

지열냉난방시스템 수직형 지중열교환기 그라우트의 열적 특성에 관한 연구

백 성권¹⁾, 전 중규²⁾, 안 형준³⁾

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

Sungkwon Baek, Joongkyu Jeon, Hyungjun An

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

Abstract : 지열 냉난방 시스템의 설계는 냉난방 공간의 크기에 따라 필요한 부하를 계산하여 설계하게 된다. 설계 부하를 충분히 소화할 수 있는 지열교환기의 길이와 보어홀의 깊이 및 개수는 지반의 열적 특성에 크게 좌우된다. 열전도율이 큰 지반일수록 지열교환기 내의 열 흡수 및 소산이 효과적으로 이루어져 지열교환기의 길이도 상대적으로 짧아질 수 있다. 즉, 효율적이고 정확한 설계를 하기 위해서는 지반, 암반 및 지중열교환기의 물리적 특성에 따른 열적 특성을 설계자는 미리 숙지하여야 한다. 현재 국내에서 수직 밀폐형 지중열교환기의 그라우트로 벤토나이트를 가장 많이 사용하고 있으나, 해외의 경우 지중 조건에 따라 시멘트 또는 벤토나이트를 적절히 선택하여 시공하고 있다. 이는 벤토나이트의 특성상 적용 조건이 제약을 받기 때문이며, 특히 지하수가 존재하지 않을 경우 사용이 사실상 불가능하다. 국내에서 이에 대한 충분한 연구는 아직 이루어지지 않았으며, 시멘트 그라우트를 사용하기 위한 물리적, 열적 특성에 대한 연구가 필요한 시점이라 판단하여 본 연구를 수행하였다.

시멘트 그라우트의 경우 수화반응이 일어나는 초기의 건조수축을 최소화하는 배합비로 물성을 구성하였으며, 벤토나이트는 일반 현장 시공 비율을 사용하였다. 열전도율은 첫째 실내 시험으로 시멘트 그라우트에 대한 열관시험법과 벤토나이트 그라우트에 대한 탐침시험법으로 수행하여 구하였으며, 두 번째 방법인 현장 시공으로 직접 현장열응답시험을 수행하여 그라우트 간의 열적 특성을 비교하였다. 또한 기존 시멘트그라우트의 열적 특성을 개량한 코오롱건설에서 개발한 시멘트 그라우트에 대한 열적 거동도 기존 타 그라우트의 열적 거동과 비교하였으며, 개발 제품의 성능이 상당히 우수함을 알 수 있었다.

1. 서 론

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, 암반과 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 지열교환기 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 어려

- 1) 코오롱건설(주) 기술연구소
E-mail : eva2k@kolon.com
Tel : (031)329-0638 Fax : (051)329-0651
- 2) 코오롱건설(주) 기술연구소
E-mail : jkjeon31@kolon.com
Tel : (031)329-0663 Fax : (051)329-0651
- 3) 코오롱건설(주) 기술연구소
E-mail : hjan@kolon.com
Tel : (031)329-0634 Fax : (051)329-0651

음이 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.

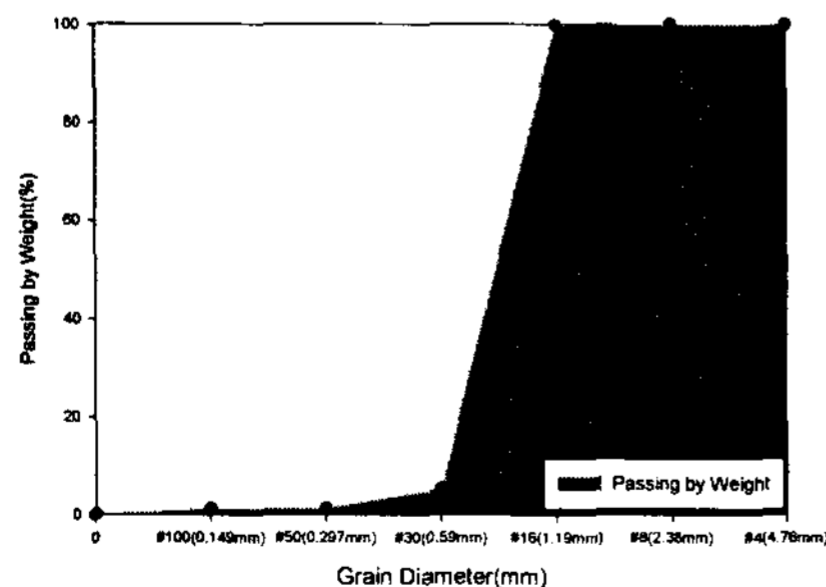


Fig. 1 Grain Size Analysis of Sand

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 상태에서 그라우트와 지하수위 아래의 습윤 상태의 그라우트 조건으로 나누어 실험을 행하였다.

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.

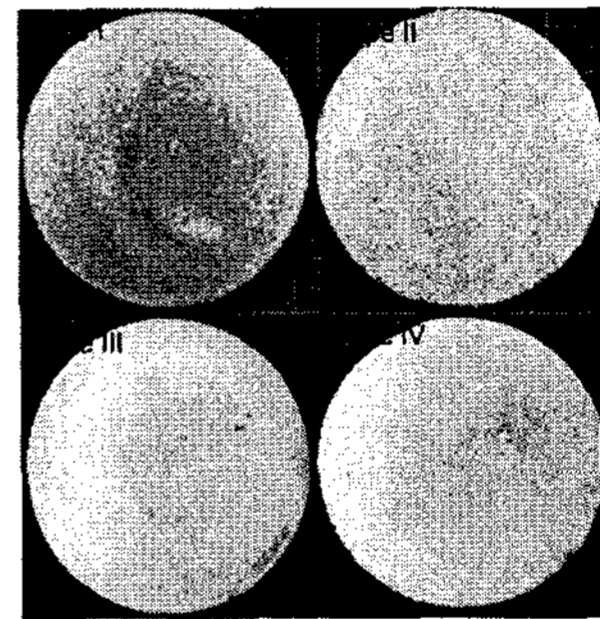


Fig. 2 Cement Grout Samples

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

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

열전도 실험 결과를 도식화 한 것이 Fig. 3이다. Type I인 순수한 시멘트 몰탈의 경우 습윤 상태와 건조 상태의 열적 특성 변화는 다른 조건

의 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.

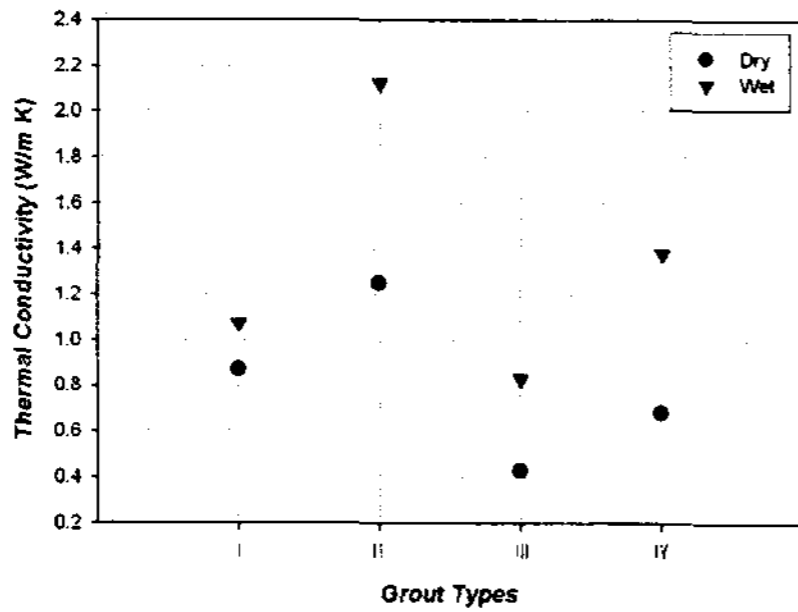


Fig. 3 Comparison of Thermal Conductivities at Wet and Dry Conditions

Type III인 시멘트에 벤토나이트를 첨가한 그라우트의 경우 상대적으로 가장 낮은 열전도율을 보이고 있으며, 이는 방수 성능을 향상하기 위해 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 열침법을 사용하였다. 시료는 습윤 상태에서 측정하였으며, 실제 지하수위 아래에서의 그라우트 상태와 일치한다. 건조 상태에 대한 열전도율을 측정하기 위해 시료를 제작하였으나, 측정이 불가능하였다. 이는 건조 시 벤토나이트 고유 특성인 팽창성이 감소하여 큰 균열을 동반한 건조 수축이 발생하기 때문이다.

건조 시 벤토나이트 그라우트의 상태는 Fig. 5.9와 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.

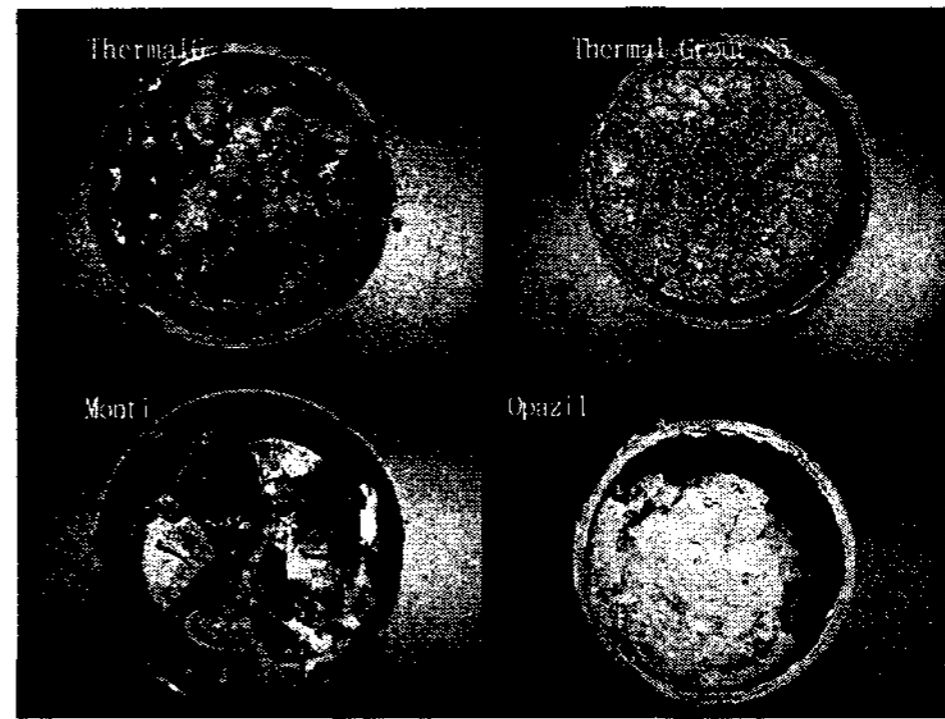


Fig. 4 Dry State by Bentonite Types

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

Table 3 Thermal Conductivity of Bentonite Grouts

Grout Type	Ratio by Weight(g/g)			Thermal Conductivity (W/m · K)
	Bentonite Type	Sand/Bentonite	Water/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

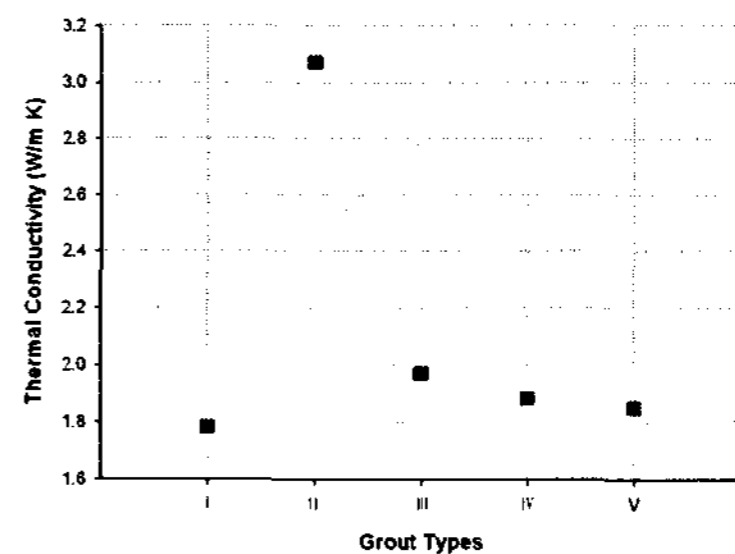


Fig. 5 Comparison of Thermal Conductivities for Bentonite Products

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

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.



Fig. 6 Injection of Cement Grout

개발 시멘트 그라우트는 초기건조수축을 최소화하는 배합을 기초로 열전도율이 우수한 강재 분말을 첨가하여 열적 성능을 높였다.

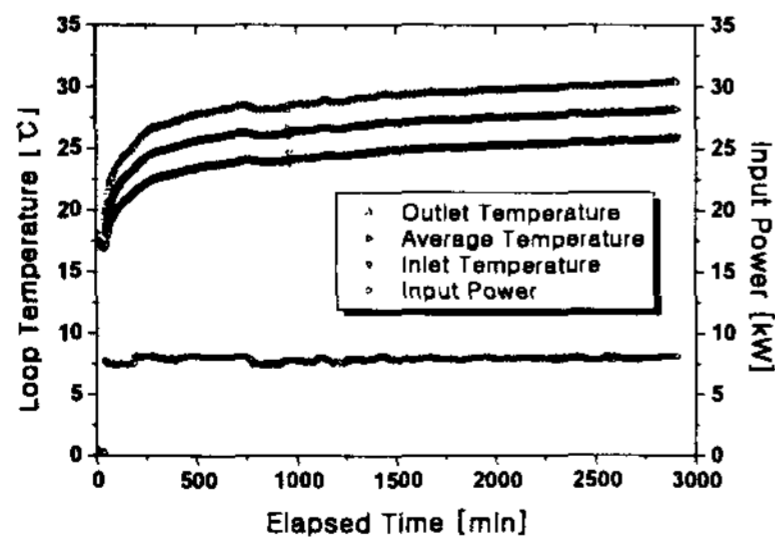


Fig. 7 Thermal Test Results for Bentonite Grout

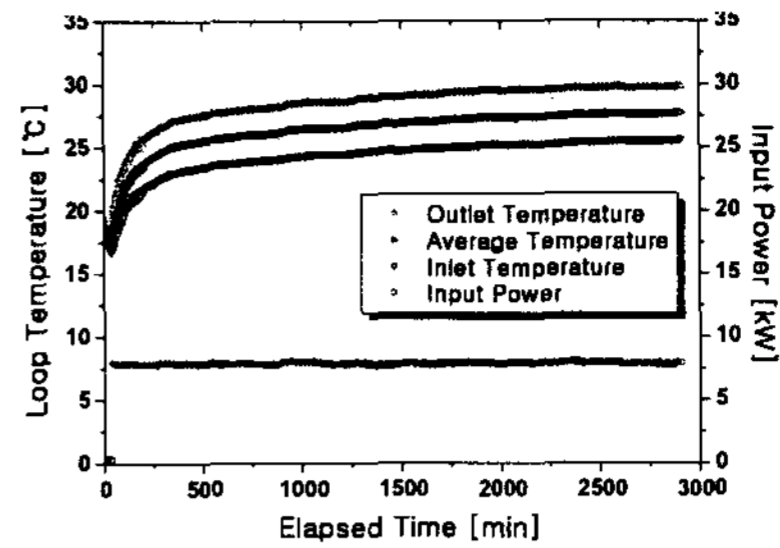


Fig. 8 Thermal Test Results for Cement Grout

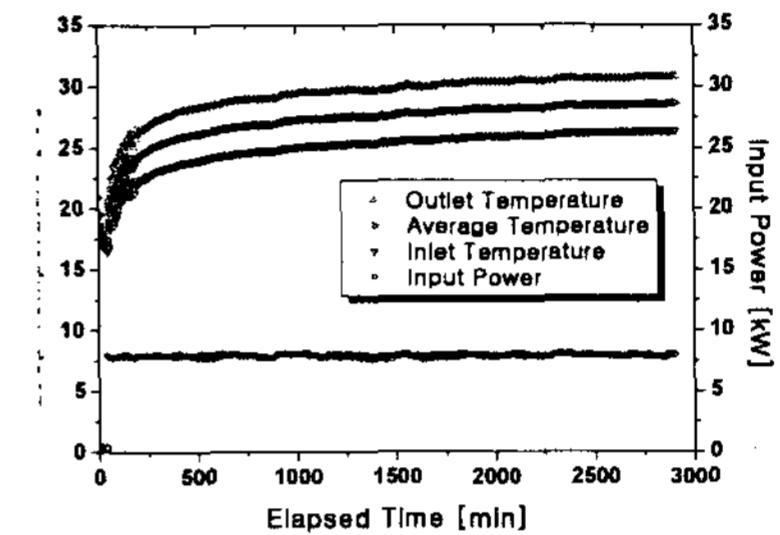


Fig. 9 Thermal Test Results for Developed Cement Grout

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

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

5. 결론

- (1) 습윤상태, 모래가 첨가되었을 경우 그라우트의 열적 성능은 더 우수하다.
- (2) 개발품 시멘트그라우트가 일반시멘트와 벤토나이트 그라우트보다 열적 성능이 우수하다.

후기

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

References

[1] Baek, S. K., 2004, "중공말뚝을 이용한 지열난방시스템 개발에 관한 연구," 박사학위논문, pp. 79-99