

지중 열교환기용 뒤채움재로서 흑연을 첨가한 벤토나이트 그라우트재의 열전도도 및 점도 특성

이철호, 이강자, 최항석[†], 최효범*

고려대학교 건축·사회환경공학부, (주) 전화 기술연구소*

Thermal conductivity and viscosity of graphite-added bentonite grout for backfilling ground heat exchanger

Chulho Lee, Kangja Lee, Hangseok Choi[†], Hyopum Choi*

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

*Managing Director, Research&Development Institute, Kinthua Co.,Ltd, Seoul 135-092, Korea

Abstract

Bentonite-based grouting has been usually used for sealing a borehole installed for a closed-loop vertical ground heat exchanger in a geothermal heat pump system (GHP) because of its high swelling potential and low hydraulic conductivity. The bentonite-based grout, however, has relatively lower thermal conductivity than that of ground formation. Accordingly, it is common to add some additives such as silica sand into the bentonite-based grout for enhancing heat transfer. In this study, graphite is adapted to substitute silica sand as an additive because graphite has very high thermal conductivity. The effect of graphite on the thermal conductivity of bentonite-based grouts has been quantitatively evaluated for seven bentonite grouts from different product sources. In addition, the viscosity of graphite-added bentonite grout was measured to evaluate the field pumpability of the grout.

Key words : Ground heat exchanger, Bentonite grout, Graphite, Thermal conductivity, Viscosity

기호설명

- k : 열전도도, W/mK
 P : 점도, $g/cm \cdot s$)

1. 서 론

최근 국내에서는 정책적으로 온실가스를 저감하도록 하고 신재생에너지를 적극 활용하도록 하

는 녹색성장을 추진하고 있다. 또한 ‘공공기관 신축건물에 대한 대체에너지 이용 의무화 제도’가 현재 국내에서 시행됨으로써 신·재생에너지의 사용이 점차 의무화 되어가고 있다. 신·재생에너지 중 지열에너지는 재생에너지로 친환경적이며 비교갈성이이다. 미국 EPA 보고서에 의하면 지열원을 이용한 냉난방시스템이 가장 에너지 효율적이고 비용효율적인 공조 시스템이라고 보고하였다. 국내의 지열 냉난방 시스템은 수직 밀폐형 지중 열교환기를 적용한 시스템이 주로 시공되고 있다. 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀과 U자

* Corresponding author
 Tel: +82-2-3290-3326; fax: +82-2-928-7656
 E-mail : hchoi2@korea.ac.kr

형 순환 파이프, 그리고 보어홀과 파이프의 빙공 간을 메우는 그라우팅 재료 등으로 구성된다. 이 때 보어홀 그라우팅 재료는 Fig. 1과 같이 지중 열교환기 파이프 내의 순환수와 보어홀 주변 지반 간의 열전달을 촉진하여 열적 단력을 방지하며, 보어홀 주변의 지하수나 지표면 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 차단하는 역할을 한다.

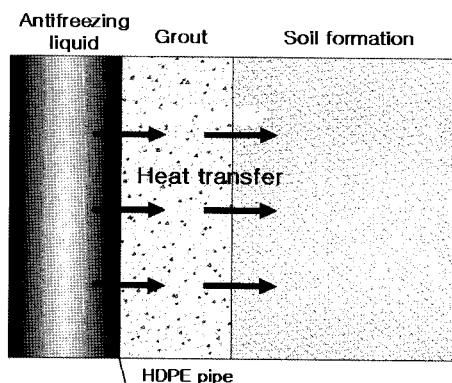


Fig. 1 Heat transfer mechanism in ground heat exchanger (cooling mode)

그라우팅 재료로는 벤토나이트, 콘크리트, 점토, 모래 등으로 다양하며 이 중 국내에서는 주로 벤토나이트를 지중열교환기 뒤채움재로 사용한다. 벤토나이트는 팽윤성 점토광물로 재료자체의 투수계수가 매우 낮고 물과 혼합 시 팽윤하는 성질을 갖고 있기 때문이다. 또한 환경 친화적인 재료로 지중 환경보호 측면에서 타 재료보다 우수한 것으로 알려져 있다.

하지만 국내에서 사용 중인 순수 벤토나이트(벤토나이트+물) 뒤채움재의 열전도도는 약 $0.75\sim 0.83 \text{ W/mK}$ 범위를 갖는 것으로 알려져 있고([1]; [2]; [3]), 이는 주변 지반에 비해 상대적으로 낮은 열전도도를 의미한다[5]. 이러한 점을 보완하기 위한 이전 연구에서는 순수 벤토나이트의 조성비를 변화시키거나 첨가제를 혼합할 경우, 이들의 열특성이 향상된다고 제시하였다. Remund 등[5]은 순수 벤토나이트에 모래나 인조규사 등과 같은 첨가제를 혼합할 경우 열전도도가 향상된다고 밝혔다. 국내의 일부 연구에서는 열전도도를 높이기 위한 첨가제 중 천연규사(silica sand)를 첨가하여 열전도도가 향상됨을 보였다([1]; [2]). 하지만 열전도도

향상을 위해 첨가제를 넣을 경우 벤토나이트 그라우트는 시간에 따라 점도가 증가하는 경향이 있으므로 이를 고려하여 점도가 과도하게 높아지기 전 적절한 시간 내에 시공을 할 수 있어야 한다.

지중 열교환기의 성능이 지열 열펌프 시스템의 전체 성능에 직결될 정도로 시스템에서 지중 열교환기가 차지하는 비중은 매우 크다. 최적의 그라우팅 재료는 또한 파이프의 길이나 보어홀 천공 깊이 등의 감소를 유도하여 시공비 절감을 가져와 경제적인 측면에서 효율이 증대된다. 하지만 이 경우 기본적인 그라우트재와 첨가제의 혼합비율이나 점도 및 유동성 등을 정량적으로 규명할 필요가 있으며 새로운 첨가제들의 개발지도를 통한 지속적인 연구가 요구된다.

본 연구에서는 국내에서 현재 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되는 7종의 벤토나이트 그라우트를 대상으로 하였다. 이에 새로운 첨가제인 흑연을 순수 벤토나이트에 혼합하였을 때 혼합비율에 따른 열전도도와 점도의 변화를 측정하여 결과를 분석하였다.

2. 시료 특성 및 시험 방법

2.1 벤토나이트 시료특성

국내에서 사용 중인 7종의 벤토나이트 시료의 광물구성비를 파악하고자 광물분석 시험인 XRD 시험을 수행하였다. XRD 분석 결과, Table 1에서 보는 바와 같이 Bentonite 2 시료가 가장 많은 몬모릴로나이트를 함유한 것으로 나타났으며 Bentonite 1, Bentonite 3과 Bentonite 7이 비교적 낮은 몬모릴로나이트 함유량을 갖는 것으로 나타났다. 벤토나이트의 팽윤성과 낮은 투수계수 특성은 점토광물 중 몬모릴로나이트의 함량과 관계가 깊다. 몬모릴로나이트는 주변의 수분조건에 따라 팽창과 수축이 크게 발생하며, $600\sim 800 \text{ m}^3/\text{g}$ 의 큰 비표면적을 갖고 있어 다른 광물에 비하여 이온흡착력이 크다. 따라서, 몬모릴로나이트의 함량이 높을수록 팽창성이 높아 뒤채움재로 사용이 적합하다고 할 수 있다. Bentonite 7의 경우 석영(Quartz)을 다량 포함하고 있는 것으로 나타났으며 이는 열전도도 향상을 위해 그라우트 제조과정에서 포함시킨 벤토나이트이다.

Table 1. Mineral composition of bentonite sample (XRD test result)[4]

Mineral Sample	Qtz	Pl	K-f	Hbl	Cal	Mnt	Ill	Kln	Op	Py	Syl
Bentonite 1	4.1	58.0	-	-	1.9	30.6	-	-	3.8	-	1.7
Bentonite 2	4.4	18.8	-	-	3.4	62.9	-	-	0.6	3.3	6.8
Bentonite 3	3.1	52.1	-	-	0.3	38.8	-	-	5.5	-	0.2
Bentonite 4	5.4	34.3	4.3	-	-	43.5	-	-	7.1	-	5.4
Bentonite 5	6.8	29.2	-	9.0	2.0	42.8	-	-	3.3	0.9	6.0
Bentonite 6	5.5	22.1	-	-	4.2	53.7	-	-	10.2	-	4.3
Bentonite 7	44.2	5.3	-	-	12.9	37.7	-	-	-	-	-

* Qtz(Quartz), Pl(Plagioclase), K-f(K-feldspar), Hbl(Hornblende), Cal(Calcite), Mnt(Montmorillonite), Ill(Illite), Kln(Kaolinite), Op(Opal), Py(Pyrite), Syl(Sylvite)

현장에서는 지중 열교환기의 그라우팅 재료로 벤토나이트를 사용할 경우 약 20%~30%의 벤토나이트 분말을 물과 혼합하여 사용한다. 따라서 20% 및 30%를 기준으로 순수 벤토나이트(물 + 벤토나이트)의 열전도도를 측정하였다. Fig. 2와 같이 20% 순수 벤토나이트의 열전도도는 $0.7441 \sim 0.8089 W/mK$ 이며, 30% 순수 벤토나이트인 경우에는 $0.7601 \sim 0.948 W/mK$ 의 열전도도를 갖는다[3].

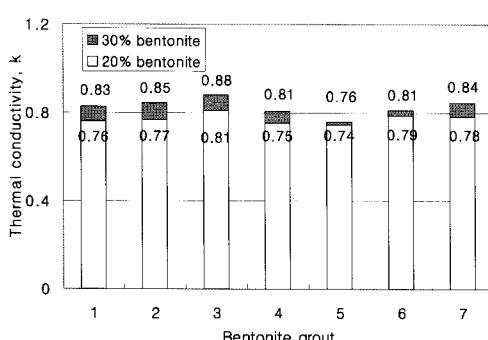


Fig. 2 Thermal conductivity of neat bentonite[3]

2.2 첨가제로서 흑연의 특성

본 연구에 사용된 흑연은 순도 98.5% 이상이며 평균입도 $8\mu\text{m}$, 입도분포는 $0 \sim 50\mu\text{m}$ 범위를

갖는다. 흑연의 결정형은 육방정계로 탄소가 육각형 모양으로 연결되어 있고 이러한 육각형이 판상체를 이루면서 연속된 층을 형성한다. Fig. 3은 흑연의 현미경 사진으로 판상체임을 확인할 수 있다.

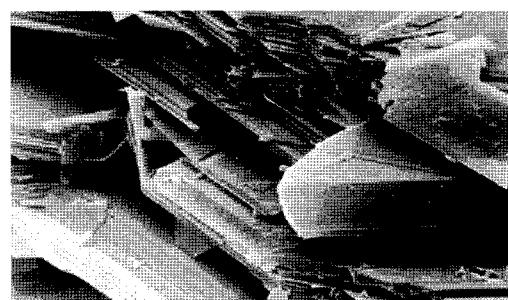


Fig. 3 Microscope photo of graphite[6]

흑연 입자의 열전도도는 육각판상인 xy축 방향의 평면에서는 $400\sim1000 W/mK$ 이며 비등방성인 z축방향의 평면에서는 약 $15 W/mK$ 으로 약 100 배 정도의 차이가 난다[6]. 한편 물에 포화시 다짐을 하지 않은 경우의 물과 흑연 혼합물 시료의 겉보기(bulk) 열전도도는 $4.4 W/mK$ 로 매우 높다.

따라서 본 연구에서는 벤토나이트 그라우트에 흑연을 첨가하여 지중 열교환기의 효율을 증대시킬 수 있도록 하고자 한다.

2.3 열전도도 측정방법

지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료의 열전도도를 측정하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 4의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 열전도도 측정기는 $0.023\sim12 W/mK$ 의 측정범위 및 $\pm 5\%$ 의 정밀도와 $\pm 3\%$ 의 재현성을 갖고며 1회 측정시간은 60초이다. 프로브는 PD-13 모델을 사용하였고 크기는 가로 95 mm, 세로 40 mm이다. 표면에 폭이 1mm인 콘스탄탄 열선이 부착되어 있고, 열선의 중앙에 K-Type 열전대가 용접되어 있다. 열전도도를 측정하는 방식으로는 매질 내의 열선에 일정 열량을 공급하고, 시간에 따른 열선의 상승관계를 구하여 매질의 열전도도를 구하는 비정상 열선법(transient hot wire method)을 사용하였다.

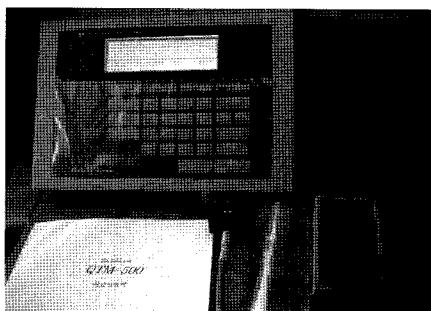


Fig. 4 Equipment for Thermal conductivity of sample (QTM-500)

벤토나이트-흑연 혼합물 시료를 제조하기 위해 먼저 벤토나이트, 물, 흑연의 중량을 배합비에 따라 측정하여 혼합기(mixer)를 이용하여 혼합하였다. 실험에 사용된 시료는 모두 점성을 갖는 교질화(gel-type) 재료이므로 일정한 시료의 형태를 유지하기 어렵기 때문에 가로 110mm, 세로 60 mm 크기의 시료 성형틀을 제작하여 사용하였다. 그리고 시료 성형틀에 water jacket를 이용하여 항온수조를 연결하고 일정온도(20°C)를 유지시켜 외부 온도의 영향을 최소화시켰다.

일반적으로 벤토나이트는 물을 흡수하면서 부피가 팽창하는 성질을 갖고 있으므로 혼합 후 시료 성형틀에 넣어 6시간이 경과한 후 5회 측정을 하였다.

2.4 점도 측정방법

본 연구에서 그라우트재의 열전도도와 더불어 그라우트 교반 후 시간에 따른 점도의 변화를 분석하였다. 점도측정은 Fig. 5의 진동방식의 점도계를 이용하여 수행하였다.

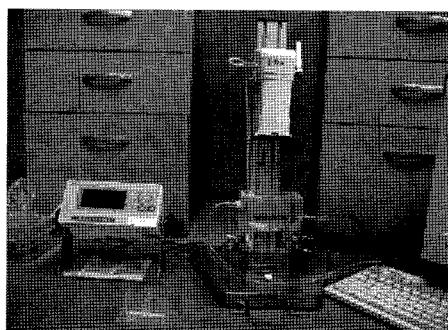


Fig. 5 Equipment for measuring viscosity of sample

진동식 점도 측정기는 측정부의 판(plate)이 진동하면서 유체나 젤의 점도를 측정하는 방법으로써 시간에 따른 점도의 변화를 자동으로 측정할 수 있으며 점도 측정 범위는 0.003~120P까지이다. 점도는 교반 완료 즉시 점도계용 케이스에 넣고 시간에 따른 점도를 측정하였다. 점도계 케이스 역시 외부 온도영향을 최소화시켜 일정한 온도를 유지하기 위해 water jacket을 가진 시료 용기를 제작하여 항온수조를 이용해 일정온도(20°C)를 유지시켰다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 벤토나이트-흑연 그라우트의 열전도도

첨가제로서 흑연을 혼합하였을 경우의 열전도도 향상 정도를 측정하기 위하여 물과 벤토나이트 전체 중량 중 벤토나이트의 중량 비율이 20% (이하 20% 벤토나이트)일 경우와 30% (이하 30% 벤토나이트)일 경우인 순수 벤토나이트 시료에 전체 중량의 5%에서 최대 30%까지 흑연을 첨가하여 열전도도를 측정하였다. 아래 Fig. 6과 Fig. 7은 총 7종 벤토나이트로 구성된 20%, 30% 벤토나이트에 흑연을 첨가하여 측정한 열전도도를 흑연함유량에 따라 나타내었다.

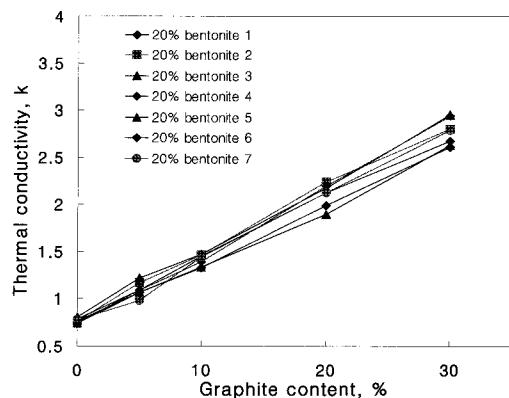


Fig. 6 Thermal conductivity with change in graphite content (20% bentonite)

흑연 자체의 열전도도가 물이나 벤토나이트보다 월등히 높아 흑연함유량이 증가할수록 혼합물

의 열전도도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 20% 벤토나이트에 흑연의 중량비를 10%씩 증가 시킴에 따라 열전도도 값은 약 $0.2\sim0.8 W/mK$ 씩 증가하며, 30% 벤토나이트의 경우에는 약 $0.2\sim1.22 W/mK$ 씩 증가하였다.

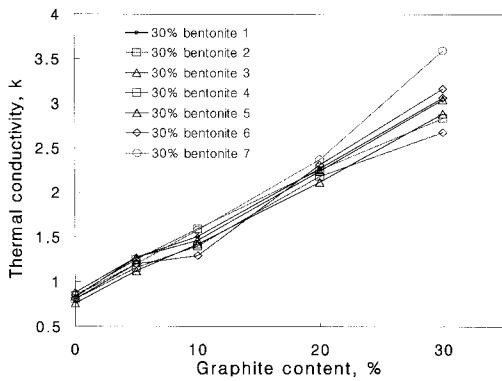


Fig. 7 Thermal conductivity with change in graphite content (30% bentonite)

앞서 서술하였듯이 그라우팅 재료로서 지반과 보어흘 사이의 열적 단락을 방지하기 위해서는 지반의 열전도도(약 $1.7\sim2.1 W/mK$)와 비슷한 열전도도를 갖는 것이 효율적이다. 이를 고려할 때 흑연의 첨가비율은 20%, 30% 벤토나이트 두 경우 모두 10%~20%정도의 흑연 함유가 적합하다.

3.2 벤토나이트-흑연 그라우트의 점도

벤토나이트 그라우트의 열전도도 향상을 위해 첨가제를 넣거나 벤토나이트 중량비를 증가시킬 경우 점도가 증가하여 뒤채움시 압송성(pumpability) 문제가 발생할 수 있으므로 이 또한 고려해야 한다.

20% 벤토나이트의 경우에 한하여 벤토나이트 1과 3의 각 경우에 흑연을 5%에서 30%까지 증가시켜 첨가한 후 시간에 따른 점도변화를 측정하였다. 30% 벤토나이트의 경우와 벤토나이트 1과 3을 제외한 나머지의 경우는 혼합기로 교반 중 빠르게 팽윤하여 점도계의 측정 한계치를 초과하여 측정하지 못하였다. Fig. 8을 보면 흑연을 첨가했을 경우 점도가 증가하며 함유량이 증가할 수록 최대 점도값에 도달하는 시간이 짧다.

20% 벤토나이트 1에 흑연을 첨가하였을 경우를 살펴보면 흑연 첨가비율이 30%일 경우를 제외

한 나머지 경우는 6시간이 지나도 점도가 지속적으로 증가하는 경향을 보이며 흑연 함유량이 높을 수록 점도가 크게 증가하였다.

20% 벤토나이트 3에 흑연을 첨가하였을 경우에는 순수 벤토나이트에 비해 점도가 매우 급격히 증가하여, 점도 최대값에 도달하는 시간이 대략적으로 15분에서 60분 사이로 나타나 매우 빠름을 알 수 있다(Fig. 9).

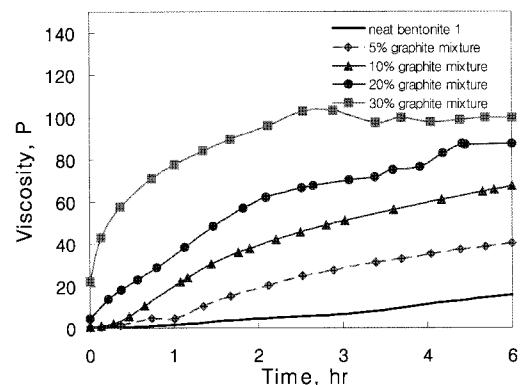


Fig. 8 Viscosity with change in graphite content (20% bentonite 1)

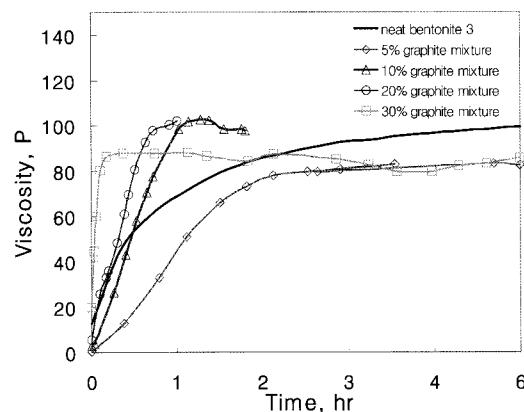


Fig. 9 Viscosity with change in graphite content (20% bentonite 3)

벤토나이트 그라우트 시공 시에는 그라우트재의 시료 혼합 후 1~2hr 내에 주입이 완료되어야 하므로 벤토나이트 3의 경우와 같이 점도가 급격하게 증가하는 경우에는 주의가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되고 있는 7종의 벤토나이트에 대하여 새로운 첨가제인 흑연을 적용하고 열전도도와 점도를 측정하였다. 연구수행 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 순수 벤토나이트에 첨가제인 흑연을 함유량을 증가시키면서 열전도도를 측정한 결과 순수 벤토나이트의 열전도도에 비해 최대 325%까지 열전도도가 증가하였다. 벤토나이트-흑연의 열전도도는 20% 벤토나이트 전체 중량의 10%씩 흑연 함유량을 증가시킴에 따라 열전도도 값은 약 $0.2\sim0.8 W/mK$ 씩 증가하였고, 30% 벤토나이트의 경우에는 약 $0.2\sim1.22 W/mK$ 씩 증가하였다.
- (2) 20% 벤토나이트 1과 벤토나이트 3에 흑연을 첨가하여 함유량을 증가시키면서 시간에 따른 점도변화를 측정한 결과, 흑연 함유량이 증가할수록 점도가 시간에 따라 매우 급격히 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 그라우트재의 열전도도를 향상시키기 위해 현장에서 순수 벤토나이트와 흑연을 혼합할 때 열전도도의 증가와 더불어 점도도 증가하는 것을 고려하여 첨가제 선정 및 주입시간을 결정한다.

후 기

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

참고문헌

1. 조정식, 2006, 지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구, 산업자원부 최종보고서, 2004-N-GE08-P-01
2. 최항석, 이철호, 길후정, 최효범, 우상백., 2007, 수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤채움재의 열전도 및 점도특성 연구, 신재생에너지학회 논문집, Vol. 3, No.4, pp 4-13.
3. 최항석, 이철호, 최효범, 우상백., 2008, 지중 열교환기용 뒤채움재의 물리적 특성 연구, 한국지반공학회 논문집, Vol. 24, No.1, pp 37-49.
4. 최항석, 이철호, 길후정, 이강자, 최효범, 2008, 지중 열교환기용 벤토나이트 그라우트의 시공성에 대한 화학적, 물리적 영향 요소에 관한 연구, 2008 한국지반공학회 가을학술발표회 포스터세션, pp 648.
5. Remund, C.P., and Lund, J.T., 1993, Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical G SHP system, ASME, Heat Pump and Refrigeration System-Design, Analysis, and Applications, Vol. 29, pp 95-106.
6. <http://www.graphite.co.kr/>