

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 25, No. 1, 2005

1차원 모델에 의한 지중열교환기의 열거동 해석

이세균*, 김대기**, 우정선***, 박상일****

*충북대학교 기계공학과(leesk@chungbuk.ac.kr), **충북대학교 대학원 기계공학과(thermo98@chungbuk.ac.kr),
한국에너지기술연구원(jswoo@kier.re.kr), *한국에너지기술연구원(sipark@kier.re.kr)

A Study on the Thermal Behavior of Vertical Borehole Heat Exchanger with 1-Dimensional Model

Lee, Se-Kyoun*, Kim, Dae-Ki**, Woo, Jung-Son***, Park, Sang-Il****

*Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk National University(leesk@chungbuk.ac.kr),
**Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Chungbuk National University(thermo98@chungbuk.ac.kr),
***Korea Institute of Energy Research(jswoo@kier.re.kr)
****Korea Institute of Energy Research(sipark@kier.re.kr)

Abstract

A one-dimensional heat transfer model for the vertical borehole system is derived in this study to predict the thermal behavior of the system and surrounding soil. In this model the U-tube is replaced with one effective tube of effective diameter which is surrounded by concentric grout region. All thermal resistances of borehole are counted in the grout region with effective thermal conductivity of grout. Effective thermal conductivity of grout and sand are calculated through parameter estimation. The validity of this model is accomplished through comparison of the predicted temperature profiles of the model with experimental data

Keywords : 보어홀 열교환기(Borehole heat exchanger), 계수추정법(Parameter estimation), 유효튜브(Effective tube), 1차원모델(1-dimensional model)

기 호 설 명

C_p : 비열 [J/kg·K]	k_s : 토양 또는 모래의 열전도율 [W/m·K]
k_{fe} : 유체영역의 유효열전도율 [W/m·K]	L : 보어홀 길이 [m]
k_{ge} : 그라우트영역의 유효열전도율 [W/m·K]	Q : 열전달율 [W]
	Res : 전열저항 [K/(W/m)]
	r : 반경 [m]

- r_b : 보어홀 반경 [m]
- r_{fe} : 유효튜브 반경 [m]
- SSE : 지층오차의 합 [$^{\circ}C^2$]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]
- t : 시간 [sec or hour]

그리스 문자

- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- ρC_p : 체적열용량 [$J/m^3 \cdot K$]

하 첨 자

- b : 보어홀
- e : 유효
- ex : 실험
- f : 보어홀 유체
- g : 그라우트
- i : 시간간격에 따른 순번
- o : 초기
- s : 토양 또는 모래
- w : 물

1. 서 론

지중열원 열펌프 시스템은 공기열원 시스템에 비하여 월등히 효과적인 냉난방 설비로 알려져 있으며 최근에는 국내에서도 이 설비가 확산되는 추세에 있다. 지중열교환기는 이 설비중 가장 기본적인 장비이며 동시에 초기투자비를 증가시키는 주요 요인이 되기도 하므로 많은 연구가 필요한 분야이다. 지중열교환기에는 수평형과 수직형이 있으며 땅이 좁은 우리나라의 현실에서는 일반적으로 수직형이 선호된다.

지중열교환기 설계시 가장 중요한 요인 중 하나는 지중토양이 갖는 유효열전도율의 정확한 측정에 있다. 그림 1은 수직형 지중열 교환기인 보어홀을

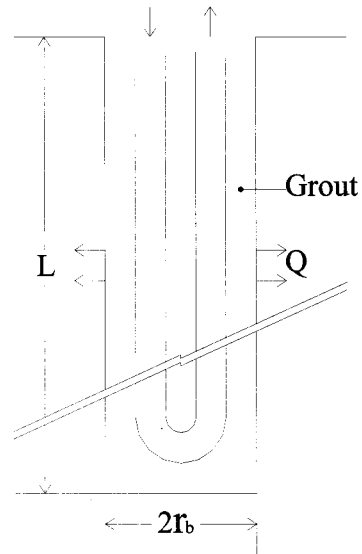


그림 1. Borehole system

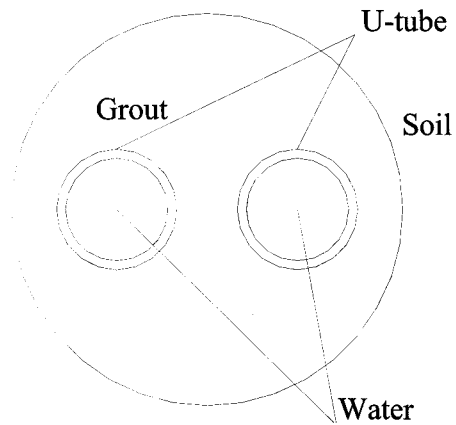


그림 2. Cross section of the borehole

보이고 있다. 보어홀은 그림에서와 같이 수직길이 L , 반경 r_b 로 이루어지며 내부에 폴리 에틸렌 U-튜브를 매설한 후 그라우팅 처리한다. 매설된 튜브 내로 보어홀 유체를 순환시켜 지중토양과 열교환을 하게 하며 보어홀 유체로는 일반적으로 부동액을 사용한다. 그림 2는 보어홀 시스템의 단면 형상을 보이고 있다. 이 그림은 단일 U-튜브의 경우이나 U-

튜브를 2중으로 매설한 2중 U-튜브 시스템도 있다. 이러한 보어홀 시스템은 지중으로부터의 에너지 취득 뿐 아니라 지중도양의 열전도를 측정에도 이용된다.

지중에 매설된 파이프와 토양사이의 열전달에 관한 이론해는 Kelvin의 직선열원(line source)에 관한 해⁽¹⁾로부터 구할 수 있으며 이 해와 보어홀 유체의 입, 출구 온도 측정값으로부터 지중도양의 열전도를 계산도 가능하다⁽²⁾. 그러나 그림 2에서 보이는 시스템은 단지 근사적인 직선열원일 뿐이며 열전도를 계산에 사용되는 식 또한 직선열원 해를 근사화한 식이 사용되므로⁽³⁾ 그 결과는 다소간의 오차를 갖게된다. 더욱이 직선열원 해는 보어홀과 지중도양간의 일정열유속 가정하에 이루어진 것으로 실제 입, 출구 온도 측정과정에서 정확히 일정 열유속을 유지한다는 것 또한 쉽지않다. 직선열원 모델에 의한 열전도를 계산은 대단히 단순하여 이용하기 편리하나 이러한 이유들 때문에 그 신뢰도가 떨어지며 따라서 이 방법보다 다소 신뢰도가 높을 것으로 사료되는 몇가지 다른 모델들이 개발되었다.

Ingersoll 등⁽⁴⁾은 실린더 열원 모델을 제시하였고 Deerman과 Kavanaugh⁽⁵⁾는 이 모델을 확장하여 열유속의 변화까지 고려한 이론해를 발표하였다. 수치모델로는 2차원 또는 3차원의 다양한 모델들⁽⁶⁻⁸⁾이 제안된 바 있으며 이러한 모델들은 주로 지중도양의 열전도를 계산보다는 지중열교환기의 설계용으로 사용된다. 지중도양의 유효열전도를 계산에 이용할 목적으로 개발된 비교적 단순한 1차원 모델이 Shonder와 Beck⁽⁹⁾에 의하여 제시된 바 있다. 이 모델에서는 그림 2에서 보이는 2개의 튜브를 유효직경을 갖는 하나의 튜브로 근사화하고 이 유효튜브의 주위로 가상적인 얇은 film영역을 추가로 설정하여 유체와 튜브에서의 열저장 및 전열저항 효과를 이 film영역에서 처리토록 하였다. 그러나 이러한 가상적인 film영역의 추가는 문제의 해법을 복잡하게 할 뿐아니라 모델 설정의 이해를 어렵게 하는 등의 불편한 점이 있다.

본 연구에서는 가상적인 film영역을 제외한 단순한 1차원 수치모델을 설정하였으며 실험을 수행하여 실험결과와 수치해석 결과를 비교하므로써 수치모델의 신뢰성을 검증하였다.

2. 1차원 모델

1차원 모델은 열유동을 반경방향으로만 가정하므로 2차원 또는 3차원 열거동효과를 무시하기 때문에 그 해는 시간이 경과할수록 다소의 오차를 포함한다고 볼 수 있다. 그러나 지중도양의 열전도를 측정을 위한 실험시간은 약 50시간 정도이므로 이 정도의 시간내에서 1차원 해의 오차는 매우 적으며 따라서 1차원 모델은 이와 같은 응용분야에 매우 적절한 모델이다. 본 연구에서도 1차원 모델의 유효튜브 개념을 채택하였으나 가상적인 film영역을 제외하고 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 유효튜브 주위로 바로 그라우트 영역을 설정하여 1차원 모델을 더욱 단순화 하였으며 보어홀 내의 전열저항은 모두 이 그라우트 영역에서 처리토록 하였다.

그림 3은 본 연구에서 설정한 1차원 모델의 단면 형상을 보여준다. 여기서는 그림 2에서 보이는 2

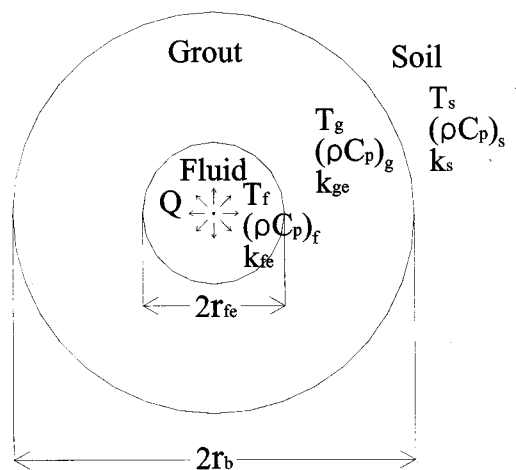


그림 3. Simplified 1-dimensional geometry of the borehole cross section

개의 튜브를 그림과 같이 유효반경 r_{fe} 인 하나의 튜브로 근사화 하고 이 유효튜브의 중심에서 열유속 Q 가 발생되며 주위는 그라우트 채움을 한 것으로 되어 있다. 열유속의 값은 외부로 전달될 때는 양의 값, 외부에서 내부로 전달될 때는 음의 값을 갖게 된다. 이 모델에 관하여 다음의 가정을 적용한다.

- (1) 보어홀은 수직방향으로 무한히 길고 유효튜브 내부유체의 온도는 균일하여 모든 열의 흐름은 반경방향으로 이루어진다.
- (2) 유효튜브내의 열전달은 열전도율이 무한히 큰 물질의 전도에 의하여 이루어진다. 즉, 이 물질의 유효열전도율 $k_{fe} = \infty$ 이다. 단, 이 물질의 열용량은 보어홀 유체와 같다.
- (3) 그라우트 영역에서의 열전도는 유효열전도율 k_{ge} 에 의하여 이루어진다.
- (4) 보어홀 시스템 및 주위 토양의 열물성치는 토양의 깊이에 관계없이 일정하다.

위의 가정 (2)는 U-튜브내의 대류 열전달을 전도 열전달효과로 대체한 것으로써 실제로 파이프내의 흐름은 열전달이 활발한 난류영역이 되며 따라서 온도분포 역시 거의 균일하게 나타나므로 전열저항이 없는(즉, 열전도율이 무한히 큰) 물질에 의한 전도 열전달 현상과 유사하다고 볼 수 있다. 그러나 튜브 내벽의 대류에 의한 전열저항, 튜브와 그라우트간의 접촉전열저항 등이 고려되어야 하나 본 연구에서는 이들을 따로 고려하지 않고 가정 (3)에 의하여 그라우트의 유효 열전도율 k_{ge} 를 적절히 산정하므로써 이들이 모두 그라우트내의 전도저항에 포함되는 것으로 처리하였다. 유효튜브내의 유체의 양은 실제와 같도록 유효튜브의 직경을 실제 튜브직경의 $\sqrt{2}$ 배로 한다. 따라서 이 1차원 모델과 실제 시스템간의 차이는 유효튜브의 설정과 그라우트의 유효열전도율 산정이며 그 외의 열물성치인 보어홀 유체의 체적열용량 $(\rho C_p)_f$, 그라우트의 체적열용량 $(\rho C_p)_g$ 및 주위 토양의 열전도율과 체적열용량 $k_s, (\rho C_p)_s$

는 실제와 같고 그라우트 영역의 직경도 실제와 같도록 설정된다.

이 모델에 따른 열전도 방정식은 다음과 같다. 그라우트에 관하여서는

$$\frac{k_{ge}}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_g}{\partial r}) = (\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad (1)$$

$r_{fe} < r < r_b$

주위 토양에 관하여서는

$$\frac{k_s}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_s}{\partial r}) = (\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (2)$$

$r_b < r < \infty$

내부 유체의 온도변화 방정식 및 $r = r_{fe}$ 에서의 접촉경계조건은

$$(\rho C_p)_f (\pi r_{fe}^2) \frac{dT_f(t)}{dt} = \frac{Q}{L} + k_{ge}(2\pi r_{fe}) \frac{\partial T_g(r_{fe}, t)}{\partial r} \quad (3)$$

$$T_{f(t)} = T_g(r_{fe}, t) \quad (4)$$

그라우트와 토양사이의 접촉경계조건은

$$k_g \frac{\partial T_g(r_g, t)}{\partial r} = k_s \frac{\partial T_s(r_g, t)}{\partial r} \quad (5)$$

$$T_g(r_g, t) = T_s(r_g, t) \quad (6)$$

토양에서 $r = \infty$ 의 경계조건은

$$T_s(\infty, t) = T_o \quad (7)$$

전 시스템에서의 초기조건은 T_o 로 균일하며 따라서

$$T_f(0) = T_g(r, 0) = T_s(r, 0) = T_o \quad (8)$$

본 연구에서는 식 (1)-(8)을 양적 유한차분법 (explicit finite difference method)에 의하여 수치해석을 하였으며 토양내에서의 차분식을 예로 들면 다음과 같다.

$$(\rho C_p)_s \pi (r_{n+1}^2 - r_n^2) \frac{\Delta T_s}{\Delta t} = \frac{T_{n-1} - T_n}{Res_n} - \frac{T_n - T_{n+1}}{Res_{n+1}} \quad (9)$$

여기서

$$Res_n = \frac{1}{2\pi r_n} \left(\frac{r_{n+1} - r_{n-1}}{2k_s} \right) \quad (10)$$

그라우트에서의 식은 식 (9), (10)에 T_s , k_s 대신 T_g , k_g 를 대입하면 된다.

3. 실험

본 연구에서는 위에서 제시한 수치모델의 해석결과를 검증하기 위하여 실험실규모의 지중열교환 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였으며 그림 4는 이 실험장치의 개략도를 보이고 있다. 실험장치에서는 내경 0.15 m, 두께 0.005 m의 PVC 파이프 내부에 내경 0.025 m, 두께 0.0045 m의 폴리에틸렌 U-튜브를 설치하고 주위는 그라우트(Bentonite 20%) 채움을 한다. 실제 지중열 시스템에서는 그라우트를 둘러싸고 있는 PVC 파이프를 설치하고 있지 않으나 실험장치 제작편의상 부득이 파이프를 추가한 것이다. 이렇게 제작된 보어홀을 0.5×0.5×3m의 모래상자 내부에 설치하였으며 수조에서 가열된 온수가 U-튜브 내부를 순환하면서 주위 모래를 가열한다. 여기서 모래는 주위토양을 시뮬레이션 한 것으로 1차원 모델과 조화되기 위하여서는 모래영역도 원통형으로 이루어져야 하나 이 역시 제작상 문제로 이와 같은 사각형 형태로 만들어 졌다. 모래상자는 0.012 m의 합판으로 제작되고 0.055 m 두께의 스티로폼으로 단열처리 되었다. 순환수의 입, 출구 온도 및 유량은 설치된 온도센서(T-타입) 및 유

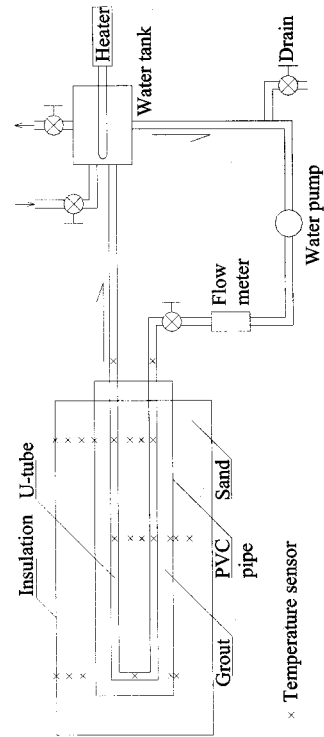


그림 4. Schematic diagram of experimental apparatus

량계로 측정한다. 투입된 모래는 비교적 건조한 상태로 별도 실험을 통한 측정결과 $k_s = 0.31 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 임이 확인되었다. 수조내의 전기히터를

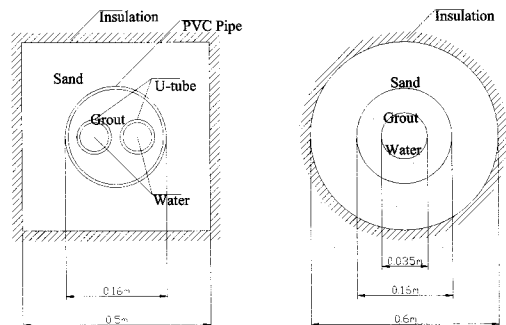


그림 5. Cross sections of (a) experimental system and (b) numerical model

가동하여 136 W의 열량을 순환수를 통하여 주위 모래에 공급한다. 실험은 순환수의 초기온도 30.5°C에서 시작하여 57°C가 될 때까지 약 22 시간동안 계속된다.

4. 계수 추정법(parameter estimation)

그림 5에서 (a)는 실험장치 보어홀의 단면형상이며 (b)는 이 실험장치의 열해석을 위하여 본 연구에서 제시한 동심원 1차원 모델의 단면형상이다. 1차원 모델로의 단순화 과정은 위에서 설명한 바 있으며 여기서는 U-튜브 및 PVC 파이프의 두께에 따른 전도 저항, 기타 접촉전열 저항 등을 그라우트의 전도저항에 포함시키는 효과를 갖는 그라우트의 유효 열전도율 k_{ge} 및 주위모래의 열전도율 k_s 를 계수 추정법으로 구하고자 한다. 모래와 그라우트 및 물의 열용량은 실제값을 적용하여 각각 $(\rho C_p)_s = 3.9 \text{ MJ/m}^3 \cdot K$, $(\rho C_p)_g = 1.35 \text{ MJ/m}^3 \cdot K$, $(\rho C_p)_w = 4.2 \text{ MJ/m}^3 \cdot K$ 로 한다. 수치모델의 전체 직경은 4각형으로 제작된 실험장치의 변과 대각선 길이의 평균으로 잡아서 0.6m로 하였다.

계수추정법은 실험결과 측정된 U-튜브의 입, 출구 유체온도의 평균값 $T_{f,ex}$ (이 값은 U-튜브 전단면에 걸쳐 균일하다고 가정한다.)와 수치해석 결과 얻어진 T_f 와의 비교를 통하여 이루어지며 비교방법은 최소자승 오차의 개념을 도입하여 다음과 같이 한다.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (T_{f,ex,i} - T_{f,i})^2 \quad (11)$$

여기서 i 는 시간에 따른 측정순번이며 SSE는 자승 오차의 합(sum of square error)이 된다. 따라서 SSE는 k_{ge} 와 k_s 에 따른 함수가 되며 최적값은 주어진 범위의 k_{ge} 와 k_s 에 관한 grid search를

통하여 얻게 된다. 수치해석 프로그램에서 k_{ge} 를 최소값에서 최대값까지 input으로 준 후 10등분하여 증가시키며 각각의 k_{ge} 값에 대하여 k_s 또한 최소값에서 최대값까지 input으로 준 후 10등분하여 증가시켜 나간다. 각각의 k_{ge} , k_s 값에 대한 SSE를 계산하고 비교해 가며 SSE가 최소가 되는 점을 찾는다. 이리하여 최적점의 윤곽이 파악되면 그 점을 중심으로 다시 한번 더 좁은 범위로 k_{ge} 와 k_s 의 최대, 최소값을 input 시킨 후 grid search를 되풀이 한다. 이렇게 2~3회 반복 실시하므로써 신뢰할 만한 최적점을 찾을 수 있다. 본 연구에서는 이 방법에 의하여 $k_{ge} = 1.95 \text{ W/m} \cdot K$, $k_s = 0.31 \text{ W/m} \cdot K$ 를 얻었다. 여기서 구한 k_s 의 값이 위에서 언급한 별도의 방법으로 측정된 값과 일치함을 알게 되었으며 따라서 해의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

5. 결과 해석

수치해석을 위하여 반경방향 등 간격으로 그라우트 영역은 5개, 모래영역은 반경 0.15m까지는 5개, 0.15~0.3m는 10개의 영역으로 나누어 시간 간격 10초 단위로 계산을 수행하였다. 반경 0.3m에서는 단열경계조건이 적용된다. 그림 6은 실험에서 측정된 순환수 평균온도와 수치해석으로 계산한 T_f 를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최소자승의 관점에서 도출된 $k_{ge} = 1.95 \text{ W/m} \cdot K$ 와 $k_s = 0.31 \text{ W/m} \cdot K$ 를 사용하므로써 실험과 계산 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 판명된다. 그림 7에서는 반경방향의 온도분포를 비교하여 보았다. 이러한 비교는 실험에서나 가능한 것이며 실제의 지중열 시스템에서는 수행하기 어려운 내용이다. 왜냐하면 실제의 시스템에서 비교 가능한 것은 유체온도 뿐이며 반경방향의 온도분포는

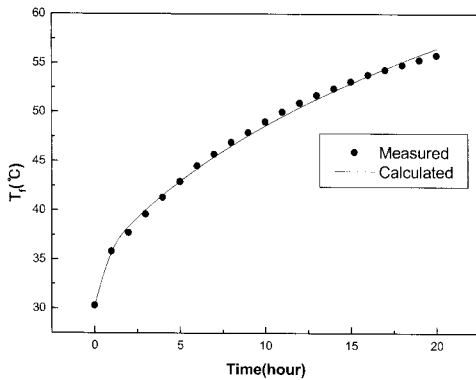


그림 6. Measured and calculated borehole fluid temperature as a function of time

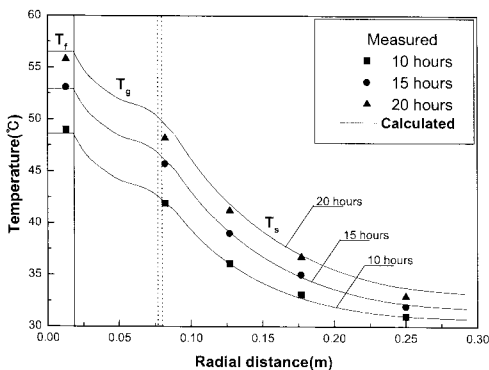


그림 7. Measured and calculated temperature profiles along the radial distance

반경방향으로 별도의 보어홀을 설치하지 않는 이상 측정이 불가능하기 때문이다. 그림에서 보면 실험과 계산결과는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 중심부의 유체온도를 최소자승의 관점에서 실제와 근접시킨 k_{ge} 와 k_s 의 효과는 시스템 전체에 걸쳐 유효하다는 것을 알 수 있다. 단, 반경방향 거리 0.25m 근처에서는 15시간 이상 경과시 측정온도가 계산온도보다 낮게 나타나는데 이것은 실험장치의 외곽부분 단열이 완전하게 이루어지지 않은데 기인된 것으로 생각된다.

6. 결 론

수직형 지중열교환기와 그 주위의 열거동을 해석하기 위한 1차원 열전달 모델이 본 연구에서 제시되었다. 동심원 유효튜브 개념을 적용한 이 모델은 기존의 1차원 모델보다 해석과정이 더욱 단순하며 이해하기가 쉽다. 여기서는 전열저항을 모두 그라우트 영역에서 처리토록 하였고 그라우트와 주위 토양의 유효열전도율은 계수추정법으로 구하였다.

이 모델의 타당성 검증을 위하여 실험실 규모의 실험장치를 통한 실험이 수행되었으며 실험과 수치해석의 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 제시된 모델은 그라우트와 주위 토양의 유효열전도를 측정에 이용될 수 있으며 열교환기 주위 토양의 열거동 해석에도 응용될 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 2003년도 대체에너지연구사업에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ingersoll, L.R. and Plass, H.J., 1948, "Theory of the Ground Pipe heat Source for the Heat Pump", ASHVE Transactions, Vol. 47, pp. 119-122.
2. Eklöf, C. and Gehlin, S., 1996, TED-A Mobile Equipment for Thermal Response Test, Master Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
3. Kavanaugh, S.P., 2000, Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests, ASHRAE 1118-TRP.
4. Ingersoll, L.R., Zobel O.J. and Ingersoll,

- A.C., 1954, Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications, New York: McGraw-Hill.
5. Deerman, J.D. and Kavanaugh, S.P., 1991, "Simulation of Vertical U-tube Ground-cupled Heat Pump Systems using the Cylindrical Heat Source Solution", ASHRAE Transactions, Vol. 97, Pt. 1, pp.287-295.
 6. Eskilson, P., 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Dept. of Math. Physics, University of Lund, Sweden.
 7. Hellstrom, G., 1991, Ground Heat Storage, Dept. of Math. Physics, University of Lund, Sweden.
 8. Rottmayer, S., Beckmann, W.A. and Mitchell, J.W., 1997, "Simulation of a Single Vertical U-tube Ground Heat Exchanger in an Infinite Medium, ASHRAE Transactions, Vol. 103, Pt. 2, pp.651-659.
 9. Shonder, J.A. and Beck, J.V., 1999, "Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique", ASHRAE Transactions Vol. 105, Pt. 1, pp.458-466.