한국신·재생에너지학회 2007년도 추계학술대회논문집 pp.550~554

1차원 모델에 의한 보어홀 열거동 해석 및 현지측정

김 대기[1], 우 정선[2], 노 정근[3], 이 세균[4]

A Study of Borehole Thermal Behavior with 1-Dimensional Model: Field Test Analysis included

DaeKi Kim, JoungSon Woo, JeongGeun Ro, SeKyoun Lee

Key words : One-dimensional heat transfer model(1차원 열전달 모델), Parameter estimation(계수 추정법), Initial Ignoring Time(초기제외시간), Borehole heat exchanger(보어홀 열교환기), Effective tube(유효튜브)

Abstract : A one-dimensional heat transfer model coupled with parameter estimation is developed in this study to predict the effective thermal conductivities of soil formation and borehole resistances from in situ field test data. In this application a new method of using initial ignoring time(IIT) obtained from error estimation is tried and turned out to be successful in determining soil thermal conductivities.

The validity of this model is accomplished through comparison of the predicted temperature profiles of the model with the data from laboratory scale experimental setting.

Eleven test boreholes were constructed in Ochang, Chungcheong Buk Do, and thermal response test was carried out with each borehole. The results of the in situ tests were analyzed with our 1-D numerical model and compared with the results of line source method. The comparison shows that the thermal properties from line source method is a little lower (~95%)than those from numerical method. The reason of such result seems to be the lower thermal conductivity of grout material, which is not counted in line source method.

Nomenclature

C_p : specific heat, kJ/kg · K
k : conductivity, W/m · K
L : borehole length, m
Q : heat flux, kW
Res : resistance, m · K/W
r : radius, m
SSE: sum of square error, K^2
SE : square error, K^2
T : temperature, K
t : time, hour
ρ : density, kg/m^3

subscrip

b : borehole
e : effective
ex : experiment
f : fluid
g : grout
i : counting time
m : measurement
s : soil
w : water

1) 충북대학교 기계공학부
E-mail : thermo98@chungbuk.ac.kr
Tel : (043)261-2446 Fax : (043)263-2441
2) 한국에너지기술연구원
E-mail : jswoo@kier.re.kr
Tel : (042)860-3213 Fax : (042)860-3202
3) 충북대학교 기계공학부
E-mail : jeonguen@chungbuk.ac.kr
Tel : (043)261-2446 Fax : (043)263-2441
4) 충북대학교 기계공학부
E-mail : leesk@chungbuk.ac.kr
Tel : (043)261-2446 Fax : (043)263-2441

1. 서 론

지중열원 열펌프 시스템은 공기열원 열펌프 시스템에 비하여 효과적인 설비로 알려져 있으나 지중열교환기는 이 설비 중 가장 기본적인 장비이며 동시에 초기투자비를 증가시키는 요인이 되므로 많은 연구가 필요한 분야이다. 지중열교환기에는 수평형과 수직형이 있으며 땅이 좁은 우리나라에서는 수직형을 주로 사용한다.

지중열교환기 설계 시 중요한 요인 중 하나는 지중토양의 유효열전도율의 정밀한 측정에 있다. Fig. 1은 수직형 지중열교환기인 보어홀의 개략도를 보이고 있다. 보어홀은 그림에서와 같이 수직 길이 L, 반경 r_b로 이루어지며 내부에 폴리에틸렌 파이프로 된 U관을 매설한 후 그라우팅 처리를 한다. 매설된 U관으로 보어홀 유체를 순환시켜 지중토양과 열교환을 하게하며 일반적으로 보어홀 유체는 부동액을 사용한다.

지중에 매설된 파이프와 토양사이의 열전달에 관한 이론해는 Kelvin의 직선열원에 관한 해[1]로부터 구할 수 있으며 이 값과 측정된 보어홀 유체의 입, 출구 온도로부터 지중토양의 열전도율 계산도 가능하다.[2] 그러나 보어홀은 단지 근사적인 직선열원일 뿐이며 열전도율을 계산하는 식 또한 직선열원의 식을 근사화한 식이므로[3] 그 결과는 다소의 오차를 가지고 있다. 직선열원 모델에 의한 열전도율의 계산은 단순하고 이해하기 쉽기 때문에 이용하기 편리하나 이런 이유들 때문에 그 신뢰도가 떨어지며 따라서 이 방법보다 다소 신뢰도가 높을 것으로 사료되는 다른 모델이 개발되었다.

지중토양의 유효열전도율을 계산할 목적으로 비교적 단순한 1차원 모델이 Shonder와 Beck[4]에 의하여 제시된 바 있으며 이 모델은 2개의 튜브를 유효직경을 갖는 하나의 튜브로 근사화하고 이 유효튜브 주위로 가상적인 얇은 필름영역을 추가로 설정하여 유체와 튜브사이의 열전달 및 전열저항을 이 필름영역에서 처리하도록 하였다. 이 가상적인 필름영역의 추가는 문제의 해석을 복잡하게 할 뿐 아니라 모델의 이해를 어렵게 하는 등의 불편한 점이 있다.

본 연구에서는 가상적인 필름영역을 제외한 단순한 1차원 모델을 설정하였으며 계수추정 시 초기제외시간(IIT) 개념을 적용한 해석방법을 개발

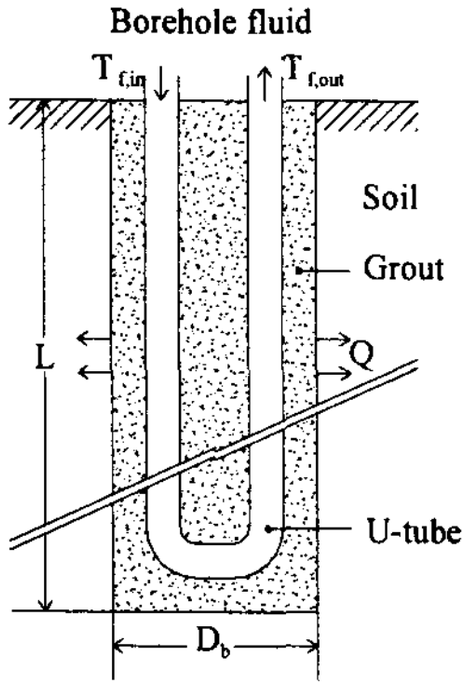

Fig. 1 Borehole system

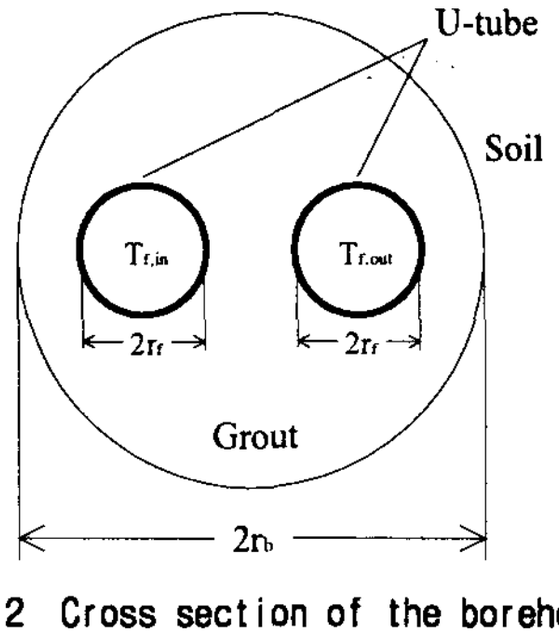

Fig. 2 Cross section of the borehole

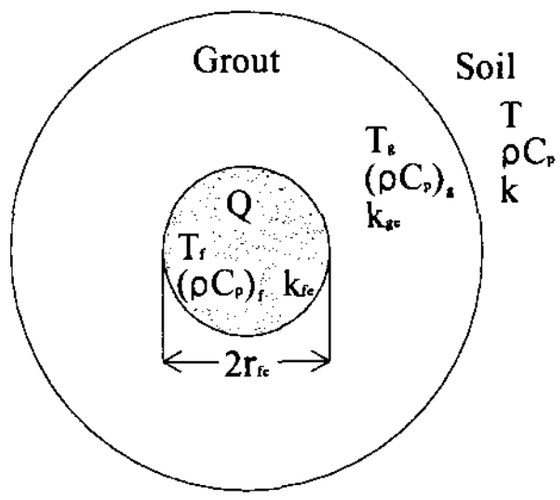

Fig. 3 Simplified 1-dimensional geometry of the borehole cross section

하고 실험실 규모의 실험을 통하여 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 수치해석의 타당성을 검증하였다. 또한 현지시험의 측정결과를 이용하여 이 수치해석모델의 적용성을 살펴보았다.

2. 1차원 모델

Fig. 3은 본 연구에서 설정한 1차원 모델의 단면을 보여준다. 이 모델에서는 보어홀에 설치된 U관을 유효반경을 갖는 하나의 유효튜브로 근사화하고 유효튜브 주위로는 동심원 형태의 그라우트 영역과 주위토양 영역을 설정하였다. 실제 보어홀 내에서 발생되는 모든 전열저항은 이 모델에서는 그라우트의 유효열전도율에 의하여 고려되고 있으며 그라우트와 주위토양의 유효열전도율은 계수추정법으로 계산한다.

이 모델에 따른 열전도 방정식은 다음과 같다. 그라우트에 관하여서는

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

$$r_{fe}<r<r_b \qquad (1)$$

주위 토양에 관하여서는

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

$$r_b<r<\infty \qquad (2)$$

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_o로 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 토양 내에서의 차분식을 예로 들면 다음과 같다.

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

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_g를 대입하면 된다.

계수추정법은 실험결과 측정된 U-관 입·출구 유체온도의 평균값과 수치해석 결과 얻어진 온도와의 비교를 통하여 이루어지며 비교방법은 최소자승 오차의 개념을 도입하여 다음과 같이 한다.

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

윗 식에서 i는 시간에 따른 측정순번이며 SSE는 자승오차의 합(sum of square errors)이 된다. 따라서 SSE는 그라우트와 지중 토양의 유효열전도율 k_{ge}와 k_s의 함수가 되며 SSE가 최소가 되는 최적 k_{ge}와 k_s의 값을 찾는다. 본 연구에서는 이 최적값을 구하기 위하여 simplex algorithm을 사용하여 최적의 k_{ge}와 k_s를 추정하였다.

시스템의 가동 초기에는 오차 특성이 크게 나타날 수 있다. 그러나 이러한 특성은 가동시간이 경과함에 따라 급격히 약화되며 보어홀 주위의 온도분포는 1차원적 특성으로 접근해 나가게 된다. 따라서 오차 특성이 큰 초기부분을 제외하고 나머지 자료들로 열전도율 해석을 한다면 신뢰할만한 결과에 접근할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 보어홀 유체의 측정온도와 계산온도차의 자승의 총합을 최소화하는 관점에서 계수추정법을 사용하고 있으므로 오차특성도 자승오차(SE, square error)의 관점에서 이해하는 것이 바람직하다. 자승오차 SE는 측정온도와 계산온도의 차이를 자승한 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SE = (T_{f,m} - T_{f,c})^2 \quad (12)$$

본 연구에서는 초기 자승오차가 큰 부분의 초기 시간을 산출하여 이 시간까지의 자료를 계수 추정 해석에서 제외한다. 이 시간 이후에 자승오차가 커지는 경우도 있지만 크게 변화하지는 않으며 시간이 경과하면 대체적으로 보아 오차 크기는 안정된 영역 내에 있는 것으로 관찰된다. 이와 같은 방법으로 계산된 초기 시간은 일정하지 않으나 대략 4시간 미만인 것으로 관찰 되었다. 본 연구에서 개발된 1차원 수치 모델의 결과를 계수 추정법과 접목할 때 이와 같이 상대적으로 오차가 큰 초기 시간의 데이터를 제외하고 나머지 시간의 데이터로 계수 추정 해석을 하고자 하며 이와 같이 하므로써 보다 더 신뢰도가 높은 해석이 가능한 것으로 사료된다.

3. 실험 및 현지시험

3.1 실험

본 모델의 타당성을 검증하기 위하여 실험실 규모의 실험장치가 제작되어 실험이 수행되었다.

Fig. 4는 실험장치의 전체 모습을 보이고 있는데 그림에서와 같이 실험장치는 반경방향의 대칭성을 유지하기 위하여 직경 0.8m, 길이 6m의 원통형으로 제작된 내부에는 보어홀을 시뮬레이션하기 위하여 내경 0.075m의 동관을 설치한 후 내부에 내경 0.016m의 폴리에틸렌 U관을 장착하였다. 실험장치 및 보어홀 내부에는 흙모래를 투입하고 U관 내부에 전기히터로 일정열량을 가열한 온수를 순환시키며 U관의 입, 출구 온도를 측정한다.

측정된 데이터는 1차원 수치해석 및 계수추정법을 적용하여 최적값으로 산출된 흙모래의 유효열전도율(k_s)와 그라우트의 유효열전도율(k_{ge})를 이용하여 수치해석에 의하여 계산된 보어홀 유체의 온도와 측정된 유체의 평균온도를 Fig. 5에서 비교하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 최소자승의 관점에서 도출된 흙모래와 그라우트의 유효 열전도율을 사용하므로써 실험과 계산 결과는 비교적 잘 일치하

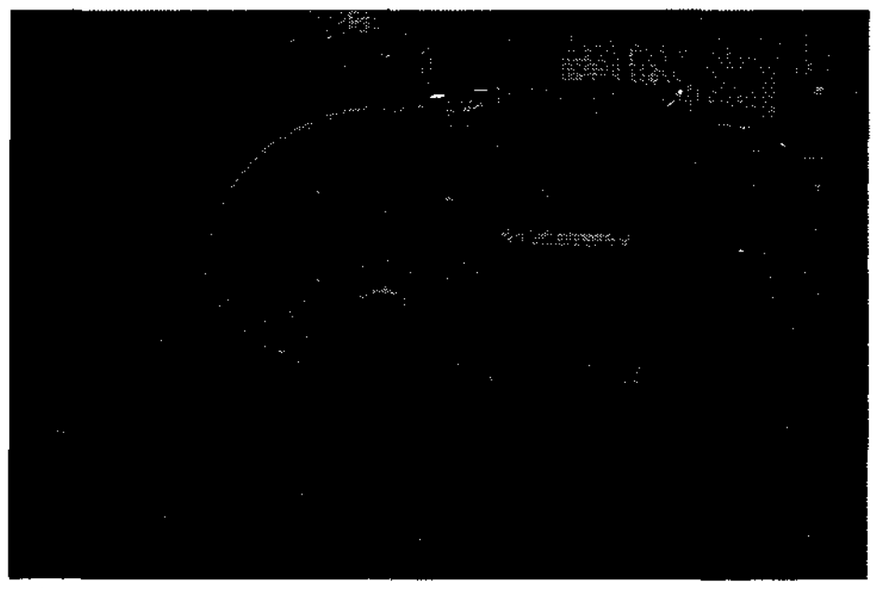

Fig. 4 Photographs of experimental setting

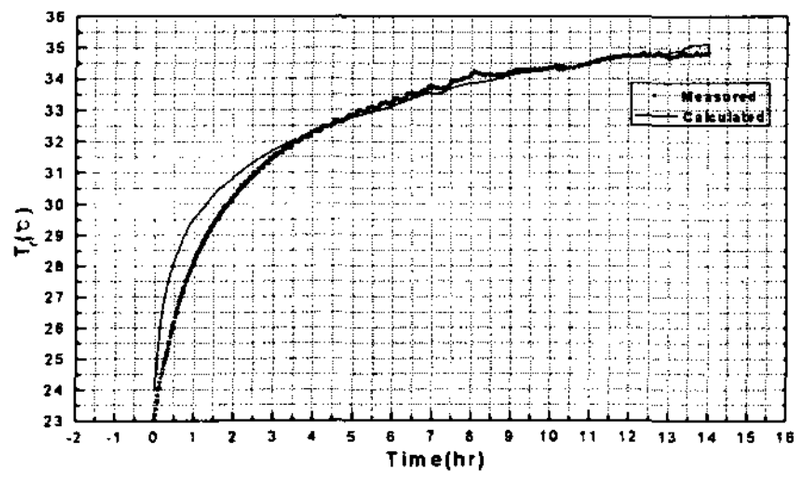

Fig. 5 Measured and calculated borehole fluid

temperature as a function of time

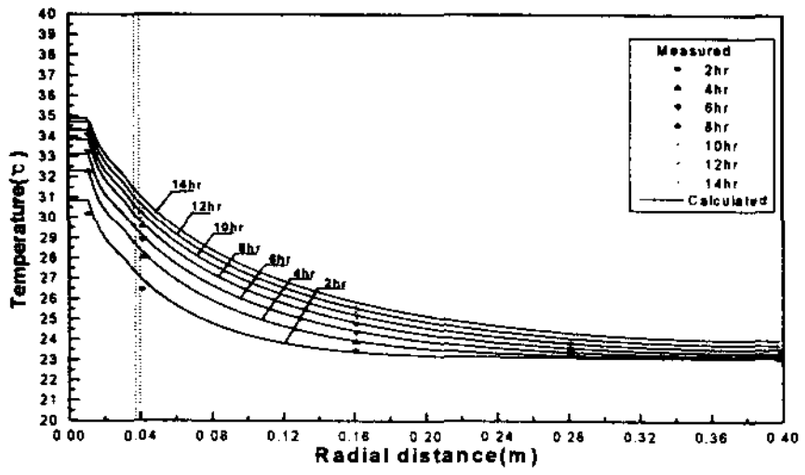

Fig. 6 Measured and calculated temperature profiles along the radial distance

는 것으로 판명되었다. 다만 실험 초기(약 3시간 이내)의 비교에서는 다소의 오차가 나타났다. 이것은 초기에는 U관의 2차원적 영향이 커서 아직 반경방향으로 대칭인 1차원적인 온도 분포가 충분히 이루어지지 않았음을 의미한다. Fig. 6에서는 반경방향의 온도 분포에 대한 실험값과 비교값을 비교하여 보았다. 이러한 비교는 실험에서나 가능한 것이며 실제의 지중열 시스템에서는 수행하기가 어려운 내용이다. 왜냐하면 실제의 시스템에서 비교가 가능한 것은 유체온도 뿐이며 반경방향의 온도분포는 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_s와 k_{ge}는 시스템 전체에 걸쳐 유효하다는 것을 알 수 있다. 단, 반경방향 거리 0.4 m 부근에서는 14시간 경과 시 측정온도가 계산온도보다 낮게 나타났는데 이것은 실험장치 외벽부분 단열이 완전하지 않은데 기인한 것으로 생각된다.

이 실험결과와 본 연구에서 개발한 1차원 수치해석 및 계수추정법의 결과를 비교하여 볼 때 본 연구에서 개발한 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

3.2 현지시험

본 연구에서 개발된 1차원 모델의 타당성은 위에서 설명한 실험장치를 통하여 어느 정도 검증되었다고 볼 수 있다. 그러나 실험실 실험은 그 규모의 제한성 때문에 완전한 검증 과정으로 보기에는 미흡하며 따라서 현지시험(in-situ test)에 의한 결과 해석이 반드시 필요하다. 단, 현지시험은 실험실 실험과는 달리 보어홀 주위 토양의 열전도율을 별도의 방법으로 측정할 수 없으며 주위 토양의 온도 분포 또한 알 수가 없는 등의 불리한 여건에 있다.

본 연구에서는 현지시험을 위하여 충북 오창에 직경 0.13m와 0.15m의 시추공을 11개 시추하여 시험용 보어홀을 설치하고 초기제외시간을 적용한 1차원 수치해석 및 계수추정법을 적용하여 지중 열전도율 k_s와 보어홀 전열저항 R_b값을 해석하였다.

Table 1에서는 시험용 보어홀의 사양을 나타내고 있다. 1 ~ 9번 보어홀은 직경 0.13m로 시추하고 매설되는 U관의 형상을 2관, 3관 그리고 4관으로 3개씩 다르게 하여 지중에 매설하였다. 그리고 그라우트는 각각의 U관의 형상에 따라 벤토나이트와 실리카 샌드 그리고 벤토나이트와 실리카 샌드가 혼합된 3가지의 그라우트 재료를 각각의 보어홀에 사용하여 그라우트 처리를 하여 시험용 보어홀을 구성하였다. 10번과 11번 보어홀은 직경 0.15m로 보어홀을 시추하고 U관의 형태는 3관을 사용하여 보어홀에 매설하였고 벤토나이트로 그라우트 처리를 하였다. 이 10번과 11번 보어홀은 U관의 이격거리에 따른 주위 토양의 유효열전도율과 보어홀 전열저항의 변화를 알아보기 위하여 11번 보어홀에 우정선 등[5]이 개발한 3관용 spacer clip을 3m간격으로 사용하여 보어홀의 벽면에 관을 밀착하였다. Fig. 7에서는 사용된 3관용 spacer clip의 형태를 보이고 있다.

Table 1 Parameters of test boreholes

Borehole No.	길이 (m)	직경 (m)	관형식	그라우트
1	101.75	0.13	2관	Bentonite
2	102.2	0.13	2관	Bentonite + Silica sand
3	101.88	0.13	2관	Silica sand
4	101.15	0.13	3관	Bentonite + Silica sand
5	100.73	0.13	3관	Silica sand
6	100.01	0.13	3관	Bentonite
7	102.88	0.13	4관	Bentonite
8	101.93	0.13	4관	Bentonite + Silica sand
9	100.52	0.13	4관	Silica sand
10	101.5	0.15	3관	Bentonite
11	99.49	0.15	3관 (Spacer)	Bentonite

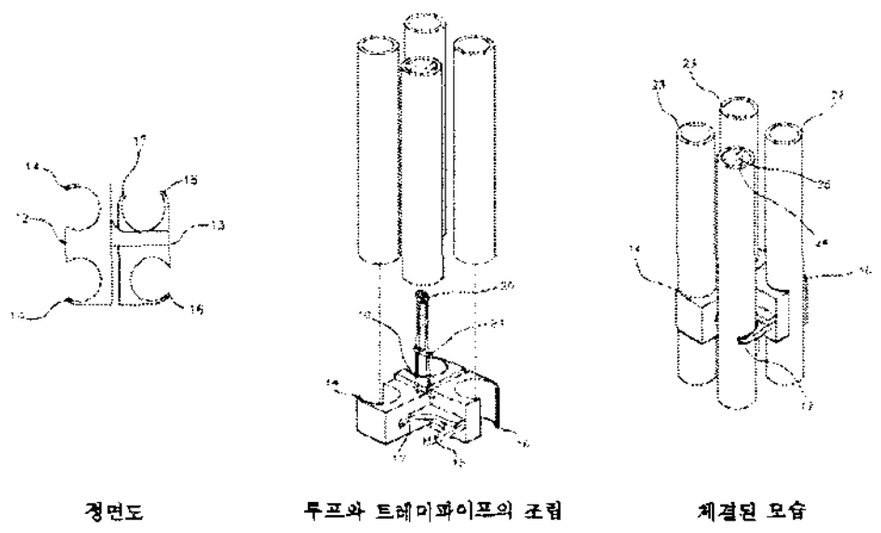

Fig. 7 U-bend pipe spacer for 3-pipe system

실험결과는 2관을 기준으로 할 때 3관의 전열저항은 약 20%, spacer 부착 3관의 경우는 약 45% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 전열저항이 45% 감소할 경우 소요되는 보어홀 길이는 약 30% 감소된다고 추정할 때 spacer 부착 3관 보어홀의 유용성은 매우 높음을 알 수 있다. 4관의 경우는 전열저항이 2관에 비하여 약 40% 정도 감소하고 있다.

Table 2에서는 11개 시험용 보어홀의 현지시험 해석결과를 총괄하여 나타내었다. 이 표에서는 본 연구에서 개발한 1차원 수치모델 결과의 타당성을 보기 위하여 일반적으로 많이 사용하고 있는 선형열원의 해석결과(IIT=12hrs 적용)를 함께 수록하였다. 표에서 보면 초기제외시간을 적용한 1차원 수치

Table 2 Estimated thermal conductivities and borehole resistances

Borehole No.		k_s(W/mK)	R_b(mK/W)
1 (2관)	Line source(IIT=12hr)	3.0574	0.11564
	1-dimensional numerical(IIT=2.00hr)	3.4697	0.12621
2 (2관)	Line source(IIT=12hr)	3.1467	0.17192
	1-dimensional numerical(IIT=0.35hr)	3.1538	0.17164
3 (2관)	Line source(IIT=12hr)	3.3229	0.11983
	1-dimensional numerical(IIT=2.20hr)	3.4127	0.12091
4 (3관)	Line source(IIT=12hr)	3.1787	0.11614
	1-dimensional numerical(IIT=0.95hr)	3.3286	0.12091
5 (3관)	Line source(IIT=12hr)	3.1857	0.07765
	1-dimensional numerical(IIT=0.35hr)	3.2348	0.07896
6 (3관)	Line source(IIT=12hr)	3.4156	0.12651
	1-dimensional numerical(IIT=2.40hr)	3.6468	0.13284
7 (4관)	Line source(IIT=12hr)	3.3624	0.05825
	1-dimensional numerical(IIT=1.00hr)	3.7062	0.06682
8 (4관)	Line source(IIT=12hr)	3.1230	0.08938
	1-dimensional numerical(IIT=0.40hr)	3.2865	0.09464
9 (4관)	Line source(IIT=12hr)	3.3793	0.07685
	1-dimensional numerical(IIT=0.70hr)	3.4368	0.07826
10 (3관)	Line source(IIT=12hr)	2.7905	0.13721
	1-dimensional numerical(IIT=2.45hr)	3.0873	0.14761
11 (3관) Spacer	Line source(IIT=12hr)	2.8048	0.09727
	1-dimensional numerical(IIT=0.40hr)	2.9445	0.10319

해석 및 계수추정법에 의한 추정 결과와 선형열원법과 2관식 보어홀에서 사용한 GPM의 결과와 유사하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 초기제외 시간을 12시간 적용한 선형열원 방법에서는 1차원 모델의 결과에 비하여 전반적으로 주위 토양 유효열전도율 k_s와 보어홀 전열저항 R_b의 결과가 약 95% 수준으로 낮게 나타났다. 이처럼 k_s와 R_b의 값이 다소 낮게 나타난 이유는 아마도 선형열원법에서는 해석 시 열전도율이 주위 토양보다 낮은 그라우트 영역을 고려하지 않는 것이 주 이유가 아닌가 사료된다.

4. 결 론

수직형 지중열교환기와 그 주위의 열거동을 해석하기 위한 1차원 모델이 본 연구에서 제시되었다. 유효튜브 개념을 적용한 이 모델은 기존의 1차원 모델보다 해석과정이 단순하고 이해하기가 쉽다. 본 모델에서 전열저항은 모두 그라우트 영역에서 처리하도록 하였고 주위 토양과 그라우트의 유효열전도율은 계수추정법으로 구하였다.

이 모델의 타당성을 검증하기 위하여 실험실 규모의 실험 장치를 통하여 실험이 수행되었으며 실험과 수치해석의 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 충북 오창에 시추된 시험용 보어홀 11개를 대상으로 현지 측정의 적용성을 확인하여 보았으며 다중관(3관, 4관)의 경우 전열저항이 상당히 감소함을 알 수 있으며 특히 spacer 부착 3관의 경우 그 감소의 폭이 매우 큼을 알 수 있다.

본 연구의 1차원 모델 해석결과를 선형열원의 결과와 비교하여 보았을 때 큰 차이는 발견되지 않았다. 다만 선형열원의 결과가 k_s와 R_b값에서 다소 낮게(1차원 모델 결과의 약 95% 수준) 나타났으며 그 이유는 아마도 선형 열원 해석에서는 그라우트 영역의 낮은 열전도율이 고려되지 않은 것 때문으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 2005년도 대체에너지연구사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

[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] Eklof, C. and Gehlin, S., 1996, TED-A Mobile Equipment for Thermal Pesponse 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] 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.

[5] 우정선, 이세균, "3관용 U-벤드 파이프 스페이서", 2005, 실용신안 등록 제 0393075호.