

## 열펌프와 잠열축열을 이용한 온실 난방시스템의 열특성과 시뮬레이션 모델개발

### Thermal Energy Characteristics and Simulation Model Development for Greenhouse Heating System with Heat Pump and Latent Heat Storage

노정근                      송현갑  
정희원                      정희원  
J. G. Ro                    H. K. Song

#### SUMMARY

The greenhouse heating system with heat pump and latent heat storage was built for development of simulation model and validation. The computer simulation model for the system to predict temperature of air, soil surface and cover film in the greenhouse were developed and its validity was justified by actual data. From the analysis of experimentally measured and the simulation output, following results were obtained.

1. The expected values of inside air temperature for the greenhouse with a heat pump and a latent heat storage system were very much close to the experimental values at the error range of 1.0°C.
2. The expected values of soil surface temperature for the greenhouse with a heat pump and a latent heat storage system were very much close to the experimental values at the error range of 1.0°C.
3. The expected values of thermal energy flow for the greenhouse with a heat pump and a latent heat storage system were very much close to the experimental values at the error range of 167.2kJ/m<sup>2</sup>h.
4. Heat loss value of day time was found to be larger than that of night time as much as 1.11 time.
5. At day time, the inside air temperature was shown to be higher than the set point of 7.0°C. At night time, the inside air temperature was controlled in order to maintain higher temperatures than the set point.

**Keywords** : Heat pump, Latent heat storage.

#### 1. 서      론

우리 나라 대부분의 겨울철 시설원에 난방은 화석 에너지를 연료로 하는 보일러가 주종이며, 이로 인한 화석에너지에서 발생하는 공해물질은 농업과 농촌 환경을 오염시키고 있어, 이를 보호하기 위한 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이

다. 특히 화석에너지 자원을 수입에 의존하고 있기 때문에 국제 유가변동에 따라 시설농업 생산에 직·간접적인 영향을 받고 있어, 에너지 절감 차원에서 새로운 난방시스템의 개발이 절실하다.

열펌프와 잠열 축열재를 이용한 새로운 난방시스템의 구성은 화석연료의 공해문제로부터 벗어날 수 있으며, 주간에 온실 난방을 위해 사용되고

This article was submitted for publication in August 2001; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2001. The authors are J. G. Ro, Research Assistant, and H. K. Song, Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University. The corresponding author is H. K. Song, Professor, Department of Agricultural Engineering, Chungbuk National University, Chungjoo 361-763, Korea. E-mail: <hksong@cbucc.chungbuk.ac.kr>.

남는 잉여 에너지를 저온에서 저장하여 야간에 보조 열원으로 일정 시간동안 활용함으로써 야간에 난방기의 가동시간을 최소화 할 수 있다. 하지만, 이러한 연구는  $-5^{\circ}\text{C}$  이하의 외기온에서 작동할 수 있는 열펌프의 개발이 전제되어야 하고, 또한 겨울철  $20\sim 22^{\circ}\text{C}$  사이의 온도에서 축열이 가능하며, 잠열량이 많은 잠열 축열재를 개발하여야 하기 때문에 많은 어려움을 가지고 있다. 이에 대한 연구로 일본 시설원예협회의 잠열 축열재 도입 연구가 있고, 국내에서 유(1992)는 잠열 축열 저장 시스템을 개발하였고, 송과 노(1998) 등이 온실 난방을 위한 열펌프-잠열축열 시스템 연구에서 열특성 분석을 하였으나, 열펌프와 잠열축열을 조합한 온실 난방 시스템 구성의 적정 규모설정을 위한 기초 자료가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 열펌프와 잠열축열재를 이용한 온실 난방시스템의 열특성을 예측할 수 있는 모델링을 개발하고, 모델링 검증 및 실험을 통한 열특성 분석을 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 시뮬레이션 모델 개발

열펌프-잠열축열 난방 시스템에 대한 열평형 이론을 정립하고 수치해석에 의하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고자 그림 1, 2, 3, 4에서 보는바 같이 개략도와 열저항 회로망을 주간과 야간으로 구분하여 구성하였다. 주간은 태양열과 열펌프에 의한 공급열원이 있는 경우의 열평형 상태를 나타내고 있으며, 야간에는 보온덮개를 닫고 잠열축열재에 의한 방열과 열펌프에 의한 공급열원이 있는 경우의 열평형을 나타내었다. 그림 2와 그림 4의 열평형 회로도에 의거 온실의 내부공기, 토양표면, 피복재, 잠열 축열재를 미지수로 하여 4개의 비선형 연립 방정식을 유도하고 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 미지수를 예측하였으며, 실험 분석치와 비교하여 수치해에 의한 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션 모델을 위하여 C언어를 사용하였으며, 겨울철의 기후조건이 유사한 여러 날을 선정하여 온도, 태양강도, 상대습도, 토양수분 함량, 열펌프의 성능계수, 소모전력량, 잠열축열재 온도 등을 자료로 하였다. 토양은 사양토로 건조한 상태를 유지하였고, 작물이 없는 나대지 상태였으며, 열평형 방정식에서도 작물이 없

는 것으로 하였다. 온실내 열전달과 수분 전달에 대한 기본 방정식의 해를 얻기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.<sup>4)</sup>

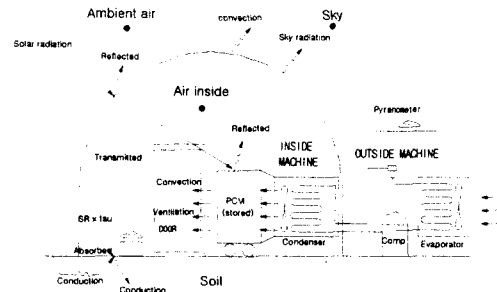


Fig. 1 Schematic diagram of energy flows in greenhouse heating system by heat pump and latent heat storage(daytime).

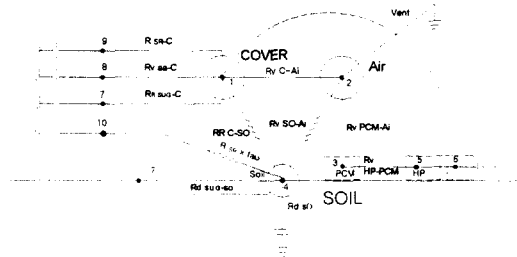


Fig. 2 Complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by heat pump and latent heat storage (daytime).

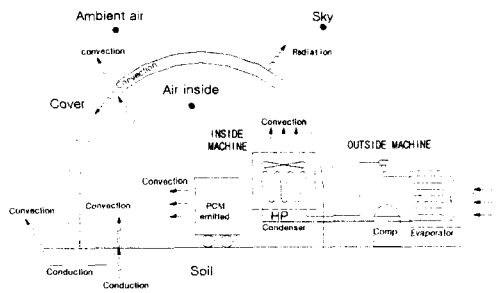


Fig. 3 Schematic diagram of energy flows in greenhouse heating system by heat pump and latent heat storage(nighttime).

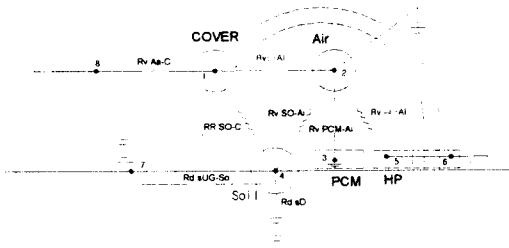


Fig. 4 Complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by heat pump and latent heat storage (nighttime).

- ① 모든 열전달 표면의 온도변화는 時間隔( $\Delta t$ )의 증가에 의존하며, 각각의 표면은 등온이다.
- ② 복사 열전달 표면은 灰體이다.
- ③ 공기의 복사열교환은 무시한다.
- ④ 온실 구조물에 의한 열전달은 무시한다.
- ⑤ 열펌프와 잠열 축열재의 열교환은 대류 열전달 만을 고려한다.
- ⑥ 열펌프 콘덴서는 내부 공기와의 열교환만 이루어지는 것으로 간주한다.
- ⑦ 잠열 축열재 요소간의 복사열 전달은 없는 것으로 간주한다.

나. 열평형 방정식

(1) 온실 피복재를 중심으로 한 열평형 방정식  
온실 피복재를 중심으로 한 주·야간 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

(가) 주간

$$Q_{S-C}^{sr} + Q_{C-SKY}^{rad} + Q_{C-SUG}^{rad} + Q_{C-Aa}^{conv} + Q_{C-Ai}^{conv} + Q_{C-SO}^{rad} + Q_{WC} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

(나) 야간

$$Q_{C-Ai}^{conv} + Q_{C-SO}^{rad} + Q_{WC} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

(2) 온실 내부 공기를 중심으로 한 열평형 방정식

온실 내부공기를 중심으로 한 주·야간 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

(가) 주간

$$Q_{Ai-C}^{conv} + Q_{Ai-SO}^{conv} + Q_{Ai-PCM}^{conv} + Q_{Ai-Aa}^{vent} = 0 \quad \dots\dots (3)$$

(나) 야간

$$Q_{Ai-C}^{conv} + Q_{Ai-SO}^{conv} + Q_{Ai-PCM}^{conv} + Q_{Ai-HP}^{conv} + Q_{Ai-Aa}^{vent} = 0 \quad \dots\dots (4)$$

(3) 잠열 축열재를 중심으로 한 열평형 방정식  
온실 내부 잠열 축열재를 중심으로 한 주·야간 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

(가) 주간

$$Q_{PCM-Ai}^{conv} + Q_{PCM-HP}^{conv} + Q_{LSH} + Q_{W-PCM} = 0 \quad \dots\dots (5)$$

(나) 야간

$$Q_{PCM-Ai}^{conv} + Q_{LSH} + Q_{W-PCM} = 0 \quad \dots\dots (6)$$

(4) 온실 내부 지표면을 중심으로 한 열평형 방정식

온실내부 지표면을 중심으로 한 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

(가) 주간

$$Q_{SKY-SO}^{SR} + Q_{SO-SD}^{cond} + Q_{SO-Ai}^{conv} + Q_{SO-C}^{rad} + Q_{WS} = 0 \quad \dots\dots (7)$$

(나) 야간

$$Q_{SO-SD}^{cond} + Q_{SO-Ai}^{conv} + Q_{SO-C}^{rad} + Q_{WS} = 0 \quad \dots\dots (8)$$

(5) 수분전달 평형 방정식

토양표면, 피복재내면, 잠열축열재 표면을 경계로 하는 온실 시스템에서의 수분전달 평형식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$M_{uS} + M_{uC} + M_{uV} + M_{uLO} = 0 \quad \dots\dots (9)$$

상기 모형에 사용된 변수들은 표 1과 같다.

Table 1 Parameters for the simulation

area of greenhouse cover	159.516 m <sup>2</sup>	calculated
area of floor in greenhouse	97.16 m <sup>2</sup>	calculated
volume of greenhouse	281.37 m <sup>3</sup>	calculated
emissivity of greenhouse cover	0.16	cited (1)(2)
emissivity of floor	0.94	cited (1)(2)
absorptance of greenhouse cover	0.12	cited (4)
absorptance of floor	0.95	cited (4)
thermal conductivity of soil	0.52 J sec <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	cited (6)
view factor (cover-sky)	0.818	calculated
view factor(cover-outside ground)	0.182	calculated
view factor (cover - floor)	0.636	calculated
view factor (cover - cover)	0.364	calculated
specific heat of greenhouse air	1005.7 J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	measured
specific heat of ambient air	1003.2 J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	measured
transmissivity of cover	0.505~0.740	measured

여기서,

$Q_{S-C}^{sr}$  : 온실피복재에 도달한 태양에너지 흡수율 (w)

$Q_{C-SKY}^{rad}$  : 피복재와 천공과의 복사 열전달(w)

$Q_{C-SUG}^{rad}$  : 피복재와 온실 지표면과의 복사 열전달(w)

$Q_{C-Aa}^{conv}$  : 피복재와 대기와의 대류 열전달(w)

$Q_{C-Ai}^{conv}$ ,  $Q_{Ai-C}^{conv}$  : 피복재와 온실내부 공기와의 대류 열전달(w)

$Q_{C-SO}^{rad}$ ,  $Q_{SO-C}^{rad}$  : 피복재와 온실내부 지표면과의 복사 열전달(w)

$Q_{WC}$  : 피복재에서 수분이동에 의한 열교환(w)

$Q_{Ai-SO}^{conv}$ ,  $Q_{SO-Ai}^{conv}$  : 내부공기와 온실지표면과의 대류 열전달(w)

$Q_{Ai-PCM}^{conv}$ ,  $Q_{PCM-Ai}^{conv}$  : 내부공기와 잠열축열재 표면과의 대류 열전달(w)

$Q_{Ai-HP}^{conv}$  : 열펌프에 의한 대류 열전달(w)

$Q_{Ai-Aa}^{vent}$  : 내부공기와 외부공기와의 환기에 의한 열전달(w)

$Q_{PCM-HP}^{conv}$  : 열펌프로 부터 잠열 축열재에 대한 대류 열전달(w):

$Q_{LSH}$  : 잠열축열재에 저장되는 현열 및 잠열(w)

$Q_{W-PCM}$  : 잠열축열재 표면에서 수분 이동에 의한 열교환(w)

$Q_{SKY-SO}^{sr}$  : 온실내부 지표면의 태양에너지 흡수율 (w)

$Q_{SO-SD}^{cond}$  : 온실 지표면과 지층과의 전도 열전달 (w)

$Q_{WS}$  : 온실 지표면에서의 수분 증발잠열(w)

$M_{wS}$  : 온실 내부 지표면에서의 수분 증발량 (kg/sec)

$M_{wC}$  : 피복재에서의 수분 이동량(kg/sec)

$M_{wV}$  : 환기에 의한 수분 이동량(kg/sec)

$M_{wLO}$  : 잠열 축열재 표면의 수분 응축량(kg/sec)

다. 난방 시스템의 열흐름 특성이론

열펌프, 잠열 축열을 이용한 겨울철 온실 난방을 위한 열평형 이론식을 다음과 같이 분석하였다.

온실의 공급열량, 손실열량, 축열량의 열평형식을 구하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \dot{Q}_{solar} + \dot{Q}_{heat\ pump} \\
 & = \dot{Q}_l + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{soil} + \dot{Q}_{crop} + \dot{Q}_{air} + \dot{Q}_{PCM} \\
 & \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

여기서,

$\dot{Q}_{solar}$  : 온실의 일사량(kJ/h)

$\dot{Q}_{heatpump}$  : 열펌프로부터 얻은 열량(kJ/h)

$\dot{Q}_l$  : 온실 피복재를 통한 손실 열량(kJ/h)

$\dot{Q}_v$  : 환기에 의한 손실 열량(kJ/h)

$\dot{Q}_{soil}$  : 온실내 토양에 의한 저장과 방출 열량(kJ/h)

$\dot{Q}_{crop}$  : 작물에 의한 저장과 방출 열량(kJ/h)

$\dot{Q}_{air}$  : 온실 공기의 엔탈피(kJ/h)

$\dot{Q}_{PCM}$  : 잠열축열재의 저장 열량(kJ/h)

### 라. 실험장치 및 방법

열펌프와 잠열축열을 이용한 온실 난방 시스템을 그림 5와 같이 구성하였으며, 상세규격은 표 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 잠열 축열재 차대 끝 부분에 송풍기를 설치하여 열저장 및 방출시 가동함으로써 열전달이 고르게 이루어지도록 하였다.

운전방법으로서는 주간 온실내의 온도가 잠열 온도(18~22℃)보다 높도록 23℃ 미만일 때는 열펌프를 가동하여 잠열 축열재에 열이 저장되도록 하였으며, 23℃ 이상일 때는 잠열 축열재 차대 끝 부분 송풍기만을 가동함으로써 실내온도에 의한 저장이 이루어지도록 열펌프의 운전시간을 조정하였다. 축열 방법으로는 열펌프 응축기 출구와 잠열 축열재 카트리지를 덕트로 연결하여 응축기에서 나온 고온 열이 우선적으로 잠열 축열재와 열교환이 이루어지도록 하였다.

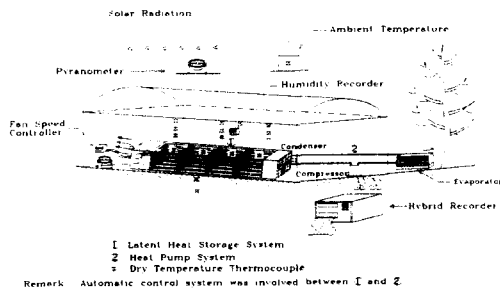


Fig. 5 Greenhouse heating system by heat pump and latent heat storage system.

주간에 열을 흡수 저장한 잠열 축열재는 야간에 온실의 실온이 기준설정 온도 이하로 내려갈 때 축열재 송풍기팬을 가동함으로써 축열조 내의 열이 실내공기로 유입되어 실온을 일정 기간동안 유지하고, 실온이 최저 설정온도 이하로 내려갈 때에는 열펌프가 가동되도록 하였다.

본 실험에서 측정 요소는 대기온도, 온실 실내 온도(상 중 하 각각 4지점) 온실내의 상대습도, 수평면 태양강도, 각 차대의 상 중 하 위치에서의 잠열 축열재 온도, 각 차대의 상 중 하 위치에서의 잠열 축열재와 잠열 축열재 사이의 공기온도, 열펌프 응축기 입·출구온도, 압축기 입·출구 냉매온도, 증발기 입·출구 냉매온도, 팽창밸브 입·출구 냉매온도, 응축기 입·출구 냉매온도, 응축기 풍량, 소비전력 등이다.

온실내·외기온과 잠열 축열조내 온도 변화, 온실내의 토양온도 변화는 55개의 열전대를 설치하여 온도 기록계에 자동으로 기록 되도록 하였으며, 상대습도는 온·습도계를 설치하여 측정하였고, 이를 이용하여 습공기의 엔탈피(Enthalpy)를 분석할 수 있게 하였다.

태양강도는 온실 안과 밖에 1개씩 2개의 일사계를 설치하여 온실내·외의 태양 강도를 측정하였고, 이를 이용하여 온실 피복재의 태양열 투과율을 분석할 수 있고, 온실 내의 태양강도에 의한 열량을 알 수 있도록 하였다.

### (1) 공기-공기 열펌프 시스템의 구성 및 성능 분석

열펌프를 온실 냉·난방용으로 실용화하기 위하여 공기-공기 열펌프 시스템에 AVACTHE(Automatic Variable Area Capillary Tube Heat Exchanger)를 고안 설치하여 열원인 대기온도가 -5℃ 이하에서도 높은 성능으로 열펌프가 작동할 수 있도록 하였다. 또한 냉매 흐름방향을 바꾸어 여름에는 냉방목적으로 사용할 수 있는 냉·난방 겸용으로 구성하였으며 제원은 표 3과 같다.

열펌프 성능은 외기온 변화에 따라 실험·분석하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 이 그림에서 보는바와 같이 외기온이 -6~0℃에서는 AVACTHE를 설치한 경우가 이를 설치하지 않은 경우(by pass)보다 COP가 높은 것으로 볼 수 있으며, 0~10℃에서는 bypass로 한 경우의 COP가 높은 것으로 판단할 수 있다.

열펌프 회로에 AVACTHE의 설치하는 외기온이

Table 2 Specifications of the 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	Ag/Awall = 0.65 where Ag : Greenhouse cover area Awall : Floor area
Heat pump (air to air)	Compressor : 3PS Evaporator : forced type for 3 PS Condenser : air heating type for 3PS	R22 : Boiling point 232.4K  Latent heat of eveaporation; 205kJ/kg	- COP = 2~4.5 - Heated air temperature = 35~50℃
PCM storage system	- PCM storage cart: 700mm(W)×700mm(L) × 900mm(H) - Total carts : 4EA - PCM mass : 68EA×12kg/bag=816 kg Power of fan motor : 0.25kW	- Al + polyethylene film  - Stainless  - Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	- Latent heat =38.5 kcal/kg - Phase change temperature = 18~22℃ - Available phase change cycle =1,500~2,000

Table 3 Specification of the heat pump for this experimental equipment.

Component		Interior unit	Exterier unit
Electronic power		3 Phase 220 V 60 Hz	
Condenser	Heating	5500-9000kcal/h	
	Cooling	5500 - 9000 kcal/h	
Compressor	Type	-	Completely closed type
	Net power	-	3 PS
Air heat exchanger		Copper pipe, Plate fin type	
Dehumidifier		-	220 V, 0.6 kw x 3 EA
Evaporator	Capacity		46 CMM
	Net power	-	3∅ 0.2kW 6p
	size	-	130cmx50cmx 20cm

-5℃ 이하일 때 열펌프의 운전을 스무스하게 해 주는 것은 물론이고, COP를 크게 증가시켜 주는 역할을 하고 있음을 증명해 주고 있다. 지금까지 열펌프 시스템이 외기온 -5℃ 이하에서 실용화가 어려운 것으로 보고되고 있으나, 이 시스템을 도입함으로써 실용화의 가능성이 커질 것으로 판단 된다.

(2) 잠열축열재 선정 및 물성안정

겨울철 온실의 내부 온도는 10~20℃가 적정 온

도 수준이므로 잠열온도가 28~30℃ 수준의 잠열 축열재인 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O를 선택하여 잠열온도를 18~22℃가 되도록 온도 조절제를 넣어 하향 조절 시켜 겨울철 온실내 온도에서 상변화가 가능한 범위의 잠열 축열재를 선정하였다.

그림 7에서 보는바와 같이 0~600cycle일 때 잠열온도는 19℃~20℃ 사이에서 변화하였으나 600 cycle 이상에서는 잠열온도 변화가 없었고, 잠열량은 cycle이 증가될수록 감소하였다.

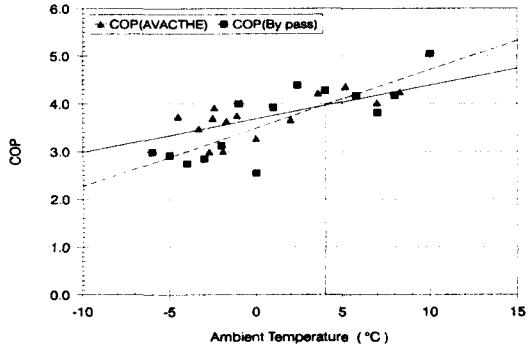


Fig. 6 The AVACTHE effect on the COP as a function of the ambient air temperature.

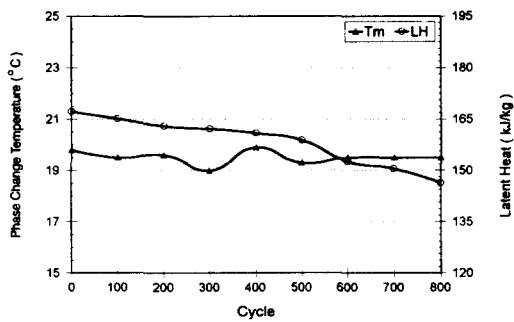


Fig. 7 Variation of phase change temperature(Tm) and latent heat(LH) of  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (TCA) according to the phase change cycle.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 시뮬레이션 모델 검증

열펌프와 잠열 축열 시스템을 이용한 난방시스템의 열특성을 예측하기 위한 모형의 예측치와 실험치를 다음과 같이 비교 분석하였다.

##### (1) 온실내 공기 온도

그림 8은 열펌프-잠열축열 난방 시스템의 실내 공기온도에 대한 이론치와 실험치의 비교 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 시작점에서 수치해가 2.5°C 정도 높게 나타난 것을 제외하고는 이론치와 실험치 편차가 1.0°C 이내에서 잘 일치하였다. 초기 시작점에서 차이가 나는 것은 온실 내 태양강도의 투과율이 오전에는

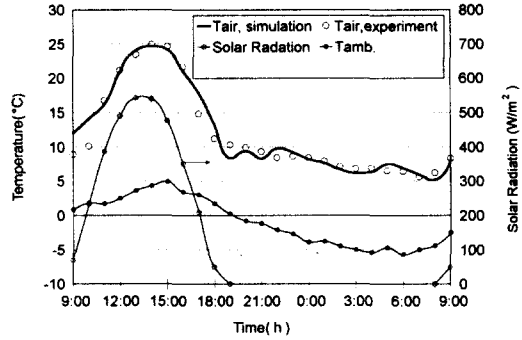


Fig. 8 Comparison between the predicted and measured air temperatures in the greenhouse equipped with heat pump and latent heat storage system.

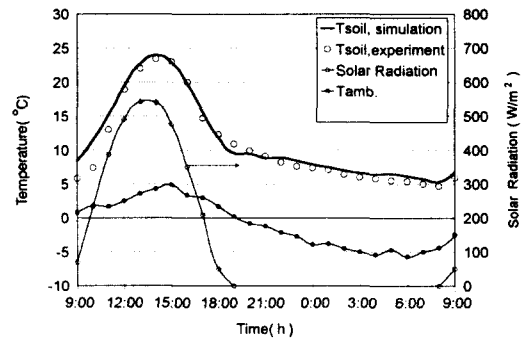


Fig. 9 Comparison between the predicted and measured soil surface temperatures in the greenhouse equipped with heat pump and latent heat storage system.

응축과 결로에 의해 차이가 많으나 투과율 입력시 겨울철 측정 평균값을 입력했기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

##### (2) 온실내 토양의 표면온도

그림 9는 열펌프-잠열축열 난방 시스템의 실내 토양 표면온도에 대한 이론치와 실험치의 비교 결과를 보여 주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 초기 시작점에서 2시간 동안을 제외하고 이론치와 실험치 편차가 1.0°C 이내에서 잘 일치하였다.

초기 시작점에서 차이가 나는 것은 온실 내 태양강도의 투과율이 오전에는 응축과 결로에 의해 차이가 많으나 투과율 입력시 겨울철 측정 평균값

을 입력했기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

(3) 피복재 표면 온도 예측

그림 10은 열펌프-잠열축열 난방 시스템의 온실 피복재 온도에 대한 이론치를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 온실 피복재 온도가 14.2℃일 때 실내 공기 온도는 24.9℃, 실외 온도는 4.3℃로서 실내 온도와 실외 온도의 평균값인 14.6℃보다 0.4℃ 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 온실 피복재 온도가 최저를 나타내는 오전 6시경에는 -1.0℃로써 실내 온도와 실외 온도의 평균값인 0.3℃보다도 1.3℃ 낮은 온도를 보여주고 있다. 그러므로 온실 피복재 온도는 실내 온도와 외기 온도의 평균값보다 약 0.4℃~1.3℃ 정도 낮은 값으로 사료된다.

(4) 온실내 열에너지 유동

그림 11은 열펌프-잠열축열 난방 시스템의 에너지 유동에 관한 이론치와 실험치의 비교 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 토양에 의한 에너지 유동은 주간 11시~15시 사이에 이론치가 더 많이 저장한 것으로 나타났으며, 야간 17시~20시 사이에 이론치 방열량이 최대 167.2kJ/m<sup>2</sup> h 큰 것으로 나타난 것을 제외하고 대체적으로 일치하는 경향을 보였다.

한편, 온실내 공기에 저장된 에너지와 손실된 에너지는 이론치와 실험치가 잘 일치하였다. 따라서 에너지 유동에 관한 이론치와 실험치는 전체적으로 잘 일치한 것으로 사료된다.

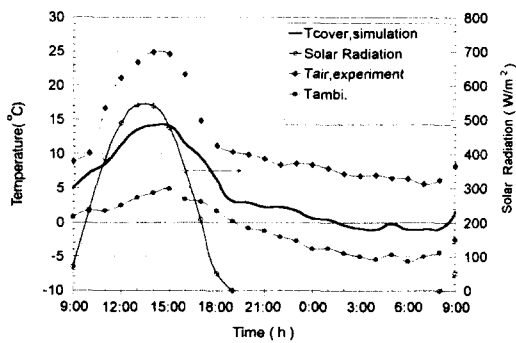


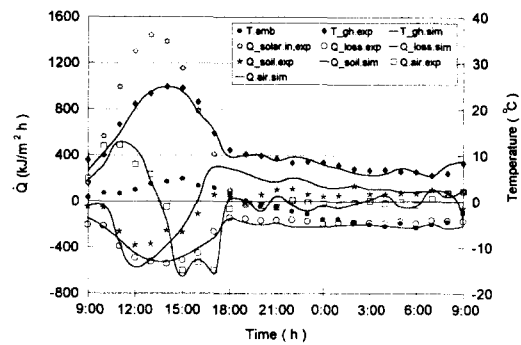
Fig. 10 The predicted cover temperatures in the greenhouse equipped with heat pump and latent heat storage system.

나. 열 특성분석

(1) 열흐름 특성

그림 12는 잠열 축열조와 열펌프가 설치된 온실내에 공급되고 있는 열이 축열 매체에 저장되고 있는 열과 온실로부터 손실되는 열흐름과 외기온도 변화를 보여주고 있다.

최소 209kJ/m<sup>2</sup> h와 최대 295.8 kJ/m<sup>2</sup> h의 태양열이 9시간 동안 온실내에 공급되었고, 250.8~418kJ/m<sup>2</sup> h의 열이 열펌프에 의하여 24시간 동안 계속해서 온실내에 공급되었다. 이 공급되는 열에너지중 주간에는 334.4~585.2kJ/m<sup>2</sup> h의 열이 토양



※T<sub>gh</sub>: Greenhouse temperature, exp: experimental value, sim: simulation value

Fig. 11 Comparison between the predicted and measured thermal energy flows in the greenhouse equipped with heat pump and latent heat storage system.

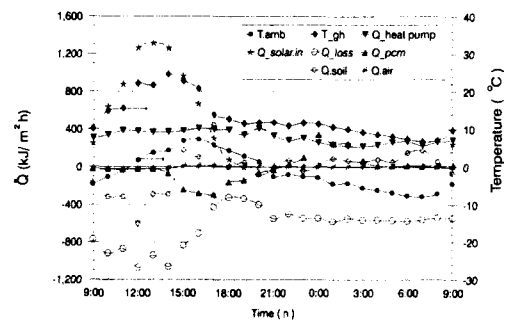


Fig. 12 Heat flow and air temperature variation in the greenhouse equipped with heat pump and latent heat storage system.



에 저장되고, 잠열 축열재에는  $83.6 \sim 292.6 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$  저장되었으며, 공기 중에는 아주 적은 양이 저장되고 있었다. 야간에는 열펌프에서  $250.8 \sim 292.6 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$ 의 열에너지가 방출되었고, 잠열축열재에서  $83.6 \sim 334.4 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$ , 토양에서  $83.6 \sim 250.8 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$ 가 방열 되어 그린하우스 난방열원으로 활용되고 있었다.

열손실은 주간에  $418 \sim 1,086.8 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$ 가 온실 밖으로 손실되었으며, 야간은  $334.4 \sim 543.4 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$ 가 온실 밖으로 손실되어 주간에 열손실이 야간보다 큰 것을 알 수 있었다. 이 결과는 가능한 한 주간에 잉여 에너지를 많이 축열하는 것이 주간에 열손실을 줄이는 것은 물론이고, 저장열을 야간에 난방열로 많이 사용할 수 있는 2중 효과를 얻을 수 있음을 시사해 주었다.

외기온은 주간에  $-4 \sim 8^\circ\text{C}$ 를 나타냈고, 야간에는  $-8 \sim 0^\circ\text{C}$ 를 나타냈지만, 온실 내부 공기온도는 온실 내부로 공급되는 열원에 힘입어 낮은 외기온을 이기고 주간에  $14 \sim 25^\circ\text{C}$ 로 유지되었으며, 야간에는  $7 \sim 14^\circ\text{C}$ 로 보존되는 결과를 얻을 수 있었다. 이상과 같은 에너지 분석결과 열펌프-잠열 축열 난방 시스템의 난방효과는 최저 외기온이  $-8^\circ\text{C}$ 일 때 설정온도  $7^\circ\text{C}$  이상을 유지할 것으로 기대되며, 농업환경 보존에도 크게 기여할 것으로 판단되었다.

(2) 전(全)열전달 특성

그림 13은 잠열 축열조와 열펌프 시스템이 온실 내에 축열 및 가열시스템으로 설치된 경우의 누적 열흐름 특성과 실온변화를 나타내고 있다.

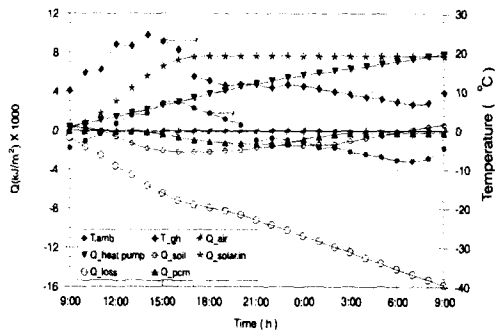


Fig. 13 Characteristics of accumulated heat transfer and temperature variation in the greenhouse equipped with heat pump and latent heat storage system.

그림에 나타내고 있는 전(全)열전달은 식(10)를 시간으로 적분하여 분석한 결과이며, 이 그림에서 보는 바와 같이 온실에 공급된 쏠태양에너지는 주간 9시간 동안  $7942 \text{kJ/m}^2$ 이었으며, 열펌프에 의하여 공급된 쏠열량도 쏠태양에너지와 거의 같은  $7942 \text{kJ/m}^2$ 으로 나타났다.

토양에 저장된 쏠열량은  $2090 \text{kJ/m}^2$  정도이고, 16시까지 축열 되었으며 그후 방열되기 시작하여 다음날 아침 6시에 모두 소진되었다. 잠열 축열재에 저장된 쏠열량은 그후 방열되기 시작하여 다음날 아침 9시까지 유지되었다.

온실 전열 손실량은 주간에  $8360 \text{kJ/m}^2$ , 야간에  $7524 \text{kJ/m}^2$ 으로 주야간 합해서  $15884 \text{kJ/m}^2$ 의 쏠손실 열량을 보이고 있으며, 주간이 야간보다 1.11배 큰 것을 알 수 있다.

이상과 같은 열흐름의 결과로 나타난 실온은  $7^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 의 변화를 보였으며, 최저 외기온을 나타내고 있는 07시에 실온이  $7^\circ\text{C}$ 로 실온과 외기온차는  $15^\circ\text{C}$ 를 보였다.

이로써 주간에 열손실을 감소시키는 방법을 연구하고, 축열 시스템을 개발하는 것이 에너지 절약 방법임을 시사하고 있다.

4. 결 론

본 연구는 온실의 자연에너지 난방시스템 개발을 위한 기초 자료를 얻기 위하여 열펌프와 잠열 축열 시스템을 이용한 온실 난방시스템을 구성하였으며, 시스템에 대한 온실 내부의 공기온도, 토양 표면 온도, 피복재 온도 등을 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고, 실험에 의하여 이를 검증하였다. 온실 난방시스템의 열특성 분석을 위하여 온도, 태양강도, 상대습도, 열용량 등의 주요 인자를 변수로 한 시뮬레이션 모델의 출력과 실험 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템에서 시뮬레이션에 의한 온실 내부 공기온도는 실험치와 최대편차가  $1^\circ\text{C}$ 이내에서 잘 일치하였다.
- 2) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템에서 시뮬레이션에 의한 온실 토양 표면온도는 실험치와 최대편차가  $1^\circ\text{C}$ 이내에서 잘 일치하였다.
- 3) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템에서 시뮬레이션에 의한 온실 열에너지 유동은 실험치와 최대편차가  $167.2 \text{kJ/m}^2 \text{ h}$ 이내에서 잘 일치하였다.

다.

4) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템의 열손실은 주간과 야간의 열손실이 야간보다 1.11배 많은 것으로 나타났다.

5) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템에서 주간에는 실온이 설정 온도(7℃)보다 높았으나, 야간에 최저 외기온이 -8℃일 때 설정온도 7℃를 유지할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. Chandra P. 1982. Thermal Radiation Exchange in a Greenhouse with a Transmitting Cover, J. agric. Engng Res. 27:261-265.
2. Desmarais G., C. Ratti and G. S. V. Raghavan, 1999. Heat Transfer Modelling of Greenhouses. Solar Energy Vol. 65. No. 5:271-284.
3. Song, H. K., J. G. Ro, J. K. Park, Y. K. Kang and H. C. Kim. 1998. A study on the heat pump latent heat storage system for the greenhouse heating. Journal of the KSAM. Vol 23(2): 147-156.(in Korea)
4. Ryou, Y. S. 1992. Development of solar energy-latent heat storage system for greenhouse heating. Ph. D Diss., Chungbuk National University.(in Korea)
5. 日本施設園藝協會, 1989. 施設園藝における潜熱蓄熱方式導入の手引. 社団法人日本施設園藝協會.
6. 日本熱物性學會編, 1990. 熱物性ハンドブック. 株式會社養賢堂.