

열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템의 열특성과 시뮬레이션 모델개발

Thermal Characteristics and Simulation Model Development for Greenhouse Heating System with Heat Pump

노정근 송현갑
정희원 정희원
J. G. Ro H. K. Song

SUMMARY

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

1. The expected values of inside air temperature for the heating system with heat pump were very much close to the experimental values.
2. In the heating system with heat pump, the expected values of day time surface temperature of soil by computer simulation were very much similar to the measured values, but those of night time were higher than the measured value by at most 2.0°C.
3. The simulation model predicted temperature of greenhouse film as of 1°C below than the mean value of ambient air and greenhouse air temperature.
4. Heat loss value of daytime was found to be larger than that of night time as much as 1.3 to 2.3 times for the heating system with heat pump.
5. In the heating system with heat pump, when the lowest ambient temperature was -8°C~-7°C the air temperature of greenhouse was 5°C~6°C, thus the heat pump heating system contributed in greenhouse heating by 13°C.

Keywords :

1. 서 론

지금까지 우리 나라 대부분의 겨울철 시설원에

난방은 화석 에너지에 의존하고 있기 때문에 국제
유가변동에 따라 시설농업 생산에 직·간접적인
영향을 받고 있으며, 화석에너지에서 발생하는 공

This article was submitted for publication in February 2001; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in March 2001. The authors are J. G. Ro, Research Assistant, and H. K. Song, Professor, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University. The corresponding author is J. G. Ro, research assistant, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University.

해물질은 농업과 농촌 환경을 오염시키고 있어, 이를 보호하기 위한 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 열펌프를 이용한 난방시스템은 자연 에너지를 활용하므로써 공해물질 및 농촌환경 오염을 줄일 수 있고, 국제 유가상승에 의한 시설농업 생산비 증가의 직접적인 영향을 감소시킬 수 있다. 이에 대한 연구로 1985년 古在豊樹의 4인은 그린하우스에서 열펌프의 이용을 연구하였고, 1989년 佐々木皓는 열펌프에 의한 그린하우스 열환경을 조절하였으며, 1996년 Omer Comakli 등 2인은 열펌프가 보조된 태양열의 열역학적 모델을 연구하였다. 한편 그린하우스에 대한 연구로서는 인도의 P. Chandra는 1982년에 그린하우스 커버의 복사 열교환을 연구하였으며, 포르투갈의 Ana Maria Silva 외 1인은 1987년에 그린하우스의 복사 열손실을 연구 발표하였다. 따라서, 우리나라의 겨울철과 같은 저온에서도 실용화가 가능한 자연 에너지를 이용할 수 있는 시스템을 개발할 필요성이 있다.

그러므로 본 연구에서는 열펌프에 의한 그린하우스 난방 시스템의 열특성을 예측할 수 있는 모델링을 개발하고, 열펌프를 이용한 그린하우스 난방시스템을 설치하여 모델링 검증 및 실험을 통한 열특성 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시뮬레이션 모델 개발

열펌프 난방시스템에 대한 열평형 이론을 정립하고 수치 해석에 의하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고자 그림 1, 2, 3에서 보는 바와 같이 개략도와 열저항 회로망을 주간과 야간으로 구분하여 구성하였으며, 그린하우스의 피복재, 내부 공기, 토양표면, 열펌프 중 열펌프를 제외한 인자의 열평형 방정식을 구성하였다. 열펌프에 의한 열량은 성능계수(COP)와 전력소모량의 곱에 의해 열량이 환산되도록 하였다. 이 열평형방정식은 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 수치해석을 하였고 수치해와 실험치를 비교하여 수치해의 타당

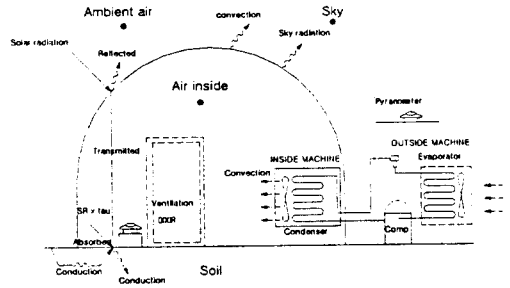


Fig. 1 Schematic diagram of energy flows in greenhouse heating system by heat pump(daytime).

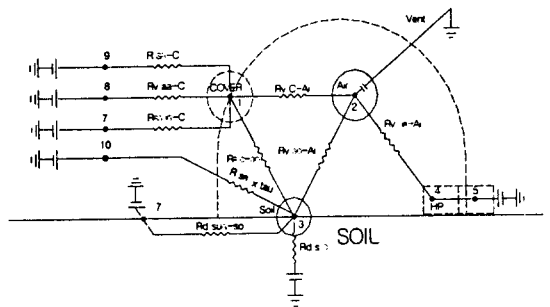


Fig. 2 Complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by heat pump(daytime).

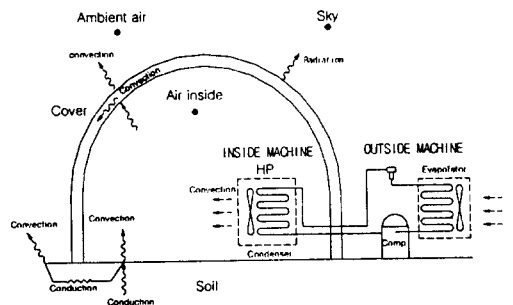


Fig. 3 Schematic diagram of energy flows in greenhouse heating system by heat pump(night time).

성을 검증하고자 하였다.

시뮬레이션 모델을 위하여 C 언어를 사용하였으며, 겨울철(11월~2월)의 기후조건이 유사한 여

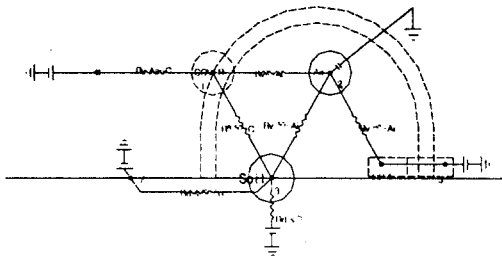


Fig. 4 Complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by heat pump(night time).

러 날을 선정하여 온도, 태양강도, 상대습도, 토양 수분 함량, 열펌프의 성능계수, 소모전력량 등을 자료로 하였다. 한편 방사율 등은 문헌⁽⁴⁾에서 인용하였다. 토양은 사양토로 건조한 상태를 유지하였고, 작물이 없는 나대지 상태였으며, 열평형 방정식에서도 작물이 없는 것으로 하였다.

나. 열평형 방정식

(1) 그린하우스 피복재를 중심으로 한 열평형 방정식

그린하우스 피복재에서의 열평형 방정식은 식 (1), (2)에서 보는 바와 같이 주간 7개, 야간 3개의 항으로 구성된다.

(가) 주간

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

(나) 야간

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

여기서,

Q_{S-C}^{SR} : 그린하우스 피복재에 도달한 태양에 너지 흡수율

Q_{C-SKY}^{rad} : 피복재와 천공과의 복사 열전달

Q_{C-SUG}^{rad} : 피복재와 그린하우스 지표면과의 복사 열전달

Q_{C-Aa}^{conv} : 피복재와 대기와의 대류 열전달

Q_{C-Ai}^{conv} : 피복재와 그린하우스 내부 공기와의 대류 열전달

Q_{C-SO}^{rad} : 피복재와 그린하우스 내부 지표면과의 복사 열전달

Q_{WC} : 피복재에서의 수분 이동 (응축 혹은 증발)에 의한 열교환

(2) 그린하우스 내부 공기를 중심으로 한 열평형 방정식

그린하우스 내부 공기를 중심으로 한 열평형 방정식은 식(3), (4)에서 보는 바와 같이 주간 3개, 야간 4개의 항으로 구성된다.

(가) 주간

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

(나) 야간

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

여기서,

Q_{Ai-C}^{conv} : 내부 공기와 피복재와의 대류 열전달

Q_{Ai-SO}^{conv} : 내부 공기와 그린하우스 지표면과의 대류 열전달

Q_{Ai-HP}^{conv} : 열펌프에 의한 대류 열전달

Q_{Ai-Aa}^{vent} : 주·야간의 내부 공기와 외부 공기와 의 환기에 의한 열전달

(3) 그린하우스 내부 지표면을 중심으로 한 열평형 방정식

그린하우스 내부 지표면을 중심으로 한 열평형 방정식은 식(5), (6)에서 보는 바와 같이 주간 5개, 야간 4개의 항으로 구성된다.

(가) 주간

$$Q_{SKY-SO}^{SR} + Q_{SO-SD}^{cond} + Q_{SO-Ai}^{conv} + Q_{SO-C}^{rad} + Q_{WS} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

(나) 야간

$$Q_{SO-SD}^{cond} + Q_{SO-Ai}^{conv} + Q_{SO-C}^{rad} + Q_{WS} = 0 \dots\dots (6)$$

여기서,

Q_{sky-SO}^{SR} : 그린하우스 내부지표면의 태양에너지 흡수율

- Q_{SO-SD}^{cond} : 그린하우스 지표면과 지층과의 전도 열전달
- Q_{SO-Ai}^{conv} : 그린하우스 지표면과 내부 공기와의 대류 열전달
- Q_{SO-C}^{rad} : 그린하우스 지표면과 피복재와의 복사 열전달
- Q_{us} : 그린하우스 지표면에서의 수분 증발 잠열

(4) 물질평형방정식

$$M_{uS} + M_{uC} + M_{uV} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

여기서,

M_{uS} : 그린하우스 내부 지표면에서의 수분 증발량(kg/sec)

M_{uC} : 피복재에서의 수분 이동량 (kg/sec)

M_{uV} : 환기에 의한 수분 이동량 (kg/sec)

다. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 열펌프⁽¹⁾는 공기-공기형으로 제작한 것으로 주요한 사양을 표 1로 나타내었다.

본 열펌프는 실내장치와 실외장치로 구성하였으며, 실외장치로는 증발기, 압축기, 팽창밸브, 증발

Table 1 Specification of heat pump for the experimental equipment

Component		Interior unit	Exterier unit
Electronic power		3 Phase 220 V	60 Hz
Con-denser	Heating	5500-9000kcal/h	
	Cooling	5500~9000 kcal/h	
Com-pressor	Type	-	Completely closed type
	Net power	-	3 PS
Air heat exchanger		Copper pipe, Plate fin type	
Dehumidifier		-	220 V, 0.6 kw×3 EA
Eva-po-rator	Capacity	-	46 CMM
	Net power	-	3∅ 0.2kW 6p
	size	-	130cm×50 cm×20cm

기판, 사방밸브로 구성되어 있고 실내 장치로는 응축기인 온풍 토출 장치로 되어있다. 실외장치인 사방밸브를 변환함으로써 냉매의 흐름을 역으로 작동하게 하여 증발기는 응축기로, 응축기는 증발기의 기능을 한다. 이때는 그린하우스 내를 냉방시켜 여름에 냉방기로도 사용할 수 있다. 또한 이와 같은 기능은 난방 운전시에 실외장치인 증발기에 생긴 성애를 응해시키는 역할도 할 수 있다. 압축기의 정격출력은 3.0 PS 였고 열펌프의 실내 장치인 응축기는 그린하우스 입구에 설치하였으나 덕트를 통해 열풍을 중앙부로 향하도록 하였다. 그림 5는 열펌프 난방시스템의 개략도를 보여주고 있으며 그린하우스의 크기는 가로 14m 세로 7.0m 높이가 3.4m로 하였으며 바닥면적은 97m² 이었다. 이때 보온비는 0.65이다. 난방 설정온도는 최저온도를 7℃ 이하가 되지 않도록 설정하였다. 또한 그림 6과 같이 태양에너지만을 이용한 그린하우스 난방시스템을 설치하여 열펌프에 의한 난방시스템과 비교할 수 있도록 하였다.

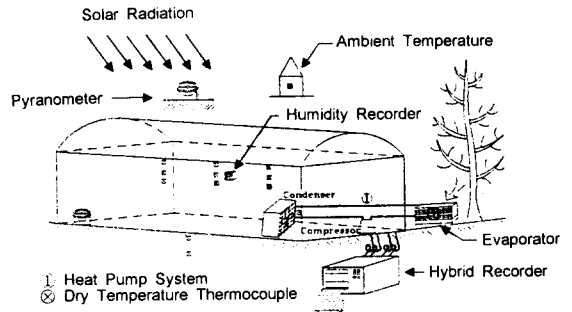


Fig. 5 Greenhouse heating system by heat pump system.

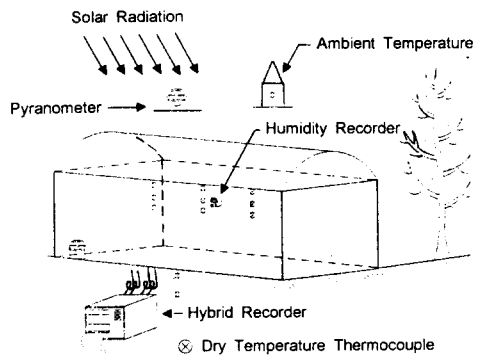


Fig. 6 Greenhouse heating system by solar energy without heat pump.

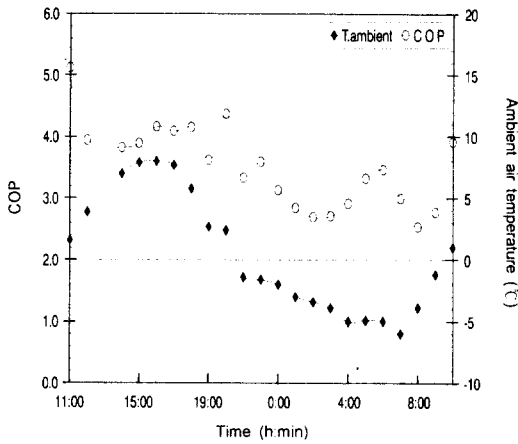


Fig. 7 COP of the heat pump with ambient air temperature.

본 실험에서 측정 요소는 대기온도, 그린하우스 실내온도(상중하 각 4지점), 그린하우스내의 상대습도, 그린하우스 내·외 토양의 깊이별 온도(표면, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 70cm, 80cm), 그린하우스 내·외 수평면 태양강도, 열펌프 응축기의 입·출구온도, 압축기 입·출구 냉매온도, 증발기 입·출구 냉매온도, 팽창밸브 입·출구 냉매온도, 풍량, 소비전력 등이다. 열펌프의 소비전력은 압축기 및 기타장치의 전력량을 적산 전력계로 계측하였다.

응축기에서 방출되는 풍량은 응축기팬 출구 32점에서 온도와 풍속을 측정하였다. 풍속은 열선 풍속 계측기로 측정하였다. 열펌프로부터의 방열량은 풍량, 공기비열, 응축기 흡입구와 배출구의 온도차에 의한 현열 교환량으로 구했다. 성능계수(COP)는 주로 연속 운전시킨 상태에서 방열량과 소비전력을 열량으로 환산하여 구하였다.

열펌프 성능은 그림 7과 같이 외기온이 0°C 이상인 주간인 경우 COP가 4.0수준이었고 외기온이 0°C 이하인 야간의 경우에는 COP가 3.0수준으로 열원인 외기온에 영향을 크게 받고 있음을 쉽게 알 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션 모델 검증

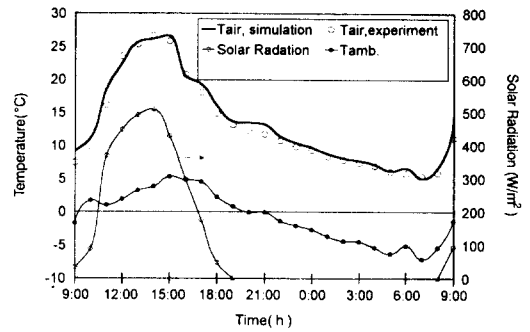


Fig. 8 Comparison between the theoretical and experimental values of the air temperature variation inside greenhouse heated by heat pump system.

열펌프 난방 시스템의 열전달 현상을 예측하기 위한 시뮬레이션의 이론치와 실험치를 다음과 같이 비교 분석하였다.

(1) 그린하우스내 공기온도

그림 8은 열펌프에 의한 그린하우스 난방 시스템의 실내 공기온도에 대한 이론치와 실험치의 비교 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이론치와 실험치가 아주 잘 일치하였다. 초기 시작점에서 차이가 나는 것은 그린하우스 내 태양강도의 투과율이 오전에는 응축과 결로에 의해 차이가 많으나 투과율 입력시 겨울철 측정 평균값을 입력했기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

(2) 그린하우스 내 토양 표면 온도

그림 9는 열펌프에 의한 그린하우스 난방 시스템의 실내 토양 표면온도에 대한 이론치와 실험치의 비교 결과를 보여 주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 주간에는 이론치와 실험치가 잘 일치하였고, 야간에는 일부 구간에서 이론치가 실험치보다 약간 높게 나타났지만, 비교적 잘 일치하였다. 야간에 이론치가 일부 구간에서 높게 나타난 것은 열펌프의 성능계수(COP)를 시간대별 평균치를 사용함으로써 외기온과 기후조건에 따른 성능계수의 차에 의해 발생한 것으로 사료된다.

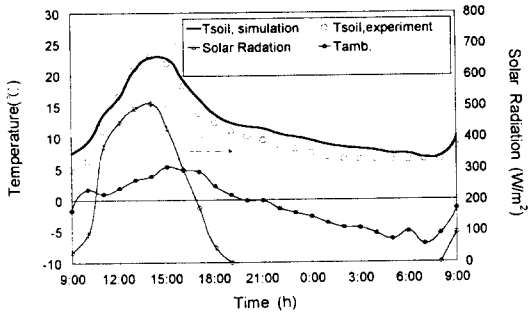


Fig. 9 Comparison between the theoretical and experimental values of the soil surface temperature variation inside greenhouse heated by heat pump system.

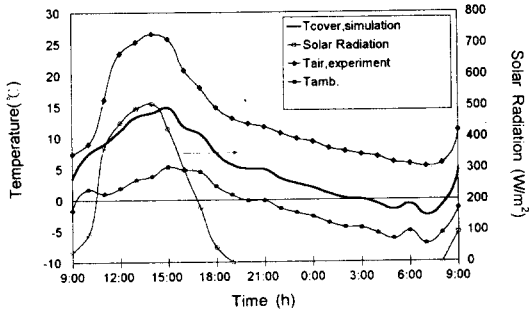


Fig. 10 The theoretical values of greenhouse cover temperature variation in case of greenhouse heated by heat pump system.

(3) 피복재 표면온도 예측

그림 10은 열펌프에 의한 그린하우스 난방 시스템의 그린하우스 피복재에 대한 이론치를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 그린하우스 피복재 온도가 최대 14.8℃일 때 실내 공기온도는 최대 25.8℃, 실외 온도는 5.3℃로서 실내 온도와 실외온도의 평균값인 15.5℃ 보다 0.7℃ 낮은 값을 나타내고 있는 바와 같이 전 구간에 걸쳐 평균 온도보다 약간 낮은 것을 볼 수 있다. 그러므로 그린하우스 피복재 온도는 실내 온도와 외기 온도의 평균값보다 약 1℃ 정도 낮은 값으로 사료된다.

나. 열특성 분석

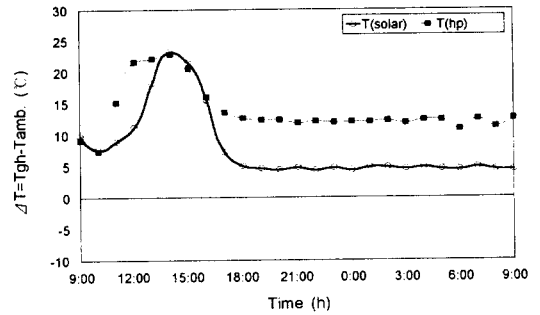


Fig. 11 Greenhouse heating effect on the basis of the ambient air temperature.

(1) 난방효과 비교

그림 11은 그린하우스 난방효과를 그린하우스의 실온과 외기온과의 차로 분석한 결과이다.

그림과 같이 주간에는 두 시스템 모두 난방효과가 좋았으나, 주간에서 야간으로 전환되는 17시부터 다음날 오전9시까지의 열펌프를 이용한 그린하우스 난방 시스템이 13℃의 난방효과를 나타냈으나, 태양에너지만을 이용한 그린하우스 난방시스템은 5℃를 나타내므로서, 열펌프를 이용한 그린하우스 난방 시스템의 난방효과가 8℃ 높은 것으로 나타났다. 이 분석 결과로 보아 겨울철 그린하우스 난방에는 열펌프를 이용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

(2) 열흐름 특성 분석

그림 12는 그린하우스 내에 열펌프를 설치한 경우의 열흐름 특성과 실온변화를 보여주고 있으며, 그림 13은 가열 시스템이 없는 경우의 열흐름 특성과 실온 변화를 보여주고 있다. 그림 12에서는 292.6~1588.4 kJ/m².h의 태양열이 9시간 동안 그린하우스 내에 공급되었고, 250.8~418 kJ/m².h의 열이 열펌프에 의하여 24시간 동안 계속해서 그린하우스 내에 공급되었다. 그 중에서 야간에는 열펌프에서 250.8~334.4 kJ/m².h의 열에너지가 방출되어 그린하우스 난방열원으로 활용되고 있었다. 이 공급되는 열에너지중 주간에는 167.2~585.2kJ/m².h의 열이 토양과 공기 중에 저장되고 있었다.

손실 열량은 주간에 585.2~1254kJ/m²·h가 그린

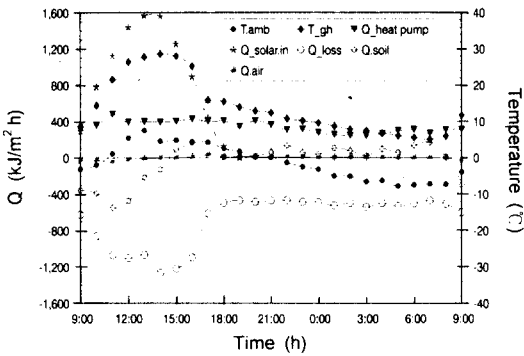


Fig. 12 Heat flow and air temperature variation in the greenhouse installed air-to-air type heat pump.

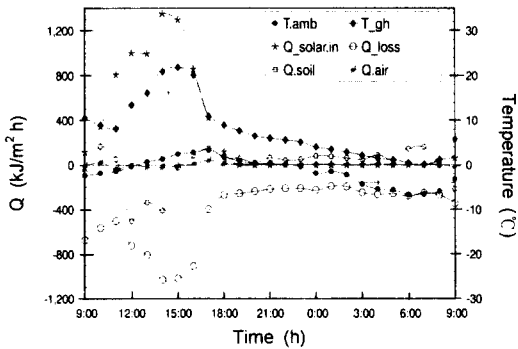


Fig. 13 Characteristics of the thermal energy flow and temperature variation in the greenhouse without heating system.

하우스 밖으로 손실되었고, 야간에는 438.9~543.4kJ/m²·h의 열에너지가 그린하우스 밖으로 손실되어 야간보다 주간 열손실이 1.33~2.3배 큰 것을 알 수 있었다.

외기온은 주간에 -4~7℃였고, 야간에는 -8~2℃이었다. 최저 외기온은 05~07시 사이에 -8℃~-7℃였으며, 이때의 그린하우스내 공기 온도는 5~6℃로 실온과 외기온 차는 13℃를 보였으며, 이는 그린하우스 내부로 공급되는 열원에 힘입어 낮은 외기온을 이기고 그린하우스 내부 공기 온도가 주간에는 8~28℃로 유지되었으며, 야간에는 6~14℃로 보온되는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 최저 외기온 구간에서 최저 설정온도 보다

1~2℃ 낮은 것은 야간에 보온커튼의 틈새차단을 완벽하게 하지 못하여 낮아진 것으로 사료되며, 보조 열원으로서의 역할을 할 수 있는 축열재를 열펌프와 동시에 사용하면 최저 설정온도 이상을 유지할 것으로 기대된다.

한편, 그림 13의 태양에너지만을 이용한 시스템에서는 공급된 열에너지중 418~501.6kJ/m²·h의 열이 토양과 공기중에 저장되었고, 야간에는 토양에서 41.8~167.2kJ/m²·h의 열이 방출되어 난방열원으로 이용되었음을 나타내었다. 이 시스템의 손실열량은 주간에 418~1,045kJ/m²·h가 그린하우스 밖으로 손실되었고, 야간에 209~250.8 kJ/m²·h의 열 에너지가 그린하우스 밖으로 손실되어 야간보다 주간 열손실이 2.0~4.2배 많음을 알 수 있다.

이상의 실험 분석 결과는 가능한 한 주간의 잉여 에너지를 축열할 필요성을 시사해 주었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 그린하우스의 자연에너지 난방시스템 개발을 위한 기초 자료를 얻기 위하여 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템을 구성하였으며, 난방 시스템에 대한 그린하우스 내부의 공기온도, 토양온도, 토양 수분 함량 등을 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고, 실험에 의하여 이를 검증하였다. 그린하우스 난방 시스템의 열특성과 토양의 열특성 분석을 위하여 온도, 태양강도, 상대습도, 수분 함량, 열 용량 등의 주요 인자를 변수로 한 시뮬레이션 모델의 출력과 실험 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템에서 실내공기온도는 이론치와 실험치가 잘 일치하였다.
- 2) 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템에서 토양표면온도는 주간에는 이론치와 실험치가 잘 일치하였고, 야간에는 이론치가 실험치보다 약간 높게 나타났다.
- 3) 그린하우스의 피복재 표면온도는 실내온도와

실외온도의 평균값보다 약 1℃ 낮은 것으로 예측되었다.

4) 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템에서 주간의 열손실은 야간의 열손실보다 1.33~2.3배 큰 것으로 나타났다.

5) 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템에서 최저 외기온이 -8℃~-7℃일때, 그린하우스 내 공기 온도는 5~6℃로 실온과 외기온 차는 13℃를 나타내므로서, 열펌프에 의한 난방이 가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 송현갑. 1997. 자연에너지를 이용한 그린하우스 난방시스템 개발. 농수산 현장 애로 기술개발 최종보고서.
2. Ana Maria Silva, Rui Rosa. 1987. Radiative Heat Loss inside a Greenhouse. *J. agric. Engng Res.* 37:155-162.
3. Chandra P. 1982. Thermal Radiation Exchange in a Greenhouse with a Transmitting Cover, *J. Agric. Engng Res.* 27:261-265.
4. Nishizaki N., K. Kokuma, K. Sakagami, H. Okazaki and A. Mitsubara. 1980. Japanese Patent Kokai 55-142, 076.
5. Omer Comakli, Mahmut Bayramoglu and Kamil Kaygusuz. 1996. A Thermo-dynamic Model of a Solar Assisted Heat Pump System With Energy Storage. *Solar Energy.* Vol. 56, No. 6:485-492.
6. 古在豊樹, 林眞紀夫, 兒玉友孝, 權在永, 渡部一郎. 1985. 溫室におけるヒートポンプ 利用(3). *農業氣象* 41(3):231-240.
7. 佐々木皓二. 1989. 空氣-空氣型ヒートポンプによる溫室環境調節. *農業施設* 20(1):121-127.