

## 수직 밀폐형 지중 열교환기 뒤택움재로서 시멘트 그라우트의 적용성 검토 Study on cement-based grout for closed-loop vertical ground heat exchanger

박문서<sup>1)</sup>, Moonseo Park, 위지혜<sup>1)</sup>, Jihae Wi, 이철호<sup>2)</sup>, Chulho Lee, 이강자<sup>3)</sup>, Kangja Lee, 최항석<sup>4)</sup>, Hangseok Choi

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>3)</sup> (주)코오롱 건설 사원, Employee, Kolon Engineering and Construction Co., Ltd

<sup>4)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**SYNOPSIS** : 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 are 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 by performing equivalent hydraulic conductivity tests, in which a pipe locates at the center of the specimen.

**Keywords** : Cement grout, thermal conductivity, workability, equivalent permeability coefficient

### 1. 서론

지열을 이용한 냉난방 시스템은 재생에너지 이용방법 중 하나로서 반영구적이며 친환경적인 에너지 활용방법이다. 지하열원을 이용한 지열 냉난방 시스템은 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. 지열 냉난방 시스템의 열교환은 지중의 열교환기에서 발생하며 천공구간에 수리적인 불투수성 구간을 만들고 수직 U-Loop내의 순환유체의 열을 전달 시키기 위해 보어홀은 뒤택움재로 채워진다(한정상 외, 2005). 지중열교환기에서 열교환은 크게 HDPE 파이프의 열전도도, 그라우트 재료의 열전도도, 지표 아래 지반의 열전도도가 중요한 요소로 작용한다. 그러므로 그라우트 재료의 열전도도를 향상은 지중열교환기의 열교환 효율 증가를 가져올 것이다. 지중열교환기용 순환 파이프를 시추공에 매설한 후, 시추공과 지반의 열교환을 위한 순환 파이프 사이에 그라우트로 뒤택움 하게 되는데 그라우트는 지중열교환기와 지반 혹은 암반 사이의 공간을 메워 지중과의 열전달을 촉진하고 시추공 내 지표수의 침투 및 지하수 오염을 방지하는 역할을 하게 된다. 그라우트가 갖추어야 할 조건은 높은 열전도도와 낮은 투수성, 시공성등이다. 일반적으로 사용하는 그라우트 재료는 벤토나이트와 시멘트가 있는데, 현재 국내에서는 대부분 벤토나이트그라우트재를 사용하고 있다. 하지만, 순수 벤토나이트 그라우트 열전도도는 지반의 열전도도보다 상당히 낮으므로 적절한 열교환 효율을

기대할 수 없다. 또한 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 위하여 다양한 배합비에 대한 시멘트 그라우트의 유동성, 열전도도 및 일축압축강도를 측정하였다. 또한, 냉난방시스템 가동으로 인한 지중열교환기 내로 순환하는 유체의 반복적인 온도 변화에 따른 시멘트 그라우트의 재료적 안정성을 일축압축강도 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 시험시료

본 연구에서는 시멘트 그라우트의 배합비에 따른 유동성 및 열전도도, 일축압축강도의 변화를 측정하기 위하여 물/시멘트 비, 천연규사 함유량, 벤토나이트 함유량을 변화시켜 배합하여 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 시멘트 무게의 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8배로 천연규사를 첨가한 조건 5가지, 물/시멘트 비는 0.6, 천연규사의 양은 시멘트 무게의 2.4배로 고정하고 시멘트 무게의 1%, 2%, 3%, 4%, 6%씩 벤토나이트를 첨가한 5가지로 총 15개의 배합으로 표1과 같이 시료를 조성하였다.

시멘트 그라우트 시료 양생 후, 지중열교환기 내로 순환유체의 반복적인 온도 변화를 모사하기 위해 항온항습기를 이용하고 온도 변화에 따른 시료의 일축압축강도를 측정은 GEO-3, GEO-8의 배합비를 적용하였다. 지중 열교환기 시공현장에서 채취한 시멘트 그라우트 시료에 대해 양생 기간에 따른 재료의 열전도도를 측정하여 시멘트 그라우트 양생 시 발생하는 수화열이 열전도도 측정에 미치는 영향을 규명하였다. 마지막으로 시멘트 그라우트와 순화 파이프 사이 경계면의 양호한 부착성 유지 여부를 판단하고자 직경 50mm, 높이 100mm인 원주형 시료와 시료 내부에 36mm 파이프를 삽입하여 투수계수를 비교, 분석 하였다. 투수계수 측정은 시멘트 그라우트 시료 배합비는 GEO-1, GEO-6, GEO-7, GEO-9, GEO-11, GEO-12에 대해 실시했으며, 순환유체의 반복적인 온도변화가 시멘트 그라우트와 파이프 사이 경계면의 부착성에 미치는 영향 파악을 위해서는 GEO-6 배합비에 파이프를 삽입하였다.

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%

## 2.2 시험장치 및 방법

### 2.2.1 유동성 및 열전도도 측정 시험

시멘트 그라우트의 유동성을 평가하기 위해 Slump Flow 시험을 수행하였다. Slump Flow 시험은 모르타르용 100mm직경의 링을 사용하였다. 수평 아크릴 판 위에 모르타르를 채운 링을 놓고 수직으로 들어 올려 모르타르가 아크릴 바닥에 타원형으로 퍼져나간 최대 직경과 최소 직경을 기록하였다. 시멘트 그라우트의 열전도도를 측정하기 위해서는 그림 1의 QTM-500(Kyoto Electronics)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 프로브는 PD-13 모델을 사용하였고 크기는 95mm × 40mm이다. 프로브의 표면에는 폭 1mm의 콘스탄탄 열선이 부착되어 있으며 열선의 중앙에 K-type의 열선대가 부착되어 있다. 시험 적용된 수정 비정상 열선법(modified transient hot-wire method)에서는 시료 표면의 특별한 가공이 필요없다. 각각의 시료를 직사각형 몰드에 성형하여 습윤 상태와 14일 후의 시료에 대하여 열전도도를 측정하였다.



그림 1. QTM-500



그림 2. 측정 프로브 (PD-13)

### 2.2.2 일축압축강도 측정 시험

시멘트 그라우트의 일축압축강도를 측정하기 위하여 배합한 시료를 표준 공시체에 넣고 수중 양생한 후 28일 강도를 측정하였다. 강도는 그림 3의 유압식 자동 강도 측정기를 이용하였다.



그림 3. 가압장치

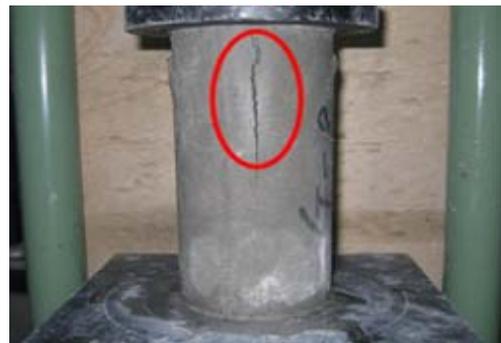


그림 4. 공시체 파괴 시 모습

시멘트 그라우트 시료 양생 후, 지중열교환기 내로 순환유체의 반복적인 온도변화에 따른 시멘트 그라우트의 재료적 안정성을 일축압축강도 변화를 통해 평가하였다. 반복적인 온도변화를 모사하기 위해 공시체를 항온항습기 내에서 50℃에서 10일, -5℃에서 10일 주기로 온도 변화를 주며 보관한 후, 각 온도변화 주기 별로 공시체의 일축압축강도를 측정하였다.

### 2.2.3 시멘트 그라우트와 파이프간의 부착성 평가 시험

시멘트 그라우트 시료는 직경 50mm, 높이 100mm인 원주형으로 시료를 성형하고 Flexible Wall Cell 을 이용한 Falling Headwater-Rising Tailwater 시험법을 선택하였다. 전체 시험장비의 개략적인 모습은 그림 5와 같다. 투수시험 장치는 투수 Cell과 시료의 상·하부에 수압을 조절하고 시료의 유량을 확인할 수 있는 조절판으로 구성되어 있다. 시료는 시험 초기에 조절판을 이용해 포화를 시키고, 시료의 포화 후 멤브레인의 접촉 상태를 양호하게 하기 위해 Cell에 적당한 구속압을 가한 후 수두변화를 기록하여 투수계수를 측정하였다 (그림 6 참조).

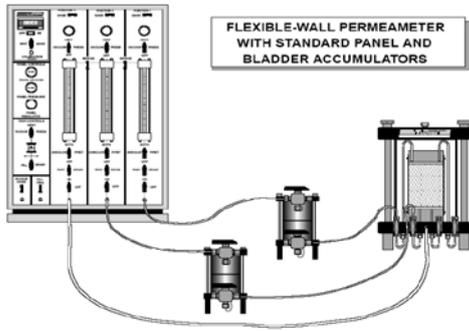


그림 5. Flexible wall 시험 장비 모식도



그림 6. 시멘트 그라우트 투수계수 측정

그림 7과 같이 시멘트 그라우트는 파이프가 삽입됨으로써 건조 시 크랙이 발생할 가능성이 있고 시간이 지남에 따라 순환유체의 반복적인 온도변화가 시멘트 그라우트와 파이프 사이 경계면의 부착력을 약화시켜 파이프와 시멘트 그라우트 사이에 갭이 발생할 가능성이 있다(Paul과 Remund, 1997). Allan과 Philippacopoulos(1999)는 연구를 통해 개발한 시멘트 그라우트에 파이프를 삽입한 경우와 파이프를 삽입하지 않은 시멘트 그라우트와 비교하였으며 1000배에서 10000배까지 침투량(Infiltration rate)이 증가하였다고 보고하였다. 본 연구에서는 파이프가 그라우트에 삽입되어 있는 공시체의 등가 투수계수 측정이 가능하도록 그림 8과 같은 장비를 고안하였다. 시멘트 그라우트에 삽입한 파이프는 일반적인 지중 열교환기용 HDPE 파이프이며 외경은 약 36mm이다. 등가 투수계수를 측정하는 그라우트 시료의 직경을 100mm로 제작하고 멤브레인을 공시체 외경에 맞게 제작하여 Flexible Wall Permeability Cell을 사용하여 등가 투수계수를 산정하였다.



그림 7. 파이프 접촉면(50배)



그림 8. 파이프가 삽입된 시멘트 시료의 투수계수 측정

또한, 지중 열교환기의 경우, 냉난방 시스템이 가동되면 냉방과 난방 과정을 통해 파이프를 순환하는 유체의 온도가 변하게 된다. 따라서 시멘트와 파이프의 서로 다른 열팽창계수로 인해, 두 재료의 경계면의 부착성이 떨어질 가능성이 있다. 본 연구에서 고안된 투수시험 장비는 그림 9와 10과 같이 투수 Cell

과 시료의 상·하부에 수압을 조절하고 시료의 유량을 확인할 수 있는 조절판으로 구성되어 있으며, 시료는 조절판을 이용해 포화시키고, Cell에 적당한 구속압을 가한 후 항온 수조를 이용하여 일정한 온도로 조절된 물을 시료의 파이프 내로 주입하여 냉방과 난방시의 온도의 순환을 고려한 등가 투수계수 측정 시험을 수행하였다.

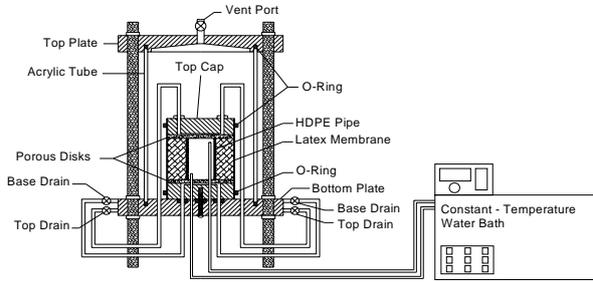


그림 9. 항온 수조를 이용한 등가 투수계수 측정 모식도



그림 10. 항온 수조를 이용한 등가 투수계수 측정 모습

### 3. 시험 결과 및 분석

#### 3.1 유동성 및 열전도도

순수 시멘트의 밀도를 감소시키고, 최종으로 혼합된 시멘트 슬러리의 체적을 증가시키기 위해 시멘트에 일반적으로 사용하는 첨가제는 모래와 벤토나이트이다(한정상 외, 2005). 따라서 본 연구에서는 여러 가지 배합비 및 첨가재에 따른 시멘트 그라우트의 유동성 및 열전도도를 측정하였다. 순수 시멘트 시료에 물/시멘트 비를 0.4부터 0.1씩 늘려가며 시료를 성형하였으며 시험 결과 그림 11과 같이 물/시멘트 비가 0.1씩 증가 할수록 열전도도는 0.01~0.07W/mK씩 감소하였으며 유동성을 나타내는 Slump Flow는 증가하는 것으로 나타났다. 열전도도 향상과 투수계수 저감 목적으로 시멘트 그라우트를 배합할 경우 Allan과 Philippacopoulo(1999)는 최소의 물/시멘트 비를 유지하는 것이 중요하다고 보고하였다. 하지만 물/시멘트 비를 감소시키는 것은 유동성이 감소한다는 것을 의미하므로 배합비에 따른 적절한 물/시멘트 비를 고려해야 할 것이다. 시료를 건조 시킨 후 열전도도를 측정한 결과 열전도도가 습윤 상태일 때보다 대략 0.23~0.27W/mK 만큼 소폭 감소하였다.

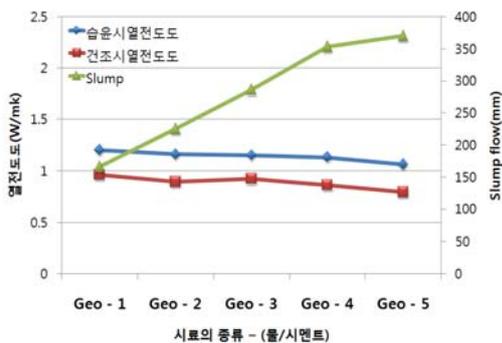


그림 11. 물/시멘트 비에 따른 유동성 및 열전도도

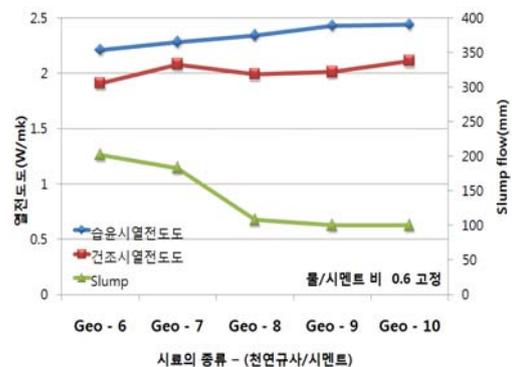


그림 12. 천연규사 첨가에 따른 유동성 및 열전도도

물/시멘트 비를 0.6으로 고정하고 천연규사/시멘트 비를 2.0부터 0.2씩 늘려가며 배합한 경우 유동화제는 시멘트 무게의 0.1%씩 첨가하였다. 시험결과 열전도도는 그림 12와 같이 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.

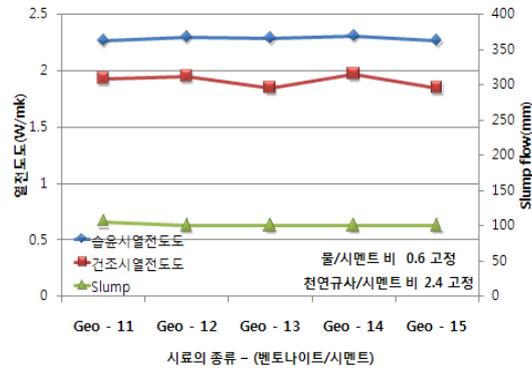


그림 13. 벤토나이트 첨가에 따른 유동성 및 열전도도

또한 물/시멘트 비와 천연규사/시멘트 비를 0.6, 2.4로 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 그림 13과 같이 벤토나이트가 시멘트 무게에 단지 1% 정도 첨가하여도 시멘트 모르타르의 유동성이 현저히 감소하였으며 벤토나이트 첨가량 2%에서 Slump Flow 시험 최소값인 100mm를 기록하였다. 따라서 시멘트/천연규사 그라우트를 배합 시 벤토나이트를 첨가할 경우 유동성이 떨어지므로 반드시 유동화제에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

지중 열교환기 시공 현장에서 채취한 시멘트 그라우트 시료에 대해 양생 기간에 따른 재료의 열전도도를 위의 표 2와 같이 나타내었다. 시멘트 수화열은 시멘트를 구성하는 각각의 화학물질 사이의 복잡한 화학식으로 표현되며 물/시멘트 비, 주변 구조물, 양생 온도 등 다양한 조건에 의해 영향을 받는다. 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 수화열은 24시간 내에 가장 크게 발생하며 약 3일간에 걸쳐 많은 양이 발생되는 것으로 알려져 있다. 또한 수화열은 시멘트 두께에 따라 온도 소산 시간이 차이가 나며 지중 열교환기에서 보어홀의 직경이 15cm이고 지반의 온도가 대략 17°C인 점을 감안하면 시멘트 그라우트 시공 후, 약 2주 후에는 대부분의 수화열이 소산될 것으로 예상된다. 표 2는 수화열로 인해 초기(2일 후)에 측정된 재료의 열전도도가 수화열이 충분히 소산된 후의 열전도도 측정값 보다 40% 가량 과소평가 되었음을 알 수 있다. 실내나 현장에서 시멘트 그라우트의 열전도도를 측정할 경우에는 경화시 발생하는 수화열이 충분히 소산된 후에 실시해야 한다.

표 2. 지중 열교환기 시공 현장에서 채취한 시료의 열전도도

시료의 종류	열전도도 (W/mK)	
	2일 후	9일 후
시멘트+천연규사	1.214	2.097
시멘트+천연규사+흑연	1.779	2.588

### 3.2 일축압축강도

일축압축강도 시험 결과, 물/시멘트 비가 0.4부터 0.1씩 증가 할수록 그림 14와 같이 일축압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 시멘트와 물만 배합한 시료이므로 시멘트 비율이 높을수록 강도가 높아지는 일반적인 시멘트 모르타르의 경향을 갖는다. 천연규사/시멘트 비가 2.0부터 0.2씩이 늘어날수록 그림 15과 같이 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.

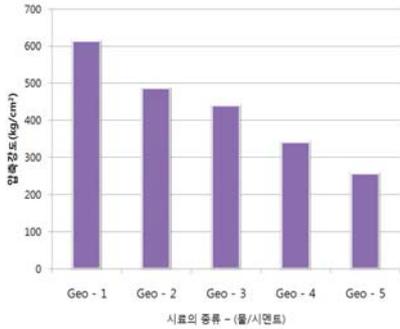


그림 14. 물/시멘트 비에 따른 일축압축강도

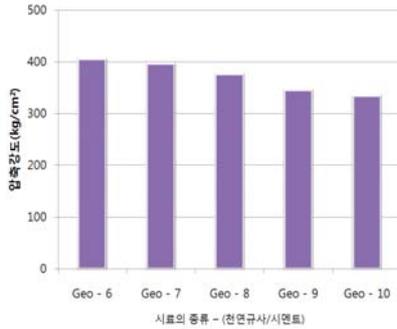


그림 15. 천연규사/시멘트 비에 따른 일축압축강도

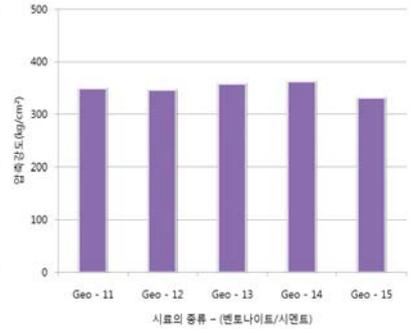


그림 16. 벤토나이트 함유량에 따른 일축압축강도

또한 실제 지중 열교환기용 파이프내 순환유체의 온도변화가 시멘트 그라우트의 재료적 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 일축압축강도를 반복적으로 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 17과 같다. 적용한 시멘트 그라우트 배합비는 표 1의 Geo-3(물/시멘트비 0.6)과 Geo-8(천연규사/시멘트 비 2.4)이다.

천연규사를 함유한 Geo-8의 배합비가 순수 시멘트 배합비(Geo-3) 보다 일축압축강도가 모든 온도변화 주기에서 크게 측정되었다. 온도변화 주기가 증가할수록 일축압축강도가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 에너지 기초구조체(에너지 파일, 에너지 슬라브 등)에서는 시멘트나 콘크리트의 역학적 안정성 유지도 중요한 설계요소이므로 온도변화에 따른 시멘트 혼합물의 강도 감소에 대해 주의가 필요하다.



그림 17. 온도에 변화에 따른 일축압축강도

### 3.3 시멘트 그라우트와 파이프간의 부착성 평가 시험

지중 열교환기는 보어홀에 파이프가 삽입되고, 그 주변에 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. 시멘트 그라우트의 경우, 그림 18과 같이 배합비에 따라 투수계수는  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  cm/sec 범위로 나타났다.

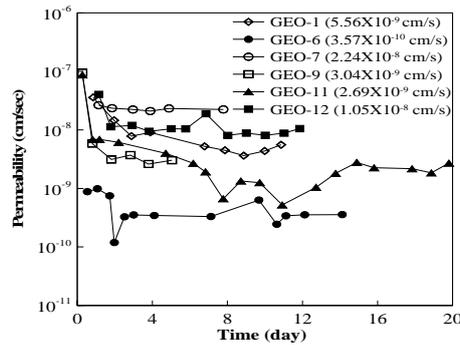


그림 18. 배합비에 따른 시멘트 그라우트의 투수계수

등가 투수계수 측정 시험에 사용된 파이프가 삽입된 시료의 배합비는 GEO-6로 시료를 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/s보다 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.

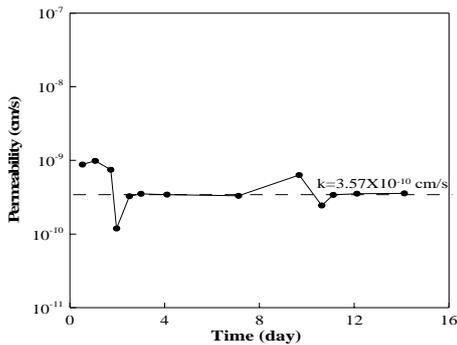


그림 19. 시멘트 그라우트의 투수계수(Geo-6)

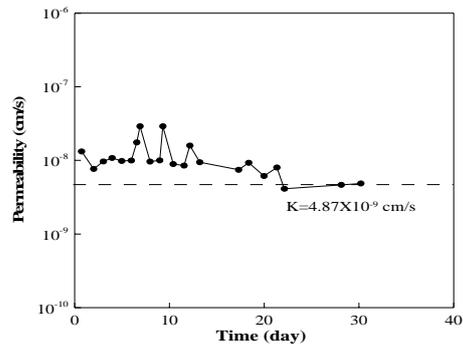


그림 20. 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수(Geo-6)

그림 19와 20에서 배합비 Geo-6의 시험결과, 시멘트 그라우트 자체의 투수계수는  $3.57 \times 10^{-10}$  cm/sec, 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수는  $4.87 \times 10^{-9}$  cm/sec로 나타났다. 이 두 값을 비교함으로써 시멘트 그라우트에 파이프를 삽입함으로써 파이프와 시멘트 사이의 접촉면으로 물이 벽면을 따라 흐를 수 있고 접촉면에서 시멘트 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 투수계수 약 100일 가량 지속적으로 측정하였다. 다음 그림 21은 파이프가 삽입된 공시체의 순환수 온도에 의한 영향을 고려한 등가 투수계수를 보여준다.

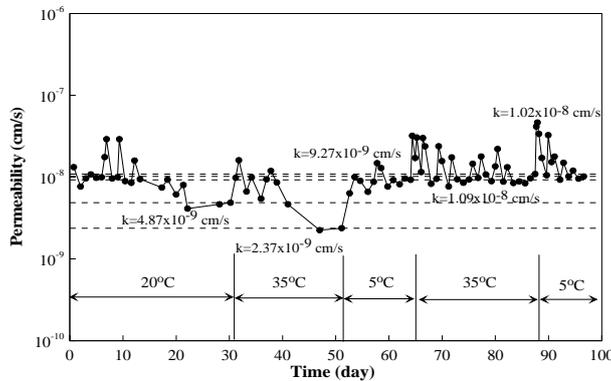


그림 21. 순환수 온도에 의한 영향

장기간 등가 투수계수 측정결과 공시체 제작 후 상온에서(20°C) 약 30일간 시험을 진행하여 등가투수 계수가  $4.87 \times 10^{-9}$  cm/sec로 수렴하였고, 이후 첫 번째 순환수의 온도 35°C의 경우(냉방모드 모사), 약 20일 경과한 후 등가투수계수는  $2.37 \times 10^{-9}$  cm/sec로 수렴하였으며 이후 순환수의 온도가 5°C의 경우(난방모드 모사),  $9.27 \times 10^{-9}$  cm/sec로 다소 증가 하였다. 순환수의 온도변화에 따라 시멘트와 파이프의 수축과 팽창 정도차이에 의해 등가 투수계수가 변하는 것을 확인할 수 있다. 순환수 35°C의 경우, 시멘트보다 HDPE 파이프의 열적 팽창성이 더 커서 시멘트와 파이프 간의 접촉면을 압착하므로 등가투수계수가 상온에서 보다 더 작게 측정되었다. 하지만, 순환수를 5°C 시험했을 경우 시멘트보다 HDPE 파이프가 상대적으로 수축을 크게 하므로 접촉부분의 이완이 예상되고, 이에 따라 측정된 등가투수계수가 35°C에 비하여 다소 증가했다. 시험 개시 후 약 65일이 지난 시점에서 5°C에 대한 등가투수계수 측정을 종료하고 다시 35°C로 순환수의 온도를 바꿔 등가투수계수 측정시험을 진행하였다. 시험시작 후 약 90일이 경과한 시점에서 35°C로 재순환 시킨 경우는 등가투수계수가 처음 35°C로 순환 시켰을 때 보다 약간 증가 하였으며 이후 5°C로 다시 온도를 바꿔 순환시킨 결과 약 100일까지 대략적으로  $1.02 \times 10^{-8}$  cm/sec로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 지중 열교환기 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 작아 순환수의 온도 변화로 인한 시멘트 그라우트의 투수계수에 미치는 영향은 작을 것으로 판단된다. 약 100일(2회 온도순환) 후 시멘트 시료의 등가투수계수는  $1.02 \times 10^{-8}$  cm/sec로 수렴하였다. 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.

#### 4. 결론

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

- 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.
- 시멘트 그라우트의 물/시멘트 비를 0.4부터 0.1씩 증가시킴에 따라 열전도도는 감소하였으며, 물/시멘트 비를 0.6으로 고정하고 천연규사/시멘트 비를 2부터 0.2씩 증가시킴에 따라 열전도도는 증가하였다. 벤토나이트를 첨가한 경우에는 모두 비슷한 열전도도 값이 나타났다.
- 일축압축강도 측정결과 물/시멘트 비 및 천연규사의 첨가량이 증가 할수록 강도는 감소하였으며 벤토

나이트 함유량에 따른 강도 변화는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

- 항온 항습기를 이용하여 온도변화에 따른 일축압축강도 측정결과 재령 28일 강도보다 강도가 낮게 나왔으며 온도변화 주기가 증가할수록 일축압축강도가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.
- 투수계수 측정결과, 접촉면 부분의 겹으로 인하여 순수 시멘트 시료의 투수계수는  $3.57 \times 10^{-10}$  cm/sec, 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수는  $4.87 \times 10^{-9}$  cm/sec로 파이프가 삽입된 시료의 등가 투수계수가 더 크게 측정되었다.
- 항온 수조를 이용하여 순환유체의 온도변화에 따른 등가 투수계수 측정결과 첫 번째 순환수의 온도 35°C의 경우, 등가투수계수는  $2.37 \times 10^{-9}$  cm/sec로 수렴하였으며 장기간 측정한 결과  $1.02 \times 10^{-8}$  cm/sec로 수렴하였다. 온도 변화에 의한 시멘트의 등가투수계수의 변화량이 작아 순환수의 온도 변화로 인한 시멘트 그라우트의 투수계수에 미치는 영향은 작을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

1. 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2005, “지열펌프 냉난방 시스템”, 한림원, pp15-1~15-38
2. 조정식, 2006, “지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구.”, 산업자원부, 최종 보고서 2004-N-GE08-P-01
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.