

# 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템의 시뮬레이션 모델개발

## Development of Simulation Model for Greenhouse Heating System with Heat Pump

노정근\*                      송현갑\*  
정회원                      정회원  
J. G. Ro                      H. K. Song

### 1. 서 론

현재 사용되고있는 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리 나라로서는 수요자들로부터 보다 안정적인 에너지 수급과 저렴한 가격으로 공급해줄 수 있는 방안을 요구받고 있다. 더욱이 우리 나라의 지난 경제 위기와 최근의 국제 유가 상승으로 에너지 수급의 불안정은 물론이고 난방 비용의 증가를 가져왔으며 특히 그린하우스를 이용하여 시설원예 농업을 하는 농민들에게 큰 타격을 주었다.

지금까지 우리 나라 대부분의 겨울철 시설원예 난방은 화석 에너지에 의존하고 있기 때문에 국제 유가변동에 따라 시설농업 생산에 직·간접적인 영향을 받고 있으며 화석에너지에서 발생하는 공해물질은 농업과 농촌 환경을 오염시키고 있어, 이를 보호하기 위한 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 국내외적으로 대체 에너지를 개발하여 화석 에너지의 의존도를 줄이려는 노력이 계속되고 있으나, 자연 에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 획기적인 기술이 개발되지 못하고 있기 때문에 자연상태에 잠재되어 있는 깨끗하면서 풍부한 에너지원인 자연 에너지를 충분히 활용하지 못하고 있다. 따라서, 우리 나라의 겨울철과 같은 저온에서도 실용화가 가능한 자연 에너지를 이용할 수 있는 시스템을 개발하여야 할 필요성이 있다.

그러므로 본 연구에서는 열펌프에 의한 그린하우스 난방 시스템의 열특성을 예측할 수 있는 모델링을 개발하였으며, 본 연구실에서 개발된 열펌프를 이용한 그린하우스 난방시스템을 설치하여 모델링 검증 및 화석 연료로부터의 탈피, 유가 변동에 따른 영향을 최소화하여 안정적인 시설농업을 할 수 있도록 하기 위한 기초자료를 얻기위하여 실험을 통한 열특성을 분석하였다.

---

\* 충북대학교 농업기계공학과

## 2. 재료 및 방법

### (1) 시뮬레이션 모델 개발

열펌프 난방 시스템에 대한 열평형 이론을 정립하고 수치 해석에 의하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고자 열펌프 난방 시스템의 열저항 회로망을 구성하였다. 그리고 그린하우스의 피복재, 내부 공기, 토양표면, 열펌프 중 열펌프를 제외한 인자의 열평형 방정식을 구성하였다. 열펌프에 의한 열량은 성능계수(COP)와 전력소모량의 곱에 의해 열량이 환산 되도록 하였다. 이상과 같이 각 절점을 미지수로 하여 3개의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 수치해석을 하였고 수치해와 실험치를 비교하여 수치해의 타당성을 검증하였다.

열펌프 난방 시스템의 열에너지 이동현상을 그림 1, 2에서 보는 바와 같이 열저항 회로망을 주간과 야간으로 구분하여 구성하였으며 이를 근거로 각 절점에서의 열에너지 평형 방정식을 정립하였다.

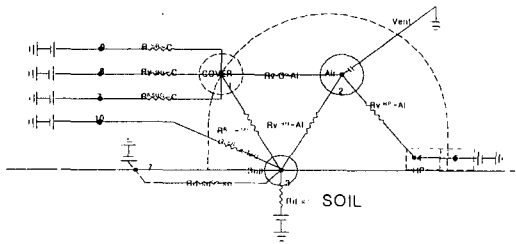


Fig.1 A complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by heat pump.(daytime)

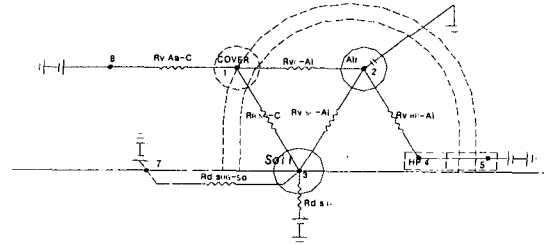


Fig.2 A complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by heat pump.(night time)

### (2) 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 표현된다.

(가) 주간

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

(나) 야간

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

여기서;

$Q_{S-C}^{SR}$  : 그린하우스 피복재에 도달한 태양에너지 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 온실 내부 공기와의 대류 열전달,  $Q_{C-SO}^{rad}$  : 피복재와 온실 내부 지표면과의 복사 열전달  
 $Q_{WC}$  : 피복재에서의 수분이동 (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 표현된다.

(가) 주간

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

(나) 야간

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

여기서;

$Q_{Ai-C}^{conv}$  : 내부 공기와 피복재와의 대류 열전달,  $Q_{Ai-SO}^{conv}$  : 내부 공기와 온실지표면과의 대류 열전달  
 $Q_{Ai-HP}^{conv}$  : 열펌프에 의한 대류 열전달,  $Q_{Ai-Aa}^{vent}$  : 주·야간의 내부 공기와 외부 공기와의 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 표현된다.

(가) 주간

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

(나) 야간

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

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,  $Q_{WS}$  : 그린하우스 지표면에서의 수분 증발 잠열

4) 물질평형방정식

물질 평형방정식은 식(7)과 같다.

$$M_{wS} + M_{wC} + M_{wV} = Q \text{-----(7)}$$

여기서;

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

$M_{wC}$  : 피복재에서의 수분 이동량 (kg/sec) ,  $M_{wV}$  : 환기에 의한 수분 이동량 (kg/sec)

(3) 실험장치 및 방법

그림 3은 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템의 개략도를 보여주고 있으며 그린하우스의 크기는 가로 14m 세로 7.0m높이 3.4m 로 하였으며 바닥면적은 97m<sup>2</sup> 이었다. 이때 보온비는 0.65이다. 난방 설정 온도는 최저온도를 7℃ 이하가 되지 않도록 설정하였다. 본 연구에 사용한 열펌프는 공기-공기형으로 제작한 것으로 실내 장치와 실외 장치로 구성하였다. 실외 장치인 사방밸브를 변환함으로써 냉매의 흐름을 역으로 작동하게 하여 증발기는 응축기로, 응축기는 증발기의 기능을 한다. 이때는 온실 내를 냉방시켜 여름에 냉방기로도 사용할 수 있다. 또한 이와 같은 기능은 난방 운전시에 실외 장치인 증발기에 생긴 성애를 응해시키는 역할도 할 수 있다. 압축기의 정격출력은 3.0 PS 였고 열펌프의 실내장치인 응축기는 온실입구에 설치하였으나 덕트를 통해 열풍을 중앙부로 향하도록 하였다.

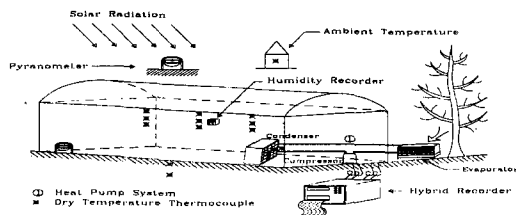


Fig.3 Greenhouse heating system by heat pump system.

3. 결과 및 고찰

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

1) 그린하우스 내 공기온도

그림 4는 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 5는 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 발생된 것으로 사료된다.

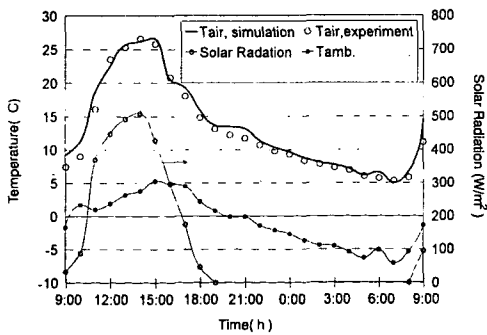


Fig.4 Comparison between the theoretical and experimental values of the air temperatures variation inside greenhouse heated by heat pump system.

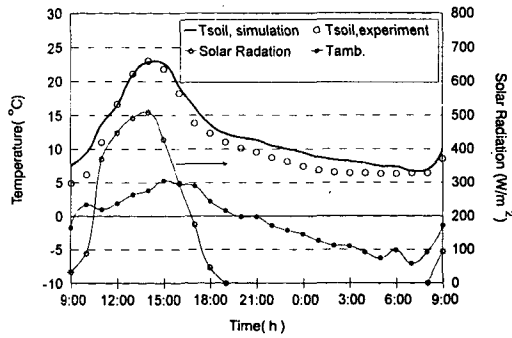


Fig.5 Comparison between the theoretical and experimental values of the soil surface temperatures variation inside greenhouse heated by heat pump system.

## 3) 피복재 표면온도 예측

그림 6은 열펌프에 의한 그린하우스 난방 시스템의 그린하우스 피복재에 대한 이론치를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실내 온도와 실외온도의 평균값인 15.5°C 보다 0.7°C 낮은 값을 나타내고 있다. 그러므로 그린하우스 피복재 온도는 실내 온도와 외기 온도의 평균값보다 약 1°C 정도 낮은 값으로 사료된다.

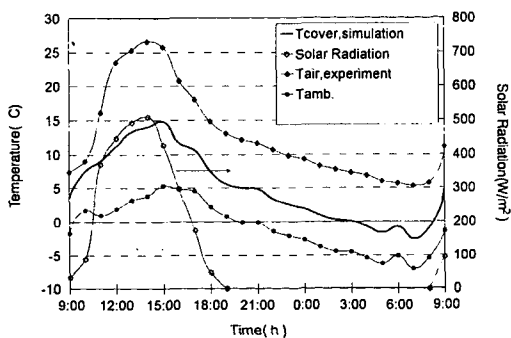


Fig.6 The theoretical values of greenhouse cover temperatures variation in case of greenhouse heated by heat pump system.

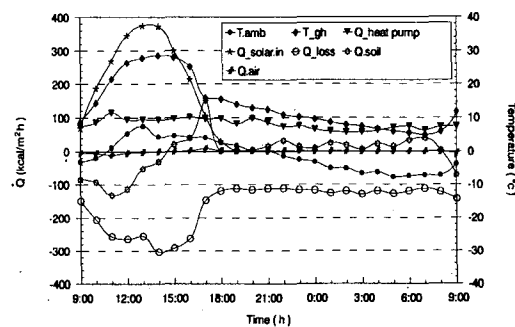


Fig. 7 Heat flow and air temperature variation in the greenhouse installed with air to air type heat pump with legal time.

#### (4) 난방 특성

그림 7은 그린하우스 내에 열펌프를 설치한 경우의 열흐름 특성과 실온변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 70~380 kcal/m<sup>2</sup> h의 태양열이 9시간 동안 그린하우스 내에 공급되었고, 60~100 kcal/m<sup>2</sup> h의 열이 열펌프에 의하여 24시간 동안 계속해서 그린하우스 내에 공급되었다. 그 중에서 야간에는 열펌프에서 60~80 kcal/m<sup>2</sup> h의 열에너지가 방출되어 그린하우스 난방열원으로 활용되고 있었다. 이 공급되는 열에너지중 주간에는 40~140kcal/m<sup>2</sup> h의 열이 토양과 공기 중에 저장되고 있었다.

손실 열량은 주간에 140~300 kcal/m<sup>2</sup> h가 그린하우스 밖으로 손실되었고, 야간에는 105~130kcal/m<sup>2</sup> h의 열에너지가 그린하우스 밖으로 손실되어 야간보다 주간의 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 공기온도가 주간에는 8~28℃로 유지되었으며, 야간에는 6~14℃로 보온되는 결과를 얻을 수 있었다.

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

### 5. 결 론

본 연구는 그린하우스의 자연에너지 난방시스템 개발을 위한 기초 자료를 얻기 위하여 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템을 구성하였으며, 그린하우스 난방 시스템에 대한 내부의 공기온도, 토양온도, 토양 수분함량 등을 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고, 실험에 의하여 이를 검증하였다. 그린하우스 난방 시스템의 열특성과 토양의 열특성 분석을 위하여 온도, 태양강도, 상대습도, 수분함량, 열용량 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 약1℃낮은 것으로 사료된다.
4. 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템에서 주간의 열손실은 야간의 열손실보다 1.33~2.3배 큰 것으로 나타났다.

5. 열펌프에 의한 그린하우스 난방시스템에서 최저 외기온이  $-8^{\circ}\text{C} \sim -7^{\circ}\text{C}$  일때, 그린하우스내 공기 온도는  $5 \sim 6^{\circ}\text{C}$ 로 실온과 외기온 차는  $13^{\circ}\text{C}$ 를 보여, 열펌프에 의한 난방이 가능한 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

1. 송현갑. 1997. 자연에너지를 이용한 온실난방시스템개발. 농수산 현장 애로 기술개발 최종보고서.
2. 송현갑, 노정근, 박종길, 강연구, 김현철. 1998. 그린하우스 난방을 위한 열펌프-잠열축열 시스템연구. 한국농업기계학회지 23(2):147-156.
3. Chen F.C, E.G. Keshock and V.C. Mei, 1989. Advances in Heat Pumps. AES Vol.7. HTD-Vol. 125.
4. Kay H. Zimmerman, Raleigh H. Powell, Jr. 1987. Heat Pumps. Lewis Publishers, Inc.
5. Omer Comakli, Mahmut Bayramoglu and Kamil Kaygusuz. 1996. A Thermodynamic Model of a Solar Assisted Heat Pump System With Energy Storage. Solar energy. Vol.56, No.6 : 485-492.
6. 石福昭, 松總堅, 増田公一, 北村規明. 1983. ヒートポンプ<原理と應用>.アグネ.
7. 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.
8. 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.
9. 張林紅, 戶次英二. 1993. ヒートポンプによる生芻の除濕乾燥に関する研究.農業機械學會誌 55(3):33-39.
10. 韓東海, 安部武美, 疋田慶夫, 鶴崎孝 1995. ヒートポンプによる椎清の除濕乾燥研究(第2報). 農業機械學會誌 57(3):29-36.