

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 21, No. 2, 2001

## 태양에너지를 이용한 그린하우스 난방시스템의 열특성과 시뮬레이션 모델개발

노정근\* 송현갑\*

\*충북대학교 농업기계공학과

### Thermal Energy Characteristics and Simulation Model Development for Greenhouse Heating System Using Solar Energy

J. G. Ro\*, H. K. Song\*

\**Dep.t of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National Univ.*

#### Abstract

The greenhouse heating system using solar energy has been realized in the protective agriculture in this study in order to analyse the thermal energy characteristics of the system the effects of ambient air temperature, solar radiation, relative humidities and water content of ambient air on the greenhouse air temperature were investigated through computer simulation experimental analysis for validation of the simulation.

The results from this study are summarized as follows:

- 1) The expected values of inside air temperature for the system solar energy were very much close to the experimental values.
- 2) In the system using solar energy, the expected values of daytime surface temperature of soil by computer simulation were very much similar to the measured values, but those of nighttime were higher than the measured value by almost 2.5 °C.

- 3) Heat loss of daytime was found to be larger than that of night time as much as 2.0 to 4.2 times for the system using solar energy.
- 4) In the system using solar energy, while the ambient air temperature varied between  $-7^{\circ}\text{C}$  and  $-3.8^{\circ}\text{C}$ , the temperature of the inside air was maintained between  $0^{\circ}\text{C}$  and  $22^{\circ}\text{C}$ .
- 5) At the minimum ambient temperature of  $-7^{\circ}\text{C}$ , the temperature of the inside air was  $0^{\circ}\text{C}$ .

### Nomenclature

- $M_{w,air}$  : Change of water content in inside air.(kg/sec)
- $M_{wC}$  : Change of water content at greenhouse cover film.(kg/sec)
- $M_{wS}$  : Evaporation of water content at greenhouse soil surface.(kg/sec)
- $M_{wV}$  : Change of water content by ventilation.(kg/sec)
- $Q_{SO-SD}^{cond}$  : Heat conduction between soil surface and underground layers.
- $Q_{Ai-SO}^{conv}, Q_{SO-Ai}^{conv}$  : Convective heat transfer between inside air and soil surface.
- $Q_{C-Aa}^{conv}$  : Convective heat transfer between greenhouse cover film and outside air.
- $Q_{C-Ai}^{conv}, Q_{Ai-C}^{conv}$  : Convective heat transfer between greenhouse cover film and inside air.
- $Q_{C-SKY}^{rad}$  : Thermal radiation between greenhouse cover film and sky.
- $Q_{C-SO}^{rad}, Q_{SO-C}^{rad}$  : Thermal radiation between greenhouse cover film and inside soil surface.
- $Q_{C-SKY}^{rad}$  : Thermal radiation between greenhouse cover film and sky.
- $Q_{S-C}^{SR}$  : Solar radiation at greenhouse cover film.
- $Q_{SKY-SO}^{SR}$  : Solar radiation at inside soil surface.
- $Q_{WC}$  : Heat exchange by condensation or evaporation at greenhouse cover film.
- $Q_{Ai-Aa}^{vent}$  : Heat transfer by ventilation.
- $Q_{WS}$  : Latent heat of evaporation at greenhouse soil surface.

### 1. 서론

많은 학자들이 그린하우스의 열특성을 분석해 왔다. 그 중에서 오스트레일리아의 K. Garzoli와 J. Blackwell은 1973년에 외기 온도와 태양 강도에 의한 그린하우스의 반응을 연구하였으며, 미국의 D. H Willits와 2인은 1985년에 그린하우스에 대한 태양 에너지 저장 시스템의 모델링을 개발하였다. 또한 인도의 P.Chandra는 1982년에 그린하우스커버의 복사 열교환을 연구하였고, 포르투갈의 Ana Maria Silva 외 1인은 1987년에 그린하우스내의 복사 열손실을 연구 발표하였다. 이와 같이 그린하우스에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 것은 그린하우스의 난방이 중요하기 때문이다. 하지만 경쟁력을 갖춘 시설농업을 하기 위해서는 경제성 있는 난방설비를 설치하는 것이 중요하다. 이것은 시설농업을 하는 농민들에게 최근의 유가 상승에 의한 어려움이 이를 잘 말해주고 있다. 그러므로 이러한 걱정 난방 시스템을 위해서는 그린하우스내 열특성 분석을 통한 그린 하우스 내 온도를 예측할 수 있

는 기초 자료가 필요하다.

본 연구의 목적은 태양에너지만에 의한 그린하우스의 난방 열특성을 예측할 수 있는 모델링 개발과 실험을 통한 예측치의 검증과 분석에 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 모델개발

태양에너지를 이용한 난방 특성에 대한 열평형 이론을 정립하고 수치해석에 의하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고자 그림1, 2, 3, 4 에서 보는 바와 같이 개략도와 열저항 회로망을 주간과 야간으로 구분하여 구성하였다. 그리고 그린하우스의 피복재, 내부공기 및 토양 표면을 미지수로 하여 3개의 비선형 연립방정식을 유도하고 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 미지수를 예측하였으며, 실험 분석치와 비교하여 수치해석에 의한 예측치의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션 모델을 위하여 C 언어를 사용하였으며, 온도, 일사강도, 상대습도, 토양 수분함량 등을 자료로 하였다. 한편 방사율 등은 문헌<sup>(3)</sup>에서 인용하였다. 토양은 사양토로 건조한 상태를 유지하였고, 작물이 없는 나대지 상태였으며, 열평형 방정식에서도 작물이 없는 것으로 하였다. 그린하우스내 열전달과 수분전달에 대한 기본 방정식의 해를 얻기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 모든 열전달 표면의 온도변화는 時間隔 ( $\Delta t$ )의 증가에 의존하며, 각각의 표면은 등온이다.
- ② 복사 열전달 표면은 灰體(gray body)이다.
- ③ 공기의 복사 열교환은 무시한다.
- ④ 그린하우스 구조물에 의한 열전달은 무시한다.
- ⑤ 천공은 등가천공온도를 갖는다.

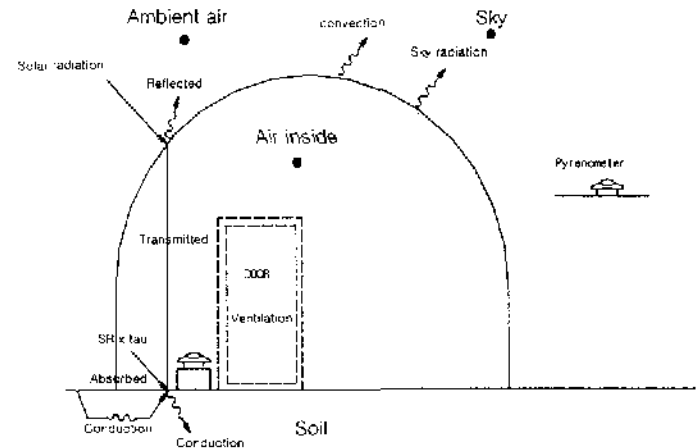


Fig. 1. Schematic diagram of energy flows in greenhouse heating system by solar energy(daytime).

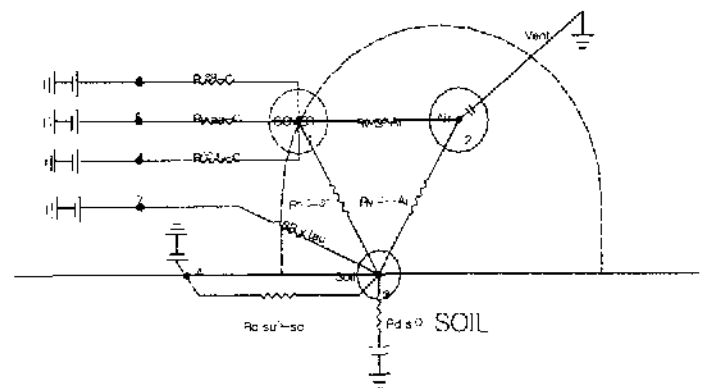


Fig. 2. Complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system by solar energy (daytime).

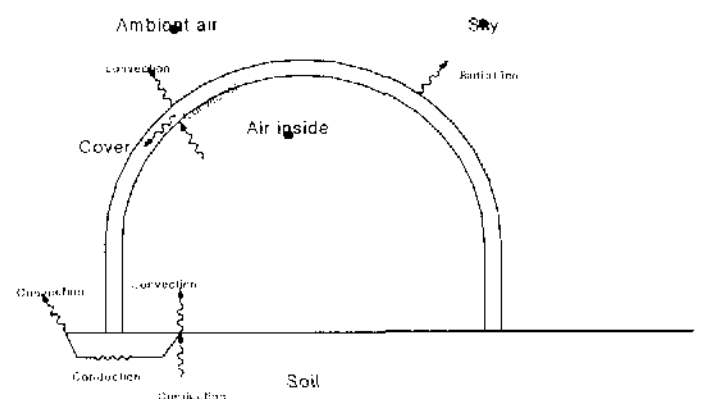


Fig. 3. Schematic diagram of energy flows in greenhouse heating system by solar energy(night time).

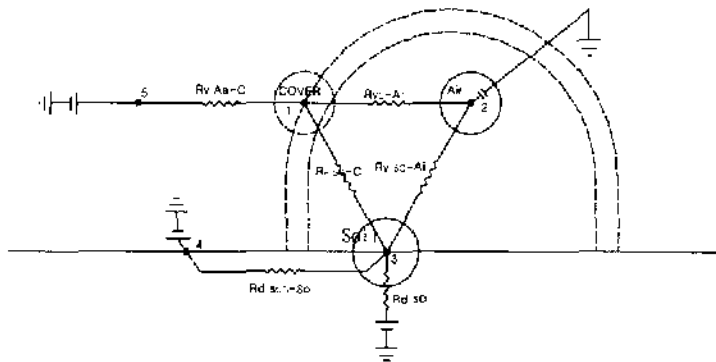


Fig. 4. Complete thermal circuit simulation model of the greenhouse heating system only by solar energy (night time).

## 2.2 열평형 방정식

### 2.2.1 그린하우스 피복재를 중심으로 한 열평형 방정식

그린하우스 피복재를 중심으로한 주·야간 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

#### (가) 주간

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

#### (나) 야간

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

### 2.2.2 그린하우스 내부 공기를 중심으로 한 열평형 방정식

그린하우스 내부 공기를 중심으로 한 주·야간 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

#### (가) 주·야간

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

### 2.2.3 그린하우스 내부 지표면을 중심으로 한 열평형 방정식

그린하우스 내부 지표면을 중심으로 한 주·야

간 열평형 방정식은 그림 2와 그림 4에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

#### (가) 주간

$$Q_{SKY-SO}^{SR} + Q_{SO-SD}^{cond} + Q_{SO-Ai}^{conv} + Q_{SO-C}^{rad} + Q_{WS} = 0 \quad (4)$$

#### (나) 야간

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

## 2.2.4 물질 전달 평형방정식

토양표면과 피복재 내면을 경계(Boundary)로 하는 그린하우스 시스템에서의 물질(수분)전달 평형식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$M_{wS} + M_{wC} + M_{wV} + M_{w,air} = 0 \quad (6)$$

이론식 (1)~(6)을 지배방정식으로 하여 그림 5와 같은 Computer simulation program의 흐름도에 의하여 주·야간 시간에 따른 그린하우스 실내온도변화, 토양표면온도를 계산하였다. 또 태양에너지를 이용한 그린하우스의 내부공기와 토양에 저장되는 열량과 손실열량을 식 (7)의 열평형 방정식을 이용하여 분석하였다.

$$\dot{Q}_{solar} = \dot{Q}_l + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{soil} + \dot{Q}_{air} \quad (7)$$

여기서;  $\dot{Q}_{solar}$ 는 태양에너지에 의한 공급 열원이고,  $\dot{Q}_l$ 과  $\dot{Q}_v$ 는 피복재와 환기에 의한 손실열량<sup>(2)</sup>이며,  $\dot{Q}_{soil}$ 과  $\dot{Q}_{air}$ 는 토양과 내부공기에 의한 저장열량<sup>(2)</sup>이다.

방정식 (7)에서 그린하우스내의 공급열량은 외기의 수평면 일사강도를 시간별로 측정된 데이터에 그린하우스 커버 필름의 시간별 평균 투과율(표 1참조)을 적용하여 계산되도록 하였다. 초기 조건과 경계조건을 위한 입력데이터로서 표 1을 사용하였으며 외기온도와 일사강도, 상대습도는 측정데이터 이다. 토양 10cm 깊이 온도는 프로그

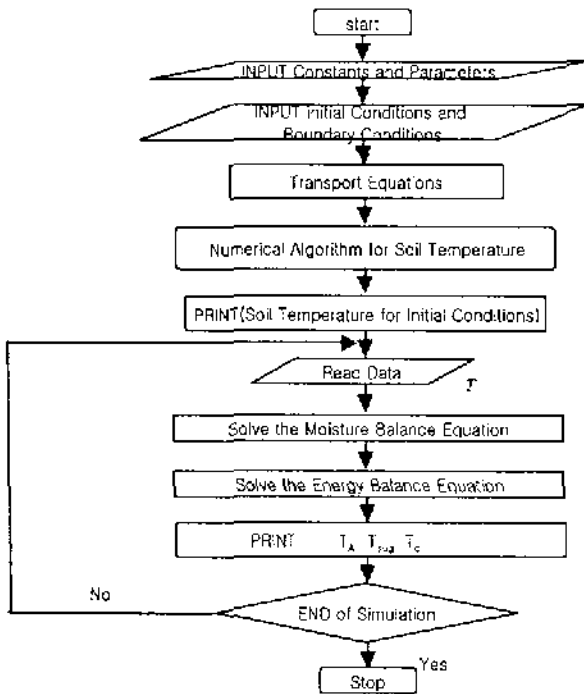


Fig. 5 Flowchart of computer programming to simulate greenhouse heating system by only solar energy.

Table 1. Input data for computer simulation model.

T_ambi. (°C)	T_soil (10cm) (°C)	RH(in) (%)	RH(out) (%)	solar radiation (w/m <sup>2</sup> )	trans-missivity
-3.1	6.8	49	82	30.07	0.505
-0.8	6.8	61	72	108.5	0.535
-1.1	6.9	65	62	180.8	0.605
-0.2	7.3	62	54	208.6	0.675
1.0	7.6	45	46	294.9	0.715
2.4	8.4	38	38	495.1	0.740
3.5	10.0	39	30	456.1	0.715
4.2	11.4	49	30	342.2	0.675
3.9	12.1	67	31	192	0.535
3.0	11.9	67	32	41.7	0.505
1.7	11.4	64	40		
0.7	10.7	62	47		
-0.5	10.1	61	54		
-1.2	9.5	59	59		
-2.6	9.0	59	64		
-3.0	8.4	57	68		
-4.2	7.9	56	74		
-4.7	7.4	55	80		
-4.9	6.9	55	87		
-5.5	6.4	55	89		
-5.6	6.0	54	91		
-5.9	5.5	54	93		
-6.7	5.1	54	93		
-6.3	4.8	53	93		
-3.0	4.6	52	93	58.4	0.625

램을 미리 수행하여 계산하고 이 값이 입력 되도록 하였으며, 이 값에 의해 그린하우스내 공기온도가 많은 영향을 받는 것으로 나타나 초기값 설정시 정밀하게 계산하는 것이 중요한 것으로 판단되었다.

### 2.3 입력데이터

컴퓨터 시뮬레이션 모델 분석을 위하여 입력한 데이터는 표 1과 같다.

### 2.4 실험장치 및 방법

태양에너지를 이용한 난방시스템은 그림 6과 같으며, 주간(겨울철 오전 9시부터 오후 5시까지)에는 보온커튼(Thermal Curtain)을 열어 태양열이 그린하우스 내에 충분히 공급될 수 있도록 하였으며, 그린하우스 내로 투과되어 들어온 열은 토양과 실내 공기 등에 저장되며 일부는 그린하우스 피복과 틈새를 통해 외부로 방열되는 것으로 하였다. 야간(오후 5시부터 다음날 오전 9시까지)에는 보온커튼을 닫아 대류 열전달을 최대한 억제토록 하였다.

그린하우스 난방 시스템의 측정 항목은 대기온도, 그린하우스 실내온도(상중하 각 4지점X5),그린하우스 내의 상대습도, 그린하우스 토양의 온도, 그린하우스 내·외 수평면 일사장도 등이었다.

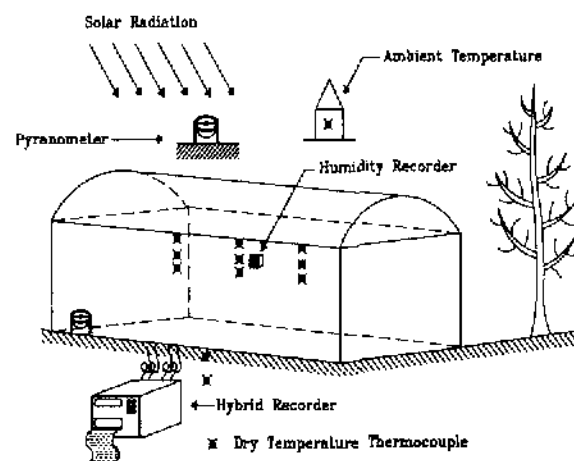


Fig. 6. Greenhouse heating system by solar energy.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 시뮬레이션 모델 검증

태양에너지를 이용한 난방시스템의 열특성을 예측하기 위한 시뮬레이션의 이론치와 실험치를 다음과 같이 비교 분석하였다.

##### 3.1.1 그린하우스 내 공기온도

그림 7은 태양에너지를 이용한 난방시스템의 실내 공기온도에 대해 이론치와 실험치의 비교를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 온도를 제외한 이론치와 실험치가 잘 일치하고 있다. 초기 시작점에서 차이가 나는 것은 그린하우스 내 태양강도의 투과율이 오전에는 수분의 응축과 결로에 의해 차이가 많으나 태양복사에너지의 투과율을 겨울철 평균값을 입력했기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

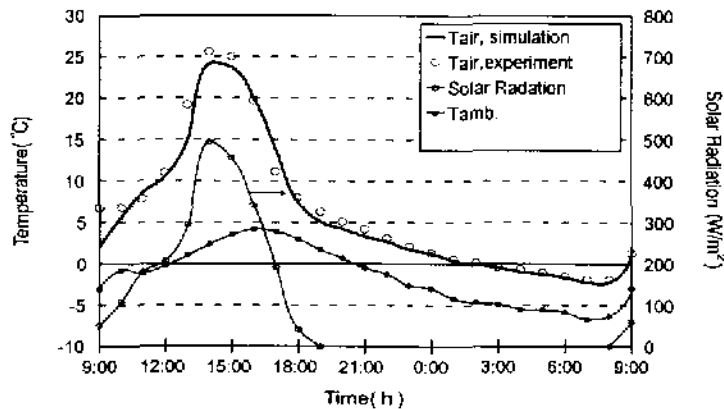


Fig. 7. Comparison between the theoretical and experimental values of the air temperature variation inside greenhouse heated by solar energy.

##### 3.1.2 그린하우스 내 토양 표면 온도

그림 8은 태양에너지를 이용한 그린하우스의 실내 토양 표면온도에 대한 이론치와 실험치를 비교한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 주간에는 이론치와 실험치가 잘 일치하고 있으나, 야간에 이론치가 실험치보다 높게 나타나있으며, 최대 오차는 약 2.5°C로 일정한 경향을 유지하고 있다. 이와 같이 야간에 시뮬레이션 값이 높은

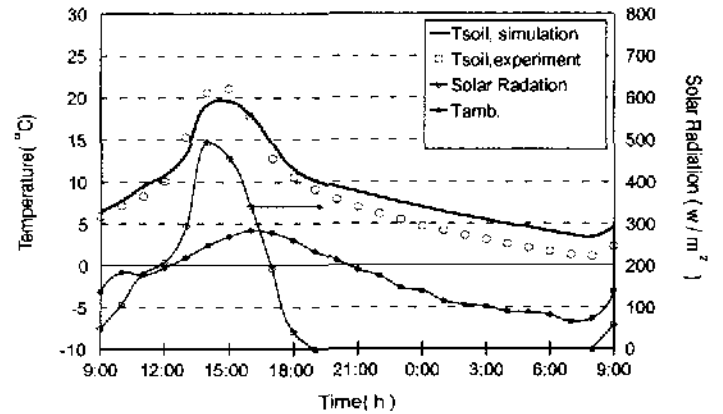


Fig. 8. Comparison between the theoretical and experimental values of the soil surface temperatures variation inside greenhouse heated by solar energy.

것은 이 시스템에서 야간에 유일한 열원으로서의 역할을 할 수 있는 토양을 인공 토조를 사용함으로써 토양에 의한 방열량이 실제로는 아주 적었으나, 그린하우스 내 토양에서 균일하게 나온 것으로 시뮬레이션 모델에 반영되었기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.2 열특성 분석

그림 9는 별도의 난방시스템이 없는 그린하우스가 태양 복사열만을 받는 경우의 열흐름 특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 167.2~1379.4 kJ/m<sup>2</sup>.h의 태양열이 9시간 동안 그

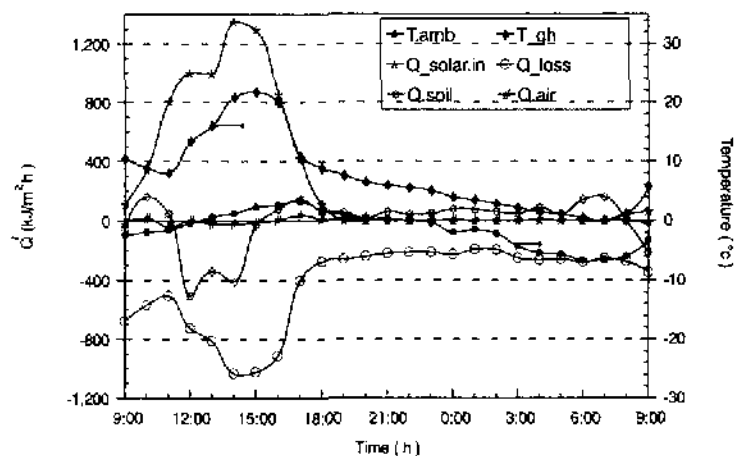


Fig. 9. Characteristics of the thermal energy flow and temperature variation in the greenhouse heated by only solar energy.

린하우스 내에 공급되었고, 이 공급되는 열에너지 중 주간에는 418~501.6kJ/m<sup>2</sup>.h의 열이 토양과 공기 중에 저장되고 있었다. 야간에는 토양에서 41.8~167.2kJ/m<sup>2</sup>.h의 열이 방출되어 난방열원으로서의 역할을 하고 있음을 나타내었다.

주간에 418~1045kJ/m<sup>2</sup>.h 열이 그린하우스 밖으로 손실되었고, 야간에 209~250.8kJ/m<sup>2</sup>.h의 열에너지가 그린하우스 밖으로 손실되어 야간보다 주간 열손실이 2.0~4.2배 이었음을 알 수 있었다. 이것은 주간 열손실을 줄여 야간에 난방에너지로 이용하는 것이 대단히 중요한 것임을 시사해주는 것이다.

외기온이 -7℃~3.8℃범위에서 변하고 있을 때 태양 복사열에 의하여 그린하우스 실온은 0℃~22℃로 상승하였으며, 외기온은 06~07시 사이에 -7℃로 최저기온을 보였다. 이때 실온은 0℃로 외기온과 실온차는 7℃를 나타내었다. 태양강도와 외기온이 높은 주간에는 실온이 8℃~22℃로 외기온과 실온차는 10℃~19℃를 유지하였으며, 야간에는 실온이 7.8℃~0℃로 외기온과 실온의 차이는 6~7℃로 유지되었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 태양에너지를 이용한 그린하우스 난방시스템에 대한 그린하우스 내부의 공기온도, 토양온도와 난방 열특성을 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고, 실험에 의하여 이를 검증하여, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 태양에너지를 이용한 그린하우스 난방시스템에서 시뮬레이션에 의한 그린하우스내 공기온도는 실험치와 잘 일치하였다.
2. 태양에너지를 이용한 그린하우스 난방시스템에서 시뮬레이션에 의한 그린하우스내 토양 표면온도는 주간에는 실험치와 잘 일치하였으나, 야간의 경우에는 이론치가 실험치

보다 최대 2.5℃ 높게 나타났다.

3. 태양에너지를 이용한 그린하우스의 열손실은 주간보다 야간의 경우보다 2.0~4.2배 많은 것으로 나타났다.
4. 태양에너지를 이용한 그린하우스 난방시스템에서 외기온이 -7℃~3.8℃범위에서 변하고 있을 때 그린하우스 실온은 0℃~22℃를 유지하였다.
5. 가장 낮은 외기온인 -7℃에서(오전 06~07시 사이) 실온이 0℃로, 이때 그린하우스 난방효과는 7℃로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 송현갑, "자연에너지를 이용한 온실 난방시스템개발. 농수산 현장 애로 기술 개발 최종보고서", 1997.
2. 송현갑 외 4인, 한국농업기계학회지 제23권 제2호, pp.147~156, 1998.
3. 유영선, "그린하우스보온을 위한 태양에너지", 충북대 박사학위논문, 1992.
4. Ana Maria Silva, Rui Rosa, "Radiative Heat Loss inside a Greenhouse", J.agric. Engng Res.37, pp.155~162, 1987.
5. Chandra P, Thermal Radiation Exchange in a Greenhouse with a Transmitting Cover, J.agric. Engng Res.27, pp.261~265, 1982.
6. Desmarais G, C.Ratti, and G.S.V. Raghavan, "Heat Transfer Modelling of Greenhouses", Solar Energy Vol.65. No.5, pp.271~284, 1999.
7. Garzoli K, J. Blackwell, "The Response of a Glasshouse to High Solar Radiation and Ambient Temperature", J.agric. Engng. Res Vol.18, pp.205~216, 1973.
8. Willits D.H, P. Chandra and M.M.Peet,

- “Modelling Solar Energy Storage Systems for Greenhouses”, J.agric. Engng Res.32, 73~93, 1985.
9. 古在豊樹. 溫室の光透過に関する數 値實驗(第1報). 農業氣象 29(3), 22~31, 1973.
10. 連小東, 中野和弘, 倉田和彦, 渡辺秀一, “ハウス内環境の制御システムに関する研究(第2報)”, 農業施設 26(1), pp.39~49, 1995.