

지열펌프 구동에 의한 지중 온도 분포 변화 모델링 연구

신 지연¹⁾, 배 광옥²⁾, 이 강근³⁾

Numerical Simulation for the Subsurface Temperature Distribution Disturbed by Heat-Pump Operation

Jiyoun Shin, Gwang-Ok Bae, Kang-Kun Lee

Key words : subsurface temperature distribution(지중 온도 분포), W-tube heat pump(W-tube 형 지열 펌프), Numerical modeling(수치 모델링), HydroGeoSphere

Abstract : Public demand for the heat pump system as a next generation energy equipment is increasing for its eco-friendly and cost-effective advantage. Many researches have been concentrated on how to calculate and develop its own efficiency, while the possible effect of the heat pump operation on the whole subsurface temperature distribution is relatively less considered. During the current study, subsurface temperature disturbance caused by seasonal surface temperature cycle in Busan area and general W-tube heat pump operation is simulated in 3-dimensional heterogeneous medium. It shows that subsurface deeper than 10m from the surface remains nearly unchanged throughout the 4 seasons and groundwater convection in highly permeable layer near the surface acts like a main path of heat plume from heat pump system. This implies the significance of detail description in shallow sedimentary layer or highly permeable layer which plays an important role on the regional flow advection and heat transfer. Also, the effect of groundwater convection increases when the arrangement of the 2 injection pipes and 2 extraction well is maintained parallel to groundwater flow. Therefore, more careful and detail investigation is required before installation and operation of heat pump system that it may not cause any possible change of microbial ecosystem in the shallow subsurface environment or 'contamination of temperature' for groundwater use as well as the loss of efficiency of the equipment itself. This can also help to design the optimized grouting system for heat pump.

Nomenclature

- T : temperature, $^{\circ}\text{C}$
- $\rho_s c_s$: heat capacity of solid, $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- $\rho_w c_w$: heat capacity of water, $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- κ_s : thermal conductivity of solid, $\text{kg m s}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- n : porosity, dimensionless
- V_x : water velocity in x direction, ms^{-1}
- K_x : hydraulic conductivity in x direction, ms^{-1}
- h : hydraulic head, m

1. 서론

비용 절감의 효과가 높고 환경 친화적인 것으로 평가되고 있는 새로운 에너지 설비인 지열

펌프에 대한 관심이 높아지고 있다. 지금까지 이 지열 펌프의 효율과 효율을 증가시키기 위한 방법에 대해 많은 연구가 집중되어온 반면, 지열펌프 구동이 지중의 온도에 미치는 영향에 대해서는 간과되어온 바가 없지 않다^{(1),(2),(3)}. 따라서 본 연구에서는 지열펌프의 효율 자체 뿐 아니라, 지중 미생물계나 지하수질의 변화, 나아가 최적의 지열펌프 디자인에까지 영향을 미칠 수 있는 지중 온도 분포 변화에 관한 수치 모델링을 수행하였다.

-
- 1) 서울대학교 지구환경과학부 수리지구환경 연구실
E-mail : jylunar@gmail.com
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 2) 서울대학교 기초과학연구원
E-mail : gokbae@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8173 Fax : (02)873-3647
 - 3) 서울대학교 지구환경과학부 수리지구환경 연구실
E-mail : kkleee@snu.ac.kr
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647

2. 이론적 배경

지층의 열전달은 크게 암석이나 토양으로 이루어진 고체 매질을 통한 전도와 공극이나 균열을 따라 흐르는 지하수에 의한 대류로 이루어진다. 지층 열의 전도-대류 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - n \rho_w c_w \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

여기에서 v_x, v_y, v_z 는 매질의 물성을 나타내는 K_x, K_y, K_z 를 이용한 Darcy의 법칙으로부터 얻어진다.

$$v_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}, v_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y}, v_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

3. 수치 모델링 및 결과

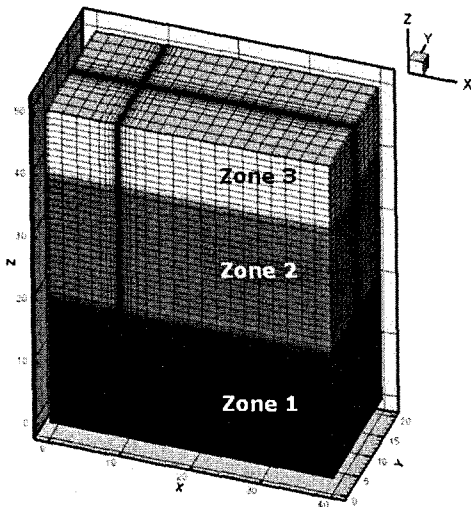


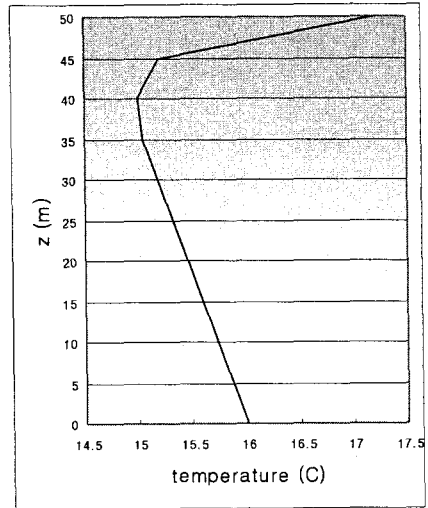
그림 1. 모델 영역의 격자와 3개의 불균질 층

3차원 T-H-C 연동형 FEM 시뮬레이터인 HydroGeoSphere를 사용하여 지열펌프 설치 3년 후의 지층 온도 분포를 예측하였다. 모사된 영역은 가로, 세로가 각각 40m, 20m이며 깊이가 50m인, 불균질한 물성을 가진 지층이고(그림 1), 지열펌프는 W-tube 형태로 $x=10m, y=10m$ 인 지점에서 지표로부터 깊이 50m까지 수직으로 설치되어 있다고 가정하였다. 모델에 사용된 수리·열적 물성치는 표 1과 같다. 초기 온도 분포는 그림 2(a)와 같으며, 지표면의 온도는 그림 2(b)에 나타난 1년 주기의 값으로 3년간 순환한다. 또한 모델링에 있어서의 편의를 위하여 W-tube 형 지열펌프는 12월부터 2월까지 일정하게 5°C의 물을 주입하여 10°C를 뽑아내고, 6월부터 8월까지

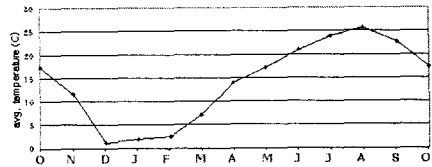
수리전도도	zone 3: 1.0 e-5 m/s
	zone 2: 1.0 e-6 m/s
	zone 1: 1.0 e-7 m/s
	grout: 1.0 e-20 m/s
열전도도	매질: 1.644 W/s°C
비열	매질: 947.17 m ² /s ² °C
	물: 4185.0 m ² /s ² °C
밀도	매질: 2650 kg/m ³
	물: 1000 kg/m ³

표 1. 모델에 사용된 수리·열적 물성치

(a) 초기 온도분포



(b) 지표면의 온도 변화 (2005년 부산)



(c) 지열펌프의 주입 및 양수 온도 변화

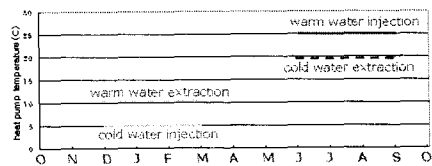


그림 2. 온도 초기조건과 경계조건

25°C의 물을 주입하여 20°C의 물을 뽑아낸다고 가정하였다(그림 2(c)).

지열펌프 구동에 의해 지층 온도 분포가 변화하는 과정에서 지하수가 미치는 영향을 살펴보고 (4), (5), (6), 다음, 지열펌프 내부의 파이프 배열에

따라 어떠한 차이가 발생할지 알아보았다.

3.1. 지하수의 영향

지중에 어떠한 유체의 흐름도 없어서 전도에 의해서만 열이 전달되는 경우와, 지하수가 들어오는 $x=0m$ 면에서 $z=45m$ 의 수두, 지하수가 흘러나가는 $x=50m$ 면에서 $z=43m$ 의 수두를 주어 모델 영역의 왼쪽에서 오른쪽으로 일정한 흐름이 있는 경우를 비교하였다. 두 경우 모두 지열펌프 디자인은 그림 3의 case 1을 사용하였다.

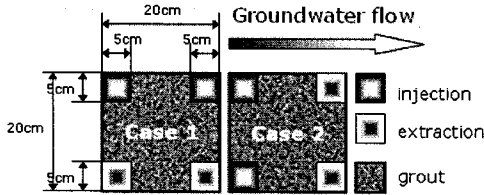


그림 3. 지열펌프 내부의 파이프 배열형태

두 경우 모두 지표의 계절적 온도 변화에 의한 영향을 받는 깊이는 지표로부터 최대 10m 이내인 것으로 나타났다. 그보다 깊은 지층에서는 연중 온도 변화가 거의 없어서 여름이나 겨울이나 일정한 온도분포를 보인다.

지하수를 고려하지 않은 경우(그림 4), 지열펌프로부터 지중에 전달되는 열은 오직 전도에 의해서 방사상으로 이동하므로 주어진 깊이에서 등온선은 원형을 그리게 된다. 그러나 일정한 속도를 가지는 지하수를 고려한 경우(그림 5), 지층의 온도 분포는 지하수의 흐름을 따라 대류에 의해 오른쪽으로 퍼지는 현상을 보이며 주어진 깊이에서 오른쪽으로 길어지는 타원형의 등온선을 이를 명확히 보여준다. 그러나 지하수를 고려하더라도 수리전도도가 낮은 지층에서는 대류의 효과가 미미하다.

3.2. 주입·양수 파이프 배열의 영향

그림 3에 나타난 서로 다른 지열펌프 디자인 case 1과 case 2에 대하여 각각 수치 모델링을 수행하였다. 실제 지열펌프는 그 단면이 원형이고 그라우트가 파이프를 감싸고 있는 형태가 많지만, 이 연구에서는 격자수를 줄여 계산시간을 단축하기 위해 지열펌프와 파이프 모두 사각형으로 가정하였다. case 1은 각각 주입되고 양수되는 파이프의 배열이 지하수의 흐름과 평행하지만 case 2는 그 배열이 지하수의 흐름과 수직이다. 두 경우 모두 파이프의 주입구와 양수구는 사각의 지열펌프 내에서 서로 대각선 방향으로 향하고 있다.

모든 수리적·열적 조건은 3.1의 조건과 동일하게 유지한 상태에서 지표로부터 7m 깊이의 온도 분포를 예측한 결과, 주입·양수 파이프의 배열이 지하수의 흐름과 평행한 경우(그림 6(a),(c)), 지하수의 대류에 의한 열전달 효과를 더 크게 반영하여 오른쪽으로 더 길게 늘어난 등온선을 그린다. 그러나 그림 6의 (a)에서 나타난 가장 큰

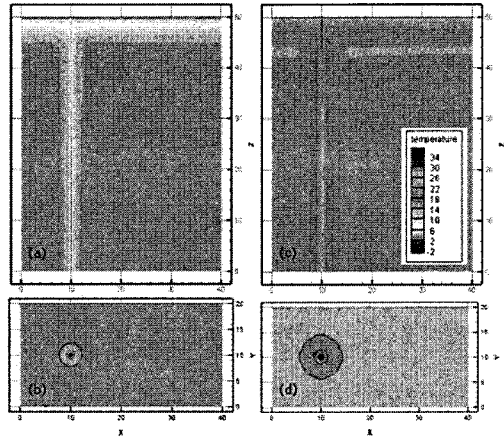


그림 4. 지하수를 고려하지 않았을 때 (a) 3년차 2월의 지중 온도 분포, (b) 3년차 2월 지표로부터 7m 깊이의 온도 분포, (c) 3년차 8월의 지중 온도 분포, (d) 3년차 8월 지표로부터 7m 깊이의 온도 분포

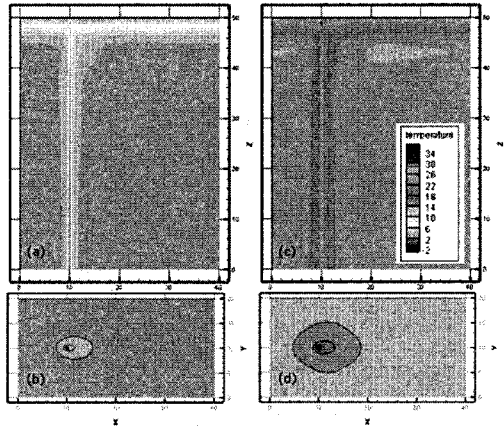


그림 5. 지하수를 고려하였을 때 (a) 3년차 2월의 지중 온도 분포, (b) 3년차 2월 지표로부터 7m 깊이의 온도 분포, (c) 3년차 8월의 지중 온도 분포, (d) 3년차 8월 지표로부터 7m 깊이의 온도 분포

타원형은 장축의 길이가 2m에 불과하므로, 주입·양수 파이프의 배열 방향이 지하수의 흐름과 수직을 이루고 있을 때(그림 6(b),(d))와 비교하여 눈에 띄는 큰 차이를 보이지는 않는다고 볼 수 있다. 이것은 전체 모델 영역에 비하여 그라우트를 포함한 지열펌프의 직경이 20cm로 매우 작기 때문이다. 그러나 지열펌프가 여러 개 설치되어 있고 설치 간격이 좁은 경우, 또는 관심 영역이 상대적으로 좁은 편인 경우에 이 또한 지중 온도 분포 변화에 중요한 요소로 작용할 수 있다.

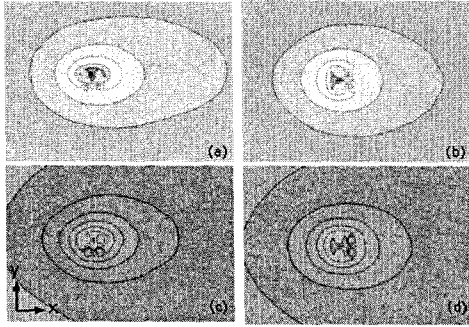


그림 6. 지표로부터 7m 깊이에서 (a) case 1의 배열을 이용한 3년차 2월, (b) case 2의 배열을 이용한 3년차 2월, (c) case 1의 배열을 이용한 3년차 8월, (d) case 2의 배열을 이용한 3년차 8월의 온도 분포

4. 결론

지하수의 흐름이 없거나 있는 상태에서, 서로 다른 두 가지의 파이프 배열을 가진 W-tube 형 지열펌프가 지중의 온도 분포 분포에 미치는 영향을 살펴보았다.

먼저, 지표의 온도 변화가 영향을 미치는 깊이는 지표에서 최대 10m 깊이 이내로 나타났으며, 그보다 깊은 지중에서는 지표의 온도보다는 지열펌프에 의해 온도 분포가 변한다. 지하수의 흐름이 있는 지중에서 지열펌프에 의해 가해진 온도 자극은 대류에 의해 지하수의 방향을 따라 이동하게 되므로, 전도에 의해서만 열이 이동할 때에 비해서 열전달 효과가 크게 나타난다. 또한 이러한 지하수의 대류에 의한 영향은 주입양수 파이프의 배열이 지하수의 흐름과 평행할 때 더 크다.

그러므로 지열펌프에 의한 지중의 온도 변화를 작게 유지하기 위해서는 그라우트의 물성을 조절하는 방법 외에도 지하수의 흐름에 영향을 미치는 수위 변동을 적게 하거나, 지하수의 흐름 방향에 대하여 파이프의 배열 상태를 수직에 가깝게 조절하는 방법을 고려해 볼 수 있다.

사 사

본 연구는 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Curtis et al., 2005, "Ground source heat pumps - Geothermal energy for anyone, anywhere: Current worldwide activity", Proceedings world geothermal congress
- [2] Witte, 2001, "geothermal Response Tests

with Heat Extraction and Heat Injection: Examples of Application in Research and Design of Geothermal Ground Heat Exchanger", Europäischer workshop über Geothermische Response Tests

- [3] Shim, 2005, "Simulation of the estimation of design parameters in an aquifer thermal energy storage utilization system model", The journal of Korean society of soil and groundwater environment
- [4] Taniguchi et al., 2003, "Transient effects of surface temperature and groundwater flow on subsurface temperature in Kumamoto Plain, Japan", Physics and chemistry of the earth
- [5] Diao et al., 2004, "Heat Transfer in Ground Heat Exchangers with Groundwater advection", International Journal of Thermal Sciences
- [6] Niibori et al., 2005, "Design of the BHP System Considering the Heat Transport of Groundwater Flow", Proceedings Worlds Geothermal Congress