

지열냉난방시스템 수직형 지중열교환기 그라우트의 열적 특성에 관한 연구

백 성 권[†], 전 중 규, 안 형 준
코오롱건설(주) 기술연구소

A Study on Thermal Conductivity Properties of Ground Heat Exchangers for GSHP systems

Sung-Kwon Baek[†], Joong-Kyu Jeon, Hyung-Jun An

ABSTRACT: Cement mortar and concrete can be used as grouts but problems regarding shrinkage and the discord of coefficients of thermal expansion between grouts and HDPE pipes has to be solved. Thermal conductivities of wet condition two times larger than those of dry condition, except for pure cement mortar. The addition of sand into the cement grouts greatly increases the thermal conductivity. The addition of bentonite into the cement grouts reduces thermal conductivity thus reducing the density. Bentonite grouting must be used only below the groundwater table since bentonite grouts possesses high shrinkage property in dry condition. The addition of sand prevents the shrinkage of bentonite grouts. Bentonite manufactured in Korea can be used since they possess similar thermal conductivities with imported products. The addition of sand into the bentonite grouts greatly increases the thermal conductivity.

Key words: Grout(그라우트), Cement(시멘트), Bentonite(벤토나이트), Ground Source Heat Pump system(지열냉난방시스템), Ground Heat Exchanger(지중열교환기), Thermal Conductivity(열전도)

1. 서론

지열 냉난방 시스템에서 그라우트의 가장 중요한 역할은 지열교환기와 지반의 열적 단락이 발생하지 않도록 하는 것이다. 실내의 열을 열펌프를 통해 운반하는 냉매가 지열교환기를 통과할 때, 열은 그라우트와 지반을 통해 흡수 또는 소산된다. 만약 그라우트가 지열교환기나 지반, 암

반과 확실히 결합된 상태가 아니라면, 그 경계면은 열적 불연속면이 되어 공기 또는 물에 의한 단열층으로 작용하게 된다. 실제 이는 지열 냉난방 시스템의 효율을 크게 떨어뜨리는 주된 요인이 되고 있으며, 주된 원인은 그라우트의 건조 수축, 다른 재료와의 열적 변형 불일치, 그라우팅 방법에 의한 시공 불량 등이다.

시공 시 시추공과 수직 지중열교환기 간의 빈 공간을 가장 이상적인 재료로 채워야 한다. 여기서 이상적인 그라우트라 함은 아래와 같은 특성을 대부분 만족해야 하지만, 실 시공에서 이를 모두 만족하는 재료는 없으며 설계 및 시공자가 환경 조건을 만족하는 최적의 재료를 선정해야 하는

[†] Corresponding author
Tel.: +82-31-329-0638; fax: +82-31-329-0651
E-mail address: eva2k@kolon.com

어려움이 남아 있다(IGSHPA, 1991).

- (1) 지하수와 같은 유체의 흐름을 막을 수 있는 낮은 투수성($1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$)
- (2) 양호한 열전도 특성
- (3) 지열교환기와 시추공 벽을 견고하게 결합 가능
- (4) 그라우트가 접할 지하수 성분 및 변형 물질에 대하여 화학적인 비활성 또는 무반응
- (5) 용이한 혼합성
- (6) 타설 시간 동안의 펌프 가능한 연경도
- (7) 3/4 또는 1 인치 직경의 파이프(트리미)를 따라 시추공 내 타설 가능
- (8) 시추공 내에서 Self-level 가능
- (9) 투수층으로 최소한 침투
- (10) 믹싱과 펌핑 장비에서 청소용이
- (11) 합리적인 가격에서 쉽게 이용 가능
- (12) 취급의 안전성
- (13) 벤토나이트는 최소한 90% 이상의 몬모릴로나이트(Montmorillonite)를 포함하여야 하며, KS A 5101(표준체)의 0.85mm (No.20) 체를 90% 이상 통과하여야 하고, 0.08mm(No.200) 체의 통과량이 10% 이하이어야 한다.(토목공사 일반 표준시방서 및 건축공사 표준시방서의 벤토나이트 방수공)

2. 시멘트 그라우트의 열전도 특성

실험 목적은 시멘트의 열전도율뿐만 아니라 모래와 벤토나이트를 첨가함에 따른 열적 특성 변화를 검토하고자 하는데 있다.

실험에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로서 모래와 벤토나이트 이외의 특별한 첨가제를 사용하지는 않았다. 모래는 Fig. 1, Table 1과 같은 입도 분포를 가지는 표준사를 사용하였으며, 벤토나이트는 GHPC(Geothermal Heat Pump Consortium)에서 추천하는 지열용 벤토나이트인 Thermal Grout 85를 사용하였다.

열전도 측정에 사용한 방법은 비정상면 열원법(TSP)을 이용한 Hot Disk법으로 평균온도 20°C에서 측정하였다. 시료는 H50×R50 mm의 원통형으로 제작하였다. 시료는 지하수위 위의 건조 상태에서의 그라우트와 지하수위 아래의 습윤 상태의 그라우트 조건으로 나누어 실험을 행하였다.

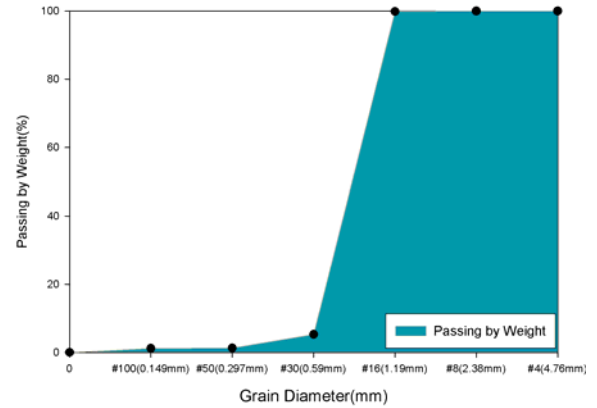


Fig. 1 Grain size analysis of sand

Table 1 Particle diameter information of sand

Physical Properties	Value
Effective Diameter D_{10} (mm)	0.62
Average Diameter D_{50} (mm)	0.87
Uniformity Coefficient C_u	1.52
Curvature Coefficient C_c	0.96

건조 시료는 지하수가 미치지 않는 곳의 그라우트 고결 조건과 유사하게 일반 상온에서 7일간 자연 양생시켰으며, 다시 이 시료를 건조로에 48시간 넣어 완전 건조시킨 후 실험하였다. 습윤 시료는 지하수 아래에 타설된 그라우트의 조건과 일치시키기 위해 7일간 수중 양생하여, 습도를 유지시킨 상태에서 실험 측정하였다.

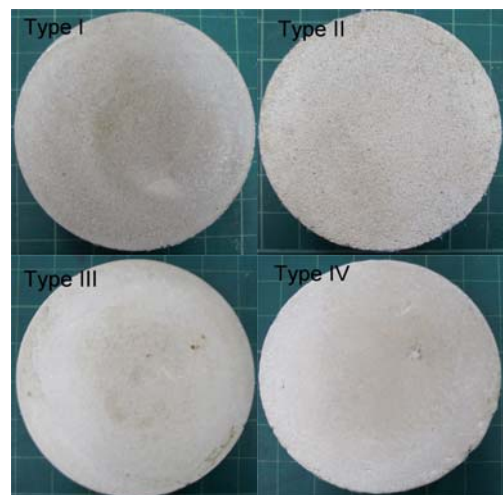


Fig. 2 Cement grout samples.

Table 2 Thermal Conductivity of Cement Grouts

Grout Type	Ratio by Weight(g/g)			Thermal Conductivity (W/m · K)	
	Sand/Cement	Bentonite/Cement	Water/Cement	Dry	Wet
I	0	0	1.0	0.87	1.07
II	2.5	0	1.0	1.25	2.12
III	0	0.2	1.0	0.43	0.83
IV	1.0	0.2	1.0	0.68	1.38

시멘트 무게를 기준으로 각각 모래, 벤토나이트, 물의 혼합비를 달리하여 시료를 성형하였다. 또한 각 시료들은 건조 상태와 습윤 상태로 그 함유 조건에 따른 열전도 특성을 측정하였다. 실험 결과 시멘트 그라우트에 모래를 첨가하였을 경우에 열전도율이 가장 높았으나, 벤토나이트를 첨가한 경우는 열전도율이 가장 낮았다.

열전도 실험 결과를 도식화 한 것이 Fig. 3이다. Type I인 순수한 시멘트 몰탈의 경우 습윤 상태와 건조 상태의 열적 특성 변화는 다른 조건의 그라우트에 비해 상대적으로 차이가 적었다. Type II, IV인 모래를 함유했을 경우 포화되었을 때 가장 열전도율이 크게 개선되었으며, 건조 상태와 습윤 상태 모두에서 다른 그라우트에 비해 열전도율이 큰 편이다.

Type III인 시멘트에 벤토나이트를 첨가한 그라우트의 경우 상대적으로 가장 낮은 열전도율을 보이고 있으며, 이는 방수 성능을 향상하기 위해

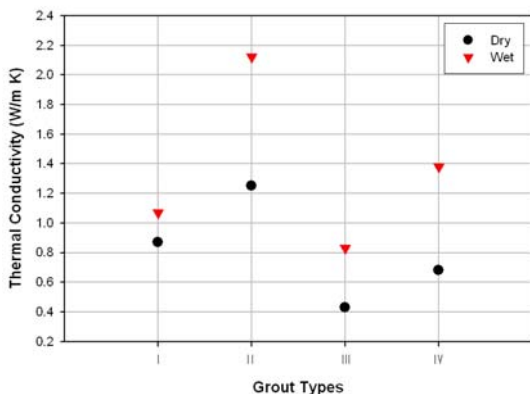


Fig. 3 Comparison of thermal conductivities at wet and dry conditions.

벤토나이트를 시멘트에 첨가할 경우 열전도율은 재료 특성상 가장 낮아지는 불리한 쪽으로 작용하게 된다. 이는 벤토나이트의 팽창에 의해 공기 또는 물입자로 채워진 간극이 다른 그라우트에 비해 커지게 되며, 실제적으로 그라우트에 의한 열전도가 상대적으로 줄어들기 때문이다. 실제로 같은 부피의 그라우트에 비해 벤토나이트를 섞을 경우 그 무게가 상당히 가벼워진다. 즉, 밀도가 상대적으로 작아져 열전도가 불량한 것이다.

전체적으로 순수 시멘트를 제외한 나머지 그라우트의 건조 상태일 때보다 습윤 상태에서 열전도율이 2배 정도 증가함을 알 수 있다.

3. 벤토나이트 그라우트의 열전도 특성

실험의 목적은 해외에서 추천하는 국외 제품과 국내에서 생산하는 국내 제품 간의 열전도율을 측정하여 각 제품 간의 열전도율 크기를 비교하기 위함이다. 또한 추가적으로 모래를 첨가하였을 때의 열적 개선 효과를 판단한다.

사용한 그라우트는 GHPC(Geothermal Heat Pump Consortium)에서 지열용으로 추천하는 Thermal Grout 85와 일반 토목용 방수 그라우트인 Montigel-F와 DY-3, 그리고 제지용 벤토나이트인 Opazil이란 제품들이다.

실험 방법은 비정상 상태의 열탐침법을 사용하였다. 시료는 습윤 상태에서 측정하였으며, 실제 지하수위 아래에서의 그라우트 상태와 일치한다. 건조 상태에 대한 열전도율을 측정하기 위해 시료를 제작하였으나, 측정이 불가하였다. 이는 건조 시 벤토나이트 고유 특성인 팽창성이 감소하여 큰 균열을 동반한 건조 수축이 발생하기 때문이다.

건조 시 벤토나이트 그라우트의 상태는 Fig. 4와 같으며, 모래를 첨가하였을 경우 건조 수축에 의한 부피의 변화는 상대적으로 작은 편이다. 이는 모래의 부피로 인해 벤토나이트의 수축률이 줄어든 것으로, 불가피하게 불포화 지반에 시공해야 할 경우 모래를 첨가하면 성능 저하를 보완할 수 있다.

제지용 벤토나이트의 경우 그 용도 특성상 상당히 점도가 크다. 즉, 그라우팅용으로 사실 부적합 재료라고 할 수 있으나, 벤토나이트 제품의 전체적인 열전도성을 가늠하기 위해 실험하였다.

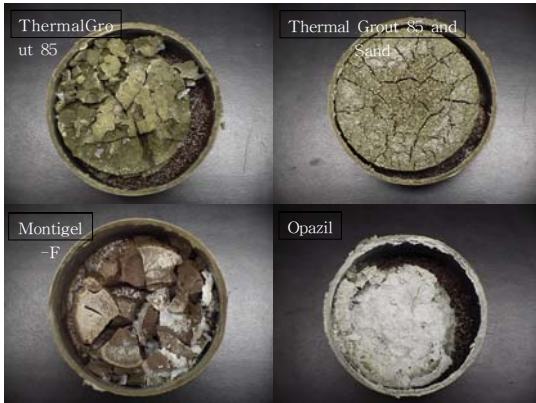


Fig. 4 Dry State by Bentonite Types.

모래를 혼합한 경우 열전도율은 약 1.5배 증가하는 경향을 보이며, 각 벤토나이트 제품 간의 열적 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 국내 제품과 국외 제품 간의 팽창성을 비교하였을 때 국외 제품의 성능이 뛰어났으나, 불투수성에서 성능의 차이란 없었다. 수입 벤토나이트 제품은 국내 제품에 비해 그 가격이 2~5배 정도 비싸지만, 국내 생산 제품의 열전도 특성을 알 수 없다는 이유만으로 무조건 수입 제품을 사용하고 있다.

본 연구 결과에 따라 저가의 국내 제품을 사용할 경우 열전도 문제는 더 이상 언급할 필요가 없을 뿐만 아니라, 비싼 국외 제품을 수입하여 사용하는 것보다는 상대적으로 저렴한 국내 제품을 사용하는 것이 같은 열 성능을 발휘하면서 경제적인 선택이라 하겠다.

4. 현장 열응답 시험 결과 비교

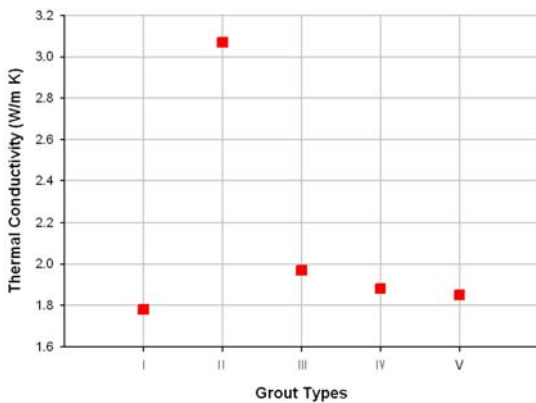


Fig. 5 Comparison of thermal conductivities for bentonite products.

Table 3 Thermal conductivity of bentonite grouts

Grout Type	Ratio by Weight(g/g)			Thermal Conductivity (W/m · K)
	Bentonite Grout	Bentonite Type	Sand/Bentonite	
I	Thermal Grout 85	0	1.5	1.78 ±0.01
II	Thermal Grout 85	1	1.5	3.07 ±0.18
III	Montigel-F	0	1.5	1.97 ±0.07
IV	Opazil	0	1.5	1.88 ±0.04
V	DY-3	0	1.5	1.85 ±0.09



Fig. 6 Injection of cement grout.

지열시스템 운전에 따른 장기적인 열특성 시험 및 각 그라우트 열성능 비교를 위하여 광주 수완코오롱 하늘채 현장에 그라우트 재질별(벤토나이트, 시멘트형(00레미탈), 개발품(레미탈형))로 150m 깊이로 천공을 하고 고밀도 폴리에틸렌 파이프 30mm의 지중열교환기를 설치하였다.

개발 시멘트 그라우트는 초기 건조수축을 최소화하는 배합을 기초로 열전도율이 우수한 강재분말을 첨가하여 열적 성능을 높였다.

그라우트 재질별 열전도도는 아래와 같이 평가되었으며, 개발품이 기존 제품과 비교하여 20% 이상 열전도도가 증가되는 것으로 평가되었다.

5. 결론

(1) 습윤상태, 모래가 첨가되었을 경우 그라우

Table 4 Thermal response test of grouts

Type of Grout	Cement	Bentonite	Developed
Thermal Test Results	2.95 W/mK	2.90 W/mK	3.58 W/mK

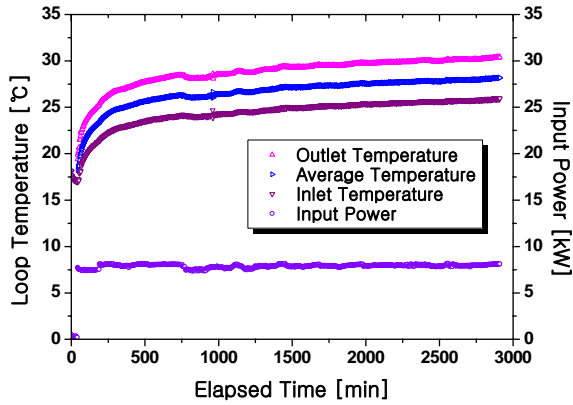


Fig. 7 Thermal test results for bentonite grout.

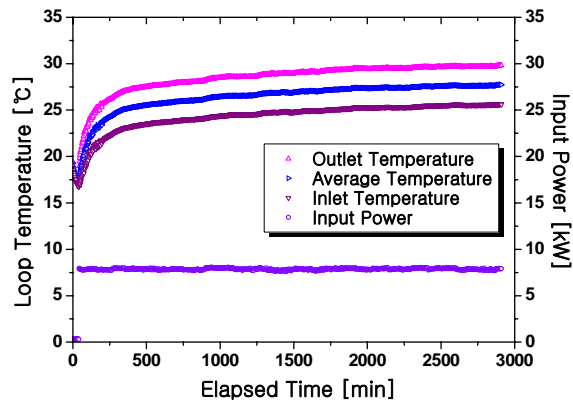


Fig. 8 Thermal test results for cement grout.

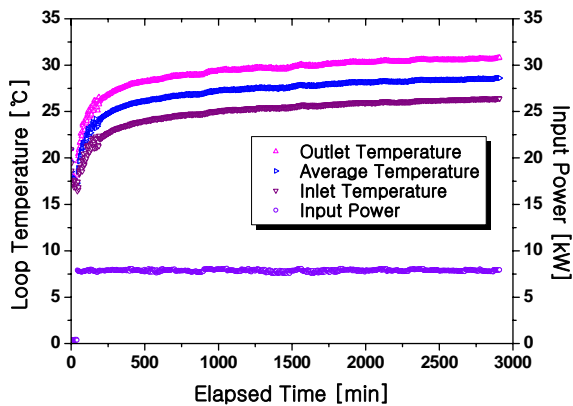


Fig. 9 Thermal test results for developed cement grout.

트의 열적 성능은 더 우수하다.

(2) 개발품 시멘트그라우트가 일반시멘트와 벤토나이트 그라우트보다 열적 성능이 우수하다.

후 기

본 연구는 신재생에너지센터 “공동주택(아파트) 지열냉난방시스템 적용성에 관한 연구” 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Baek, S. K., 2004, “중공말뚝을 이용한 지열냉난방시스템 개발에 관한 연구,” 박사학위논문, pp. 79-99