K93 Spring National Conference 2009 / March 27~28, 2009 / 94eonggi / Korea

# 수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤채움재로서 흑연(Graphite)을 첨가한 벤토나이트 그라우트재의 물리적 특성연구

## Study on physical characteristics of Graphite-added bentonite grout for backfilling closed-loop groud heat exchanger

이강자<sup>1)</sup>, Kangja Lee, 길후정<sup>2)</sup>, Hujeong Gil, 이철호<sup>3)</sup>, Chulho Lee, 최항석<sup>4)</sup>, Hangseok Choi, 최효범<sup>5)</sup>, Hyopum Choi

1)	고려대학교	건축사회환경공학과	석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural.	
			Engineering, Korea University	
2)	고려대학교	건축사회환경공학과	석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural.	
			Engineering, Korea University	
3)	고려대학교	건축사회환경공학과	박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural.	
			Engineering, Korea University	
4)	고려대학교	건축사회환경공학과	부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural.	
			Engineering, Korea University	
-				

<sup>5)</sup> (주)건화 기술연구소 상무, Managing Director, Research&Development Institute,Kunhwa Co.,Ltd.

**SYNOPSIS** : Bentonite-based grouting has been popularly used to seal 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 to the bentonite-based grout for enhancing thermal performance. In this study, graphite is adapted to substitute silica sand as an addictive 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, comparisons of viscosity between applications of graphite and silica sand as additives has been carried out. In conclusion, using graphite has thermal conductivity about three times higher than that of silica sand.

Keywords : Ground heat exchanger, Grouting material, Bentonite, Additive, Thermal conductivity, Viscosity

## 1. 서 론

최근 국내에서는 온실가스를 저감하도록 하는 녹색성장을 추진하고 화석연료의 고갈로 인한 에너지 위기를 극복하기 위해 신·재생에너지 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 이와 함께 '공공기관 신축건 물에 대한 대체에너지 이용 의무화 제도'가 현재 국내에서 시행됨으로써 신·재생에너지의 사용이 증가 하고 있는 추세이다. 신·재생에너지 중 지열 이용 냉난방 시스템은 친환경적이며 비고갈성이다.

국내의 지열 냉난방 시스템은 그림 1과 같이 수직 밀폐형 지중 열교환기를 적용한 시스템이 주로 시 공되고 있다. 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀과 U자형 순환 PE파이프, 그리고 보어홀과 파이 프의 빈공간 사이를 채우는 그라우팅 재료 등으로 구성된다. 이때 보어홀 그라우팅 재료는 그림 2와 같 이 지중 열교환기 파이프 내의 순환수와 보어홀 주변 지반 간의 열전달을 촉진하고, 보어홀 주변의 지 하수나 지표면 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 차단하는 역할을 한다.



그림 1. 수직형 지열 냉난방 시스템 모식도



그림 2. 지중 열교환기의 열전달 메커니즘

벤토나이트, 콘크리트, 점토, 모래 등 다양한 그라우팅 재료 중 국내에서는 주로 벤토나이트를 지중열 교환기 뒤채움재로 사용한다. 팽윤성 점토광물인 벤토나이트는 기본적으로 투수계수가 매우 낮고 물과 혼합 시 팽윤하는 성질을 가지고 있다. 또한 환경 친화적인 재료이므로 지중 환경보호 측면에서 타 재 료보다 우수한 것으로 알려져 있다.

하지만 국내에서 사용 중인 순수 벤토나이트(벤토나이트+물) 뒤채움재의 열전도도는 약 0.75~0.83 *W/m*℃ 범위를 갖는 것으로 알려져 있고(조정식, 2006; 최항석 등, 2007; 2008) 주변 지반에 비해 상대 적으로 낮은 열전도도를 갖는다(Remund와 Lund, 1993). 이러한 점을 보완하기 위한 이전 연구에서 순 수 벤토나이트의 조성비를 변화시키거나 첨가제를 혼합할 경우, 이들의 열특성이 향상된다고 제시하였 다. Remund et al.(1993)은 순수 벤토나이트에 모래나 인조규사 등과 같은 첨가제를 혼합할 경우 열전도 도가 향상된다고 밝혔다. 국내의 일부 연구에서는 열전도도를 높이기 위한 첨가제 중 천연규사(silica sand)를 적용하여 열전도도가 향상됨을 보였다(조정식, 2006; 최항석 등, 2007). 또한 벤토나이트의 그라 우트는 시간에 따라 점도가 증가하는 경향이 있으므로 이를 고려하여 점도가 과도하게 높아지기 전 적 절한 시간 내에 시공을 할 수 있어야 한다.

지중 열교환기의 성능이 지열 열펌프 시스템의 전체 성능에 직결될 정도로 시스템에서 지중 열교환기 가 차지하는 비중은 매우 크다. 또한 전체 공사비 중에서 지중 열교환기 시공비용이 50% 이상을 차지하 므로 최적의 그라우팅 재료를 선정하고 이를 이용하여 시공하는 것이 성능향상이나 경제적인 관점에서 중요하다. 최적의 그라우팅 재료는 또한 파이프의 길이나 보어홀 천공 깊이 등의 감소를 유도하여 경제 적인 측면에서 효율이 증대된다. 하지만 이 경우 기본적인 그라우트재와 첨가제의 혼합비율이나 점도 및 유동성 등을 정량적으로 규명할 필요가 있으며 새로운 첨가제들의 개발의 시도를 통한 지속적인 연 구가 요구된다.

본 연구에서는 현재 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되는 7종의 벤토나이트 그라우트를 대상으로 실험을 수행하였다. 새로운 첨가제인 흑연을 순수 벤토나이트에 혼합하였을 때 혼합비율에 따 른 열전도도와 점도의 변화를 측정하여 천연규사를 첨가제로 사용한 결과와 비교하였고 이를 통해서 흑 연 첨가제에 대한 영향을 고찰하였다.

#### 2. 시료의 특성 및 시험 방법

#### 2.1 흑연의 특성

본 연구에 사용된 흑연은 순도 98.5% 이상이며 평균입도 8µm, 입도분포는 0~50µm 범위를 갖는다. 일반 적으로 쓰이는 천연규사인 7호사의 평균입도 0.11mm에 비하여 매우 작은 크기이며 결정형은 육방정계로 그림 3과 같다.



그림 3. 흑연의 결정구조

그림 3(a)의 결정구조를 살펴보면 탄소가 육각형 모양으로 연결되어 있고 이러한 육각형이 판상체를 이 루면서 연속된 층을 형성한다. 판상체의 상하층간의 거리(3.351Å)가 육각형 고리내의 인접한 탄소간의 거 리(1.421Å)보다 훨씬 크다. 이러한 이유로 흑연의 열전도도는 육각판상인 xy축 방향의 평면에서는 400-1000W/m℃이며 비등방성인 z축방향의 평면에서는 약 15W/m℃으로 약 100배 정도의 차이가 난다. 흑연을 첨가한 그라우재를 사용하여 시공시 그라우트재가 보어홀로 펌핑되어 주입될 때 흑연 입자의 배열 이 바뀌면서 비등방성 열전도도값이 전체적인 평균값으로 나타나게 된다.

최근에 국외에서 지중열교환기를 위한 시멘트 그라우트에 흑연을 첨가하여 4W/m℃정도의 높은 열전 도도를 얻을 수 있는 배합비를 제시한 바 있다. 아주 적은 양의 흑연을 첨가함으로 열전도도를 크게 높 일 수 있기 때문에 흑연을 시멘트 그라우트재 중량비로 5%에서 15%사이를 첨가하는 것이 좋다고 보 고하였다. 또한 흑연의 입자 크기가 10~1000µm사이의 입자크기를 갖고 있지만 200~500µm의 입자크기 를 사용하도록 권장한다(James D. Miller, 2007).

본 연구에서는 벤토나이트 그라우트에 흑연을 첨가하여 지열 냉난방 시스템의 성능을 향상시킬 수 있 도록 높은 열전도도를 얻고자 한다.

### 2.2 시험방법

#### 2.2.1 열전도도 측정

지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료의 열전도도를 측정하기 위하여 본 연구에서는 그림 4(a)의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 열전도도 측정기는 0.023~12 W/m℃의 측정범위 및 ± 5%의 정밀도와 ± 3%의 재현성을 갖으며 1회 측정시간은 60초이다. 프로브는 PD-13 모델을 사용하였고, 크기는 가로 95 mm, 세로 40 mm이며 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브 표면의 재질은 유리섬유로 구성되어 있으며 그림 4(b)와 같다. 이 표면에 폭이 1mm인 콘스탄탄 열선이 부착되어 있고, 열 선의 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.



(a) 열전도도 측정기



(b) 프로브(PD-13)

#### 그림 4. 시험에 사용한 열전도도 측정기(QTM-500)

벤토나이트-첨가제 혼합물 시료를 제조하기 위해 먼저 벤토나이트, 물, 첨가제의 중량을 실험조건에 맞 추어 저울로 측정하여 혼합기(mixer)를 이용하여 혼합하였다. 실험에 사용된 시료는 모두 점성을 갖는 교 질화(gel-type) 재료이므로 일정한 시료의 형태를 유지하기 어렵기 때문에 가로 110mm, 세로 60 mm 크기 의 시료 성형틀을 제작하여 사용하였다.

일반적으로 벤토나이트는 물을 흡수하면서 부피가 팽창하는 성질을 갖고 있다. 따라서 동일 조건에서의 측정을 위해 혼합후 시료 성형틀에 넣어 6시간이 경과한 후 측정을 하였다. 준비된 각 시료를 대상으로 5 회 측정하였으며, 측정장비 주위의 온도변화가 측정결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해 항온수조를 이 용하여 일정한 온도(20℃)를 유지하도록 하였다.

#### 2.2.2 점도 측정

본 연구에서 그라우트재의 열전도도와 더불어 그라우트 교반 후 시간에 따른 점도의 변화를 분석하였다. 점도측정은 그림 5(a)의 진동방식의 점도계를 이용하여 수행하였다. 진동식 점도 측정기는 측정부의 판 (plate)이 진동(진동수 30Hz)하면서 유체나 겔의 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 일 정한 온도를 유지하기 위해 그림 5(b)의 water jacket을 가진 용기를 제작하였으며 온도유지는 열전도도 측정 시와 마찬가지로 항온수조를 이용하였다.



(a) 점도 측정기



(b) 점도 측정용 용기

그림 5. 진동식 점도 측정기 모습

## 3. 시험 결과 및 분석

#### 3.1 벤토나이트-흑연 그라우트의 열전도도

국내 시공현장에서는 벤토나이트의 첨가제로 천연규사를 사용하고 있다. 기존의 연구에서 천연규사를 첨가했을 경우의 열전도도 증가 효과를 측정하기 위하여 물과 벤토나이트의 전체 중량 중 벤토나이트의 중량비율이 20%(이하 20% 벤토나이트), 30%(이하 30% 벤토나이트)인 순수 벤토나이트 시료에 대한 열전 도도를 측정한 후 전체 중량의 최대 60% 까지 천연규사를 첨가하여 열전도도 변화 경향을 분석한 바 있다. 연구 결과를 살펴보면 순수 벤토나이트의 열전도도는 20%일 경우에는 평균적으로 0.74~0.81 W/m℃의 열 전도도를 나타내었고 30%일 경우에는 0.76~0.88 W/m℃을 나타내었다. 벤토나이트의 중량비율을 20%에 서 30%로 증가시켰을 때 작게는 2.2%에서 크게는 10%까지 열전도도가 증가하였다. 또한 벤토나이트에 천 연규사를 15%씩 증가시키며 첨가할 경우 열전도도는 약 0.08~0.12씩 증가하였다(최항석 등, 2007).

본 연구에서 벤토나이트 그라우트가 좀 더 높은 열전도도를 갖도록 새로운 첨가제로 도입한 것이 흑연 (Graphite)이며 천연규사의 경우처럼 흑연을 물과 벤토나이트 전체 중량의 5%에서 30%까지 첨가하여 열 전도도를 측정하였다. 아래 그림 6은 총 7종의 벤토나이트에 대해 벤토나이트-흑연 혼합물 시료의 열전도 도와 벤토나이트-천연규사 혼합물의 열전도도를 첨가제의 중량비율에 따라 비교한 것이다.





그림 6. 벤토나이트 종류에 따라 열전도도에 첨가제 함유량이 미치는 영향

첨가제의 종류를 달리했을 때 그라우트재의 열전도도가 상이했으며, 이는 첨가제 자체의 열전도도와 밀 접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 첨가제의 종류에 상관없이 첨가량이 증가할수록 혼합물의 열전도도가 증가하는 정성적인 경향을 확인할 수 있다.

20% 벤토나이트에 흑연의 중량비를 10%씩 증가시킴에 따라 열전도도 값은 약 0.2~0.8 W/m℃씩 증가 하며, 30% 벤토나이트의 경우에는 약 0.2~1.22 W/m℃씩 증가하였다. 흑연을 첨가로 사용할 경우 순수 벤 토나이트의 열전도도에 비해서 최대 325%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다.

20% 벤토나이트의 경우, 첨가제의 중량비가 동일한 경우(30%)를 비교하면 천연규사를 첨가한 벤토나이 트 그라우트의 평균 열전도도는 0.98 W/m℃이며, 흑연을 첨가한 벤토나이트 그라우트의 평균 열전도도는 2.77 W/m℃로 약 2.8배의 매우 높은 열전도도를 갖으며, 30% 벤토나이트의 경우에도 마찬가지로 흑연의 평균열전도도가 천연규사의 약 3.0배 높다는 것을 확인할 수 있다.

또한 천연규사를 중량비 60%로 첨가하여도 열전도도는 지반의 열전도도(1.7~2.1 W/m℃) 보다 매우 낮 은 약 1.2 W/m℃를 갖는 반면, 흑연을 첨가할 경우에는 약 5% 정도만 혼합하여도 천연규사 60% 경우와 비슷한 열전도도인1.1W/m℃를 얻을 수 있다. 따라서 지반의 열전도도와 유사한 열전도도를 고려할 때 흑 연의 첨가 중량비율은 20%, 30% 벤토나이트의 두 경우 모두 10%에서 20%사이가 적합하다고 할 수 있다.

### 3.2 벤토나이트-흑연 그라우트의 점도

벤토나이트 그라우트에 첨가제를 넣거나 벤토나이트 중량비를 늘릴 경우 점도가 증가하는 경향을 나 타낸다. 점도 증가는 뒤채움시 압송(pumpability) 효율을 감소시키므로 그라우트 배합시 점도의 영향을 고려해야 한다. 기존의 연구에서는 벤토나이트의 함량 20%의 경우 천연규사를 첨가한 벤토나이트 1과 벤토나이트 3의 시간에 따른 점도변화를 측정하였다(최항석 등, 2007). 벤토나이트 함량 30% 경우 교반 후 점도를 측정 하였을 때 시료의 점도가 너무 높아 장비의 한계점인 120P를 넘어서서 측정을 하지 못 하였으며, 벤토나이트 1과 3을 제외한 나머지 벤토나이트의 경우에는 교반 중 빠르게 팽윤하여 점도계 의 측정범위를 초과하여 비교할 수 없었다. 그림 7에서 벤토나이트 1과 벤토나이트 3의 두 경우 모두 천연규사 또는 흑연을 첨가했을 경우 첨가량이 증가함에 따라서 점도가 증가하는 경향을 확인할 수 있 다.



그림 7. 20% 벤토나이트 그라우트의 시간에 따른 점도 변화

벤토나이트 1의 경우, 흑연과 천연규사를 첨가한 경우가 그렇지 않았을 경우보다 시간에 따른 증가 비율 이 크다. 흑연의 경우 천연규사와 동일한 첨가 비율인 30%일 때를 살펴보면 천연규사 첨가시의 점도 최대 값은 22.7P이며 흑연 첨가시는 103P로 천연규사를 첨가한 경우보다 약 4.5배 크다. 또한 천연규사의 점도는 일정시간(6hr)이 지난 후에도 점도가 증가하는 양상을 보이나 흑연의 경우에는 3시간 정도 지나자 일정한 값에 수렴해 나가는 것을 알 수 있다.

벤토나이트 3의 경우에는 천연규사를 중량비 60% 첨가한 경우를 제외한 나머지 경우는 첨가제를 혼합 하지 않았을 경우와 거의 유사한 점도가 측정되었다. 점도가 과도하게 낮은 경우에는 첨가제의 재료분리로 인한 열전도 효율감소를 고려해야한다. 벤토나이트 1의 경우와 마찬가지로 벤토나이트 3의 경우도 흑연과 천연규사를 동일한 중량비율 30%로 첨가시, 점도 최대값을 비교해보면 천연규사는 92P, 흑연은 100P로 비 슷한 값을 가진다. 하지만 흑연을 첨가한 경우 점도의 최대값이 15분 정도 경과후 나타나 천연규사를 첨가 한 경우에 2시간 후부터 최대값에 수렴하는 데에 비해 점도가 매우 빠르게 증가함을 알 수 있다.

따라서 그라우트재의 열전도성을 높이기 위해 현장에서 순수 벤토나이트와 천연규사 또는 흑연을 혼합 할 때 열전도도의 증가와 더불어 점도도 증가한다는 사실을 반드시 고려하여야 한다. 벤토나이트 그라우트 를 시공시에는 그라우트재의 시료 혼합 후 1~2hr 내에 주입을 완료함이 바람직하며 벤토나이트 3과 같이 점도가 급격히 증가하는 경우에는 시공시 첨가제 선정 및 주입시간 결정에 주의가 필요하다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되고 있는 7종의 벤토나이트에 새로운 첨가 제인 흑연을 적용하고 이를 천연규사를 첨가한 경우의 열전도도와 점도에 대하여 비교·분석하였다. 연구 수행 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 순수 벤토나이트에 첨가제인 흑연을 중량비율을 증가시켜가며 열전도도를 측정한 결과 순수 벤토나 이트의 열전도도에 비해 최대 325%까지 열전도도가 증가하였다. 벤토나이트-흑연의 열전도도는 20% 벤 토나이트 전체 중량의 10%씩 흑연의 양을 증가시킴에 따라 열전도도 값은 약 0.2~0.8 W/m℃씩 증가하 였고, 30% 벤토나이트의 경우에는 약 0.2~1.22 W/m℃씩 증가하였다.

(2) 20%, 30% 벤토나이트의 첨가제를 동일한 중량비율인 30%로 혼합할 때 천연규사에 비해 흑연을 혼 합한 벤토나이트 그라우트의 열전도도가 평균적으로 약 3배 크다.

(3) 20% 벤토나이트 1과 벤토나이트 3에 첨가제의 양을 증가시키며 시간에 따른 점도변화를 측정한 결과 천연규사의 경우와 마찬가지로 흑연을 첨가시에도 점도가 시간에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 동일한 첨가제의 중량비율인 30%일 때 흑연이 천연규사에 비해 약 4.5배 정도 높은 점도를 보였다.
(4) 그라우트재의 열전도성을 높이기 위해 현장에서 순수 벤토나이트와 천연규사 또는 흑연을 혼합할 때 열전도도의 증가와 더불어 점도도 증가한다는 사실을 고려하여 첨가제 선정 및 주입시간을 결정한다.

## 감사의 글

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

#### 참고문헌

- 조정식(2006), "지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구", 산업자원부, 최종 보고서 2004-N-GE08-P-01
- 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", 한국지반공

학회 논문집, Vol. 24, No.1, pp 37-49.

- 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.
- 5. Remund, C.P., Schafer, V.R. and Stetson, L.E.(1993), "Bentonite-based backfill mixtures for GSHPs", Final Report, RER Project 91–18, National Rural Electric Coopperative Association
- 6. James D. Miller and Roswell, GA.(2007), "Thermally conductive grout for geothermal heat pump systems", USA, **Patent Application publication**