

수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤채움재의 열전도 및 점도특성 연구

최 항석¹⁾, 이 철호²⁾, 길 후정³⁾, 최 효범⁴⁾, 우 상백⁵⁾

Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Grouts for Backfilling Ground Heat Exchanger

Hangseok Choi, Chulho Lee, Hujong Gil, Hyopum Choi, Sang-Baik Woo

Key words : Ground heat exchanger(지중열교환기), Grout(그라우트), Thermal conductivity(열전도도), Viscosity(점도)

Abstract : In order to characterize the thermal conductivity and viscosity of grout materials used for backfilling ground heat exchangers, nine bentonite grouts and cement grouts being 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 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 in case of the bentonite grouts. Maintaining the moisture content of grouts is a crucial factor in enhancing the efficiency of ground heat exchangers.

Nomenclature

P : coefficient of viscosity, g/cm · s
K: coefficient of thermal conductivity, W/m °C

1. 서론

우리나라는 에너지 자원 보유량이 부족하여 화석연료의 97%를 수입에 의존하고 있으며 고유가 시대를 대비하기 위한 대체 에너지 개발의 필요성이 증대 되고 있다. 교토 의정서(1997)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 보이고 있다. 지열 냉난방 시스템의 열교환은 지중의 열교환기에서 발생하며 천공구간에 수리적인 불투수성 구간을 만들고 수직 U-bend 내의 순환 유체의 열을 전달시키기 위해 보어홀은 뒷채움재로 채워진다(한정상의, 2005). 지중 열교환기의 효율은 뒷채움재의 열전달 특성에 크게 영향을

받게 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 국내 현장에서 사용 중인 9종의 벤토나이트계 그라우트와 미국에서 개발된 시멘트계 그라우트의 열전도와 점도특성을 분석하였다. 벤토나이트의 경우 벤토나이트 함유량에 따른 열전도도 관계와 첨가제로 인한 특성변화에 대한 실험을 실시하였으며, 시멘트계 그라우트재는 BNL(Brookhaven National Lab)에서 추천한 시멘트-모래 배합비로 시료를 조성한 후 열전도도를 측정하고 물과 시멘트 비율을 변화시킨 후 열전도도를 측정하였다.

- 1) 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수
E-mail : hchoi2@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3326 Fax : (02)928-7656
- 2) 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정
E-mail : cryfreer@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3742 Fax : (02)928-7656
- 3) 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정
E-mail : kilmanner@hanmail.net
Tel : (02)3290-3742 Fax : (02)928-7656
- 4) (주)건화 기술연구소 상무
E-mail : choihp@kunhwaeng.co.kr
Tel : (02)3218-4281 Fax : (02)3218-4201
- 5) 대원토질(주) 이사
E-mail : wsoil@hanmail.net
Tel : (02)511-0600 Fax : (02)544-2408

2. 열전도도 및 점도 측정

2.1 시험 시료

본 연구에 사용된 시료는 현재 국내에서 사용 중인 벤토나이트 9종과 시멘트계 그라우트를 사용하였으며, 첨가제로는 천연규사(7호사)를 사용하였다. 벤토나이트 시료 1-7은 토목 공사용으로 생산된 재료이며 벤토나이트 8은 지중열교환기용으로 쓰이며, 특히 벤토나이트 9는 지중열교환기용 벤토나이트로 제작되어 일정 함량의 천연규사가 제품에 미리 함유되어 현장에서 물과 혼합하여 바로 사용할 수 있는 특성을 가지고 있다. 시멘트계 그라우트는 기존 문헌(Allan와 Philippopoulos, 1999)에서 제시한 배합비로 일반 포틀랜드 시멘트로 배합하였으며 첨가한 천연규사는 벤토나이트 첨가제와 동일한 재료를 사용하였다. 이중 'Mix-111'은 BNL연구소에서 지중열교환기용으로 개발한 뒷채움 재료로써 벤토나이트나 순수 시멘트의 열전도도보다 3배가량 높은 열전도도를 나타내며 습윤상태의 열전도도는 평균 $2.42\text{W/m}^\circ\text{C}$, 건조상태일때 평균 $2.16\text{W/m}^\circ\text{C}$ 의 값을 보인다(Allan와 Philippopoulos, 1999). 본 연구에서는 추가로 물/시멘트 비율을 조절하여 두 가지 시멘트계 뒷채움재를 위한 시료(A, B)를 배합하여 그 특성을 분석하였다.

2.2 시험 장치 및 방법

2.2.1 열전도도 측정 시험

본 연구에서는 그라우트 재료의 열전도도를 측정하기 위하여 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 프로브는 PD-13 모델을 사용하였고, 크기는 $95\text{mm} \times 40\text{mm}$ 이며 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브 표면은 유리섬유로 구성되어 있다. 열전도도를 측정하는 방식은 매질 내의 열선에 일정 열량을 공급하고, 시간의 따른 열선의 온도 상승관계를 구하여 매질의 열전도도를 구하는 비정상 열선법(transient hot wire method)을 사용한다. 시험에 사용한 프로브는 시료의 특별한 가공 없이 열전도도를 측정할 수 있다. 벤토나이트의 경우 Gel-type의 재료이므로 일정한 시료의 형태를 유지하기 어려워 $60\text{mm} \times 110\text{mm}$ 크기의 시료 성형틀을 제작하고 시료 주변에 물이 흐를 수 있는 jacket을 넣고 항온수조를 이용하여 일정한 온도를 유지하면서 열전도도를 측정하였다. 온도는 시료가 충분히 팽윤을 하게 되는 시간(6시간) 동안 일정하게 20°C 로 유지하도록 하였다. 시멘트계 그라우트의 경우 직사각형 몰드에 시료를 성형하여 수중양생 후 14일 시료에 대해 열전도도를 측정하였다.

2.2.2 점도 측정 시험

그라우트재의 열전도도 측정과 더불어 교반 후 시간에 따른 그라우트재의 점도 변화를 분석하였다. 점도측정은 진동방식의 점도계를 이용하여 수행하였다. 진동식 점도 측정기는 측정부의 판(plate)이 진동(30Hz)하면서 유체나 Gel의 점도를 측정하는 방법으로써 시간에 따른 점도의 변화를 자동으로 측정할 수 있으며 점도 측정 범

위는 $0.003\text{--}120\text{P}$ (poise)이다. 점도는 교반 완료 즉시 점도계용 케이스에 넣고 시간에 따른 점도를 측정하였다. 점도계 케이스에도 일정한 온도를 유지하기 위해 water jacket을 가진 틀을 제작하였으며 온도유지는 열전도 측정 시와 마찬가지로 항온수조를 이용하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 열전도도 측정 시험

3.1.1 순수 벤토나이트의 열전도도

일반 토목 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 벤토나이트 무게비 20%와 30%를 기준으로 순수 벤토나이트의 열전도도를 측정하였다. 무게비 20% 순수 벤토나이트 9종에 대한 열전도도 실험결과, 그림 1에서 보듯이 평균적으로 $0.74\text{--}0.81\text{W/m}^\circ\text{C}$ 의 열전도도가 측정되었고, 무게비 30% 순수 벤토나이트인 경우에는 $0.76\text{--}0.95\text{W/m}^\circ\text{C}$ 의 열전도도를 갖는 것으로 측정되었다. 대체적으로 벤토나이트의 함량을 20%에서 30%로 증가시켰을 때 벤토나이트 종류에 따라 작게는 2.2%에서 크게는 24%까지 열전도도가 증가하였다.

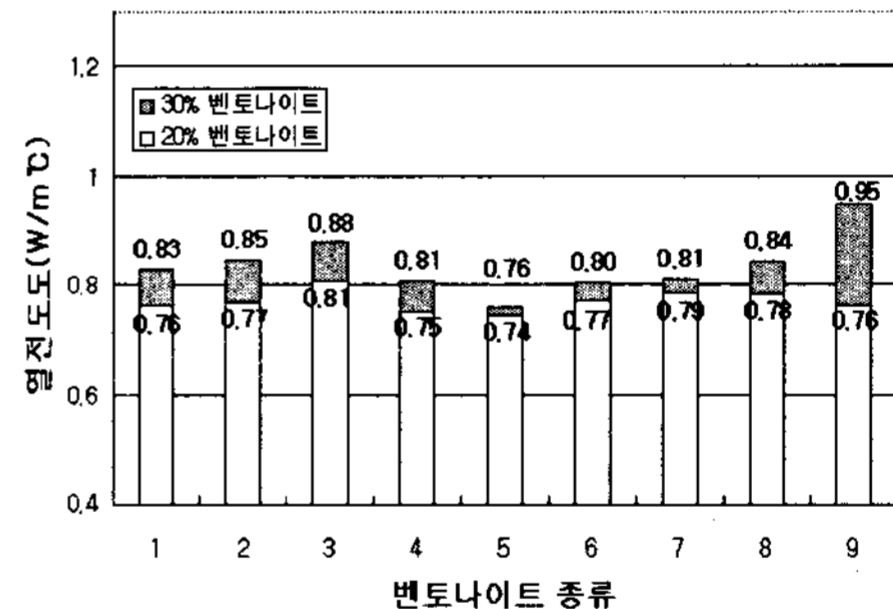


그림 1. 무게비에 따른 순수 벤토나이트의 열전도도

벤토나이트의 함량 증가가 열전도도를 증가시키는 이유는 벤토나이트 슬러리 입자사이의 공극이 줄어들는 효과로 인한 것이라 판단된다. 벤토나이트 9의 경우에는 벤토나이트 함량이 20%에서 30%로 증가할 때 열전도도가 현저한 증가를 보이는데, 이는 제품의 추천 혼합비인 26%보다 작은 벤토나이트 혼합비(즉, 20%)에서 벤토나이트의 열전달 능력이 추천 혼합비의 열전도도 보다 상당히 감소하는 것으로 보인다. 또한, 천연규사가 일정량 포함되어 있어서 벤토나이트의 무게비 30%의 다른 제품에 비해 높은 열전도도가 측정되었다.

3.1.2 천연규사가 첨가된 벤토나이트의 열전도도

우리나라의 경우 순수 벤토나이트에 천연규사를 섞어 사용하는 것으로 알려져 있으며 순수 벤토

토나이트와 비교했을 때 상대적으로 열전도도가 높은 첨가제를 넣음으로써 열전도도를 높일 수 있다(조정식, 2006). 그림 3에서 보듯이, 무게비 20% 벤토나이트의 경우에, 15%씩 천연규사의 양을 증가시키기에 따라 열전도도 값은 약 0.08~0.12W/m²씩 증가하였다. 그러나 순수 천연규사+물의 열전도도(일반적으로 약 2.5W/m² 이상)에 비해 낮은 값을 보이는 이유는 그림 2에서 보듯이 비록 천연규사의 열전도도가 높다고 하더라도 천연규사 입자 사이에 채워진 벤토나이트가 상대적으로 높은 열전도도를 갖는 천연규사 입자와 입자 사이의 열전도 특성을 방해하는 효과로 볼 수 있다(그림 2b).

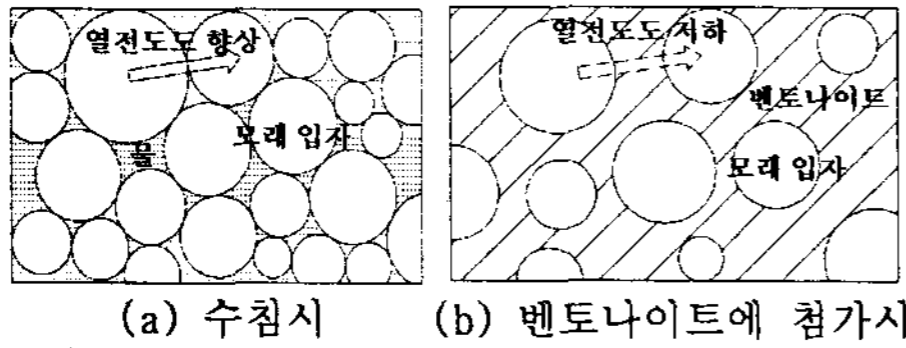


그림 2. 천연규사의 열전달 패턴

벤토나이트 1의 경우 다른 벤토나이트에 비해 상대적으로 점도가 낮아 천연규사 함량이 증가하더라도 천연규사의 재료분리로 용기바닥에 침전하는 현상이 발생하여 열전도도 증가폭이 다른 시료보다 작은 것으로 판단된다.

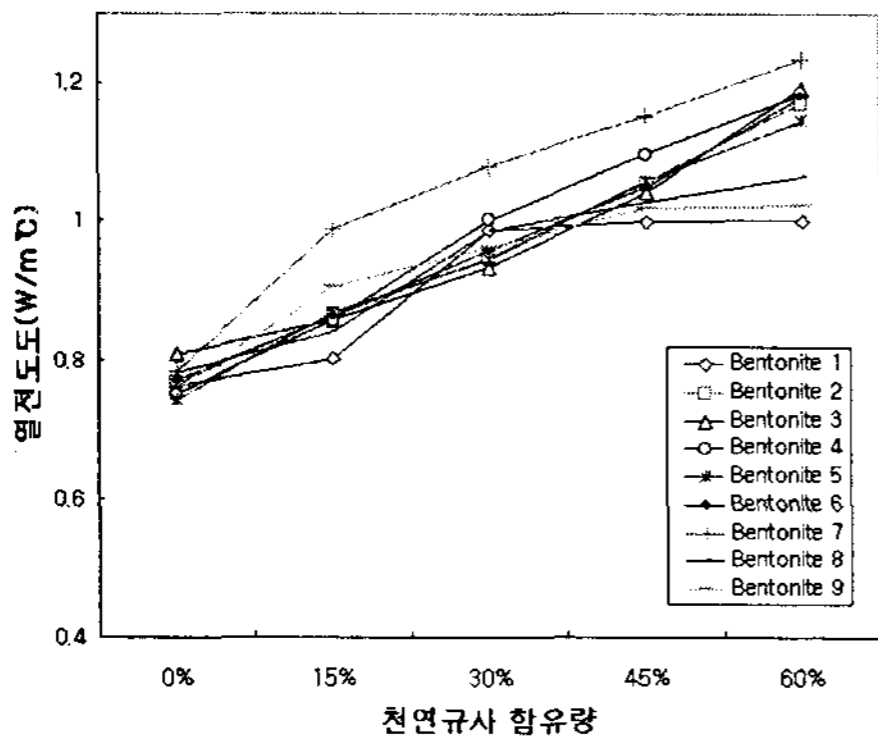


그림 3. 천연규사 함유량에 따른 20% 벤토나이트의 열전도도

시공된 지중 열교환기 주변 지하수위가 하강하여 벤토나이트의 함수비가 감소된 경우를 살펴보기 위해 열전도도 측정을 마친 벤토나이트를 10일간 공기건조 시킨 후 다시 열전도도를 측정하였다. 실험에 사용한 무게비 20% 순수 벤토나이트 시료의 경우 함수비는 400%이며 건조 후 함수비는 재료에 따라서 약 38%~270%까지 나타났다. 건조된 벤토나이트 1과 2의 시료에 대해 측정된 결과 그림 4에서 보듯이 열전도도가 현저하게 저하되는 것을 볼 수 있다. 이는 벤토나이트 그라우트의 경우 함수비 유지가 지중열교환기의 성능 유지 측면에서 가장 큰 영향 인자라고 사료된다.

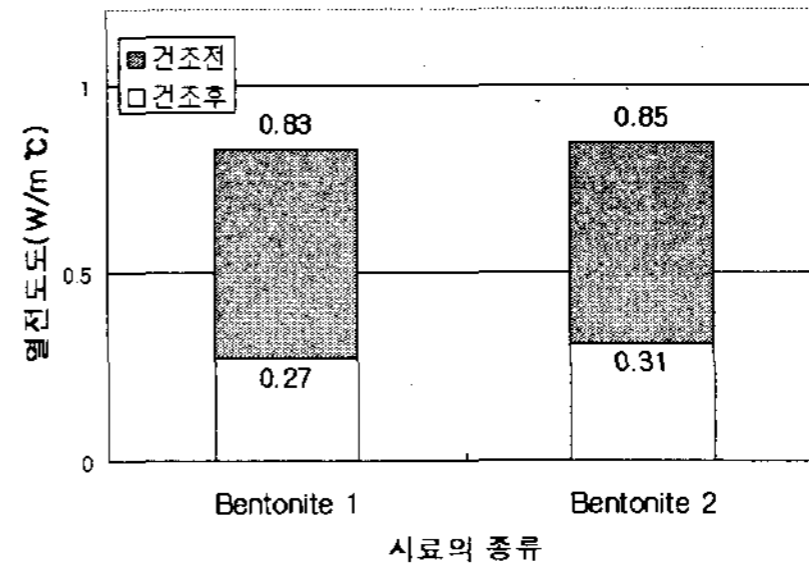


그림 4. 벤토나이트의 열전도도(건조 전/후)

3.1.3 시멘트계 그라우트의 열전도도

시멘트계 그라우트는 Allan과 Philippacopoulos (1999)이 제시한 배합비와 추가적으로 시멘트/모래 비를 변화시키고 천연규사의 양을 조절한 배합비(A, B)로 시료를 조성하였다. 측정은 보어홀 내에 지하수의 영향을 고려하기 위해 습윤 상태로 측정 후 건조 상태의 열전도도를 측정하여 그림 5에 비교하였다. Allan과 Philippacopoulos (1999)는 습윤상태의 열전도도는 평균 2.42W/m², 건조상태일때 평균 2.16W/m²의 값을 갖는다고 보고하였으나, 본 실험에서는 습윤상태에서 2.21W/m², 건조상태에서 1.94W/m² 정도로 약간 작게 측정되었다. 하지만, 건조상태의 열전도도가 습윤상태 일때와 비교하여 'Mix-111'의 열전도도가 0.27 W/m² 가량 감소하는 경향은 Allan과 Philippacopoulos(1999)의 결과와 일치한다. 측정된 시멘트계 그라우트의 열전도도가 대략 1.91~2.38W/m² 범위로 벤토나이트계 열전도도보다 높으나 건조 시 크랙이 발생할 가능성이 있고 시간이 지남에 따라 파이프와의 접착력이 떨어져 파이프와 그라우트 사이에 갭이 발생할 가능성이 있다고 문헌에 보고된 바 있다(Paul과 Remund, 1997). 크랙이 발생하는 위치에 따라 감소율은 다르지만 최대 66%까지 열전도도가 감소하는 것으로 보고하였다(Philippacopoulos와 Allan, 2001). 그러나, 크랙이 발생하지 않는 경우, 시멘트계 그라우트는 건조 시에 열전도도가 오직 5~17%만 감소하며, 그 감소폭은 벤토나이트계의 경우에 비해 상당히 작았다. 시멘트계의 건조 수축 정도와 이로 인한 크랙 발생 그리고 크랙 발생으로 인한 시스템의 열전도도와 차수성 검토에 대한 연구는 현재 진행중에 있다.

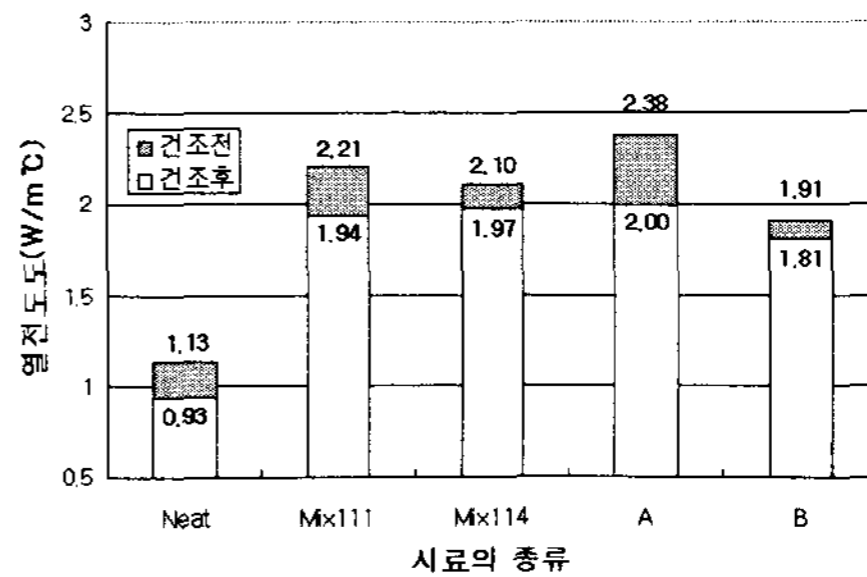
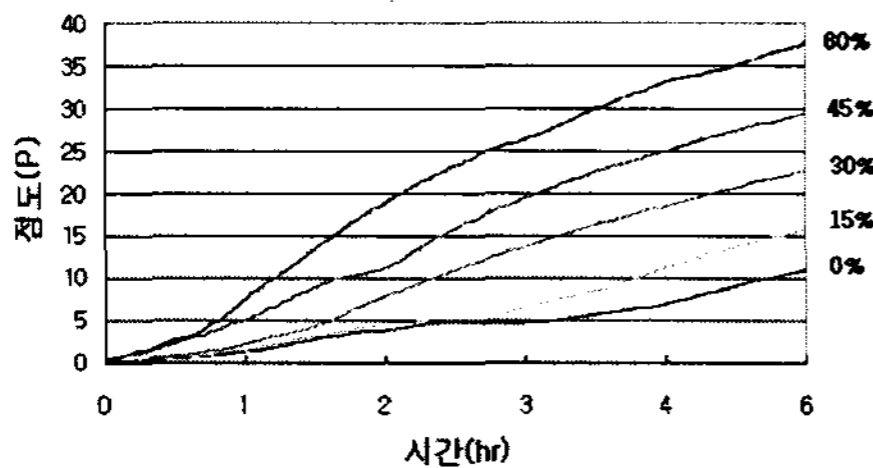


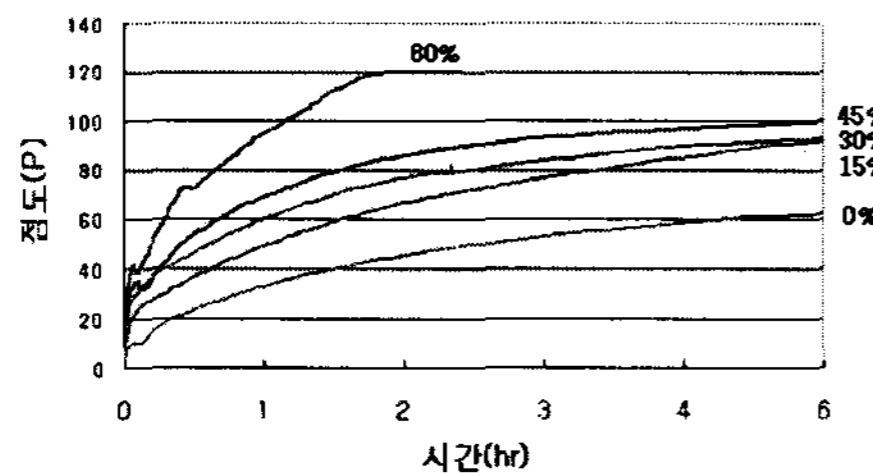
그림 5. 시멘트계 그라우트의 열전도도

3.2 점도 측정 시험

벤토나이트의 함량 20%의 경우에 천연규사 함유량에 따른 벤토나이트 1과 벤토나이트 3의 점도변화를 측정하여 그림 6에 비교하였다. 다른 벤토나이트의 경우 교반 중 빠르게 팽윤하여 점도계의 측정범위를 초과하여 비교할 수 없었다. 현장 시공 시 팽윤도가 좋은 재료는 반드시 유동화제를 섞어 압송성(pumpability)을 높여 시공해야 할 것으로 판단된다. 벤토나이트 1의 경우 앞서 열전도도 실험 결과에서 재료분리 현상으로 인해 천연규사의 침전이 발생하였지만 상대적으로 입경이 작은 천연규사가 침전되지 않고 여전히 남아있을 것이므로 천연규사 함유량 증가에 따라 점도는 증가하는 경향을 보였다. 이는 열전도도를 측정하는 과정에서 천연규사 함유량 30% 이상에서 측정값이 약간 증가하는 경향과 일치한다. 벤토나이트 3의 경우도 벤토나이트 1과 마찬가지로 천연규사의 함유량이 증가 할수록 점도가 증가하는 경향을 보였다. 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.



(a) 20% 벤토나이트 1



(b) 20% 벤토나이트 3

그림 6. 천연규사를 함유한 벤토나이트의 시간에 따른 점도 변화

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 사용 중인 9종의 벤토나이트와 시멘트계 그라우트의 열전도도와 점도 특성에 대해 실험적으로 고찰하였으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 순수 벤토나이트 그라우트의 경우, 전체 무게

에 대한 벤토나이트의 무게비가 20% 일때 열전도도는 0.74 ~ 0.81W/m²C이고 30% 일때 0.76 ~ 0.95W/m²C로 종류에 따라 2.2~24%까지 열전도도가 증가하였다.

- 시멘트계 그라우트는 습윤 시 순수 시멘트일 경우 1.13W/m²C, 시멘트-모래의 경우 1.91 ~ 2.38W/m²C 이고, 건조 시 순수 시멘트일 경우 0.93W/m²C, 시멘트-모래의 경우 1.81~2.00W/m²C 로 측정되었다.
- 벤토나이트계 그라우트에 천연규사를 첨가 할 경우 천연규사의 함유량이 증가함에 따라 열전도도는 증가하지만 벤토나이트의 점도가 낮을 경우 재료분리 현상으로 증가 폭이 크게 감소한다.
- 건조된 상태의 벤토나이트 그라우트는 시멘트계 그라우트에 비해 열전도도 감소폭이 크므로 벤토나이트계의 경우 지중 열교환기 보어홀 내의 함수비 유지가 중요하다.
- 벤토나이트 그라우트에 첨가제를 넣거나 벤토나이트 무게비를 늘릴 경우 점도가 증가하는 경향을 나타낸다. 점도 증가는 뒤채움시 압송효율을 감소시키므로 그라우트 배합시 점도 영향을 고려해야 한다.
- 시멘트계 그라우트는 벤토나이트계 그라우트에 비해 2배~3배가량 높은 열전도도를 가지며 건조 시 열전도도 감소폭이 작아서 지중 열교환용 뒤채움 재료로써 시멘트계 그라우트재의 적용성을 연구할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술 혁신사업(06건설핵심D04)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] 조정식, 2006, "지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구.", 산업자원부, 최종보고서 2004-N-GE08-P-01
- [2] 한정상, 한혁상 외, 2005, "지열펌프 냉난방 시스템", 한림원, pp15-1~15-38
- [3] 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..
- [4] Allan, M. L., 2000, "Materials characterization of superplasticized cement-sand grout.", Cement and Concrete Research, vol 30, pp. 937-942.
- [5] 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.
- [6] Philippacopoulos, A. and Berndt, M. L., 2001, "Influence of debonding in ground heat exchanger used with geothermal heat pumps.", Geothermics, vol30, pp. 527-545.