산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제31권 B호, 2011.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 31 B, 2011.

지중 열교환기용 시멘트 그라우트에 관한 연구

A study on cement-based grout for ground heat exchangers

이 동 주* 백 환 조** 김 경 만***
Lee, Dong-Ju Baek, Hwan-Jo Kim, Gyoung-Man

Abstract

In this paper, the applicability of cement grout has been studied as an alternative to bentonite grout for backfill ground heat exchangers. To provide an optimal mixture design, the thermal conductivity of cement grout and bentonite grout with various mixture ratios were experimentally evaluated and compared. Numerical analyses using Fluent(FVM program) were applied to compare the thermal transfer efficiency of the cement grout with that of the bentonite grout used in the construction. Also the effective ground thermal conductivity was measured by In-situ thermal response test. The results showed that the thermal efficiency of the cement grout was better than the bentonite grout. Consequently, the cement grout could be an alternative with more thermal efficiency to bentonite grout for ground heat exchangers.

키워드 : *지중 열교환기, 열전도도, 현장 열응답 시험*
Keywords : *Ground Heat Exchanger, Thermal Conductivity, In-situ Thermal response test*

1. 서론

우리나라는 세계 10대 에너지 소비국 임에도 불구하고 에너지 부존자원이 매우 부족하여 화석연료의 97%를 수입에 의존하고 있어 고유가 시대를 대비하기 위한 신재생 에너지 개발의 필요성이 증대되고 있다. 여기서 신재생 에너지는 '대체에너지 개발 및 이용보급 촉진법' 제2조에 석유·석탄·원자력·천연가스가 아닌 에너지로 정의되고 있다. 구체적으로 연료전지(fuel cell)·가스화 복합발전(IGCC; integrated gasification combined cycle)·수소에너지(hydrogen energy) 등이 신에너지 범주에, 태양열(solar thermal)·태양광(photovoltaic)·풍력(wind power)·바이오(bio energy)·폐기물(waste energy)·소수력(small hydropower)·해양(ocean)·지열(geothermal) 등이 재생에너지에 포함된다[1].

신재생에너지 중 지열을 이용한 냉난방 시스템은 반영구적이며 친환경적인 에너지 활용 방법이다. 지열 열펌프 시스템은 그림 1과 같이 냉방 시에는 건물 내의 열을 지중으로 방출하고, 그림 2와 같이 난방 시에는 지중의 열을 실내로 공급함으로써 냉난방을 구현한다. 냉방 및 난방 사이클에서 각각 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)의 역할을 하는 지열은 공기보다 안정적이다. 따라서 기존 냉난방 설비, 특히 공기열원 열펌프 시스템(air source heat pump system)과 비교했을 때 효율이 높고 성능이 우수한 시스템으로 알려져 있다.

수직형 지중 루프 열교환기(vertical ground loop heat exchanger)를 이용하는 지열 열펌프 시

* 강원대학교 대학원 에너지자원공학과 석사과정
** 강원대학교 에너지자원공학과 교수(교신저자)
*** 강원대학교 대학원 에너지자원공학과 박사과정

스템의 핵심은 열펌프 유닛(heat pump unit)과 지중 루프 열교환기(이하 지중 열교환기)이다. 지중 열교환기용 순환 파이프를 보어홀에 매설한 후, 보어홀과 지반의 열교환을 위한 순환 파이프 사이에 그라우트로 뒤채움하게 되는데 그라우트는 지중 열교환기와 지반 혹은 암반 사이의 공간을 메워 지중과의 열전달을 촉진하고 보어홀 내 지표수의 침투 및 지하수 오염을 방지하는 역할을 하게 된다. 그라우트가 갖추어야 할 조건은 높은 열전도도와 낮은 투수성, 시공성 확보이다. 일반적인 그라우트 재료로 벤토나이트와 시멘트를 주로 사용하는데 현재 국내에서는 대부분 벤토나이트 그라우트재를 사용하고 있다. 하지만, 순수 벤토나이트 그라우트 열전도도는 지반의 열전도도보다 상당히 낮으므로 적절한 열교환 효율을 기대할 수 없다. 또한 지중 열교환기 뒤채움용 벤토나이트는 대부분 수입에 의존하고 있어 재료비에 대한 부담이 높은 편이다. 시멘트 그라우트의 경우, 벤토나이트보다 열전도도가 높고, 높은 부착력과 낮은 투수계수를 갖는다[2].

본 연구에서는 시멘트 그라우트의 적용성을 검토하기 위해 임의의 배합비에 대한 실내시험을 통해 열전도도, 일축압축강도를 평가하였다. 또한 수치해석프로그램(FLUENT)을 사용하여 2차원 열전달 거동을 파악하였다. 마지막으로 현장에 직접 벤토나이트 그라우트와 시멘트 그라우트를 타설하여 현장 열응답 시험을 통해 유효 열전도도를 측정, 비교하였다.

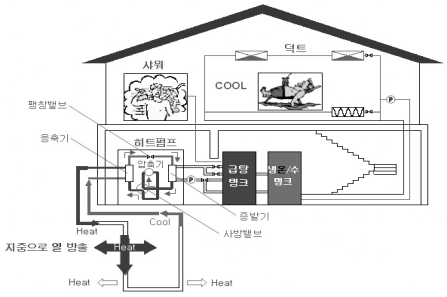


그림 1. 지열시스템의 냉방 원리

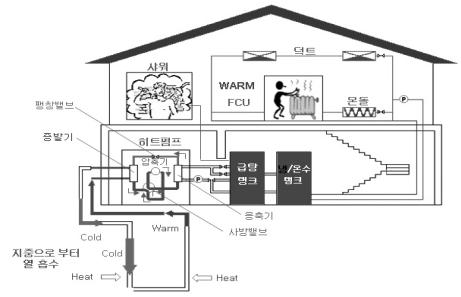


그림 2. 지열시스템의 난방 원리

2. 그라우트 특성 시험

본 실험에서는 순수 벤토나이트(벤토나이트+물)와 벤토나이트-첨가제, 순수 시멘트 뒤채움재(시멘트+물)에 모래와 같은 첨가제를 혼합한 시료를 제작하였다. 뒤채움재의 열전도도를 증가시키기 위해 주로 적용되는 방법은 순수 그라우트 재료에 열전도도가 큰 첨가제를 일정량 첨가함으로써 전체 질량비 중 고형 성분이 차지하는 비율을 증가시키는 것이다[3]. 실내 시험을 통해 벤토나이트 그라우트와 시멘트 그라우트의 열전도도를 비교하였다.

2.1 시험 시료

(1) 벤토나이트 그라우트

이번 실험에 사용된 벤토나이트는 CETCO KOREA사의 Volclay Grout로써, 폴리머가 가미되지 않은 단일성분으로 제조된 가루 형태의 벤토나이트 제품이다. 시료는 순수 벤토나이트와 벤토나이트-첨가제 시료를 제작하였다. 지중 열교환기 그라우팅은 현장에서 대략 20%~30%의 벤토나이트 분말을 물과 혼합하여 사용하고 있다. 따라서 본 실험에서는 순수 벤토나이트 20%와 30%를 기준으로 시료를 제작하여 열전도도를 측정하였다. 또한 첨가제를 첨가한 시료는 5가지(전체 질량비의 10%, 20%, 30%, 40%, 50%)로 첨가제를 배합하여 제작하였다. 첨가제로 사용된 천연규사와 인조규사는 약 0.25mm 크기를 사용하였다.

(2) 시멘트 그라우트

이번 실험에 사용된 시멘트는 포틀랜드 시멘트(Portland cement)로 주성분은 석회(CaO), 알루미나(Al_2O_3), 규사(SiO_2) 및 산화철(Fe_2O_3)등이다.

본 연구에서는 시멘트 그라우트의 배합비에 따른 특성을 알아보고자 물/시멘트 비, 천연규사 함유량을 변화시키면서 배합하여 각 배합비에 따른 영향을 검토하였다.

Allan과 Philippacopoulos(1999)에 의하면 시멘트 그라우트에 벤토나이트를 첨가하는 목적은 블리딩 현상 감소, 그라우트의 체적 향상, 모래의 침전형상 방지 등이다[2]. 열전도도에 미치는 영향은, 열전도도 측정 결과 벤토나이트의 함량으로는 시멘트 그라우트의 열전도도에 크게 영향을 미치지 않았다. 하지만 시멘트 질량의 단지 1% 정도 첨가하여도 시멘트 그라우트의 유동성이 현저히 감소하였다. 그러므로 시멘트 그라우트에 벤토나이트를 첨가할 경우 유동성이 떨어지므로 반드시 유동화재에 대한 고려가 있어야 한다. 표 1은 이번 실험의 시멘트 그라우트 배합비를 나타낸 것이다.

표 1. 시멘트 그라우트 배합비

W / C	S / C	시멘트(g)	모래(g)	물(ml)	벤토나이트 (g)	유동화재 (ml)
0.6	1	850	850	510	8.5	12.75
	2	567	1134	340.2	5.67	8.51
	3	425	1275	255	4.25	6.38
0.7	1	850	850	595	8.5	12.75
	2	567	1134	396.9	5.67	8.51
	3	425	1275	297.5	4.25	6.38
1.0	1	850	850	850	8.5	12.75
	2	567	1134	567	5.67	8.51
	3	425	1275	425	4.25	6.38

2.2 시험 방법

(1) 열전도도 측정

본 연구에서는 실내 시험에서 지중 열교환기 뒤채움재의 열전도도를 측정하기 위하여, 그림 3의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 그림 4와 같이 콘스탄탄 열선(Constantan wire)과 열전대(K-type)로 구성 된 프로브(PD-11, Kyoto Electronics)를 사용하였고, 크기는 가로×세로가 95mm×40mm 이다. 시료와 직접 접촉하는 프로브의 표면에는 폭이 1mm인 콘스탄탄 열선이 부착되어 있으며 열선의 중앙에 K-type 열전대가 그림 4와 같이 용접되어 있다. 본 연구에서 사용한 열전도도 측정기(QTM-500)는 0.023~12 W/mK의 측정 범위 및 ±5%의 정밀도와 ±3%의 재현성을 갖는다.

이 측정기는 시료에 인가되는 전류(I)와 열선의 온도(T)를 측정한 후, 필요한 센서 프로브의 보정 값을 이용하여 열전도도를 결정한다. 이때 내부에 장착된 정항 값(R)을 이용하여 열선의 단위 길이 당 발열량(Q)을 구한다. QTM-500을 이용해 열전도도를 측정할 때 다음 식(1)과 같다.

식(1)에서 K와 H는 센서 프로브의 보정 값으로 열전도도 측정기 내부에 입력된 값이다. 또한 R과 I는 각각 열선의 단위 길이 당 전기저항과 열선에 흐르는 전류이다. t_1과 t_2는 열선에 전류가 흐른 후 부터의 시간(초)이며, T_1과 T_2는 이때의 열선의 온도가 된다.

$$k_1 = K\frac{RI^2 \ln(t_2/t_1)}{T_2 - T_1} - H \qquad (1)$$

그림 3. QTM-500

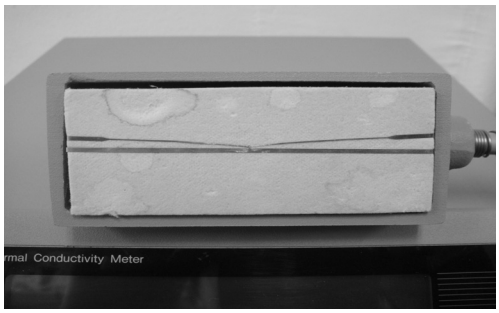


그림 4. 측정 프로브 (PD-11)

(2) 일축압축강도 시험

일반적으로 하중전달 능력이 거의 없는 벤토나이트 그라우트에 비해 하중전달 능력이 높은 시멘트 그라우트를 사용하여 뒤채움을 하면 설치 면적 부족으로 인해 건물 하부에 지중 열교환기를 설치할 경우 건물의 안정성을 확보할 수 있다.

시멘트의 일축압축강도 시험을 위해 표 1의 배합비에 따라 표준 공시체를 만들어 수중 양생한 후 7일 강도를 측정하였다.

(3) 수치해석을 통한 열전달 거동 파악

본 연구에서는 지중 열교환기 단면의 열전달 거동을 알아보기 위해 ANSYS사의 유한체적해석 프로그램(Finite Volume Method)인 FLUENT를 이용하여 2차원적 해석을 수행하였다. FLUENT는 비압축성(Low subsonic)에서 압축성(Supersonic) 및 천음속(Transonic)유동 등 유동의 전 영역을 해석할 수 있는 Solver이다.

지중 열교환기 보어홀의 뒤채움재에 따른 열전달 양상을 파악하기 위해 본 실험을 실시하였다. 실험 해석에는 지중 열교환기를 2차원으로 단순도식화하여 직경 3cm인 HDPE 파이프와 직경 15cm인 보어홀, 그리고 가로×세로(100cm×100cm)인 지반으로 구성하였다. 또한, 지반의 깊이 5m이하 지중온도가 대기온도의 영향을 받지 않아 연중 약 12~15℃를 유지하므로 지반의 초기 온도를 15℃로 입력하였고, 난방과정일 때 유입 파이프 온도 4℃와 유출 파이프 온도 8℃, 냉방과정일 때 유입 파이프 온도 25℃와 유출 파이프 온도 20℃로

가정하였다. 파이프간의 이격거리는 1.5cm, 파이프 두께는 0.5cm로 적용하였다.

(4) 현장 열응답 시험

현장 열응답 시험은 무한 선형 열원 이론으로 설명 된다. 공간상의 임의의 점(x,y)를 지나고 z축에 평행한 선형 열원에 열량(Φ)이 공급될 때 Carslaw와 Jaeger(1959)는 임의의 점(x,y)에서 시간에 따른 매질의 온도차를 다음 식(2)과 같이 제시하였다[4].

$$T(r,t') - T_0(r,0) = \frac{1}{4\pi a}\int_0^t \Phi(t') e^{-r^2/4a(t-t')} \frac{dt'}{t-t'} \quad (2)$$

여기서 T는 임의의 점(r)에서 온도, a는 열확산계수, r은 $\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}$ 으로 표현되며, xy 평면상에서 열원으로 부터의 거리, t'는 적분변수, t는 시간이다. 만약 식(2)에서 초기시간(t)은 0, 초기온도(T_0)는 0K이고 시간에 따른 열량이 열원의 단위 길이에 대해 $\Phi(t)=q$(상수)로 일정하다고 가정하면 식(2)은 다음 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi a}\int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3)$$

식(3)에서 충분히 긴 시간에 대해서 다음 식(4)과 같이 어떤 시간과 열원에서의 거리에 대한 무한 선형 열원 해를 지수 적분 형태로 표현할 수 있다.

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi a}\int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi a} E_i\left(\frac{r^2}{4ay}\right) \quad (4)$$

여기서 E_i는 지수 적분으로 다음과 같이 정의된다.

$$E_i(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\Upsilon - \ln x + x - \frac{x^2}{4} + \cdots \quad (5)$$

($\gamma = 0.5772$: Euler's Constant)

따라서, 보어홀 벽면의 임의 시간에서 초기 온도와 차이는 다음 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_b - T_0 = \frac{Q/L}{4\pi\lambda}\left(\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma + \frac{r_b^2}{4at} - \frac{r_b^2}{16at}\right) \quad (6)$$

여기서 T_b는 시간 t에서 보어홀 벽면의 온도, T_0는 보어홀 벽면의 초기온도, r_b는 보어홀의 반지름, Q는 주입된 열량, L은 보어홀의 길이이며, Q/L은 단위 길이당 열량(q)이다. 이때, 보어홀은 선형 열원 모델로 간주하기 때문에 출구 온도(T_f)는 다음 식(7)과 같이 입출구 순환수의 평균 온도를 사용하며 보어홀 내부의 열저항(R_b)은 평균 온도와 단위 길이 당 열량을 사용하여 다음 식(8)으로 정의한다.

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{f0}}{2} \quad (7)$$

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (8)$$

여기서 T_{fi}는 지중 열교환기로 유입되는 순환수의 온도, T_{f0}는 지중 열교환기에서 유출되는 순환수의 온도이다. 보어홀 벽면에서 보어홀 내부의 전열저항에 따른 온도와 선형열원에 대한 해는 같으며 이를 평균 출구 온도(T_f)에 관해 정리하면 다음 식(9)로 정리할 수 있다.

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi\lambda}\ln t + \frac{Q/L}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{4a}{r_b^2} - \gamma\right) + \frac{Q}{L}R_b + T_0 + \frac{Q/L}{4\pi\lambda}\left(\frac{r_b^2}{4at}\right)\left(1 - \frac{r_b^2}{16at}\right) \quad (9)$$

만약, $\frac{r_b^2}{at}$가 매우 작을 경우(시간(t)이 충분히 큰 경우) 다시 다음과 같이 정리할 수 있다. ($\frac{r_b^2}{at} \approx 0$)

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi\lambda}\ln t + \frac{Q/L}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{4a}{r_b^2} - \gamma\right) + \frac{Q}{L}R_b + T_0 \quad (10)$$

위 식(10)은 $\ln t$에 관한 선형 식으로 표현할 수 있으며 다음과 같이 나타낸다.

$$T_f = bx + c \quad (11)$$

$b = \frac{Q/L}{4\pi\lambda}, x = \ln t, c = b\left(\ln\frac{4a}{r_b^2} - 0.5772\right) + \frac{Q}{L}R_b + T_0$ 이다. 따라서 식(11)의 기울기 b를 현장 열응답 시험으로 산정할 경우 열전도도 λ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (12)$$

결과적으로 현장 열응답 시험에서는 그림 5와 같이 입출구 평균온도와 시간($T_f - t$)에 대한 현장 자료를 획득하고 그림 6과 같이 이를 반대수 관계($T_f - \ln t$)로 그래프의 기울기를 산정 한 후 사용한

열량과 보어홀의 길이를 식(12)에 대입하여 현장의 유효 열전도도를 산출하게 된다.

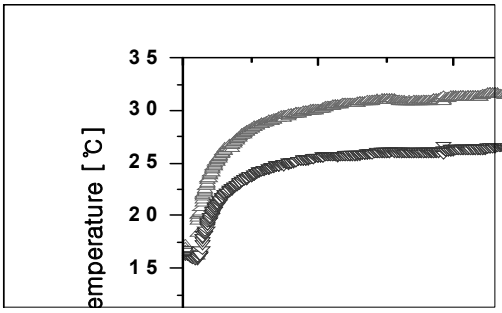


그림 5. 열응답 측정결과($T_f - t$)

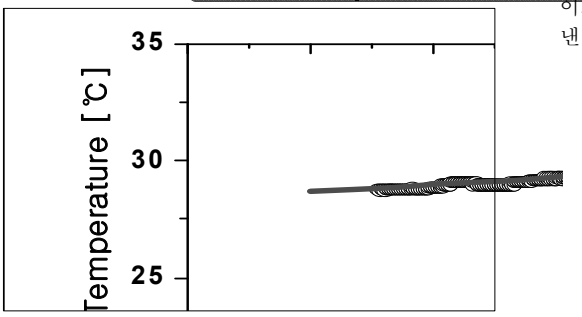


그림 6. 열응답 측정결과($T_f - \ln t$)

3. 시험 결과

3.1 열전도도 측정 결과

(1) 순수 벤토나이트

벤토나이트 함량에 따른 열전도도 특성을 알아보기 위해 실험을 실시하였다. 그림 7은 시료 전체 질량비의 20%와 30% 벤토나이트를 혼합한 시료의 열전도도를 측정한 결과이다.

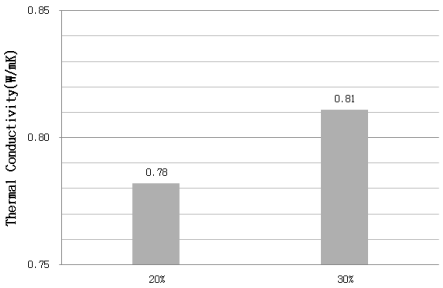


그림 7. 순수 벤토나이트 함량에 따른 열전도도

그림 7에서 보듯이 20% 순수 벤토나이트는 평균 0.78 W/mK의 열전도도를 나타냈고, 30% 순수 벤토나이트의 경우에는 평균 0.81 W/mK의 열전도도를 갖는 것으로 측정되었다. 이 결과로 보아 벤토나이트의 함량을 20%에서 30%로 증가 시켰을 때 Volclay Grout는 약 3.8% 증가하였다. 이는 벤토나이트의 함량이 증가됨으로써 벤토나이트 입자 사이의 공극이 줄어드는 효과와 벤토나이트의 주성분인 SiO_2의 함량의 차이로 인해 열전도도가 증가되었을 것이라고 판단된다.

(2) 벤토나이트 그라우트

순수 벤토나이트 그라우트에 첨가제(인조규사, 천연규사)를 혼합하여 혼합비의 종류에 따른 영향과 배합비에 따른 열전도도를 측정하였다. 그림 8~그림 9는 20%, 30% 순수 벤토나이트에 천연규사와 인조규사를 첨가하여 첨가제가 순수 벤토나이트 시료의 열전도도 증가에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

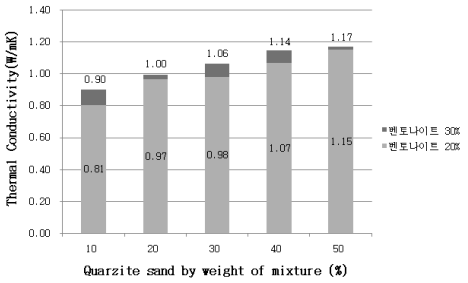


그림 8. 순수 벤토나이트-인조규사 열전도도

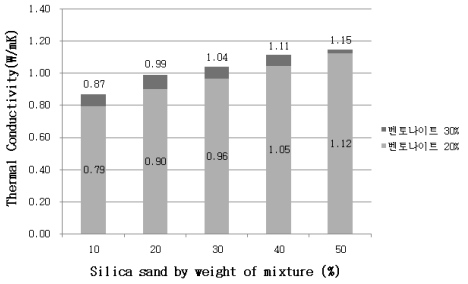


그림 9. 순수 벤토나이트-천연규사 열전도도

그림 8~그림 9에서 보듯이 첨가제의 양이 증가할수록 열전도도 측정값도 증가하였다. 첨가제의 양이 10%에서 50%로 증가하였을 때 열전도도는 약 30%정도 증가하였다. 또한 첨가제 종류에 따른 열전도도를 비교해 보았을 때 인조규사가 천연규사보다 크게 나타났다. 하지만 열전도도의 차이가 거의 미비하여 두 첨가제의 영향은 거의 동일한 것으로 보아도 무방할 것으로 판단된다.

(3) 시멘트 그라우트

Allan과 Philippacopoulos(1999)이 제안한 시멘

트 배합비(MIX-111)에 추가적인 실험을 위해 물/시멘트 비, 모래/시멘트 비를 변화시켜서 시료를 제작하였다[2]. 시료의 열전도도 측정은 지하수 영향을 고려하여 습윤 상태와 건조 상태를 측정하여 비교하였다. 표 1에서 보듯이 물/시멘트 비와 모래/시멘트 비를 달리하여 열전도도를 측정하였다.

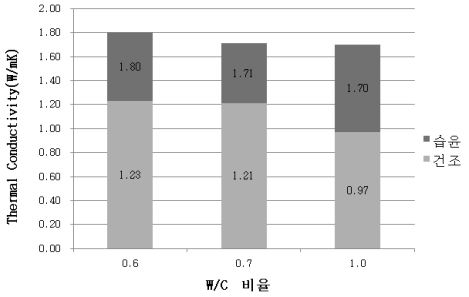


그림 10. 물/시멘트 비에 따른 열전도도

첫 번째 실험은 모래/시멘트 비를 1.0으로 고정한 후에 물/시멘트의 비를 0.6, 0.7, 1.0으로 변경하면서 실험하였다. 실험 결과는 그림 10을 보면 물/시멘트 비를 증가시킬수록 열전도도가 감소하는 것으로 나타났다. 시료를 건조시킨 후 열전도도를 측정한 결과 열전도도가 습윤 상태일 때보다 0.50~0.73 W/mK 만큼 감소하였다. 이는 건조 상태일 때 공기로 채워져 있던 시료의 공극에 습윤 상태일 때는 공기보다 상대적으로 열전도도가 좋은 물로 채워지면서 열전도도가 증가되는 것으로 판단된다.

Allan과 Philippacopoulos(1999)는 열전도도 향상과 투수계수 저감 목적으로 시멘트 그라우트를 배합할 때, 물/시멘트 비를 최소한으로 유지하는 것이 중요하다고 보고하였다[2]. 그러나 물/시멘트 비의 감소는 유동성의 감소를 의미하므로 현장 시공성을 위해 배합비에 따른 적절한 물/시멘트 비를 고려해야 한다.

두 번째 실험은 천연규사 함유량에 따른 시멘트 그라우트의 열전도도를 평가하기 위해 물/시멘트 비를 0.6으로 고정한 후에 천연규사/시멘트 비를 1.0, 2.0, 3.0으로 변경하면서 실험하였다. 그림 11에서 보듯이 시료를 건조시킨 후 열전도도를 측정한 결과 열전도도가 습윤 상태일 때보다 0.38~0.62 W/mK 만큼 감소하였다. 또한 모래/벤토나이트 비가 1.0일 때의 결과와 비교하였을 때 시멘트 그라우트의 열전도도에 비해 벤토나이트 그라우트의 열전도도가 약 40%정도 감소하였다. 이는 같은 조건하에 벤토나이트 그라우트보다 시멘트 그라우트 열전도도 특성이 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

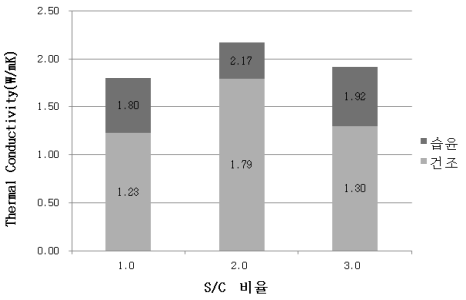


그림 11. 모래/시멘트 비에 따른 열전도도

기존 연구에서는 천연규사의 양이 증가할수록 열전도도가 증가한다고 보고하였다[5]. 하지만 이번 실험에서는 모래/시멘트 비가 3.0일 때 열전도도가 감소하였다. 이는 공극률에 차이에 의하여 열전도도가 감소한 것으로 판단된다. 실험 결과, 천연규사/시멘트 비가 증가함으로 인해 열전도도가 상승할 수 있지만, 공극률에 의한 영향을 시공 시 이를 고려해야 할 것이다.

3.2 일축압축강도 측정 결과

배합비에 따른 각각의 시료를 수중 양생한 후 7일 강도를 측정하였다. 각각의 시료를 3개씩 제작하여 파괴 강도의 평균값으로 표시하였다.

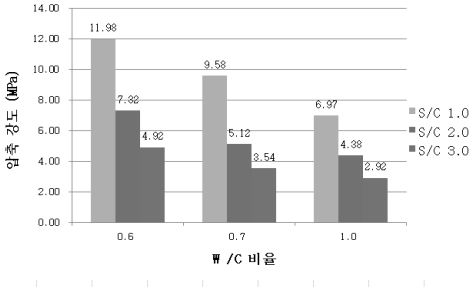


그림 12. 배합비에 따른 일축압축강도

일축압축 강도시험 결과 그림 12에서 보듯이, 물/시멘트 비가 증가할수록 일축압축 강도가 감소하는 경향을 보였다. 시멘트와 물만 혼합한 일반적인 시멘트 모르타르와 비슷한 경향을 갖는다. 또한 모래/시멘트 비, 즉 첨가제의 양이 증가할수록 일축압축 강도는 그림 12와 같이 감소하는 경향을 보였다. 지중 열교환기 보어홀 시공 시 그라우트의 일축압축강도는 전반적인 지중 열교환기 안정성에 크게 영향을 주지 않으나 강도가 좋은 시멘트 그라우트의 경우 보어홀 형상 유지에 도움이 될 것이라고 판단된다. 하지만 열전도도를 높일 목적으로 천연규사가 과다 첨가 될 때에는 강도 저하나

시멘트 경화 과정에 문제가 발생할 수 있으므로 시공 시 이를 고려해야 한다.

3.3 수치해석 결과

지중 열교환기 뒤채움재는 앞에서 언급했듯이 보어홀 주변의 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 방지하는 역할을 한다. 이러한 역할 이외에도 보어홀 주변의 지반과 유동액 간의 열전달을 촉진하는 중요한 역할을 한다. 뒤채움재의 열전도도는 지반과 유동액 사이의 열전달에 있어서 중요한 인자가 된다. 따라서 지중 열교환기 보어홀의 뒤채움재에 따른 열전달 양상을 파악하기 위해 본 실험을 실시하였다. 표 2~표 3은 해석에 적용된 물성치를 나타낸 것이다.

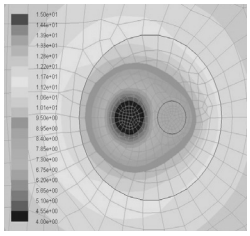
표 2. 해석에 적용된 물성치

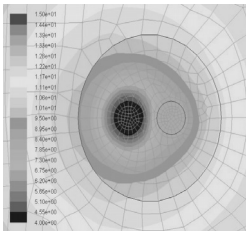
물성치	지반	파이프	유동액
밀도 (kg/m^3)	2900	955	1113
열용량 ($J/kg \cdot k$)	760	525	4217
열전도도 (W/mK)	2.5	0.4	0.6
점성계수 ($kg/m \cdot s$)	-	-	16.1

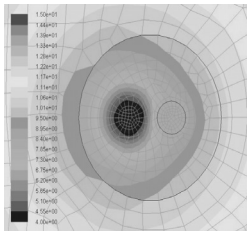
표 3. 해석에 적용된 뒤채움재 열전도도

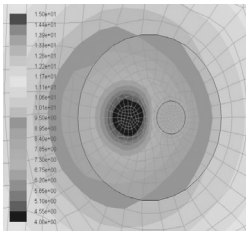
물성치	material 1	material 2	material 3	material 4	material 5
열전도도 (W/mK)	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8

지중 열교환기 뒤채움재의 열전도도가 증가함에 따라 열전달에 미치는 영향에 대해 해석을 실시하였다. 지열 냉난방 시스템의 난방과정은 상대적으로 온도가 높은 지반의 열을 흡수하는 과정이므로 유출 파이프 온도가 높을수록 열전달이 잘 이루어졌다고 할 수 있다. 그림 13~그림 14에서 보듯이 뒤채움재의 열전도도가 증가할수록 열전달이 더 원활히 이루어 졌다고 평가할 수 있다. 또한 표 4의 난방과정 시 해석결과를 보면 파악 할 수 있다. 난방 시에는 뒤채움재의 열전도도가 증가함에 따라 상대적으로 온도가 높은 지반으로부터 열의 흡수가 원활히 이루어져 유출 파이프 평균 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 냉방 시에는 뒤채움재의 열전도도가 증가함에 따라 상대적으로 온도가 낮은 지반으로 열을 방출시켜 유출 파이프 평균 온도가 낮아지는 것을 표 5에서 확인할 수 있다.


▣ 열전도도 0.8W/mK


▣ 열전도도 1.3W/mK


▣ 열전도도 1.8W/mK


▣ 열전도도 2.3W/mK

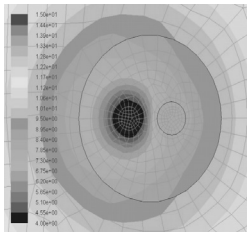
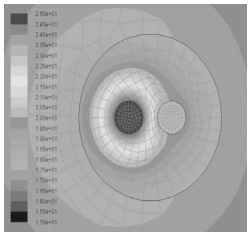
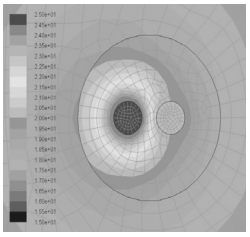
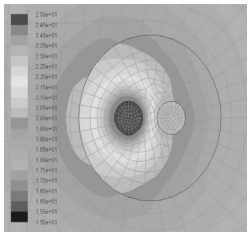
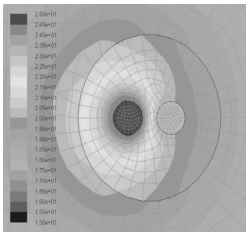

▣ 열전도도 2.8W/mK

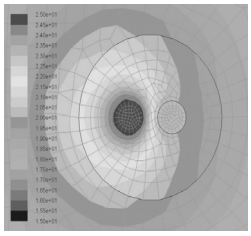
그림 13. 열전도도에 따른 난방과정 해석결과


▣ 열전도도 0.8W/mK


▣ 열전도도 1.3W/mK


▣ 열전도도 1.8W/mK


▣ 열전도도 2.3W/mK



▣ 열전도도 2.8W/mK

그림 14. 열전도도에 따른 냉방과정 해석결과

표 4. 난방과정 시 유출파이프 온도

구 분	온 도(℃)	평균 온도(℃)
material 1	7.61 ~ 8.12	7.87
material 2	7.72 ~ 8.27	8.00
material 3	7.84 ~ 8.36	8.10
material 4	7.96 ~ 8.50	8.23
material 5	8.01 ~ 8.63	8.32

표 5. 냉방과정 시 유출파이프 온도

구 분	온 도(℃)	평균 온도(℃)
material 1	20.00 ~ 20.50	20.25
material 2	19.84 ~ 20.38	20.11
material 3	19.81 ~ 20.21	20.01
material 4	19.76 ~ 20.19	19.98
material 5	19.62 ~ 20.04	19.83

실험 결과를 종합해보면 뒤채움재의 열전도도가 증가하면 할수록 냉·난방 시에 지반과의 열전달이 원활하게 이루어져서 열효율이 더 증가함을 확인하였다.

3.4 현장 열응답 시험 결과

현장 열응답 시험은 최소 48시간 이상 지속적인 측정을 실시하여 지반의 유효 열전도도를 산정하는 시험법이다. 측정 결과는 그림 15~그림 16까지 그라우트재료에 따라 결과를 나열하였으며 유효 열전도도 측정결과는 표 6에 나타내었다. 측정 데이터 결과는 시험 시작 12시간 동안의 자료는 안정화 시간에 해당하는 것으로 간주하고 유효 열전도도 산정 과정에서 제외하였으며 유효 열전도도는 유출·유입 순환수 평균온도(T-avg)를 사용하여 산정하였다. 현장 열응답 시험결과는 식(12)을 사용하여 각 보어홀의 유효 열전도도를 산정하였다.

이번 실험결과, 선형 열원해석에 필요한 자료는 평균적으로 450분 이후에 선형화되는 것으로 나타났다. 선형으로 나타나는 지점에서 시험 종료 시까지 획득한 자료를 이용하여 온도와 시간의 기울기(식(12)에서 b값)를 산정하고 평균 일 입력량(Power input, Q), 보어홀 깊이(L) 등을 식(12)에 대입하여 지중 유효 열전도도 값을 산정한다.

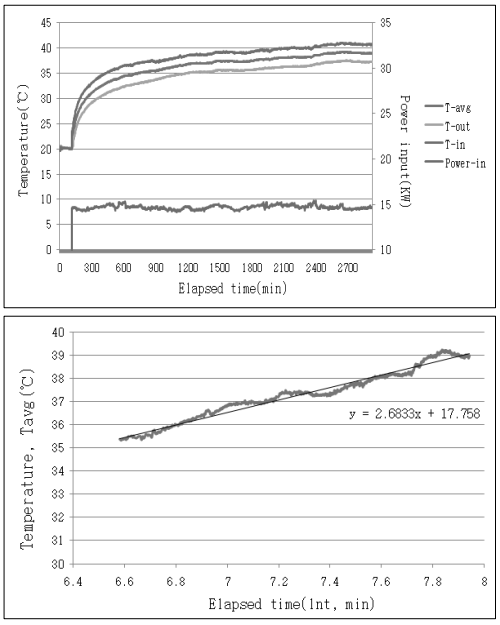


그림 15. 열응답 시험 결과(벤토나이트 그라우트)

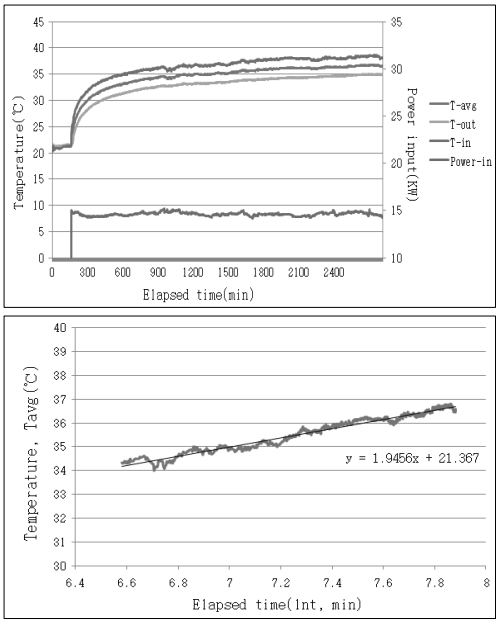


그림 16. 열응답 시험 결과(시멘트 그라우트)

표 6. 유효 열전도도 측정 결과

시험항목	뒤채움재 종류	
	벤토나이트 그라우트	시멘트 그라우트
평균전원 (V)	221.5	221.6
평균전류 (A)	66.3	66.1
평균전력 (W)	14678.0	14651.6
Slope	2.6833	1.9456
Depth (m)	220	220
열전도도 (W/mK)	**1.98**	**2.73**

시멘트 그라우트와 벤토나이트 그라우트의 유효 열전도도 측정 결과를 비교해 보면, 시멘트 그라우트가 벤토나이트 그라우트에 비해 유효 열전도도가 약 37.9% 성능 향상을 가져왔다. 이는 벤토나이트 그라우트 보다 유효 열전도도가 높은 시멘트 그라우트로 지중 열교환기를 시공했을 때 보다 향상된 효율로 인하여 시공비의 절감을 할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 지열 열펌프 시스템의 중요한 한 부분인 지중 열교환기 보어홀 뒤채움재의 열물성과 강도 특성을 연구하였다. 현재 국내에서 사용되는 뒤채움재의 재료를 대상으로 열전도도 측정과 일축압축 강도를 측정하여 각각의 결과를 비교하였다.

순수 벤토나이트 시료에 두 종류의 첨가제(천연규사, 인조규사)를 혼합한 후, 이 혼합물의 열전도도를 측정하였다. 그리고 표 1과 같이 각각의 배합비에 따른 시멘트 그라우트를 제작하여 물/시멘트비 및 모래/시멘트 비가 열전도도 측정 결과와 일축압축 강도 결과에 미치는 영향을 고찰하였다.

실내 열전도도 시험을 통해 얻은 열전도도 값을 바탕으로 수치해석을 통해 열전달 거동을 파악하였다. 또한 벤토나이트그라우트와 시멘트 그라우트를 가지고 실제 현장에 타설하여 현장 열응답 시험을 통해 유효 열전도도 값을 측정하였다.

이번 연구 실험 결론은 다음과 같다.

▪본 연구에 사용한 Volclay Grout의 20% 순수 벤토나이트 열전도도는 0.78 W/mK, 30% 순수 벤토나이트의 열전도도는 0.81 W/mK로 측정되었다. 벤토나이트의 질량 비율이 20%에서 30%로 증가되었을 때, 열전도도 값은 약 3.7%까지 증가하였다.

▪순수 벤토나이트에 첨가제(천연규사, 인조규사)를 전체 질량비 10%~50%까지 혼합하였다. 첨가제의 질량이 증가할수록 열전도도는 평균 27%까지 증가하였다. 또한 첨가제 종류에 따른 열전도도 값의 차이는 인조규사가 천연규사 보다 더 높게 측정되었으나, 첨가제에 따른 열전도도의 영향은 미미하다고 판단된다.

▪시멘트 그라우트의 경우, 물/시멘트 비가 증가할수록 열전도도 측정값은 감소하였다. 또한 습윤 상태일 때보다 건조 상태일 때의 열전도도 측정값도 감소하였다. 이는 물로 채워져 있던 시료의 공극에 상대적으로 열전도도가 낮은 공기로 채워져서 열전도도 값이 감소하는 것으로 판단된다.

▪기존 연구에서는 첨가제의 양이 증가할수록 시멘트 그라우트의 열전도도 값이 증가한다는 결과가 나왔다. 하지만 이번 연구에서는 열전도도 값이 모래/시멘트 비가 3.0일 때 공극률의 증가로 인해 열전도도 값이 모래/시멘트 비가 2.0일 때 보다 감소하였다. 이는, 공극률에 의해 뒤채움재의 열전도도 값이 낮아질 수 있다고 판단된다. 현장에 적용 시 뒤채움재 타설 시 공극률을 최소화하는 것이 중요하다 사료된다.

▪보어홀 뒤채움재로 하중 전달 능력이 거의 없는 벤토나이트 그라우트보다 일정수준의 강도를 갖는 시멘트 그라우트로 설계를 할 경우, 구조물 인접 지역이나 구조물 하부 및 주차장 등에 설치가 가능할 것으로 판단된다.

▪유한체적해석 프로그램인 FLUENT를 통한 2차원 열전달 거동 해석을 위해 지반, 보어홀, 파이프를 현장 시공 조건과 동일하게 모델링한 결과, 벤토나이트 그라우트보다 시멘트 그라우트가 상대적으로 열전도도가 높아 지반과의 열전달이 더 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

▪현장 열응답 시험 결과, 지중 열교환기 보어홀 뒤채움재로 벤토나이트 그라우트를 사용하였을 때 보다 시멘트 그라우트를 사용하였을 때 유효 열전도도가 약 37.9% 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 실내실험과 수치해석을 통한 실험결과와 같은 지중 열교환기 보어홀 뒤채움재로 벤토나이트 그라우트 대신 시멘트 그라우트를 사용하였을 때 보다 높은 열전달 효율을 기대할 수 있다.

▪벤토나이트 그라우트와 시멘트 그라우트를 상대로, 실내 열전도도 시험과 수치해석 및 현장 열응답 시험의 결과를 종합해보면 지중 열교환기 보어홀 뒤채움재로 벤토나이트 그라우트 대신 시멘트 그라우트를 대체하면 지열 열펌프 시스템의 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] 조정식, "지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재(grouting material)", *에너지·자원기술개발사업 최종보고서*, 2006.

[2] Allan, M.L. and Philippacopoulos, A., "Properties and performance of cement-based grouts for geothermal heat pump application", *U.S. Department of Energy*, Washington D.C., 1999.

[3] Remund, C.P. and Lund, J.T., "Bentonite-based backfill mixtures for GSHP", RER Project 91-18, *National Rural Electric Coopperative Association*, 1993.

[4] Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of heat in solid", *Oxford Univ Pr*, 1959.

[5] 박문서, 위지혜, 이철호, 최항석, 강신형, "수직 밀폐형 지중열교환기 뒤채움재로서 시멘트 그라우트의 적용성 검토", *한국지반공학회 논문집*, 제26권, 7호, pp.107~115, 2010.