

## 지중 열교환기용 뒤채움재의 물리적 특성 연구

### A Study on the Physical Characteristics of Grout Material for Backfilling Ground Heat Exchanger

최 항 석<sup>1</sup> Choi, Hang-Seok

이 철 호<sup>2</sup> Lee, Chul-Ho

최 효 범<sup>3</sup> Choi, Hyo-Pum

우 상 백<sup>4</sup> Woo, Sang-Baik

#### Abstract

A geothermal heat pump system is a preferable alternative energy system in Korea because it uses the heat energy of the earth, which is environmentally friendly and inexhaustible. In order to characterize the thermal conductivity and viscosity of grout materials used for backfilling ground heat exchangers, nine bentonite grouts, one marine clay from Boryung, and cement grouts adapted in the United State have been considered in this study. The bentonite grouts indicate that the thermal conductivity and viscosity increase with the content of bentonite or filler (silica sand). In addition, material segregation can be observed when the viscosity of grout is relatively low. The marine clay turns out to be unsuitable for backfilling the ground heat exchanger due to its insufficient swelling potential. The saturated cement grouts appear to possess much higher thermal conductivity than the saturated bentonite grouts, and the reduction of thermal conductivity in the cement grouts after drying specimens is less than that in the case of the bentonite grouts. Maintaining the moisture content of grouts is a crucial factor in enhancing the efficiency of ground heat exchangers.

#### 요 지

지열 냉난방 시스템은 친환경적이며 비고갈성인 지열 에너지를 이용함으로써 에너지 자원이 부족한 우리나라에 유용한 대체 에너지 시스템이다. 본 연구에서는 지중 열교환기의 뒤채움재로 사용되는 그라우트 재료의 열전달 및 점도 특성을 파악하고자, 국내 시공 현장에서 사용 중인 벤토나이트계 그라우트 9종과 충남 보령의 해성점토, 그리고 미국 등 선진국에서 사용 중인 시멘트계 그라우트를 선택하여 열전도도 실험과 점도실험을 수행하였다. 벤토나이트계 그라우트는 벤토나이트의 무게비가 증가 하거나 첨가제(천연규사)의 비율이 증가 할 때 열전도도와 점도가 증가하는 경향이 나타났다. 또한, 첨가제 사용 시 그라우트의 점도가 낮을 경우 그라우트와 첨가제의 재료분리 현상이 나타났다. 해성점토에 대한 실험에서는 해성점토가 벤토나이트에 비해 팽윤성이 낮아 그라우트 재료로는 부적합하다는 결론을 내렸다. 시멘트계 그라우트의 열전도도 실험에서 습윤 상태의 시멘트계 그라우트가 벤토나이트계 그라우트 보다 높은 열전도도를 가지는 것으로 나타났으며 건조 상태로 변할 때 벤토나이트계에 비해 열전도도 감소폭이 작은 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 그라우트의 함수비 유지가 지중 열교환기의 열전달 효율에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었다.

**Keywords :** Bentonite, Geothermal grouts, Ground heat exchanger, Thermal conductivity, Viscosity

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수 (Member, Assistant prof., Dept. of Civil, Environmental & Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environmental & Architectural Engrg, Korea Univ.)

3 정회원, (주)건화 기술연구소 상무 (Member, Managing director, Research & Development Institute, Kunhwa Co.,Ltd.)

4 정회원, 대원토질(주) 이사 (Member, Director, Daewon Soil Co.,Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

우리나라는 에너지 자원 보유량이 부족하여 화석연료의 97%를 수입에 의존하고 있으며 고유가 시대를 대비하기 위한 대체 에너지 개발의 필요성이 증대되고 있다. 교토 의정서(1997)와 최근의 발리 로드맵(2007)에 의한 온실가스 배출량 제한과 신에너지 및 재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법 제 11조를 통해 대체에너지의 사용이 의무화 되어가고 있는 실정이다. 대체 에너지중 지열원을 이용하는 지열 냉난방 시스템은 친환경적이며 비고갈성으로 알려져 있다. 국내에도 2000년대에 들어서면서 지열 냉난방 시스템의 보급이 점차 증가하는 추세를 보임에 따라 시스템의 효율을 결정하는 지중 열교환기(ground heat exchanger)에 대한 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다.

열펌프(heat pump)를 이용하는 지열 냉난방 시스템은 냉방의 경우 건물에서 발생한 열을 지중으로 내보내고 난방의 경우 지중의 열을 건물로 공급하여 냉난방을 구현하게 된다. 이런 냉난방 시스템에서 열원으로 작용하는 지열은 공기보다 안정적인 열원의 역할을 하게 된다. 국내에서 주로 수직 밀폐형 지중 열교환기(vertical ground loop heat exchanger)를 이용한 지열 냉난방 시스템이 시공되고 있다. 그림 1은 수직 밀폐형 지중 열교환기를 적용한 지열 시스템의 구성과 역할을 간략적으로 나타낸다. 이중 지중 열교환기는 지중 150m~200m까지 천공한 대략 15cm 직경의 보어홀(bore hole)에 U자 관(U-loop)으로 연결된 두 가닥의 HDPE 파이프를 설치하여 물 혹은 부동액을 순환시켜 주변 지반과 직접적으로 열교환을

하도록 한다. 열교환을 위한 HDPE 파이프는 지상의 열펌프와 연결되어 부동액을 순환하도록 한다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 보어홀과 HDPE 파이프 사이의 뒤채움재가 지반과 파이프간의 열교환 매개체 역할을 한다. 그림 2는 여름철 냉방모드를 묘사하는 것으로 건물의 냉방을 위해 더워진 순환 유체가 열교환 파이프로 순환하면서 열을 지중으로 전달하는 과정을 보여준다. 물론, 겨울철 난방의 경우는 이와 반대로 난방을 위해 차가워진 순환 유체가 열교환 파이프로 순환하면서 지중으로부터 열을 흡수하여 상부 열펌프의 열원으로 사용된다. 또한 뒤채움재는 지상의 오염물질이 보어홀로 유입되어 지하수를 오염시키는 것을 방지하고, 보어홀 주변의 지하수가 지상으로 유출되는 것을 차단하는 역할을 한다. 현재 국내에서 사용되는 열교환기 뒤채움용 그라우트재는 비싼 수입 벤토나이트나 성능이나 신뢰

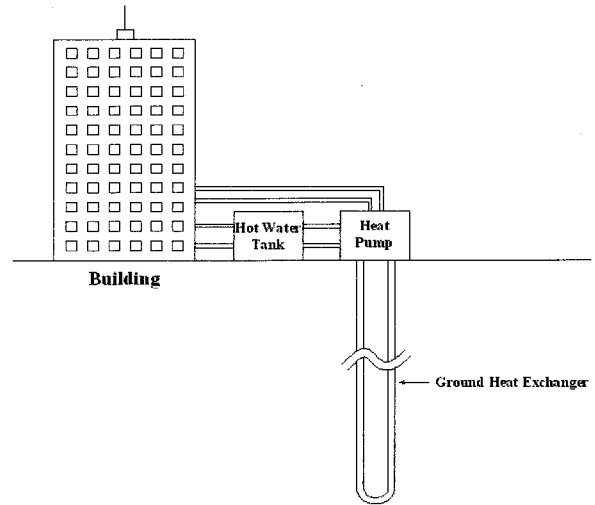
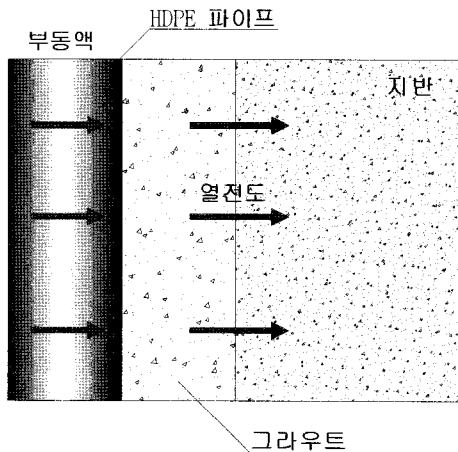
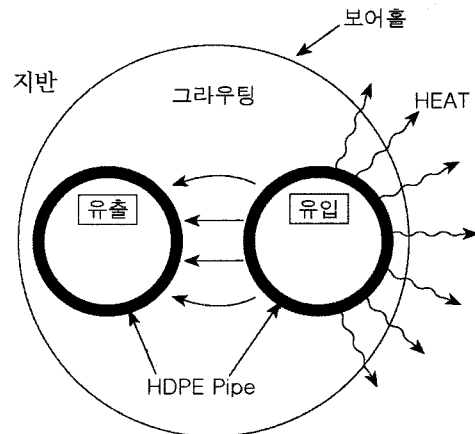


그림 1. 수직형 지열 냉난방 시스템 모식도



(a) 냉방시(지중)



(b) 냉방시(보어홀)

그림 2. 지중 열교환기의 열전달 메커니즘

성에 대한 검증이 되지 않은 일반 토목공사용 벤토나이트가 주류를 이루고 있다. 따라서 이런 문제들을 해결하기 위해 지중 열교환기 뒤택음용 그라우트재에 대한 성능 평가 및 거동 분석이 요구된다.

지중 열교환기의 성능향상은 그라우트재의 열전도도와 물리적인 특성의 향상을 통해 이뤄지며, 그라우트의 시공성이나 열전도도, 투수계수, 내구성, 환경적인 요소, 경제성 등의 복합적인 요소를 고려해야 한다(Allan 과 Philippacopoulos, 1999). 수직 밀폐형 지중 열교환기의 경우 U자관과 그라우트, 주변 지반으로 구성되는데, 최근 지중 열교환기 효율 향상에 관한 연구는 U자관과 지반 사이의 열전달 효율에 집중되고 있다. 이러한 효율에 관한 연구는 지중 열교환기의 시공깊이 설계 시 필요한 지표로 사용된다. 앞에서 언급 하였듯이 뒤택음재가 지중에 매설된 파이프와 지반사이의 열전달 매개체로 작용하게 된다. 따라서 열전도성이 좋은 뒤택음재일수록 기존에 천공하던 길이보다 짧게 지중 열교환기를 시공할 수 있어서 시공비가 절약되고 전체 냉난방 시스템의 경제성이 향상 된다.

지중 열교환기용 뒤택음재로 현재 주로 사용하는 재료는 시멘트류와 벤토나이트류로 나눌 수 있다. 시멘트 그라우트의 경우 보통 모래를 섞어 열전도 성능을 높이며 시멘트-모래(cement-sand) 그라우트의 경우, 순수 시멘트나 벤토나이트보다 열전도도가 높고, 높은 부착력과 낮은 투수계수를 갖는다(Allan, 2000). 하지만 유동화제(superplasticizer)를 사용한 낮은 물/시멘트 비를 갖는 시멘트-모래 그라우트의 경우 열전도도는 높으나 시공 후 갭(gap)이 발생하여 열전달 효율에 큰 영향을 줄 수 있다. 지중 열교환기 내에 발생한 갭의 효과를 수치 해석 모델로 해석 한 결과, 그라우트와 파이프사이의 갭이 그라우트와 지반 사이의 갭보다 영향을 크게 준다고 보고된다(Philippacopoulos와 Berndt, 2001). 또한 시멘트계열 그라우트는 시간이 지날수록 수축이 되어 지중 열교환기 파이프 재료인 플라스틱에 대한 접착력이 다소 감소하는 경향이 있다(Paul 과 Remund, 1997). 그라우트의 접착력이 감소하면 파이프와 접촉면에 틈이 발생하며 이는 지중 열교환기의 열전달 효율의 저하를 초래하게 된다(Philippacopoulos와 Berndt, 2001). 국내에서는 이러한 시멘트계 그라우트에 대한 물리적 특성 규명이 명확하지 않아 실무에서는 주로 벤토나이트계열의 그라우트를 사용한다.

국내에서 사용 중인 순수 벤토나이트의 열전도도는

대략적으로  $0.75 \sim 0.83 W/m^{\circ}C$  범위를 갖는다고 보고되고(조정식, 2006), 시멘트-모래 그라우트와 같은 시멘트계 그라우트재의 열전도도는  $2.10 \sim 2.40 W/m^{\circ}C$ 로 벤토나이트 보다 높은 값을 보인다. 벤토나이트의 경우, 열전도도를 높이기 위해 첨가제를 사용하는 것이 보통이며 국내 현장에서는 첨가제로, 천연규사를 사용한다(조정식, 2006). 첨가제를 사용한 벤토나이트 그라우트의 열전도도 특성을 파악하고 시공 시 사용하는 첨가제의 양을 고려하여 지중 열교환기 설계에 반영함으로써 효과적인 설계가 되도록 해야 한다. 이를 위해 첨가제의 양에 따른 벤토나이트 그라우트의 열전도도를 평가해야 하며 열전도도를 증가시킬 수 있는 다른 첨가제의 개발도 필요하다.

벤토나이트계나 시멘트계의 그라우트는 교반 후 시간에 따라 점도가 증가하는 경향이 있으며 적절한 시간 내에 시공을 함으로써 주입 파이프나 펌프에 무리 없이 그라우트를 보어 홀에 시공 할 수 있어야 한다. 또한 시공 시 점도가 높아지기 전에 그라우트재를 보어홀 내에 주입해야 열교환 파이프와 지반 사이를 빈 공간 없이 그라우트재로 채울 수 있을 것이므로 시간에 따른 점도 변화는 지중 열교환기 시공 시에 중요한 사항이 된다.

본 연구에서는 국내 지중 열교환기 뒤택음재로 사용 중인 9종의 벤토나이트계 그라우트와 국내 해성점토 중 보령 머드, 그리고 미국에서 개발된 시멘트계 그라우트를 선택하여 열전도도와 점도특성을 분석하였다. 벤토나이트의 경우 벤토나이트 함유량에 따른 열전도도와 점도 특성과 첨가제로 인한 특성 변화에 대한 실험을 실시하였으며, 해성점토의 경우 정제된 시료와 정제전 시료에 대해 열전도도를 측정 하였다. 시멘트계 그라우트재는 BNL(Brookhaven National Lab)에서 제시한 시멘트-모래 배합비로 시료를 조성한 후 열전도도를 측정하고 물과 시멘트 비율을 변화시킨 후 열전도도를 측정하였다.

## 2. 열전도도 측정 및 점도 시험

### 2.1 시험 시료

본 연구에 사용된 시료는 국내에서 사용 중인 벤토나이트 9종과 해성점토, 시멘트계 그라우트를 사용하였으며, 첨가제로는 천연규사를 사용하였다. 벤토나이트의 물리적 특성은 표 1과 같고, 해성점토(보령 머드)의 광물학적 조성비는 표 2와 같다. 첨가제로 사용된 천연규

사의 입도분포는 그림 3과 같다. 벤토나이트는 국내 제품(D사)과 수입 제품(C사, S사)을 선택하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 벤토나이트 중 D사의 벤토나이트 1은 본래 주물용이나 토목용으로 생산되고 벤토나이트 2는 기존에 생산되던 제품에 몬트모릴로나이트를 첨가하여 팽윤성과 점성을 증가시킨 제품이다. S사의 벤토나이트(3, 4, 5)는 토목 공사용 재료이며 기초 벽 시공, 여과 조절을 위한 점결제 및 지지제로 사용하고 있다. 벤토나이트 3은 저급으로 쓰레기 매립장에 사용되는 재료로 다른 제품에 비해 점도와 팽윤성이 낮으며 벤토나이트 5의 경우 slurry 공법에 사용되던 재료로써 점도가 높고 팽윤성이 좋으나 다른 제품에 비하여 고가에 속한다. C사의 벤토나이트 6은 저급으로 매립장으로 사용되는 재료이고, 벤토나이트 7은 과립상 재료로

토목/구조용 재료로써 주로 방수용으로 사용된다. 벤토나이트 8은 분말로 되어 있고 지열용으로 쓰이며, 특히 벤토나이트 9는 지중열교환기용 벤토나이트로 제작되어 어느 정도의 천연규사가 제품에 미리 함유되어 현장에서 물과 혼합하여 바로 사용할 수 있다. 해성점토는 충남 보령시의 머드로 화장품용으로 가공된 제품과 가공하기 전 상태의 시료, 두 가지에 대해 실험을 실시하였다. 시멘트계 그라우트는 기존 문헌(Allan와 Philippacopoulos, 1999)에서 제시한 표 3과 같은 배합비를 국내 일반 포틀랜드 시멘트로 배합하였으며 첨가한 천연규사는 벤토나이트 첨가제와 동일한 재료를 사용하였다. 이중 'Mix-111'은 BNL연구소에서 지중열교환기용으로 개발한 재료로써 벤토나이트나 순수 시멘트의 열전도도보다 3배가량 높은 열전도도를 나타내며 습윤상태의 열전도도는 평

표 1. 벤토나이트 시료의 물리적 특성

종 류	제조사	공기중 함수비 (%)	pH	Swelling Volume (ml/2g)	Marsh Viscosity (교반 1시간후) (sec)	투수계수 (cm/sec)	200번체 잔류량 (%)
벤토나이트 1	D	10.0	9-11	12-15	•	•	•
벤토나이트 2	D	10.0	9-11	24-30	•	•	•
벤토나이트 3	S	8.9	10.0	15.0	33.9	•	•
벤토나이트 4	S	9.5	10.1	23.0	40.9	•	•
벤토나이트 5	S	9.5	10.0	24.5	41.6	•	•
벤토나이트 6	C	12.0	6-12	18.0	•	$10^{-7}$ 이하	2.2
벤토나이트 7	C	12.0	6-12	29.0	•	$10^{-7}$ 이하	2.2
벤토나이트 8	C	12.0	6-12	10.0	•	$10^{-7}$ 이하	2.2
벤토나이트 9	C	12.0	6-12	11.0	•	$10^{-7}$ 이하	2.2

표 2. 해성점토 시료의 광물학적 특성

시료	Oxides(wt. %)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	others	lgloss
해성점토	68.40	15.10	3.73	0.72	1.58	2.43	2.83	0.74	3.96

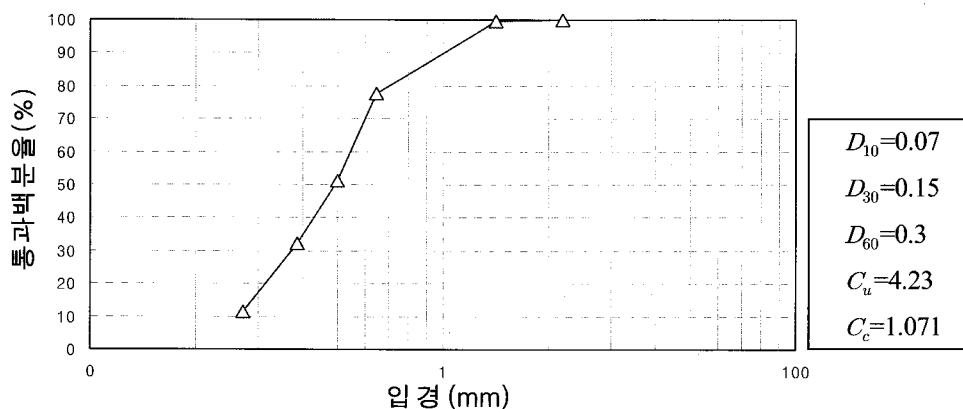


그림 3. 천연규사의 입도분포

표 3. 시멘트계 그라우트의 배합비

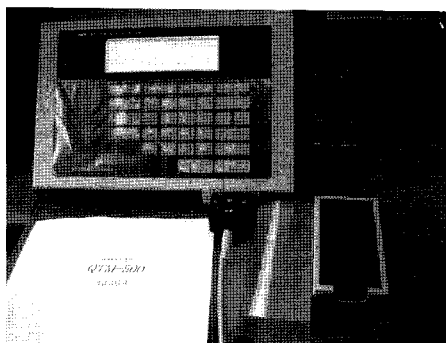
	Mix 111	Mix 114	Mix 115	순수시멘트 (w/c=0.6)	A	B
시멘트(kg/m <sup>3</sup> )	587.7	349.4	346.2	1087.0	395.0	827.7
플라이애시(kg/m <sup>3</sup> )	0	0	230.8	0	0	0
고로 슬래그(kg/m <sup>3</sup> )	0	233.0	0	0	0	0
물(l/m <sup>3</sup> )	323.3	320.3	317.3	652.2	423.3	323.3
천연규사(kg/m <sup>3</sup> )	1251.8	1240.5	1229.0	0	1493.0	1010.0
벤토나이트(kg/m <sup>3</sup> )	6.5	6.4	6.3	0	6.5	6.5
유동화제(l/m <sup>3</sup> )	8.8	8.7	8.7	0	8.8	8.8
비중	2.2	2.2	2.1	1.7		

균 2.42 W/m<sup>2</sup>·°C, 건조상태일때 평균 2.16 W/m<sup>2</sup>·°C의 값을 보인다고 알려져 있다(Allan와 Philippacopoulos, 1999). 건조상태의 열전도도가 습윤상태와 비교하여 ‘Mix-111’은 0.26 W/m<sup>2</sup>·°C가량 감소하는 반면, 벤토나이트는 최대 0.5 W/m<sup>2</sup>·°C까지 감소하므로 건조상태가 지중에 발생할 수 있는 지역에서 벤토나이트 대신 사용할 수 있다(Allan와 Philippacopoulos, 1999). ‘Mix-114’나 ‘Mix-115’는 ‘Mix-111’의 시멘트-모래 배합비에서 시멘트 비율을 줄이고 각각 고로슬래그와 플라이애시를 첨가한 그라우트이다. 본 연구에서는 추가로 물/시멘트 비율을 조절하여 두 가지 시료(A, B)를 제작하였다. A는 ‘Mix-111’의 배합비에서 시멘트의 비율을 낮추고 물과 모래의 비율을 높였고, B는 시멘트 비율을 높이고 모래의 비율을 낮추어 배합하였다.

## 2.2 시험 장치 및 방법

### 2.2.1 열전도도 측정 시험

본 연구에서는 그라우팅 재료의 열전도도를 측정하기 위하여 사진 1(a)의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 열전도도 측정기는 0.023 ~ 12 W/m<sup>2</sup>·°C의 측정범위 및 ±5%의 정밀도와 ±3%의 재현성을 갖으며 1회 측정시간은 60초이다. 프로브는 PD-13 모델을 사용하였고, 크기는 95mm×40mm이며 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브 표면은 유리섬유로 구성되어 있으며 형태는 사진 1(b)와 같다. 열전도도를 측정하는 방식으로는 매질 내의 열선에 일정 열량을 공급하고, 시간에 따른 열선의 상승관계를 구하여 매질의 열전도도를 구하는 비정상 열선법(transient hot wire method)을



(a) 열전도 측정기

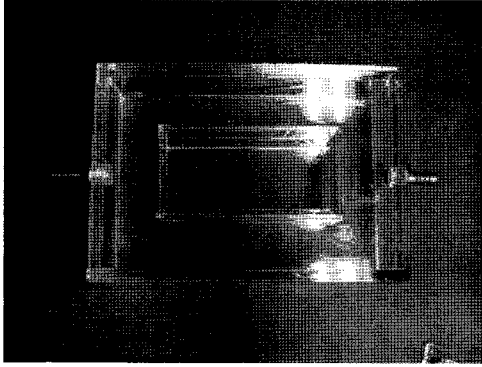


(b) 프로브(PD-13)

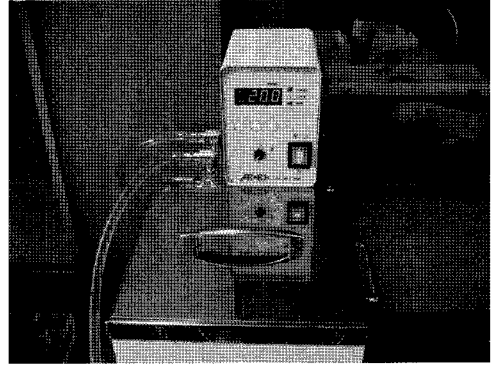
사진 1. 시험에 사용한 열전도도 측정기(QTM-500)

표 4. 표준시료에 대한 측정오차

표준시료	열전도도(W/m <sup>2</sup> ·°C)		오차
	표준치	측정치	
Quartz glass	1.412	1.425	0.92%
Silicon rubber	0.238	0.235	-1.26%
Polyethylene foam	0.036	0.037	2.78%

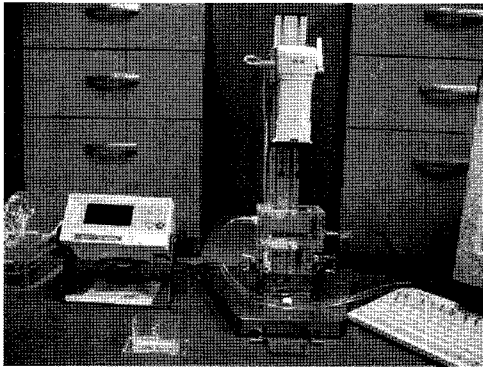


(a) 열전도 측정용 시료 성형틀

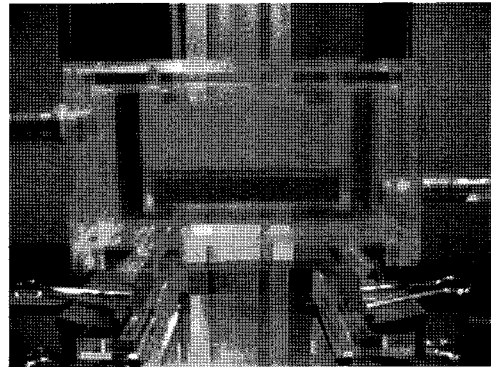


(b) 항온 수조

사진 2. 시료 성형틀과 항온수조



(a) 점도 측정기



(b) 점도 측정용 용기(water jacket)

사진 3. 점도 측정기

사용하였다. 표 4는 표준시료들로 열전도도를 측정했을 때 측정 오차를 나타낸 것이며 대체적으로 낮은 오차범위로 표준시료의 열전도도를 측정할 수 있다.

열전도도를 측정하는 과정에서 열선과 두 매질의 접촉은 매우 중요한 문제이다. 또한 측정의 정밀도를 높이기 위해서는 매질 표면의 정밀한 가공이 필요하다. 그러나 본 측정에 적용된 장비는 프로브 표면이 단열성과 탄성이 우수한 재료이기 때문에 보다 정확한 측정 결과를 기대할 수 있으며 시료 표면의 특별한 가공이 필요 없다. 아울러 본 연구에 사용된 프로브 PD-13의 경우 케이스 내부에서 용수철로 움직이는 1kg의 가압추가 프로브 표면과 시료 표면의 부착성을 높여준다. 본 실험에 사용된 시료는 모두 점성을 갖는 Gel-type의 재료이므로 일정한 시료의 형태를 유지하기 어렵다. 따라서 사진 2(a)와 같은 60mm×1100mm 크기의 시료 성형틀을 제작하고 물이 흐를수 있는 jacket을 넣어 사진 2(b)의 항온수조를 이용하여 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 그러므로, 본 실험에서 측정된 열전도도는 특정 실내온도가 유지된 상태에서의 열전도도 측정값이다. 온도는 교반 후, 틀에 넣어 시료가 충분히 팽윤을 하게 되는 시간

(6시간)을 감안하여 일정하게 유지하도록 하였으며 시료 초기 온도는 20℃로 고정하여 실험하였다. 시멘트계 그라우트의 경우 직사각형 몰드에 시료를 성형하여 평평한 면을 갖도록 제작하였으며 양생 후 14일째 되는 날에 습윤 상태와 건조 상태 시료의 열전도도를 측정하였다.

### 2.2.2 점도 측정 시험

본 연구에서 그라우트재의 열전도도와 더불어 그라우트 교반 후 시간에 따른 점도의 변화를 분석하였다. 점도측정은 사진 3(a)의 진동방식의 점도계를 이용하여 수행하였다. 진동식 점도 측정기는 측정부의 판(plate)이 진동(진동수 30Hz)하면서 유체나 Gel의 점도를 측정하는 방법으로써 시간에 따른 점도의 변화를 자동으로 측정할 수 있으며 점도 측정 범위는 0.003~120P(poise =g/cm·s) 까지 이다. 점도는 교반 완료 즉시 점도계용 케이스에 넣고 시간에 따른 점도를 측정하였다. 점도계 케이스 역시 온도변화를 줄이고 일정한 온도를 유지하기 위해 사진 3(b)의 water jacket을 가진 틀을 제작하였으며 온도유지는 열전도 측정 시와 마찬가지로 사진 2(b)의 항온수조를 이용하였다.

### 3. 시험 결과 및 분석

#### 3.1 열전도도 측정 시험

##### 3.1.1 벤토나이트계 그라우트

###### (1) 순수 벤토나이트의 열전도도

일반 시추용 벤토나이트 슬러리를 혼합할 때 전체 슬러리 무게에 대하여 보통 8~10%의 벤토나이트를 사용하지만 지중 열교환기의 그라우트 재료로 사용할 경우 현장에서는 보통 15%~25%의 벤토나이트 분말을 물과 혼합하여 사용하고 있다. 따라서 본 실험에서는 20%와 30%를 기준으로 순수 벤토나이트의 열전도도를 평가하였다. 일반적으로 벤토나이트는 free swelling 값이 20ml/2g의 팽윤도를 가지고 있어서 실제 함수비 200% 이상에서도 교반이 잘 되지 않을 만큼 높은 점도를 갖는 특성을 나타내고 20%에서 30%로 무게비가 증가함에 따라 점도 역시 증가 하는 경향을 보인다.

무게비 20% 순수 벤토나이트 9종에 대한 열전도도 실험결과, 그림 4에서 보듯이 평균적으로 0.74~0.81

$W/m^{\circ}C$ 의 열전도도를 나타냈고 무게비 30% 순수 벤토나이트인 경우에는 그림 4에서 보듯이 0.76~0.95  $W/m^{\circ}C$ 의 열전도도를 갖는 것으로 측정 되었다. 국내 제품과 수입 제품 벤토나이트의 열전도도는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 대체적으로 벤토나이트의 함량을 20%에서 30%로 증가 시켰을 때 벤토나이트 종류에 따라 작게는 2.7%에서 크게는 25%까지 열전도도가 증가하였다.

벤토나이트의 함량 증가가 열전도도를 증가시키는 이유는 벤토나이트 슬러리 입자사이의 공극이 줄어들

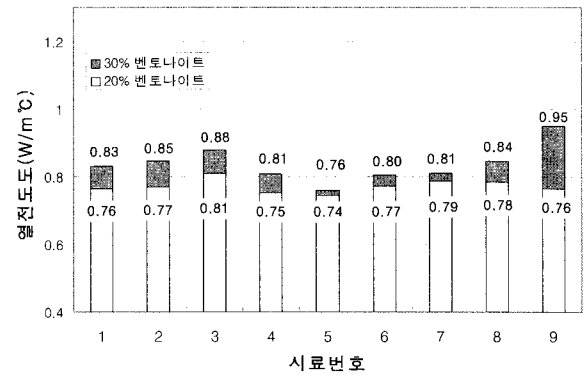
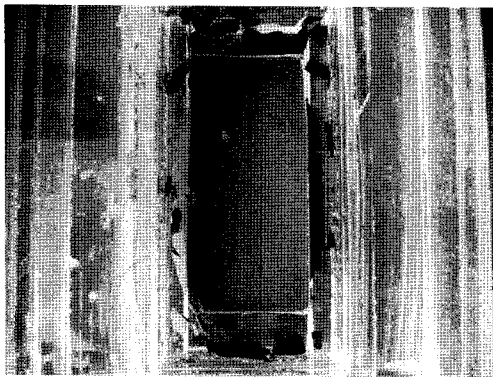
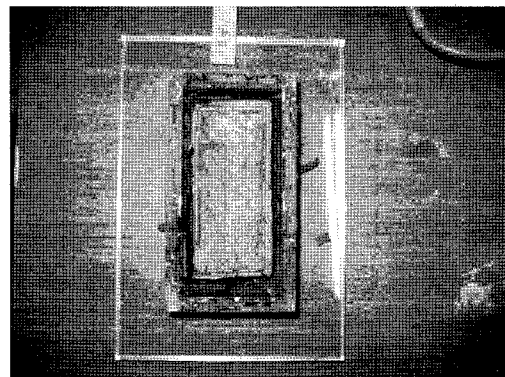


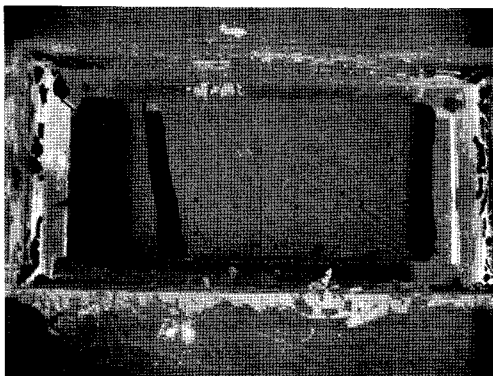
그림 4. 무게비 20%, 30% 순수 벤토나이트의 열전도도



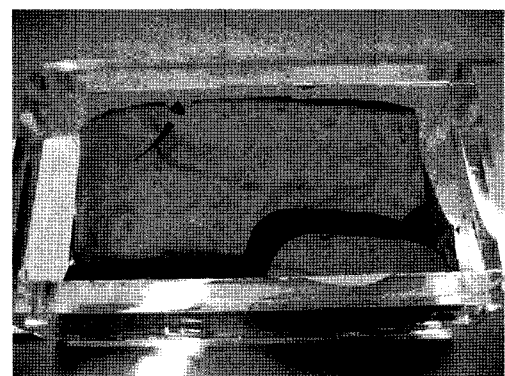
(a) 벤토나이트 1



(b) 벤토나이트 2



(c) 벤토나이트 8



(d) 벤토나이트 9

사진 4. 건조상태시 벤토나이트의 수축과 크랙 발생

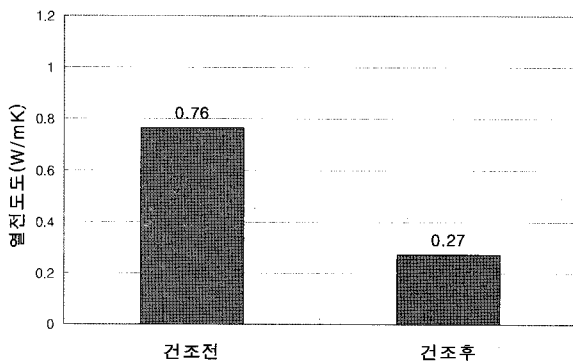
는 효과로 인한 것이라 판단된다. 벤토나이트 함량 20%인 경우 수입 제품이나 국산 제품에서 비슷한 열전도도가 측정되었다. 벤토나이트 9의 경우에는 벤토나이트 함량이 20%에서 30%로 증가할 때 열전도도가 현저한 증가를 보이는데, 이는 제품의 추천 혼합비인 26%보다 적은 벤토나이트 혼합비(즉, 20%)에서 벤토나이트의 열전달 능력이 추천 혼합비의 열전도도 보다 상당히 감소하는 것으로 보인다. 또한, 벤토나이트 9의 경우, 제품 생산 시에 열전도도 향상을 목적으로 천연규사가 일정량 포함되어 있어서 벤토나이트의 무게비 30%의 다른 제품에 비해 높은 열전도도가 측정되었다. 이는 다른 벤토나이트의 경우에도 적절한 양의 천연규사를 혼합하여 열전도도를 높일 수 있다는 의미로 해석할 수 있을 것이다.

건조 시, 열전도도 측정은 벤토나이트 시험체가 사진 4에서 보는 것처럼 심하게 갈라지고 수축하여 변형이 심하므로 열전도도의 감소 경향을 확인할 수 있으나 전반적으로 정확한 값을 측정하기가 어렵다. 실제로 10일간 공기 중에 방치하였을 경우 50%정도의 부피변화가 발생하였고, 건조 시 측정 가능한 형태를 유지한 시료의 열전도도 측정 결과 함수비를 유지시킨 시료에 비해 20%정도의 열전도 성능밖에 발휘되지 못하였다. 이는 지중 열교환기 시공 시에 고려되어야 할 사항이며 뒤채움 그라우트 시공 시와 시공 후 함수비 유지가 지중 열

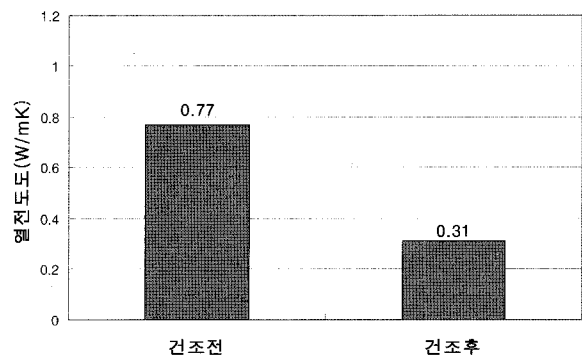
교환 시스템의 효율에 큰 관건임을 보여주는 결과이다. 건조 시 시료의 상태가 열전도도 측정이 가능한 벤토나이트 시료(1, 2)에 대해 열전도도를 측정하고 이때의 함수비를 측정하였다. 측정된 건조 시 벤토나이트의 열전도도는 습윤시와 비교하여 그림 5에 나타났다. 이때의 벤토나이트 1의 함수비는 38.68%, 벤토나이트 2의 함수비는 272.6%로 나타났다. 시료의 바깥 부분보다 시료 안쪽이 수분증발이 어려워 시료의 안쪽부분의 함수비가 조금 높게 나타나므로 시료의 바깥쪽과 안쪽의 평균 함수비를 기록하였다. 시료를 건조시켰을 때 대부분의 경우 심하게 갈라져 crack이 발생하거나 수축이 심하여 QTM-500을 사용하여 열전도도 측정이 용이하지 않지만, 그림 5처럼 함수비 유지의 중요성을 단적으로 보여주는 결과를 얻게 되었다.

(2) 천연규사를 첨가한 벤토나이트의 열전도도

국내 시공현장에서는 벤토나이트의 첨가제로 천연규사를 주로 섞어서 사용하고 있다. Allan와 Philippacopoulos (1999)는 시멘트-모래 그라우트인 'Mix-111'의 예를 통해 천연규사를 첨가한 시멘트계 그라우트의 열전도도가 순수 시멘트 보다 현저히 증가된 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 먼저 천연규사 자체의 열전도도 특성을 파악하고자 공기 중의 천연규사의 열전도도를 측정하



(a) 벤토나이트 1



(b) 벤토나이트 2

그림 5. 건조상태시 벤토나이트의 열전도도 변화 양상

표 5. 천연규사의 열전도도 특성

시료	측정결과(W/m°C)					평균값
	1	2	3	4	5	
물(Reference)	•	•	•	•	•	0.61
천연규사(건조)	0.41	0.43	0.44	0.43	0.42	0.43
천연규사 + 물	2.67	2.66	2.68	2.68	2.67	2.67



고 천연규사를 물에 수침시킨 시료의 열전도도를 측정하여 비교하였다. 공기 중의 천연규사는 보어홀내에서 벤토나이트가 유실되고 지하수위가 하강했을 때 천연규사의 열전달 능력을 대략적으로 확인하기 위함이며 물에 수침시킨 천연규사의 열전도도 특성은 벤토나이트만 유실된 상태의 천연규사의 열전도도 특성을 알아보기 위함이다. 마찬가지로 벤토나이트의 열전도도를 측정 하였던 water jacket이 달린 케이스를 이용하였으며 케이스에 넣은 천연규사의 표면을 매끄럽게 다듬은 후 열전도도 측정하였다. 천연규사에 물을 채워 측정할 경우에는 케이스 안의 물의 높이와 시료의 높이를 같게 맞춰 열전도도를 측정하였다.

건조 시, 천연규사 자체의 열전도도는 물에 수침되었을 때와 비교 했을 때 표 5에서 보듯이 약 16% 정도의 열전도도 밖에 발견되지 못하는 것으로 나타났다. 이 결과는 보어홀 내에 수분의 증발이 열전도도에 치명적인 요인임을 다시 확인하는 결과라고 판단된다. 건조 시, 천연규사가 물에 수침된 천연규사보다 열전도도가 현저히 낮은 이유는 건조된 천연규사의 경우, 공기가 입자 사이에 존재하여 입자간 열전달이 원활 하지 않은 데에서 기인한 것으로 판단되며, 한편 천연규사를 물과 함께 측정할 경우에는 입자간의 공극 사이에 존재하던 공기가 물로 채워지므로 열전도도가 건조상태의 천연규사보다 높게 측정 된 것으로 판단된다. 일반적으로 공기의 열전달계수는 물에 비해 1000배 이상 작은 것으로 알려져 있다.

천연규사를 첨가했을 경우 열전도도 증가 효과를 측정하기 위하여 물과 벤토나이트의 무게비 20%, 30% 시료에 대해 15%, 30%, 45%, 60%의 천연규사를 첨가하여 열전도도 변화 경향을 분석하여 그림 6, 7에 나타냈다.

Allan와 Philippacopoulos(1999)과 조정식(2006)이 보

고하는 바와 같이 천연규사의 함유량이 증가 할수록 열전도도가 증가하는 경향을 보였다(그림 6과 7). 순수 벤토나이트와 비교 했을 때, 상대적으로 열전도도가 높은 첨가제를 넣음으로써 열전도도를 높일 수 있음을 확인

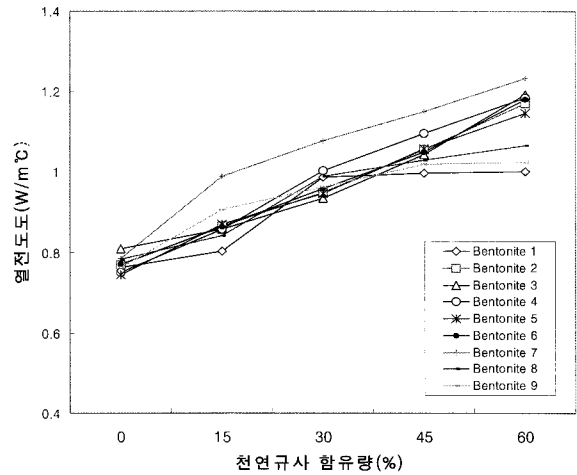


그림 6. 천연규사를 첨가한 20% 벤토나이트의 열전도도

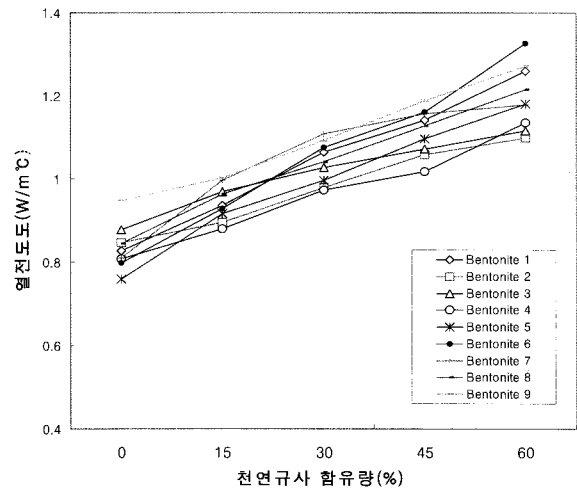
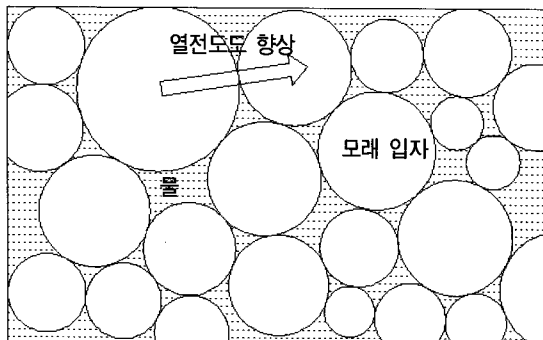


그림 7. 천연규사를 첨가한 30% 벤토나이트의 열전도도



(a) 수침시



(b) 벤토나이트에 첨가시

그림 8. 천연규사의 열전달 패턴

하였다. 15%씩 천연규사의 양을 증가시킴에 따라 열전도도도 값은 약  $0.08 \sim 0.12 W/m^{\circ}C$  씩 증가 하였다. 그러나 순수 천연규사+물의 열전도도( $2.67 W/m^{\circ}C$ )에 비해 낮은 값을 보인다. 이는, 천연규사 자체의 열전도도가 높다고 하더라도 천연규사 입자사이에 벤토나이트가 채워져서 상대적으로 높은 열전도도를 갖는 천연규사 입자와 입자 사이의 열전도 특성을 방해하는 효과로 볼 수 있다. 즉, 물에 수침된 천연규사의 경우는 천연규사 입자간의 직접적인 접촉으로 높은 열전도도를 보인 반면, 벤토나이트와 혼합된 천연규사의 경우는 천연규사가 마치 벤토나이트 슬러리에 부유하는 상태가 되므로 입자간의 직접적인 접촉이 없어 상대적으로 낮은 열전도도를 보인다(그림 8). 반대로 순수 벤토나이트만을 사용하는 입장에서 보면 천연규사를 첨가 할수록 벤토나이트 입자 사이의 열전달 능력이 천연규사로 인해 좋아지는 효과라고 볼 수 있을 것이다. 하지만, 벤토나이트 1의 경우 천연규사의 함유량 증가에 의한 열전달계수 증가가 크지는 않았다. 천연규사가 함유되는 시점에서 열전달계수의 변화는 있었지만 이후 첨가제를 증가시키더라도 큰 변화는 나타나지 않았다. 벤토나이트 1의 경우 다른 벤토나이트에 비해 점도가 낮아 천연규사 함량이 증가하더라도 천연규사의 재료분리로 용기바닥에 침전하는 현상이 발생하는 것이 원인인 것으로 판단된다. 점도가 낮은 벤토나이트와 천연규사의 혼합 시 발생할 수 있는 비중차이에 의한 천연규사의 재료분리는 지중 열교환기의 열전달 효율에 큰 영향을 줄 것이라 예상되고, 벤토나이트와 천연규사의 재료분리에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

### 3.1.2 시멘트계 그라우트

시멘트계 그라우트는 Allan와 Philippacopoulos(1999)이 제시한 배합비와 본 연구에서 추가적으로 시멘트/모래 비를 변화시키고 천연규사의 양을 조절한 배합비(A, B)로 시료를 조성하였다. 시료는 열전도도 측정을 위해 표면을 평평하게 성형 할 수 있는 직사각형 몰드(mold)를 사용하였다. 시료는 성형 후, 수중 양생 14일 경과 후 열전도도를 측정하였다. 측정은 보어홀 내에 지하수의 영향을 고려하기 위해 습윤 상태로 측정하였으며 측정 후 공기건조시켜 건조 상태의 열전도도를 측정하였다. 측정 결과는 그림 9에 나타났다. BNL연구소에서 제시한 'Mix-111' 배합비 경우, Allan와 Philippacopoulos(1999)는 습윤상태의 열전도도는 평균  $2.42 W/m^{\circ}C$ ,

건조상태일때 평균  $2.16 W/m^{\circ}C$ 의 값을 갖는다고 보고 하였으나, 본 연구에서는 그림 9에서 보듯이, 습윤상태의 열전도도는 약  $2.21 W/m^{\circ}C$ , 건조상태일때 약  $1.94 W/m^{\circ}C$  정도로 약간 작게 측정되었다. 이는 배합된 재료의 차이로 기인 한다 볼 수 있다. 하지만, 건조상태의 열전도도가 습윤상태 일때와 비교하여 'Mix-111'의 열전도도가  $0.27 W/m^{\circ}C$ 가량 감소하는 경향은 Allan와 Philippacopoulos(1999)의 결과와 일치한다.

순수 시멘트는 다른 시멘트계 그라우트보다 낮은 열전도도를 나타냈으며 이는 첨가제로 사용한 천연규사의 영향으로 판단된다. 시멘트계 그라우트의 경우, 벤토나이트계 그라우트보다 전반적으로 높은 열전도도 값을 보이거나 일반 시멘트 그라우트에 비해 물/시멘트 비가 낮아 시공 시 어려움이 있을 것으로 판단된다. 지중 열교환기용 시멘트계 그라우트의 경우 유동화제(superplasticizer)를 사용하여 물/시멘트 비를 최소화 시킨 재료이다(Philippacopoulos와 Berndt, 2001).

측정된 시멘트계 그라우트의 열전도도는 순수시멘트(Neat시멘트)를 제외하고 대략  $1.91 \sim 2.38 W/m^{\circ}C$  범위로 벤토나이트계 열전도도보다 높으나 건조 시 크랙이 발생할 가능성이 있고 시간이 지남에 따라 파이프와의 접착력이 떨어져 파이프와 그라우트 사이에 갭이 발생할 가능성이 있다(Paul과 Remund, 1997). 크랙이 발생하는 지점에 따라 감소하는 경향이 다르지만 최대 66%까지 열전달계수(heat transfer coefficient)가 감소하는 것으로 보고하였다(Philippacopoulos와 Berndt, 2001). 시멘트계 그라우트는 벤토나이트계와 마찬가지로 건조 시에 열전도도가  $1.81 \sim 2.00 W/m^{\circ}C$ 로 5~17%까지 감소하였지만 그 폭은 벤토나이트에 비해 작았다. 하지만

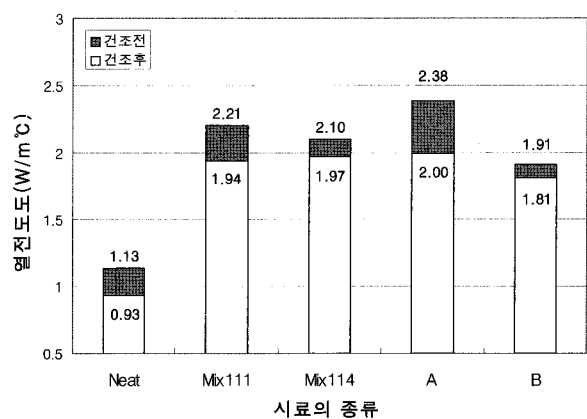


그림 9. 시멘트계 그라우트의 열전도도(건조전/후)

시공 후 건조 상태가 발생할 경우 그라우트의 크랙과 파이프 사이의 갭이 발생할 수 있다는 점을 고려해야 할 것이다.

### 3.1.3 해성점토

해성점토는 국산 지중 열교환기용 뒤택흙재의 대체 재료를 개발하기 위해 본 연구에 고려되었으며 충남 보령의 해성 점토와 화장품용으로 정제된 머드에 대해 실험을 실시하였다. 하지만 일반 해성 점토는 여러 종류의 점토 광물의 혼합물이므로 벤토나이트에 비해 팽윤도가 낮아 기존 벤토나이트 실험에 사용했던 무게비 20%와 30%로 시료를 조성했을 경우(이때 함수비는 약 230%~400%) 대부분 용기 바닥에 침전하게 된다. 따라서 점토를 물에 충분히 침전시키고 침전된 상태의 점토를 채취하여 열전도도를 측정 후 이때의 함수비를 측정하였다. 정제하기 전 해성점토의 경우 함수비는 27.51%였고 이때의 열전도도는  $1.69 W/m^{\circ}C$ 였다. 정제된 점토의 경우 함수비는 61.15%였으며 이때의 열전도도는 1.39

$W/m^{\circ}C$ 로 측정되었다.

### 3.2 점도 측정 시험

벤토나이트의 함량 20%의 경우에 벤토나이트 1과 벤토나이트 3의 시간에 따른 점도변화를 측정하여 그림 10에 온도 변화와 함께 도식했다. 다른 벤토나이트의 경우 교반 중 빠르게 팽윤하여 점도계의 측정범위를 초과하여 비교할 수 없었다. 특히 교반 중 벤토나이트 6과 벤토나이트 9의 점도 증가 속도가 다른 재료에 비해 빠르게 나타났다. 현장 시공 시 벤토나이트 6이나 벤토나이트 9와 같이 팽윤도가 좋은 재료는 반드시 유동화제를 섞어 압송성(pumpability)을 높여 시공해야 할 것으로 판단된다. 항온수조를 이용하여 온도를 조절하였으나 교반 시 사용한 물의 온도와 항온수조간의 온도차로 인해 점도 측정 초기에 시료의 온도가 변하다가 시간이 지날수록 온도는 수렴하는 모양을 나타냈다.

벤토나이트 함량 30% 경우 교반 후 점도를 측정 하였을 때 시료의 점도가 높아 장비의 한계점인 120P를 넘어서서 측정을 하지 못하였다. 벤토나이트 6의 경우는 그림 11과 같이 실험 시작 후 2분여 만에 점도 측정기의 한계점인 120P에 도달하였다.

천연규사를 첨가한 벤토나이트의 점도에서는 천연규사 함유량이 증가함에 따라 점도도 증가하는 경향을 보인다(그림 12). 벤토나이트 1의 경우 앞서 열전도도 실험 결과에서 재료분리 현상으로 인해 천연규사의 침전이 발생하였지만 상대적으로 입경이 작은 천연규사(그림 3에서 보듯이 #200채 통과량이 11.46%)가 침전되지 않고 여전히 남아있을 것이므로 그림 12와 같이 천연규사 함유량 증가에 따라 점도는 증가하는 경향을 보였다.

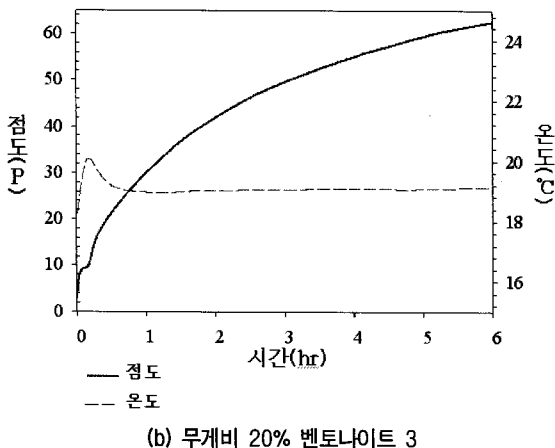
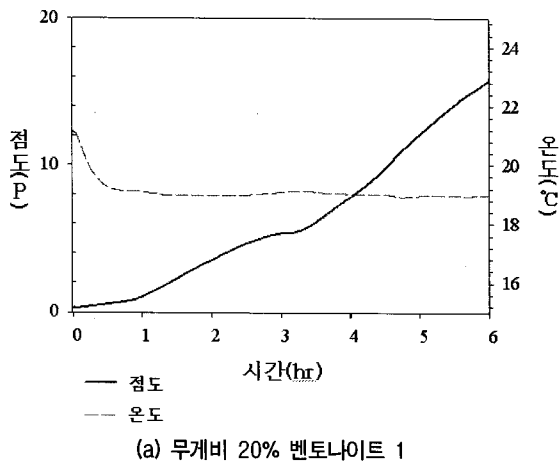


그림 10. 무게비 20% 벤토나이트 1과 3의 시간에 따른 점도 변화

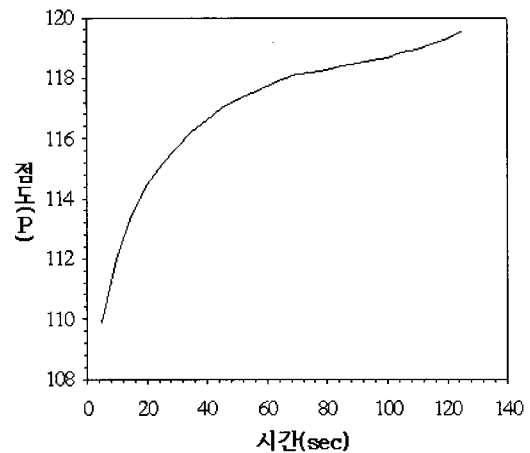
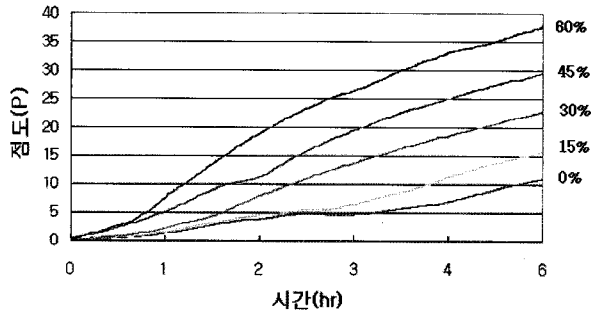
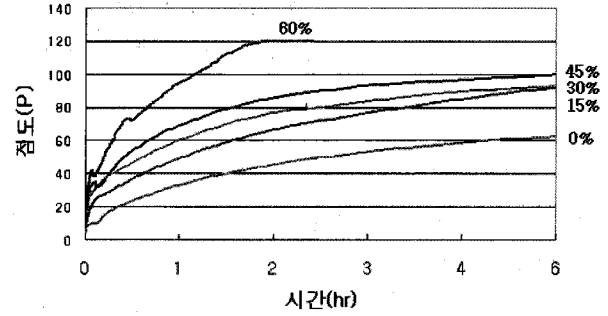


그림 11. 벤토나이트 6의 시간에 따른 점도 변화



(a) 20% 벤토나이트 1



(b) 20% 벤토나이트 3

그림 12. 천연규사를 함유한 벤토나이트의 시간에 따른 점도 변화

이는 열전도도를 측정하는 과정에서 첨가제의 30% 함유량 이상에서 측정값이 약간 증가하는 경향과 일치한다. 벤토나이트 3의 경우도 벤토나이트 1과 마찬가지로 천연규사의 함유량이 증가 할수록 점도도 증가하는 경향을 보였다. 특히 60% 경우 실험시작 2시간 이후부터 120P에 도달하여 이후 실험은 진행 할 수 없었다. 따라서 그라우트재의 열전도성을 높이기 위해 현장에서 순수 벤토나이트와 천연규사를 혼합할 때, 열전도도의 증가와 함께 점도도 증가한다는 사실을 반드시 고려하여 그라우트 주입 시 천연규사 함량 및 주입시간 결정에 반영해야 한다. 또한, 점도가 낮은 벤토나이트의 경우, 천연규사의 재료분리로 인한 열전도 효율감소를 고려해야 한다.

시멘트계 그라우트의 경우 낮은 물/시멘트 비로 인해 점도를 측정할 수 없었으나 시공 시에는 반드시 고려해야 할 것이다. 해성점토의 경우 시료의 침전현상으로 점도를 측정할 수 없었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내에서 사용 중인 9종의 벤토나이트와 해성점토, 시멘트계 그라우트의 열전도도 특성과 점도에 대해 실험적으로 고찰하였다. 벤토나이트계 그라우트의 경우 벤토나이트의 무게비를 20%와 30%로 시료를 조성한 후 열전도도와 점도를 측정하였으며 천연규사를 전체 무게의 15%, 30%, 45%, 60% 만큼 첨가하여 열전도도와 점도를 측정하였다. 해성점토는 점토의 특성상 침전하는 경향으로 침전된 상태의 열전도도를 측정하였다. 시멘트계 그라우트는 기존 문헌에서 제시한 배합비로 조성하고 추가로 시멘트와 모래의 비율을 변화시켜 습윤상태와 건조상태의 열전도도를 측정하였

다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 순수 벤토나이트 그라우트의 경우, 전체 무게에 대한 벤토나이트의 무게비가 20%인 경우에 열전도도가  $0.74 \sim 0.81 W/m^{\circ}C$  이고 30%인 경우는  $0.76 \sim 0.95 W/m^{\circ}C$  로 측정되었다. 이는 벤토나이트 무게비가 20%에서 30%로 증가할 때, 벤토나이트 종류에 따라 작게는 2.7%에서 크게는 25%까지 열전도도가 증가하였다.
- (2) 시멘트계 그라우트의 경우 습윤 시 순수 시멘트일 경우  $1.13 W/m^{\circ}C$ , 시멘트-모래 그라우트의 경우  $1.91 \sim 2.38 W/m^{\circ}C$  이고, 건조 시 순수 시멘트일 경우  $0.93 W/m^{\circ}C$ , 시멘트-모래 그라우트의 경우  $1.81 \sim 2.00 W/m^{\circ}C$  로 측정되었다.
- (3) 해성점토(보령머드)의 경우 정제전 점토는 함수비가 27.51%일 때 열전도도는  $1.69 W/m^{\circ}C$  이고, 정제된 점토의 경우 함수비가 61.15%일 때 열전도도는  $1.39 W/m^{\circ}C$  로 나타났다. 그러나, 해성점토가 벤토나이트에 비해 팽윤성이 현저히 낮아 그라우트 재료로는 부적합 하다는 결론을 내렸다.
- (4) 벤토나이트 그라우트와 시멘트계 그라우트의 경우 건조되어 초기 함수비보다 낮아 질 때 열전도도는 감소한다. 특히, 벤토나이트의 경우 건조 상태일 때, 습윤 상태의 열전도도의 약 20% 이하로 감소한다.
- (5) 벤토나이트계 그라우트에 천연규사를 첨가 할 경우 천연규사의 함유량이 증가함에 따라 열전도도는 약  $0.08 \sim 0.115 W/m^{\circ}C$  증가하지만 벤토나이트의 점도가 낮을 경우 재료분리 현상으로 인해 증가 폭이 크게 감소한다.
- (6) 벤토나이트 그라우트에 첨가제를 넣거나 벤토나이트 무게비를 늘릴 경우 점도가 증가하는 경향을 나

타낸다. 점도 증가는 뒤채움시 압송 효율을 감소시키므로 현장에서 그라우트 배합시 점도 영향을 고려해야 한다.

- (7) 시멘트계 그라우트는 벤토나이트계 그라우트에 비해 2배~3배가량 높은 열전도도를 가지며 건조 시 열전도도 감소폭이 작다. 따라서 지중 열교환용 뒤채움 재료로서 시멘트계 그라우트재의 적용성을 연구할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심D04)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 조정식 (2006), “지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구.”, 산업자원부, 최종보고서 2004-N-GE08-P-01
2. Allan, M. L. and Philippacopoulos, A. (1999). “Properties and performance of cement-based grouts for geothermal heat pump application.”, *U.S. Department of Energy*, Washington D.C..
3. Allan, M. L. (2000). “Materials characterization of superplasticized cement-sand grout.”, *Cement and Concrete Research*, vol.30, pp. 937-942.
4. Paul, N. D. and Remund, C. P. (1997). “Physical, thermal and hydraulic properties of bentonite-based grouts.”, *Electric Power Research Institute*, Final Report No.TR109160, ERI Project RP38 81-1.
5. Philippacopoulos, A. and Berndt, M. L. (2001). “Influence of debonding in ground heat exchanger used with geotherma heat pumps.”, *Geothermics*, vol.30, pp.527-545.

(접수일자 2007. 5. 29, 심사완료일 2007. 12. 24)