



일반원고

수직밀폐형 지중 열교환 유효도 측정 기술

강은철, 이의준
한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터

1. 서론

지열에너지는 지하 수 km 깊이 이하의 지열원을 이용하는 심부지열 자원과 지표면 일사량의 영향으로 일정 깊이 이상이 되면 점차 안정적이고 일정한 온도를 유지하는 천부지열 자원으로 분류된다. 우리나라의 경우 대체로 지중 깊이 50m 이상이면 약 15°C 내외의 온도범위를 갖기 때문에 지열원을 이용한 히트펌프(GSHP, Ground Source Heat Pump) 기술 적용이 용이하며, 이러한 지열 히트펌프시스템을 이용하여 공간시설 냉/난방, 온수 농작물 건조, 농업용 원예온실시설, 정부공공건물시설 냉/난방 등에 다양하게 이용 가능하다. 그러나 지열 히트펌프시스템을 적용하기 위해서는 무엇보다도 실제 적용 예정 현장에서의 지반과 지중 열교환기의 열교환율이 중요하며, 이 열교환율은 토양, 암반 특성 및 지하수 접촉여부 등에 의해 영향을 받기 때문에 이러한 지열원 히트펌프 시스템의 효율적인 설계와 사용을 위해서는 무엇보다도 지중 열교환 유효도 측정 시험(Thermal Response Test)이 선행되어야 한다. 지중 열교환 유효도는 지중 열전도도도도 표현되고 있으며, 이 지중 열교환유효도를 측정하고 분석하는 것은 지열원 히트펌프 시스템의 설계 및 용량을 결정짓는데 중요한 변수로 작용된다. 현재 지중 열교환 유효도 측정 방법으로는 우리가 잘 알고 있는 열유체식 방식과 유럽에서 지질 특성을 분석할 때 사용되는 전자식 방식이 있다. 본 고에서는 이 두 기술의 전반적인 특성과 활용법을 살펴보고 향후 상호 보완적으로 활용

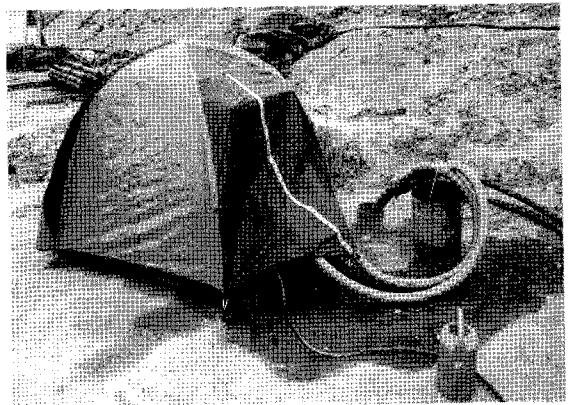
가능한 방안을 제시해 보고자 한다.

2. 열유체식 지중 열교환 유효도 측정 기술

2.1 열유체식 지중 열교환 유효도 측정 기술 개요

현재 국내에서 많이 보급되어진 지중 열교환 유효도 측정 기술은 그림 1과 같이 열유체 방식을 이용한 측정 기술이다. 열유체 방식의 측정 기술은 지중 열교환기 내에 일정한 에너지를 가진 유체를 흘려보냄으로써 지반과 열교환될 때의 열교환기 입출구 온도차를 이용하여 측정하는 방법으로 지중 전체를 하나의 시스템으로 보는 거시적 관점에서 이루어진다. 따라서 본 기술을 적용할 때에는 다음의 가정을 기본 전제로 한다.

- ① Kelvin Line Source Theorem (깊이별 열유속 불변)
 - ② 주변 지반의 homogeneous
- 이러한 기술은 지중 열교환기가 설치된 현지에



[그림 1] 열유체 방식의 지중 열교환 유효도 측정 장비

서의 통합된 지중 열교환 유효도를 측정할 수 있어 열교환기 설치 길이 설계가 용의하다는 장점이 있으나, 시스템 가동시 높은 전력이 요구되고, 측정시간도 48시간 이상 소요된다.

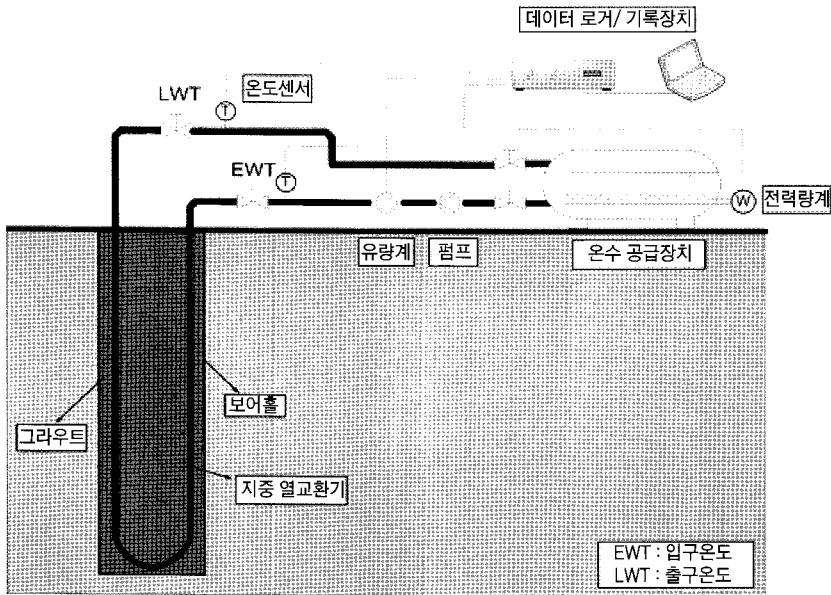
2.2 지중열전도도 측정 방법

지중물성에 관한 유효 열교환 유효도 측정 방법에는 정상상태법, 과도상태법 및 현지측정법이 있는데 지중 열교환 유효도는 일반적으로 시료를 채취하여 실험실에서 구할 수 있는 성질의 것이 아니며, 현재 상태 즉 있는 그대로의 조건하에서의 열교환 유효도를 측정하여야 하므로 현지측정법을 사용한다. 현지측정 방식은 설치하고자 하는 보어홀과 같은 형태와 크기의 시험정을 설치하고자 하는 장소에 먼저 설치하고 U-관을 매설한 후 히터에서 가열된 온수를 U-관을 통하여 순환시키면서 순환수의 입/출구 온도를 측정하는 방식이다. 이 방식은 기본적으로 열침법과 같은 직선열원의 원리이나 보어홀이 완전한 직선열원이 되지 못하므로 근사적인 직선열원이라고 볼 수 있으므로 선형 열원이라고 가정한다. 표 1은 수직밀폐형 지중 열교환 유효도 측정 항목 및 기준을 보여주고 있다.

현지 지중 열교환 유효도 측정은 보어홀을 설치하고자 하는 위치에 시험용 보어홀을 먼저 설치하고 여기에 온수(혹은 냉수)를 순환시키며 순환수의 입/출구 온도를 일정한 시간 간격(10분 또는 그 이하)으로 측정하는 것이다. 시험은 48시간 이상 계속되어야 하며, 온수 순환을 통하여 지중으로 전달되는 열량은 대략 보어홀 단위 길이당 50 ~ 80 W/m 수준으로 전달되어야 한다. 이 정도의 전열량은 실제 지열원 열펌프 가동시의 최대부하 범위에 속하는 것이며 보통 보어홀 50 ~ 70m당 1RT 정도가 된다. 시험 초기에는 먼저 가열장치를 작동하지 않고 물만 순환시켜 지중 토양의 초기온도를 측정된 후에 가열장치를 작동시킨다. 온수가열기를 잘 제어하여 지중으로 전달되는 열량은 가능하면 일정하게 유지되어야 하며 온수 유량은 온수의 입/출구 온도차가 3.5~7℃ 정도가 되도록 권장되고 있다. 이 온도차는 실제 현장에서 가동될 때의 온도차를 기준으로 정한 범위이다. 측정된 데이터를 해석하는 방법에는 선형열원 모델, 실린더열원 모델, 수치모델이 있으며 수치모델에는 1차원 모델 또는 2차원 모델 등이 있다. 해석결과와 주 관심은 지중 열교환 유효도(지중열전도도) k 값을 구하는 것이며, 설치되

<표 1> 수직밀폐형 지중열전도도 측정 항목 및 기준

순번	항목	기준	비고
측정 시간	1	열전도도 측정 개시	그라우팅 완료 후 72시간 이후
	2	제외 시간	시험 시작 후 12시간 데이터 제외
	3	유효데이터의 연속 취득시간	48시간 이상 연속 취득
	4	데이터 취득 간격	10분 이하
측정 조건	5	측정공 투입 전력량	2관식 : 50 ~ 80W/m 3관식 : 60 ~ 95W/m 4관식 : 65 ~ 105W/m
	6	Loop 입출구 온도차 (이 온도범위에서 유량조절)	3.5 ~ 7℃
측정오차	7	측정온도의 오차	±0.3℃ 이하 (평균온도에 대한 표준편차)
	8	입력전력의 오차	±1.5% 이하 (평균전력에 대한 표준편차)
재측정	9	재측정 개시	지중초기 온도의 0.3℃이내 까지 회복 후 재측정



[그림 2] 열유체 방식의 지중 열교환 유효도 시험 개념도

어 있는 보어홀의 전열저항 R_b 도 함께 구할 수 있다. 여기서 평가되는 R_b 의 값은 설치과정에서 튜브 위치의 변화, 그라우트 채움의 불량 등으로 인하여 설계치와는 상당히 다르게 나타날 수도 있으며 이러한 비교를 통하여 설치 기술도 함께 평가될 수 있다.

2.3 현지 지중 열교환 유효도 산출

2.3.1 k값 계산

지중 열교환 유효도 k 값은 식 (1)에 의해서 구할 수 있다. 여기서 T_f 는 보어홀 내부를 흐르는 유체의 평균온도, T_o 는 초기온도, Q 는 토양으로 전달되는 열전달율, L 은 보어홀의 길이이며 따라서 Q/L 은 보어홀 단위 길이 당 열전달율, a 는 토양의 열확산율, k 는 토양의 열교환 유효도, t 는 시간, γ 은 거리, R_b 는 보어홀 전열저항, ν 는 Euler상수로 0.5772의 값을 갖는다.

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4a}{\gamma^2} - \nu \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad \text{식(1)}$$

식 (1)에서 T_f 와 $\ln t$ 에 관하여 1차식이며 따라서 T_f 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_f = ax + b \quad \text{식(2)}$$

여기서,

$$a = \frac{Q/L}{4\pi k} \quad \text{식(3)}$$

$$x = \ln t \quad \text{식(4)}$$

또한, $\nu = 0.5772$ 이므로

$$b = a \left(\ln \frac{4a}{\gamma^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad \text{식(5)}$$

식 (2)에서 기울기 a 를 알면 식 (3)로부터 k 를 구할 수 있다.

$$k = \frac{Q/L}{4\pi a} \quad \text{식(6)}$$

따라서 열응답시험을 통하여 시간에 따른 보어홀 유체온도를 측정하고 그 결과를 $T_f - \ln t$ 의 좌표위에 나타내어 직선식을 얻고 그 직선의 기울기 a 를 구한 후 식 (6)으로부터 k 를 결정하게 된다. 이렇게 직선식의 기울기로부터 k 를 구하기 때문에 이 방법을 Slope법이라고도 한다.

2.2.2 R_b 값 계산

지중 토양의 k 가 결정되면 다음에는 열확산율 $a (=k/\rho c)$ 를 구하여야 하며 여기서 ρc 값은 보어홀 굴착자료를 이용하여 결정한다. 열확산율을 구한 후 식 (5) 또는 식 (1)을 이용하여 보어홀의 전열저항 R_b 값을 구할 수 있다. 식 (5)를 이용하면 R_b 값을 빨리 구할 수 있으나 보통 식 (1)을 이용하는 것이 좀 더 신뢰할 수 있는 결과를 가져온다. 식 (1)을 이용하면

$$R_b = \frac{L}{Q} T_f - \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) - T_o \quad \text{식 (7)}$$

여기서 T_f 는 시간에 따라 변하는 값이므로 R_b 또한 시간에 따라 다소 변화를 보일 수 있다. 따라서 주어진 시간 내에서 구한 평균값으로 R_b 값을 결정하게 된다.

3. 전자식 지중 열교환 유효도 측정 기술

3.1 전자식 지중 열교환 유효도 측정 기술 개요

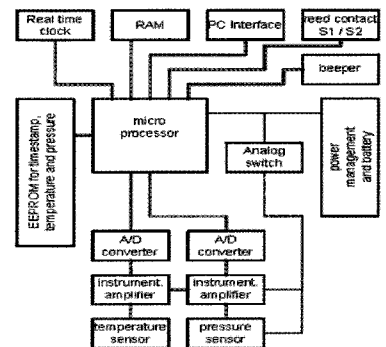
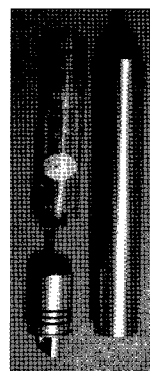
<표 2> 전자식 지중 열교환 유효도 측정 장치 사양

Material	Steel
Diameter (mm)	23
Weight (g)	99.8
Length (mm)	235
Sink velocity (m/s)	0.1
Water resistant (bar)	100
Battery usage time (hour)	3
Store measurement data	16,000
Measurement time(sec)	3.5

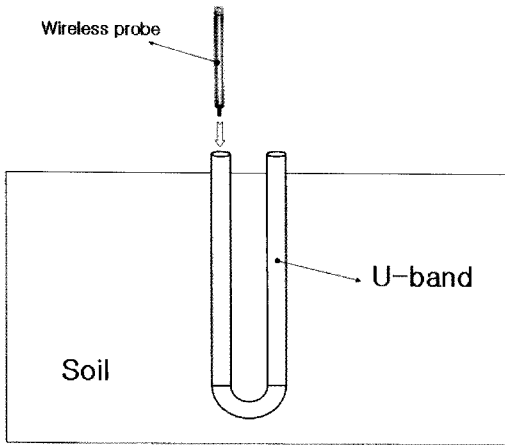
열유체 방식 이외에 또 다른 지중 열교환 유효도 측정 방법으로는 유럽에서 지질 특성을 분석할 때 사용되는 전자식 방식이 있다. 전자식 지중 열교환 유효도 측정 기술은 스위스 G사에서 개발하였으며 측정 장치는 기존의 열유체 방식에 비해 매우 작고 가벼우며, 사용이 간편하다. 이 측정장치는 수압 100bar까지 견딜 수 있는 금속재질로 만들어졌다. 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 핵심 구성요소로는 측정장치 내부에 설치되어진 아날로그/디지털 변환기, 마이크로프로세서와 데이터 저장을 위한 메모리(EEPROM)가 있고, 측정이 완료된 후 컴퓨터 통신에 연결하여 측정된 데이터를 회수하고 보정해주는 커넥터가 있다. 측정된 데이터 수집 및 분석은 마이크로 엑셀 매크로로 구성된 전용 프로그램을 이용하여 측정 데이터(시간, 압력, 온도)를 읽을 수 있다. 또한 이 프로그램을 통해 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 EEPROM에 저장되어 있는 데이터를 자유롭게 삭제/회수가 가능하며 시간의 정확함을 보장하기 위해 컴퓨터 시간과 동일하게 맞출 수도 있다. 그림 3의 오른쪽 그림은 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 회로도도 개략적인 작동원리를 보여주고 있다.

3.2 전자식 지중 열교환 유효도 측정 방법

전자식 지중 열교환 유효도 측정 방법은 그림 3



[그림 3] 전자식 지중 열교환 유효도 측정 장치 및 회로도



[그림 4] 전자식 지중 열교환 유효도 측정 방법

에서 보는바와 같이 무선형 프로브(Wireless probe)를 보여홀내 열교환기에 직접 투하하여 사용할 수 있다. 이렇게 투하된 무선프로브는 3.5초 간격으로 온도와 압력을 측정하여 깊이별 지중 온도를 얻어낸다. 여기서 무선프로브가 보여홀의 바닥면까지 0.1m/s의 속도로 내려간다고 가정하면 깊이 300m의 경우 1시간 이내의 측정시간을 갖는다. 이는 기존의 열유체 방식을 이용한 지중 열교환 유효도 측정 기술에 비해 약 50배 가까운 시간을 절약하는 것이다. 측정이 완료된 무선 프로브는 펌프를 이용하여 지중 열교환기 외부로 회수한다.

나. 3.3 현지 지중 열교환 유효도 산출

전자식 지중 열교환 유효도 측정 장치를 이용함으로써 현지 지중 깊이별로 열교환 유효도를 산출할 수 있다. 특정 깊이($x = x_u$)에서 측정된 온도 T_u 와 i 만큼의 거리에 있는 깊이($x = x_i$)에서 측정되어진 온도 T_i 에서의 지중 온도구배는 식 (8)과 같다.

$$\nabla T_i = \frac{T_u - T_i}{x_u - x_i} \quad \text{식 (8)}$$

결과적으로 지중 온도구배와 국부 지열유량

(local terrestrial heat flow value)에 의해 각 구간별 지중 열교환 유효도를 계산할 수 있다. 국부 지열유량은 현지에서 채취한 깊이별 지반 샘플을 이용하여 구할 수 있으며, 우선 현장에서 채취되는 깊이별 지반샘플의 열전도도 값을 구한 뒤 그 값을 식 (9)에 대입하여 현지 국부 지열유량을 산출한다. 그리고 현지에서 계산된 지열유량을 이용하여 식 (10)에 적용함으로써 현장에서의 국부적인 지중 열교환 유효도를 산출한다.

$$q_{loc} = k_i \times \nabla T_i = k_i \times \frac{T_u - T_i}{x_u - x_i} \quad \text{식 (9)}$$

$$k_i = \frac{q_{loc}}{\nabla T_i} \quad \text{식 (10)}$$

국내에서의 국부 지열류량은 지역별 지열류량 조사 자료로부터 얻을 수 있으며, 국토해양부에서 실시한 국내 247개소에서 측정된 열류 데이터 분석 결과로써 국내 평균 지열유량 값은 $64 \pm 14 \text{ mW/m}^2$ 로 조사되었다.

4. 현지 지중 열교환 유효도 측정

열유체식 측정 장비를 이용하여 한국에너지기술연구원 복합실험동 건물에 대하여 지중 열교환 유효도를 측정하였다. 표 3은 KIER 복합실험동 지중 열교환 유효도 측정 데이터를 보여주고 있다. 현장에는 30mm 직경의 지중열교환기가 2관식 수직밀폐형으로 150m 매설되었고, 작동유체는 물을 이용하였다. 시험 검사는 48시간동안 진행되었으며, 그림 5의 좌측과 같이 측정하는 동안에 입출구 온도값과 평균 온도값, 순환수 평균 유량, 평균 소비동력 등을 구하였고, 시험 데이터를 분석한 결과 그림 5의 우측과 같은 지중열교환기 순환수의 기울기 a 를 구하였다. 식 (6)에 의해 기울기 a 와 지중열교환기 길이 L , 평균 소비동력 Q 를 알 수 있으므로 현지 지중 열교환 유효도를 구

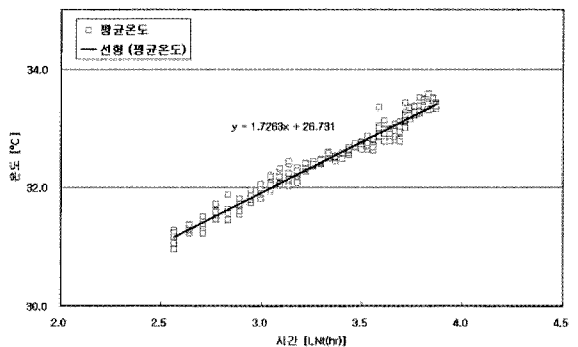
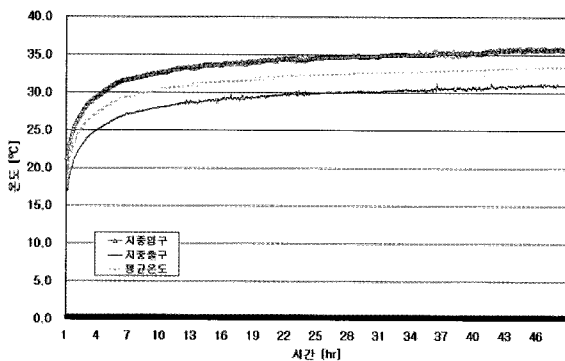
할 수 있으면 그 값은 2.583 [W/m-K]으로 산출되었다. 아울러, 동 현장에서 전자식 측정 장비를 이용하여 그림 6과 같이 깊이별 지중온도 분포도를 구하였고 국내 평균 지열유량 값을 적용하여 지하 60m 이후의 안정적인 범위에서의 지중 열교환 유효도를 산출해보았다.

그림에서 알 수 있듯이 현지 지중 온도 분포는 대기온도와 같은 온도에서 시작하여 지하 10m까

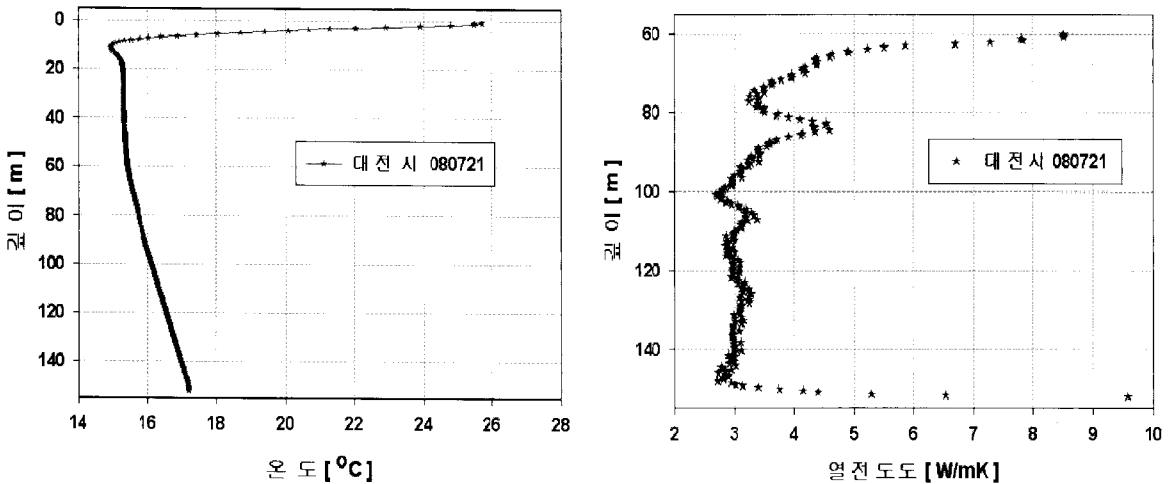
지 급격히 감소하다가 10m이후부터는 조금씩 상승하였고, 60m부터는 거의 일정한 온도변화 폭을 보였다. 따라서 60m이후에 대하여 지중 열교환 유효도를 측정하였으며, 현장에서 채취한 샘플의 열교환 유효도 값 대신에 국내 평균 지열유량 값인 64mW/m²를 식 (10)에 대입함으로써 지중 열교환 유효도를 산출하였다. 그 결과 60m 이후에 대하여 3.36 W/m-K의 열교환 유효도 값을

<표 2> 전자식 지중 열교환 유효도 측정 장치 사양

항목	기본값
측정 시간	48 [hr]
측정 간격	5 [min]
열교환기 타입	2관식 수직밀폐형
열교환기 깊이	150 [m]
열교환기 관경	30 [mm]
사용 유체	물
초기 지중온도	16.2 [°C]
지중입구순환수 평균온도(고온부)	34.9 [°C]
지중출구순환수 평균온도(저온부)	30.2 [°C]
입출구 평균온도차	4.7 [°C]
순환수 평균유량	25.7 [LPM]
평균 전류	35.5 [A]
평균 전압	240.2 [V]
평균 소비전력	8,515.3 [W]
열전달율	8,404.3 [W]
기울기	1.7263
열전도도	2.583 [W/m-K]



[그림 5] 지중 열교환기 순환수 온도(좌) 및 기울기(우)



[그림 6] 전자식 측정 기술에 의한 깊이별 온도 분포(좌) 및 열교환 유효도(우)

구할 수 있었다. 또한, 지열유량 값을 60mW/m^2 으로 가정하면 3.15 W/m-K 의 열교환 유효도 값이 산출되며, 54mW/m^2 으로 가정하면 2.83 W/m-K 의 열교환 유효도 값이 산출된다. 따라서 현지의 지열유량 값을 알 수 있다면 전자식 지중 열교환 유효도 기술도 함께 사용이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 고에서는 지열원 히트펌프 시스템의 설계 및 용량을 결정짓는 중요한 변수로 작용하는 지중 열교환 유효도(지중 열전도도) 측정을 위한 방법으로 현재 국내외에 많이 보급되어 있는 열유체 방식과 최근 유럽에서 사용되고 있는 전자식 방식을 간단히 소개하였다. 열유체 방식의 측정 기술은 이미 국내에는 지반보고서용으로 현지 지중 열전도도 측정을 위한 기술로 활용되고 있으며, 본 기술은 이용함으로써 지중 열교환기가 설치된 현지에서의 전체 지중 열교환 유효도를 측정할 수 있다. 그러나 이 기능 외에 지반의 특성이나 온도분포, 국부적인 지중 열교환 유효도 측정 등이 불가능하며, 장비 가동시 높은 전력이 요구되며,

측정시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 유럽에서 사용되는 전자식 방식은 지중 깊이별 온도분포는 물론 국부적인 지중 열교환 유효도 측정 및 지중 열교환기의 휨 등을 파악할 수 있으며 장비가 작고 가벼워 사용이 간편하다. 또한 무선프로브가 보어홀의 바닥면까지 약 0.1m/s 의 속도로 내려가기 때문에 깊이가 300m 인 보어홀의 경우 1시간 이내로 측정시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있다. 다만, 지중 열교환 유효도 측정에 필요한 지열유량 값을 구하기 위하여 천공시 지반 샘플 채취 및 샘플의 열전도도 측정이 수반되어야 하는 문제를 해결해야 한다.

향후 지열시스템을 적용하기 위해서는 지중 열전도도는 물론 지중 열교환기 매설 상태, 지중 온도분포 등 다양한 지질 특성들이 함께 조사되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 열유체 방식의 지중 열교환 유효도 측정 기술은 물론 본 고에서 소개한 전자식 지중 열교환 유효도 측정 기술도 함께 활용될 수 있는 기반이 마련되기를 바란다.

참고문헌

1. Lund, J.W. and Freeston, D.H. , 2001,

- “World-wide direct uses of geothermal energy”, Geothermics, Vol 30
2. <http://www.geowatt.ch>
 3. Rohner, E., Rybach, R., and Scharli, U., 2005, “A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design”, World Geothermal Congress. Calculation Programs. ASHRAE Transactions. 108(1)
 4. Hyoung Chan Kim, Saro Lee and Moo Young Song, 2004, “ Geological Characteristics and Heat Flow Relationship in South Korea”, Economic and environmental geology
 5. 우정선, 2005, “현지용 지중열전도도 예측기술 개발”, 산업자원부
 6. Krarti, M., Lopez-Alonzo, C., Claridge, D.E., and Kreider, J. F., 1995, “Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation,” Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117
 7. Hyoung Chan Kim, Yoonho Song, 2005, “Characteristics of Geothermal Anomaly in South Korea”, Proceedings World Geothermal Congress 