (r.p.m)
 η_v = Volumetric efficiency of compressor
 η_{me} = Mechanical efficiency
 D_p = Compressor displacement (m)
 D_{pl} = Inside diameter of cylinder (m)
 Z_{pl} = Number of cylinder
 v_c = Clearance volume of compressor (m³)
 $T_{w, in}$ = Inlet water temperature into condenser (K)
 $T_{w, out}$ = Outlet water temperature from condenser (K)
 T_{in} = Air temperature in the greenhouse (K)
 T_{ambi} = Ambient air temperature (K)
 T_{s1} = Solid phase temperature of PCM at the state 1 (K)
 T_{s2} = Solid phase temperature of PCM at the state 2 (K)
 T_{l1} = Liquid phase temperature of PCM at the state 1 (K)
 T_{l2} = Liquid phase temperature of PCM at the state 2 (K)
 $C_{p\ solid}$ = Specific heat of solid phase PCM at constant pressure (kcal/kg · °C)
 $C_{p\ liquid}$ = Specific heat of liquid phase PCM at constant pressure (kcal/kg · °C)
 $C_{p\ w}$ = Specific heat of water at constant pressure (kcal/kg · °C)
 $m_{pcm, solid}$ = PCM mass at solid phase (kg)
 $m_{pcm, liquid}$ = PCM mass at liquid phase (kg)
 \dot{m}_{air} = Mass flow rate of air (kg/hr)
 A_{crop} = Soil surface area covered with crops (cm²)
 α_{crop} = Heat absorption rate of crop
 t = Celsius temperature (°C)

C_p = Specific heat of air at constant pressure (kcal/kg $^{\circ}$ C)

C_v = Specific heat of air at constant volume (kcal/kg $^{\circ}$ C)

$m_{soil, i}$ = Soil mass of each soil layer (kg)

$C_{p, soil}$ = Specific heat of soil (kcal/kg $^{\circ}$ C)

ΔT_i = Temperature difference with time lag in each soil layer ($^{\circ}$ C)

$\Delta \tau$ = Time lag (hr)

참 고 문 헌

1. 송현갑, 유영선. 1994. 온실난방을 위한 태양열-지하잠열축열 시스템 개발. 한국농업기계학회지 19(3).
2. 송현갑, 유영선. 1996. 그린하우스 열환경조절을 위한 파라핀계 화합물의 잠열축열특성. 한국농업기계학회지 21(1).
3. Kaygusuz, K., and T. Ayhan. 1991. Solar-Assisted Heat Pump Systems and Energy Storage. Solar Energy. 47(5):383~391.
4. Huang B. K., and M. Toksoy. 1986. Transient Response of Latent Heat Storage in Greenhouse Solar System. Solar Energy. 37(4):270~292.
5. Sushid K., and Y. James. 1984. Thermal Performance of A Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump. Solar Energy. 33(2):155~162.
6. 吉岡勉 등. 1996. 地中蓄熱型 ソーラ温室に 關あ る研究 (續報) 日本太陽 エネルギ"- 22(6):58~66.