

태양열을 이용한 시설재배 지중변온가온의 토양 온도특성 연구(1) - 지중변온가온에 따른 깊이별 온도특성 -

김진현 김태욱 나규동 김태수 성일중 정석현

Study on the Temperature Variation of Greenhouse Soil Warming using the Solar Energy(1) - Temperature Variation of Soil Depth by Soil Warming -

J. H. Kim T. W. Kim K. D. Nah T. S. Kim I. J. Sung S. H. Chung

Abstract

The temperature of root zone is known as an important factor for the growth of crops and reduction of energy in greenhouse. The purpose of this study was to design the solar energy supply system to keep the optimum condition of root zone by soil warming.

As a result of this study, soil warming compared with no warming changed on a large scale temperature rise effect by depth of soil. The greenhouse's inner temperature have an effect on the temperature of surface up to 15 cm, rised to about 1 hour after warming. In case of the temperature fluctuation, soil temperature was about 12°C up to 15~25 cm and it was 13.4°C at greater depths. This results showed that the position of root zone was very different after 3 weeks of growth.

Keywords : Solar energy, Soil warming, Soil depth, Soil temperature, Greenhouse

1. 서론

2008년 8월 국제유가는 배럴당 140 달러까지 상승하여 에너지 의존도가 높은 우리나라는 겨울철 시설재배에 큰 어려움이 있다. 정부에서는 지열을 이용한 신재생에너지 보급지원과 개발, 태양광, 태양전지, 바이오매스 등을 확대 보급하여 석유 의존도를 낮추는 정책에 총력을 기울이고 있다. 특히 농업은 에너지 가격에 민감하여 농가에서는 재배를 포기하는 경향도 나타나고 있다. 따라서 태양열을 지중에 공급함으로써 근권부의 온도를 상승시켜 지상부 난방 에너지를 줄이고 생산성을 극대화하며 친환경 농산물을 재배하는 기술에 대해 지속적인 연구가 필요한 시점이다.

우리나라에서 태양열 시설재배 이용에 관한 기술이 1990

년도 이후 연구가 시작되었으며 최근들어 신재생에너지의 시설재배 활용기술 개발이 비교적 활발히 수행되고 있는 실정이다. 겨울철 시설재배 작물의 근권부 환경은 지상부 환경과의 상호작용에 의해서 노지와는 다른 경향을 나타낸다. 온실내 지온은 실외 지온보다 높은 것이 특징인 데 계속 피복된 온실내 연평균 기온은 실외 기온보다 고온이 되며, 온실내 지온도 노지 지온보다 상당히 높아진다. 뿐만 아니라 생육은 지상부의 온도에 주로 영향을 받지만, 토양의 온도가 낮을 경우에는 양분의 흡수가 불량하고, 토양미생물의 활동이 저하되고 세균의 발달이 억제되며 정식후 묘의 활착이 지연되어 토양 수분의 흡수가 불량해지므로 생육이 저하된다(Eom, 1991).

일반적으로 시설채소는 근권에 적합한 지온이 18~22°C로 알려져 있고, 시설오이의 경우 최저한계지온이 13~15°C이며

This study was conducted by the research fund supported by Agricultural R&D Promotion Center (ARPC). The article was submitted for publication on 2009-06-01, reviewed on 2009-06-09, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-06-15. The authors are Jin Hyun Kim, KSAM member, Professor, Tae Wook Kim, KSAM member, Professor, Machinery Engineering, College of science and engineering, Kyungpook National University, Kuh Dong Nah, KSAM member, President, HNL co., Ltd., Tae Soo Kim, KSAM member, Director, Corelogic R&D center, Il Jung Sung, Graduate Student, and Seok Hyun Chung, KSAM member, Patent Examiner, KIPO. Corresponding author: J. H. Kim, Professor, Machinery Engineering, College of science and engineering, Kyungpook National University, 386 Gajang-dong, Sangju-shi, 742-170, Korea; Fax: +82-54-530-1278; E-mail: <jinhyun@knu.ac.kr>.

최고한계지온은 25°C로 알려져 있다(Lee, 1994; Takahashi, 1983; Terada et al., 1980). 겨울철 시설내의 난방상태에서 토양의 무가온시 지중의 최저온도는 지중 15 cm에서 약 15°C로 나타나 시설오이의 경우 최적지온에 비하면 약 3~7°C가 떨어지므로(Kim et al., 1998a; Kim et al., 1998b; Kim et al., 1999) 묘의 활착 증진과 성장촉진을 위해서는 지온의 상승이 불가피하다고 볼 수 있다.

시설내의 지온은 가온하지 않는 경우 지중 40 cm에서는 일일 중 온도 변화가 0.5°C 미만으로 나타나(Kim and Kim 2001) 온도의 변화가 매우 둔감하다. 또한 근권의 한계 깊이도 일반적으로 10~30 cm이므로 지중가온용 파이프 내경을 100~120 mm로 사용할 경우, 지중 40 cm를 매설깊이로 주로 설정한다(Kim et al., 1998a; Kim et al., 1998b; Kim et al., 1999). 최근 동절기 시설재배에 지중가온에 의한 증수효과는 약 50% 이상으로 알려져 있어 지중가온을 위한 전기료나 난방에너지의 고비용에도 불구하고 보일러 등을 사용한 지중가온을 농가에서 시도하고 있다.

본 연구에서는 토양에 유입되는 에너지와 유출되는 에너지, 관의 열전달 특성, 온실 내기온의 변화와 유량, 관의 단면적과 길이 등으로부터 근권의 에너지 관계를 구명하고 근권의 위치에 따른 최적 공급에너지를 산출하여 지중가온을 통한 근권부의 최적 조건을 달성할 수 있는 에너지 공급 체계를 정립하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시험장지

1) 포장의 시험 설계

그림 1은 경북대학교 상주캠퍼스 기계공학과 시험포장(가로×세로=14 m×10 m)의 지중변온 시스템 개략도를 나타내었으며, 지중변온을 위한 배관은 변온가온구와 무가온구를 각각 3반복, 2반복하도록 설계하였다. 포장 내부의 지중배관은 구당 2개의 두둑으로 모두 12개의 두둑으로 설계하였다. 그림 2와 3에 지중배관의 설비 장면과 지중온도 계측센서 매설 장면을 나타내었다.

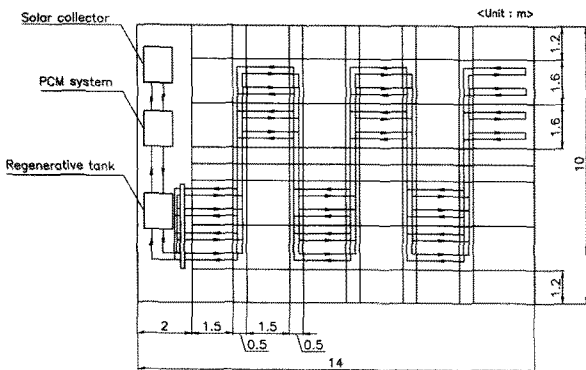


Fig. 1 The field design of water pipe lines for soil warming.



Fig. 2 The laying view of the pipe lines.

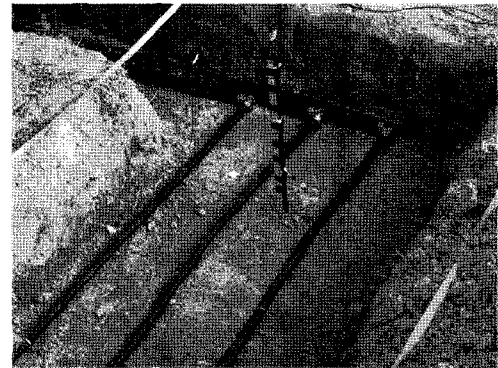


Fig. 3 The laying view of temp. sensors.

그림 4는 현재 겨울철 시설오이 재배방식의 대표적인 식부 규격을 나타내고 있으며 두둑을 20 cm, 폭을 100 cm로 하고 지중에 매설될 가온장치는 지중 40 cm 아래에 중앙으로 유입하고 바깥으로 유출시키는 방식으로 설치하였다.

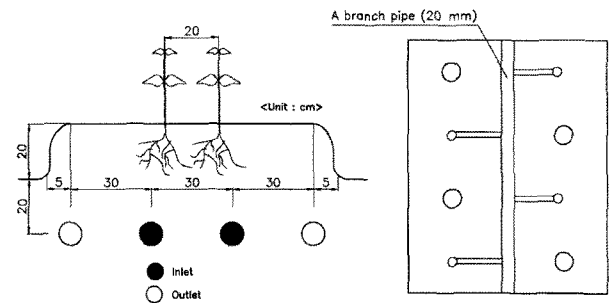


Fig. 4 The vertical section of pipe lines for traditional cucumber cultivation in greenhouse.

2) 태양열 축열시스템 구성

태양열을 이용한 지중변온시스템의 온도특성 시험을 위해 진공관형 태양열 집열기를 이용하여 축열시스템을 구성하였다. 진공관형 집열기는 통상적으로 10~30개가 한 세트로 구성되어지는 데 본 연구에서는 20개를 한 세트 구성하여 총 3세트를 남향 설치하였다. 열손실을 줄이기 위해 축열조는 온실내부에 단열처리하여 설치하였으며, 온수 공급 시 온도 변화 계측을 위하여 각 지점에 온도센서를 설치하여 지중가

온을 위한 온수공급 시의 온도변화를 계측하였다. 그림 5는 축열시스템의 구성도를 나타내며 효율적인 축열을 위해 축열조 내부에 잠축열물질과 열매체유를 투입하였다.

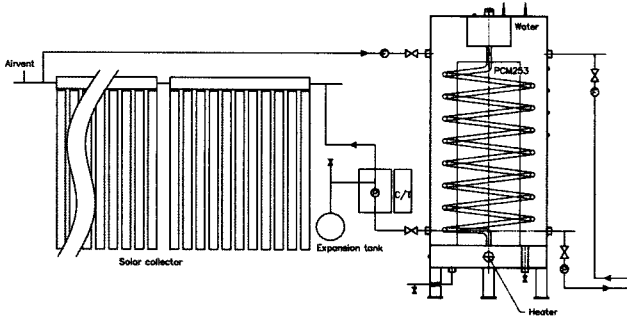


Fig. 5 Schematic diagram of the heat storage system.

3) 토양의 조건

본 연구에 사용된 토양은 삼각좌표분류법상 silty sand에 해당하며, 토양의 특성은 표 1과 같다. 그리고 지중가온 시험 시 평균 토양함수비는 12.9%(깊이 15 cm 기준)로 실제 현장의 상태와 비슷하게 비교적 높은 함수비로 설정하여 시험하였다. 이 때 토양수분장력은 9~20 kPa의 범위로 나타났다.

Table 1 Soil classification used in the experiment

Depth (cm)	Soil Classification	Wn(%)	WL(%)	Ip	Gs	Cu	USCS
15	Silty sand	1.32	42.2	5.95	2.63	70.9	SM

나. 시험방법

1) 시험조건

Table 2 Conditions of the experiment

Item	Conditions
Temperature measurement by soil depth(warming zone)	Depth 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm, 3 repetitions
Temperature measurement by soil depth(non-warming zone)	Depth 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm, 2 repetitions
Loss of energy by Length	Total piping length 75 m, at 7 m intervals
Extra warming equipment	Water heater (400 L, 12 kW)
Hot air heater	HANA Industry Seba-120 A
Image, Chart monitoring	realtime measurement & monitoring
Measuring software	Wizcon 7.02. SCADA
Computer	32 Bits Industrial Computer Set, 12 Slots
Interface Card	AX5232×4sheets

2) 온도 계측시스템의 설계

온도계측을 위해 사용된 시스템은 온도계측용 인터페이스(AX5232, AXIOM, Taiwan) 4장을 12-Slot용 산업용 컴퓨터(AX6150A, AXIOM, Taiwan)에 설치하고, RS232C를 통하여 시스템 컴퓨터에 입력되도록 하였다. AX5232는 총 128 Points의 온도와 전압을 계측할 수 있으나, 본 실험에서는 75 Points를 계측하였다. Board상에서 영점보상(Cold junction compensation)과 12 bit의 분해능, Sample비 100 MHz의 성능을 가지고 있다. 그리고 계측을 위한 프로그램은 그림 6과 같이 SCADA방식의 Wizcon 7.02(PCSOFT, Israel)를 사용하였다. 또한 시스템 전체의 관리와 온도변화를 측정 및 기록하는 스테이션은 586컴퓨터를 사용하였으며, T-type 열전대로 측정된 자료를 AX5232 컨버터를 통하여 산업용 컴퓨터(MODICON, IBM, Korea)에서 일시 기억후 RS-232C 직열 통신케이블을 통하여 시스템 컨트롤 스테이션에 실시간으로 기록되도록 하였다.



Fig. 6 Temperature measurement of the soil warming, non-warming and water pipe lines.

3) 온도 계측점 설계

표 3은 지중변온 시스템의 온도 계측을 위한 위치 설정을 나타낸다. 총 계측점의 수는 75 points이며, 태양열 집열판과 축열조 등의 유입구 및 유출구에 계측점을 설치하였고, 가장 중요한 지온의 계측은 깊이 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm의 7위치를 3반복 계측하였으며, 가온을 하지 않은 무가온구의 지온을 같은 방법으로 2반복 14 points 계측하였다. 토양의 열전도 손실에 대한 단위 길이 당 변화를 구하기 위해 전체 배관의 길이별로 11 points을 2반복하도록 설계하였다.

Table 3 Measurement points of temperature

Items	Collector	Temp.(Air)	PCM	Regenerative Tank	Soil Temp.		Temp by pipe length	Total
					Fluctuation	No fluctuation		
Points	2×2=4	3×2=6	2×2=4	2×2=4	7×3=21	7×2=14	11×2=22	75

3. 결과 및 고찰

가. 환경조건

시설재배에 있어서 태양열 에너지의 활용에 미치는 중요한 요인은 그 지역의 연평균 일사량과 외기온도이다. 우리나라 연간 평균 일사량은 4,675 MJ/m² 로써 일사량이 매우 풍부하며, 그림 7에 상주 인근의 추풍령, 문경, 안동 지역의 1970~2000년까지의 일일 평균 일사량을 월별로 나타내었다. 상주 지역은 일사량이 측정되지 않는 관계로 이 세지역의 통계 자료를 활용하였으며, 일사량은 5월이 가장 높고 12월과 1월이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 동절기 시설재배를 기준으로 할 때, 10월 하순부터 2월 하순까지의 일사량이 중요하므로 10월 하순부터 2월 하순까지의 평균치를 활용하고자 하였다. 일사량의 평균치는 10월 13.36 MJ/m², 11월 10.22 MJ/m², 12월 9.0 MJ/m², 1월 13.0 MJ/m², 2월 16.2 MJ/m²로써 시설오이를 기준으로 할 때, 정식이후 동절기 사용가능한 약 5개월의 일사량의 평균치는 12.36 MJ/m²로 나타났다.

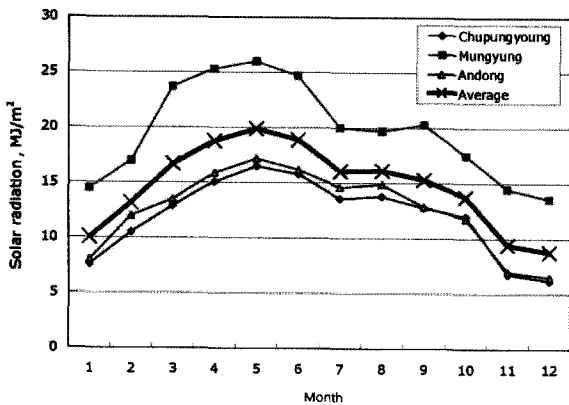


Fig. 7 Mean of solar irradiance in nearby the Sangju.

또한, 상주시의 평균온도는 12월과 1월이 가장 낮고, 11월과 3월은 비슷한 온도를 나타내고 있다. 시설오이의 동절기 재배 기간인 11월에서 다음해 3월을 기준으로 할 때, 시설하우스의 지상부 난방은 11월부터 야간을 중심으로 부분적으로 이루어지며, 지상부의 영향을 받는 지중의 깊이는 약 15~20 cm 까지로 나타난다. 따라서 시설오이의 초기 생육시기인 11월은 근권이 깊지 않기 때문에 지상부의 난방 영향이 지중가온의 영향보다 더 중요하지만 생육 초기인 11월 하순에서 12월 초순은 토양 40 cm 아래에서 열이 지표면으로 전

도되기 위해서는 에너지가 더 필요하다.

나. 외기온과 온실 내기온

2008년 12월 6일과 7일의 외기온과 온실 내기온의 측정된 데이터는 그림 8, 9와 같다. 외기온(Tambi_1, Tambi_2, Tambi_3)은 시험포장의 남, 서, 북쪽의 3지점에서 지상 1.5 m의 위치에 설치하였으며, 온실 내기온(Tgh_1, Tgh_2, Tgh_3)은 중앙 단면에 1.5 m의 높이에 3지점을 선택하여 측정하였다. 외기온과 온실 내기온의 센서 간에는 큰 차이를 나타내지 않았으며 2008년 12월은 비교적 날씨가 따뜻한 편이었으나 측정된 시험시간에는 전형적인 겨울의 일교차를 보여주었다. 외기온은 오전 6시 경에 가장 낮은 -10℃, 주간에는 오후 2시 경에 가장 높은 3~4℃로 나타났고, 온실 내기온은 외기온의 경향과 거의 같은 온도 변화를 보여주며 오후 2시 경에 약 22℃, 야간에는 오전 6시경에 0~-2℃ 정도로 가장 낮게 나타났다. 그러나 온실 내부는 온풍기를 가동하여 최저온도가 0℃ 이상을 유지하도록 하였다.

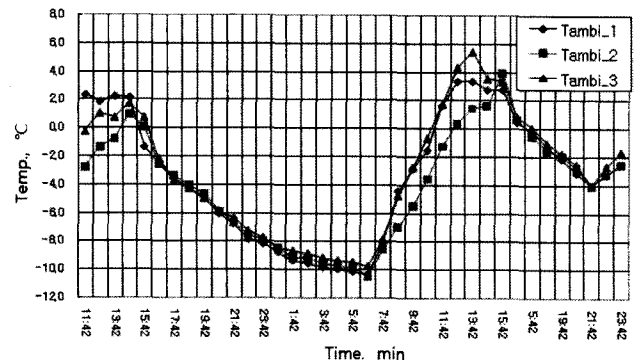


Fig. 8 Variations of greenhouse ambient air temperatures(2008.12.6~7).

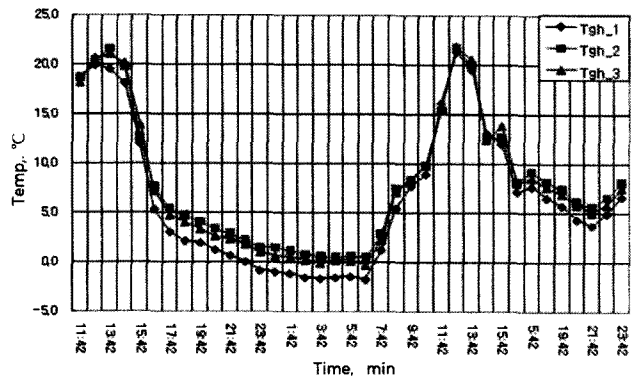


Fig. 9 Variations of greenhouse inside air temperatures(2008.12.6~7).

다. 변온가온구의 토양 깊이별 온도 변화

그림 10은 공급수의 온도를 25°C로 하고, 지중 40 cm에 위치한 배관에 오전 12시부터 오후 4시까지 1.380 L/h(총 5,500 L)를 하루 공급하였을 때, 지중 깊이별 지온의 변화를 나타내고 있다. 시험포장의 내기온이 약 20°C인 상태에서 지표면 5 cm의 지온은 약 18°C로 나타나 내기온의 영향을 크게 받고 있었으며, 지표면 10 cm에서는 약 14°C로써 약 4°C가 낮게 나타났다. 또한 지표면 15 cm에서는 12°C 정도로 내기온의 영향을 적게 받는 것으로 나타나 지중 가온의 영향도 적게 받는 것으로 나타났다. 지중가온의 영향을 많이 받는 지점은 지표면 25 cm, 30 cm, 35 cm에서 가장 크게 나타났으며, 무가온 상태보다 약 2°C 정도 높게 가온이 되었다. 이것은 근권이 최소한 25 cm이상 성장하면 지중가온의 효과가 나타날 수 있음을 보여주고 있다.

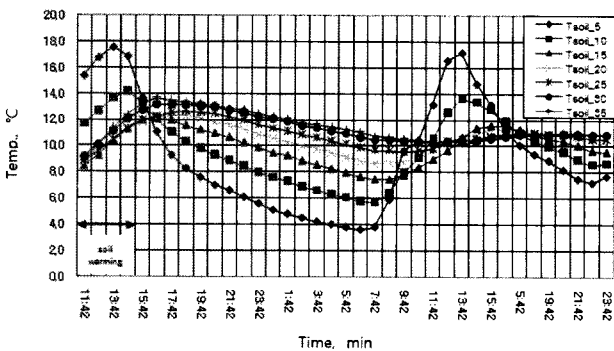


Fig. 10 Variations of soil temperatures in depth when soil warming (2008.12.6~7).

그림 11은 12월 11일, 12일 오전 9시부터 오후 2시까지 4시간 공급수 온도를 25°C로 하고, 1.380 L/h(총 5,500 L)를 2회 공급하였을 때, 지온의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 지표면 5 cm, 10 cm의 지온은 온실 내기온의 영향을 크게 받지만 15 cm이하에서는 공급수의 온도 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 지중 20 cm 이하에서는 지중가온의 효과가 잘 나타나며 약 15°C까지 상승하는 것으로 나타났다.

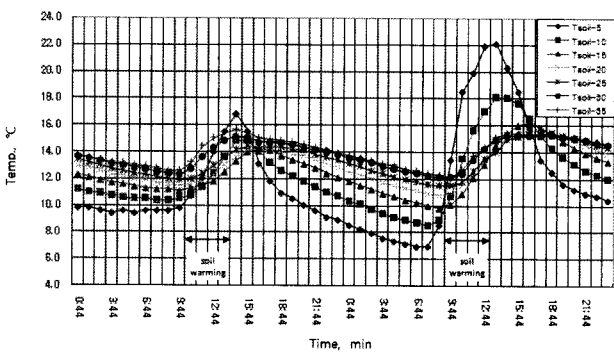


Fig. 11 Variations of soil temperatures in depth when soil warming (2008.12.11~12).

라. 무가온구의 토양 깊이별 온도 변화

무가온구의 토양 깊이별 지온의 변화는 그림 12와 같이 나타났다. 깊이 5 cm에서는 포장 내기온의 영향을 가장 많이 받고 있으며, 깊이 10 cm와 깊이 15 cm순으로 영향을 받고 있다. 지표면의 지온이 가장 높은 시간은 약 3시 30분경이었으며 온실 내기온이 가장 높게 나타난 것은 그림 12와 같이 2시 30분경이므로 깊이 10 cm까지는 약 1시간의 전도시간이 소요되는 것으로 나타났다. 또한 온실 내기온이 20°C에서 깊이 5 cm의 온도는 15°C로 나타나 가온구에 비해 3°C 정도 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 지중가온의 효과는 지표면 5 cm, 10 cm 까지 무가온구에 비해 2~3°C 큰 것을 보여주고 있다. 그러나 지표면 15 cm이하로 내려갈수록 열전달 시간이 지연되고 20 cm이하에서는 전체적으로 10°C를 유지하여 온실 내기온의 영향이 거의 나타나지 않았다. 또한 가온구에 비해 깊이 20 cm이하에서도 1~3°C 정도 낮게 나타났다. 따라서 시설작물의 근권이 20 cm이상 내려가면 온실 내기온의 영향이 미미하므로 지중가온이 필요한 것을 알 수 있다.

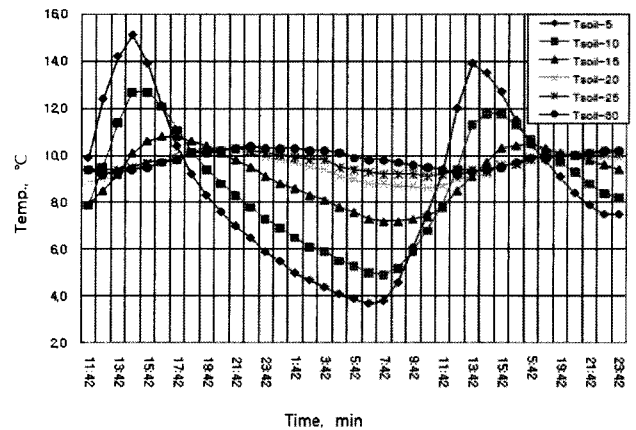


Fig. 12 Variations of soil temperatures in depth when soil non-warming(2008.12.6~7).

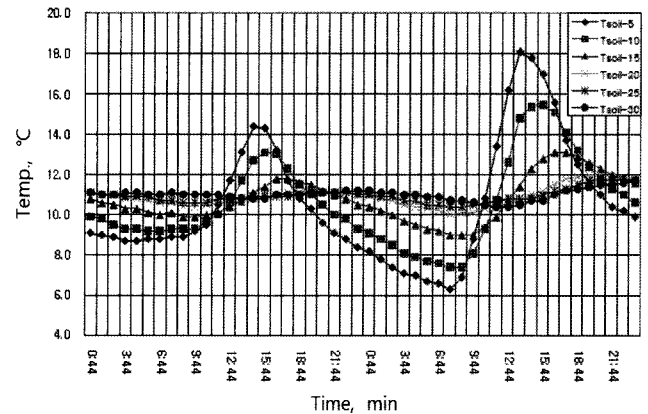


Fig. 13 Variations of soil temperatures in depth when soil non-warming(2008.12.11~12).

그림 13은 12월 11일~12일 무가온구의 지온 변화를 나타내고 있다. 무가온구의 지온은 깊이 15 cm까지는 온실 내기온의 영향을 받는 것으로 나타났으나 깊이 20 cm 이하에서는 11~12°C로 변화가 없는 것을 알 수 있었다. 따라서 근권의 적정 온도를 기준으로 약 6~8°C 가온이 필요한 것으로 사료되었다.

마. 변온가온구와 무가온구의 토양 깊이별 온도 특성

지중가온을 2008년 12월 6일 12:00부터 16:00까지 4시간 공급한 후, 종료시점의 깊이별 변온가온구와 무가온구의 온도특성은 그림 14와 같다. 그림에서와 같이 변온가온구는 깊이 15~25 cm까지는 약 12°C이었으며, 깊이가 깊어질수록 온도가 상승하여 약 13.4°C까지 상승하였다. 깊이 15 cm까지는 온실 내기온의 영향과 지중가온의 영향을 모두 받는 것을 알 수 있었다. 반면에 무가온구의 깊이별 온도의 변화는 온실 내기온의 영향을 받는 지표면에서는 비교적 높았으나 깊이 35 cm까지 갈수록 계속 내려가는 모습을 보여주고 있다. 따라서 변온가온구와 무가온구는 깊이 35 cm에서는 약 4°C까지 차이를 보이고 있다. 이것은 시설작물의 근권 위치가 깊이 15 cm이하로 내려가는 생육 3주 이후에는 큰 차이를 나타낼 수 있음을 보여주고 있다.

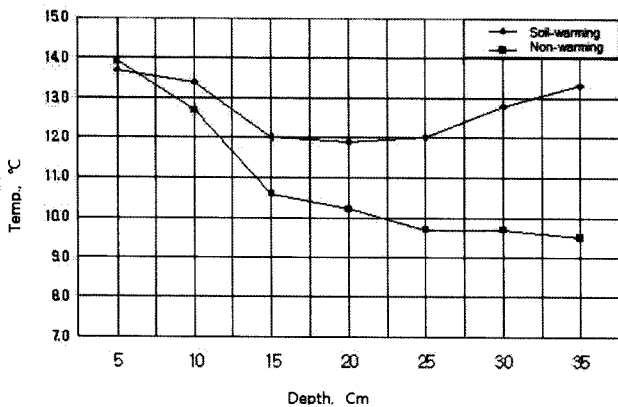


Fig. 14 Temperature variations according to soil depth when soil warming and non-warming(2008.12.6~7).

4. 요약 및 결론

지중가온은 겨울철 시설재배에 있어서 에너지의 절감과 생육효과 증대, 지상부 난방에너지의 절감에 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 지상부 난방에 많은 에너지를 공급하지만 지중의 근권에 대한 온도 조절에 대한 연구와 기술은 부족한 실정이다. 토양에 유입되는 에너지와 유출되는 에너지, 관의 열전달 특성, 온실 내기온의 변화와 유량, 관의 단면적과 길이 등으로부터 근역의 에너지 관계를 구명하는 것은 에너지

의 절감에 앞서 시설작물의 생육과 관련하여 가장 기본적으로 해석되어야 할 과제이기도 하다.

- (1) 지중가온은 무가온에 비해 토양의 깊이별 온도 상승효과를 크게 변화시킴을 알 수 있었다. 여기서는 공급수의 25°C로 일일 4시간만 공급하였을 때, 깊이별 지온에 대한 변화를 분석하였다.
- (2) 온실 내기온에 대한 영향은 깊이 15 cm까지 영향을 미쳤으며 약 1시간 이후에 토양의 온도가 상승함을 알 수 있었다. 깊이별 변온가온구와 무가온구의 온도특성에서 변온가온구의 깊이 15~25 cm까지는 약 12°C이었으며, 깊이가 깊어질수록 온도가 상승하여 약 13.4°C까지 상승하였다.
- (3) 지표면 아래로 내려갈수록 온도의 비교 폭은 커지며 깊이 35 cm에서는 약 4°C까지 차이를 보이고 있다. 따라서 시설작물의 생육 시기에 따라 근권이 깊이 15 cm이하로 내려가는 경우에는 지중가온의 효과가 크게 나타낼 수 있음을 보여주고 있다.

참고 문헌

1. Eom, K. T. 1991. Development of soil temperature and freezing depth prediction model. Ministry of science and technology report. pp. 11-12. Rural Development Administration, Suwan, Korea.
2. Kim, J. H., C. S. Kim, B. S. Myung, J. S. Choi, G. H. Koo and T. W. Kim. 1998a. A development of automation system and a way to use solar energy system efficiently in greenhouse(1) -Study on temperature variation of soil heating in greenhouse-. Journal of Biological Production Facilities & Environment Control 7(1): 15-24.
3. Kim, J. H., J. Y. Oh, G. H. Koo and T. W. Kim 1998b. A development of automation system and a way to use solar energy system efficiently in greenhouse(2) -Study on improvement of growth and yield of a cucumber in soil heating-. Journal of Biological Production Facilities & Environment Control 7(1): 25-34.
4. Kim, J. H., G. H. Koo and T. W. Kim 1999. A study on the cucumber growth by soil warming and warmed water irrigation using solar energy system(3). Journal of Biological Production Facilities & Environment Control 8(1): 1-8.
5. Kim, T. W. and J. H. Kim. 2001. The growth of cucumber and variation of soil temperature used by warming water irrigation system. Journal of Bio-Environment Control 10(1): 15-22.
6. Lee, J. W. 1994. Effect of root zone warming by hot water in winter season on rhizosphere environment, growth and yield

- of greenhouse-grown cucumber. A Treatise for a Degree of Doctor. KyungPook National University, Daegu, Korea. pp. 7-8.
7. Takahashi, K. 1983. Temperature Circumstance and Vegetable(1). Vegetable Greenhouse Horticulture. pp. 128-129.
- Jochang-Bookstore, Tokyo, Japan.
8. Terada, T., S. Yoshino, and S. Huruno. 1980. System of Solar Energy in Greenhouse Horticulture. pp. 4-5. Greenhouse Agriculture Production Technical Society.