

# 地中熱交換 溫室의 蓄熱 및 放熱 特性<sup>+</sup>

## Characteristics of the Stored and Released Thermal Energy in Plastic Greenhouse with Underground Heat Exchange System

李鍾瑚\* 朴勝濟\* 金容顯\* 金哲洙\* 李仲用\*  
C. H. Lee S. J. Park Y. H. Kim C. S. Kim J. Y. Rhee

### Summary

The efficient use of solar energy for greenhouse heating is one of the most obvious applications to save the heating energy for greenhouse culture. To increase the efficiency of solar energy utilization in plastic greenhouse, underground heat exchange system was installed. Characteristics of the stored and released thermal energy in plastic greenhouse with underground heat exchange system was analyzed. The average stored and released thermal energy in this system were 1,484 kJ/m<sup>2</sup> day and 555 kJ/m<sup>2</sup> day, respectively. The average coefficient of performance of heat exchange system was found to be 2.86. Also an attempt was made to predict the air temperature in plastic greenhouse. The agreement between the results of prediction and that of measurement was relatively good.

### 1. 緒論

清明일에 플라스틱 온실의 内部 晝間氣溫은 35~40°C 정도의 高溫으로 상승하여 과채류 재배의 適正溫度에 해당하는 15~25°C를 훨씬 초과하는 경우가 빈번하게 나타난다. 이러한 高溫 現象은 細胞分裂 또는 花粉의 發芽를 억제하여 光合成을 저하시키거나 高溫障壁를 일으킬 수 있다. 한편, 夜間에 無加溫溫室의 内部氣溫은 外氣溫과 비슷한 수준까지 하강하여 작물의 생육 불량을 초래한다. 그러므로 晝間에 온실내로 투과되는 과도한 태양에너지를 적절하게 온실내에 蓄熱시킨 후 야간 또는 외기온이 낮아서 난방을

필요로 할 때 효과적으로 이용할 수 있는 방법이 모색되어야 한다.

본 연구에서는 태양에너지의 이용효율을 제고시키기 위하여 플라스틱 온실내에 지중열교환 시스템을 설치하였다. 지중열교환 온실은 온실 자체를 태양열 집열기로 생각하여, 온실 床面의 토양층을 축열매체로 이용한 半受動 形態 (semi-passive type)의 태양열 이용 온실에 해당된다. 지중열교환 시스템은 지중에 매설된 파이프내로 온실내 공기가 송풍되는 가운데 파이프 벽면이 열교환면으로 사용되며, 공기로부터 파이프 주위의 토양층으로 또는 토양층으로부터 공기로서 열이 이동되어 축열과 방열이 이루어지

<sup>+</sup> 이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음  
\* 전북대학교 농과대학 농업기계공학과

는 태양열 이용 시스템의 하나이다.

晝間에 온실내로 투과된 태양에너지의 이용 효율을 제고시키기 위한 연구는 오래전부터 시도되었다. 주간 온실내 過剩에너지를 地中에 축열시킨 후 夜間에 방열시켜 실내를 가온시키는 지중열교환방식에 관한 연구는 山本(1966)에 의해서 최초로 시도되었다. 山本(1973)은 온실내의 土層에 열교환용 PVC 파이프를 매설하고 온실내의 공기가 송풍기에 의해서 파이프내를 통과하여 순환되는 지중열교환 온실의 축열 및 방열 특성을 분석하였다. 그후 지중열교환 온실의 열교환 성능에 관한 연구는 森(1977), Kozai(1985) 등에 의해서 시도되었으며, 설계에 관한 연구는 高倉과 山川(1981), Kurata와 Takakura(1985)에 의해서 많이 시도되었다.

高倉과 山川(1981)은 지중열교환온실의 보온 성능을 분석하고자 기존의 실험자료를 토대로 하여 定常狀態의 一次元 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 개발된 시뮬레이션 모형을 이용하여 시스템 전체의 傳熱 매개변수의 분석, 열교환용 파이프의 재질, 크기가 축열 및 방열 특성에 미치는 영향을 검토하였다. Kurata 와 Takakura(1985)는 土層에 열평형 및 수분평형식을 적용하여 非定常 狀態의 二次元 시뮬레이션 모형을 개발한 결과 파이프 표면으로부터 20cm 떨어진 범위의 토층에서 축열이 효과적으로 이루어짐을 확인하였다. 그러므로 열교환 파이프의 매설 간격은 40cm 정도가 적당하다고 보고하였다.

본 연구는 수경재배용 온실에 설치된 지중열교환 시스템의 축열 및 방열특성을 평가하여 지중열교환 온실의 개발에 필요한 기초 자료를 제공하고자 시도되었다.

## 2. 材料 및 方法

### 가. 지중열교환 시스템

#### 1) 실험용 온실

실험용 온실은 플라스틱 單棟 온실로서 폭과

길이는 각각 6m 및 12m 이며, 전북대학교 농과대학 실험농장에 설치되었다. 온실의 床面積은 72㎡, 표면적은 117.6㎡로서 保溫比는 0.61 이다. 피복재로는 폴리에틸렌 필름(polyethylene film)에 비해서 응축현상이 비교적 적은 것으로 알려진 두께 0.05mm의 장수필름(Jangsoo film)을 사용하여 二重으로 피복하였다. 온실의 棟方位는 남북방향이며, 全面과 後面에 풍량 20㎡/min의 환기용 송풍기가 설치되었다. 이와 같은 플라스틱 온실이 二棟 설치된 가운데 한 동에는 지중열교환 시스템이 설치되었으며, 나머지 한 동은 지중열교환 시스템이 설치되지 않은 無加溫 온실로서 對照區로 사용되었다.

#### 2) 지중열교환 시스템의 구성

지중 40cm의 깊이에 중심이 위치하도록 매설된 PVC파이프(Poly Vinyl Chloride pipe)는 길이 4m의 파이프 2개를 하나로 연결시킨 것이다. 파이프의 내부와 외부직경은 각각 100mm 및 114mm 이다. Kurata와 Takakura(1985)의 연구 결과를 고려하여 인접한 파이프의 간격을 35cm로 하여 14개를 매설하였다. 열교환용 송풍기는 1,710rpm의 회전속도에서 60㎡/min의 풍량을 낼 수 있는 것으로서 단상 220V, 1HP의 전동기가 연결되었다. 열교환용 송풍기로부터 균일한 풍량의 공기가 파이프내를 통과하도록 송풍기 하부에 압력실(plenum chamber)을 설치하였다. 방수용 합판으로 제작된 압력실은 0.91m×1.2m×1.2m의 크기를 갖는다. 압력실과 파이프는 공기 분배용 덕트에 의해서 연결된다. 그림 2-1은 열교환용 송풍기 및 PVC 파이프가 매설된 실험용 온실을 나타낸 것이다.

온실내의 기온을 기준으로 하여 온-오프(on-off) 제어되는 송풍기의 작동은 2단계로 이루어진다. 실험기간의 1994. 1. 28~2. 10에는 일사량이 부족한 시기에 해당되므로 주간 室溫을 기준으로 하여 송풍기의 작동 개시 및 중지온도를 각각 22.5℃, 23.5℃로 설정하였다. 즉, 日出後 실내 기온이 22.5℃ 이상으로 상승되면

데이터로거의 디지털 출력으로부터 “1”의 신호가 출력된다. 이 신호가 3~32VDC의 입력과 250 VAC 5A의 출력을 갖는 솔리드 스테이트 릴레이 (solid state relay)의 접점을 연결시켜 송풍기를 작동시킨다. 실내 온도가 23°C 정도를 유지하다가 일사량의 감소 등에 의해서 실내 온도가 23.5°C 이하로 내려가면 디지털 출력으로부터 “0”의 신호가 출력된다. 이 신호로부터 솔리드 스테이트 릴레이의 접점이 떨어지면서 송풍기의 작동이 중지된다. 1994년 2월 11일부터 실험이 종료되는 시기까지에는 일사량이 점차 증가하기 때문에 송풍기의 작동 개시 및 중지온도를 각각 24.5°C, 25.5°C로 변경하여 설정하였다. 한편, 야간에는 실내 기온이 7.0°C 이하로 내려가면 송풍기가 작동되고, 8.0°C 이상으로 올라가면 송풍기의 작동이 중지된다.

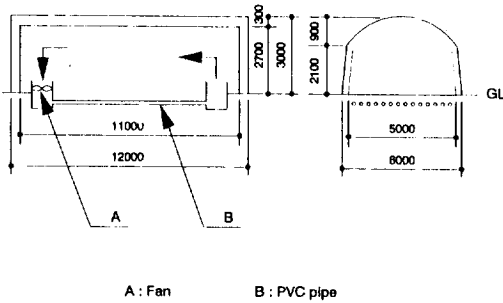


Fig. 2-1. Schematic diagram of experimental greenhouse with underground heat exchange system.

3) 측정요소 및 방법

지중열교환 온실에서 온실내의 건구 및 습구 온도 각 1점, 파이프 입구 및 출구의 기온 각 1점, 파이프 입구로부터 0m, 2m, 4m, 6m, 8m 떨어진 지점의 기온 각 1점, 지표면 온도 1점, 지중 40cm의 깊이에서 파이프 둘레로부터 0cm, 2cm, 4cm, 6cm, 9cm, 12cm 떨어진 지점의 지중온도 각 1점 및 지중 50cm 깊이의 지중온도 1점을 측정하였다. 또한, 피복재의 내부 및 외부 피복면에서의 온도 각 1점, 베드 내의 양액온도 1점 및 엽온 1점, 외기온 1점을 측정하였다. 日射量과

純放射量은 온실 중앙의 지표면에서 각각 1점씩 측정하였고, 온실 중앙의 지중 1cm 깊이에서 地中傳熱量을 측정하였다. 파이프내에서의 실제 풍량을 계산하기 위한 풍량은 파이프 입구 부근에서 측정하였다. 대조구로 사용된 무가온 온실에서는 실내의 건구 및 습구온도 각 1점, 양액의 온도 1점을 측정하였다. 플라스틱 온실 외부의 시간별 일사량은 全州 氣象測候所의 기상 자료를 이용하였다.

온도 센서로서 직경 0.3mm의 T형 열전대(T-type copper-constantan thermocouple)가 사용되었다. 전천일사계(CM11, KIPP & ZONEN)와 순방사계(CN-11, EKO)는 실내의 일사량과 순방사량을 측정하는 데 이용되었다. 이 밖에 지중 전열량의 측정을 위하여 열류판(MF-81, EKO)이 사용되었다. 온도, 일사량, 순방사량 및 지중 전열량을 측정하는 센서는 데이터로거(7V08, San-ei)에 연결되어 30분 간격으로 이들 값이 출력된다. 송풍기의 전력소모량은 적산전력계에 의해서 측정되었다.

3. 結果 및 考察

가. 지중열교환 온실의 열적 성능

1) 일사량, 축열 및 방열 특성

표 3-1은 실험기간 동안 晝間의 기간별 온실 외부 및 내부 일사량, 온실내의 순방사량, 지중 전열량, 지중축열량, 송풍기의 전력소모량 및 日射의 투과율을 나타낸 것이다. 지중축열량은 파이프를 통과하는 공기의 입구 및 출구 온도를 기준으로 다음 식에서 계산된다.

$$B_g = C_p \rho (T_i - T_o) V \dots\dots\dots (3-1)$$

$B_g$  : 지중축열량(kJ/hr)

$C_p$  : 공기의 정압비열(kJ/kg°C)

$\rho$  : 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$T_i$  : 파이프의 입구 기온(°C)

$T_o$  : 파이프의 출구 기온(°C)

$V$  : 파이프내 공기의 평균 풍량(m<sup>3</sup>/hr)

Table 3-1. Results of daytime heat flux measurements.(unit : kJ/m<sup>2</sup>)

| Period (1994) | G <sub>o</sub> (A) | G <sub>i</sub> (B) | S <sub>o</sub> | B <sub>o</sub> | B <sub>g</sub> | E <sub>d</sub> | B/A  |
|---------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| Jan.28-Jan.31 | 28,750             | 12,685             | 10,858         | 3,515          | 3,466          | 318            | 0.44 |
| Feb. 1-Feb. 5 | 47,650             | 24,060             | 18,578         | 4,887          | 7,975          | 795            | 0.50 |
| Feb. 6-Feb.10 | 42,000             | 23,218             | 18,565         | 5,225          | 5,285          | 502            | 0.55 |
| Feb.11-Feb.15 | 43,390             | 24,614             | 20,317         | 5,780          | 4,988          | 357            | 0.57 |
| Feb.16-Feb.20 | 59,410             | 32,218             | 26,524         | 7,994          | 9,609          | 816            | 0.54 |
| Feb.21-Feb.25 | 66,650             | 36,667             | 27,888         | 7,750          | 9,296          | 915            | 0.55 |
| Feb.26-Feb.28 | 40,100             | 22,064             | 17,886         | 5,387          | 6,059          | 595            | 0.55 |
| Mar. 1-Mar. 5 | 52,430             | 29,765             | 21,520         | 6,358          | 5,626          | 435            | 0.57 |
| Mar. 6-Mar.10 | 48,690             | 28,545             | 22,607         | 6,550          | 5,630          | 528            | 0.58 |
| Mar.11-Mar.15 | 71,000             | 42,827             | 30,075         | 8,641          | 8,854          | 1,106          | 0.60 |
| Mar.16-Mar.18 | 50,910             | 30,736             | 24,011         | 6,664          | 7,412          | 895            | 0.60 |
| Daily average | 11,019             | 6,148              | 4,777          | 1,375          | 1,484          | 145            | 0.55 |

Note G<sub>o</sub> : sum of daily solar radiation outside plastic greenhouse  
 G<sub>i</sub> : sum of daily solar radiation in plastic greenhouse  
 S<sub>o</sub> : sum of daily net radiation in plastic greenhouse  
 B<sub>o</sub> : sum of daily soil heat flux in plastic greenhouse  
 B<sub>g</sub> : sum of daily thermal energy stored in soil  
 E<sub>d</sub> : sum of daily electric energy consumed for the operation of fan

床面積을 기준으로 실험 기간 동안 온실외부 일사량의 1일 평균치는 11,019 kJ/m<sup>2</sup> day, 온실내로 투과된 일사량은 6,148 kJ/m<sup>2</sup> day로 나타났다. 폴리에틸렌 필름을 피복재로 사용한 二重 온실에서 日射의 平均透過率은 0.55, 즉 55%로 나타났다. 순방사량과 지중전열량의 1일 평균치는 각각 4,777 kJ/m<sup>2</sup> day 및 1,375 kJ/m<sup>2</sup> day로 나타났다. 식(3-1)을 사용한 지중축열량은 1,484 kJ/m<sup>2</sup> day으로 계산되었다. 지중축열량의 계산에서 파이프 벽면에서 응축 현상이 이루어지지 않는 것으로 가정하였다. 그러나, 실제로 파이프 벽면에서 응축 및 기화에 의한 잠열교환이 발생되어 전체 열교환량 가운데 잠열교환량이 차지하는 비중이 클 것으로 예상된다. 한편, 지중 축열에 사용된 송풍기의 전기소모량은 145 kJ/m<sup>2</sup> day로 나타났다.

그림 3-1은 실험 기간의 일사량, 순방사량 및 지중전열량의 변화를 전형적으로 나타낸 도표로서 2월 24일부터 2월 26일 사이의 자료이다. 日出後 일사량이 증가함에 따라 순방사량도 증가하면서 13時頃에 971~1,323 kJ/m<sup>2</sup> hr의 최고치를

나타내었다. 日没 後부터 翌日 日出이 이루어질 때까지 순방사량은 100~140 kJ/m<sup>2</sup> hr의 일정한 값을 유지하였다. 지중전열량은 12時頃에 331~406 kJ/m<sup>2</sup> hr의 최고치를 나타내는 가운데 열전달이 下向, 즉 床面에서 地中으로 이루어지는 것으로 나타났다. 한편, 日没 後부터 翌日 日出이 이루어질 때까지 室溫이 하강하여 지온보다 낮게 되면 지중전열의 전달방향이 逆轉되어 地中으로부터 床面으로 전달되는 上向 흐름을 나타낸다. 이 때 지중전열량은 90~122 kJ/m<sup>2</sup> hr으로서, 순방사량보다 다소 낮게 나타났다.

그림 3-2로부터 온실내의 지중전열량 및 지중축열량에 영향을 미치는 주요 기상 요소가 온실 외부 일사량임을 알 수 있다. 온실 외부 일사량을 독립변수로 가정하여 표현한 선형회귀식은 다음과 같다.

$$B_o = 0.1128 G_o + 132.4 \dots\dots\dots (3-2)$$

$$(R^2 = 0.8960)$$

$$B_g = 0.1925 G_o - 637.8 \dots\dots\dots (3-3)$$

$$(R^2 = 0.8554)$$

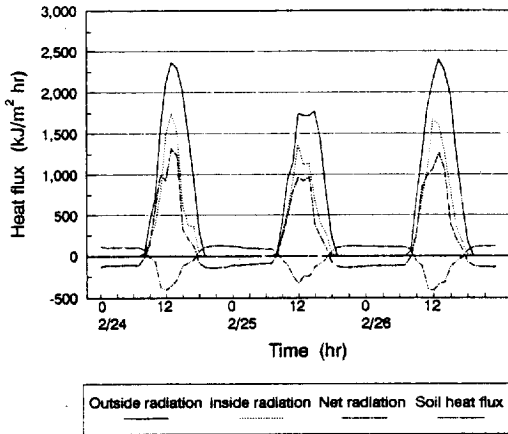
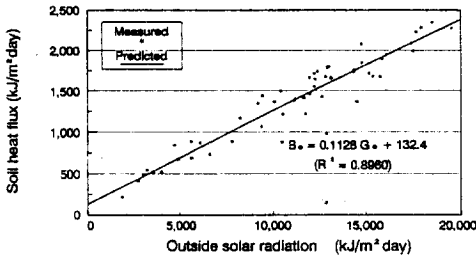
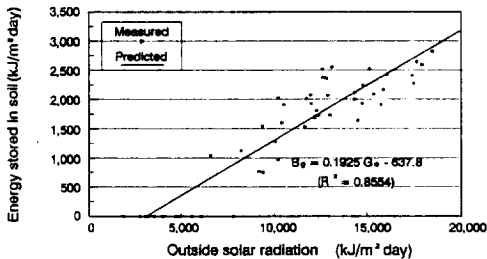


Fig. 3-1. Variation of solar radiation outside and inside greenhouse, net radiation and soil heat flux.



(a) soil heat flux vs. outside solar radiation



(b) thermal energy stored in soil vs. outside solar radiation

Fig. 3-2. Influence of outside solar radiation on soil heat flux and thermal energy stored in plastic greenhouse soil.

$G_o$ : 온실 외부 일사량( $\text{kJ/m}^2 \text{ day}$ )

$B_o$ : 온실내의 지중전열량( $\text{kJ/m}^2 \text{ day}$ )

$B_g$ : 지중축열량( $\text{kJ/m}^2 \text{ day}$ )

그림 3-2(b)로부터 외부일사량이  $8,000 \text{ kJ/m}^2 \text{ day}$  이하일 경우 실내 기온이 열교환 송풍기의 작동 개시온도에 해당되는  $25^\circ\text{C}$  이상을 초과하지 못하므로 지중축열이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

夜間の 기간별 순방사량, 지중전열량, 방열량 및 송풍기의 전력소모량을 표 3-2에 나타내었다. 토양으로부터의 방열량은 지중축열량의 계산 방법과 마찬가지로 식 (3-1)에 의해서 얻어진다. 夜間の 1일 평균 순방사량과 지중전열량은 각각  $1,300 \text{ kJ/m}^2 \text{ day}$  및  $1,257 \text{ kJ/m}^2 \text{ day}$  로서 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다. 방열량은 외기온의 영향을 받는 가운데 평균  $555 \text{ kJ/m}^2 \text{ day}$  로 나타났다. 最大放熱量은  $1,668 \text{ kJ/m}^2 \text{ day}$  로서, 실험 기간 동안 最低外氣溫이 나타난 2월 9일 日沒後부터 翌日 日出 사이에 이루어졌다.

### 3) 파이프내 기온의 변화

그림 3-3은 2월 24일에 온실 중앙의 지중에 매설된 파이프의 위치에 따른 기온 변화를 나타낸 것으로서, 7~8時까지 방열이 이루어지는 가운데 파이프 입구, 중앙 및 출구에서의 기온은 각각  $6.5^\circ\text{C}$ ,  $7.4^\circ\text{C}$ ,  $8.4^\circ\text{C}$ 로서 日變化 가운데 최저치가 나타났다. 일출후 실온의 상승과 함께 파이프내의 기온이 증가되며, 11시 이후에는 기온의 변화가 역전되어 입구, 중앙 및 출구의 순서로 나타났다. 파이프내 기온의 최고치는 15시에 각각  $24.0^\circ\text{C}$ ,  $21.7^\circ\text{C}$ ,  $19.5^\circ\text{C}$ 로 나타났으며, 19시 이후에 기온의 변화가 다시 역전되어 출구, 중앙 및 입구에서의 순서로 나타났다. 이러한 결과로부터 기온의 최고치가 일사량 또는 순방사량이 최대로 나타나는時刻에 비해서 다소 지연되어 나타남을 알 수 있다.

한편, 地中 50cm 깊이에서 地溫의 日變化는 2월 24일에  $9.9\sim 10.6^\circ\text{C}$ , 3월 16일의 경우  $12.1\sim 12.8^\circ\text{C}$ 의 일정한 수준을 유지하는 것으로 측정되었다. 파이프내의 기온과 지중 50cm 깊이에서 地溫의 변화를 고려할 때 晝間の 온실내 파이프에너지가 지중에 저장될 수 있는 여지가 충분함을 알 수 있다.

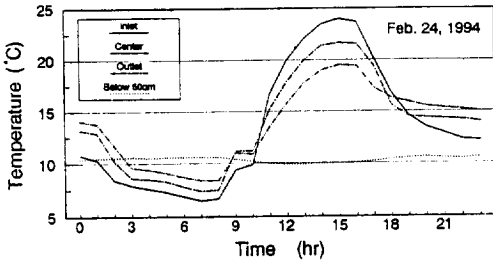


Fig. 3-3. Variation of air temperatures at inlet, center, outlet of pipe buried in greenhouse soil and soil temperature at depth of 50cm.

4) 파이프 부근의 지온 변화

그림 3-4는 지중 40cm의 깊이에서 파이프의 벽면으로부터 0cm, 2cm, 4cm, 6cm, 9cm, 12cm 만큼 떨어진 지점에서의 지온 변화로서, 일출이 이루어지기 전까지 0cm 지점에서 지온은 방열과 더불어 계속적으로 하강하여 9시에 10.8℃의 최저치를 나타내었다. 이 후 열교환의 개시와 함께 지온이 상승하여 16시에 17.0℃의 최고치에 도달하였다. 인접한 파이프의 중앙에 해당되는 12cm 떨어진 지점에서의 지온은 12시에 10.9℃의 최저치를 나타내었고, 최고치는 20시에 15.2℃에 도달하였다. 결국 파이프의 벽면으로부터 멀리 떨어질수록 축열 및 방열과정에서의 열전달이 지체되어, 지온의 최저치와 최고치에 도달하는 시각이 점차 지연됨을 알 수 있다.

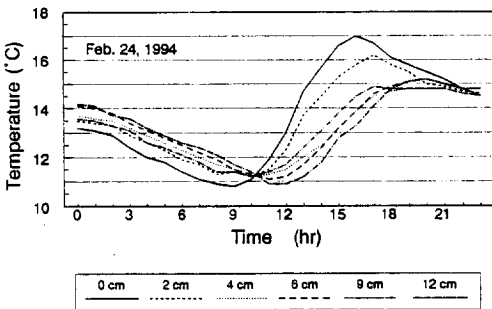


Fig. 3-4. Variation of soil temperatures for various distances from pipe wall.

그림 3-4로부터 실측된 지온의 차이가 벽면에 근접할수록 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 지중에 축열되는 에너지의 대부분이 파이프 벽면 근처에서 이루어짐을 의미하는 것이다. 지중에 에너지를 쉽게 저장시키기 위하여 열교환 파이프를 둘러싸고 있는 토양의 체적 열용량 및 열전도계수가 큰 것이 바람직하다. 더구나, 토양의 열적 성질이 수분의 영향을 가장 크게 받으므로 토양의 수분을 높이기 위한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

나. 지중열교환 시스템의 축열효율 및 성능계수

태양열을 난방 열원으로 하는 지중열교환 온실에서 효율과 성능을 분석하기 위하여 저장되는 에너지比, 축열효율 및 성능계수를 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$r_i = r_o + r_g = \frac{B_o + B_g}{S_o} \dots\dots\dots (3-4)$$

$$\eta_g = \frac{B_o + B_g}{G_o} \dots\dots\dots (3-5)$$

$$\eta_s = \frac{B_g}{G_o} \dots\dots\dots (3-6)$$

$$C.O.P. = \frac{B_r}{E_d + E_n} \dots\dots\dots (3-7)$$

$r_i$  : 순방사량에 대한 지중전열 및 축열량의 저장비

$r_o$  : 순방사량에 대한 지중전열량의 비

$\eta_g$  : 순방사량에 대한 축열량의 비

$\eta_s$  : 지중열교환 시스템의 집열효율

$B_r$  : 야간의 평균방열량 (kJ/m<sup>2</sup> day)

$E_d$  : 주간 전력소모량 (kJ/m<sup>2</sup> day)

$E_n$  : 야간의 전력소모량 (kJ/m<sup>2</sup> day)

C.O.P. : 성능계수

표 3-3은 실험기간에 저장된 에너지比, 집열효율 및 성능계수를 나타낸 것이다. 순방사량에 대한 지중전열량 貯藏比와 지중축열량 貯藏比의 평균치는 각각 0.289 및 0.312 로서, 에너지 저장비의 승은 0.601 로 나타났다. 이것은 溫室 床面に 도달된 순방사량의 약 60%가 지중에 저장됨

Table 3-2. Results of nighttime heat flux measurements.

(unit : kJ/m<sup>2</sup>)

| Period(1994)  | S <sub>o</sub> | B <sub>o</sub> | B <sub>r</sub> | E <sub>n</sub> |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Jan.28-Jan.31 | 3,601          | 3,847          | 5,236          | 846            |
| Feb. 1-Feb. 5 | 5,023          | 4,672          | 5,128          | 933            |
| Feb. 6-Feb.10 | 5,180          | 4,715          | 2,592          | 385            |
| Feb.11-Feb.15 | 5,797          | 4,613          | 1,509          | 277            |
| Feb.16-Feb.20 | 6,984          | 5,927          | 1,534          | 287            |
| Feb.21-Feb.25 | 8,226          | 7,930          | 3,306          | 537            |
| Feb.26-Feb.28 | 4,261          | 4,052          | 1,301          | 178            |
| Mar. 1-Mar. 5 | 6,306          | 6,208          | 1,370          | 227            |
| Mar. 6-Mar.10 | 7,041          | 7,353          | 1,882          | 276            |
| Mar.11-Mar.15 | 7,940          | 8,555          | 1,383          | 186            |
| Mar.16-Mar.18 | 3,353          | 3,711          | 1,975          | 245            |
| Daily average | 1,300          | 1,257          | 555            | 89             |

Note S<sub>o</sub> : sum of daily net radiation in plastic greenhouse  
 B<sub>o</sub> : sum of daily soil heat flux in plastic greenhouse  
 B<sub>r</sub> : sum of daily thermal energy released from soil  
 E<sub>n</sub> : sum of daily electric energy consumed for the operation of fan

Table 3-3. Thermal performance of plastic greenhouse with underground heat exchange system.

| Period(1994)  | r <sub>o</sub> | r <sub>g</sub> | r <sub>t</sub> | η <sub>g</sub> | η <sub>s</sub> | C.O.P. |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| Jan.28-Jan.31 | 0.323          | 0.319          | 0.642          | 0.243          | 0.120          | 4.95   |
| Feb. 1-Feb. 5 | 0.263          | 0.429          | 0.692          | 0.270          | 0.167          | 3.27   |
| Feb. 6-Feb.10 | 0.281          | 0.285          | 0.566          | 0.250          | 0.126          | 3.27   |
| Feb.11-Feb.15 | 0.284          | 0.246          | 0.530          | 0.248          | 0.115          | 4.24   |
| Feb.16-Feb.20 | 0.301          | 0.362          | 0.664          | 0.296          | 0.162          | 1.68   |
| Feb.21-Feb.25 | 0.278          | 0.333          | 0.611          | 0.256          | 0.139          | 2.18   |
| Feb.26-Feb.28 | 0.301          | 0.339          | 0.640          | 0.285          | 0.151          | 2.27   |
| Mar. 1-Mar. 5 | 0.295          | 0.261          | 0.557          | 0.229          | 0.107          | 2.50   |
| Mar. 6-Mar.10 | 0.290          | 0.249          | 0.539          | 0.250          | 0.116          | 2.56   |
| Mar.11-Mar.15 | 0.287          | 0.294          | 0.582          | 0.246          | 0.125          | 2.15   |
| Mar.16-Mar.18 | 0.278          | 0.309          | 0.586          | 0.276          | 0.146          | 2.38   |
| Daily average | 0.289          | 0.312          | 0.601          | 0.259          | 0.134          | 2.86   |

Note r<sub>o</sub> : ratio of soil heat flux to net radiation  
 r<sub>g</sub> : ratio of thermal energy stored in soil to net radiation

을 의미하는 것이다. 山本(1977)은 지중열교환 방식에 의한 재배용 온실의 난방에 관한 실험에서 순방사량에 대한 지중전열량 貯藏比와 지중 축열량 貯藏比를 0.28과 0.48로 얻었다. 이 가운데 순방사량에 대한 지중축열량의 貯藏比는 파이프내의 풍속, 파이프 및 토양의 열적 성질에 의해서 커다란 영향을 받는다고 보고하였다. 향후 지중열교환 시스템의 에너지 저장비를 향상

시키기 위하여 상기 요소들이 지중축열량에 미치는 효과가 구체적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

지중열교환 온실의 집열효율은 0.259, 지중열교환 시스템의 집열효율은 0.134로 나타났다. 지중열교환 온실과 지중열교환 시스템의 집열효율의 차이에 해당되는 0.125는 온실 床面의 집열효율에 해당되는 것이다. 즉, 온실 집열량의 51.7

%가 지중열교환 시스템을 통하여 이루어지고, 나머지 48.3%는 온실 상면을 통하여 저장됨을 의미한다.

555 kJ/m<sup>2</sup> day의 평균방열량을 얻기 위하여 열교환용 송풍기가 소모한 전기에너지는 주간의 경우 145 kJ/m<sup>2</sup> day, 야간에는 89 kJ/m<sup>2</sup> day 이었다. 이것에 기초한 지중열교환 시스템의 평균 성능계수는 2.86으로 나타났다.

다. 온실내의 기온 예측

파이프로부터 배출된 공기가 온실내를 통과하면서 얻거나 또는 잃은 顯熱量은 정상상태로 가정할 경우 다음 식에서 계산된다.

$$Q = \phi_s - \phi_k \dots\dots\dots (3-8)$$

Q : 공기가 얻거나 잃은 현열량 (kJ/hr)

$\phi_s$  : 온실내 지표면으로부터 전달된 현열 (kJ/hr)

$\phi_k$  : 온실표면으로부터의 관류열량 (kJ/hr)

공기가 온실내의 길이 방향으로 dz를 진행하는 동안 dT<sub>a</sub>의 온도 변화가 이루어질 때 공기의 현열량은 다음 식으로 표시된다.

$$Q = C_p \rho S_c u' dT_a \dots\dots\dots (3-9)$$

S<sub>c</sub> : 온실의 단면적 (m<sup>2</sup>)

u' : 온실내의 풍속 (m/hr)

또한, 온실내 지표면으로부터 전달된 현열과 온실표면으로부터의 관류열량은 다음 식에서 계산된다.

$$\phi_s = A \alpha' (T_{x=0} - T_a) dz \dots\dots\dots (3-10)$$

$$\phi_k = B K (T_a - T_{out}) dz \dots\dots\dots (3-11)$$

A : 온실의 내부 폭 (m)

B : 온실의 둘레 (m)

$\alpha'$  : 온실내 지표면의 현열전달율 (kJ/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>)

K : 온실의 열관류율 (kJ/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>)

T<sub>x=0</sub> : 지표면 온도 (°C)

T<sub>a</sub> : 온실내 공기온도 (°C)

T<sub>out</sub> : 외기온 (°C)

식 (3-9), (3-10) 및 (3-11)을 식 (3-8)에 대입하고 정리하면 다음과 같게 된다.

$$C_p \rho S_c u' \frac{dT_a}{dz} = A \alpha' (T_{x=0} - T_a) - B K (T_a - T_{out}) \dots\dots\dots (3-12)$$

여기에서 지표면 온도가 온실내 기온에 미치는 영향이 작으며, 지표면 온도가 온실의 길이 방향으로 일정하다고 가정할 경우 식 (3-12)의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$T_a = M + (T_o - M) \exp(Z/N) \dots\dots\dots (3-13)$$

$$M = (\alpha' A T_{x=0} + K B T_{out}) / (\alpha' A + K B) \dots\dots\dots (3-14)$$

$$N = -(C_p \rho S_c u') / (\alpha' A + K B) \dots\dots\dots (3-15)$$

Z : 온실의 길이 (m)

T<sub>o</sub> : 파이프의 출구 기온 (°C)

파이프의 출구 기온과 지표면 온도가 주어지고 식 (3-13)을 사용하여 온실의 길이(Z)에 파이프의 길이를 대입하면 파이프 입구에서의 기온이 결정된다. 지중열교환 시스템이 정지하여 온실내의 공기가 유동하지 않을 때 실내 기온은 식 (3-12)의 좌변을 0으로 놓은 후 결정된다. 여기에서 온실의 폭을 상면적으로, 둘레를 표면적으로 대치시킬 때 실내 기온은 다음과 같이 표시된다.

$$T_a = (A' \alpha' T_{x=0} + B' K T_{out}) / (A' \alpha' + B' K) \dots\dots\dots (3-16)$$

A' : 온실의 상면적 (m<sup>2</sup>)

B' : 온실의 표면적 (m<sup>2</sup>)

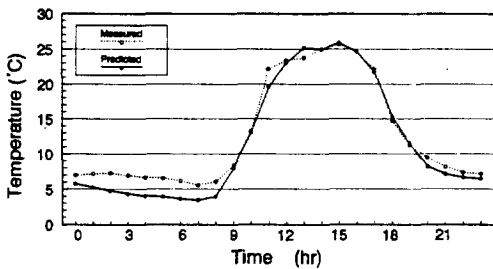
실내 기온을 예측하는 데 사용된 온실의 열관류율과 지표면에서의 열전달율은 각각 14.2kJ/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>, 41.8kJ/m<sup>2</sup>hr<sup>2</sup>로서 山本(1977)의 자료를 이용하였다. 표 3-4는 실내 기온의 예측에 사용된 주요 측정치 및 물성치를 나타낸 것이다.

그림 3-5는 2월 24일과 3월 16일의 실내 기온의 실측치와 예측치를 나타낸 것이다. 그림으로부터 일출이 이루어지는 8시 이전 시각, 즉 지중으로부터 방열이 이루어지는 시간에 예측치가 실측치에 비해서 0.9~2.6°C 정도 낮게 나타났으나, 그 이후에는 예측치와 실측치가 비교적 일치함을 알 수 있다.

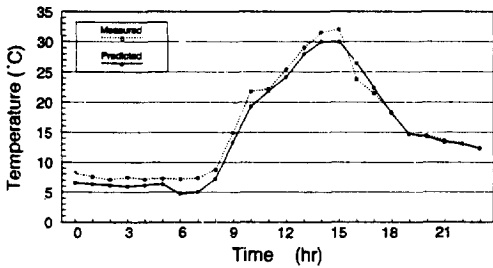


Table 3-4. Various constants used for the prediction of air temperature in greenhouse

| Parameter                         | Symbol         | Value  | Unit                   |
|-----------------------------------|----------------|--------|------------------------|
| Greenhouse                        |                |        |                        |
| inner width                       | A              | 5.0    | m                      |
| perimeter of film                 | B              | 9.8    | m                      |
| floor area                        | A'             | 72     | m <sup>2</sup>         |
| surface area                      | B'             | 117.6  | m <sup>2</sup>         |
| cross-sectional area              | S <sub>c</sub> | 12.5   | m <sup>2</sup>         |
| Air                               |                |        |                        |
| velocity in greenhouse            | u'             | 110.88 | m/hr                   |
| specific heat                     | C <sub>p</sub> | 1.0057 | kJ/kg°C                |
| density                           | ρ              | 1.1774 | kg/m <sup>3</sup>      |
| Overall heat transfer coefficient |                |        |                        |
| greenhouse film                   | K              | 14.2   | kJ/m <sup>2</sup> hr°C |
| soil surface                      | α'             | 41.8   | kJ/m <sup>2</sup> hr°C |



(a)



(b)

Fig. 3-5. Comparison of the measured and predicted air temperature in plastic greenhouse.

(a) Feb. 24, 1994      (b) Mar. 16, 1994

#### 4. 要約 및 結論

본 연구에서는 태양에너지의 이용효율을 제고

시키기 위하여 플라스틱 온실내에 지중열교환 시스템을 설치한 후 지중열교환 온실의 축열 및 방열특성을 분석하였다. 또한, 열교환용 파이프 내의 기온 및 파이프 주위에서 지온 변화의 특성이 분석되었고, 실내 기온의 예측이 이루어졌다. 이상의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실험 기간 동안 晝間の 순방사량, 지중전열량 및 지중축열량은 각각 4,777 kJ/m<sup>2</sup> day 및 1,375 kJ/m<sup>2</sup> day, 1,484 kJ/m<sup>2</sup> day로 나타났다. 夜間の 순방사량, 지중전열량 및 방열량은 각각 1,300 kJ/m<sup>2</sup> day, 1,257 kJ/m<sup>2</sup> day, 555 kJ/m<sup>2</sup> day로 나타났다.

2) 외부 일사량과 온실내의 지중전열량 및 축열량과의 관계는 다음과 같다.

$$B_o = 0.1128 G_o + 132.4$$

$$(R^2 = 0.8960)$$

$$B_g = 0.1925 G_o - 637.8$$

$$(R^2 = 0.8554)$$

3) 실험기간 순방사량에 대한 지중전열량 貯藏比와 지중축열량 貯藏比의 평균치는 각각 0.289 및 0.312로서, 溫室 床面에 도달된 순방사량의 약 60%가 지중에 저장되었다. 지중열교환 온실과 지중열교환 시스템의 집열효율은 각각 0.259, 0.134로 나타났다. 한편, 지중열교환 시스템

의 평균 성능계수는 2.86 으로 나타났다.

4) 실내 기온을 예측한 결과 예측치와 실측치가 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

1. 金 容顯, 高 學均, 金 文基. 1990. 플라스틱 溫室의 熱貯藏 시스템 開發에 關한 研究 (I). 韓國農業機械學會誌 15(1) : 14-22.
2. 金 容顯, 高 學均, 金 文基. 1990. 플라스틱 溫室의 熱貯藏 시스템 開發에 關한 研究 (II). 韓國農業機械學會誌 15(2) : 123-133.
3. 金 容顯. 1990. 플라스틱 溫室의 熱貯藏 시스템 開發에 關한 研究. 서울大學校 博士學位 論文.
4. 山本雄二郎. 1966. 地中-空氣熱交換의 應用 例. 農業氣象. 22(2) : 33-35.
5. 山本雄二郎. 1973. 地中-空氣熱交換 하우스의 溫度環境および熱特性. 農業氣象. 29(1) : 11-15.
6. 山本雄二郎. 1977. 地中熱交換方式による栽培用 하우스의 暖房に關する 研究. 電力中央 研究所報告 476007.
7. 森 俊人. 1977. 地中熱交換方式による冬季 하우스 토마토 栽培의 實用性. 農業及び園藝 52 : 41-45.
8. 高倉 直, 山川建一. 1981. 地中熱交換 하우스의 設計 1. 定常一次元 모델による 解析. 農業氣象 37(3) : 187-196.
9. Kozai, T. 1985. Thermal performance of a solar greenhouse with underground heat storage system. Proc. of the international symposium on thermal application of solar energy. 503-508.
10. Kurata, K. and T. Takakura. 1985. Simulation of climate within a solar greenhouses equipped with underground heat storage units. Proc. of the international symposium on thermal application of solar energy. 521-526