

## 지중가온이 온실의 난방부하에 미치는 영향

### The Effect of Soil Warming on the Greenhouse Heating Load

남 상 운\*

Nam, Sang Woon

#### Abstract

In order to examine the heat transfer characteristic of a soil warming system and effects of soil warming on the greenhouse heating load, control experiments were performed in two greenhouses covered with double polyethylene film. One treated the soil warming with an electric heat wire and the other treated a control. Inside and outside air temperature, soil temperature and heat flux, and heating energy consumption were measured under the set point of heating temperature of 5, 10, 15, and 20°C, respectively. Soil temperatures in a soil warming treatment were observed 4.1 to 4.9°C higher than a control. Heating energy consumptions decreased by 14.6 to 30.8% in a soil warming treatment. As the set point of heating temperature became lower, the rate of decrease in the heating energy consumptions increased. The percentage of soil heat flux in total heating load was -49.4 to 24.4% and as the set point of heating temperature became higher, the percentage increased. When the set point of heating temperature was low in a soil warming treatment, the soil heat flux load was minus value and it had an effect on reducing the heating load. Soil heat flux loads showed in proportion to the air temperature difference between the inside and outside of greenhouse but they showed big difference according to the soil warming treatment. So new model for estimation of the soil heat flux load should be introduced. Convective heat transfer coefficients were in proportion to the 1/3 power of temperature difference between the soil surface and the inside air. They were 3.41 to 12.42 W/m<sup>2</sup>°C in their temperature difference of 0 to 10°C. Radiative heat loss from soil surface in greenhouse was about 66 to 130% of total heating load. To cut the radiation loss by the use of thermal curtains must be able to contribute for the energy saving in greenhouse.

*Keywords* : Greenhouse, Heating load, Heat flux, Soil surface, Soil warming

#### I. 서 론

우리나라의 온실면적은 2004년 현재 51,237 ha로 이중 24%인 12,370 ha가 난방을 실시하고 있다. 난방연료는 약 95%가 경유를 사용하고 있으며, 환율상승에 따른 원유 값의 인상으로 1997년

\* 충남대학교 농업생명과학대학  
\* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5794  
Fax: +82-42-821-8943  
E-mail address: swnam@cnu.ac.kr

10월에 리터당 285원이던 면세 경유 가격은 2004년 12월에 510원으로 79%나 상승하였다. 이에 따라 생산비 중에 난방비가 차지하는 비중이 20~30%에서 30~40%로 높아져 시설원에 농가의 경제성이 크게 악화되고 있다(NHRI, 2004). 이를 극복하고 안정적인 생산을 계속하기 위하여 보온력 향상이나 자연에너지 이용기술, 에너지 절감 기술에 관한 지속적인 기술개발과 보급이 필요할 것으로 생각된다.

시설재배에 있어서 온도관리는 기온뿐만 아니라 지온관리도 매우 중요하다. 지온이 낮을 경우 양분의 흡수가 불량하고, 토양미생물의 활동이 떨어진다. 특히 세균의 발달이 억제될 뿐만 아니라 코르크화가 촉진되고, 정식 후 묘의 활착이 지연되어 토양수분의 흡수가 불량해지므로 생육이 저하된다(Hurewitz et al., 1984; McAvoy and Janes, 1984). 일반적으로 시설채소의 근권에 적합한 지온은 18~22℃로 알려져 있으나, 겨울철 지중온도는 시설의 지상부 난방을 실시하더라도 15℃이하로 관측되고 있어 지중가온이 필요한 것으로 보고되고 있다(Lee and Moon, 1993). 지온이 작물의 양분이나 수분 흡수 및 생육에 미치는 영향에 관한 연구는 많이 이루어지고 있다. 지온이 낮을 경우에는 양분의 흡수율이 현저히 낮아지고, 특히 인산의 흡수비율이 낮으며, 물의 흡수도 매우 감소하는 것으로 보고되어 있다(Goldsberry and Lang, 1987; Meyer et al., 1993; Moon, 2001). 지중가온에 의한 생육 촉진과 에너지절감 효과에 관한 연구도 상당수 이루어지고 있다(Moss, 1983; Zeroni et al., 1984). 오이 재배시 지중가온을 할 경우 무가온구에 비하여 생육이 월등히 증가하고 상품성 및 수량성이 크게 향상되어 65~95%의 조수익 증가를 나타낸 것으로 보고되어 있다. 또한 지중가온을 할 경우 토양중의 열이 계속해서 지상부로 방출됨에 따라 지상부의 난방부하가 감소되어 지상부 가온 비용도 절감되는 것으로 보고되고 있다(NHRI, 2004). 지중가온을 이용한 사례로서 면적 300평

온실에 오이를 재배한 경우를 살펴보면, 지온을 18~20℃로 가온 해준 경우 수량이 38.6%나 증가하였으며 기름 소비량도 16% 정도 절약되는 것으로 나타나고 있다(Lee et al., 1997).

그러나 지중가온 시스템의 열환경 특성이나 토양 열류, 지표면을 통한 지상부로의 전열량 등을 정량적으로 분석하여 지중가온 시스템의 적절한 설치운영이나 에너지절감효과에 관한 연구는 거의 수행된 바가 없는 실정이다(Zondag and Brugger, 1987; Bartok, 1994; Chang et al., 1997).

기존의 난방설계에서는 최대난방부하를 기준으로 난방기 용량을 선정함(Kim et al., 2000)으로서 평상시에는 용량과다로 에너지가 낭비되는 것으로 지적되고 있으므로, 지중가온을 전제로 한 난방설계는 별도로 이루어져야 할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 토양과 지상부의 경계를 이루는 온실바닥에서의 대류열전달계수를 도출하여 토양으로부터 지상부로 전류되는 열량을 정량적으로 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 지중가온 시스템의 전열특성을 분석하고 지중가온 유무에 따른 토양 온도 분포를 검토함으로써, 지중가온 온실의 설계 자료를 제공하고, 온실바닥에서의 대류열전달계수를 도출하여 토양으로부터 지상부로 전류되는 열량을 정량적으로 파악함으로써 에너지절감 효과를 분석하고 지중가온 온실의 난방설계 자료를 정립하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 온실의 지중전열특성 실험

지중가온이 난방부하에 미치는 영향을 검토하기 위하여 폭 5.6 m, 길이 13.2 m, 측고 1.7 m, 동고 3.5 m의 아치형 플라스틱 온실 내부에 2개의 소형 플라스틱 온실을 제작하여 1동은 지중가온 다른 1동은 지중무가온 상태로 지중전열특성 실험을

수행하였다. 내부에 설치된 소형 온실은 폭 2.0 m, 길이 3.6 m, 측고 1.0 m, 동고 2.0 m의 양지붕형 플라스틱 온실로서 2개의 소형 온실 사이에는 환경 영향을 최소화하기 위하여 두께 100 mm의 스티로폼을 지하 50 cm 깊이까지 매설하고 동 간격이 1.0 m 되도록 설치하였다. 플라스틱 피복재는 모두 0.1 mm 두께의 PE필름을 사용하였고, 환기전열부하를 무시하기 위하여 완전 밀폐 구조로 제작하였다.

지중가온을 위해 350 W의 전열온상선(200 V, 고센산업)을 20 cm 깊이로 온실의 바닥 토양에 매설하였고, 지상부 난방은 3 kW의 전기라디에이터(ERT-30, 흥신)를 이용하였다. 전열온상선과 전기라디에이터는 온도조절기(EB-CON1, 대원시스템)를 이용하여 설정온도로 제어하였고, 적산전력계(GF-18, 금성계전)를 이용하여 지중가온 및 지상부 난방 에너지량을 실측하였다. 지중전열부하를 측정하기 위하여 지표면 바로 밑에 열류판(MP-75-D, Eko)을 매설하여 토양층으로부터 온실 지표면으로 전류되는 열량을 계측하였다. 외기온과 2중온실의 중간층 온도 및 실내온도는 온도센서(Hobo, Onset Computer Co.)를 이용하여 10분 간격으로 계측하였으며, 온실 중앙의 5 cm, 15 cm, 25 cm 깊이에 열전대(T형, 0.3 mm)를 매설하여 지중온도를 계측하였다.

열류판과 열전대는 데이터로거(KM-180, Konics)를 이용하여 10분 간격으로 기록하였고, 실험은 2006년 1월 10일부터 2월 24일까지 실시하였다. 지중가온 설정온도는 20℃로 하였으며, 지상부 난방온도는 5, 10, 15, 20℃의 4가지로 설정하여 각각에 대하여 8회씩 반복 실험을 수행하였다. 태양 복사 에너지가 공급되는 주간에는 난방이 필요 없기 때문에 매일 오후 3시부터 이튿날 오전 10시까지를 1회 실험으로 간주하여 야간에만 난방실험을 실시하였다.

## 2. 난방부하계수 분석

난방중 온실의 열손실은 피복체를 통한 관류열손실, 온실 표면의 틈새를 통한 환기전열손실 및 실내공기와 토양과의 열교환에 의한 지중전열손실 등 세 가지로 구분되는데, 이 세가지 손실열량의 합을 전체난방부하라고 한다.

$$Q_g = A_g(q_i + q_v) + A_s q_s \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $Q_g$ 는 난방부하(W),  $A_g$ 는 온실의 피복면적( $m^2$ ),  $A_s$ 는 온실의 바닥면적( $m^2$ ),  $q_i$ 는 단위 피복면적당 관류열부하( $W/m^2$ ),  $q_v$ 는 단위 피복면적당 환기전열부하( $W/m^2$ ),  $q_s$ 는 단위 바닥면적당 지중전열부하( $W/m^2$ )이다.

실험온실은 완전 밀폐온실로서 환기전열부하는 0이 되고, 식 (1)의  $Q_g$ 는 전력량계,  $q_s$ 는 열류판(heat flux plate)을 이용하여 계측한 값( $q_h$ )으로부터 유도하여 사용하면 관류열부하와 관류열전달계수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q_i = \frac{Q_g - A_s q_s}{A_g} \dots\dots\dots (2)$$

$$h_i = \frac{Q_g - A_s q_s}{A_g(t_i - t_o)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $h_i$ 는 관류열전달계수( $W/m^2\text{℃}$ ),  $t_i$ 와  $t_o$ 는 실내기온 및 외기온( $℃$ )이다.

열류판을 이용한 계측값( $q_h$ )에는 지표면에서 실내로 전달된 대류전열량 즉, 지중전열부하( $q_s$ )에 지표면에서 복사냉각으로 손실된 열량( $q_r$ )이 포함되어 있기 때문에 이를 분리해 내야한다.

$$q_h = q_s + q_r \dots\dots\dots (4)$$

온실의 난방부하를 지중가온시(첨자 1)와 무가온시(첨자 2)로 구분하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{gl} = A_g q_t + A_s q_{sl} \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_{\varrho} = A_g q_t + A_s q_{\varrho} \dots\dots\dots (6)$$

$$q_{sl} = h_{sl} (t_i - t_{sl}) \dots\dots\dots (7)$$

$$q_{\varrho} = h_{\varrho} (t_i - t_{\varrho}) \dots\dots\dots (8)$$

여기서,  $h_s$ 는 지표면의 열전달계수( $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $t_s$ 는 지표면 온도( $^\circ\text{C}$ )이다.

온실 내 지표면에서의 열전달계수는 수평 평판에서의 자연대류(난류) 열전달계수와 같고, 이는 온도차의 1/3승에 비례하는 것으로 알려져 있으며 다음과 같이 표시할 수 있다(Albright, 1990; Takakura, 1993).

$$h_s = k_s |t_i - t_s|^{1/3} \dots\dots\dots (9)$$

여기서,  $k_s$ 는 실험계수로서 Albright(1990)는 수평평판에서 1.52, Takakura(1993)는 온실모델에서 1.38~4.6의 값을 제시하고 있으며 식 (9)를 이용하여 식 (7)과 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$q_{sl} = k_s \Delta t_1 (t_i - t_{sl}) \dots\dots\dots (10)$$

$$q_{\varrho} = k_s \Delta t_2 (t_i - t_{\varrho}) \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta t_j = |t_i - t_{sj}|^{1/3}, \quad j=1, 2 \dots\dots\dots (12)$$

따라서 식 (5), (6)의 난방부하 차이를 이용하면

계수  $k_s$ 를 구할 수 있고, 식 (9)를 이용하여 지표면에서의 열전달 계수를 추정할 수 있다.

$$Q_{\varrho} - Q_{gl} = A_s (q_{\varrho} - q_{sl}) \dots\dots\dots (13)$$

$$q_{\varrho} - q_{sl} = k_s (\Delta t_2 (t_i - t_{\varrho}) - \Delta t_1 (t_i - t_{sl})) \dots\dots\dots (14)$$

$$k_s = \frac{Q_{\varrho} - Q_{gl}}{A_s (\Delta t_2 (t_i - t_{\varrho}) - \Delta t_1 (t_i - t_{sl}))} \dots\dots (15)$$

식 (7), (8)로부터 지표면에서의 대류열 전달량  $q_s$ 를 구하면 열류판 계측값  $q_h$ 로부터 복사냉각 손실  $q_r$ 을 분리해 낼 수 있다.

### III. 결과 및 고찰

기상청 홈페이지의 주간 기상예보를 참고로 지상 부 난방 설정온도를 결정하여 실험설계를 하였다. 즉, 최저기온이 높을 것으로 예보된 때의 난방온도를 더 높게 설정하였다. 실험기간 동안의 외기온 및 실험온실의 온도계측 결과를 정리하면 Table 1과 같고, 하루 동안의 관측 예를 Fig. 1에 나타내었다. 온도 조절기의 성능은 그다지 정밀하지 못하여 설정온도와 실제 실내온도의 평균치 사이에는  $-0.8\sim 1.2\text{ }^\circ\text{C}$  정도의 차이가 발생하였다. 실험기간 동안 야간의 외기온은  $-14.1\sim 12.7\text{ }^\circ\text{C}$ 의 범위에 있었고, 처리별 평균기온은  $-4.2\sim 1.8\text{ }^\circ\text{C}$ 의 범위를 나타냈다. 평균지온은 무처리구에서  $7.1\sim 10.1\text{ }^\circ\text{C}$

Table 1 Change of air and soil temperatures in the experimental greenhouse.

Set point of temp. ( $^\circ\text{C}$ )	Outside air temperature ( $^\circ\text{C}$ )			Average air temp. ( $^\circ\text{C}$ )		Average soil temp. ( $^\circ\text{C}$ )	
	Min.	Max.	Avg.	Interlayer	Inside	Warmed	Control
5	-10.9	3.4	-4.2	-1.7	6.2	12.0	7.1
10	-14.1	5.0	-2.7	0.3	10.6	12.4	7.8
15	-7.8	9.8	0.4	3.3	14.9	13.4	9.3
20	-5.9	12.7	1.8	5.7	19.2	14.6	10.1

범위를 보였고, 지중가온 처리구에서 12.0~14.6℃로 나타나 4.1~4.9℃의 차이를 보였다. 무처리구의 지온분포는 타 연구에서 발표한 경우보다 상당히 낮고(Lee and Moon, 1993), 지중가온 처리구에서도 설정온도인 20℃에 비하여 상당히 낮게 관측되고 있는데, 이는 실험온실 바닥에 작물이 없고 보온피복을 하지 않은 관계로 지표면에서의 복사냉각이 컸기 때문으로 판단된다. 또한 지중가온설비의 용량이 부족한 것도 한 이유로 생각되지만 본 연구에서는 지중가온과 무처리구의 비교를 목적으로 하였기 때문에 결과분석에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

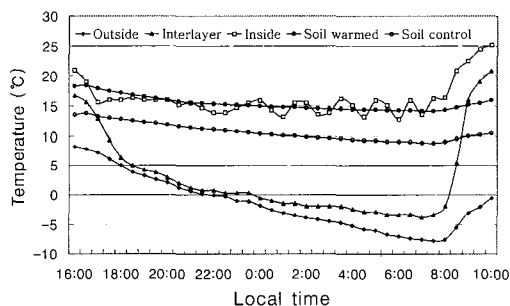


Fig. 1 An example for measured temperatures in experimental greenhouse.

지중가온에 따른 난방에너지 소비량을 Table 2에 나타내었다. 온실의 지상부 난방에너지만을 고려할 경우 지중가온 처리구가 무처리구에 비하여 난방설정온도에 따라 14.6~30.8%의 에너지를 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 난방 설정온도가 낮을수록 지중전열량이 커지므로 에너지 절감 비율은 증가함을 알 수 있다. 지중가온 에너지를 포함시킬 경우에는 전체 에너지 사용량이 비슷하게 나왔으나 15~20℃로 난방 설정온도가 높은 경우 전체 에너지 사용량도 2~4% 정도 절감되는 것으로 나타났다. 지중가온을 해줄 경우 지상부 난방에너지는 크게 절감되는 것을 알 수 있으며, 지중가온 에너지는 태양에너지의 축열이나 난방기 폐열회수 또는 심야전력 등을 이용하면 온실의 전체 난방에너지 비용을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 2는 온실의 난방 설정온도에 따른 평균 난방부하를 나타낸 것이고, 온실의 평균 난방부하를 관류열부하와 지중전열부하로 나누어 지중가온 여부에 따라 정리하면 Table 3과 같다. 관류열부하는 지중가온 여부와는 관계없고 난방 설정온도와 외기온 및 피복특성에 따라 변하지만 지중전열부하는 지중가온 여부에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다.

관류열전달계수는 평균 4.59 W/m<sup>2</sup>℃, 95% 신

Table 2 Change of greenhouse heating energy according to the soil warming.

Inside air temperature (°C)	Greenhouse heating energy (kWh)				Energy saving (%)		
	Control	Soil warming			Indoor	Root zone	Total
	Indoor	Indoor	Root zone	Total			
6.2	15.88 <sup>z</sup> (4.08)	10.98 (3.98)	4.93 (0.24)	15.91 (3.99)	30.8	-31.0	-0.2
10.6	24.68 (4.32)	20.01 (4.00)	4.81 (0.24)	24.82 (4.01)	18.9	-19.5	-0.6
14.9	30.64 (3.57)	25.65 (2.95)	4.38 (0.64)	30.03 (3.09)	16.3	-14.3	2.0
19.2	42.06 (6.51)	35.92 (5.14)	4.51 (0.52)	40.43 (5.42)	14.6	-10.7	3.9

<sup>z</sup> Average daily consumption of heating energy(Standard deviation).

외구간에서 3.69~5.48 W/m<sup>2</sup>°C로 나타났다. 이 값은 2중 PE필름의 열손실계수 4.55 W/m<sup>2</sup>°C(Lindley and Whitaker, 1996)와 거의 비슷하고, 2중 플라스틱 온실의 관류열전달계수 3.97~4.43 W/m<sup>2</sup>°C(Kim et al., 2000) 보다 약간 큰 값으로서 실험 온실의 경우 2중 플라스틱(PE) 온실이지만 층간 간격이 크게 설치되어 단열효과가 떨어졌기 때문으로 판단된다.

난방부하 중에 지중전열부하는 실내온도가 6.2°C인 경우 -3.0%로 무시할 정도였고, 실내온도가 증가함에 따라 12.3~24.4%로 증가하였다. 지중가온 처리의 경우 난방설정온도와 지중가온 온도가 거의

비슷한 실내온도 14.9°C의 경우에 지중전열부하는 3.9%로 거의 무시할 수 있을 정도로 작고, 실내온도가 낮은 경우에는 -8.2~-49.3%로 전체난방부하를 경감하는 효과가 나타남을 알 수 있었다.

일반적으로 온실의 난방부하 설계는 난지, 한지 등 온실 설치지역의 기후, 보온피복의 유무 및 온실의 내외 기온차에 따라 제시된 지중전열부하 값을 사용하고 있다. 여기서 제시하고 있는 지중전열부하 값은 내외 기온차 10~20°C에서 비례적으로 -23.3~11.7 W/m<sup>2</sup>의 범위이다(Kim et al., 2000). 본 실험결과도 지중전열부하는 Fig. 3과 같이 온실의 내외 기온차에 비례하여 거의 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. 지중전열부하는 지중가온 처리구에서 평균 -7.2 W/m<sup>2</sup>(95% 신뢰구간에서 -77.5~63.2 W/m<sup>2</sup>), 무처리구에서 평균 38.1 W/m<sup>2</sup>(95% 신뢰구간에서 -33.3~109.5 W/m<sup>2</sup>)으로 분석되었다. 즉, Kim et al.,(2000)이 제시한 것과 비슷한 경향을 보였으나 지중가온의 유무에 따라 그 값은 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 지중가온 처리한 경우가 Kim et al.,(2000)의 값과 비슷하게 나타나고 있는데 이는 지온 관측 결과 무처리구에서 매우 낮았고 지중가온 처리구의 경우가 실제 작물재배 온실의 지온과 유사하였기 때문으로 판단된다. 따라서 지중가온

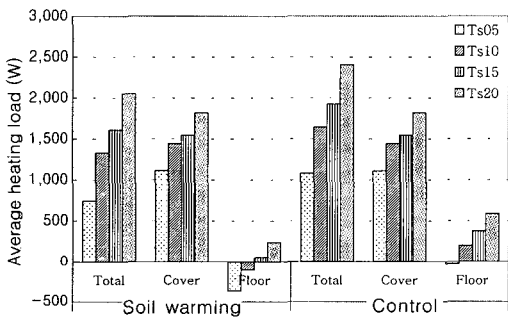


Fig. 2 Comparison of the daily heating load according to the set point of heating temperature (Ts) and the soil warming.

Table 3 Change of greenhouse heating load according to the inside air temperature and the soil warming.

Inside air temperature (°C)	Average greenhouse heating load, W (%)					
	Control			Soil warming		
	Heat flow through cover	Heat flow in soil	Total	Heat flow through cover	Heat flow in soil	Total
6.2	1,112 (103.0)	-32 (-3.0)	1,080 (100)	1,112 (149.3)	-367 (-49.3)	745 (100)
10.6	1,443 (87.7)	201 (12.3)	1,645 (100)	1,443 (108.2)	-109 (-8.2)	1,334 (100)
14.9	1,547 (80.4)	376 (19.6)	1,923 (100)	1,547 (96.1)	63 (3.9)	1,610 (100)
19.2	1,818 (75.6)	585 (24.4)	2,404 (100)	1,818 (88.5)	237 (11.5)	2,055 (100)

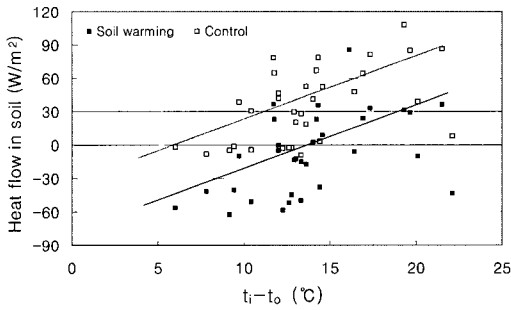


Fig. 3 Relationship between the heat flow in soil and the air temperature difference between the inside and the outside of greenhouse.

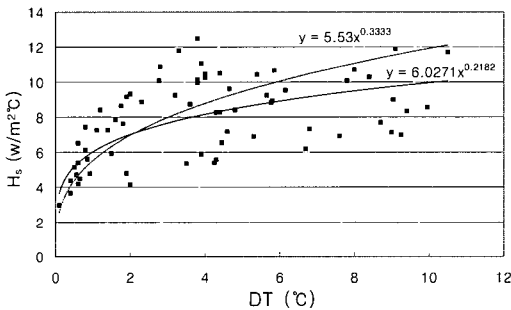


Fig. 4 Relationship between the convective heat transfer coefficient and the temperature difference between the soil surface and the inside air.

설비를 가동하는 온실의 난방부하 설계에는 기존의 방법을 수정하여 새로운 지중전열부하 산정 모델의 도입이 필요할 것으로 생각된다.

지중전열부하를 이론적으로 구하기 위해서는 지표면에서의 대류열전달계수가 필요하다. Fig. 4는 실내공기와 지표면 온도차에 따른 대류열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 대부분의 온실 모델에서 실내표면의 대류열전달계수는 풍속의 함수로, 실내 표면의 대류열전달계수는 자연대류로서 온도차의 함수인 식 (9)의 형태로 표현되고, 식에서 사용되는 계수( $k_s$ )는 1.38~4.6, 대류열전달계수는 3.4~10.5 W/m<sup>2</sup>°C로 제시되고 있다(Takakura, 1993). 본 실험에서  $k_s$ 는 평균 5.53(95% 신뢰구간에서 2.80~8.26)이었고, 대류열전달계수도 평균 7.91

W/m<sup>2</sup>°C(95% 신뢰구간에서 3.41~12.42 W/m<sup>2</sup>°C)로 분석되어 Takakura (1993)가 제시한 값에 비하여 비교적 큰 것으로 나타났다. 대류열전달계수는 표면의 조도나 식생 상태에 따라 달라지므로, 본 연구에서는 작물을 고려하지 않았기 때문에 판단된다. 또한 지표면 온도도 정확히 표면온도를 측정하기가 어려워 지표면 아래 표층의 지온을 이용하여 분석하였는데 그로 인한 오차도 원인으로 생각할 수 있다.

식 (4)에서와 같이 표층에서의 지중열류량은 근권부에서 지표면으로 전도되는 열량으로써 이중 일부는 지표면에서 지상부로 대류되고 나머지는 지표면에서 천공으로 복사된다. Fig. 5는 지중가온 처리 유무에 따른 지표면에서의 열류량을 나타낸 것이다. +는 상향, -는 하향 열류를 나타낸 것으로서 복사냉각 때문에 지표면 온도가 떨어지고 계속해서 지중에서 지표로 열이 흘러나오게 된다. 지온에 비하여 온실의 실내 온도가 낮을 경우에는 지표면에서 대류를 통하여 열을 공급 받게 되므로 지중가온을 하면서 난방설정온도가 낮을수록 상향의 대류열이 많은 것을 볼 수 있다.

표층에서의 지중열류량 예측값으로부터 식 (7), (8)로부터 구한 대류열전달량을 분리해 내면 지표면에서의 복사냉각 손실량을 구할 수 있다. 복사열량은 지중가온 처리구에서 평균 163.3 W/m<sup>2</sup>(95% 신뢰구간 범위 115.4~211.2 W/m<sup>2</sup>), 무처리구에

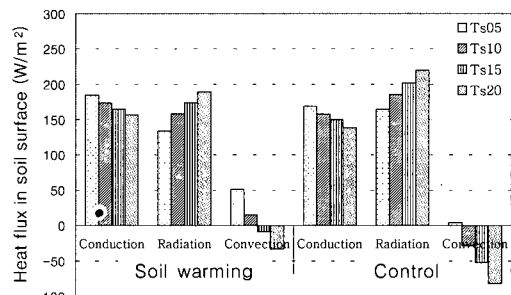


Fig. 5 Comparison of the heat flux in soil surface according to the set point of heating temperature (Ts) and the soil warming.

Table 4 Average heating load for the greenhouse and radiation heat loss from the soil surface.

Inside air temperature (°C)	Control			Soil warming		
	Heating load (W), a	Radiation loss (W), b	Ratio (b/a)	Heating load (W), a	Radiation loss (W), b	Ratio (b/a)
6.2	1,080	1,183	1.10	745	965	1.30
10.6	1,645	1,337	0.81	1,334	1,138	0.85
14.9	1,923	1,454	0.76	1,610	1,251	0.78
19.2	2,404	1,583	0.66	2,055	1,366	0.66

서 평균 192.4 W/m<sup>2</sup>(95% 신뢰구간 범위 142.7~242.0 W/m<sup>2</sup>)으로 나타났다. 이것은 대부분 주간에 토양에 축열된 태양복사 에너지가 대기권으로 방출되는 것이고, 난방열량 중에서 지표면에서 복사 손실되는 비율은 낮을 것으로 판단된다. 하지만 보온피복 등을 통하여 이 부분을 차단하면 주간에 축열된 태양에너지를 유효하게 이용하는 것이 되므로 난방 에너지 절감에 크게 기여할 수 있을 것이다. Table 4는 온실의 난방부하와 지표면에서의 복사손실을 비교한 것이다. 온실 지표면에서의 복사냉각 손실량은 난방부하의 66~130% 정도로 상당히 크므로 이것을 반 정도만 차단하여도 33~65%의 에너지를 절감할 수 있을 것으로 생각된다. 이는 보온커튼에 의한 열절감률 30~65%와 매우 유사한 결과를 나타내는 것으로 판단된다(Kim et al., 2000).

Table 5는 지중가온 에너지 중에서 순수 지온상승에 기여한 비율을 나타낸 것이다. 지중가온 처리구와 무처리구의 표층에서 측정한 지중열류량의 차

이는 지중가온 에너지 중에서 지상부로 유출되어 난방부하 경감에 사용된 에너지와 손실에너지에 해당하므로 이를 제외한 나머지를 순수 지온상승에 기여한 부분으로 간주하였다. 분석 결과 52.1~65.2%로 나타났으며, 이는 지중가온 에너지 중에서 34.8~47.9% 정도는 지표면으로 이동하여 지상부 난방에 이용되거나 복사냉각으로 손실되었음을 의미한다.

#### IV. 요약 및 결론

온실 지중가온 시스템의 전열특성과 지중가온이 난방부하에 미치는 영향을 검토하기 위하여 2동의 이중 폴리에틸렌 필름 피복의 실험온실에서 대조실험을 실시하였다. 1동은 전열온상선을 이용한 지중가온 처리구로 다른 1동은 무처리구로 설치하였고, 온실 내부온도를 5, 10, 15, 20°C로 설정하여 실내외 기온과 지온분포, 지중열류량 및 난방에너지 소비량을 실측하였다.

Table 5 The percentage of energy used in the soil warming of the total heating energy for soil.

Inside air temperature (°C)	Total heating energy for soil (W)	Heat flux difference between the soil warming and the control (W (%))	Heating energy used in the soil warming (W (%))
6.2	335.4	116.6(34.8)	218.8(65.2)
10.6	319.3	111.2(34.8)	208.1(65.2)
14.9	268.2	109.0(40.6)	159.2(59.4)
19.2	256.5	122.8(47.9)	133.7(52.1)



계측결과 지중가온 처리구의 지온이 무처리구에 비하여 4.1~4.9℃ 높게 나타났다. 지상부 난방에너지는 지중가온 처리구에서 14.6~30.8% 절감되는 것으로 나타났으며, 난방 설정온도가 낮을수록 지중가온에 따른 에너지 절감비율은 증가하는 것으로 나타났다. 전체 난방부하 중에서 지중전열부하가 차지하는 비율은 -49.4~24.4%로 난방설정온도가 높을수록 증가하였으며, 지중가온 처리구에서 난방 설정온도가 낮을 경우는 마이너스 값으로 난방부하를 경감하는 효과를 확인할 수 있었다. 지중전열부하는 온실의 내외 기온차에 비례하는 것으로 나타났으나 지중가온 유무에 따라 큰 차이를 보이고 있으므로 새로운 지중전열부하 산정 모델의 도입이 필요할 것으로 판단되었다.

온실 지표면에서의 대류열전달계수는 실내공기와 지표면 온도차의 1/3승에 비례하는 것으로 나타났으며 온도차 0~10℃의 범위에서 3.41~12.42 W/m<sup>2</sup>℃로 분석되었다. 온실 지표면에서의 복사냉각 손실량은 전체 난방부하의 66~130% 정도로 분석되어 보온피복 등을 통하여 이 부분을 차단하면 난방에너지 절감에 크게 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2005년도 충남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### References

1. Albright, L. D., 1990, Environment control for animals and plants. ASAE, Michigan.
2. Bartok, J. W., 1994, Designing a root zone heating system. Connecticut greenhouse newsletter No. 183: 11-15.
3. Chang, J. T., J. E. Son, K. C. Kang and J. W. Lee, 1997, Experimental study on soil heating effects for the improvement of root environment, *Proceedings of the Korean Society for Bio-Env. Con.* 6(1): 112-115. (in Korean)
4. Goldsberry, K. L. and R. C. Lang, 1987, Response of gerbera to root zone heating in soil and gravel substrates, *HortScience* 22(4): 595-597.
5. Hurewitz, J., M. Maletta and H. W. Janes, 1984, The effects of root zone heating at normal and cool air temperatures on growth and photosynthetic rates of tomatoes, *Acta Horticulturae* 148: 871-876.
6. Kim, M. K., S. W. Nam, W. M. Seo, Y. C. Youn, S. G. Lee and H. W. Lee, 2000, *Agricultural Structures Engineering*, Hyan-gmoonsa Press, Seoul. (in Korean)
7. Lee, B. E. and W. Moon, 1993, *Protected horticulture*, Korea National Open Univ. Press, Seoul. (in Korean)
8. Lee, J. W., E. H. Lee, J. S. Kwon, S. Y. Lee and N. Y. Heo, 1997, Effects of different soil warming for each growing stage on growth and yield of greenhouse grown cucumber, *Rural Dev. Administration J. Agri. Sci.* 39(1): 9-15. (in Korean)
9. Lindley, J. A. and J. H. Whitaker, 1996, *Agricultural buildings and structures*. ASAE, Michigan.
10. McAvoy, R. J. and H. W. Janes, 1984, The effects of root zone heating in conjunction with standard and cool night conditions on the growth of chrysanthemums, *Acta Horticulturae* 148: 843-851.
11. Meyer, G. E., G. Ridder, J. B. Fitzgerald and D. D. Schulte, 1993, Simulated water use and growth of New Guinea impatiens in single pots using root zone heating. *Trans. of the ASAE* 36(6): 1887-1893.
12. Moon, J. H., 2001, *Physiological responses of cucumber to root zone temperature*, PhD Diss., Seoul National Univ., Seoul. (in Korean)

13. Moss, G. I., 1983, Root zone warming of greenhouse tomatoes in nutrient film as a means of reducing heating requirements. *J. of Horticultural Science* 58(1): 103-109.
14. National Horticultural Research Institute, 2004, Energy saving technology for protected cultivation in the times of high oil price. (in Korean)
15. Takakura, T., 1993, Climate under cover - Digital dynamic simulation in plant bio-engineering, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
16. Zeroni, M., A. Nir and R. Kopel, 1984, Root zone heating as an element in energy conservation in a seasonal heat storage greenhouse. *Acta Horticulturae* 148: 859-864.
17. Zondag, R. H. and M. Brugger, 1987, Root zone heating design considerations, Combined proceedings International Plant Propagators' Society Vol. 36: 511-515.