

TOUGH2를 이용한 폐쇄형 지열펌프 시스템의 3차원 모델링 연구

김 성균¹⁾, 배 광옥²⁾, 이 강근³⁾

3 Dimensional Numerical Simulation for the Closed Loop Heat Pump System Using TOUGH2

Seong-Kyun Kim¹⁾, Gwang-Ok Bae²⁾, Kang-Kun Lee³⁾

Key words : Closed Loop Heat pump(폐쇄형 지열펌프), Numerical Simulation(모델링), TOUGH2(터프2)

Abstract : To evaluate the effect of groundwater flow on the outlet temperature of a geothermal heat pump, 3 dimensional numerical simulations are performed considering both groundwater flow and pipe flow in the U-tube using TOUGH2. The present study involved the following 4 simulation cases: (1) no groundwater flow, (2) slow groundwater flow (hydraulic conductivity: 1.0×10^{-9} m/s), (3) fast groundwater flow (hydraulic conductivity: 1.0×10^{-7} m/s), and (4) groundwater flow varying with the depth (hydraulic conductivity: $1.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-10}$ m/s). The effect of groundwater flow on the outlet temperature is significant where hydraulic conductivity of aquifer is 1.0×10^{-7} m/s. Where hydraulic conductivity of aquifer is 1.0×10^{-10} m/s, however, that effect is negligible.

Nomenclature

- V_n : arbitrary subdomain
- Γ_n : closed surface
- M : mass or energy per volume
- F : mass or heat flux
- q : sink or source
- n : normal vector on surface element $d\Gamma_n$, pointing inward into V_n
- ρ_w : water density
- u_w : Darcy velocity of water
- k : intrinsic permeability
- μ_w : water viscosity
- P_w : water pressure
- g : gravitational acceleration
- λ : thermal conductivity
- T : temperature
- h_w : specific enthalpy of water

superscript

- ^K: labeling the mass or heat components

1. 서론

열펌프는 시스템의 외부와 열을 교환하여 난

방 혹은 냉방을 하는 장치이다. 난방을 목적으로 하면 외부의 온도가 높을수록, 냉방을 목적으로 하면 외부의 온도가 낮을수록 효율이 좋으므로 대기와 열을 교환할 경우의 효율은 높지 않다. 지하의 경우 온도의 변화가 거의 없으므로 열펌프의 효율을 높일 수 있다. 이렇게 지하 시스템과 열을 교환하여 작동하는 열펌프를 지열펌프(geothermal heat pump)라 한다.

여기서 다룬 폐쇄형 지열펌프는 일반적으로 길이 100 m 이상의 관정에 U자 형태의 파이프(U-튜브)를 한개 내지 여러 개 삽입하여 그 내부로 물과 같은 액체를 순환시켜 지하 시스템과 열을 교환하는 장치이다. 일반적인 열펌프에 비해 지열펌프는 운영비가 적게 들지만 초기 설치비용

1) 서울대학교 지구환경과학부

E-mail : kskinc@hanmail.net

Tel : (02) 873-3647 Fax : (02) 873-3647

2) 서울대학교 지구환경과학부

E-mail : gokbae@snu.ac.kr

Tel : (02) 873-3647 Fax : (02) 873-3647

3) 서울대학교 지구환경과학부

E-mail : kkle@snu.ac.kr

Tel : (02) 873-3647 Fax : (02) 873-3647

이 크기 때문에 지역에 따라 최적화된 설계가 필요하다. 일반적으로 사용되는 EED⁽¹⁾ (Earth Energy Designer)와 같은 지열펌프 설계 프로그램은 semi-analytical 소프트웨어로 계산 속도는 빠르지만 지하 시스템이 균질하지 않거나 장기간 운영했을 때의 영향을 알아보기에는 부족하다.⁽³⁾

이 연구에서는 미국 Lawrence Berkeley National Lab.에서 개발한 TOUGH2 (Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat version 2)를 이용하여 지하수의 흐름은 물론이고 U-튜브 내에서 물의 흐름까지 고려한 보다 현실적인 3차원 모델링을 수행하여 지하수의 흐름이 지열펌프 출수구의 온도 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지배 방정식

TOUGH2에서 사용되는 질량 혹은 에너지 균형 방정식은 식 (1)과 같다.⁽²⁾

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{r_n} F^k \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n \quad (1)$$

물의 흐름과 열의 이동은 각각 식 (2)와 (3)에 의해서 계산된다.

$$F_w = \rho_w u_w = -\frac{k_p w}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w g) \quad (2)$$

$$F_h = -\lambda \nabla T + h_w F_w \quad (3)$$

식 (2)는 Darcy의 법칙을 나타낸다. 물의 밀도와 점성도는 온도에 따라 변한다. 식 (3)의 우변은 각각 전도와 물에 의한 대류를 나타낸다.

3. 지열펌프 모델링

3.1 Model Setup

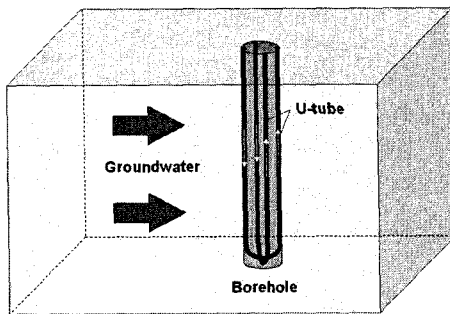


그림 1. 모델링 모식도

그림 1은 이 연구에서 수행한 모델링의 모식도를 나타낸 것이다. 모델에서 사용한 매개 변수

는 표 1과 같다. 경계 조건은 도메인의 좌우로만 물이 흐를 수 있고 상하, 전후 방향은 물의 이동이 없다. U-tube에서 0.38 m/s의 속도로 30 °C (여름의 상황)의 물이 주입 되고 있다. 지온 구배와 지표의 온도 변화는 고려하지 않고 모든 경계에서 온도를 15 °C로 설정하였다.

표 1. 매개 변수⁽³⁾

	열전도도 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	열용량 MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹
U-튜브	0.6	4.0
그라우트	0.81	2.0
대수층	2.0	2.5

U-튜브의 길이는 100 m이고 직경은 3 cm이다. U-튜브가 들어 있는 관정의 직경은 11 cm이다. 사용된 요소의 수는 29 × 29 × 32 개로 총 26,912 개다. 각 방향으로의 길이는 대략 130 × 130 × 163 m이다. 그림 2는 모의에 사용한 도메인을 나타낸 것이다.

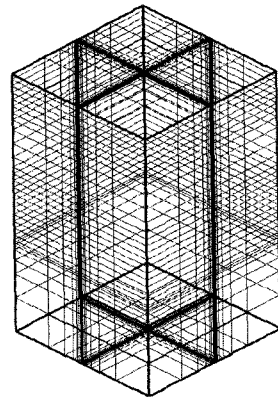


그림 2. 모델링 도메인

시간 간격은 TOUGH2에서 Newton-Raphson iteration의 수렴 여부에 의해 자동으로 결정된다.

3.2 Numerical Simulation

수치 모의는 지하수의 흐름이 지열펌프에 얼마나 영향을 미치는지를 살펴보기 위해 다음과 같이 4가지 상황에 대해 진행되었다.

- (1) 지하수의 흐름이 없는 경우.
- (2) 지하수의 흐름이 느린 경우.
- (3) 지하수의 흐름이 빠른 경우.
- (4) 깊이에 따라 지하수의 속도가 다른 경우.

지하수 흐름 속도는 도메인 좌우 경계의 수두를 다르게 하여 생성하였고 수리전도도를 이용하여 조절하였다. 모의 기간은 30일이다.

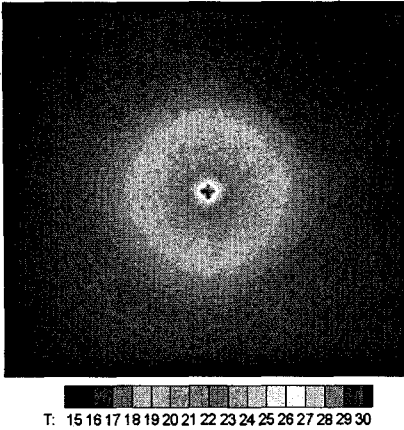


그림 3. 30일이 지났을 때 도메인 상부의 온도분포 (지하수의 흐름이 없는 경우)

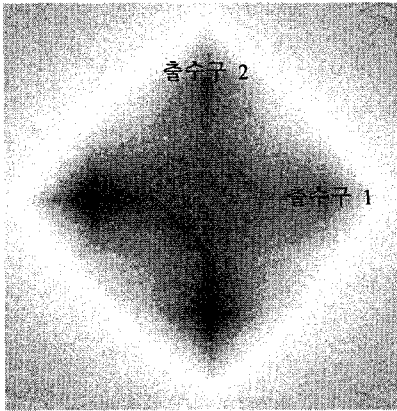


그림 4. 관점 주위의 온도 분포

그림 3은 지하수의 흐름이 없는 경우 30일이 지났을 때 도메인 상부를 확대하여 나타낸 것이다. 그림 4는 관점 주위를 더 확대하여 나타낸 것으로 입수구와 출수구의 온도 차이를 볼 수 있다.

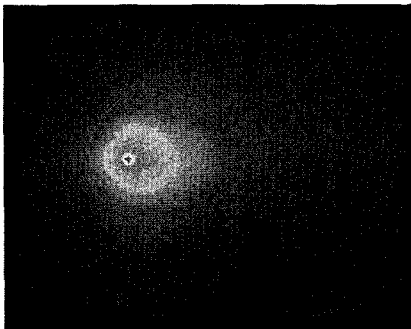


그림 5. 지하수의 흐름이 느린 경우

그림 5는 지하수의 흐름이 느린 경우 30일이 지났을 때 도메인 상부의 온도분포를 나타낸 것이다. 지하수는 좌에서 우로 흐르고 있고 수리전도도는 1.0×10^{-9} m/s 이다. 도메인 좌우경계의 수두 차이는 1.1 cm 이다. 나타난 온도 분포는 물의 흐름의 영향을 잘 반영하고 있다.

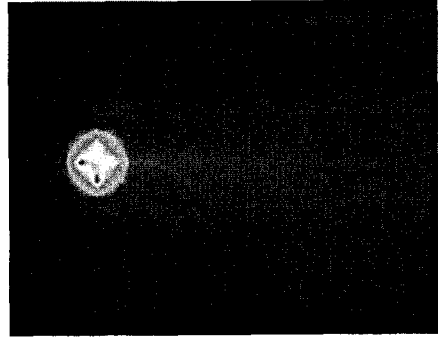


그림 6. 지하수의 흐름이 빠른 경우

그림 6은 지하수의 흐름이 빠른 경우 30일이 지났을 때 도메인 상부의 온도분포를 나타낸 것이다. 이때의 수리전도도는 1.0×10^{-7} m/s 이다. 그림 5와 비교해보면 지하수 영역의 온도는 거의 증가하지 않고 관점 오른쪽 부분만 약간 온도가 증가한 것을 알 수 있다.

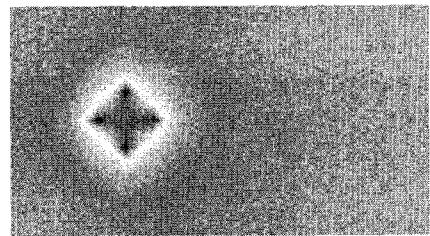
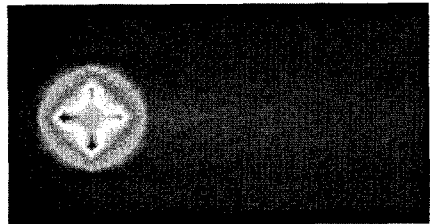


그림 7. 깊이에 따라 지하수의 속도가 다른 경우

그림 7은 지하수의 속도가 깊이에 따라 달라지는 경우로 수리전도도는 $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-10}$ m/s 까지 깊이가 깊어질수록 감소한다. 그림 7 중 위쪽 그림은 도메인 상부이고 아래쪽 그림은 상

부에서 90 m 하부에 위치한 지점을 나타낸 것이다. 온도의 분포 양상이 지하수의 속도에 따라 달라지는 것을 잘 볼 수 있다.

4. 결과 및 토의

표 2. 출수구의 온도

	출수구 1	출수구 2
(1)	28.98 °C	28.98 °C
(2)	28.87 °C	28.76 °C
(3)	27.38 °C	27.30 °C
(4)	28.33 °C	28.27 °C

표 2는 각 경우별로 출수구의 온도를 나타낸 것이다. 도메인 위쪽에서 봤을 때 출수구 1은 관정 우측에 위치해 있고 출수구 2는 관정 위쪽에 위치해 있다. 물의 흐름이 있는 경우는 모두 출수구 2의 온도가 출수구 1의 온도보다 낮는데 이것은 출수구 2가 지하수의 흐름 영향을 좀 더 잘 받을 수 있는 위치에 있기 때문이다. 지하수의 흐름이 없는 경우가 가장 온도가 높고 지하수의 흐름이 빠른 경우가 가장 낮은 온도를 보였다. 지하수 흐름의 속도가 변하는 경우는 지하수의 흐름이 빠른 경우와 유사한 출수구 온도를 보였는데 이는 도메인 상부에서의 흐름이 출수구 온도에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다.

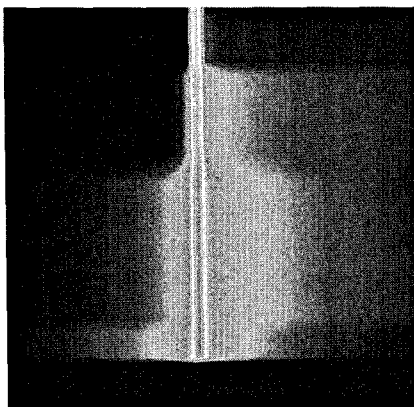


그림 8. 깊이에 따라 지하수의 속도가 다른 경우 y 방향 단면의 온도 분포

그림 8은 깊이에 따라 지하수의 속도가 다른 경우 y 방향 단면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 수리전도도가 1.0×10^{-10} m/s 일 때는 지하수의 흐

름이 온도 분포에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 볼 수 있다. 반면 수리전도도가 1.0×10^{-7} m/s 일 때는 지열펌프가 지하수의 온도 변화에 큰 영향을 주지 못하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

TOUGH2를 이용하여 지하수의 흐름과 지열펌프 내에서의 흐름을 고려한 3차원 모델링을 수행하였다. 지하수의 흐름은 지열펌프 출수구의 온도에 영향을 주었으나 대수층의 수리전도도가 1.0×10^{-10} m/s 보다 작을 경우 지하수 흐름의 영향은 미미할 것으로 생각된다.

이 연구에서 사용한 매개 변수들의 값은 실제 시스템과 차이가 있을 수 있고 U-튜브 내에서 파이프 벽과 내부를 흐르는 물 사이의 열교환을 전도로 계산했기 때문에 출수구 온도의 절대적인 값보다는 상대적인 값의 차이에 의미가 있을 것이다.

앞으로의 연구에서는 좀 더 실제에 가까운 매개 변수 값을 사용하고 경계 조건을 현실적으로 수정하는 작업이 필요하다.

후기

본 연구는 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Hellström, G. Sanner, B., 2000. EED: Earth Energy Designer. User manual, Version 2.0.
- [2] Karsten Pruess, Curt Oldenburg, and George Moridis, 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0.
- [3] Sarah Signorelli. 2004. Geoscientific Investigations for the Use of Shallow Low-Enthalpy Systems. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, for the degree of Doctor of Science