

온실 내 토양소독을 위한 지중난방시스템의 지중 열전달 특성

박경규 하유신 홍동혁 장승호 김진현

Underground Heat Transfer Characteristics of the Underground Heating System for Soil Sterilization in Greenhouse

K. K. Park Y. S. Ha D. H. Hong S. H. Jang J. H. Kim

Abstract

This study was conducted to estimate the optimum temperature and required time for soil sterilization when heated water was circulated through underground heating pipes in the greenhouse which solar heat was influenced to the temperature of soil during the summer day. Two different types of heating pipes were used for the experiment. One was a polyethylene pipe(XL) and the other was a corrugated ring shaped stainless steel pipe(STS). The results of the studies were summarized as follows;

By measuring the thermal characteristics of the XL and STS, it was examined that the average temperature differences of the inlet and outlet were 8.5°C and 13.3°C, the average flowrates were 15.3 L/min and 5.6 L/min, and the average radiation powers were 9.1 kW and 4.1 kW, respectively. As results of the regression analysis of underground temperatures, when average soil temperature was 35°C, an average water temperature was 80°C, and XL was used, it was estimated that the possible heat transfer distance, the required time for heat transfer and heat flux to reach the underground temperature of 60°C were 300 mm, 230 hours, and 7.57 kW/m², respectively.

Keywords : Soil sterilization, Underground heating system, Heat transfer, Solar energy, Greenhouse

1. 서론

지금까지 토양 병해가 발생했을 경우, 농약 등 약제에 의한 방제로 농약 내성균, 농약 저항성 해충이 발생하므로 방제를 위해 더욱 강력한 농약을 사용하게 되는 문제점이 있어 친환경적인 소독방법이 필요하게 되었다. 친환경적인 방법에는 유용미생물을 이용하거나 윤작, 항충성 작물을 재배하는 방법이 있지만, 최근 태양열과 지중난방시스템을 겸한 토양소독이 친환경적인 방법으로 주목 받고 있다.

Hong 등(2002)은 태양열을 이용한 시설하우스의 토양소독 방법을 제시하고 있으며, 일반적으로 토양병원균은 55~60°C

의 온도에서 짧은 시간 동안에 사멸하는 것으로 알려져 있지만 태양열만으로 가온했을 경우 지중 10 cm 깊이까지 온도가 30~40°C를 유지하지 못하기 때문에 심층까지 소독하기에는 무리가 있다고 하였다.

Hiroshi 등(2003)에 의하면 시설 하우스의 겨울철 근권부 토양가온을 목적으로 지중 깊이 50 cm, 폭 60 cm 간격으로 매설한 지중난방시스템을 이용하여 여름철에 태양열과 70°C의 고온수를 순환하였을 경우 지중 15~60 cm 근처까지 45°C 이상 상승하였고, 129시간 이상을 유지할 때 토양선충 밀도를 감소시킬 수 있다고 하였다. Nakamura 등(2004)은 태양열과 지중난방시스템을 동시에 이용하였을 경우 지표면으로

This work was supported by the Kyungpook National University Research Grant, 2009. The article was submitted for publication on 2010-01-04, reviewed on 2010-03-17, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-04-02. The authors are Kyung Kyoo Park, KSAM member, Professor, Yu Shin Ha, KSAM member, Graduate Student, Dong Hyuck Hong, KSAM member, Graduate Student, Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Seung Ho Jang, KSAM member, President, Shinan Green-Tech Co., Ltd., and Jin Hyun Kim, KSAM member, Professor, Kyungpook National University, Sangju. 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>.

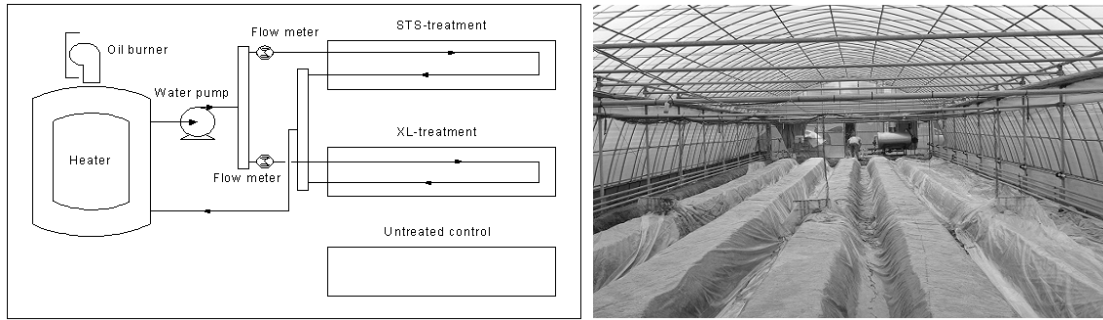


Fig. 1 Feature of experimental device in greenhouse.

부터 지중 60 cm 근처까지 50°C의 온도에 도달하였고, 50°C의 온도에 도달한 후 7일 이상 지속될 때 잡초종자의 사멸효과도 있다고 하였다. 이는 주로 처리온도와 지속시간에 따른 병원균, 해충, 잡초종자 등의 사멸조건을 연구한 것이다.

그러나, 배관종류와 설치형태, 토양상태 등에 따라서 지중 열유동 특성은 상이하게 나타나지만(Kim and Park, 2005; Lee et al., 2005), 태양열과 지중난방시스템을 겸하였을 때 나타나는 지중 열전달 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 온실 내 토양소독을 위하여 태양열과 병행하여 지중난방관으로 고온수를 순환시켰을 때 지중의 온도변화와 분포를 측정하고, 지중위치별로 열전달 소요시간, 열전달거리 등의 특성을 파악하여 토양소독에 적합한 온도와 시간 및 소요열량을 산출하는 기초자료를 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치 및 재료

온실 내 토양소독을 위한 지중난방장치의 지중 열전달 특성을 조사하기 위하여 전체 시스템을 그림 1과 같이 구성하였다. 약 330 m²의 온실 내에 폭 450 mm, 높이 450 mm, 길이 50 m의 두둑을 두둑성형기를 이용하여 성형하였고, 열전달을 양호하게 하기 위하여 토양표면에 물을 충분히 관수한 후 토양표면에는 폴리에틸렌 필름을 피복하였다. 배설형태는 두둑 중앙에 400 mm 간격으로 지표 100 mm 아래에 2열 배관인 Direct return 방식으로 배치하고 고온수를 공급할 수 있도록 난방기(SGS-120, Shinan Green-Tech, Suncheon, Korea)를 설치하였다. 지중난방관은 그림 2와 같이 재질과 형상이 다른 15A용 폴리에틸렌-관(XL)과 스테인레스-환상주름관(STS) 2종류를 이용하였으며 각각의 열전도계수는 XL의 경우 0.38 W/m·°C, STS는 16.29 W/m·°C이다. 시험구 토양의 상태는 함수비가 평균 24.7%(w.b.)이며, 입자의 성분분포는 모래 90%, 자갈 8%, 실트 2%로 나타났다.

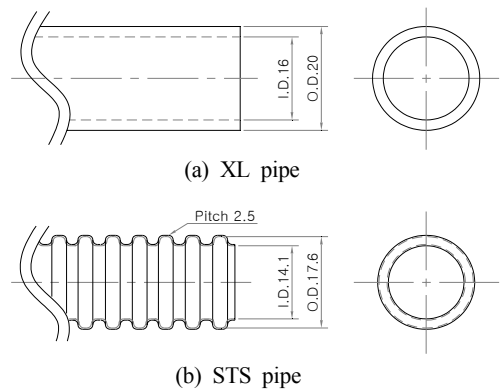


Fig. 2 Drawings of underground heating pipes(unit: mm).

나. 실험방법

토양의 온도변화 측정은 열전대(K Type)와 온도기록계(DR230, Yokogawa, Tokyo, Japan)를 이용하여 온실내 대기 온 1점과 그림 3과 같이 무처리구, XL처리구, STS처리구의 두둑별로 온실입구에서 15 m 지점에 각각 19점씩 지중온도를 측정하였다.

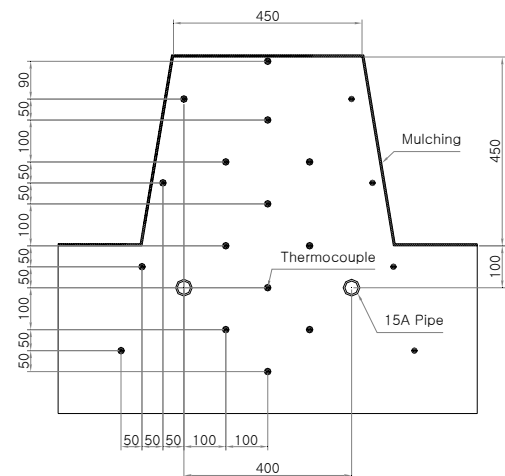


Fig. 3 Temperature measurement locations at the ridge section(unit: mm).

지중난방관의 방열특성은 XL처리구와 STS처리구의 입구 관과 출구관에 온도센서를 각 1점씩을 설치하고 각각의 유량과 온도를 측정 후 식 (1)을 이용하여 산출하였다. 또한, 난방기 경유사용량을 측정하기 위하여 적산식 유량계를 사용하였다.

$$Q = \int_0^t \dot{m} c_p (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

where, \dot{m} : Water flow rate (kg/h)
 c_p : Specific heat of water (kJ/kg°C)
 T_{out} : Outlet temperature (°C)
 T_{in} : Inlet temperature (°C)
 t : Energy loss time (hr)

토양내 온도상승 패턴 분석은 다음의 방법으로 수행하였다. 초기의 토양온도는 3가지 실험구의 두둑 단면별과 지중 깊이별로 다르며, 고온수의 유출입 온도는 50 m의 두둑 길이별로 온도편차가 발생하기 때문에 지중관으로 유입되는 고온수의 온도(T_{∞})와 초기 토양온도(T_0)에 따른 시간(θ)에 따라 변화되는 지중온도(T)의 변화를 분석하였다. 그림 4에서와 같이 고온수의 온도(T_{∞})에 수렴하는 Newton equation을 이용하여 식 (2)의 근사해를 유도하고(Holman, 2002), 근사해로부터 미분방정식을 도출하여 해를 계산하였다. 그 해는 반대수(semi-log) 눈금에서 직선의 방정식으로 나타낼 수 있으며 이를 이용하여 깊이별 온도상수 a, b 값을 산출한 후 지중 온도 변화를 예측하였다. 이때, 시간에 따른 지중온도 변화 예측곡선과 특정 지중온도(T)에서의 열전과시간과 열전과거리의 산출은 SigmaPlot V8.0(SPSS Inc., Chicago, USA)과 Surfer V8.0(Golden Software Inc., Colorado, USA) 프로그램을 이용하였다.

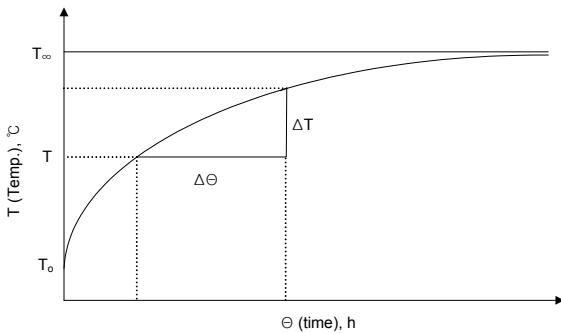


Fig. 4 Prediction curve of soil temperature.

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} \approx T_{\infty} - T \quad (2)$$

$$\ln \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} = a\theta + \ln b$$

$$T = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) b e^{a\theta}$$

where, T : Soil temperature at t hours (°C)

T_{∞} : Water temperature (°C)

T_0 : Initial soil temperature (°C)

a, b: Newton equation constants

θ : Heat transfer time (h)

3. 결과 및 고찰

가. 토양 내 온도변화 특성

그림 5와 표 1은 태양열만이 이용된 무처리구의 토양내 온도변화와 특성을 나타낸 것으로 온실입구에서 15 m 지점에서 측정된 것이다. 실험 당시 날씨정보를 살펴보면 일사량은 최고 22.82 MJ/m², 최저 0.63 MJ/m², 기온은 최고 30.7°C, 최저 20.2°C, 풍속은 최대 8.6 m/s, 최소 0.9 m/s로서 온실 내 온도변화는 최고값과 최저값의 편차가 큰 것으로 나타났다.

지중의 온도변화는 두둑아래 지중 10 mm 위치에서는 28.4~46.6°C로서 18.2°C의 온도편차를 보였으며, 지중 150 mm 위치에는 30.3~39.4°C로 온도편차가 9.1°C, 지중 350 mm 위치에서는 31.2~34.6°C로 온도편차가 3.4°C, 지중 550 mm 위치에서는 30.9~33.8°C로 온도편차가 2.9°C, 지중 750 mm 위치에서는 30.2~32.7°C로 온도편차가 2.5°C로 나타났다. 따라서 두둑 중앙의 지중 150 mm까지는 온도 강하가 급격히 이루어져 온실내 기온의 영향을 많이 받았으나, 지중 350 mm 이상에서는 온도 강하가 느려 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한, 온실 내 온도가 최고값 및 최저값이 나타나는 시점에서 지표면에서 지중으로 들어갈수록 지온의 최저치와 최고치에 도달하는 시각이 점차 지연됨을 알 수 있는 데, 이를 통해 지중 깊이 들어갈수록 토양의 축열 및 방열과정에서 열전달이 지체됨을 알 수 있었다.

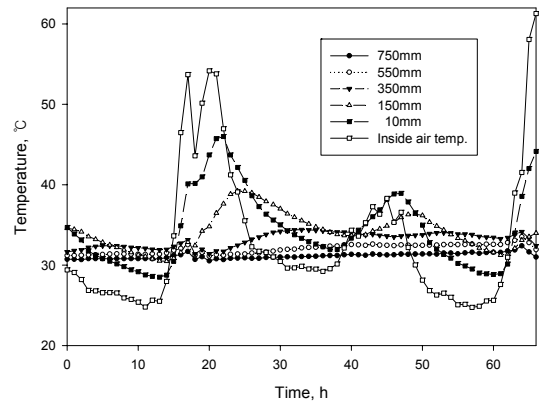


Fig. 5 Variations of soil temperatures in terms of depth for untreated control plot.

Table 1 Comparison of soil temperatures in terms of depth for untreated control plot

Temperature(°C)	Inside air	Depth (mm)				
		10	150	350	550	750
Maximum (a)	61.3	46.6	39.4	34.6	33.8	32.7
Minimum (b)	24.8	28.4	30.3	1.2	30.9	30.2
Difference (a-b)	36.5	18.2	9.1	3.4	2.9	2.5

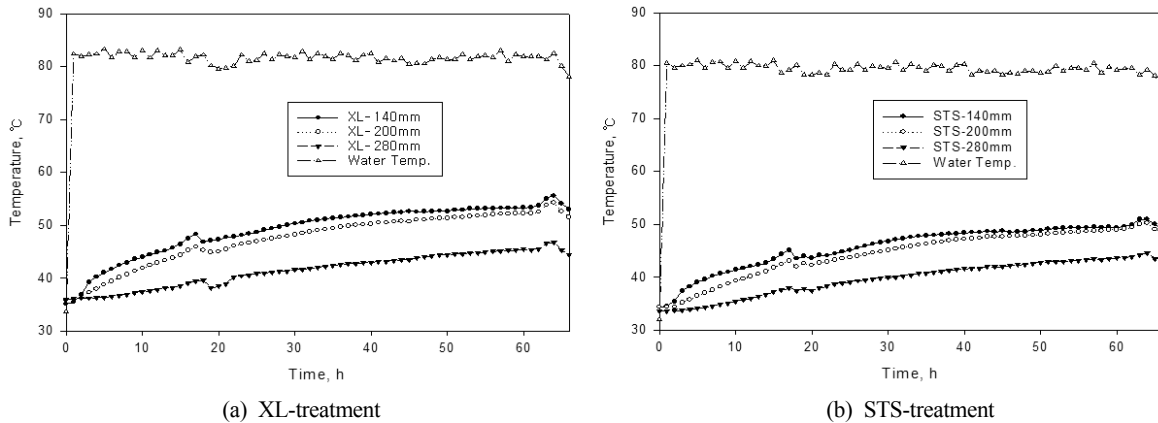


Fig. 6 Variations of soil temperatures around the heating pipes.

Table 2 Comparison of soil temperatures around the pipe in terms of time

Item		Time after treatment (°C)							Average temperature increase rate (°C/h)
Around the pipe(mm)		0 h	10 h	20 h	30 h	40 h	50 h	60 h	
XL	140	35.1	44.0	46.9	50.3	52.1	52.6	53.3	0.32
	200	35.9	41.9	45.0	48.2	50.2	51.3	52.3	0.29
	280	35.9	37.5	38.5	41.6	43.0	44.4	45.4	0.24
STS	140	34.4	41.4	43.6	46.8	48.3	48.9	49.4	0.26
	200	34.3	39.3	42.3	45.1	47.2	48.0	48.9	0.24
	280	33.6	35.4	37.5	39.9	41.6	42.7	43.6	0.18

그림 6과 표 2에 XL처리구와 STS처리구의 토양내 온도변화와 특성을 나타낸 것으로 온실입구에서 15 m 지점에서 측정된 것이다. XL의 경우 내부의 물의 온도는 78.1~83.3°C로서 평균 81.7°C를 나타내었다. XL 주위 140 mm 지점에서의 토양온도는 초기에 35.1°C, 60시간 후 53.3°C를 나타내었으며 온도는 시간당 평균 0.32°C 상승하였다. 200 mm 지점에서의 토양온도는 초기에 35.9°C, 60시간 후 52.3°C를 나타내었으며 온도는 시간당 평균 0.29°C 상승하였다. 280 mm 지점에서의 토양온도는 초기에 35.9°C, 60시간 후 45.4°C를 나타내었으며 온도는 시간당 평균 0.24°C 상승하였다.

STS의 경우 내부의 물의 온도는 76.3~81.0°C로서 평균 79.4°C를 나타내었다. STS 주위 140 mm 지점에서의 토양온도는 초기에 34.4°C를 나타내었으며, 60시간 후 49.4°C를 나타내어 온도는 시간당 평균 0.26°C 상승하였다. 200 mm 지점에서의 토양온도는 초기에 34.3°C, 60시간 후 48.9°C를 나

타내었으며 온도는 시간당 평균 0.24°C 상승하였다. 280 mm 지점에서의 토양온도는 초기에 33.6°C, 60시간 후 43.6°C를 나타내었으며 온도는 시간당 평균 0.18°C 상승하였다.

지중온도의 변화는 열전달시간이 증가함에 따라 지중 깊이 들어갈수록 지연되는 것으로 나타났으며, 관 주위 토양온도 변화는 XL이 STS보다 지중온도가 더 빨리 상승됨을 알 수 있었다.

나. 토양 내 온도분포 특성

그림 7에 무처리구의 지중 온도분포를 나타내었다. 무처리구는 주야간의 온실내 기온의 영향을 많이 받고 있지만, 지중 관 주위는 거의 30~34°C의 온도로 균일한 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다. (a)는 20시간 후의 온도분포로 두둑 경계면의 온도상승에 따라서 지중온도가 상승 분포를 나타내고 있으며, (b)는 60시간 후의 온도분포로 두둑 경계면의 온

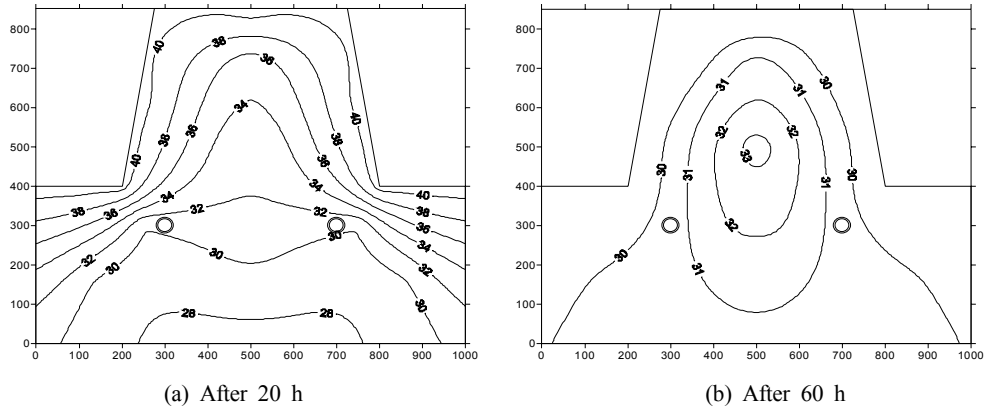


Fig. 7 Distribution of soil temperatures in untreated control.

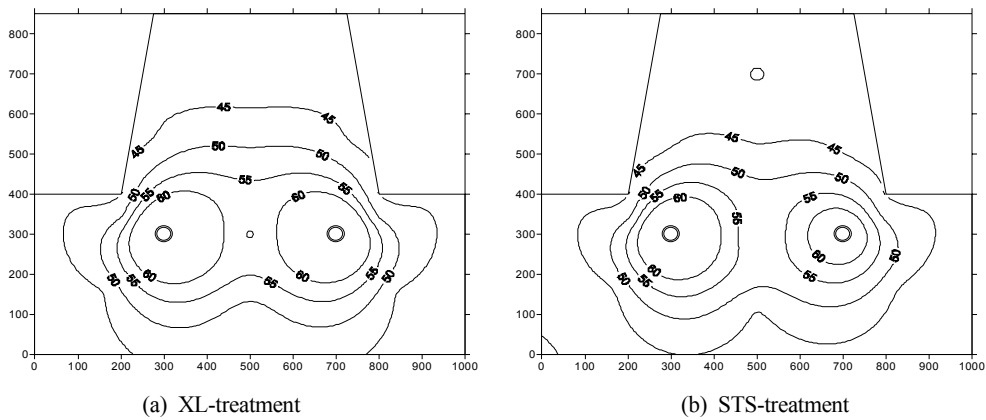


Fig. 8 Distribution of soil temperatures around the pipe after 60 hours.

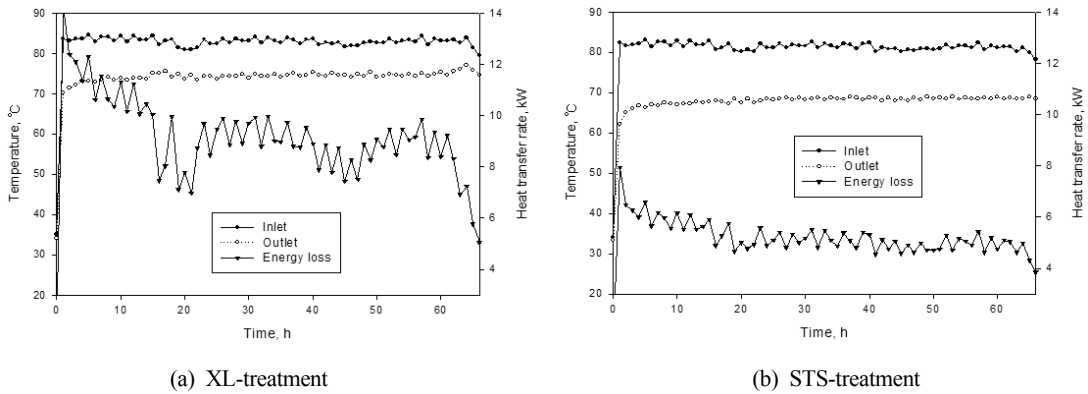


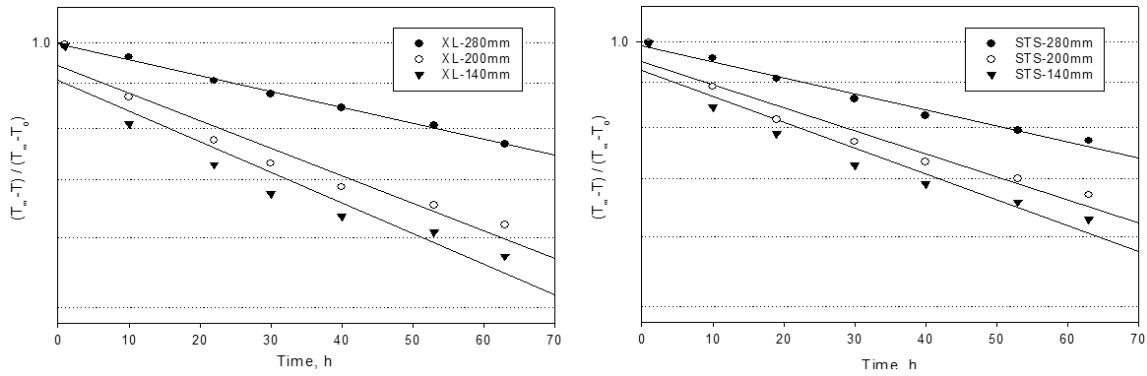
Fig. 9 Variations of heat transfer characteristics in heating pipes.

도하강에 따라서 지중온도도 하강 분포를 나타내고 있다. 그림 8에 60시간 후의 처리구별 지중 온도분포를 나타내었다. (a)의 XL처리구와 (b)의 STS처리구의 경우 온도분포의 특성은 열전달시간에 따라 열전과거리는 지연되어 나타났으며, 관 주위 열전과거리는 XL이 STS보다 지중온도가 더 빨리 확대되었고, 지중온도분포는 XL이 STS 보다 더 균일한 분포를 나타내었다. 또한, STS의 경우 XL보다 한쪽 배관과 다른 쪽 배관 주위의 온도가 불균일한 분포를 보이고 있는데

이것은 열전도계수와 표면적이 커서 2열배관에서 입출구의 물의 온도차가 큰 것에 기인한 것으로 판단된다.

다. 지중난방관의 방열특성

그림 9에 관 형태에 따른 관내 입출구 온도변화 및 방열특성을 나타내었다. XL의 경우 입구온도는 79.4~84.6°C로 평균 82.9°C, 출구온도는 72.2~77.0°C로 평균 74.4°C, 입출구 평균온도차(ΔT)는 8.5°C를 나타내었으며, 유량(Q)은 15.3



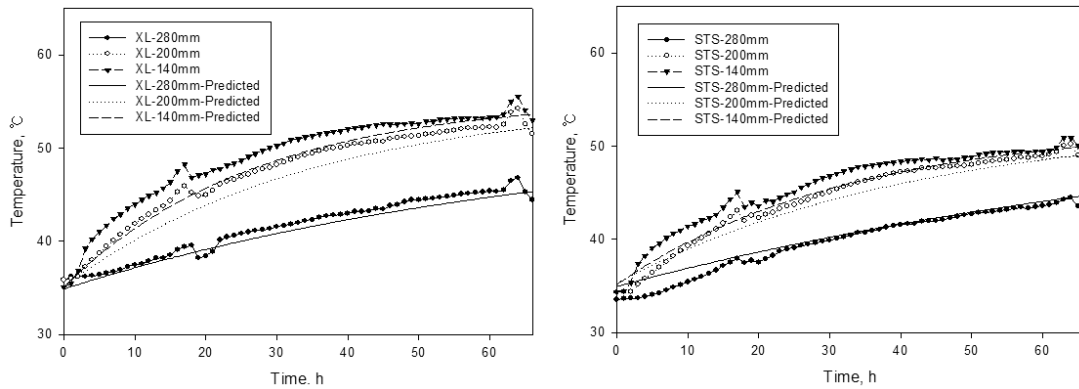
(a) XL-treatment

(b) STS-treatment

Fig. 10 Regression curve of Newton equation constants by pipe type and distance

Table 3 Newton equation constants by pipe type and distance

Pipe	Distance (mm)	Constant (a)	Constant (b)	Correlation coefficient (R ²)
XL	140	-0.0060	0.9039	0.9078
	200	-0.0056	0.9375	0.9430
	280	-0.0036	0.9936	0.9967
STS	140	-0.0053	0.9247	0.9182
	200	-0.0049	0.9476	0.9415
	280	-0.0037	0.9884	0.9835



(a) XL-treatment

(b) STS-treatment

Fig. 11 Comparison of predicted and measured curve of soil temperature by pipe type and distance.

L/min, 총방열량은 608.9 kWh, 열전달율(q)은 9.1 kW로 나타났다.

STS의 경우 입구온도는 78.3~83.0°C로 평균 81.4°C, 출구온도는 65.9~69.0°C로 평균 68.1°C, 입출구 평균온도차(ΔT)는 13.3°C를 나타내었으며, 유량(Q)은 5.6 L/min, 총방열량은 345.9 kWh, 열전달율(q)은 4.1 kW로 나타났다. STS는 열전도계수가 매우 커서 입출구 온도차가 크게 나타났지만 관내 주름의 영향으로 마찰에 따른 물의 유동이 원활하지 못한 것으로 나타났다.

라. 토양 내 온도상승 패턴

그림 10의 관종류별 관주위거리에 따른 위치별 온도상승 회귀곡선을 이용하여 표 3에 온도상수 a와 b 값을 나타내었다. 산출된 온도상수 a, b 값의 결정계수(R²)는 0.91~0.99 사이의 값으로 모델의 상관성이 큰 것으로 나타났다.

표 3의 위치별 온도상수 a와 b값과 식 (2)로부터 XL과 STS의 주위거리에 따른 지중 온도변화 예측곡선을 그림 11에 나타내었다. 이때, 초기의 토양 평균온도(T₀)는 35°C, 배관별 유출입 고온수 평균온도(T_∞)는 80°C를 이용하였다.

시간에 따른 토양온도의 변화는 실험치가 예측치에 비해 다소 높게 나타났다. 실험치는 초기에 다소 급격하게 증가하여 일정시간 이후에는 완만하게 증가하는 것으로 나타났으며, 예측치와 비교하면 초기에 다소 온도편차가 크지만 약 50 시간 이후부터는 유사한 경향을 보이고 있다. 또한, 지중깊이 들어갈수록 실험치와 예측치는 유사한 경향을 보이고 있지만 토양표면과 가까울수록 온도편차가 다소 크게 나타났다. 이는 지중난방관에 의한 전도보다는 온실 내 복사와 대류 열전달의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단되었다. 실험치와 예측치를 종합적으로 비교해볼 때 토양 깊이별 열전도계수, 비열, 밀도, 수분 상태와 토양 초기온도, 고온수 온도, 외기온 영향 등에 따라 약간의 차이가 있을 수 있지만 비교적 유사한 수준으로 판단되었다.

그림 11을 이용하여 열전파시간에 따른 열전파거리별 온도를 산출하고, 산출된 온도로부터 온도분포 특성그래프를 작성한 후, 특정온도대의 열전파거리를 산출하였다. 표 4에 열전파거리에 따른 55℃와 60℃에 도달되는 시간을 나타내었다. XL의 경우 열전파거리가 300 mm일 때 164 h, 230 h로, STS의 경우는 171 h, 240 h로 나타났다.

Table 4 Prediction of heat transfer time by the heat transfer distance

Pipe	Heat transfer distance (mm)	Heat transfer time (h)	
		55℃	60℃
XL	100	55	77
	150	82	115
	200	109	153
	250	136	192
	300	164	230
STS	100	57	80
	150	86	120
	200	114	160
	250	143	200
	300	171	240

마. 토양소독에 필요한 열량 산출

실험에 사용되어진 난방기의 경유사용량은 총 66시간 동안 281 L로 측정되었으며 330 m²의 온실에 사용된 시간당 경유사용량은 4.26 L/h로 나타났다. 경유발열량 8,700 kcal/L를 기준으로 할 때, 난방기의 총발열량은 2843.2 kWh, 토양내 총발열량은 총 2172.6 kWh로서 난방기의 효율은 76.4%로 나타났다.

한편, 지중가온을 목적으로 설계된 농가보급형 자동화온실 (1-2W형) 1000 m²을 기준으로 필요열량을 산출하였다. 이때 지중온도가 55℃와 60℃에 도달되는데 필요한 열량은 약 5,382 kW와 7,567 kW가 되는 것으로 나타났다. XL의 경우

지중온도가 60℃에 도달되는 열전파거리가 300 mm일 때 7.57 kW/m²의 열량이 필요한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 온실 내 태양열과 병행하여 지중난방관으로 고온수를 순환시켰을 때 토양소독에 적합한 온도와 소요시간 및 소요열량을 산출할 목적으로 수행되었다. 지중 난방 방법은 재질과 형상이 다른 15A용 폴리에틸렌-관(XL), 스테인레스-환상주름관(STS) 및 무처리구에 따르는 두둑별 토양내 온도변화특성, 온도분포특성, 지중난방관의 방열특성을 분석하고, 토양내 온도상승 패턴, 토양소독에 필요한 열량을 산출하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) XL과 STS의 방열특성을 살펴보면, 입출구 평균온도차는 8.5℃, 13.3℃, 유량은 15.3 L/min, 5.6 L/min, 열전달율은 9.1 kW, 4.1 kW로 나타났다.
- (2) 지중관 고온수 온도와 초기 토양온도에 따른 지중온도의 변화를 회귀 분석한 결과, 일정 시간이 흐를수록, 지중 깊이가 들어갈수록 실험치와 예측치는 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.
- (3) 토양 평균온도가 35℃, 유출입 고온수 평균온도가 80℃일 때, 지중온도 55℃와 60℃에 도달되는 시간은 XL의 경우 열전파거리가 300 mm일 때 164 h, 230 h로, STS는 171 h, 240 h로 나타났다.
- (4) 지중가온을 목적으로 설계된 농가보급형 자동화온실을 기준으로 토양소독을 할 경우 지중온도 60℃, 열전달거리가 300 mm일 때 XL의 경우 소요열량은 7.57 kW/m²이 필요한 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Hiroshi, K., O. Ko, S. Takahashi, H. Sugeno and M. Morita. 2003. Effects of subsoil heating system in strawberry forcing culture. Research Information of National Agricultural Research Center for Tohoku Region 2003. National Agricultural Research Center for Tohoku Region, Morioka, Japan.
2. Holman, J. P. 2002. Heat Transfer Ninth Edition. McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
3. Hong, S. S., J. Y. Kim and K. Y. Park. 2002. Soil sterilization effects on soil solarization in greenhouse. Bulletin of the Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services 2002:375-391. (In Korean)
4. Kim, Y. B. and J. C. Park. 2005. Soil heating and sterilization system in greenhouse. Proceedings of the KSAM 2005 Summer

- Conference 10(2):414-417. (In Korean)
5. Lee, Y. B., S. I. Cho, C. H. Kang, I. K. Jung, C. G. Lee, J. H. Sung, S. O. Chung and Y. B. Kim. 2005. Analysis of heat transfer characteristics in soil for development of a geothermal heat exchange system. *Journal of Biosystems Engineering* 30(3):185-191. (In Korean)
 6. Nakamura, Y., Katase, M. and C. Kubo. 2004. Soil sterilization through subsoil heating system with solar heat sterilization I: Soil temperature and disinfection in soil sterilization. *Bulletin of the Chiba Prefectural Agriculture Research Center* 3:113-120. (In Japanese)