

실리카샌드 첨가에 의한 벤토나이트 그라우트의 열전도도 증가

손 병 후[†]

한국건설기술연구원 화재·설비 연구부

Thermal Conductivity Enhancement of Bentonite Grout Using Silica Sands

Byong Hu Sohn[†]

ABSTRACT: This paper concerns the measurement of thermal conductivity of grouting materials for ground loop heat exchanger. A thermal conductivity meter, QTM-500 based on modified transient hot wire method was used to measure the thermal conductivity of neat bentonite and mixtures of bentonite and various additives. Relative to the total mixture mass, as the percent additive was increased the mixture thermal conductivity increased. For the bentonite-silica sand mixtures, the higher density of the sand particles resulted in much higher mixture thermal conductivity.

Key words: Thermal conductivity(열전도도), Bentonite(벤토나이트), Silica sand(실리카샌드), Ground heat exchanger(지중 열교환기), Transient hot wire method(비정상 열선법)

기 호 설 명

- E_i : 지수적분함수
- h : 열선의 폭 [m]
- k : 열전도도 [$W/m^{\circ}C$]
- q : 열선의 단위 길이당 발열량 [W/m]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]
- ΔT : 온도차 또는 열선의 온도 상승 [$^{\circ}C$]
- t : 시간 [s]
- x : 거리 [m]

- λ : 식(1)에서 정의된 값
- σ : 식(1)에서 정의된 값

하첨자

- 1 : 매질 1
- 2 : 매질 2
- b : 벤토나이트
- m : 벤토나이트-실리카샌드 혼합물

그리스 문자

- α : 열확산계수 [m^2/s]

1. 서 론

근래 들어 설치 사례가 증가하고 있는 지열 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)에서 수직형 지중 루프 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)과 U자 형상의 파이프 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우팅 재료(grouting material) 등으로 구성된

[†]Corresponding author

Tel.: +82-31-369-0511; fax: +82-31-369-0540

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

다. 보어홀 그라우팅 재료는 지중 열교환기 파이프 내의 순환수와 보어홀 주변 토양층(또는 암반층)간의 열전달을 촉진하고, 보어홀 주변의 지하수나 지표면 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 차단하기 때문에 그 역할이 매우 크다.

다양한 종류의 그라우팅 재료 중, 국내-외에서 주로 사용되는 재료는 벤토나이트이다. 벤토나이트는 기본적으로 점토광물이며, 지중 환경보호 측면에서 타 재료보다 우수한 것으로 알려져 있다. 하지만, 순수 벤토나이트(벤토나이트+물)는 보어홀 주변의 토양 또는 암반과 비교했을 때 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는 것이 단점이다.⁽¹⁾ 따라서, 이러한 단점을 극복하기 위해 순수 벤토나이트에 각종 첨가제를 혼합하여 사용한다.

최근 일련의 연구는 순수 벤토나이트 또는 순수 시멘트(시멘트+물)의 조성비를 변화시키거나 열전달 촉진용 고체 첨가제를 혼합할 경우, 이들 재료가 처음 갖고 있던 열물성이 향상된다고 제시하였다.⁽²⁾ Remund and Lund⁽³⁾는 벤토나이트를 그라우팅 재료로 사용할 경우 파이프 표면과의 접착력이나 재료가 함유하고 있던 수분의 유출에 따른 열전도도 감소 등을 주의 깊게 고려해야 한다고 언급하였다. Remund et al.⁽⁴⁾은 순수 벤토나이트에 첨가제를 혼합하여 실험을 수행한 후, 모래나 인조규사(quartzite sand) 등과 같은 첨가제를 혼합할 경우 열전도도가 향상된다고 밝혔다.

반면, 국내에서는 그라우팅 재료의 열물성 측정이나 국산 벤토나이트의 적용 가능성에 대한 연구가 거의 없었기 때문에 이에 대한 체계적인 데이터 확보는 시급한 문제이다.

본 연구에서는 현재 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되고 있는 일부 벤토나이트를 대상으로 열전도도를 측정하였다. 아울러 순수 벤토나이트에 실리카샌드를 첨가하였을 때 조성비 변화에 따른 열전도도 변화를 측정하였으며, 또한 실리카샌드의 입자 크기가 열전도도 증가에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 측정 이론: 비정상 열선법

본 연구에서는 열전도도 측정에 주로 적용되는 비정상 열선법(transient hot wire method)을 이용하여 그라우팅 재료의 열전도도를 측정하였다. Fig. 1은 비정상 열선법을 개략적으로 도식화한

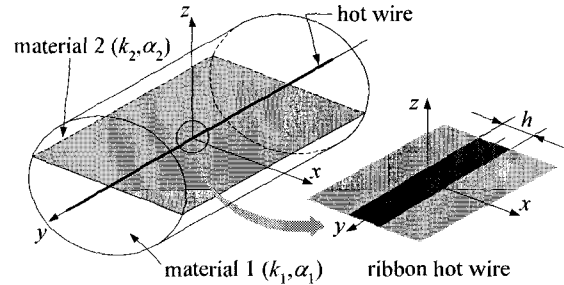


Fig. 1 Transient hot wire method.

것이다. 비정상 열선법에서 매질 내의 열선에 일정 열량이 공급될 때, 시간 경과에 따른 열선의 온도 상승 관계($\ln t - \Delta T$)가 직선으로 주어지며, 이 직선의 기울기의 역수가 측정하려는 매질(시료)의 열전도도이다.

Fig. 1에서와 같이 열전도도가 서로 다른 매질 사이에 열선이 삽입되어 있는 경우, Takegoshi et al.⁽⁵⁾은 통상의 비정상 열선법에 적용되는 열전도 방정식을 다음과 같이 수정하였다.

$$\Delta T = -\frac{Q\lambda\sigma}{4\pi k_1} \times \int_0^1 \frac{E_1 \{-\lambda^2 x^2 / 4a_1 t (\lambda^2 u + 1 - u)\}}{(\lambda^2 u + 1 - u)^{1/2} (1 - u + \sigma^2 u)^{3/2}} du \quad (1)$$

식(1)에서 λ 와 σ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = a_1^{1/2} / a_2^{1/2}, \quad \sigma = (k_2 a_1^{1/2}) / (k_1 a_2^{1/2}) \quad (2)$$

또한 Fig. 1의 우측 그림에서와 같이, 유한 반경을 갖는 열선 대신 유한한 두께의 열선이 폭이 h 인 리본(ribbon) 형상이고, 이때 x 가 매우 작을 경우 Takegoshi et al.⁽⁵⁾은 식(1)의 해석해(analytical solution)를 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{d\Delta T}{d \ln t} = \frac{q}{2\pi(k_1 + k_2)} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{h^2}{12x^2} \right) \times \frac{k_1 a_2 / a_1 + k_2}{k_1 + k_2} \frac{x^2}{4a_2 t} \right\} \quad (3)$$

식(3)의 우변에서 $(k_1 a_2 / a_1 + k_2) / (k_1 + k_2)$ 의 값이 1이고 h 와 $x^2 / 4a_2 t$ 의 값이 매우 작다면, 식(3)을

다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k_1 = -\frac{q}{2\pi} \frac{d \ln t}{d \Delta T} - k_2 \quad (4)$$

따라서 매질 2의 열전도도를 이미 알고 있을 때, 측정 시료인 매질 1의 열전도도는 식(3) 또는 식(4)로부터 산정된다.

3. 측정 장비 및 방법

3.1 측정 장비

지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료의 열전도도를 측정하기 위해 본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 측정 시스템을 이용하였다. 측정 시스템은 열전도도 측정기(QTM-500, Kyoto Electronics), 열선(wire heater)과 열전대가 부착된 프로브(PD-13, Kyoto Electronics), 시료(samples) 그리고 데이터 획득 장치 등으로 구성되어 있다.

열전도도 측정기는 0.023 ~ 12 W/m°C의 측정범위 및 ±5%의 정밀도와 ±3%의 재현성을 갖는다. 프로브 크기는 가로 95 mm, 세로 40 mm이며, 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브 표면의 재질은 유리섬유(glass fiber)이다. 이 표면에 폭이 1 mm인 콘스탄탄 열선이 부착되어 있고, 열선의 중앙에 K-type 열전대가 용접되어 있다.

측정의 정확성을 검증하기 위해, 본 실험에 앞서 Table 1의 표준 매질을 대상으로 상온에서 열

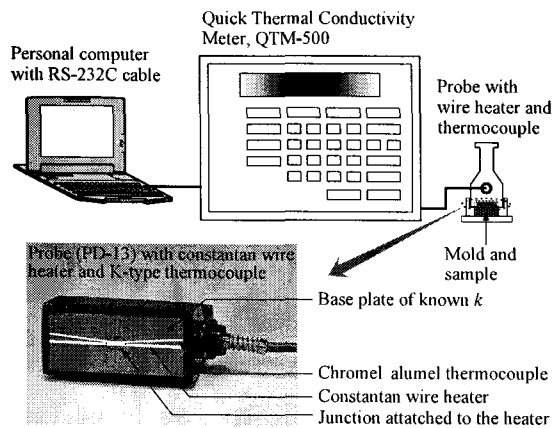


Fig. 2 Experimental apparatus for measuring thermal conductivity of grouting materials.

Table 1 Comparison between literature values and measured ones for thermal conductivity of reference materials.

Reference materials	k(W/m°C)		Error (%)
	Literature value ⁽⁶⁾	Measured value	
Quartz glass	1.412	1.428	1.13
Silicon rubber	0.238	0.234	-1.68
Polyethylene foam	0.036	0.037	2.78

전도도를 측정한 후, 문헌⁽⁶⁾에 제시된 값과 비교하였다. 각 표준 매질의 열전도도는 7회 측정된 결과를 평균한 값이며, ±3% 내에서 문헌⁽⁶⁾ 값과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 시료 및 측정 방법

본 연구에서는 벤토나이트로 세 종류의 국내 제품(Bentonite A, B, C)과 두 종류의 외국 제품(Bentonite D, E)을 선정하였다. 건조 상태에서 벤토나이트 A, B, C, E는 분말(powder)이며 D는 과립모양(granular)이다.

순수 벤토나이트 또는 벤토나이트-실리카샌드 혼합물 시료의 제조를 위해 먼저 벤토나이트, 실리카샌드, 물의 질량을 실험조건에 맞추어 저울로 측정 후, 혼합기(mixer)를 이용하여 혼합하였다. 이때 혼합기 패들(paddle)의 회전속도를 3000 rpm으로 유지하면서 3분 동안 혼합하였다.

일반적으로 벤토나이트는 물을 흡수하면서 부피가 팽창한다. 따라서 동일 조건에서의 측정을 위해 혼합 후 6시간이 경과한 다음, 제조된 시료를 틀(mold; 가로 110 mm×세로 50 mm×높이 20 mm)에 부어 일정 크기로 성형하였다.

실험 초기의 시료 온도(열선 온도), 열선에 공급되는 전류 및 전압, 열선의 온도 상승 등을 1초 간격으로 60초 동안 측정하여 데이터 획득 시스템에 저장하였으며, 준비된 각 시료를 대상으로 7회 측정하였다. 측정 시스템 주변의 온도 변화에 의한 측정결과의 오차를 최소화하기 위해 실내 온도를 20 ~ 22°C로 일정하게 유지하였으며, 전용 프로그램(SOFT-QTM5EW)을 이용하여 열전도도를 산정하였다. 본 결과에 영향을 미치는

측정 데이터 및 변수의 편차들을 조합하여 Kline⁽⁷⁾이 제안한 방법에 따라 열전도도의 불확실도를 계산한 결과, $\pm 3.03\%$ 이었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 순수 벤토나이트 그라우트

본 연구에 사용된 순수 벤토나이트 그라우트(neat bentonite grout)라 함은 벤토나이트 분말(또는 과립)과 물이 혼합된 시료를 의미한다. 본 연구에서는 혼합 전의 전체 질량 중, 벤토나이트 분말 또는 과립의 질량 비율이 각각 20%(이하 20% 벤토나이트)와 30%(이하 30% 벤토나이트)인 순수 시료를 기본으로 하였다.

Fig. 3의 (a)는 측정 시간 경과에 따른 열선의 온도 상승을 나타낸 결과이며, Fig. 3의 (b)는 열선의 온도 상승을 측정 시간(초)의 로그값의 함수로 표현한 것이다. 그림에서 20초 이후의 데이

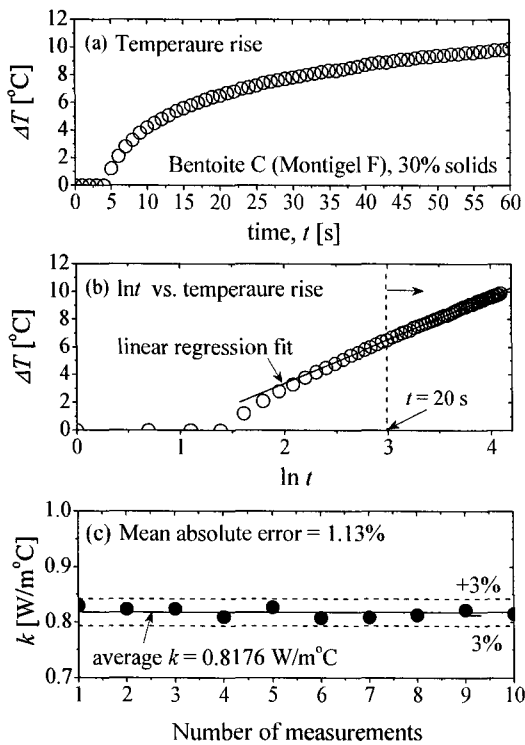


Fig. 3 Typical measurement results: (a) temperature rise; (b) temperature rise as a function of natural logarithm of time; (c) reproducibility of measurements.

터에 대한 직선 기울기의 역수가 측정하려는 시료의 열전도도가 된다. Fig. 3의 (c)는 측정의 재현성을 도시한 것이며, 총 10회 측정으로부터 해당 시료의 평균 열전도도는 0.8176 W/m°C이었다. 또한 각각의 측정 결과는 평균 1.13% 오차 내에서 평균 열전도도와 일치하였기 때문에, 재현성이 매우 우수한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 20%와 30% 벤토나이트 시료를 대상으로 열전도도를 측정한 결과이다. 20% 벤토나이트는 $0.7746 \sim 0.8374$ W/m°C의 열전도도를 그리고 30% 벤토나이트인 경우 $0.7962 \sim 0.8673$ W/m°C의 열전도도를 갖는 것으로 측정되었다. 또한 벤토나이트의 질량 비율을 20%에서 30%로 증가시켰을 때, 작게는 2.5%에서 크게는 7.5%까지 열전도도가 증가하였다.

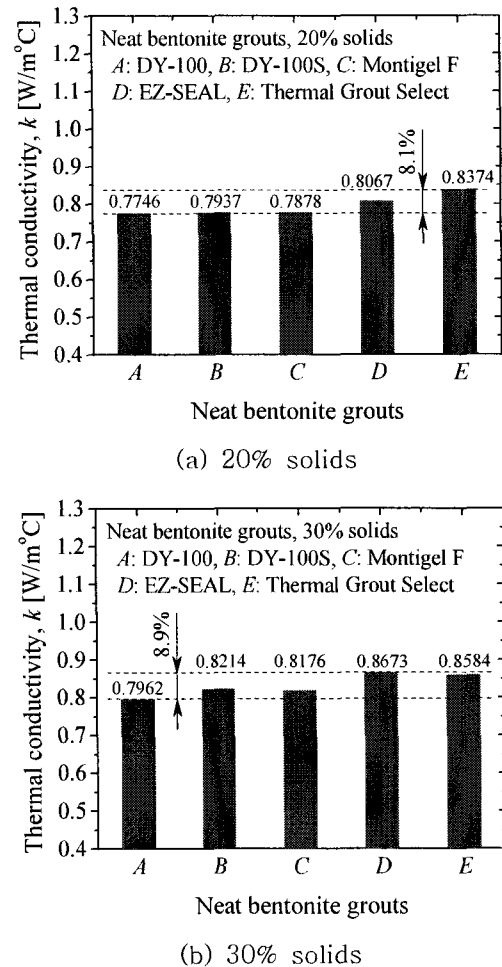


Fig. 4 Thermal conductivity measurements of neat bentonite grouts.

Fig. 4에서 20% 순수 벤토나이트 시료 중, A(DY-100)와 E(Thermal Grout Select)가 가장 작은 값과 큰 값을 보였으며, 두 값의 차이는 8.1%이었다. 또한 30% 시료에서는 A(DY-100)와 D(EZ-SEAL)가 가장 작은 값과 큰 값이었으며, 두 열전도도 값의 차이는 8.9%로 계산되었다. 각 시료별로 열전도도 값이 다소 차이를 보이는 것은 벤토나이트의 성분 중 대부분을 차지하는 이산화규소의 함량 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 이 성분이 상대적으로 적은 벤토나이트 A(DY-100)의 열전도도가 가장 작았으며, 이산화규소가 65% 이상인 벤토나이트 D(EZ-SEAL)와 E(Thermal Grout Select)의 열전도도는 상대적으로 큰 값을 보였다.

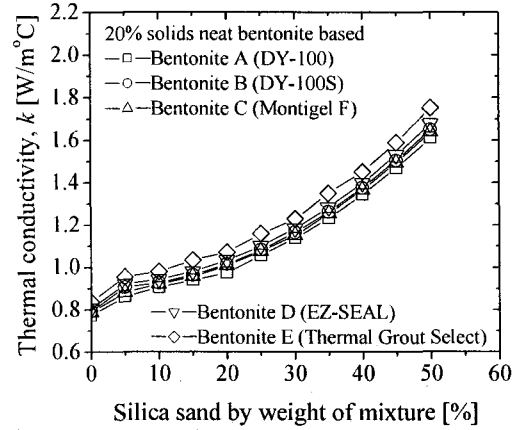
4.2 벤토나이트-실리카샌드 그라우트

Fig. 5는 벤토나이트-실리카샌드 혼합물 시료의 열전도도를 실리카샌드의 질량 비율의 함수로 나타낸 것이다. 측정에 사용된 시료는 20%와 30% 순수 벤토나이트에 0.11 mm 크기의 실리카샌드를 질량 비율로 50%까지 혼합한 것이다.

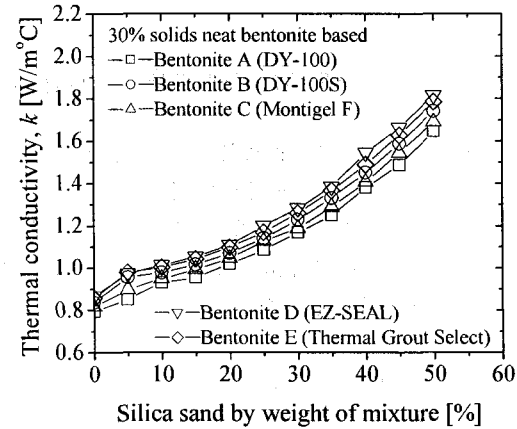
모든 시료에서 실리카샌드의 양이 증가할수록 열전도도는 증가하였으며, 최대 108%까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 아울러 실리카샌드의 첨가량이 25%인 지점을 전후하여, 혼합물 시료의 열전도도 증가율이 다르게 나타나는 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

제조사별 순수 벤토나이트에 동일 질량의 실리카샌드를 첨가하였을 때, 각 혼합물 시료의 열전도도에 다소 차이가 있었다. 예를 들어, 30% 순수 벤토나이트-30% 실리카샌드 혼합물 시료 중, A(DY-100)와 D(EZ-SEAL)의 열전도도는 9.8%의 차이를 보였으며, 이는 앞서 Fig. 4에서의 차이(8.9%)와 유사하다. 따라서 각 벤토나이트-실리카샌드 혼합물의 열전도도 차이는 기본 재료인 순수 벤토나이트의 열전도도와 관련이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6의 (a)는 30% 벤토나이트 C(Montigel F)에 입자 크기가 다른 실리카샌드를 첨가하였을 때, 입자 크기가 열전도도 증가에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 모든 시료에서 열전도도 증가에 대한 정성적인 경향은 유사하였기 때문에 이 결과를 대표로 도시하였으며, Fig. 6의 (b)는 모든 시료에 대한 결과를 평균한 것이다.



(a) 20% solids bentonite based



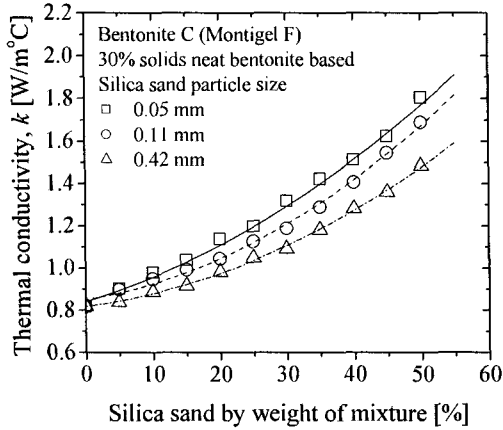
(b) 30% solids bentonite based

Fig. 5 Thermal conductivity measurements of bentonite-silica sand grouts.

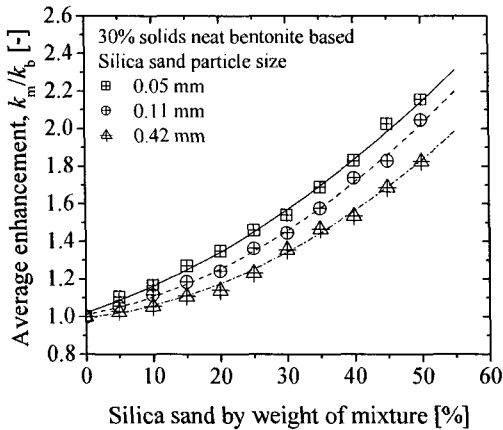
실리카샌드의 입자 크기가 작을수록 혼합물의 열전도도 증가율은 크게 나타났다. 이는 동일 질량으로 실리카샌드를 혼합하더라도 입자 크기가 작을수록 순수 벤토나이트에 고르게 분포하기 때문이다. 아울러, 입자 크기에 상관없이 실리카샌드의 첨가량이 증가할수록 혼합물의 열전도도가 증가하는 정성적인 경향은 Fig. 5에서의 결과와 동일하였다.

5. 결론

본 연구에서는 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되고 있는 일부 벤토나이트를 대상으로 열전도도를 측정하였다. 또한 벤토나이트-실리카샌드 혼합물의 열전도도를 측정하였으며, 실



(a) 30% Bentonite C-silica sand mixture



(b) Thermal conductivity enhancement

Fig. 6 Effect of silica sand particle sizes on the enhancement of thermal conductivity.

리카샌드 입자크기가 열전도도 증가에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에 사용된 20% 순수 벤토나이트는 0.7746 ~ 0.8374 W/m°C의 열전도도를 그리고 30% 순수 벤토나이트인 경우 0.7962 ~ 0.8673 W/m°C의 열전도도를 갖는 것으로 측정되었다. 벤토나이트의 질량 비율을 20%에서 30%로 증가시켰을 때, 열전도도는 2.5 ~ 7.5%까지 증가하였다.

(2) 첨가제인 실리카샌드의 질량 비율이 증가할수록 순수 벤토나이트의 열전도도는 평균 108%까지 증가하였다. 시료별 열전도도 값의 차이는 기본 재료인 순수 벤토나이트의 열전도도와 밀접한 관련이 있었다.

(3) 실리카샌드의 입자 크기가 작을수록 혼합물의 열전도도 증가율은 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 2004년 대체에너지 기술개발사업(2004-N-GE08-P-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Salomone, L. A. and Marlowe, J. I., 1989, Soil and rock classification for the design of ground-coupled heat pump systems: field manual, Special Report(EPRI CU-6600), Electric Power Research Institute.
2. Zhang, Q. and Murphy, W. E., 2000, Measurement of thermal conductivity for three bore-hole fill materials used for GSHP, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 434-441.
3. Remund, C. P. and Lund, J. T., 1993, Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical GSHP systems, ASME, Vol. 29, Heat Pump and Refrigeration Systems- Design, Analysis, and Applications, pp. 95-106.
4. Remund, C. P., Schafer, V. R. and Stetson, L. E., 1993, Bentonite-based backfill mixtures for GSHPs, Final Report 91-18, National Rural Electric Cooperative Association.
5. Takegoshi, E., Imura, S., Hirasawa, Y. and Takenaka, T., 1982, A method of measuring the thermal conductivity of solid materials by transient hot wire method of comparison, Bulletin of JSME, Vol. 25, pp. 395-402.
6. Rohsenow, W. M., 1973, Handbook of heat transfer, McGraw-Hill, New York.
7. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, J. Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 153-160.