

지열 열교환시스템 개발을 위한 지중 열유동 특성분석(I)

Analysis of Heat Transfer Characteristics in Soil for Development of Geothermal Heat Exchange System(I)

이용범*, 조성인**, 유영선*, 강금춘*, 한길수*, 김상철*, 노대현*

정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원

Y.B.Lee, S.I.Cho, Y.S.Ryu, K.C.Kang, G.S.Han, S.C.Kim, D.H.Ro

1. 서론

땅속에서의 열확산속도 및 확산거리 그리고 지열히트펌프 시스템이 가동되지 않는 시간동안 토양온도가 회복되는 정도 등 지중의 열유동에 대한 기초특성을 구명하고 이를 기초로 지열 열교환시스템 개발시 파이프 매설간격, 파이프 코일의 피치 등을 결정하여 매설 파이프 상호간 열간섭을 최대한 배제하여 효율성을 기하고자 지중 열유동 해석을 위한 기초시험을 수행하였다. 먼저 에너지평형방정식을 이용하여 토양 열유동에 따른 이론적 고찰을 수행하고 Fluent 5.4를 이용하여 열유동 특성을 분석하였으며, 이를 검증하기 위한 토양매설시험을 실시하였다. 본지에서는 일차적으로 지중 열유동의 이론적 고찰 및 시뮬레이션 결과를 우선적으로 소개하고자 한다.

2. 재료 및 방법

가. 이론적 고찰

지중에 매립된 파이프내 유체와 토양과의 전열과정은 토양내 에너지평형방정식, 매설관 자체의 에너지 평형방정식, 관내의 유체유동시 열전달방정식으로 구분하여 해석할 수 있으며 부가적으로 수분이동으로 인한 토양내 물질평형방정식 등으로 해석한다. 그러나 여기서는 수분이 낮은 토성이므로 수분의 이동에 의한 영향이 크지 않을 것으로 간주하여 이는 고려치 않고 해석하였다. 토양내 에너지 평형방정식은 J.P Holman이 제시한 아래 토양내 3차원 열전도 방정식을 이용하여 토양 내에서 시간에 따른 열의 이동을 분석하였다.

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

여기서, α :열확산계수, T_s :토양온도

그리고 매설관 자체에 대한 열의 평형방정식은 Puri(1987)에 의하면 아래식을 적용하였다.

$$\rho_i C_{pt} V_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = H_c A (T_f - T_i) + \frac{K_s A}{\Delta R} (T_s - T_i)$$

여기서, ρ_i :매설관 밀도, C_{pt} :관의 정압비열, V_i :관의체적, T_i :관내온도

H_c :관과 유체사이의 대류열전달계수, T_f :유체온도, K_s :토양열전도계수

그리고 관내의 유체유동시의 열전달방정식은 관내의 유체가 유동할 시의 열전달 형태는

Puri(1986)에 의해 다음과 같이 적용하였다.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{2 H_c (T_i - T_f)}{\rho_f C_{Pf} R_i} + \frac{K_f}{\rho_f C_{Pf}} \frac{\partial^2 T_f}{\partial^2 x} - U \frac{\partial T_f}{\partial x}$$

여기서, T_f :유체온도, C_{Pf} :유체의 정압비열, ρ_f : 유체의 밀도

K_f :유체의 열전도계수, H_c :관과 유체와의 대류 열전달계수

이상과 같이 토양 속에서의 열유동해석은 토양내 에너지 평형방정식, 매설관 자체 평형방정식, 관내의 유체유동시의 열전달방정식 등에 의거 열유동을 분석할 수 있다. 하지만 이를 해석학적으로 해를 구하는 것은 매우 어렵고 무수히 많은 해를 가질 수 있으므로 기존 상용화된 CFD의 프로그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

나. 열유동 시뮬레이션

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

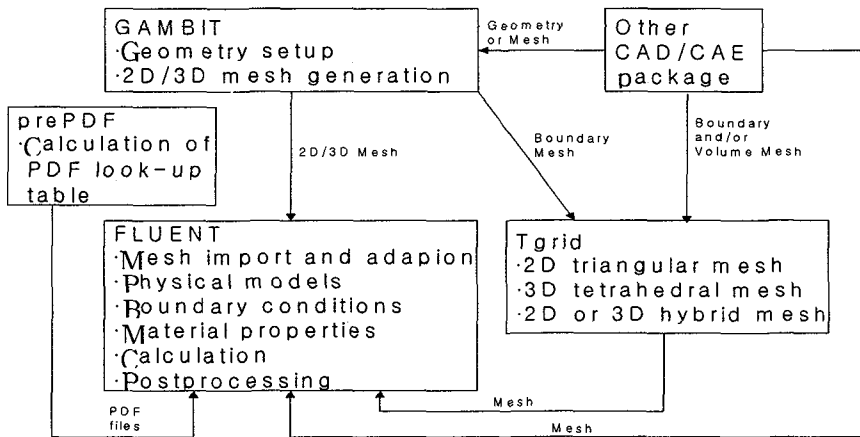


Fig. 1. Simulation procedure for the computational fluid dynamics model using commercial analytical package

1) 세부해석 모델의 설정

CFD Fluent를 이용해 세부해석을 위하여 지배방정식은 유체해석을 위한 기본적인 3개의 방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식으로 하고 에너지 방정식은 이론 고찰에서 도출한 토양내 에너지 평형방정식, 매설관 자체 평형방정식, 관내 유체 유동시 열전달 방

정식으로 하였다. Solver의 선택은 열교환시스템의 경우 일정한 유속과 밀도로 매체유가 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 묘사 가능하고 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 realizable k-ε모델을 선택하였고, 모델의 상수 값들은 일반적인 유동해석에 적용되는 추천 값들을 사용하였다. realizable k-ε모델의 경우 벽 근처의 흐름에 대해 잘 맞지 않기 때문에, 이를 보완하기 위해서 파이프 면에서의 유체흐름은 standard wall functions 방법을 적용하였다.

2) 재료의 물성값 입력

토양, 파이프, 순환매체유의 비열 및 밀도, 열전달계수 등은 각 물질의 종류 및 특성에 따라 다양한 범위의 값을 가지나 문헌자료를 이용하여 검증시험을 수행할 재료 및 토성을 고려하여 물성 값을 표 1과 같이 선정하였으며 상수로 취급하였다.

Table 1. Physical properties of the materials used as simulation input values

Physical property	Materials		
	HDPE	Water(70%) +ethylene glycol(30%)	Soil
Density (kg/m ³)	960	1050	1880
Specific heat (J/kg · °C)	1890	3570	840
Thermal conductivity(w/m °C)	0.4	0.45	0.2

3) 경계조건의 설정

유속은 1.03m/s로 하였으며 난류특성은 난류강도, 난류길이척도(turbulence length scale)에 의해 설정되었다. 난류강도 I 와 난류길이척도 L 은 Fluent프로그램에서 제공한 아래 식과 같이 계산하였으며 순환유체의 온도는 33°C, 가동시간은 7시간 30분을 지속하였다.

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

ν' : root-mean-square of the velocity fluctuation

ν_{avg} : average flow velocity

Re : reynolds number, D : diameter of pipe

계산영역의 외부 및 파이프 표면은 wall로 설정을 하였고, 각각의 상황에 맞는 재질(외부 영역 soil, 파이프 HDPE)과 두께를 설정하였으며, 토양의 초기 온도는 실험에서 측정된 것처럼 파이프로부터 10, 20cm는 14.1°C, 30cm는 13.7°C, 50cm는 13.5°C, 그리고 1m까지는 12°C로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 가동 중 열매체유와 토양과의 열유동 특성을 시뮬레이션한 결과이다. 온실에서 냉난방은 1일 주기로 가동과 중단이 규칙적으로 반복됨에 따라 토양의 온도변화 또한 1일 주기로 반복되므로 24시간동안 토양의 온도변화를 살펴보면 열 유동특성을 알게 된다.

먼저 열 매체유가 흐르는 파이프에서 10cm 이격된 지점에서는 가동전(열매체유가 흐르기 전) 14.1℃인 토양온도는 33℃의 열매체유가 지중으로 흐르면서 상승한다. 그러나 가동직후 바로 상승하는 것이 아니라 58분이 지난 후 상승하는데 이는 토양내 열이 10cm 전파하는데 58분이 소요된 것으로 토양의 지연현상에 기인한 것이다. 즉, 가동 58분까지는 온도변화가 없다가 이 후 완만하게 상승하여 가동중단시점에서는 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 일정시간동안 서서히 토양과 열교환을 지속하기 때문이며 그 이후 땅온도는 지속적으로 회복되어 15.3℃까지 떨어지게 되고 2일차 가동시점에서는 당초보다 1.2℃가 높아 그만큼 회복이 덜된 상태에서 재가동이 되는 것으로 나타났다. 반면 20cm지점에서는 135분이 경과한 후부터 토양의 온도변화가 나타나 가동중단시점에서는 14.7℃가 되고 중단 후에도 지속적으로 완만하게 상승하여 15.5℃까지 상승하였다가 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 30cm 이상 이격된 시점에서는 온도변화가 일어나지 않았다.

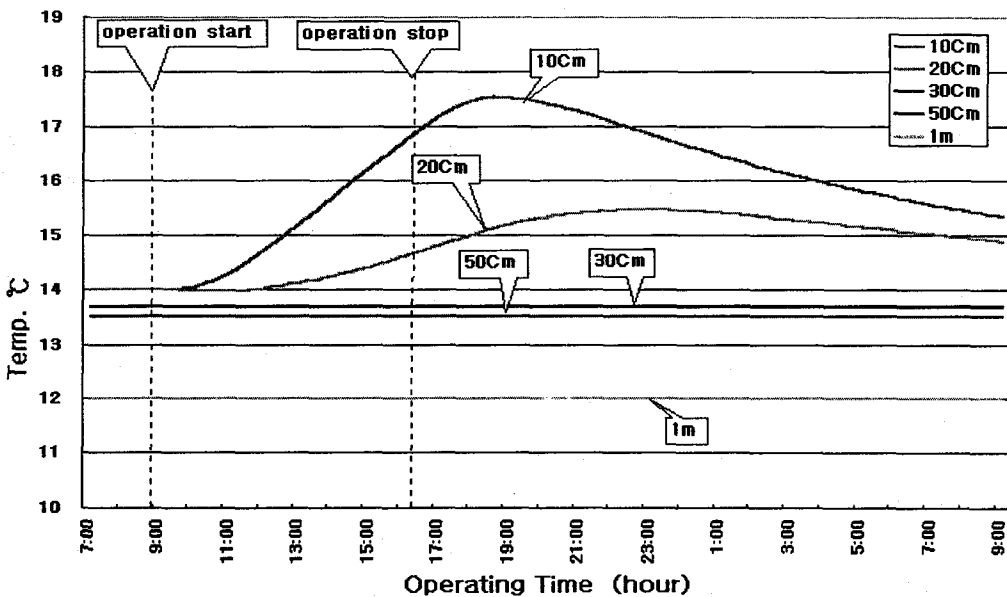


Fig. 2. Changes in simulated soil temperature at different distances from the pipe with circulation fluid. (using fluent 5.5)

이상 시뮬레이션 결과를 종합하여 볼때 토양이 열전파에 영향을 받는 최대거리는 파이프에서 20cm~30cm 떨어진 지점이 될 것이며 토양의 회복은 서서히 진행되기 때문에 완전회복까지는 상당히 긴 시간이 필요하므로 지열-히트펌프는 비정상상태로 가동이 이루어지게 되는 것으로 판단되었다.

4. 결론 및 요약

지열 열교환시스템 개발시 파이프 매설간격, 파이프 코일의 피치 등을 결정하여 매설 파이프 상호간 열간섭을 최대한 배제하여 시스템의 효율성을 기하고자 실시한 지중 열유동해석 시뮬레이션 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 열 매체유가 흐르는 파이프에서 10cm 이격된 지점에서는 가동전 14.1℃인 토양온도는 33℃의 열매체유가 흐르면서 58분이 지난 후 상승하기 시작하고 7시간 30분후인 가동중단시점에서는 16.9℃에 이르게 된다. 또 가동중단 후에도 약 2시간이 경과할 때 까지는 0.6℃의 온도가 더 상승하여 최고 17.5℃까지 상승하며, 가동 중단후 2일차 가동시점에서는 당초보다 1.2℃가 높아 그만큼 회복이 덜된 상태에서 재가동이 되는 것으로 나타났다.

2. 반면 20cm지점에서는 135분이 경과한 후부터 토양의 온도변화가 나타나 가동중단시점에서는 14.7℃가 되고 중단 후에도 지속적으로 완만하게 상승하여 15.5℃까지 상승하였다가 땅온도 회복이 일어나 14.9℃까지 떨어지게 되어 2일차 가동을 하게 된다. 즉 당초 땅온도보다 0.8℃회복되지 않은 상태에서 가동을 하게 된다.

3. 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 사료되었다.

5. 참고문헌

1. 金榮福, 宋鉉甲. 1989. 二重管形潛熱蓄熱裝置의 傳熱特性에 관한 實驗的分析. 韓國農業機械學會誌 14910 : 24~32
2. 김영복. 1996. 환경보전형 지열이용 시스템에 의한 생물생산 환경제어기술. NICEM 해외 훈련결과보고서.
3. 김홍제, 이진국, 백남춘. 1990. 지중 열교환시스템의 파이프 매설 간격 변화에 따른 열전달 특성. 에너지연구12(3).
4. 山本雄二郎, 青木 清, 岡野利用. 1981. 地中熱交換ハウス基本設計. 電力中央研究所. 研究報告. 481011, 31.
5. Puri, V. M. 1986. Feasibility and performance curves for intermittent earth-tube heat exchangers. Trans. of the ASAE 29(2) : 525-532.
6. Puri, V. M. 1987. Earth-tube heat exchanger performance correlation using boundary element method. Trans. of the ASAE 30(2) : 514-520.