

열펌프 – 잠열 축열 시스템 온실에서 토양의 열저장 및 방열 특성

Thermal Energy Storage and Release Characteristics of the Soil in the Greenhouse Equipped with Heat Pump and Latent Heat Storage System

노정근
정회원
J. G. Ro

송현갑
정회원
H. K. Song

ABSTRACT

In order to obtain the information of bio-environment control, the thermal characteristics of soil in the greenhouse heated by the heat pump and latent heat storage system were experimentally analyzed. The experimental systems were composed of the greenhouse with a heat pump and a latent heat storage system (system I), the greenhouse with a heat pump (system II), the greenhouse with a latent heat storage system (system III), and the greenhouse without auxiliary heating system (system IV). The thermal characteristics experimentally analyzed in each system were temperature of soil layers, soil heat storage and release, soil heat capacity and soil heat storage ratio. The results could be summarized as follows.

1. Time to reach the highest temperature at 20cm deep in soil layers of the crop roots in case of system I was shown to be delayed by 6 hours in comparison to the time of the highest temperature at the soil surface.
2. In the clear winter days, the stored heat capacity values for the system I and the system II were shown to be 22.3% and 11.0% higher than the released heat capacity respectively, and the stored heat capacity values for the system III and the system IV were shown to be 6.2% and 29.6% lower than the released heat capacity respectively. This confirms that the system I provided the best heat storage effect.
3. The heat quantity values stored or released were shown to be highest at 5 cm depth of soil layers. And it was reduced with increasing of depth of soil layers until 20 cm and was not changed under the soil layer of 20 cm depth.
4. The heat absorption rates of soil, the ratio between supplied and stored heat energy, for both the system I and system II were lower than 23%.

Keywords : Thermal characteristics, Soil energy, Bio-environment control.

1. 서 론

우리 나라 겨울철 온실 난방은 주로 화석에너지에 의존하고 있어, 공해문제가 심각하게 대두되고

있는 실정이다. 그러므로 화석에너지 의존도를 줄이려는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구로 자연에너지를 이용할 수 있는 열펌프와 잠열축열을 이용한 시스템 구성에 의한 방법이 있다. 이러한

This article was submitted for publication in September 2001, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in November 2001. The authors are J. G. Ro, Post Doctor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering Sungkyunkwan University, H. K. Song, Professor, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University. The corresponding author is J. G. Ro, Post Doctor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea.

시스템의 온실내 열특성 분석시 중요한 인자로서 토양의 저장열과 방열량을 정확하게 분석하여 반영하는 것이 중요하다. 또한 농업에서는 토양의 온도가 작물의 성장에 중요한 역할을 하고, 아울러 미생물의 활동과 생육에 영향을 미치므로 토양 열에 대한 분석이 필요하다.

토양열에 관한 연구로 국내에서는 김(1998)이 엔진 구동 지열 열펌프의 성능 분석에 관한 연구에서 지중 온도를 예측할 수 있는 방정식을 정립하였으며, B. S Ghuman과 R. Lal(1982)의 표면조건과 공기온도와 관련된 열대지방의 토양온도에 관한 연구와 Joseph Horowitz(1987) 등의 토양의 지역적 분포에 따른 표면전도의 이론적 접근 연구가 있다. 또한 Takayuki Kojima(1989) 등은 온실내 지열교환 시스템에 의한 열전도 특성에 관한 연구를 하였고, Papadakis(1989) 등은 태양열 온실의 토양 에너지 평형분석을 하였으며, W. J. Massman (1993)은 균일하지 않은 토양에서의 주기적 온도변화를 연구하였지만 난방시스템을 갖춘 온실 토양에 대한 열량 분석 및 예측을 위한 기초자료가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템의 토양열 특성을 분석하기 위해, 그리고 시설농업에 필요한 정보로서 온실내 토양의 온도 분포나 변화를 예측하기 위한 기초 자료를 얻기 위해 내부와 외부 토양의 열특성 분석, 토양의 깊이별 온도변화 분석, 토양의 저장열량과 방열량 특성 분석을 하였으며, 태양에너지만을 이용한 온실난방시스템, 잠열축열 시스템을 이용한 온실 난방 시스템, 열펌프를 이용한 온실 난방시스템의 토양 열특성과 비교 분석을 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 토양의 열저장 특성

온실 내·외의 작물이 없는 토양에 시간 당 저장되거나 방열되는 열량은 다음과 같은 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_{soil} = \sum_{i=1}^n m_{soil,i} \cdot C_{p,soil,i} \cdot \Delta T_i \dots\dots\dots(1)$$

$$= \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot A_s \cdot t_i \cdot C_{p,soil,i} \cdot \Delta T_i$$

한편, 단위 면적당 열량 (q_{soil})을 구하기 위해 $A_s = 1$ 을 대입하여 정리하면, 식 (2)와 같다.

$$q_{soil} = \sum_{i=1}^n \rho_{soil} \cdot t_i \cdot C_{p,soil} \cdot \Delta T_i \dots\dots\dots(2)$$

여기서;

A_s = 토양의 면적 (m²)

$C_{p,soil}$ = 토양의 비열 (kJ/kg °C)

m_{soil} = 토양의 질량 (kg)

Q_{soil} = 시간당 토양저장 열량 (kJ/h)

t_i = 토양의 깊이방향 층별 두께 (m)

ρ = 토양의 용적밀도 (kg/m³)

$\Delta T_i = (T_r - T_{r-1})$ 시간당 온도차 (°C/h)

나. 실험장치 및 방법

토양온도 측정에 관한 개략도는 그림 1과 같으며, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 온실 내·외부에서 동일 깊이별로 온도 센서를 설치하여 온도 측정 기록 장치에 연결하여 자동으로 30분 간격으로 기록 되도록 하였다. 측정은 온실 내부의 3지점 (중심, 전후(길이방향) 외부의 2지점에서 하였다. 본 실험에서 측정된 토양 깊이는 토양표면, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 70 cm, 80 cm 깊이의 10지점이었다. 토양온도 측정 기록 장치의 온도 센서는 주로 T Type을 사용하였으며, 센서를 통해 입력된 온도 정보는 온도 측정 장치로 입력되고 이는 다시 RS-232C를 통해 컴퓨터로 전송하였다. 이 온도측정 기록장치는 TECHNOL SEVEN사 K370모델이며, 채널은 30개로 이루어져 있다.

그림 2는 토양의 열량을 적분하기 위한 토양 깊이별 두께를 나타내고 있다. 그림과 같이 표면은 2.5 cm의 적분 두께, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 30 cm

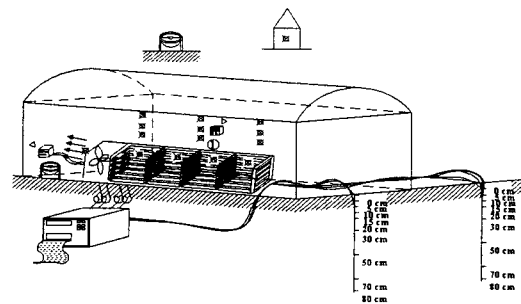


Fig. 1 Measurement of soil temperatures in the underground soil inside and outside the greenhouse.

열펌프-잠열축열 시스템 온실에서 토양의 열저장 및 방열 특성

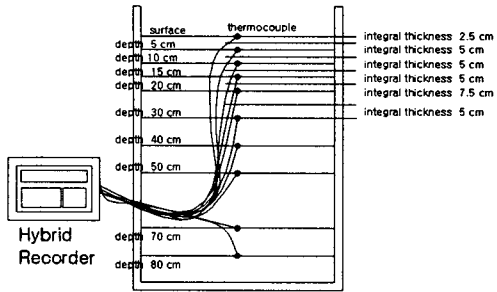


Fig. 2 Integral thickness for the soil heat analysis.

깊이에서는 각각 5 cm의 적분 두께, 20 cm 깊이에서는 7.5 cm의 적분두께를 적용하였다. 여기에 사용된 밀도는 사양토의 용적밀도인 1,230 kg/m³을 적용하였으며⁷⁾, 이때 적용된 비열은 0.9739 kJ/kg · K를 적용하였다.⁷⁾

온실은 표 1과 같은 사양으로 1동을 만들어 4가지 형태의 난방 시스템을 일정별로 다르게 구성하여 3년 동안 반복실험을 하였으며, 외기 조건이 유사한 날을 선정 비교 분석하였다. 각 시스템은 열펌프와 잠열 축열재를 이용한 온실난방 시스템(System I), 열펌프를 이용한 온실 난방시스템(System II), 잠열 축열 시스템을 이용한 온실 난방 시스템(System III) 그리고 태양에너지만을 이용한 온실난방시스템(System IV)이다.

3. 결과 및 고찰

가. 토양온도 특성분석

(1) 온실 내부 깊이별 온도변화

토양의 온도변화를 깊이를 기준으로 분석하였다. 그림 3은 열펌프-잠열축열 난방시스템의 깊이별 시간에 따른 일일의 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주간에는 지표면 층에서는 실내 공기온도보다 낮은 상태에서 실내온

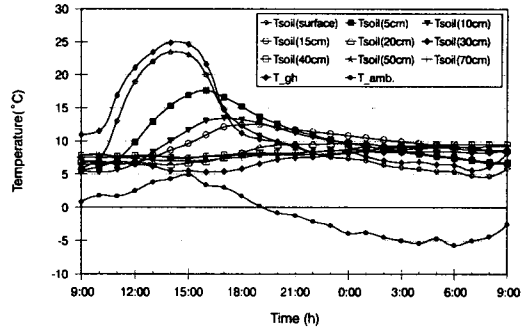


Fig. 3 The soil layers temperature history in the greenhouse in case of heat pump and latent heat storage greenhouse heating system.

도의 변화곡선과 동일한 유형으로 변화하지만 17시에서 19시까지 한 때 실내온도보다 높은 상태를 유지한 후 22시부터 지표면 층 온도는 다시 실내 온도보다 낮은 온도를 보이고 있다. 15 cm 깊이 층에서는 최고온도에 도달하는 시간이 지표면층 최고온도 도달시간으로부터 5시간 지연되어 나타나고 20 cm이상의 깊이에서는 온도변화가 심하지 않은 것을 볼 수 있다.

최고온도를 분석해 보면 최고온도에 도달하는 시간은 지표면 층에서는 13~15시 사이이며, 이때의 온도는 23.5℃를 나타냈고 지중 20 cm 깊이 층에서는 지표면 층 최고온도 도달시간으로부터 약 6시간이 지연되어 나타났으며, 그때의 온도는 9.6℃로서 그 온도 상승폭은 지중 평균 온도, 8.1℃보다 1.5℃ 높은 것으로 나타났다. 최저온도는 40 cm 이하 층에서 오전 6~9시 사이에 나타났으며, 층간의 최저온도 시간 지연은 없었다. 그러나 10 cm 깊이 이하의 토양 층에서 층별 최저온도 차이는 있었으며 50 cm 깊이 이상의 층에서는 하루를 주기로 볼 때는 온도 등락의 변화가 거의 일어나지 않는 것을 볼 수 있다.

(2) 온실 외부 깊이별 온도 변화

Table 1 Specifications of the greenhouse heating system

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

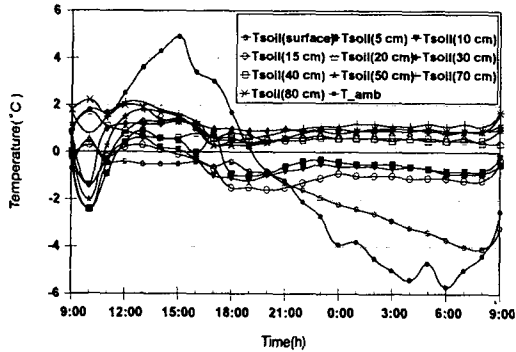


Fig. 4 The temperature history of the soil layers outside the greenhouse.

그림 4에서는 온실 외부에서 깊이를 기준으로 한 토양의 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 깊이별 온도변화를 보면 주간에는 2개의 온도분포 그룹과 야간에 3개의 온도분포 그룹으로 나눌 수 있다. 그 그룹은 주간에는 지표면에서 15 cm까지와 20 cm 이상의 그룹으로 나눌 수 있고 야간에는 지표면, 5~15 cm, 20 cm 이상의 그룹으로 온도차가 뚜렷하게 구분됨을 볼 수 있다.

시간에 따른 같은 층별 온도 변화를 보면 주간에는 15 cm까지는 야간의 온도보다 최대 0.6°C 높았으나 20 cm 이상에서는 1.2°C 높았다. 지표면 층은 주간에 대기온도보다 낮았지만 야간에는 역으로 대기온도보다 높은 상태를 유지하면서 해뜨기 직전까지 직선적으로 하강하는 현상을 나타냈다. 5~15 cm까지는 -1.0~-0.5°C 사이에서 일정하게 유지하였고, 20 cm 이상에서는 0.5~1.5°C 사이에서 일정하였다. 한 가지 주목할 현상으로서 20 cm 이상의 깊이에서는 온도가 0°C 이하로 내려가지 않아 얼지 않음을 볼 수 있다. 이것은 겨울에 한국의 청주지역을 중심으로 한 중부지방 토양의 빙점 결정에 한 요인으로 추정된다.

나. 토양의 방열량

(1) 온실 내·외부 토양 방열 특성

그림 5는 열펌프-잠열축열 난방시스템, 열펌프 난방시스템, 잠열축열 난방시스템, 태양에너지만을 이용한 난방시스템의 내부 토양열과 외부 토양열에 대한 시간별 비교를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 온실 내부에서는 모든 시스템의 저장 시간이 주간 8시간을 지속했지만 외부에서

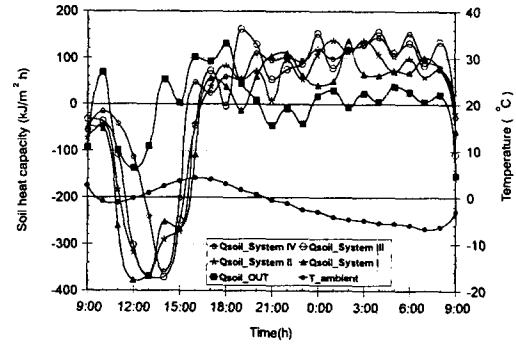


Fig. 5 Soil heat release rate depending on greenhouse heating systems.

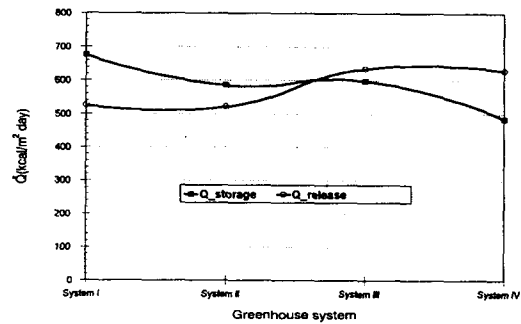


Fig. 6 Comparison of heat storage and release in soil depending on greenhouse heating systems.

는 주간 3시간과 야간 3시간으로 나누어진 저장 시간을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 주간에 저장된 태양 직달 복사 에너지에 의한 것이고 야간의 저장은 16시 전후의 외부 공기온도에 의한 온실효과로 판단된다. 한편, 하루 동안의 토양열량의 경향을 보면 각 시스템 모두 주간에는 저장을 하고 야간에 방열을 하지만 야간초기 시간보다는 후반부에 외기온이 낮아지면서 더 많은 방열량을 나타내는 것을 볼 수 있다. 하지만 온실 외부 토양에서는 주간에 저장도 불규칙하고 저장량도 적을 뿐더러 15시 이후부터 20시 사이에 온실 시스템의 방열량 보다도 많은 방열량을 나타내는데 이것은 손실량이 크다는 것을 의미하는 것이며 24시 이후의 방열량은 아주 작은 것을 보여주고 있다.

(2) 축열량과 방열량의 분석

그림 6은 온실 난방 시스템별 토양의 축열량과 방열량과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 잠열 축열재 난방시스템과 태양에너지

열펌프-잠열축열 시스템 온실에서 토양의 열저장 및 방열 특성

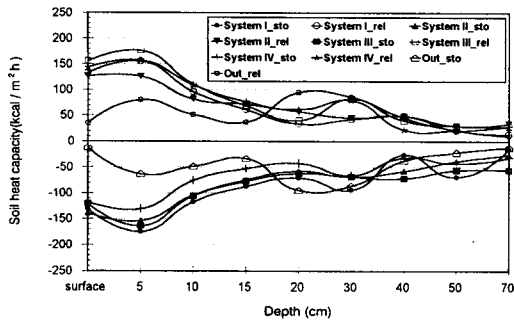


Fig. 7 Analysis of soil storage and release heat capacity as function of soil depth.

만을 이용한 난방시스템에서는 축열량이 방열량보다 적었으며, 열펌프-잠열축열 난방시스템과 열펌프 난방시스템에서는 축열량이 방열량보다 많은 것을 보여주고 있다. 여기서 태양에너지만을 이용한 난방시스템과 잠열 축열 난방시스템의 경우 방열량이 비슷하지만 축열량의 차이가 나는 것은 잠열 축열 난방시스템의 경우는 잠열 축열조의 축열량 방열로 인한 온실 내부온도가 일정 기간동안 유지될 때 이로 인한 토양 축열량의 증가를 가져온 것으로 판단된다. 그러한 현상은 열펌프 난방시스템과 열펌프-잠열축열 난방시스템에서도 동일한 결과를 보여주고 있어 잠열 축열의 필요성을 나타내 주는 것이라 하겠다. 이것은 열펌프와 잠열 축열을 동시에 이용한 시스템이 난방기만을 이용한 기존의 시스템보다 난방비 절감을 실현할 수 있음은 물론 난방효율을 증가시킬 수 있다는 것을 말해주는 결과이며, 온실 난방온도를 설정치 이상으로 유지하기 위하여 유리한 시스템이라는 것을 나타내 주는 것이다.

또한, 열펌프가 없는 난방시스템이 열펌프가 있는 난방 시스템보다 오히려 토양 방열량이 큰 것은 열펌프가 없는 난방시스템의 경우 실내 공기온도가 설정온도보다 낮은 경우를 나타내며 이것은 난방의 필요성을 나타내주는 것이라 하겠다.

그림 7은 토양의 축열량과 방열량을 시스템별 깊이별로 하루 동안에 대해 분석한 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 각층에서 시스템별로 축열량만의 열량과 방열량의 열량을 각각 비교할 때 그 차이는 크지 않았으며, 깊이별로 동일한 결과를 보여주고 있다. 이것은 토양에서는 일정한 주기를 가지고 열이 유동하고 있다는 것을 보여주는 결과이며 깊이가 증가될수

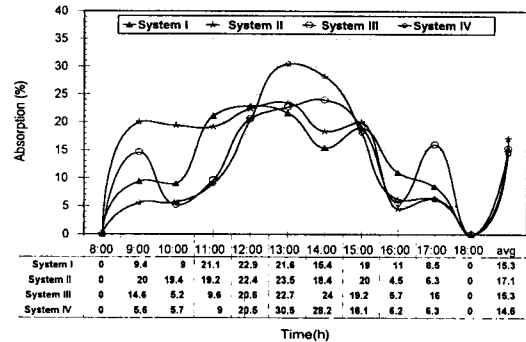


Fig. 8 Ratio of heat stored in soil to heat supplied by the heating systems.

록 그 유동성이 줄어드는 것을 알 수 있다. 토양층별 저장열량과 방열량은 온실 난방 시스템 내에서는 모두 5 cm 깊이 층에서 가장 큰 값을 보였으며, 이 값은 20 cm 깊이까지는 점차 감소하다가 20 cm 깊이 이상에서는 하루 주기의 변화가 더욱 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 반면에 그런하우스를 설치하지 않은 외부 토양에서는 20~30 cm 깊이에서 진폭의 변화가 크지만 40 cm 이상의 깊이에서는 변화가 아주 적은 것을 알 수 있다.

(3) 토양의 열 저장을 분석

그림 8은 온실 난방 시스템 내에서 공급열원의 열량에 대한 토양 저장열량과의 관계를 저장율로 분석한 결과이며, 이 저장율은 겨울철 3개월간(12월~2월)을 평균하여 온실 내에 공급되는 열원의 열량의 합과 토양에 저장된 열량과의 비로 나타내었다.

이 그림에서 보는 바와 같이 12시~15시 사이에 저장율이 각 시스템에서 최대치를 나타내고 있으며, 태양에너지만을 이용한 난방시스템의 저장율은 최대 30%를 나타내고 있다. 그리고 열펌프 시스템은 9시부터 오후 3시까지 20% 정도를 일정하게 유지하는 것을 보여주고 있는데 이것은 태양에너지에 열펌프로부터 열 공급이 추가되었기 때문이다. 16시 이후에 저장율이 급격히 저하되는 것은 태양강도의 약화 때문으로 판단된다. 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템, 열펌프에 의한 온실 난방 시스템에서 온실 내 토양의 열수지는 23% 이하를 나타내는 것으로 판단된다.

주간 시간 동안의 저장율을 평균하면, 그 편차는 최대 2.5% 편차만 보일 뿐 시스템별 차이가 크지 않다는 것을 말해주고 있어 공급열량을 늘리

려는 것보다는 잉여 에너지 저장 쪽에 관심을 기울여야 한다는 것을 암시하고 있다고 하겠다.

4. 결 론

열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템의 토양열 특성을 분석하기 위해, 그리고 시설농업에 필요한 정보로서 온실내 토양의 온도 분포나 변화를 예측하기 위한 기초 자료를 얻기 위해, 온실내·외부 토양의 깊이별 온도변화 분석, 토양의 저장열량과 방열량 분석, 토양의 열 저장율 분석을 하였으며, 각 시스템(태양에너지만을 이용한 온실난방시스템, 잠열축열 시스템을 이용한 온실난방 시스템, 열펌프를 이용한 온실 난방시스템)과 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템에서 작물의 근권부(根圈部)인 20 cm 깊이 토양층의 최고 온도 도달시간은 지표면 층의 경우보다 6시간 지연되는 것으로 나타났다.

2) 시스템별 저장열량과 방열량은 잠열 축열에 의한 온실 난방 시스템과 태양에너지만을 이용한 온실 난방시스템은 저장열량이 방열량 보다 각각 6.2%, 29.6% 적었지만, 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템과 열펌프에 의한 온실 난방시스템의 경우에는 저장열량이 방열량 보다 각각 22.3%, 11.0% 많은 것으로 나타나 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템의 저장효과가 가장 큰 것으로 확인되었다.

3) 토양 층별 저장열량과 방열량은 5 cm 깊이 층에서 가장 큰 값을 보였으며, 이 값은 20 cm 깊이까지는 점차 감소하다가 20 cm 깊이 이상에서는 변화가 없는 것으로 분석되었다.

4) 열펌프-잠열축열에 의한 온실 난방시스템, 열펌프에 의한 온실 난방 시스템에서 온실내 토양의 열 저장율(공급열량에 대한 토양저장 열량의 비)은 23% 이하였다.

참 고 문 헌

1. 김영복. 1998. 엔진구동 지열펌프의 성능분석 (I). 한국농업기계학회지 Vol. 23(2):135-146.
2. Ghuman, B. S., R. Lal. 1982. Temperature Regime of a Tropical Soil in Relation to Surface Condition and Air Temperature and Its Fourier Analysis. Soil Science Vol. 134(2):133-140.
3. Joseph Horowitz, Daniel Hillel. 1987. A Theoretical Approach to The Areal Distribution of Soil Surface Conductivity. Soil Science. Vol. 143(4): 231-240.
4. Massman, W. J. 1993. Periodic Temperature Variations in an Inhomogeneous Soil: A Comparison of Approximate and Exact Analytical Expressions. Soil Science. Vol. 155(5):331-338.
5. Papadakis, G. A. Frangoudakis and S. Kyritsis. 1989. Soil Energy Balance Analysis of a Solar Greenhouse. J. Agric. Engng Res. Vol. 43:231-243.
6. Takayuki, Kojima, Susumu Fujita. 1989. Isothermal Fields and Thermal Conductivities of the Soil under the Greenhouse with an Earth-Air Heat Exchange System. Journal of The Society of Agricultural Structures, 20(1):128-134.
7. 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.