

## 지열 열교환시스템 개발을 위한 지중 열유동 특성분석

이용범 조성인 강창호 정인규 이충근 성제훈 정선옥 김영복

### Analysis of Heat Transfer Characteristics in Soil for Development of a Geothermal Heat Exchange System

Y. B. Lee S. I. Cho C. H. Kang I. K. Jung C. G. Lee J. H. Sung S. O. Chung Y. B. Kim

#### Abstract

Importance of alternative energy has been increasing due to environmental issues and lack of fossil fuels. In addition, heating cost that occupies from 30 to 40% of the total production cost in the protected cultivation sector in Korea needs to be reduced for profitability and global competition. But, study on geothermal energy to solve these problems has not been activated for Korean protected cultivation. This study was conducted to develop an optimized geothermal exchange system through fundamental test of heat transfer characteristics in soil such as thermal diffusivity, changes in soil temperature during heating and cooling operations, and restorations of soil temperature after the heater was turned off. These issues were investigated using computer simulation for different depths. The simulated characteristics were evaluated through controlled tests. Simulated characteristics of heat transfer in the soil at different depths showed a reasonable agreement with the results of the controlled tests. All of computer simulation and controlled tests, soil temperatures changed at 10cm and 20cm distance from pipe. but don't change at more than 30cm distance. It means that distances of heat transfer of the soil ranged from 20 to 30 cm a day. Based on these results, the optimum spacing between adjacent heat exchange pipes and the pitch were selected as 50 and 40 cm, respectively.

**Keywords :** Geothermal heat exchange system, Heat transfer analysis, Soil temperature change, CFD simulation

#### 1. 서론

대체에너지는 청정하고 안전한 에너지로서 화석연료 사용에 따른 CO<sub>2</sub> 발생이 거의 없고, 고갈되지 않아 지속적으로 이용이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 덴마크 등 선진외국은 미래의 에너지원 확보와 더불어 지구환경보호 차원의 에너지자원 개발, 그리고 국제통상 조약인 GR, WTO 등 다자간 협상에 능동적으로 대처하기 위해서 태양열, 풍력, 지열, 핵연료 등의 대체에너지 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

그 중에서 지열은 농업분야에서 실용화가 가장 유망한 자

원으로 평가되고 있다. 즉 이는 땅속에 있는 열을 끌어내어 온실 등 농업용 시설의 냉난방 에너지로 이용하는 것으로 태양열, 풍력 등 다른 대체에너지에 비하여 초기투자비가 적게 들고 소규모 이용이 가능하며, 땅속에 매설되는 열교환시스템의 수명이 40~50년으로 반영구적이며 계절에 따라 변화가 적은 지속가능한 에너지라는 장점 때문이다. 그러나 열교환시스템을 어떻게, 어떤 형태로 매설하여야 최적의 지열이 확보되는지에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 하지만 국제유가의 불안정과 화석에너지의 고갈에 대비한 대체에너지 개발 차원에서 이러한 연구는 앞으로는 가속화 될 것

This study was conducted by the research fund supported by the Rural Development Administration (RDA). This article was submitted for publication in March 2005, reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in June 2005. The authors are Yong Beom Lee, KSAM member, Senior Researcher, National Institute of Agricultural Engineering, Seong In Cho, KSAM member, Professor, Seoul National University, Chang Ho Kang, KSAM member, Director, Bio-Production Fundamental Engineering Division, Choung Keun Lee, In Kyu Jung, Je Hoon Sung, Seon Ok Chung, KSAM member, Junior Researcher, National Institute of Agricultural Engineering, RDA, and Young Bok Kim, Professor, GyeongSang National university. The corresponding author is Yong Beom Lee, senior researcher, National Institute of Agricultural Engineering, RDA, Suwon 441-100, Korea; E-mail : <beom@rda.go.kr>

로 판단된다.

그동안 부분적으로 수행되어 온 국내외의 유사연구를 살펴 보면 일본의 高倉 등(1991)은 지열을 이용하기 위한 파이프의 매설위치는 깊이 50 cm, 파이프간격 50~60 cm가 좋다고 제안하였으며, Puri(1986)는 유한요소법을 이용 이론적으로 지열을 해석하여 단속운전시의 성능분석을 수행하였고 단속운전을 하면 열 재충전시간이 있기 때문에 유리하다고 하였다. 또한 2차원 정상상태식을 경계요소법으로 해석하고, 정상상태 해석은 장기간의 성능을 고려할 때 합리적인 오차범위에 있다고 보고 예측치와 10%의 차이가 있다고 보고하였다 (Puri, 1987).

국내의 사례로는 열교환시스템의 파이프 매설간격에 따른 열전달 특성에 대해 김 등(1990)은 경계밀착좌표계를 이용한 수치해석 결과 파이프의 매설간격이 좁을수록 지표면을 통한 열손실이 증가하여 지중열교환 효율이 저하되므로 매설간격이 중요하다고 강조하였으며, 김과 백(1996)은 지중매설관을 통한 토양공기의 열교환을 통하여 열교환량, 열교환효율, 성능계수, 매설관 적정길이 등을 검토분석 하였다.

본 연구는 땅속에서의 열확산속도 및 확산거리 그리고 열전과 패턴 등 열 유동에 대한 기초특성을 구명하여 지열 열교환시스템 매설시 파이프의 매설간격 및 코일 피치 등을 결정하는데 활용하고자 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 지중 열유동의 이론적 고찰

지중에 매설된 파이프내의 순환유체와 토양과의 전열과정은 토양내 에너지평형방정식, 매설관 자체의 열 평형방정식, 관내의 유체유동시 열전달방정식, 그리고 수분이동으로 인한 토양내 물질평형방정식 등으로 구분하여 해석할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 수분의 이동에 의한 영향은 크지 않을 것으로 판단하여 이는 고려치 않고 해석하였다. 토양내 에너지 평형방정식은 Holman(1989)이 제시한 아래 식 (1)과 같이 토양내 3차원 열전도 방정식을 이용하여 토양 내에서 시간에 따른 열의 이동을 분석하였다.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\alpha^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\alpha^2 T_s}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$  : 열확산계수,  $T_s$  : 토양온도

그리고 매설관 자체의 열평형방정식은 Puri(1987)에 의해 제안된 식 (2)를 적용하였다.

$$\rho_t C_{pt} V_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = H_C A (T_f - T_t) + \frac{K_s A}{\Delta R} (T_s - T_t) \quad (2)$$

여기서,  $\rho_t$  : 매설관 밀도,  $C_{pt}$  : 관 정압비열,  $V_t$  : 관 체적,  $T_t$  : 관내온도,  $A$  : 관 표면적,  $H_C$  : 관과 유체사이의 대류열 전달계수,  $T_f$  : 유체온도,  $K_s$  : 토양열전도계수,  $\Delta R$  : 관 두께 그리고 관내 유체유동시의 열전달방정식은 Puri(1986)가 제안한 식 (3)을 적용하였다.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{2H_c(T_t - T_f)}{\rho_f C_{pf} R_i} + \frac{K_f}{\rho_f C_{pf}} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - U \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (3)$$

여기서,  $T_f$  : 유체온도,  $C_{pf}$  : 유체의 정압비열,  $\rho_f$  : 유체의 밀도,  $U$  : 열매체유 유속,  $K_f$  : 유체의 열전도계수,  $H_C$  : 관과 유체사이의 대류열전달계수,  $R_i$  : 관 내부 반지름

이상과 같이 토양 속에서의 열유동은 상기방정식에 의거 분석할 수 있다. 하지만 이를 해석학적으로 해를 구하는 것은 매우 어렵고 무수히 많은 해를 가질 수 있다. 따라서 기존 상용화된 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 프로그램을 이용 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 시간을 함수로 한 토양속에서 열유동에 대한 일련의 현상들을 해석하였다.

### 나. 지중 열유동 컴퓨터 시뮬레이션

CFD 시뮬레이션은 유체를 포함하는 시스템에 대하여 유체의 흐름, 열전달 등 일련의 현상들을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 수치적 해를 구하는 분석도구이다. 본 연구에서는 CFD해석 패키지 Fluent 5.4(Fluent Inc. 미국)를 사용하였으며, 기하학적 요소 및 계산 영역의 요소 분할 등은 GAMBIT 1.3 (Fluent Inc. 미국)을 이용하였다(그림 1).

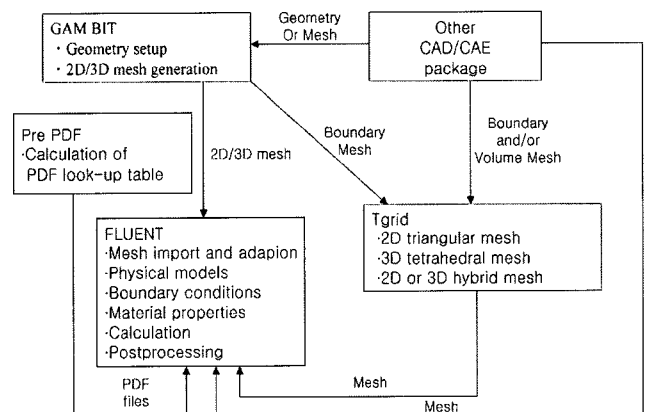


Fig. 1 Simulation procedure for the computational fluid dynamics models using commercial analytical package.

1) 시뮬레이션 조건 설정

지중 열유동 해석을 위한 컴퓨터시뮬레이션의 조건은 실제 매설시 사용되는 매설재료 및 매설형태와 동일하게 표 1 및 그림 2와 같이 3 m 깊이에 외경 27 mm, 내경 21 mm의 고밀도 PE파이프를 일직선으로 32 m를 매설하고 물(70%)+에틸렌글리콜 부동액(30%)을 순환매체유로 하여 35°C로 가열한 후(지중순환시 33°C) 유속 1.03 m/s로 하여 오전 9시부터 오후 4시 30분까지 순환하는 것으로 설정하였다.

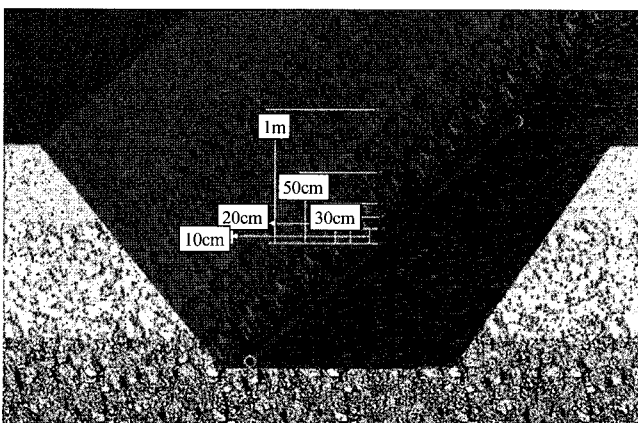
이때 순환 매체유의 가열온도는 실제 냉방 시 유입될 온실 내 온도를 기준으로, 가동시간은 1일중 실제 냉방이 이루어지는 시간을 기준으로 하였다. 지중의 온도 측정위치는 그림 2와 같이 순환매체 파이프로부터 10 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm 및 1 m 떨어진 지점으로 하였고 토양 내에서 열 전파거리, 가동 중 온도변화, 그리고 가동 중단시 토양온도의 회복정도 등을 고찰하였다.

난류특성은 난류강도, 난류길이척도(turbulence length scale)로 설정하였으며, 난류강도  $I$ 와 난류길이척도  $L$ 은 Fluent5 Users Guide에서 제시한 아래 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$I = \frac{\nu'}{\nu_{avg}} \cong 0.16(Re) - 0.125, L = 0.07D \quad (4)$$

**Table 1** Simulation conditions and specification of the geothermal heat exchange pipe used for investigation of heat transfer characteristics in soil.

Item	Specification
Burying type	Straight line
Pipe (mm)	HDPE, Inside diameter 21, outside 27
Burying length and depth (m)	Length 32, depth 3
Circulation fluid	Water (70%)+ethylene glycol (30%)
Fluid temperature (°C)	35 (in pipe 33)
Fluid velocity (m/s)	1.03
Operating time (hour)	7.5 (9 AM~4:30 PM)



**Fig. 2** Measurement locations of soil temperature for investigation of heat transfer characteristics in soil.

여기서,  $\nu'$  : root-mean-square of the velocity fluctuation

$\nu_{avg}$  : average flow velocity

Re : Reynolds number

D : diameter of pipe

또한 지중 토양의 초기 온도는 검증시험을 할 토양에서 실측한 것으로 지중파이프로부터 20 cm 이격지점까지 14.1°C, 30 cm는 13.7°C, 50 cm는 13.5°C, 그리고 1 m까지는 12°C로 설정하였다.

2) 세부해석 모델의 설정

CFD Fluent를 이용한 지중 열유동 세부해석을 위한 지배방정식은 유체해석용 기본방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식으로 하고, 에너지 방정식은 이론 고찰에서 도출한 바와 같이 식 (1)~(3)의 토양 및 매설관 자체 열 평형 방정식, 관내 유체유동 열전달방정식으로 하였다. Solver의 선택은 열교환시스템의 경우 일정한 유속과 밀도로 매체유체가 이동하기 때문에 간단하면서도 계산이 빠른 분리해석법 (segregated solver)을 적용하고, 시간에 따른 온도분포 변화를 예측하기 위하여 비정상상태로 해석하였다.

Viscous 모델은 최근에 도입되어 난류의 유동상태를 보다 사실적으로 묘사가 가능하지만, 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 Realizable k-e 모델을 선택하였고, 모델의 상수 값들은 일반적인 유동해석에 적용되는 추천 값들을 사용하였다. Realizable k-e 모델의 경우 벽 근처의 흐름에 대해 잘 맞지 않기 때문에, 이를 보완하기 위해서 파이프 면에서의 유체흐름은 standard wall functions 방법을 적용하였다(Fluent5 Users Guide).

3) 재료의 물성값 설정

HDPE(high density polyethylene)파이프, 순환매체유, 토양의 밀도 및 비열, 열전달계수 등은 각 물질의 종류 및 특성에 따라 다양한 범위의 값을 가지나 검증시험을 수행할 토성 및 재료를 기준으로 하여 물성 값을 표 2와 같이 선정하고 상수로 취급하였다.

**Table 2** Physical properties of the materials used as simulation input values.

Physical property	Materials		
	HDPE	Water (70%) + ethylene glycol (30%)	Soil
Density (kg/m <sup>3</sup> )	960	1,050	1,880
Specific heat (J/kg·°C)	1,890	3,570	840
Thermal conductivity (W/m°C)	0.4	0.45	0.2

**Table 3** Texture and water content of the soil used in the verification test.

Item	Depth		
	1 m	2 m	3 m
Texture (%)			
sand	71	51	41
slit	21	31	35
clay	8	18	24
Water content (%)	18	21	22

**다. 시뮬레이션에 대한 토양매설 검증시험**

지중 열유동에 대한 시뮬레이션 결과를 검증하고자 농업공학연구소 구내 밭포장(경기도 수원시 소재 농촌진흥청사 내)에서 2003. 12. 13~12. 25일 까지 13일 동안 매설을 통한 검증시험을 실시하였다

**1) 매설토양의 상태**

농업공학연구소 구내 밭 토양은 표 3과 같이 1~3 m깊이에서 함수율은 18~22%내외로 매우 건조한 토양이며, 입자의 성분 분포는 1 m 깊이에서 sand 71%, slit 21%, clay 8%이고, 2 m 깊이에서는 sand 51%, slit 31%, clay 18%였다. 그리고 3 m 깊이에서는 sand 41%, slit 35%, clay 24%로 구성된 토양이다. 또 매설지역이 건축폐자재 등 불순물이 포함된 성토된 토양으로 토양의 상태가 다소 불량하여 효율적인 열유동을 기대하기는 어려웠다.

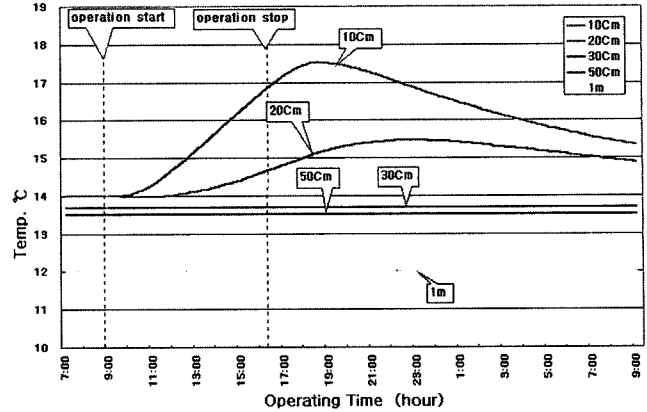
**2) 시험장치의 구성**

매설을 통한 검증시험장치는 앞서 기술한 열유동 컴퓨터 시뮬레이션에서와 동일한 조건으로 매설하고 실시하였다. 유속 및 유량 측정은 측정오차가 1% 미만인 초음파유량계를 사용하였으며, 이때 토양의 온도변화 측정은 측정범위가 -180~370℃ 사이인 열전대 T타입을 사용하였다. 온도의 보정은 ±0.1℃까지 정밀하게 측정되는 온도보정용 온도계 C100(LUFFT, 독일)과 열음을 이용하여 보정하였고 온도기록은 DR-230(Yokogawa, 일본)을 이용하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**가. 컴퓨터 시뮬레이션**

그림 3은 열매체유 순환 중 토양과의 열유동 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 온실에서의 냉난방은 1일 밤낮을 기준으로 가동과 중단이 규칙적으로 반복되므로 토양의 온도변화를 1일 동안 살펴보면 열 유동의 패턴을 알 수 있다.



**Fig. 3** Changes in the simulated soil temperature at different distances from the pipe with circulation fluid (using Fluent 5.4).

먼저 지중 열매체유가 흐르는 파이프에서 10 cm 이격된 지점에서는 매체유의 순환 전(시험장치 가동전) 14.1℃인 토양 온도는 33℃의 열매체유가 지중으로 흐르면서 상승한다. 그러나 가동직후 바로 상승하는 것이 아니라 58분이 지난 후부터 상승하게 되는데 이는 토양 내에서 열이 10 cm 전파되는데 58분이 소요된 것으로 토양의 지연현상에 기인한 것이다. 즉, 가동 58분까지는 온도변화가 없다가 이 후 완만하게 상승하여 가동중단 시점인 7.5시간 이후엔 16.9℃에 이르게 되고 가동중단 후에도 약 2시간이 경과할 때 까지는 0.6℃의 온도가 더 상승하여 최고 17.5℃까지 상승하는 것으로 나타났다.

이와 같은 현상은 가동을 중단하더라도 데워진 매체유는 일정시간 동안 서서히 토양과 열교환을 지속하기 때문이며, 가동중단 이후 땅온도는 지속적으로 떨어져 15.3℃까지 회복하나 2일차 가동시점에서는 당초 14.1℃보다 1.2℃가 높아 회복이 덜된 상태에서 재가동을 하게 된다. 반면 20 cm지점에서는 135분이 경과한 후부터 토양의 온도변화가 나타나 가동중단 시점에서는 14.7℃가 되고 중단 후에도 지속적으로 완만하게 상승하여 15.5℃까지 상승하였다가 가동중단 후 땅온도 회복이 일어나 14.9℃까지 떨어지게 되어 2일차 가동을 하게 된다. 즉 당초 땅온도 보다 0.8℃ 회복되지 않은 상태에서 가동을 하게 된다. 하지만 30 cm이상 이격된 시점에서는 토양의 온도변화가 일어나지 않았다. 그리고 10, 20 cm지점에서 시간이 경과할수록 토양의 온도차이가 발생하는 것은 파이프의 온도가 가동시간 내내 33℃로 일정하게 유지되면서 토양과의 열전달이 지속적으로 이루어져 파이프에서 가까운 토양부터 시간경과에 따라 점점 온도가 상승하게 된다. 즉 10 cm지점에서 온도가 먼저 상승하고 점차 20 cm지점도 온도가 상승하게 된다. 만일 가동시간이 장기화된다면 주변 토양의 온도는 차츰 33℃에 수렴하게 되어 10, 20 cm지점에서 온도 차이가 발생하지 않을 것이나 7.5시간 가동으로는 토양의 열

전도 특성상 차이가 발생하는 것이다.

이상 시뮬레이션 결과를 종합하여 볼 때 지중 토양의 1일 7.5시간 가동 동안 열전파 거리는 파이프에서 20~30 cm 떨어진 지점이 될 것이며, 가동 중단후 토양의 온도회복은 서서히 진행되기 때문에 완전회복까지는 상당히 긴 시간이 필요하게 되므로 1일 밤낮을 기준으로 가동과 중단을 반복하는 지열-히트펌프에서는 토양의 온도가 완전복원이 안된 상태에서 재차 가동이 이루어지게 되는 것으로 나타났다.

**나. 시뮬레이션에 대한 토양매설 검정시험**

컴퓨터 시뮬레이션으로 도출한 토양의 열유동 특성을 검증하고자 실시한 매설시험 결과를 그림 4, 5, 6에 나타내었다. 그림 4에서 나타난 것처럼 시뮬레이션 결과와 동일하게 파이프에서 10 cm, 20 cm 이격된 지점에서는 토양온도가 상승하나 30 cm 이상 이격된 지점에서는 영향이 나타나지 않았다.

그림 5는 가동시간 동안 열매체유와 토양과의 열유동 특성을 세부적으로 나타낸 것이다. 파이프에서 10 cm 이격된 지점은 가동 전 토양온도가 14.1°C 였으나 33°C의 열매체유가

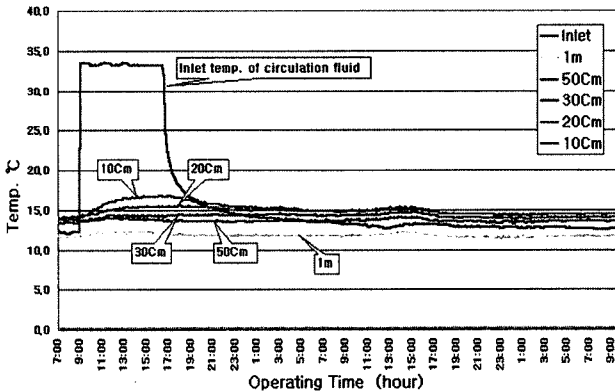


Fig. 4 Changes in the measured soil temperature at different distances from the pipe.

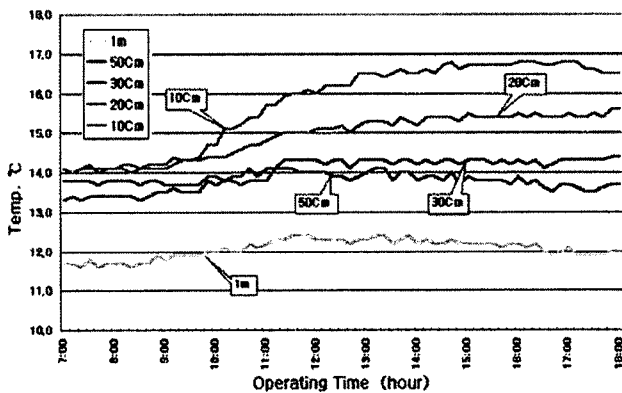


Fig. 5 Changes in the measured soil temperature at different distances from the pipe (during heating only).

지중으로 흐르면서 토양온도는 상승한다. 그러나 가동직후 바로 상승하지 않고 50분이 지난 후부터 토양의 온도변화가 나타나기 시작하였으며, 이는 열이 토양내 10 cm 거리를 전파하는데 50분이 소요된 것이다. 그 후 2시간동안은 다소 가파르게 토양온도는 상승하여 16°C까지 증가하고 가동중단 시점에서는 최고온도인 16.8°C에 이르러 2.7°C가 상승하였다.

그러나 20 cm 떨어진 지점에서는 121분이 경과한 후부터 토양의 온도변화가 나타나기 시작하고 가동을 중단하는 시점까지 서서히 상승하여 최고온도 15.5°C에 이르게 되어 가동직전 토양온도 보다 1.4°C가 상승하였다. 그러나 30 cm 이상 이격된 지점에서는 토양의 온도변화가 나타나지 않았다. 즉 1일 가동으로 토양의 온도변화가 나타나는 거리는 20~30 cm 지점까지가 됨을 알 수 있었다.

그림 6은 가동이 중단된 이후 익일 재가동 시점까지 이격 지점별 상승한 토양온도가 다시 원래의 상태로 회복되는 특성을 분석한 것이다. 그림에서 나타난 것처럼 가동중단 이후 토양온도는 바로 강하하지 않고 가동시 온도상승이 나타날 때의 지연시간 만큼 즉 10 cm 지점은 50분, 20 cm 지점은 121분 후 서서히 온도강하가 나타났다. 이와 같은 현상은 시뮬레이션 결과에서 일정시간 온도가 상승하였다가 강하하는 것과 같은 맥락을 이룬다고 볼 수 있다.

그리고 가동중단 후 익일 재가동 직전까지 토양온도의 회복정도는 10 cm 지점에서는 14.8°C까지 회복되지만, 첫날 가동직전 토양온도인 14.1°C 보다는 0.7°C가 덜 회복된 상태로 2일째 가동을 하게 되며, 토양의 온도회복 패턴은 초기에 많이 회복되고 시간이 경과할수록 회복의 양은 줄어들었다.

20 cm 지점에서도 회복량에 차이는 있었지만 이와 유사한 패턴을 나타냈으며, 중단 후 2시간동안 중단 직후의 온도가 유지되다가 그 이후 다소 완만하게 회복이 이루어졌고 시간이 경과할수록 그 회복량도 줄어들어 0.6°C가 미 회복된 상태

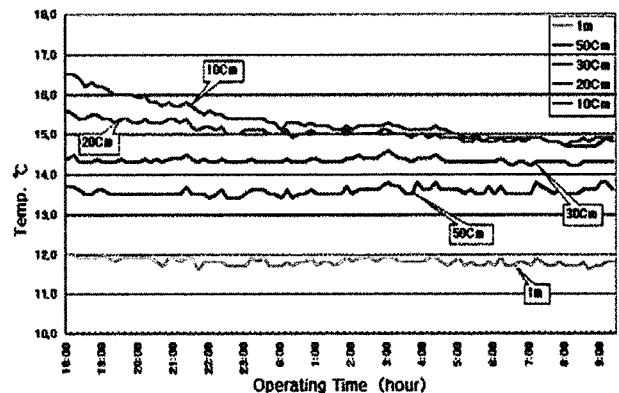


Fig. 6 Restoration of soil temperature after the heater was turned off at different distances from the pipe.

**Table 4** Comparison of heat transfer characteristics between simulation and burying test.

Distance from the pipe		Initial soil temp. (°C)	Heat transfer time (min)	Heat transfer distance (cm/day)	Maximum temp (°C)	Time of maximum temp (hr)	Soil temp at 24hrs later (°C)	Change patten of soil temp
10 cm	Simul-ation	14.1	58	20~30	17.5	2 hour after operation stop	15.3	Slow
	Burying test	14.1	50		16.8	at operation stop	14.8	Fast
20 cm	Simul-ation	14.1	135		15.5	4 hour after operating stop	14.9	Very slow
	Burying test	14.1	121		15.5	at operating stop	14.7	Slow

에서 2일차 가동을 하게 되는 것으로 나타났다.

이상 열특성 구명을 위한 매설시험 결과 하루주기로 반복 되는 냉난방 장치의 가동시 토양이 영향을 받는 거리는 파이프에서 20~30 cm 떨어진 지점까지이며 토양회복은 중단 후 초기에 많이 회복되고 그 이후부터는 회복량과 회복속도가 매우 낮음을 알 수 있으며 완전회복까지는 상당히 긴 시간이 필요함을 알 수 있었다.

**다. 시뮬레이션과 토양검정시험 결과 비교**

표 4는 컴퓨터시뮬레이션과 토양매설검정시험 결과를 비교 분석한 것이다. 매설시험을 통한 토양의 온도변화는 다소 급격하게 일어나는 반면 시뮬레이션 상에서는 서서히 진행되었으며, 가동중단 직후에도 매설시험에서는 최고온도가 일정시간 유지되는 반면 시뮬레이션에서는 일정시간 동안 조금 증가하다가 서서히 떨어지는 것으로 나타났다.

그리고 각 지점에 온도변화가 나타나는 전파시간 및 전파거리에는 큰 차이가 없이 일치하였으며 1일 가동으로 토양의 온도변화가 나타나는 거리(열전파거리)는 20~30 cm임을 알 수 있었다. 따라서 본 시험결과 매설공간을 최소화하고 파이프 상호간 열간섭을 최대한 배제할 수 있는 파이프 간격은 50 cm(1일 열전파거리 25 cm), slinky 및 spiral 코일의 피치는 40 cm(1일 열전파거리 20 cm)로 설치함이 좋을 것으로 판단되었다.

그리고 토양의 최고온도 및 최고온도 발생시기, 익일 재가동시 토양 회복온도, 토양의 온도변화 등에서는 시뮬레이션과 토양매설 검정시험 간 추세는 일치하였다. 정량적으로 약간의 차이를 나타내었는데 이러한 차이는 매설토성의 불균일에 가장 큰 원인이 있을 것으로 사료되었다. 즉 시뮬레이션에서는 토양이 일정하게 조성되어 있다고 가정하여 열전도율, 밀도, 비열 등을 상수 값으로 지정하였으나, 시험토양은 성토한 토양으로 불순물이 많이 매설되어 있어 토성이 일정치 않은 것에 기인한 것으로 사료된다.

**4. 요약 및 결론**

지열 열교환시스템 개발시 파이프의 매설간격 및 코일의 피치 등을 결정하여 매설 파이프 상호간 열간섭을 최대한 배제하여 시스템의 효율성을 기하고자 지중 열유동해석 시뮬레이션 및 이의 검증을 위한 매설시험을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 땅속 각 지점별 온도변화가 나타나는 전파시간 및 전파거리에는 시뮬레이션 및 토양검정시험 상호간에 큰 차이가 없이 일치하였다. 반면 토양의 최고온도 및 최고온도 발생시기, 익일 재가동시 토양 회복온도, 토양의 온도변화 형태 등에서는 추세는 일치하나 정량적으로 미소한 차이를 나타내었는데, 이러한 차이는 매설토성의 불균일에 가장 큰 원인이 있을 것으로 사료되었다.
- (2) 미가동시 토양온도의 회복에서는 초기에는 다소 급격히 일어나다가 시간이 경과할수록 회복량이 줄어들고 회복 또한 서서히 진행됨에 따라 완전회복까지는 상당히 긴 시간이 필요하므로 1일 밤낮을 기준으로 반복 가동하는 냉난방시스템에서 정상상태로 운전하는 것은 불가능하였다. 따라서 토양온도의 강하 방지를 위해 지중온도를 회복시켜주는 장치가 필요할 것으로 사료되었다.
- (3) 시뮬레이션 및 토양검정시험 모두 열매체파이프에서 10, 20 cm 이격된 지점에서는 지온변화가 나타났으나 30 cm 이상 이격된 지점에서는 온도변화가 일어나지 않았다. 이는 1일 열전파거리는 20~30 cm 떨어진 지점까지를 나타내며, 이를 기초로 분석한 결과 파이프간 매설간격은 50 cm, 파이프 코일의 피치간격은 40 cm정도가 적합할 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Fluent Inc. 1998. Fluent5 users guide : 6-13.
2. Holman, J. P. 1986. Heat transfer. New York:McGraw-Hill.
3. Kim, Y. B., L. Baeg. 1996. Performance analysis of an earth tube heat exchanger (I) - Temperature variation characteristics and heat exchange performance on the mode of continuous operation-. Journal of the KSAM 21(4):436-448. (In Korean)
4. Puri, V. M. 1986. Feasibility and performance curves for intermittent earth-tube heat exchangers. Trans. of the ASAE 29(2):525-532.
5. Puri, V. M. 1987. Earth-tube heat exchanger performance correlation using boundary element method. Trans. of the ASAE 30(2):514-520.
6. 高倉, 山川健一. 1991. 地中熱交換方式の暖房効果と運用上の問題點. 農業施設 12:41-47.