

지중 열교환기용 그라우팅

지중 열교환기에 사용되는 그라우트 재료의 특징과 최근 동향을 소개하고자 한다.

최 항 석

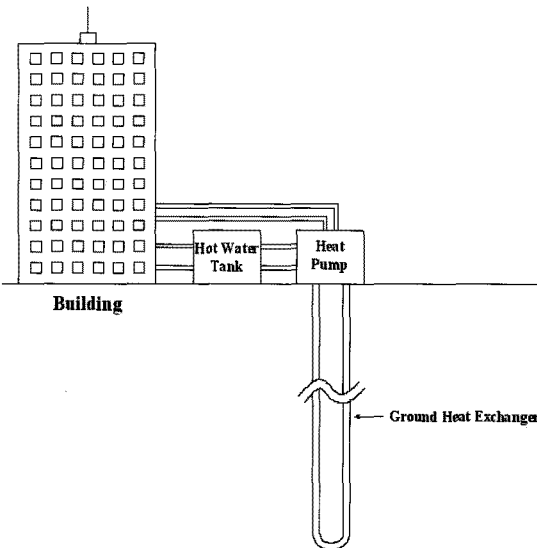
고려대학교 건축·사회환경공학과(hchoi2@korea.ac.kr)

그라우팅의 목적

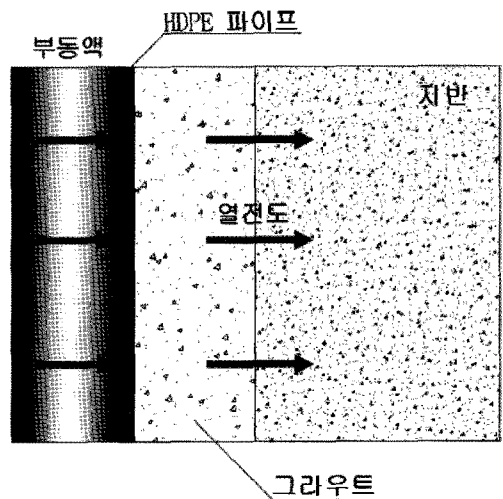
수직 밀폐형 지중 열교환기(Ground Heat Exchanger, 그림 1)에서 그라우팅은 보어홀 벽과 지중 순환파이프 사이의 빈 공간에 낮은 투수성과 양호한 열전도도를 갖는 물질을 채워 보어홀 내로 지하수 유입으로부터 지중 열교환기를 반영구적으로 보호하고, 오염된 지표수의 유입으로 인한 지하수 오염을 방지하

며, 시추공(Borehole)과 지반사이의 열적 단락을 방지하는 목적으로 시공된다. 일반적으로 지중 열교환기에서 그라우팅의 주요 목적은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 천공된 보어홀로 인한 지표에 존재하는 오염물질의 지하수 유입 방지
- 지중 열교환기 보어홀을 따라 발생할 수 있는 상방향 흐름 제어(지하수 유출)
- 보어홀 내의 원활한 열 흐름 유도를 통해 지중 열교환기 효율저하 방지(그림 2)



[그림 1] 지열 냉난방 시스템 모식도



[그림 2] 지중 열교환기 열교환 메카니즘



지중 열교환기용 그라우트 재료의 조건

지중 열교환용 그라우트는 일반적으로 다음의 조건들을 만족하는 재료를 선정하는 것이 합리적이나 모든 조건을 동시에 만족하는 재료는 드물며 시공자가 시공환경에 맞는 재료를 선정해야 하는 어려움이 있다(IGSHPA, 1991).

- 지하수와 지표수 등 유체의 흐름을 차단할 수 있는 낮은 투수성($10^{-7} \sim 10^{-9}$ cm/s)
 - 양호한 열전도성
 - 지중 열교환기와 시추공 벽을 견고하게 결합
 - 시추공 주변 지하수의 화학적 성분 비활성 또는 장기 안정성
 - 첨가제의 재료분리를 방지할 수 있는 점도 유지
 - 용이한 혼합성 및 시공성(pumpability)
 - 경제성
 - 취급의 안정성
 - 지하수 환경을 보존할 수 있는 재료의 친환경성
- 현재 국내 지중 열교환기 시공에 사용되는 그라우팅 재료는 벤토나이트 그라우트가 대부분을 차지한다. 시멘트 그라우트에 비해 벤토나이트 그라우트가 갖는 가장 큰 장점은 시공의 편리함에 있으나 주변 지반에 비해 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는다는 문제점을 가지고 있다.

그라우트재의 종류

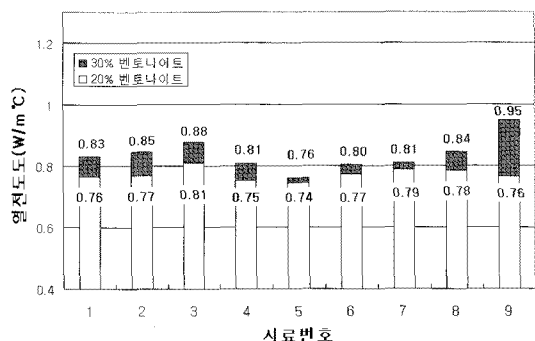
벤토나이트 그라우트

상업용 벤토나이트는 광물학적 또는 물리적인 특징에 따라 일반적으로 나트륨계 벤토나이트(Na-bentonite)와 칼슘계 벤토나이트(Ca-bentonite)로 분류할 수 있다. 나트륨계 벤토나이트는 충분한 물이 공급되었을 때 약 15배 정도 부피가 팽창하는 벤토나이트로서 미국 Wyoming에서 주로 생산되며 낮은 투수계수(10^{-8} cm/sec)를 갖고 소량으로도 큰 체적 팽창효과를 기대할 수 있다. 칼슘계 벤토나이트는 나트륨계에 비해 상대적으로 팽윤성 작으며 주로 미국 남부 지방에서 생산되고 우리나라의 경우 포항, 울산 등지에서 생산된다. 지중 열교환기용 그라우트 재료는 나트륨계 벤토나이트가 적합하며 현재 국내와 세계 각국에서 널리 사용되고 있다.

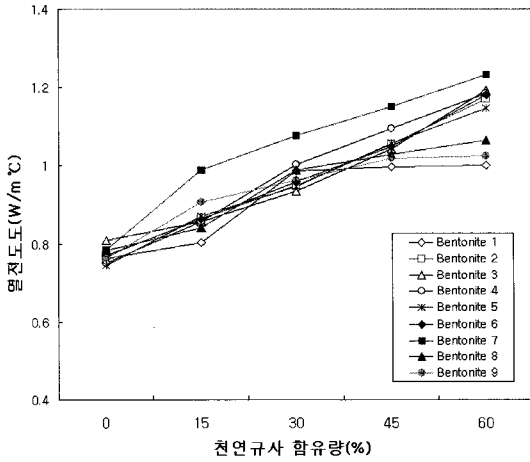
벤토나이트 그라우트는 투수계수가 상대적으로 낮고 팽윤성이 좋기 때문에 토목분야에서도 다양하게 사용되고 친환경적이라 알려져 있다. 하지만, 순수 벤토나이트 그라우트(벤토나이트+물)는 보어홀 주변의 지반에 비해 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는 문제점을 갖고 있다. 따라서, 이러한 단점을 극복하기 위해 여러 첨가제를 혼합하여 열전도도를 향상시키는 노력을 하고 있다.

최항석 등(2007)이 국내에서 현재 사용되고 있는 9가지 지중 열교환기용 벤토나이트 그라우트재의 열전도도를 측정된 결과, 그림 3에서와 같이 순수 벤토나이트의 경우 열전도도가 0.74 ~ 0.95 W/m°C로 물의 열전도도(0.6 W/m°C)보다 약간 높은 열전도도를 갖는 것으로 보고하였다. 그림 3에서 제시된 적용된 순수 벤토나이트 그라우트의 배합비는 20 ~ 30%로 일반적인 시공현장에서 적용하는 배합 범위이다.

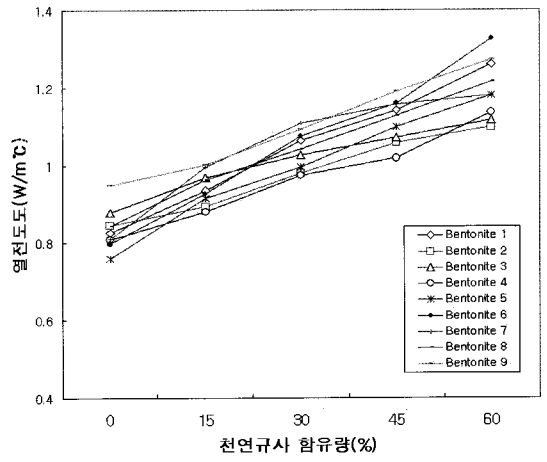
열전도도 향상을 위해 벤토나이트 그라우트에 천연규사(silica sand)를 첨가한 경우, 그라우트 종류에 따라 열전도도 증가율은 다르지만, 그림 4와 그림 5에서 보듯이 기존 문헌에서 언급한 바와 같이 대체로 열전도도가 증가하는 경향을 보인다. 하지만, 실제 현장에서, 과도한 점도 증가로 말미암아 그라우팅 시공성을 저하시킬 수 있는 천연규사 무게비 60% 경우도 열전도도는 오직 1.2 W/m°C 내외로 주변 지반에 비해 상대적으로 작다. 따라서, 천연규사를 첨가해 벤토나이트 그라우트의 열전도도를 향상시키는 방법은 실효성이 크지 않다고 보여 진다.



[그림 3] 배합비 20%와 30% 순수 벤토나이트의 열전도도



[그림 4] 배합비 20% 벤토나이트의 천연규사 함유량에 따른 열전도도

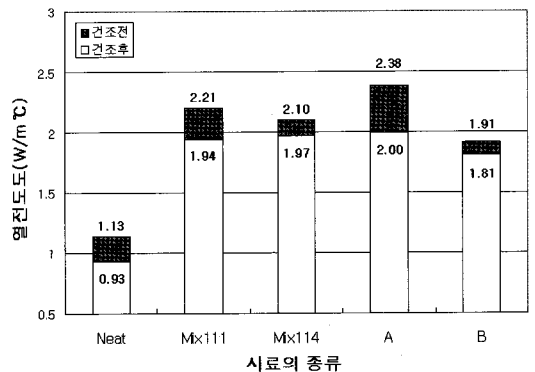


[그림 5] 배합비 30% 벤토나이트의 천연규사 함유량에 따른 열전도도

시멘트 그라우트

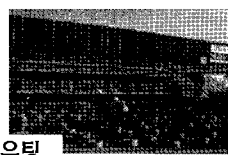
시멘트는 일반적으로 토목공사에 사용되는 재료로서 물과 혼합하였을 때 페이스트 (paste) 형태로 존재하다가 시간이 지남에 따라 차츰 경화하여 높은 강도를 갖는 재료이다. 보통 사용하는 시멘트는 포틀랜드(1종) 시멘트로서 순수 시멘트의 경우 열전도도가 약 1.1 W/m°C로 벤토나이트 그라우트제보다 크다. 또한, 벤토나이트 그라우트 경우와 같이 시멘트 그라우트도 모래(천연규사)를 섞어 열전도도를 향상시킨다. 시멘트-모래(cement-sand) 그라우트의 경우, 순수 시멘트나 벤토나이트 보다 열전도도가 월등히 높고, 높은 부착력과 낮은 투수계수를 갖는다고 알려져 있다. 하지만, 고성능 유동화제(Superplasticizer)를 첨가한 낮은 물/시멘트 비를 갖는 시멘트-모래 그라우트의 경우 열전도도는 높으나 시공 후 건조수축으로 인해 지중 순환파이프와 그라우트제 사이에 틈(gap)이 발생하여 열전달 효율에 큰 영향을 줄 가능성이 있다고 알려져 있다.

미국 BNL 연구소에서는 시멘트-모래 그라우트의 열전도도 향상을 위해 고성능 유동화제를 사용하여 낮은 물/시멘트 비를 갖는 시멘트 배합비를 제시하였다. 이 연구소에서 제시한 배합비(Mix-111)의 열전도도는 습윤 시, 약 2.42 W/m°C로 일반 벤토나이트 그라우트와 비교했을 때 약 2 ~ 3배 높은 값을 나타냈



[그림 6] 시멘트 그라우트의 천연규사 함유량에 따른 열전도도

다. 순수 시멘트(neat cement), BNL 연구소에서 제안한 배합비, Mix-111과 Mix-114, 그리고 Mix-111 비합비 보다 모래 함유량을 늘린 그라우트 (A), 시멘트 함유량을 늘린 그라우트 (B)에 대한 열전도도를 측정할 결과는 그림 6과 같다. 순수 시멘트(neat cement) 경우에도 순수 벤토나이트 그라우트 보다 높은 열전도도를 보이며, 모래(천연규사) 첨가량에 따라 약 2 배 이상의 열전도도 향상을 보였다. 또한, 시멘트 그라우트는 건조 시에도 벤토나이트 그라우트에 비해 열전도도 감소가 상당히 적음을 알 수 있다.



모래-물 혼합물

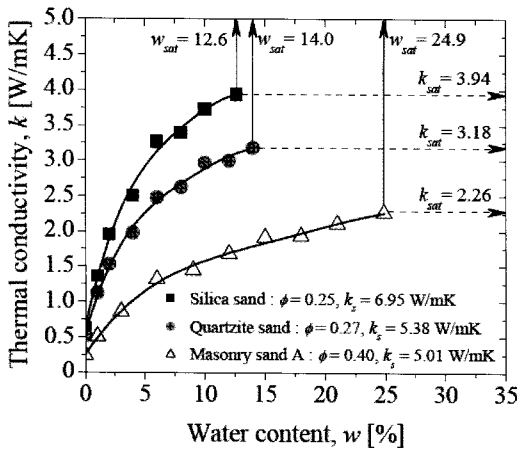
건물의 지열 냉난방시스템을 위한 수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤택움재는 앞서 언급한 대로, 국내외 시공현장에서 벤토나이트 그라우트를 주로 사용하고 있고 시멘트 그라우트는 벤토나이트 그라우트가 적합하지 않은 지반조건에 제한적으로 사용되거나 열전도도 향상 관점에서 벤토나이트 그라우트를 대체할 그라우트재로서 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 근래에 들어, 특수한 조건의 수직 밀폐형 지중 열교환기나 온실 또는 소규모 냉난방 시스템에 적용되는 수평형 지중 열교환기에서는 모래와 같은 천연 재료를 물과 함께 섞어 직접 뒤택움재로 사용하는 경우가 있다. 특히, 수평형 지중 열교환기용 뒤택움재는 지하수의 영향을 상대적으로 덜 받기 때문에 열전도도에 대한 고려가 우선적으로 요구되는 특징이 있다. 또한, 일반적으로 지하수위 윗부분에서 시공이 이루어지기 때문에 지반의 수분함량과 토양의 광물 조성이 뒤택움재의 열전도도에 주요한 영향인자로 작용한다. 토양의 종류와 수분 함량에 따라 뒤택움재 열전도도에 미치는 영향은 여러 선행 연구를 통해 분석되었고, 여기에서는 모래-물 혼합물의 열전도도 특징에 대해 간단히 소개 하고자 한다.

혼합물의 주재료인 모래에는 천연규사(silica sand), 인조규사(quartzite sand), 인조석회사(limestone sand), 인조사암사(sandstone sand), 인

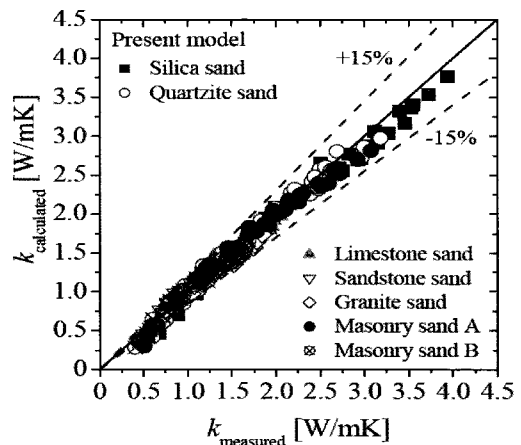
조화강사(granite sand), 건축용 강모래(masonry sand) 등이 있으며 이들의 수분함량에 따른 열전도도는 모래 입자 사이의 간극(porosity)이 증가할수록, 즉, 입자간 거리가 멀어질수록 열전도도는 감소하며 그림 7에서와 같이 포화도(간극 중 물이 차지하는 비)가 증가 할수록 열전도도는 증가하는 경향으로 나타난다. 또한, 포화도가 같을 경우, 건조밀도(모래의 조밀함 정도)가 증가할수록 열전도도는 증가하며 건조밀도까지 동일 할 경우에는 모래입자의 열전도도에 따라 전체 뒤택움재의 열전도도가 결정된다. 일반적으로 천연규사가 가장 높은 열전도도를 보이며 인조규사, 인조석회사, 인조사암사, 인조화강사 순으로 열전도도를 갖는다. 최근 국내 연구 결과(손병후, 2008)에서 모래-물 혼합물의 불포화 시료에 대한 열전도도 상관관계를 보고한 바 있으며 그림 8에서와 같이 열전도도 측정 결과와 연구에서 제안하는 상관관계를 비교한 결과에서 약 15% 범위의 잘 일치하는 결과를 도출하였다.

현장 그라우팅 방법

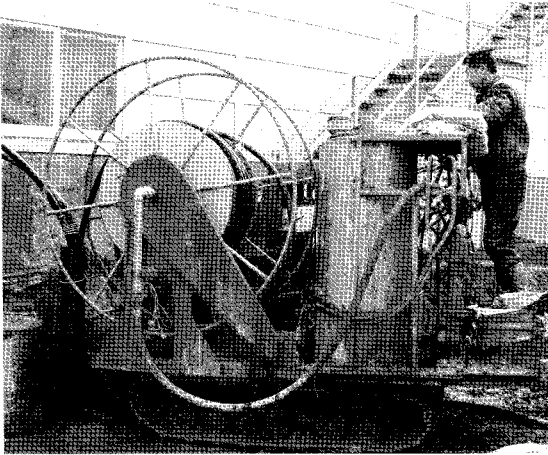
일반적으로 그라우트 주입은 보어홀 천공이 끝난 후 바로 시공하므로 시공 전 미리 그라우트 재료의 특성에 따른 펌프의 종류를 선택해야 한다. 펌프 선정 후에는 보어홀 깊이에 따른 펌핑용 트리미(tremie)관와 압송력을 결정한 후 현장에 펌프를 배



[그림 7] 합수비에 따른 모래-물 혼합물의 열전도도 (손병후, 2008)

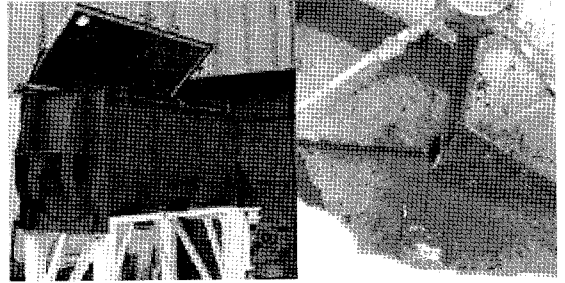


[그림 8] 측정된 결과와 연구에서 제안하는 상관관계 (손병후, 2008)



[그림 9] 트리미관을 통한 그라우트 시공 모습

치하고 벤토나이트를 배합할 준비를 하게 된다. 대부분의 경우 그라우팅은 트리미관을 통해 시공되므로 보어홀 깊이보다 긴 트리미관이 필요하다. 그림 9와 같이 펌프와 트리미관을 지중 열교환 파이프와 함께 보어홀 저면에 설치한 뒤 트리미관을 상부로 끌어 올리면서 그라우트를 시공하게 된다. 펌프는 그라우트 재료의 특성에 따라 선택해야 하며 일반적으로 사용되는 벤토나이트용 펌프는 기어방식, 피스톤방식, 변속방식, 가압방식, 튜브(연동)방식 등이 있다. 그라우트 재료의 점도에 비해 압송력이 부족할 경우 뒷채움에 어려움이 발생하여 밀실한 시공이



[그림 10] Paddle Mixer

어렵게 되므로 적절한 압송력을 결정해야 한다.

벤토나이트 그라우트의 배합은 현장에서 직접 이루어지며 대개 펌프와 믹서가 일체형으로 된 그림 9와 같은 장비가 사용되고 있다. 믹서는 보통 그림 10과 같은 Paddle Mixer를 사용하며 설계된 배합비에 따라 벤토나이트를 물과 함께 믹서에서 충분히 배합한 후 펌프를 통해 트리미관으로 압송하여 보어홀을 채운다. 펌프 성능에 따라 트리미관을 끌어 올리는 속도를 조절하면서 보어홀 바닥에서부터 상부로 벤토나이트를 채워 나간 후 보어홀 상부를 임시 봉인하고 다음 보어홀을 진행하는 시공순서가 일반적이다. 수직 밀폐형 지중 열교환기의 보어홀의 깊이는 보통 200 ~ 250 m로서 그라우트의 시공 상태를 육안으로 확인하기는 힘들다. 따라서 경험 많은 숙련된 기술자와 적절한 펌프 선택, 믹서의 적절한 선택이 필요하다. ❁