

# 열 열교환시스템 개발을 위한 지중 열유동 특성분석(II) - 컴퓨터시뮬레이션 결과검증을 위한 토양매설시험 중심 - Analysis of Heat Transfer Characteristics in Soil for Development of a Geothermal Heat Exchange System(II)

이용범\*    조성인\*\*    강창호\*    정인규\*    이충근\*    성제훈\*    정선옥\*    김영복\*\*\*  
정희원    정희원    정희원    정희원    정희원    정희원    정희원    정희원

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

## 1. 서론

본 연구에서는 땅속에서의 열확산속도 및 확산거리 그리고 열전과 패턴 등 열 유동에 대한 기초특성을 구명하여 지열 열교환시스템 매설시 파이프의 매설간격 및 코일 피치 등을 결정하는데 활용하고자 컴퓨터 시뮬레이션(Fluent 5.4)을 통하여 열유동 특성을 분석하고 이를 검증하기 위하여 토양매설시험을 실시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과는 2005년 동계 학술대회에서 기 발표되었기에 본지에서는 이를 검증하기 위해 농업공학연구소 구내 발포장(경기도 수원시 소재 농촌진흥청사 내)에서 실시한 매설시험 결과 중심으로 기술한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 매설토양의 상태

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

Table 1 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

### 나. 시험장치의 구성

매설을 통한 검증시험장치는 그림 1과 같이 앞서 발표된 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  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 까지 정밀하게 측정되는 온도보정용 온도계 C100(LUFFT,독일)과 열음을 이용하여 보정하였고 온도기록은 DR-230(Yokogawa, 일본)을 이용하였다.

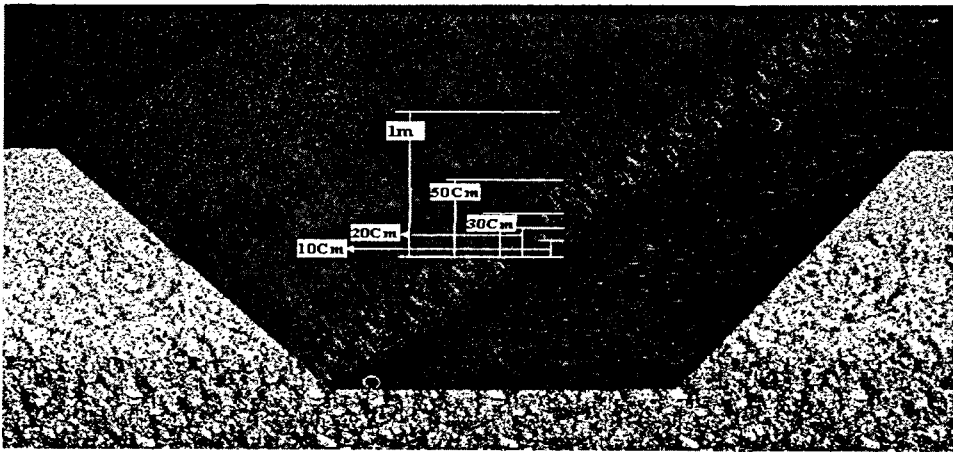


Fig. 1 Measurement locations of soil temperature for investigation of heat transfer characteristics in soil.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 토양 검정시험

컴퓨터 시뮬레이션으로 도출한 토양의 열유동 특성을 검증하고자 실시한 매설시험 결과를 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 그림 2에서 나타난 것처럼 시뮬레이션 결과와 동일하게 파이프에서 10 cm, 20 cm 이격된 지점에서는 토양온도가 상승하나 30 cm 이상 이격된 지점에서는 영향이 나타나지 않았다.

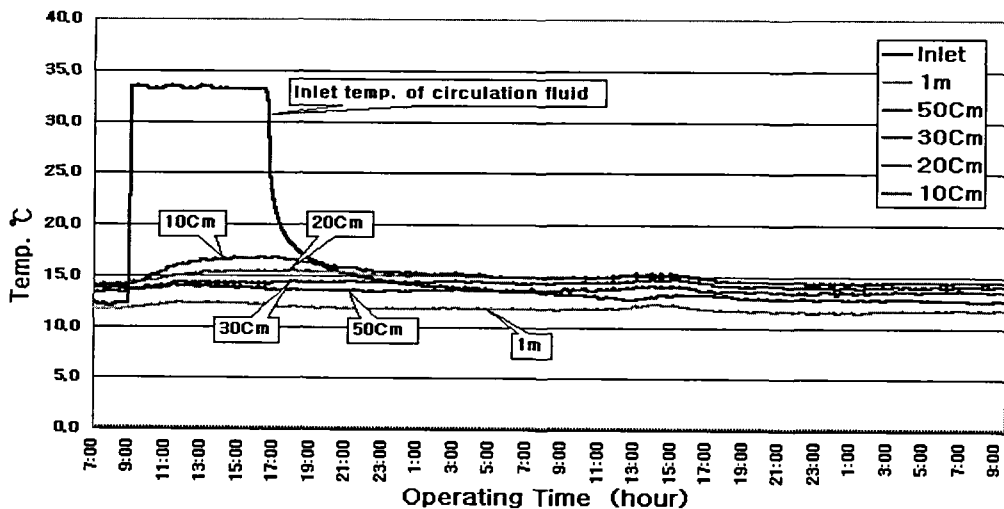


Fig. 2 Changes in the measured soil temperature at different distances from the pipe.

그림 3은 가동시간 동안 열매체유와 토양과의 열유동 특성을 세부적으로 나타낸 것이다. 파이프에서 10 cm 이격된 지점은 가동 전 토양온도가 14.1℃였으나 33℃의 열매체유가 지중으로 흐르면서 토양온도는 상승한다. 그러나 가동직후 바로 상승하지 않고 50분이 지난 후부터 토양의 온도변화가 나타나기 시작하였으며 이는 열이 토양내 10 cm거리를 전파하는데 50분이 소요된 것이다. 그 후 2시간동안은 다소 가파르게 토양온도는 상승하여 16℃까지 증가하고 가동중단 시점에서는 최고온도인 16.8℃에 이르러 2.7℃가 상승하였다.

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

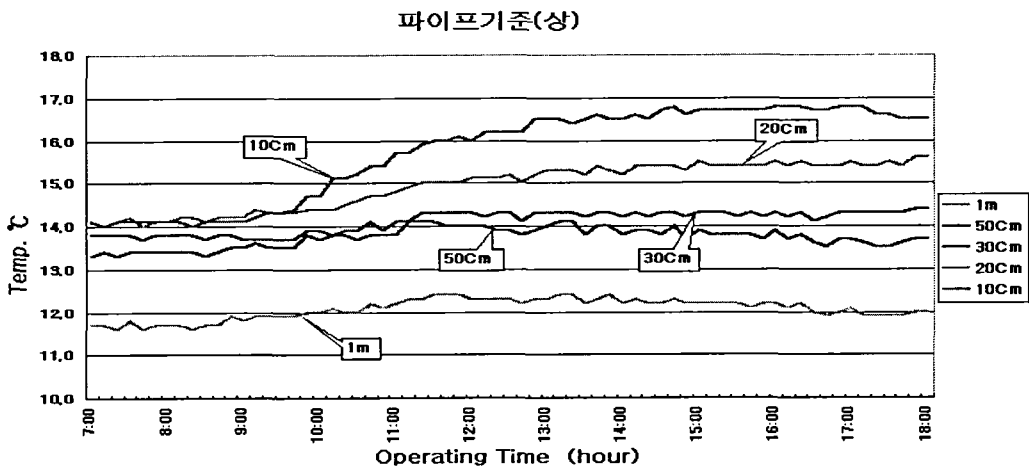


Fig. 3 Changes in the measured soil temperature at different distances from the pipe (during heating only).

그림 4은 가동이 중단된 이후 익일 재가동 시점까지 이격지점별 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 cm지점은 50분, 20 cm지점은 121분 후 서서히 온도강하가 나타났다. 이와 같은 현상은 시뮬레이션 결과에서 일정시간 온도가 상승하였다가 강하하는 것과는 같은 맥락을 이룬다고 볼 수 있다. 그리고 가동중단 후 익일 재가동 직전까지 토양온도의 회복정도는 10 cm지점에서는 14.8℃까지 회복되지만 첫날 가동직전 14.1℃토양온도보다는 0.7℃가 덜 회복된 상태로 2일째 가동을 하게 되며, 토양의 온도회복 패턴은 초기에 많이 회복되고 시간이 경과할수록 회복의 양은 줄어들었다.

20 cm지점에서 회복량에 차이는 있었지만 이와 유사한 패턴을 나타냈으며 중단 후 2시간동안 중단 직후의 온도가 유지되다가 그 이후 다소 완만하게 회복이 이루어졌고 시간이

경과할수록 그 회복양도 줄어들어 0.6℃가 미 회복된 상태에서 2일차 가동 하게 된다.  
파이프기준(상)

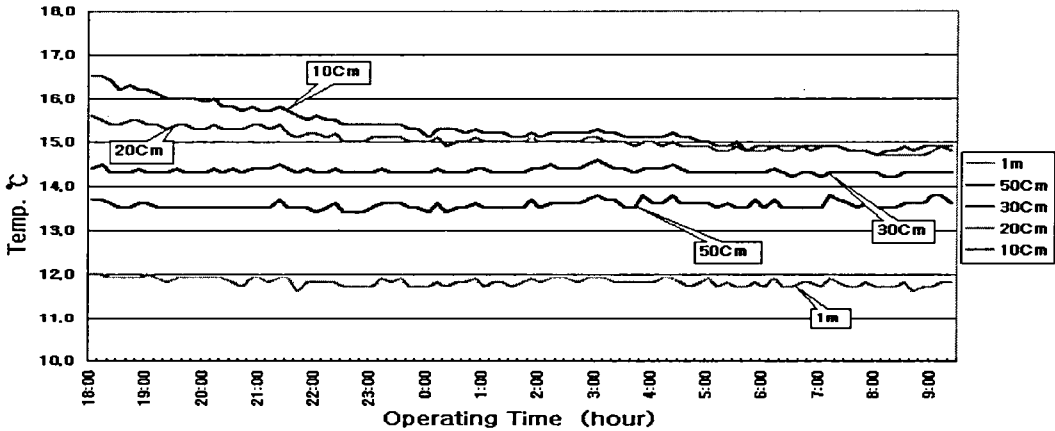


Fig. 4 Restoration of soil temperature after the heater was turned off at different distances from the pipe

이상 열특성 구멍을 위한 매설시험 결과 하루주기로 반복되는 냉난방 장치의 가동시 토양이 영향을 받는 거리는 파이프에서 20~30cm 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.

#### 나. 시물레이션과 토양검정시험 결과 비교

표 2는 컴퓨터시물레이션과 이의 검증을 위한 토양매설시험 결과를 비교분석한 것이다. 매설시험을 통한 토양온도변화는 다소 급격하게 일어나는 반면 시물레이션 상에서는 서서히 진행되었으며, 가동중단 직후에도 매설시험에서는 최고온도가 일정시간 유지되는 반면 시물레이션에서는 일정시간 동안 조금 증가하다가 서서히 떨어지는 것으로 나타났다.

Table 2 Comparison of heat transfer characteristics between simulation and burying test

Distance from the pipe		Initial soil temp.(℃)	Heat transfer time (min)	Heat transfer distance (cm/day)	Maximum temp.(℃)	Time of maximum temp. (hr)	Soil temp. at 24hrs later(℃)	Change patten of soil temp.
10cm	Simulation	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	14.9	Fast
20cm	Simulation	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

그리고 각지점에 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 시물레이션과 토양매설 검증시험 간 추세는 일치하였으나 정량적으로 미소한 차이를 나타내었는데 이러한 차이는 매설토성의 불균일에 가장 큰 원인이 있을 것으로 사료되었다. 즉 시물레이션에서는 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.

## 5. 요약 및 결론

지중 열유동 시물레이션 및 검증을 위한 매설시험의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 땅속 각 지점별 온도변화가 나타나는 전파시간 및 전파거리에는 시물레이션 및 토양검증시험 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. 시물레이션 및 토양검증시험 모두 열매체파이프에서 20cm 이격된 지점에서는 지온변화가 나타났으나 30cm이상 이격된 지점에서는 온도변화가 일어나지 않았다. 이는 1일 열전파거리는 20~30cm 떨어진 지점까지를 나타내며 이를 기초로 분석한 결과 파이프간 매설간격은 50cm, 파이프 코일의 피치간격은 40cm정도가 적합할 것으로 판단되었다.

## 5. 참고문헌

1. 김영복, 백이. 1996. 지중매설관 열교환장치의 성능분석(I)-연속운전실험에서의 온도특성 및 열교환성능. 한국농업기계학회지 21(4) : 436~448
3. 김홍제, 이진국, 백남춘. 1990. 지중 열교환시스템의 파이프 매설 간격 변화에 따른 열전달 특성. 에너지연구 12(3).
4. 이재한. 2000. 지중열 교환시설의 실용화연구. 영남농업시험장 연구보고서.
5. 이중호, 박승제, 김용현, 김철수, 이중용. 1984. 지중열교환온실의 축열 방열특성. 한국농업기계학회지 19(3) : 222-231.
6. Baxter, D. O. 1992/1994. Energy exchanges and related temperatures of and earth-tube heat exchanger in the heating/cooling mode. Transactions of the ASAE Vol. 35(1) : 275-285/37(1) : 257-267.