

불포화 지반 조건을 고려한 파일 매입형 열교환기의 수치해석

Numerical Simulation of Ground Heat Exchanger Embedded Pile Considering Unsaturated Soil Condition

최정찬¹⁾, Jung Chan CHOI, 이승래²⁾, Seung Rae LEE

¹⁾ KAIST 건설및환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST

²⁾ KAIST 건설및환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST

SYNOPSIS : This study presents a numerical simulation model of vertical ground heat exchangers, considering unsaturated hydro static ground conditions induced by the ground water table fluctuation. Heat transfer in ground and grout is modeled by a 3-D FEM transient conductive heat transfer model, where heat transfer between circulating fluid and heat exchanging pipe is treated as 1-D quasi steady state forced convective elements. To take into account the unsaturated ground condition, soil thermal conductivity and heat capacity which are dependent on the matric suction are applied to ground elements. Parametric studies considering various ground water table conditions are conducted to investigate the influence of unsaturated hydro static ground condition on the mean heat exchange rate of ground heat exchanger. Simulation results considering water table fluctuation show 60~100% of mean heat exchange rate for a saturated soil condition and 125~208% of that for a dry soil condition. Thus consideration of unsaturated soil condition is substantially recommended for more accurate design and performance evaluation for ground heat exchangers.

Keywords : Ground heat exchanger, Unsaturated soil condition, Numerical simulation, Heat transfer

1. 서론

최근들어 지구온난화, 화석에너지의 고갈로 인하여 에너지를 저장할 수 있는 신재생에너지원의 필요성이 나날이 증대되고 있다. 지중 열교환기 시스템은 비교적 일정한 온도를 유지하는 지중을 열원 또는 히트 싱크로 이용하여 여름철에는 열에너지를 방출하고 겨울철에는 열에너지를 흡수하는 시스템이다. 지중 열교환기 시스템의 이산화탄소 발생 저감 및 에너지 절약형 기술로써의 장점으로 인하여 미국과 유럽을 중심으로 새로운 신재생에너지원으로 각광 받고 있다. 또한 최근들어서는 수직 밀폐형 지중 열교환기의 단점을 보완하기 위하여 구조물의 기초 말뚝에 매입된 지중열교환기 기술이 2000년대 들어서 유럽의 오스트리아, 독일, 일본 등에서 활발히 연구되고 시공되어 지고 있다.

이와 같이 지중 열교환기 시스템의 대중화로 인하여 수직 밀폐형 열교환기의 보다 정확한 설계를 위하여 많은 해석 방법들 역시 연구되어 왔다. Bose et al.(1985), Hart & Couvillion(1986), Deerman & Kavanaugh(1991) 등은 Carslaw & Jaeger(1946)의 cylindrical heat source theory 또는 Kelvin(1882)의 line source theory에 바탕을 둔 해석 모델을 소개하였다. 또한 Eskilson(1987), Shonder & Beck(1999), Yavuzturk(1999) 등은 수치적 해석 방법에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같은 모델들은 균질한 지반이나 단순한 지반 조건이 가정되었지만 파일 매입형 지중열교환기의 경우 관입깊이가 15~40m로 비교적 낮은 깊이에 시공되어 복잡한 지반 거동 특성을 보이며 이는 열교환기의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다(Preene & Powrie, 2009). 특히 파일 매입형 지중 열교환기의 전부

또는 일부가 지하수위의 위쪽에 존재할 경우 지반은 불포화 상태에 놓이게 되며 이 또한 지중 열교환기의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서, 이와 같은 지하수위 유동에 의해 발생하는 불포화 지반 조건을 고려한 해석 모델이 필요함에 불구하고 대부분의 모델이 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 지하수위 유동에 의해 야기되는 불포화 지반 상태를 고려한 파일 매입형 열교환기의 3차원 유한요소 해석 모델이 소개되었다. 수치 해석은 지반 및 그라우트 내에서의 열 흐름은 3차원 전도 열전달 유한요소모델로 고려되었고 순환유체와 파이프 사이의 열전달은 1차원 유사 정적 강제 대류 모델이 이용되었다. 불포화 지반 상태가 파일 매입형 지중 열교환기에 미치는 영향을 검토하기 위하여 다양한 지하수위 조건을 고려한 매개 변수 연구가 수행되었다.

2. 이론적 배경 및 모델링

2.1 지중 열교환기의 열전달 메커니즘

지중 열교환기의 열전달 메커니즘은 열전달 유체가 보어홀내의 파이프내를 이동하면서 여름철에는 상대적으로 낮은 온도를 갖는 그라우트 재료와 주변의 지반으로 열을 방출하고 겨울철에는 상대적으로 높은 온도를 갖는 그라우트 재료와 주변의 지반으로부터 열을 흡수하는 방법이다. 이와 같은 파일에 매입된 지중열교환기와 주변 지반으로의 열 전달 거동을 모사하기 위해서는 복잡하고 복합적인 열전달 메커니즘이 필요하게 된다. 주변 토양의 지하수의 흐름이 비교적 적고 그라우트와 지반내의 열전달은 전도에 의한 열 전달만 고려한다면 지중 열교환기의 열전달은 1)파이프내에서 유체의 유동에 의한 강제 대류 열전달과 2)그라우트 및 지반내의 전도로 인한 열전달로 이루어진 복합 열전달 과정으로 나타낼 수 있다.

만약 파이프내의 유체의 흐름 방향의 전도에 대한 영향이 극히 미미하다고 가정한다면 파이프내의 유체와 파이프를 통한 그라우트와의 열전달은 다음과 같은 지배 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}c_{fluid}(T_{fluid,inlet} - T_{fluid,outlet}) = h_{eq}\pi D_{out} \int (T_{fluid} - T_{surface})dL \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 는 순환 유체의 질량 속도, c_{fluid} 는 순환 유체의 비열, $T_{fluid,inlet}$ 와 $T_{fluid,outlet}$ 은 순환유체의 입구부와 출구부의 온도, h_{eq} 는 파이프를 고려한 순환 유체의 등가 대류 계수, D_{out} 는 파이프의 외경, T_{fluid} 는 유체의 온도, $T_{surface}$ 는 파이프 표면의 온도를 나타낸다. 여기서 파이프를 고려한 순환유체의 등가 대류 계수 h_{eq} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{eq} = \left(\frac{D_{out}}{2\lambda_{pipe}} \ln \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right) + \frac{D_{out}}{D_{in}h} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서 λ_{pipe} 는 파이프의 열전도도, D_{in} 은 파이프의 내경, h 는 순환유체의 대류 계수로 파이프내의 유체가 난류 흐름일 때 Dittus-Boelter correlation에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.35} \frac{\lambda_{fluid}}{D_{in}} \quad (3)$$

여기서 Re 는 순환 유체의 Reynold number, Pr 는 Prandtl number, λ_{fluid} 는 순환 유체의 열전도도이다. 지반의 간극비가 크지 않아 수분의 이동이 그리 크지 않은 경우 지반과 그라우트 내의 열전달은 주로 전도에 의하여 발생한다(Rees et al., 2000). 내부에서 발생하는 열 q_i 가 존재하는 경우 전도에 의한 열전

달 지배방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{d}{di}\left(\lambda\frac{dT}{di}\right)+\rho c\frac{dT}{dt}+q_i=0 \quad (i=x,y,z) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열이다.

식 (4)의 열전도도와 체적 비열은 지반의 여러 가지 거동에 의하여 이질성을 갖게 된다. 이는 열전달 지배 방정식의 재료 비선형성을 초래하게 된다.

2.2 지하수위 유동로 인한 지반의 불포화 조건

지하수위 위쪽의 지반은 간극 공기압 u_a 과 부의 간극수압 u_w 의 차이로 나타낼 수 있는 모관흡수력 ψ 를 갖는 불포화 지반 조건에 놓이게 된다. 지하수위 위쪽의 모관흡수력의 분포는 지표면의 상태, 지반의 투수율, 강우 조건 등의 여러 가지 조건에 의해 결정된다. 하지만 본 연구에서는 불포화 지반에서의 함수비의 변화가 열교환기의 성능에 미치는 영향을 검토하기 위하여 지반내의 흐름이 없고 지표면의 영향이 없는 정수압 분포를 갖는 정적 상태를 고려한 다음과 같은 모관 흡수력의 분포를 가정하였다.

$$\psi = (u_a - u_w) = -g\rho_w(H_{w,t} - z) \quad (5)$$

여기서 g 는 중력 가속도, $H_{w,t}$ 는 지하수위, z 는 깊이 이다.

모관 흡수력은 지반내의 체적 함수비와 고유한 관계를 갖고 있으며 이를 함수특성곡선이라고 한다. 함수특성곡선을 추정하는 많은 식은 다양한 문헌을 통해 발표되었다(Brooks & Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund & Xing, 1994). 본 연구에서는 지반 공학 분야에서 활발히 사용되고 있는 Fredlund & Xing의 모델(1994)이 사용되었다. 모관흡수력에 의해 표현되는 지반의 포화도 S_r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_r = \frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (6)$$

여기서 a , n , m 은 순서대로 곡선의 공기 함입치, 기울기 및 모양을 나타내는 맞춤 변수이다. 따라서 식(5)와 (6)을 이용하여 지하수위 위쪽의 함수비의 분포를 알 수 있게 된다.

2.3 불포화 지반 열 물성치

지중 열교환기의 수치해석에서 열전도도 λ 와 체적 비열 C 는 지반의 전도에 의한 열전달을 나타내는 중요한 열 물성치로 지반의 흙 입자, 물, 공기의 세가지 상을 고려하여 결정된다.

체적 비열 C 는 단위 부피를 갖는 어떤 물질의 온도를 1도 올리는 데 소요되는 에너지의 양으로 정의된다. 체적 비열은 흙의 미세 구조에 큰 영향을 받지 않기 때문에 다음과 같이 각 상의 체적비에 따른 체적 비열의 합으로 나타낼 수 있다(Brandl, 2006).

$$C = c\rho = \sum_{i=1}^3 \chi_i c_i \rho_i \quad (i = soil, water, air) \quad (7)$$

여기서 χ 는 각 상의 체적비이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi_{air} = \eta(1 - S_r) \quad (8)$$

$$\chi_{water} = \eta S_r \quad (9)$$

$$\chi_{soil} = 1 - \eta \quad (10)$$

여기서 η 는 흙의 간극률이다.

흙의 열 전도도는 흙의 종류와 함수비에 의해 크게 영향을 받는다(Abu-Hamdeh & Reeder, 2000). 흙의 열전도도를 추정하는 다양한 모델이 제안되었지만 흙의 복잡한 미세 구조로 인하여 모든 흙의 종류와 모든 범위의 함수비에서 열전도도를 정확하게 예측하는 모델은 아직 알려지지 않고 있다(Thomas & Rees, 2009). 본 연구에서는 이론식 중 비교적 흙의 열전도도를 잘 모사한다고 알려져 있는 Geometric mean model(Sass et al., 1971)이 다음과 같이 사용되었다.

$$\lambda = \prod_{i=1}^3 \lambda_i^{\chi_i} \quad (11)$$

여기서 아랫 첨자 i 는 순서대로 공기, 물, 흙 입자이다.

식(7)과 (11)에 따라 깊이에 따른 지반 열특성의 분포가 식(5)와 (6)에서 구해진 함수비와의 관계를 통해 구할 수 있게 된다.

2.4 수치 모델링

지반의 정적 불포화 조건을 고려한 지중 열교환기의 수치 해석이 3차원 유한요소법을 이용하여 수행되었다. 수치 해석은 3차원 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS version 6.5가 사용되었으며 지반 및 그라우트는 8절점 연속 입방 열전달 요소로 모델링 되었다. 지하수위에 의한 지반의 불포화 조건을 고려하기 위하여 식 (5), (6), (7) 및 (11)을 이용하여 깊이에 따른 지반의 열전도도 및 체적 비열의 분포가 사용자 서브루틴을 이용하여 반영되었다.

또한 각 노드에서의 파이프내의 유체의 온도를 계산하기 위하여 파이프 요소를 유사 정적 1차원 요소로 가정하여 사용자 서브루틴을 이용하여 반영하였다. 각 노드를 지나는 유체의 온도는 그라우트 요소에서의 열유량을 이용하여 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$T_{fluid,i} = T_{fluid,i-1} - \frac{q_i + q_{i-1}}{2} \frac{\pi D_{out} dl}{\dot{m} c_{fluid} \rho_{fluid}} \quad (12)$$

여기서 $T_{fluid,i}$ 는 i 노드의 유체의 온도, q_i 는 그라우트 요소 노드의 열유량이다.

계산된 유체의 온도를 이용하여 순환유체와 파이프를 통한 그라우트와의 열전달은 그라우트 요소의 대류 경계 조건으로 다음의 식을 통하여 반영할 수 있다.

$$q_{conv,i} = h_{eq} \pi D_{out} dL (T_{fluid,i} - T_i) \quad (13)$$

여기서 T_i 는 그라우트 요소 노드의 온도이다.

3. 다양한 지하수위 조건을 고려한 수치 해석

3.1 해석 조건

지하수위 위치에 따라 발생하는 지반의 함수비의 분포가 파일 매입형 지중 열교환기에 미치는 영향을

검토하기 위하여 다양한 지하수위 조건을 고려한 경우에 대하여 위에서 제안된 수치 모델을 이용하여 해석해 보았다. 해석에 사용된 보어홀의 기하학적 형상이나 재료의 물성은 일반적인 지중 열교환기에 사용되는 물성치를 이용하였고 그 값은 표 1과 2에 나타내었다. 해석에 사용된 운전 조건은 지반의 초기 온도는 일반적인 지반의 온도 범위 안에 있는 13°C로 가정하였으며 지반이 냉방 소스로 작동할 때의 영향을 살펴보기 위하여 입구부의 온도는 30°C로 설정하였다. 순환 유체의 질량 유속은 0.245 kg/sec이고 해석 시간은 100시간으로 하였다.

표 1. 해석에 사용된 보어홀의 기하학적 형상

| Parameter | Value |
|-------------------------------------|-------|
| Pipe inner diameter, D_{in} (mm) | 25.0 |
| Pipe outer diameter, D_{out} (mm) | 28.0 |
| Borehole diameter, D_B (mm) | 300.0 |
| Shank space, L_s (mm) | 180.0 |
| Borehole length, L (m) | 20.0 |

표 2. 해석에 사용된 보어홀의 열 물성치

| Parameter | Value |
|--|----------|
| Pipe thermal conductivity, λ_{pipe} (W/m°C) | 0.385 |
| Convective heat transfer coefficient, h (W/m²°C) | 1975.947 |
| Equivalent convective heat transfer coefficient, h_{eq} (W/m²°C) | 213.317 |
| Grout thermal conductivity, λ_{grout} (W/m°C) | 2.8 |
| Grout density, ρ_{grout} (kg/m³) | 2300.0 |
| Grout heat capacity, c_{grout} (J/kg°C) | 1050.0 |
| Fluid heat capacity, c_{fluid} (J/kg°C) | 4200.0 |

해석에서 고려된 지하수위의 위치는 지반이 완전히 포화 및 건조될 경우와 지하수위가 지표로부터 5, 10, 15, 20m 깊이에 있는 경우에 대한 해석이 수행되었다. 해석에 사용된 지반내의 간극률 및 각 상의 열 물성은 표 3과 같다. 해석에 사용된 지반의 함수 특성 곡선은 그림 1과 같이 국내 화강 풍화토의 특성을 따르는 범위 내의 값을 사용하였다.

표 3. 해석에 사용된 간극률 및 흙을 구성하는 각 상의 열 물성치

| Symbol | Parameter | Value |
|-------------|--|-------|
| η | Porosity | 0.40 |
| λ_s | Thermal conductivity of Soil Particle (W/mK) | 4.00 |
| λ_w | Thermal conductivity of Water (W/mK) | 0.560 |
| λ_a | Thermal conductivity of Air (W/mK) | 0.026 |
| c_s | Heat capacity of Soil Particle (J/kgK) | 800 |
| c_w | Heat capacity of water (J/kgK) | 4200 |
| c_a | Heat capacity of air (J/kgK) | 1000 |
| ρ_s | Density of Soil Particle (Kg/m³) | 2600 |
| ρ_w | Density of Water (Kg/m³) | 1000 |
| ρ_a | Density of Air (Kg/m³) | 1.25 |

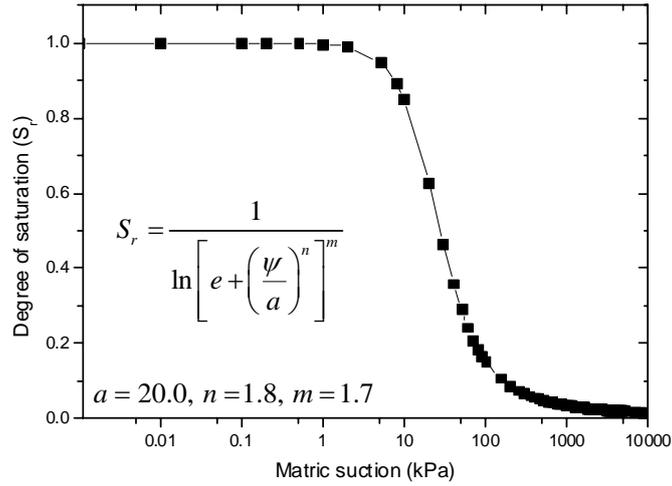


그림 1. 해석에 사용된 함수 특성 곡선

식 (7)과 (11)을 이용한 각각의 지하수위를 고려한 지반 열물성치의 분포는 그림 2 및 3과 같고 사용자 서브 루틴을 이용하여 수치 해석 모델에 적용되었다.

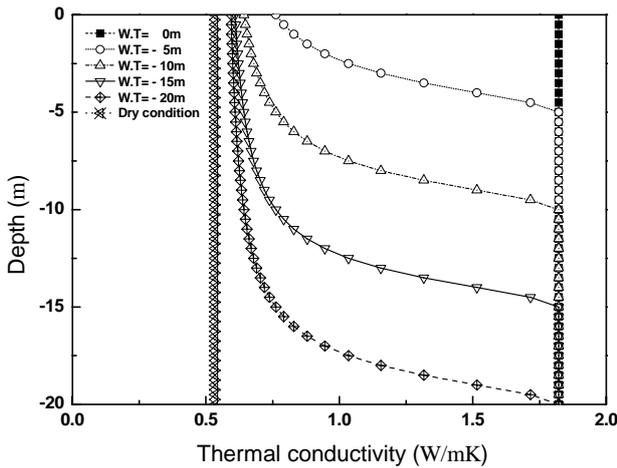


그림 2. 지하수위에 따른 열전도도의 분포

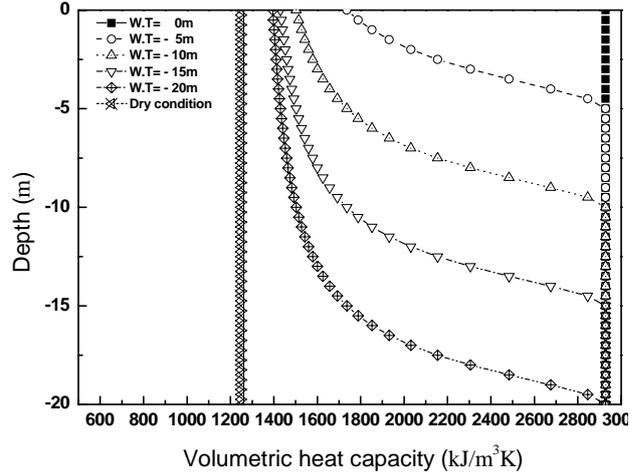


그림 3. 지하수위에 따른 체적 비열의 분포

3.2 해석 결과

지하 수위의 변화에 따른 지중 열교환기의 출구부의 온도와 평균 열교환율의 해석 결과를 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4에서 보는 것과 같이 해석 시간이 증가할수록 유출부의 순환 유체의 온도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 100시간 후 유출부의 온도는 지반을 완전 포화로 가정할 경우 28.6 °C, 완전 건조로 가정할 경우 29.2 °C로 약 0.6°C의 차이를 보였다. 또한 지하수위가 지표면에 가까워 질수록 유출부의 온도가 선형적으로 낮아지는 경향을 알 수 있었다. 그림 5에서 보는 것처럼 평균 열 교환율은 해석 시간이 증가 할수록 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 지하수위 지표면에 가까울수록 더 높은 열교환율을 보이는 것을 알 수 있었다.

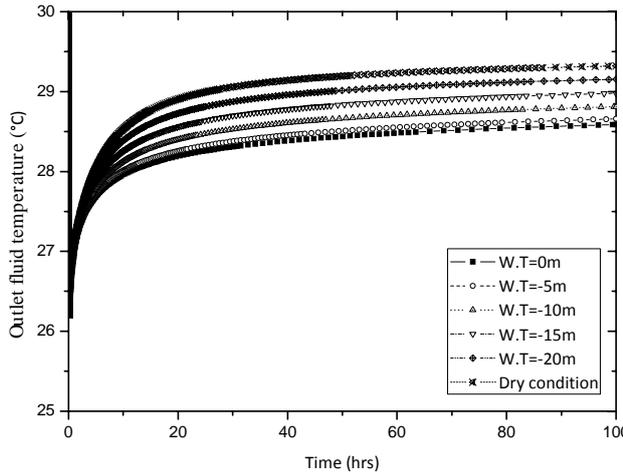


그림 4. 지하수위에 따른 열전도도의 분포

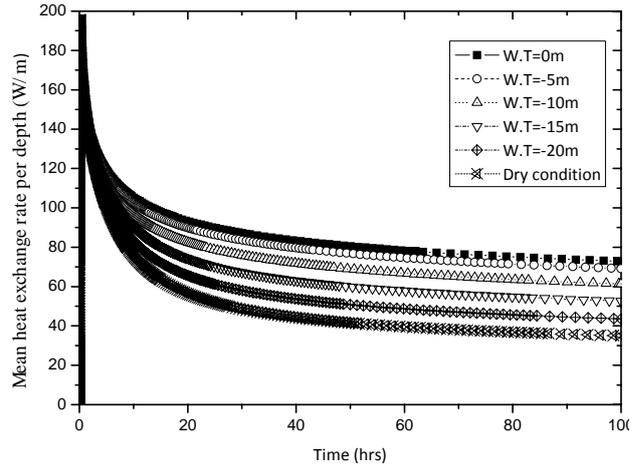


그림 5. 지하수위에 따른 체적 비열의 분포

그림 6는 해석 시간 100시간 후에 각각의 지하수위 조건에 따른 평균 열교환율을 나타낸 그림이다. 해석 결과 지반을 완전 포화로 가정한 경우 72.8 W/m , 완전 건조로 고려한 경우 35 W/m 의 열교환율을 보였다. 또한 지반의 지하수위의 변화로 인한 불포화 조건을 고려한 경우 완전 포화와 비교해서 약 60~95%, 완전 건조 경우와 비교해서 약 125~208%의 열교환율을 보였다. 이는 지중 열교환기의 시공 후 지하수위의 변화에 의하여 지중 열교환기의 성능이 크게 차이가 날 수 있음을 나타낸다. 따라서 본 결과를 통해 지중의 불포화 조건이 지중 열교환기 설계시 중요하게 고려되어야 할 요소임을 알 수 있었다.

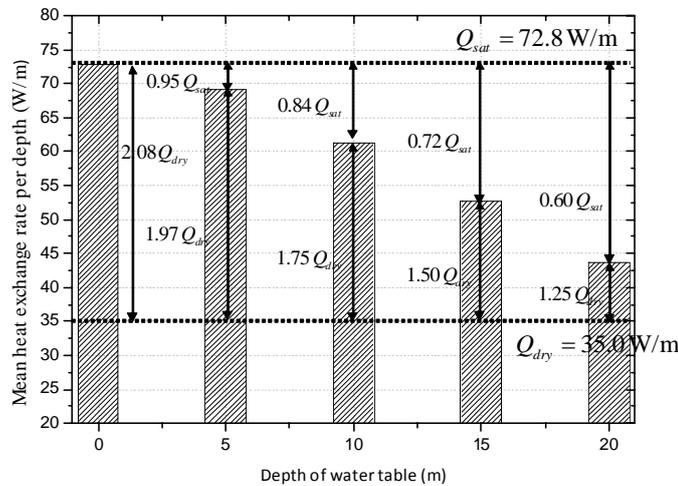


그림 6. 100시간 해석 후 지하수위 조건에 따른 평균 열교환율

4. 결론

본 연구에서는 지하수위의 유동으로 인한 불포화 지반에서의 함수비의 변화가 파일 매입형 지중 열교환기의 성능에 미치는 영향을 검토하기 위하여 지반의 불포화 조건을 고려한 지중 열교환기의 3차원 유한요소 해석 모델이 제안되었다. 지중 열교환기와 불포화 지반의 복합 열전달을 고려하기 위하여 순환 유체와 파이프를 통한 그라우트로의 열전달은 1차원 유사 정적 강제 대류 모델로 그라우트와 지반내의 열전달은 3차원 전도 열전달 요소로 모델링 되었다. 지하수위 유동에 따른 불포화 지반에서의 함수비의 변화에 대한 영향은 함수특성곡선과 지반의 공기, 물, 흡입자를 고려할 수 있는 지반 열전도도와 체적

비열 모델을 이용하여 모델에 적용시켰다.

지하수위 깊이에 따른 지중 열교환기의 성능을 검토하기 위하여 다양한 지하수위를 고려한 매개 변수 수치 해석이 본 연구에서 수행되었다. 해석 결과 깊이 단위 미터 당 평균 열교환율이 포화 지반을 가정했을 경우의 약 60~100%, 완전 건조 상태로 가정했을 경우의 약 135~200%의 값을 보이는 것으로 나타나 지하수위의 변화로 인한 지반내의 함수비의 변화가 지중 열교환기의 성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 보다 정확한 지중 열교환기의 설계 및 해석을 위하여 지반의 불포화 조건의 고려가 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Abu-Hamdeh, N.H., and Reeder, R.C. (2000), "Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, pp. 1285 - 1290.
2. Bose, J.E., Parker, J.D., McQuiston, F.C. (1985), Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump systems. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta.
3. Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique* 56, No. 2, pp 81~122.
4. Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964), Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Paper 3*, Civil Engineering Department, Colorado State University.
5. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1946), *Conduction of heat in solids*, Clarendon Press, Oxford.
6. Deerman, J.D. and Kavanaugh, S.P.(1991), "Simulation of vertical U-tube ground coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution", *ASHRAE Transactions*, 97(1), pp 287~295.
7. Eskilson, P.(1987), Thermal analysis of heat extraction boreholes. Doctoral Thesis, Department of Mathematical Physics and Building Technology, University of Lund, Sweden.
8. Fredlund, D. G. and Xing, A.(1994), "Equations for the soil water characteristic curve", *Can Geotech J*, Vol. 31, pp. 521~32.
9. Hart, D.P. and Couvillion, R.(1986), *Earth coupled heat transfer*, National Water Well Association.
10. Kelvin, Sir W. Thomson. (1882), *Mathematical and physical papers* II.
11. Preene, M. and Powrie, W. (2009), "Ground energy systems: from analysis to geotechnical design", *Geotechnique* 59, No. 3, pp 261-271.
12. Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M. and Thomas, H. R. (2000), "Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, Issue 3, pp 213~265.
13. Sass, J. H., Lachenbruch, A. H. and Munroe, R. J. (1971), "Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations", *J. Geophys. Res.* 76, No. 14, pp. 3391~3401.
14. Shonder, J.A. and Beck, J.V. (1999), "Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique", *ASHRAE Transactions*, 105(1), pp 458~466.
15. Thomas, H. R. and Rees, S. W. (2009), "Measured and simulated heat transfer to foundation soils", *Geotechnique* 59, No. 4, pp. 365~375.
16. Van Genuchten MTh. (1980),"A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci Soc Am J*, 44(5), pp. 892~8.
17. Yavuzturk, C.(1999), Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems. Doctoral Thesis, Oklahoma State University.