

수직 밀폐형 지중열교환기 뒤채움재로서 시멘트 그라우트의 적용성 검토

Study on Cement-based Grout for Closed-loop Vertical Grout Heat Exchanger

박 문 서¹ Park, Moon-Seo

위 지 헤¹ Wi, Ji-Hae

이 철 호² Lee, Chul-Ho

최 항 석³ Choi, Hang-Seok

강 신 형⁴ Kang, Shin-Hyung

Abstract

In this paper, the applicability of cement grout has been studied as an alternative to bentonite grout to backfill ground heat exchangers. To provide an optimal mixture design, the groutability and thermal conductivity of cement grouts with various mixture ratios were experimentally evaluated and compared. The unconfined compression strength of cement grout specimen was measured, which was exposed to cyclic temperature variation ranging from 50°C to -5°C. In addition, the integrity of the interface between circulating HDPE pipes and cement grout was evaluated by performing equivalent hydraulic conductivity tests, on the specimen, in which a pipe locates at the center of the specimen.

요 지

본 연구에서는 수직 밀폐형 지중열교환기 뒤채움 용도로, 기존 벤토나이트 그라우트의 대안으로서 시멘트 그라우트의 적용성을 검토하였다. 실내 시험을 통하여 물/시멘트 비, 천연구사 첨가비, 흑연 첨가비의 변화에 따른 시멘트 그라우트 열전도도 및 유동성에 미치는 영향을 평가하였으며 배합비에 따른 시멘트 그라우트의 일축압축강도를 측정하였다. 실제 지중열교환기용 파이프내 순환유체의 온도변화가 시멘트 그라우트의 재료적 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 -5°C와 50°C를 한 주기로 하여 일축압축강도를 반복적으로 측정하였다. 또한, 시멘트 그라우트가 지중에서 양생된 후, 냉난방 운전에 따른 순환수의 계절적 변화에 의한 시멘트 그라우트와 순환파이프의 접촉면의 양호한 부착성 유지 여부를 판단하기 위해 시멘트 그라우트에 HDPE 파이프를 삽입한 시료의 등가투수계수를 flexible wall permeameter를 이용하여 장기간 측정하였다.

Keywords : Cement grout, Equivalent permeability coefficient, Thermal conductivity, Workability

1. 서 론

산업혁명 이후 화석연료 에너지원이 주요 산업발전

의 중요한 열쇠가 되었지만 석탄, 석유, 천연가스등 화석연료의 과다사용으로 인해 환경파괴 및 지구 온난화를 초래 하였으며, 2020년쯤으로 예상되는 화석연료의

1 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

4 건양대학교 기계공학과 교수 (Prof., Dept. of Mechanical Engrg., Konyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

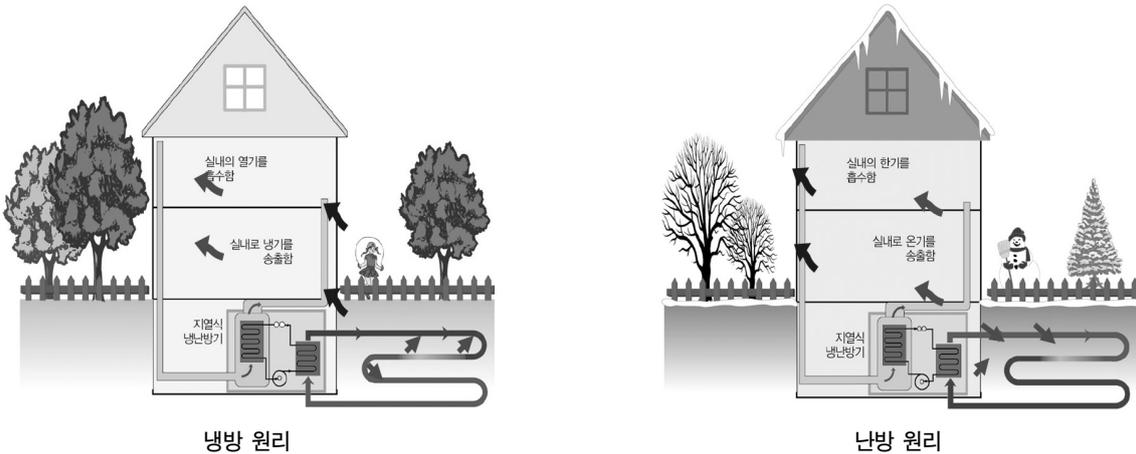


그림 1. 지열 냉난방 시스템 원리

고갈은 인류의 미래를 어둡게 하고 있다. 하지만 화석연료의 대안으로 연구되고 있는 신재생에너지 중 지열을 이용한 냉난방 시스템은 반영구적이며 친환경적인 에너지 활용방법이다. 지하열원을 이용한 지열 냉난방 시스템은 그림 1과 같이 겨울에는 상대적으로 따뜻한 지중열(heat source)을 흡수하여 열펌프를 통해 실내 난방을 하며, 여름에는 실내의 열을 추출하여 지중으로 순환시켜 열을 버리도록(heat sink)하는 원리를 이용한다.

지중열교환기에서 열교환은 그림 2에서 보듯이 크게 HDPE 파이프의 열전도도, 그라우트 재료의 열전도도, 지표 아래 지반의 열전도도가 중요한 요소로 작용한다. 지열 냉난방 시스템의 열교환은 지중의 열교환기에서 발생하며 천공구간에 수리적인 불투수성 구간을 만들고 수직 U-Loop내의 순환유체의 열을 전달 시키기 위해 보어홀은 뒤채움재로 채워진다(한정상 외, 2005). 그러므로 그라우트 재료의 열전도도 향상은 지중열교환기의 열교환 효율 증가를 가져올 수 있다.

지중열교환기용 순환 파이프를 보어홀에 매설한 후, 보어홀과 지반의 열교환을 위한 순환 파이프 사이에 그라우트로 뒤채움 하게 되는데 그라우트는 지중열교환기와 지반 혹은 암반 사이의 공간을 메워 지중과의 열전달을 촉진하고 보어홀 내 지표수의 침투 및 지하수 오염을 방지하는 역할을 하게 된다. 그라우트가 갖추어야 할 조건은 높은 열전도도와 낮은 투수성, 시공성 확보이다. 일반적인 그라우트 재료로 벤토나이트와 시멘트를 주로 사용하는데 현재 국내에서는 대부분 벤토나이트 그라우트재를 사용하고 있다. 하지만, 순수 벤토나이트 그라우트 열전도도는 지반의 열전도도보다 상당히 낮으므로 적절한 열교환 효율을 기대할 수 없다. 또한 지중

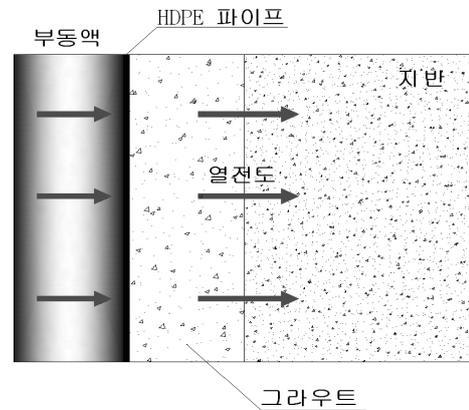


그림 2. 지중열교환의 열교환 메커니즘

열교환기 뒤채움용 벤토나이트는 대부분 수입에 의존하고 있어 재료비에 대한 부담이 높은 편이다. 시멘트 그라우트의 경우, 벤토나이트보다 열전도도가 높고, 높은 부착력과 낮은 투수계수를 갖는다(Allan, 2000). 본 연구에서는 시멘트 그라우트의 적용성을 검토하기 위해 Allan와 Philippacopoulos(1999)가 제시한 시멘트 배합비(Mix-111, Mix-114)를 참고하여 추가적으로 임의의 적합한 배합비에 대한 시멘트 그라우트의 열전도도, 유동성, 일축압축강도를 실내시험을 통하여 평가하였다. 또한, 지열 냉난방시스템 가동으로 인한 지중열교환기 내로 순환하는 유체의 계절에 따른 반복적인 온도 변화를 적용하여 시멘트 그라우트의 재료적 안정성을 일축 압축강도 변화를 통해 연구하였다. 마지막으로 순환유체의 반복적인 온도변화가 시멘트 그라우트와 파이프 사이 경계면의 부착성에 미치는 영향을 등가 투수계수 측정을 통해 간접적으로 판단하였다.

2. 시멘트 그라우트 특성 시험

2.1 시험 시료

본 연구에서는 시멘트 그라우트의 배합비에 따른 열전도도 및 유동성, 일축압축강도를 평가하기 위하여 물/시멘트 비, 천연규사 함유량에 따른 배합비와 벤토나이트 함유량에 따라 공시체를 배합하고 각 배합 조건에 따른 영향을 평가하였다. 물/시멘트 비는 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8의 5가지, 물/시멘트는 0.6으로 고정하고 천연규사를 첨가한 조건 5가지(시멘트 무게의 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8배), 물/시멘트 비는 0.6, 천연규사의 양은 시멘트 무게의 2.4배로 고정하고 벤토나이트를 첨가한 5가지

표 1. 시멘트 그라우트 특성 시험에 사용된 배합비

시료 번호	물/시멘트 비	천연규사/시멘트	벤토나이트/시멘트 비
GEO-1	0.40	-	-
GEO-2	0.50	-	-
GEO-3	0.60	-	-
GEO-4	0.70	-	-
GEO-5	0.80	-	-
GEO-6	0.60	2.00	-
GEO-7	0.60	2.20	-
GEO-8	0.60	2.40	-
GEO-9	0.60	2.60	-
GEO-10	0.60	2.80	-
GEO-11	0.60	2.40	1%
GEO-12	0.60	2.40	2%
GEO-13	0.60	2.40	3%
GEO-14	0.60	2.40	4%
GEO-15	0.60	2.40	6%

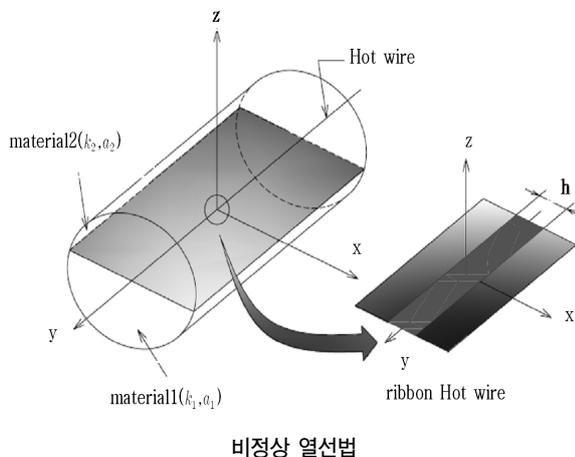
(시멘트 무게의 1%, 2%, 3%, 4%, 6%)로 총 15개의 배합으로 표 1과 같이 시료를 조성하였다.

또한, 지중열교환기 내 순환유체의 반복적인 온도변화에 대한 영향을 모사하기 위하여 표 1에 제시된 배합비 중 GEO-3, GEO-8번의 배합비로 공시체 제작 후, 항온습기를 이용하여 온도 변화 주기에 따른 시멘트 그라우트의 일축압축강도를 측정하였다. 마지막으로 시멘트 그라우트와 순환 파이프 사이 경계면의 계절적 순환수 온도변화에 따른 부착성 유지 여부를 판단하고자 직경 50mm, 높이 100mm인 원주형 시료와 직경 100mm, 높이 100mm로 제작한 공시체 내부에 36mm 파이프를 삽입하여 Flexible wall permeameter을 적용한 변수위투수시험을 통해 투수계수를 비교, 분석 하였다. 투수계수 측정은 표 1의 배합비 중 GEO-1, GEO-6, GEO-7, GEO-9, GEO-11, GEO-12의 배합비에 대해 실시하였으며, 순환유체의 반복적인 온도변화가 시멘트 그라우트와 파이프 경계면의 부착성에 미치는 영향 파악을 위해서 GEO-6 배합비에 파이프를 삽입하여 등가 투수계수 측정을 실시하였다.

2.2 시험 장치 및 방법

2.2.1 유동성 및 열전도도 측정 시험

시멘트 그라우트의 유동성을 평가하기 위해 Slump Flow 시험을 수행하였다. Slump Flow 시험은 모르타르 용 100mm 직경의 링을 사용하였다. 수평 아크릴 판 위에 모르타르를 채운 링을 놓고 수직으로 들어 올려 모르타르가 아크릴 바닥에 타원형으로 퍼져나간 최대 직경과 최소 직경을 기록하였다. 유동성이 낮은 모르타르 일



비정상 열선법



QTM-500

그림 3. 열전도도 측정 방법 및 장치

수록 퍼져나간 범위는 작아질 것이므로 시멘트 그라우트의 유동성을 판단할 수 있다. 시멘트 그라우트의 열전도도를 측정하기 위해서는 그림 3의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. QTM-500은 0.023~12W/mK의 측정범위 및 $\pm 3\%$ 의 재현성을 갖는다. 열전도도 측정 시스템에서 프로브는 PD-13 모델을 사용하였고 크기는 95mm × 40mm이다. 프로브의 표면에는 폭 1mm의 콘스탄틴 열선이 부착되어 있으며 열선의 중앙에 K-type의 열전대가 부착되어 있다. 시험 적용된 수정 비정상 열선법(modified transient hot-wire method)은 시료 표면의 특별한 가공이 필요없는 장점이 있다. 각각의 시료를 직사각형 몰드에 성형하여 습윤 상태와 14일 후의 시료에 대하여 열전도도를 측정하였다.

2.2.2 일축압축강도 측정 시험

일반적으로 수직 밀폐형 지중열교환기 뒤편재의 강도는 중요 설계 변수는 아니다. 하지만, 최근에 들어와서 지중열교환기 설치 면적 부족으로 인해 건물 하부에 지중열교환기를 시공할 경우 건물의 안정성 확보를 위해 지중열교환기의 강도를 고려해야 한다. 또한 시멘트 그라우트의 강도 특성 평가는 향후 에너지 파일의 적용성 평가에도 중요한 정보를 줄 수 있을 것이다.

시멘트 그라우트의 일축압축 강도를 측정하기 위해 배합한 시료를 표준 공시체에 넣고 수중 양생한 후 28일 강도를 측정하였다. 강도를 측정하기 위하여 유압식 자동 강도 측정기를 이용하였다. 또한, 지중열교환기 내 순환유체의 반복적인 온도 변화에 대한 시멘트 그라우트의 재료적 안정성을 파악하기 위하여 공시체의 온도 반복에 따른 일축압축강도 변화를 평가하였다. 시멘트

그라우트에 반복적인 온도변화를 주기 위해 공시체를 항온항습기 내에서 50°C에서 10일, -5°C에서 10일 주기로 온도를 변화시켜 보관한 후, 각 온도변화주기 별로 공시체의 일축압축강도를 측정하였다.

2.2.3 시멘트 그라우트와 파이프간의 부착성 평가 시험

시멘트 그라우트를 직경 50mm, 높이 100mm인 원주형으로 공시체를 성형하고 Flexible Wall Permeameter을 이용한 변수위 투수계수 측정법으로 투수계수를 측정하였다. 시험법을 선택하였다. 전체 시험장비의 개략적인 모습은 그림 4와 같다. 투수시험 장치는 투수 셀과 시료의 상·하부에 수압을 조절하고 시료의 유량을 확인할 수 있는 조절판으로 구성되어 있다. 시료는 시험 초기에 조절판을 이용해 포화시킨 후, 공시체와 멤브레인의 접촉 상태를 양호하게 하기 위해 투수 셀 내부에 적당한 구속압을 가하고 수두변화를 기록하여 투수계수

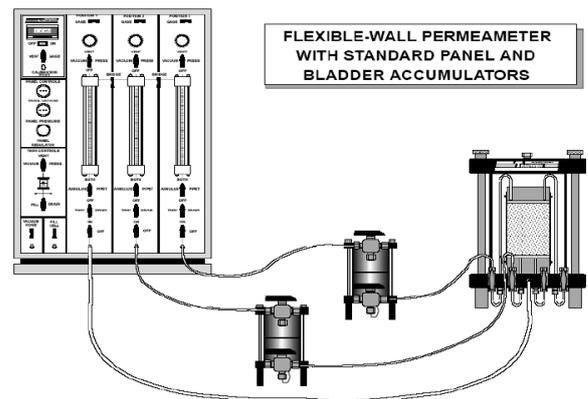


그림 4. Flexible wall 시험 장비 모식도



파이프 접촉면(50배)



파이프 접촉면(50배)

그림 5. 시멘트 그라우트와 파이프 사이 접촉면

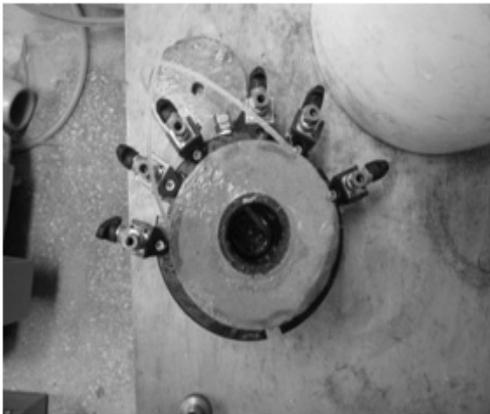
를 측정하게 된다.

시멘트 그라우트는 그림 5와 같이 파이프가 삽입됨으로써 건조시 크랙이 발생할 가능성이 있고 시간이 지남에 따라 순환유체의 반복적인 온도변화에 의해 시멘트 그라우트와 파이프 사이 경계면의 부착력이 약화되어 파이프와 시멘트 그라우트 사이에 갭이 발생할 가능성이 있다 (Paul과 Remund, 1997). 또한 Allan과 Philippacopoulos (1999)는 연구를 통해 개발한 시멘트 그라우트에 파이프를 삽입한 경우와 파이프를 삽입하지 않은 경우를 비교하였으며, 그 결과 파이프를 삽입한 시멘트 그라우트가 파이프를 삽입하지 않은 시멘트 그라우트보다 1000배에서 10000배까지 침투량(Infiltration rate)이 증가하였다고 보고하였다.

이를 확인하기 위해 본 연구에서는 파이프가 그라우트에 삽입되어 있는 공시체의 등가투수계수 측정이 가능하도록 장비를 고안하였다(그림 6). 이를 통해 파이프

가 삽입된 시멘트 그라우트의 투수계수를 산정하여 시멘트만의 투수계수가 아닌 파이프 접촉면을 고려한 등가투수계수를 얻고자 하였다. 본 연구에서 사용한 파이프는 일반적인 지중열교환기용 HDPE 파이프로 외경은 약 36mm이며, 시멘트 그라우트 시료의 직경은 100mm로 제작하였고 멤브레인을 공시체 외경에 맞게 제작하여 실험 목적에 맞는 투수 셀을 고안하였다.

등가투수계수 측정 뿐 아니라 지중열교환기의 경우, 냉난방 시스템이 가동되면서 냉방과 난방 과정을 통해 파이프를 순환하는 유체의 온도가 계절에 따라 변하게 되므로 시멘트 공시체와 HDPE 파이프의 서로 다른 열팽창 계수로 인해 온도에 따른 팽창 및 수축 정도가 다르고 이로 인해 두 재료 사이의 부착성이 감소될 가능성이 있다. 본 연구에서 고안된 투수시험 장비는 삽입된 파이프 내부에 계절적으로 변화하는 온도에 따른 등가투수계수 변화를 측정하기 위해, 그림 7과 같이 항온수조를 이용하여 삽입

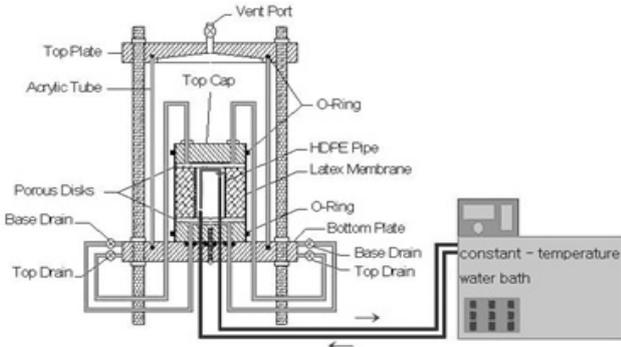


파이프가 삽입된 시멘트 그라우트의 투수계수 측정 장비

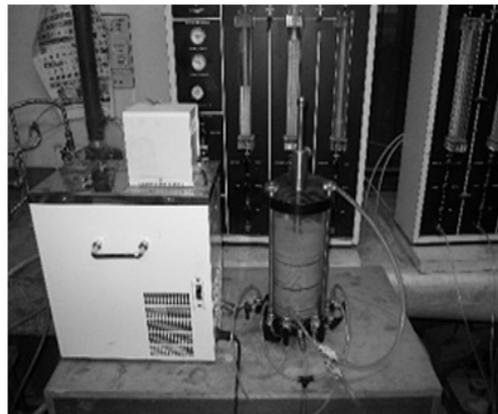


시멘트 그라우트 투수계수 측정

그림 6. 파이프가 삽입된 시멘트 그라우트 시료의 투수계수 측정



항온 수조를 이용한 등가 투수계수 측정 모식도



항온 수조를 이용한 등가 투수계수 측정 전경

그림 7. 항온 수조를 이용한 등가 투수계수 측정

된 파이프 내에 일정 온도의 유체가 순환할 수 있도록 설계하고, 냉방과 난방시 다른 온도를 갖는 순환수의 순환을 고려한 등가투수계수 측정 시험을 수행하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 열전도도 및 유동성

순수 시멘트의 밀도를 감소시키고 최종적으로 혼합된 시멘트 슬러리의 체적을 증가시키기 위해 일반적으로 시멘트에 사용하는 첨가제는 천연규사와 벤토나이트이다 (한정상 등, 2004). 또한, Allan와 Philippacopoulos(1999)는 시멘트 그라우트의 열전도도를 높이기 위해 물/시멘트 비를 최소화하는 것이 중요하다고 보고하였다. 물/시멘트 비가 감소할수록 그라우트에 사용되는 시멘트의 양이 증가하여 유동성은 감소하게 되는 반면에, 시멘트의 양을 줄여서 물/시멘트 비를 늘릴 경우, 유동성은 증가하게 되지만 열전도도가 낮아지고 첨가재로 사용한 모래의 골재 분리 현상이 나타날 수 있다. 그러므로 시공성을 확보하기 위하여 적절한 유동성을 가지면서 재료 분리를 방지하고 열전도도가 높은 시멘트 그라우트에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 Allan와 Philippacopoulos(1999)가 제시한 시멘트 배합비(Mix-111, Mix-114)를 참고하여 추가적으로 여러 가지 배합비 및 첨가재에 따른 시멘트 그라우트의 유동성 및 열전도도를 측정하였다. 순수 시멘트 시료에 물/시멘트 비를 0.4부터 0.1씩 늘려가며 공시체를 성형하였으며 시험 결과 그림 8과 같이 물/시멘트 비가 0.1씩 증가할수록 열전도도는 0.01~0.07W/mK씩 감소하였으며 유동성을 나타내는 Slump Flow는 증가하는 것으로 나타났다. 열전도도 향상과 투수계수 저

감하기 위해 Allan과 Philippacopoulos(1999)는 최소의 물/시멘트 비 유지를 제안했지만, 물/시멘트 비를 감소시키는 것은 유동성이 감소한다는 것을 의미하므로 배합비에 따른 적절한 물/시멘트 비를 고려해야 할 것이다. 공시체를 건조 시킨 후 열전도도를 측정한 결과 열전도도가 습윤 상태일 때보다 대략 0.23~0.27W/mK 만큼 소폭 감소하였다.

물/시멘트 비를 0.6으로 고정하고 천연규사/시멘트 비를 2.0부터 0.2씩 증가 시켜가며 배합한 경우 유동화제는 시멘트 무게의 0.1%씩 첨가하였다. 시험결과 열전도도는 0.01~0.09W/mK씩 증가하였으며 Slump Flow 시험의 Geo-9와 Geo-10의 경우 측정 최소값인 100mm로 나타났다. Geo-9와 Geo-10의 배합비 같은 경우는 유동화제의 사용량을 증가시켜야 적절한 유동성을 확보할 것으로 보인다. 시료를 건조 시킨 후에는 열전도도가 대략 0.20~0.42W/mK만큼 감소하였다. 또한 물/시멘트 비와 천연규사/시멘트 비를 0.6, 2.4로 각각 고정하고 벤토나이트의 첨가 비율을 1%씩 증가시킬 때 마다 열전도도는 크게 변하지 않았으며 시료를 공기건조 시킨 후에는 열전도도가 0.34~0.44W/mK 만큼 감소하였다. 유동성에 관한 시험결과는 벤토나이트가 시멘트 무게에 단지 1% 정도 첨가하여도 시멘트 모르타르의 유동성이 현저히 감소하였으며 벤토나이트 첨가량 2%에서 Slump Flow시험 최소값인 100mm를 기록하였다. 따라서 시멘트/천연규사 그라우트를 배합 시 벤토나이트를 첨가할 경우 유동성이 떨어지므로 반드시 유동화제에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

3.2 일축압축강도

일축압축강도 시험 결과, 물/시멘트 비가 0.4부터 0.1

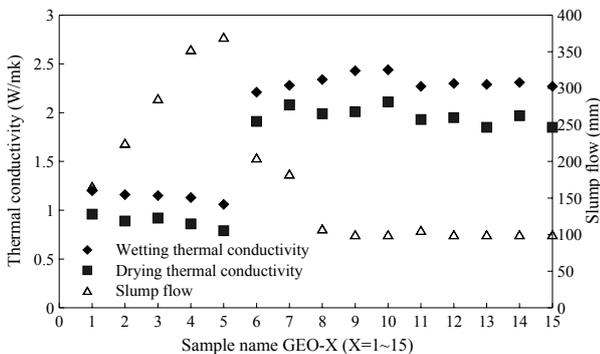


그림 8. 배합비에 따른 열전도도 및 유동성

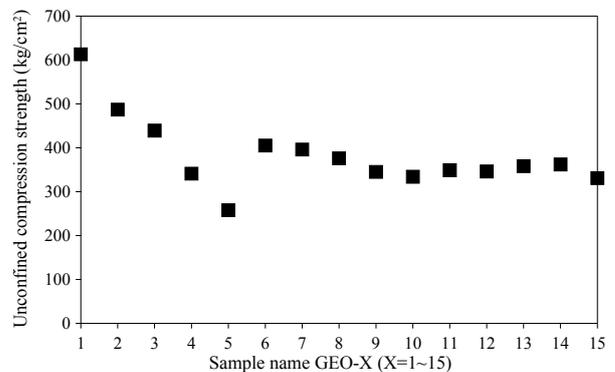


그림 9. 배합비에 따른 일축압축강도

씩 증가 할수록 그림 9와 같이 일축압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 시멘트와 물만 배합한 시료이므로 시멘트 비율이 높을수록 강도가 높아지는 일반적인 시멘트 모르타르의 경향과 같다. 천연규사/시멘트 비가 2.0 부터 0.2씩 늘어날수록 일축압축강도는 감소하는 것으로 나타났으며 시멘트 무게의 1%, 2%, 3%, 4%, 6%씩 벤토나이트를 첨가한 경우 벤토나이트 함유량에 따른 강도 변화는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 열전도도를 높일 목적으로 천연규사가 과다 첨가 될 때에는 강도 저하나 시멘트 경화 과정에 문제가 발생할 수 있으므로 시공 시 이를 고려해야 한다.

또한 실제 지중열교환기용 파이프내 순환유체의 온도변화가 시멘트 그라우트의 재료적 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 온도에 따른 일축압축강도변화를 측정하였다. 반복적인 온도변화를 모사하기 위해 공시체를 항온항습기 내에서 50°C에서 10일, -5°C에서 10일 주기로 온도 변화를 주며 보관한 후, 각 온도변화 주기 별로 공시체의 일축압축강도를 측정한 결과는 그림 10과 같다. 적용한 시멘트 그라우트 배합비는 표 1의 Geo-3(물/시멘트비 0.6)과 Geo-8(천연규사/시멘트 비 2.4)이다.

온도변화 주기가 증가할수록 일축압축강도가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 수직형 지중열교환기가 건물 하부에 시공 될 경우나, 에너지 기초구조체(에너지 파일, 에너지 슬라브등)에서는 시멘트나 콘크리트의 역학적 안정성 유지가 중요한 설계요소이므로 온도변화에 따른 시멘트 혼합물의 강도 감소에 대해 주의가 필요하다.

3.3 시멘트 그라우트와 파이프간의 부착성 평가 시험

지중열교환기는 보어홀에 파이프가 삽입되고, 그 주

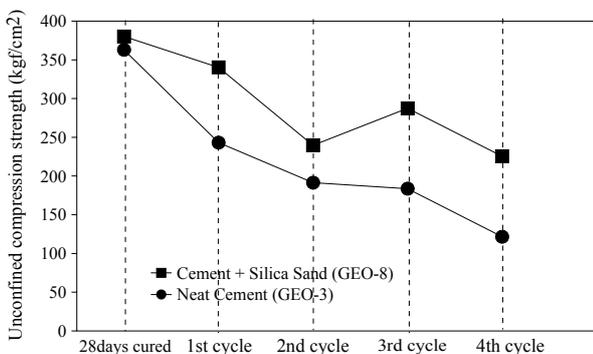


그림 10. 온도 변화에 따른 일축압축강도(Geo-3: 물/시멘트비 0.6, Geo-8:천연규사/시멘트 비 2.4)

변에 그라우트를 채워 시공된다. 시공 시 파이프가 삽입되면서 재료와 파이프 사이의 부착이 완벽하지 않으면 접촉면을 통해 물이 파이프 벽을 따라 흐를 수 있기 때문에 파이프를 고려한 단면의 등가 투수계수는 커질 수 있다. 따라서 재료 자체의 투수계수를 측정하는 것도 중요하지만, 파이프가 삽입된 상태에서 등가 투수계수 변화에도 주목해야 한다. 일반 시멘트 그라우트 시료의 경우, 열전도도 및 일축압축강도 평가를 위해 적용한 배합비로 투수계수 측정용 시료로 제작하여 시험을 수행하였다. 각 시멘트 그라우트 배합비의 경우, 그림 11과 같이 배합비에 따라 투수계수는 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/sec 범위로 나타났다.

등가 투수계수 측정 시험에 사용된 파이프가 삽입된 시료의 배합비는 GEO-6로 공시체를 성형하였다. 모든 투수계수 측정 시험은 시료가 포화된 상태에서 실시하게 된다. 따라서 실험을 통해 구해진 투수계수는 포화투수계수가 된다. 그러므로 실험 전 시멘트 그라우트 시료와 파이프가 삽입된 시료를 충분히 포화가 되도록 수침을 시킨 후 시험을 진행하였다. 시험은 투수계수가 10^{-8} cm/s 보다 클 경우 최소 4회 측정된 평균값의 변화가 $\pm 25\%$ 일 때 종료하였으며 투수계수가 10^{-8} cm/s 보다 작을 경우에는 최소 4회 측정된 평균값의 변화가 $\pm 50\%$ 일 때 종료하였다. 그림 12에서 배합비 Geo-6의 시험결과, 시멘트 그라우트 자체의 투수계수는 3.57×10^{-10} cm/sec, 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수는 4.87×10^{-9} cm/sec로 나타났다. 이 두 값을 비교함으로써 시멘트 그라우트에 파이프를 삽입함으로써 파이프와 시멘트 사이의 접촉면으로 물이 벽면을 따라 흐를 수 있고 접촉면에서 시멘트

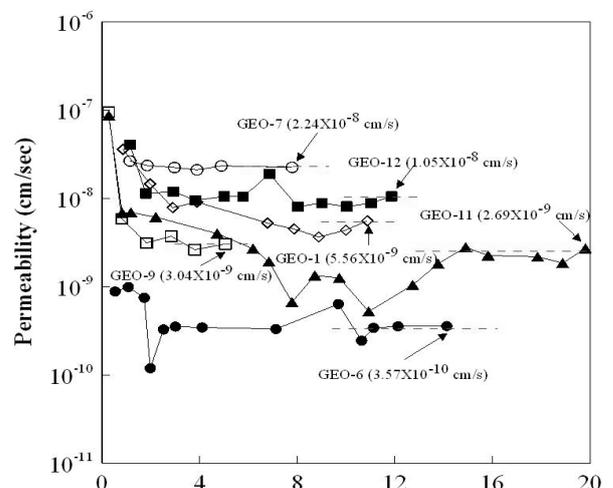


그림 11. 배합비에 따른 시멘트 그라우트의 투수계수

그라우트가 조밀하지 않다는 것을 확인하였다.

순환유체의 반복적인 온도변화가 시멘트 그라우트와 파이프 사이 경계면의 부착성에 미치는 영향을 등가 투수계수 측정을 통해 간접적으로 판단하였다. 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수를 약 100일간 지속적으로 측정하였다. 다음 그림 13은 파이프가 삽입된 공시체의 순환수 온도에 의한 영향을 고려한 등가 투수계수를 보여준다.

장기간 등가 투수계수 측정결과 공시체 제작 후 상온에서(20℃) 약 30일간 시험을 진행하여 등가투수계수가 $4.87 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$ 로 수렴하였고, 이후 첫 번째 순환수의 온도 35℃의 경우(냉방모드 모사), 약 20일 경과한 후 등가 투수계수는 $2.37 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$ 로 수렴하였으며 이후 순환수의 온도가 5℃의 경우(난방모드 모사), $9.27 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$

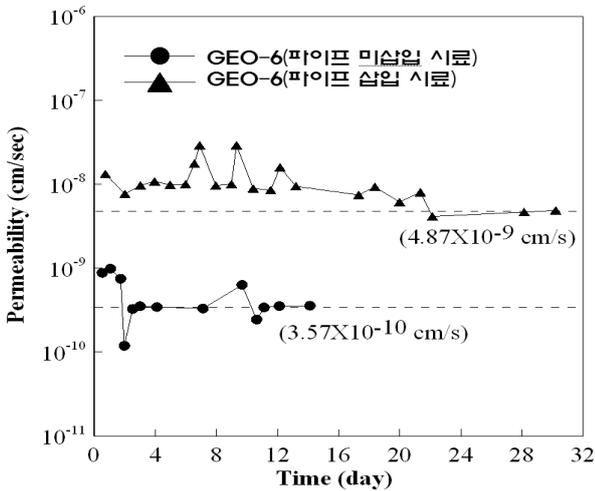


그림 12. 파이프 삽입에 따른 시멘트 그라우트의 등가 투수계수 비교

로 다소 증가 하였다. 순환수의 온도변화에 따라 시멘트와 파이프의 수축과 팽창 정도차이에 의해 등가 투수계수가 변하는 것을 확인할 수 있다. 순환수 35℃의 경우, 시멘트 공시체보다 HDPE 파이프의 열팽창성이 커서 시멘트와 파이프 간의 접촉면을 압착하므로 등가투수계수가 상온에서 보다 더 작게 측정되었다. 하지만, 순환수 5℃의 경우 시멘트보다 HDPE 파이프가 상대적으로 수축을 크게 하므로 접촉부분의 이완이 예상되고, 이에 따라 측정된 등가투수계수가 35℃에 비하여 다소 증가했다. 시험 개시 후 약 65일이 지난 시점에서 5℃에 대한 등가투수계수 측정을 종료하고 다시 35℃로 순환수의 온도를 바꿔 등가투수계수 측정시험을 진행하였다. 시험시작 후 약 90일이 경과한 시점에서 35℃로 재순환 시킨 경우는 등가투수계수가 처음 35℃로 순환시켰을 때 보다 약간 증가하였으며 이후 5℃로 다시 온도를 바꿔 순환시킨 결과 약 100일까지 대략적으로 $1.02 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 지중열교환기 파이프 내 순환수의 온도 변화로 인한 시멘트와 파이프 사이의 이격에 대한 영향을 등가 투수계수 측정 시험을 통해 검토한 결과, 온도 변화에 의한 시멘트의 등가투수계수의 변화량이 비교적 크지 않아 순환수의 온도 변화로 인한 시멘트 그라우트와 파이프 간의 경계면 부착성에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 즉, 첫 번째 냉난방 순환 시 등가투수계수의 값이 제한된 범위 안에서 변동하다가 두 번째 냉난방 순환 이후에는 냉방과 난방에 관계없이 일정한 등가투수계수로 수렴함을 알 수 있다.

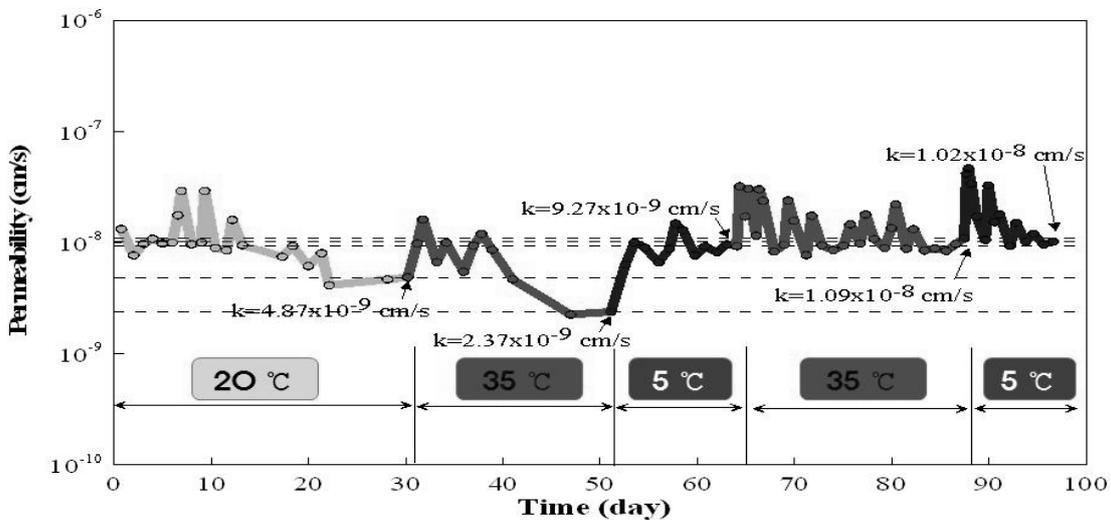


그림 13. 순환수 온도에 의한 등가 투수계수 변화

4. 결 론

본 연구에서는 실내시험을 통하여 시멘트 그라우트의 유동성과 열전도도, 일축압축강도 특성 및 등가 투수계수에 대해 실험적으로 고찰하였으며 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 물/시멘트 비가 증가할수록 Slump Flow는 증가하였으며, 물/시멘트 비를 고정하고 천연규사/시멘트 비를 늘린 경우 Slump Flow는 감소하였다. 벤토나이트를 첨가한 경우는 유동성이 현저히 감소하였다.
- (2) 시멘트 그라우트의 물/시멘트 비를 0.4부터 0.1씩 증가시키기에 따라 열전도도는 감소하였으며, 물/시멘트 비를 0.6으로 고정하고 천연규사/시멘트 비를 2부터 0.2씩 증가시키기에 따라 열전도도는 증가하였다. 벤토나이트를 첨가한 경우에는 모두 비슷한 열전도도 값이 나타났다.
- (3) 일축압축강도 측정결과 물/시멘트 비 및 천연규사의 첨가량이 증가 할수록 강도는 감소하였으며 벤토나이트 함유량에 따른 강도 변화는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.
- (4) 지중열교환기용 파이프내 순환유체의 온도변화가 시멘트 그라우트의 재료적 안정성에 미치는 영향을 일축압축강도로 측정된 결과 재령 28일 강도보다 강도가 감소하였으며 온도변화 주기가 늘어날수록 일축압축강도가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 지중열교환기가 건물 하부에 시공되거나 에너지 기초구조체(에너지 파일, 에너지 슬라브 등)에서는 시멘트나 콘크리트의 역학적 안정성 유지도 중요한 설계요소이므로 온도변화에 따른 시멘트 혼합물의 강도 감소에 대한 고려가 필요하다.
- (5) 투수계수 측정결과, 접촉면 부분의 겹으로 인하여 순수 시멘트 시료의 투수계수는 $3.57 \times 10^{-10} \text{cm/sec}$, 파이

프가 삽입된 시료의 등가 투수계수는 $4.87 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 로 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수가 더 크게 측정되었다.

- (6) 항온 수조를 이용하여 순환유체의 온도변화에 따른 등가 투수계수 측정결과 첫 번째 순환수의 온도 35°C 의 경우, 등가투수계수는 $2.37 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 로 수렴하였으며 장기간 측정된 결과 $1.02 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 수렴하였다. 온도 변화에 의한 시멘트의 등가투수계수의 변화량이 작아 순환수의 온도 변화로 인한 시멘트 그라우트의 투수계수에 미치는 영향은 작을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 신재생에너지센터 신재생에너지 기술개발사업(2008-N-GE08-R-01)과 교육과학기술부의 지원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0011159)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 조정식, 2006, “지중열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤패움재 조성에 관한 연구”, 산업자원부, 최종보고서 2004-N-GE08-P-01.
2. 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2005, “지열펌프 냉난방 시스템”, 한림원, pp.15-1 ~ 15-38.
3. Allan, M. L. (2000), “Materials characterization of superplasticized cement-sand grout”, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp. 937-942.
4. 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.
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.

(접수일자 2010. 4. 26, 심사완료일 2010. 7. 8)