

지중 열교환기용 벤토나이트 그라우트의 시공성에 대한 화학적, 물리적 영향 요소에 관한 연구

Chemical and Physical Influence Factors on Performance of Bentonite Grouts for Backfilling Ground Heat Exchanger

이철호¹⁾, Chulho Lee, 길후정²⁾, Hujeong Gil, 이강자³⁾, Kangja Lee, 최항석⁴⁾, Hangseok Choi, 최효범⁵⁾, Hyopum Choi

- 1) 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 2) 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 3) 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 4) 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 5) (주)진화 기술연구소 상무, Managing Director, Research&Development Institute, Kunhwa Co., Ltd.

SYNOPSIS : Bentonite-based grouting has been popularly used to seal a borehole installed for a closed-loop vertical ground heat exchanger in a geothermal heat pump system (GHP) because its high swelling potential. However, if the bentonite-based grouting is conducted in coastal areas, the salinity of groundwater changes in the mineral fabric of bentonite. In other words, an increase of cation concentration in groundwater leads to a reduction in the diffuse double-layer thickness in the bentonite mineral structure, and thus the volume of bentonite-based grouts will decrease proportional to the salinity of groundwater. In this paper, the effect of salinity (i.e., NaCl 0.5M, 0.25M, and 0.1M) on the change of swelling potential for bentonite-based grouts has been quantitatively evaluated for seven bentonite grouts from different product sources. In addition, in case of using additives such as a silica sand to increase the thermal conductivity of bentonite-based grouts, the possibility of particle segregation has been studied considering the viscosity of grouts and salinity of groundwater.

Key words : Bentonite grout, Ground heat exchanger, Swelling index, Segregation, Salinity

1. 서 론

최근 우리나라는 고유가 시대를 대비하기 위한 대체 에너지 개발의 필요성이 증대되고 있다. 교토 의정서(1997)나 최근의 발리 로드맵(2007)에 의한 온실가스 배출량 제한과 신재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법 제 11조 등을 통해 정책적으로 신재생 에너지의 사용이 의무화 되어가고 있다. 지열 에너지는 재생에너지(renewable energy)로 비고갈성이며 환경친화적인 에너지이다.

국내 지열 냉난방 시스템은 그림 1과 같이 수직 밀폐형 지중 열교환기를 적용한 시스템이 주로 시공되고 있다. 지중 열교환기는 지중 약 150~200m까지 천공한 대략 15cm 직경의 보어홀에 U자관으로 연결된 두 가닥의 HDPE 파이프를 설치하여 물 혹은 부동액을 순환시켜 주변 지반과 열교환이 이루어진다. 그림 2에서 보여 지는 것과 같이 보어홀과 HDPE 파이프 사이의 뒤채움재는 지반과 파이프간의 열교환 매개체 역할을 담당한다. 국내에서는 뒤채움재로 벤토나이트 그라우트를 사용하도록 권장하고 있다. 벤토나이트는 투수계수가 낮고 물과 혼합 시 팽윤하는 성질을 가지고 있어 오염된 지표수로부터 지하수를 보호하고 파이프 손상 시 흘러나올 수 있는 부동액의 확산을 방지한다. 또한, 벤토나이트의 팽윤성을 이용하여 파이프와 지반 사이에 열적 단락이 발생하는 것을 방지하는 역할을 하게 된다.

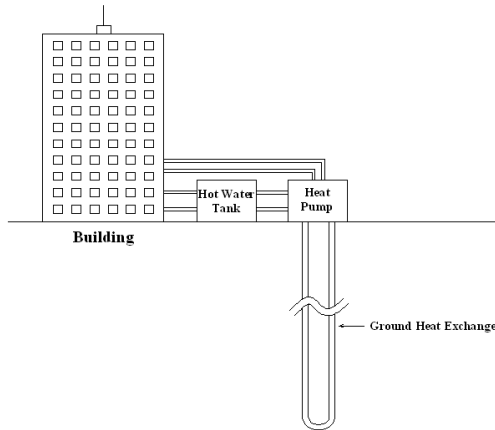
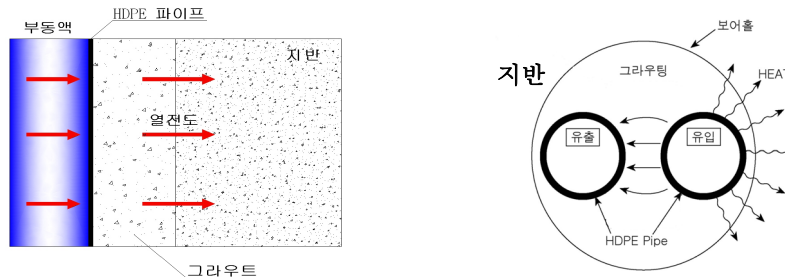


그림 1. 수직형 지열 냉난방 시스템 모식도



(a) 냉방시 지중의 열전달 메커니즘 (b) 지중열교환기 단면에서의 열전달

그림 2. 지중 열교환기의 열전달 메커니즘

벤토나이트의 낮은 투수계수와 팽윤성은 점토광물의 확산 이중층(double layer) 이론으로 설명할 수 있다. 점토 입자는 자연 상태에서 음극을 띠며 입자 주변의 양이온이나 물을 끌어당겨 확산 이중층 두께를 증가시켜 팽윤하게 되고 포화시 낮은 투수계수를 갖는다. 1970년 Olson과 Mesri은 간극수의 이온 농도에 따른 점토의 투수계수 변화에 대해 연구 하였으며 점토 광물의 이온교환에 의한 이중층 구조의 변화로 투수계수가 커진다고 결론을 내렸다. 따라서, 벤토나이트를 뒤채움재로 사용하는 지중 열교환기가 염도에 의한 영향을 받을 우려가 있는 해안가에 시공 될 때에는 팽윤성과 투수계수 변화를 고려해야 한다.

국내에서 사용 중인 벤토나이트 뒤채움재의 열전도도는 약 $0.75\sim 0.83 W/m^{\circ}C$ 범위를 갖는 것으로 보고 되었으며(조정식, 2006; 최항석 등, 2007) 주변 지반에 비해 상대적으로 열전도도가 낮다(Remund와 Lund, 1993). 따라서 국내 시공 현장에서는 열전도도를 높이기 위해 천연규사(silica sand)를 첨가제로 사용하고 있다(조정식, 2006; 최항석 등, 2007). 그러나 그라우트의 점도가 낮을 경우 첨가제로 사용된 천연규사가 바닥에 가라앉는 재료분리 현상이 발생할 수 있으며, 이로 인해 기대했던 열전도도 효율이 발현되지 않을 가능성이 있다.

본 연구에서는 국내에서 지중 열교환기 시공시 사용 중인 7종의 벤토나이트 그라우트를 선정하여 각각의 광물 특성을 XRD 시험을 통해 분석하고 간극수의 염도에 따른 벤토나이트의 물리적 변화와 그라우트의 점도에 따른 재료분리 현상을 평가하였다.

2. 시료의 특성 및 시험 방법

2.1 XRD 시험

국내 사용 중인 7종의 벤토나이트 시료에 대해 XRD 시험을 수행하였다. XRD 분석 결과, 표 1에서 보는 바와 같이 Bentonite 2 시료가 가장 많은 몬모릴로나이트를 함유한 것으로 나타났으며 Bentonite 1, Bentonite 3와 Bentonite 7이 비교적 낮은 몬모릴로나이트 함유량을 갖는다. 벤토나이트의 팽윤성과 낮은 투수계수 특성은 몬모릴로나이트와 관계가 깊다. 점토광물 중 몬모릴로나이트는 주변의 수분조건에 따라 팽창과 수축이 크게 발생하며, 600~800m²/g의 큰 비표면적을 갖고 있어 다른 광물에 비하여 이온흡착력이 크다. 따라서, 몬모릴로나이트의 함량이 높을수록 팽창성이 높아 뒤채움재로 사용이 적합하다고 할 수 있다. Bentonite 7의 경우 석영(Quartz)을 다량 포함하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 열전도도 향상을 위해 그라우트 제조과정에서 모래 성분인 석영을 포함시킨 것으로 추측된다.

표 1. 벤토나이트 시료의 XRD 분석결과

광물 시료	Qtz	Pl	K-f	Hbl	Cal	Mnt	Ill	Kln	Op	Py	Syl
Bentonite 1	4.1	58.0	-	-	1.9	30.6	-	-	3.8	-	1.7
Bentonite 2	4.4	18.8	-	-	3.4	62.9	-	-	0.6	3.3	6.8
Bentonite 3	3.1	52.1	-	-	0.3	38.8	-	-	5.5	-	0.2
Bentonite 4	5.4	34.3	4.3	-	-	43.5	-	-	7.1	-	5.4
Bentonite 5	6.8	29.2	-	9.0	2.0	42.8	-	-	3.3	0.9	6.0
Bentonite 6	5.5	22.1	-	-	4.2	53.7	-	-	10.2	-	4.3
Bentonite 7	44.2	5.3	-	-	12.9	37.7	-	-	-	-	

* Qtz(Quartz: 석영), Pl(Plagioclase: 사장석), K-f(K-feldspar: 정장석), Hbl(Hornblende: 각섬석), Cal(Calcite: 방해석), Mnt(Montmorillonite: 몬모릴로나이트), Ill(Illite: 일라이트), Kln(Kaolinite: 고령토), Op(Opal: 단백석), Py(Pyrite: 황철석), Syl(Sylvite: 실바이트)

2.2 Free swell 시험

Free Swell Test(ASTM D 5890, 1995)은 U.S. Pharmacopoeia Convention (USPC)에서 의약품 조제나 복용량을 조사하는 법에서 착안하여 고안된 시험법이다. ASTM의 방법이 적용되기 전에는 벤토나이트의 팽윤도를 측정하는 방법으로 GRI(Geosynthetic Research Institute) 시험법인 GCL-1(Free Swell of the Clay Component of Geosynthetic Clay Liners)을 사용하였는데 GRI의 GCL-1은 100g의 시료를 눈금이 부착된 직경 150mm의 실린더에 넣고 24시간 후의 팽윤된 값을 측정하는 시험법이다. ASTM법은 GRI GCL-1법보다 간단한 시험기구를 이용하여 진행된다. 시험은 노건조 후 ball-milling된 2g의 세립분 시료를 100ml 메스실린더에 0.1g씩 넣고 충분히 수화하여 침강할 수 있도록 최소 10분 간격으로 시험을 진행한다. 벤토나이트가 뭉쳐서 덩어리 형태로 침강할 경우 낮은 투수특성으로 인해 뭉친 벤토나이트 슬러리에 물이 안쪽까지 스며드는 시간이 매우 오래 걸리기 때문에 시료를 넣는 과정에서 주의를 요한다. 그림 3과 같이 2g의 시료를 넣은 후(ASTM에서는 16시간) 팽윤된 점토와 물 사이의 경계를 ml단위로 읽고 결과를 ml/2g의 단위로 기록하며 이를 팽윤도(swelling index)라고 정의한다.

본 연구에서는 100번체를 통과한 총 7종의 벤토나이트 시료에 대해 Free Swell 시험을 수행하였다.



그림 3. Free Swell 시험 모습

2.3 간극수의 염도 효과를 고려한 침강 시험

벤토나이트의 물리화학적 특성에 미치는 간극수의 염도 영향을 고려하기 위하여 NaCl용액 농도별 침강시험을 실시하였다. 실내 침강시험은 1000ml 메스실린더를 사용하여 농도가 0.1M, 0.25M, 0.5M의 NaCl용액을 조성한 후 벤토나이트와의 무게비가 20%(벤토나이트 무게/전체 시료의 무게)가 되도록 혼합하였다. 또한 벤토나이트 교반 시 덩어리가 생기지 않도록 충분히 교반한 후 그림 4와 같이 침강시험을 실시하였다. 침강시험 초기에는 침강속도가 빠르기 때문에 침강특성을 파악하기 위하여 짧은 시간 간격으로 시료 높이를 측정하였으며, 침강속도가 줄어드는 시점부터는 시간 간격을 늘려 측정을 하였다. 또한 증발에 대한 침강 높이의 영향을 배제하기 위해서 상부를 봉인하여 실험을 수행하였다.



그림 4. 벤토나이트 침강시험 모습

2.4 첨가제의 재료분리 실험

열전도도를 높이는 목적으로 벤토나이트 그라우트에 천연규사를 첨가제로 사용할 때 그라우트의 점도가 너무 낮을 경우 비중차이에 의해서 천연규사가 가라앉는 재료분리가 발생할 수 있다. 천연규사가 첨가된 벤토나이트의 재료 분리 현상을 관찰하기 위해서는 그라우트를 셋팅한 후 각 층별로 깊이로 따른 천연규사 함량과 열전도도를 측정하였다. 시료를 각각의 층으로 나누기 위해 그림 5와 같은 Ring-type 재료분리 시험 장비를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 재료분리 장비는 청동 재질로 직경이 15cm이고, 두께 1.5cm의 다수의 링으로 구성되어서 1.5cm 간격으로 층을 나누어 각 층에서의 시료를 채취하여 분석을 할 수 있다. 그리고 각 층의 시료 채취를 용이하게 하기 위하여 별도의 guide plate를 제작하였다. 분리된 링 20개를 그림 5와 같이 쌓아올린 후, 내부에 벤토나이트 그라우트를 부어 천연규사의 재료분리 시험을 실시하였다. 링과 링 사이로 시료가 유출되는 것을 막기 위하여 링과 링 사이의 경계면에 vacuum greese를 도포한다.

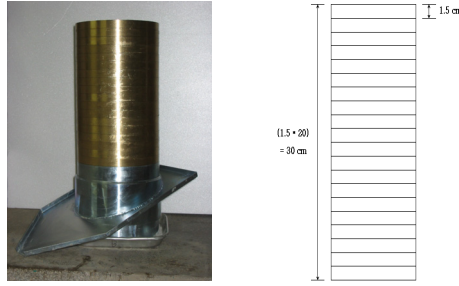


그림 5. 재료 분리 시험장비

그라우트 셋팅이 완료된 후 각 층을 분리하여 채취한 시료를 건조기에서 건조시켜 입도 분석을 하고 각 층에서의 천연규사와 벤토나이트의 양을 측정하였다. 재료 분리 정도를 알아보기 위하여, 전체 시료 높이를 네 부분으로 나누어 각 층에 남아 있는 천연규사의 양과 각 층의 시료에 대한 열전도도를 측정하였다.

본 연구에서는 낮은 점도에서의 재료분리 현상을 알아보기 위하여 무게 배합비 20%, 10%의 벤토나이트에 각각의 벤토나이트 시료 무게의 30%에 해당하는 천연규사를 첨가하여 실험을 수행하였다. 시험에 사용된 벤토나이트는 Bentonite 1와 Bentonite 3이고 천연규사는 국내 7호사이다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 Free swell 시험 결과

국내 7종의 벤토나이트에 대해서 Free Swell Test를 시험한 결과는 표 2와 같다. 벤토나이트의 종류에 따라 큰 팽윤도 차이를 보인다. 특히 Bentonite 2, Bentonite 6의 경우 큰 팽윤도를 갖는다. 이는 앞에서 설명한 몬모릴로나이트 광물의 함량과 연관이 있다. 보통 나트륨계 벤토나이트의 경우 건조 상태 체적의 1~15배까지 팽윤하는 것으로 알려져 있다. 실제 국내 시공현장에서 벤토나이트가 그라우트재로 주로 사용되고 있는 이유는 벤토나이트의 높은 팽윤도 때문인데, 각 벤토나이트에 대한 팽윤도 측정을 통해 벤토나이트 종류에 따른 팽윤특성을 실제 설계에 반영할 수 있을 것이라고 판단된다.

표 2. 시료별 Free Swell Test 결과

시료	팽윤도(ml/2g)
Bentonite 1	13.5
Bentonite 2	27
Bentonite 3	15
Bentonite 4	23
Bentonite 5	24.5
Bentonite 6	29
Bentonite 7	10

벤토나이트를 구성하는 점토광물 중 몬모릴로나이트는 팽윤성이 가장 큰 광물로서 몬모릴로나이트 함량이 팽윤도에 중요한 요소로 볼 수 있다. 그림 6은 XRD 시험 결과로부터 얻은 몬모릴로나이트 함량과 팽윤도의 관계를 보여준다. 몬모릴로나이트 함량이 클수록 팽윤도값이 큰 것을 알 수 있고, 이는 몬모릴로나이트 함량이 벤토나이트의 팽윤성을 결정하는 가장 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

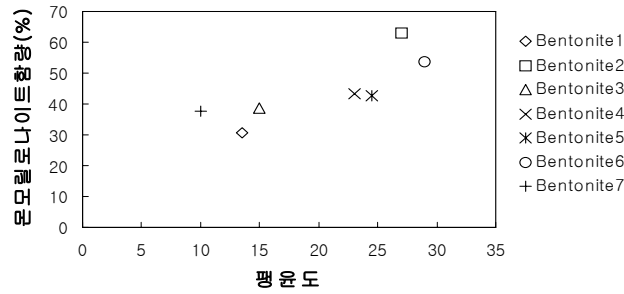


그림 6. 몬모릴로나이트 함량과 팽윤도 관계

3.2 간극수의 염도 효과를 고려한 침강 시험 결과

대부분의 벤토나이트는 간극수의 NaCl 농도가 높아짐에 따라 총침강량은 증가를 보였으나, 벤토나이트 종류에 따라서 NaCl 농도가 총침강량과 침강속도에 미치는 영향정도가 다르다는 것을 보여주고 있다. 앞서 언급했듯이, 간극수의 전해질 농도 증가는 점토의 확산 이중층 내 양이온 농도와 불균형을 이루어 이중층 내의 물분자를 삼투압에 의해 이중층 밖으로 배출하여 시료의 부피를 감소시킨다.

NaCl 농도에 따른 총침강량과 팽윤도(Swelling index)의 관계를 분석하였다. 20%로 교반한(Bentonite 6의 경우는 10%) 벤토나이트 시료의 침강 결과에 대하여 NaCl 전해질 농도별로 팽윤도를 비교하였다. 표 3은 각 시료에 대해 팽윤도와 전해질 농도에 따른 시료의 초기높이 대비 침강량의 비율(침강율)을 보여준다. 그림 7-9는 0.1M, 0.25M, 0.5M의 경우에 대한 각각의 팽윤도와 침강율의 관계를 보여준다.

표 3. 팽윤도와 침강율

시료	팽윤도(ml/2g)	총침강량 / 초기높이 × 100(%)	
		0.1M	0.25M
Bentonite 1	13.5	32.6	42.3
		48.7	
Bentonite 2	27	0	19.5
		28	
Bentonite 3	15	0	0.88
		37	
Bentonite 4	23	0	30
		33.4	
Bentonite 5	24.5	0	0
		23.75	
Bentonite 6	29	0	0
		0	
Bentonite 7	10	0	34.48
		37.2	

* Bentonite 6은 10% 벤토나이트 함유량

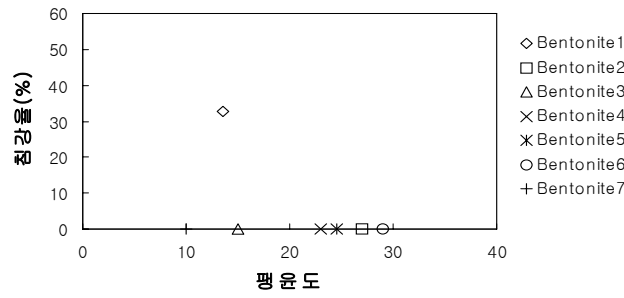


그림 7. 0.1M NaCl 용액에서 팽윤도와 침강율 관계

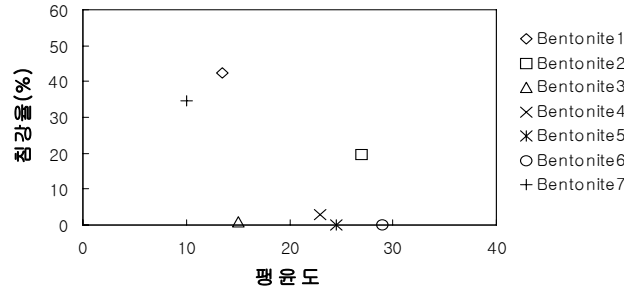


그림 8. 0.25M NaCl 용액에서 팽윤도와 침강율 관계

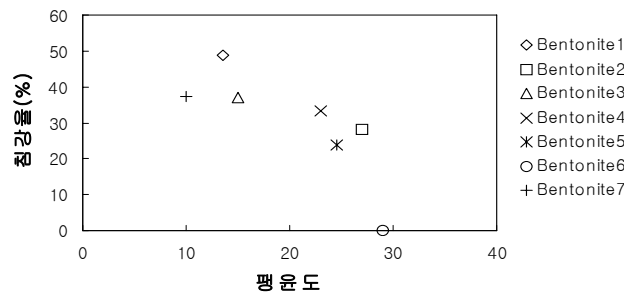


그림 9. 0.5M NaCl 용액에서 팽윤도와 침강율 관계

NaCl 0.1M, 0.25M에서는 벤토나이트 시료의 침강 정도가 전해질 농도에 비교적 덜 민감하여 팽윤도와 침강정도의 관계가 명확하지 않으나 0.5M의 경우에서는 팽윤도가 커짐에 따라 침강율이 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서, 해안가와 같이 간극수의 염도가 고려되는 경우는 지중 열교환기의 뒤채움용 그라우트를 팽윤도가 큰 벤토나이트를 선정해야 한다.

3.3 침강율과 점토광물 함량과의 관계

NaCl 0.1M, 0.25M, 0.5M 용액에 대한 침강율과 몬모틸로나이트 함량과의 관계를 나타내면 그림 10-12와 같다.

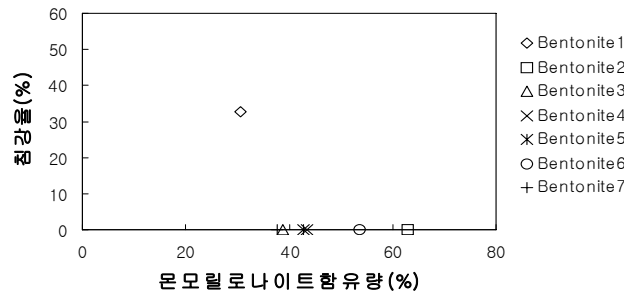


그림 10. 0.1M NaCl 용액에서 몬모릴로나이트 함량과 침강율 관계

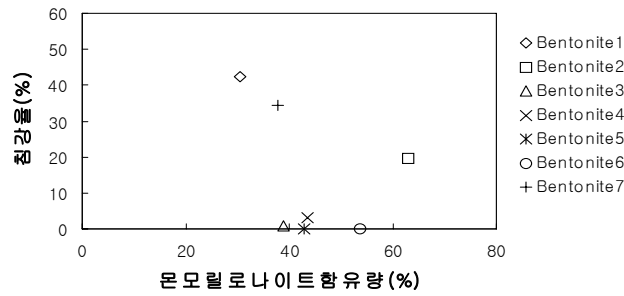


그림 11. 0.25M NaCl 용액에서 몬모릴로나이트 함량과 침강율 관계

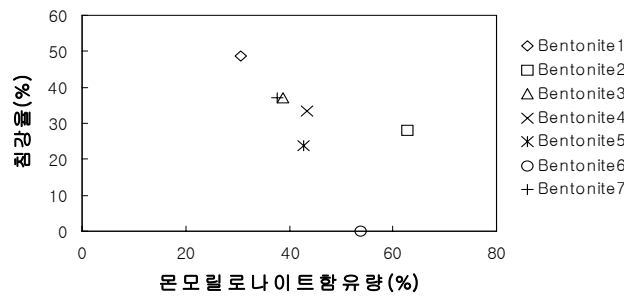


그림 12. 0.5M NaCl 용액에서 몬모릴로나이트 함량과 침강율 관계

침강율과 팽윤도의 관계에서도 보여진 바와 같이 NaCl 농도 0.1M과 0.25M 용액에서는 침강율과 몬모릴로나이트 함량의 관계가 뚜렷하지 않지만 0.5M 용액에서는 몬모릴로나이트 함량이 높을수록 침강율이 작아지는 경향을 볼 수 있다. 지중 열교환기 뒤편재로 벤토나이트를 사용한 경우, 벤토나이트는 충분한 몬모릴로나이트 함량을 보유해야 한다. 높은 몬모릴로나이트 함량은 높은 팽윤성(팽윤도)을 유지시키고, 또한, 지하수가 상대적으로 높은 염도를 갖는 경우(해안지역) 전해질 농도에 의한 벤토나이트 그라우트 부피감소를 최소화 할 수 있다. 다시 말해, 지중 열교환기에 사용되는 벤토나이트 그라우트는 지하수 염도 영향도 고려해야 하므로 몬모릴로나이트의 함량이 높은 재료를 사용하여 지중 열교환기의 성능을 유지해야 한다. 만약 Bentonite 1(몬모릴로나이트 함량=30.6%, 팽윤도=13.5 mg/2ml)를 NaCl 농도 0.25M의 지하수 조건에 200m 깊이로 시공한 경우, 지하수 염도에 의해 최악의 경우 약 120m 만이 벤토나이트로 채워지는 경우를 초래할 수 있다(침강율 41.25%). 이는 지중열교환기의 시스템 효율을 크게 감소시킨다.

3.4 첨가제의 재료분리 실험 결과

천연규사와 벤토나이트의 혼합은 교반기를 이용하여 균질한 혼합이 이루어지도록 하였다. 교반을 완

료한 시료를 Ring-type 재료분리 시험장비에 부어 넣은 후 시험을 개시했다. 그라우트 셋팅이 완료된 후 4개의 층으로 나누어 재료 분리 현상을 관찰하였다. 그림 13은 천연규사가 첨가된 벤토나이트 시료를 재료 분리 시험장비에 설치한 모습이다. 본 실험에서는 벤토나이트와 천연규사의 재료 분리 여부를 확인하고 재료 분리가 열전도도에 미치는 영향을 알아보려고 각각의 혼합 기준에 대한 재료 분리 현상을 먼저 확인해 보았다. 그리고 분리 현상이 발생한 시료에 대한 각 층별 입도 분석과 열전도도를 측정하였다.



그림 13. 재료분리 시험장비에 채워진 벤토나이트 시료

그라우트 셋팅이 완료된 후 재료분리 실험 장비를 4개의 층으로 나누어 분리를 하였다. 각 층의 시료를 채취하여 열전도도를 측정하고 입도분석을 실시하였다. 입도분석은 KS F 2302에 의거하여 채취한 시료를 건조기에 넣어 완전 건조 시킨 후 시험을 수행하였으며 열전도도 측정은 그림 14의 비정상 열전도도(QTM 500) 측정기를 이용하였다.



그림 14. 비정상 열전도도 측정기(QTM 500)

벤토나이트의 무게비를 10%, 20%로 다르게 하여 실험을 수행한 결과, 벤토나이트의 종류에 따라 다른 결과가 나타났다. Bentonite 1에서는 10%, 20% 모두에서 재료 분리 현상이 일어난 반면, Bentonite 3의 경우에는 무게비 10%에서만 재료 분리 현상이 나타났다. 재료 분리 현상이 일어날 경우 천연규사가 전체 층을 통해 일정하게 분포되어 있지 않고 그림 15처럼 천연규사가 바닥에 대부분 침전되는 것을 볼 수 있었다. 천연규사의 재료분리 정도를 나타내기 위해 층별로 시료를 채취하여 건조시키고 대표적으로 100번체를 통과시켜 잔류율(100번체에 남은 무게 / 시료의 무게)로 표시하였다.



(a) 무게비 10% Bentonite 1



(b) 무게비 10% Bentonite 3

그림 15. 실험 장비 바닥에 침전된 천연규사

Bentonite 1은 무게비 10%, 20% 모두에서 재료 분리 현상이 발견되었고, 특히 벤토나이트 무게비 10%의 시료에서 급격하게 재료 분리가 일어났다. 그림 16은 10%인 Bentonite 1의 열전도도와 100번체 잔류율을 보여준다. 상부 세 개 층의 천연규사 잔류율은 2% 이하이고, 특히 첫 번째 층의 경우 거의 0%에 가깝지만, 네 번째 층인 0 ~ 7.5cm 구간의 천연규사 잔류율은 다른 세 개 층에 비해 40배 정도 높은

약 80%에 이르고 있다. 즉, 대부분의 천연규사가 실험 장비 바닥에 침전된 것으로 보인다.

천연규사 잔류율의 큰 차이는 열전도도에 크게 영향을 주었다. 천연규사 잔류율이 매우 낮은 상부의 세 개 층에서는 0.68 ~ 0.77(W/m°C) 정도의 열전도도 분포를 보이지만, 네 번째 층(0~7.5cm)의 열전도도는 첫 번째 층에 비해 상당히 높은 1.16(W/m°C)의 열전도도를 보인다. 이러한 사실을 통해 벤토나이트 그라우팅에서 재료 분리 현상이 열전도도에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

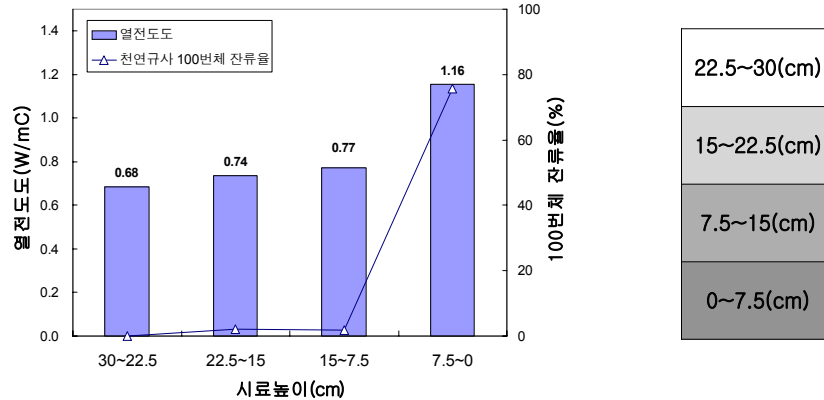


그림 16. 시료 높이에 따른 열전도도와 천연규사 100번째 잔류율(무게비 10% Bentonite 1)

20%의 Bentonite 1의 경우는 10%의 경우에 비하여 재료 분리 현상이 명확하게 나타나지는 않았다. 그림 17에서와 같이, 네 개의 층에서 천연규사의 100번째 잔류율은 38 ~ 42% 정도로 차이가 나타났으며 이에 따른 열전도도는 0.87 ~ 0.93(W/m°C)으로 나타났다.

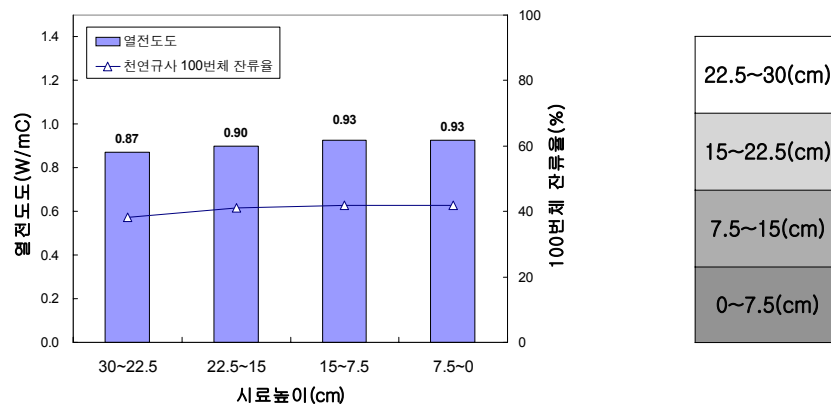


그림 17. 시료 높이에 따른 열전도도와 천연규사 100번째 잔류율(무게비 20% Bentonite 1)

그림 18은 Bentonite 3에 대한 시료 높이 별 천연 규사 100번째 잔류율과 열전도도를 보여주고 있다. 물론, 실험에 사용한 7호사 천연규사 중 100번체를 통과한 입자가 있을 수 있어 100번째 잔류율은 각 층에 남은 천연규사 잔류율(천연규사 무게/시료 전체의 무게)보다는 다소 적을 것이다. 그러나 각 층에서 벤토나이트와 천연규사를 완전히 분리해서 무게를 측정하기는 현실적으로 어렵기 때문에, 본 연구에서는 천연규사 입자 중 100번체를 통과하는 양이 미미할 것이라는 가정 하에 각 층에서 구한 100번째 잔류량을 천연규사 양으로 가정하여 실험결과를 분석하였다. Bentonite 3은 10%에서만 재료 분리 현상이 발생하였고, 시험 후 4개의 층으로 나누어 각 층에서의 천연 규사의 양을 측정한 결과 그림 18에서와 같이 실험 장비의 가장 아래층인 0~7.5cm에서 천연 규사의 양이 가장 많게 측정되었고, 상부로 갈수록 그 양이 줄어들었다. 특히, 상부층인 22.5 ~ 30cm 구간과 가장 아래층인 0~7.5cm의 천연 규사 양을 비교해 보면 약 2배 정도의 차이를 보이고 있다. 천연규사의 잔류율이 가장 높은 하부층(0~7.5cm) 구간에서

열전도도가 0.87(W/m°C)로 가장 높게 측정되었으며, 하부층에 비해 약 50%의 천연 규사 잔류율을 보이는 상부층에서는 0.85(W/m°C)의 열전도도가 측정되었다. 각 층에서의 천연 규사의 양의 차이로 인하여 각 층의 열전도도 차이가 발생한 것으로 판단된다.

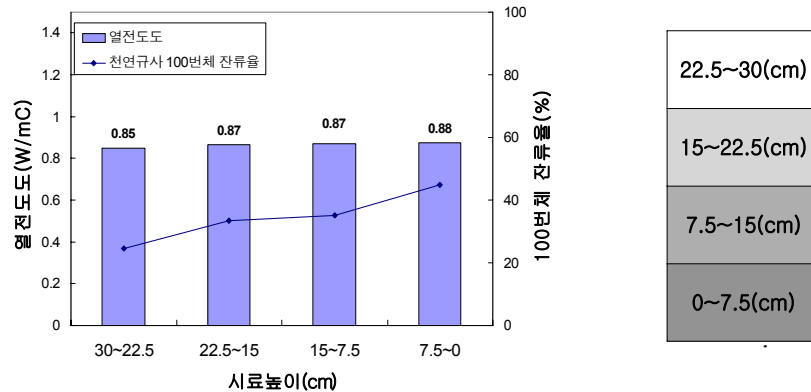


그림 18. 시료 높이에 따른 열전도도와 천연규사 100번체 잔류율(Bentonite 3)

낮은 그라우트 점도에서의 천연규사의 재료 분리로 인해 시료 높이에 따른 열전도도의 차이는 결과적으로 시료 전체에서 천연규사가 균일하게 분포되어 있지 않아 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 벤토나이트 그라우트의 점도가 낮을 경우 재료분리로 인해 보어홀 깊이별 열전도도 분포가 다를 수 있다. 이는 현장에서 그라우트의 시공성을 높이기 위해 점도를 과도하게 낮출 경우 시공된 지중 열교환기의 시스템효율이 예측한 값보다 작아질 수 있다. 즉, 200m 깊이의 보어홀에서 재료분리가 발생할 경우 상부에서 열전도도 향상을 기대할 수 없어 당초 설계한 지중 열교환기의 열전도 성능이 발휘되지 않을 것이다. 따라서, 시공 시 그라우트재의 배합비에 따른 점도를 고려하여 재료분리 현상이 발생하지 않도록 해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 사용 중인 7종의 벤토나이트 그라우트의 광물 특성을 분석하고 간극수의 염도에 따른 영향과 점도에 따른 영향을 실험적으로 고찰하였다. 연구수행 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) Free Swell 시험 결과 벤토나이트의 팽윤도는 13.5~29 ml/2g의 범위를 갖는 것으로 나타났으며 몬모틸로나이트 함량이 높을수록 팽윤도(Swelling index)도 비례적으로 증가하는 경향으로 나타났다. 그러므로 물리적 성질면에서 몬모틸로나이트 함량이 높은 벤토나이트를 지중 열교환기용 뒤채움재로 사용하는 것이 적합하다.
- (2) 간극수의 염도에 따른 벤토나이트 그라우트의 침강 시험 결과 NaCl 농도 0.1M과 0.25M에서는 침강정도가 전해질 농도에 덜 민감하여 팽윤도와 침강정도 관계를 명확히 알 수는 없었으나 0.5M의 경우에는 팽윤도가 높을수록 침강율이 작아지는 경향으로 나타났다. 몬모틸로나이트 함량과 간극수의 염도에 따른 침강율은 몬모틸로나이트 함량이 높을수록 침강율이 낮았다. 따라서, 해안가와 같이 지하수 염도 영향을 고려하는 지역에 시공할 때에는 몬모틸로나이트 함량이 높은 재료를 사용하여 지중 열교환기의 성능을 유지해야 한다.
- (3) 상대적으로 점도가 낮은 벤토나이트와 천연규사를 배합한 결과 재료분리 현상이 관찰되었으며, 재료분리가 발생 하였을 때 시료의 상부와 하부에 열전도도 차이가 발생하였다. 시료에 따라 상하부 열전도도 차이가 다르게 나타났으며 Bentonite 1 무게비 10%의 경우 열전도도의 차이가 0.58W/m°C로 가장 크게 나타났다. 시공성을 위해 벤토나이트 그라우트의 점도를 낮출 때에는 재료분리로 천연규사가 지중 열교환기 바닥에 가라앉아 지중 열교환기 열전달 능력이 감소되는 것을 고려해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심D04)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ASTM D5890 (1995), "Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners", **American Society for Testing and Materials**
2. 조정식(2006), "지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성에 관한 연구", 산업자원부, 최종보고서 2004-N-GE08-P-01
3. 최항석, 이철호, 김후정, 최효범, 이상백(2007), "수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤채움재의 열전도 및 점도특성 연구", **신재생에너지학회 논문집**, Vol. 3, No.4, pp 4-13.
4. 최항석, 이철호, 최효범, 이상백(2008), "지중 열교환기용 뒤채움재의 물리적 특성 연구", **한국지반공학회 논문집**, Vol. 24, No.1, pp 37-49
5. Olson, R. E. and Mesri, G(1970), "Mechanisms controlling the compressibility of clays", *Journal of ASCE*, Vol. 96, No. 6, pp 1863-1878.
6. Remund, C.P., and Lund,J.T.(1993), "Bentonite-based backfill mixtures for GSHPs", Final Report, RER Project 91-18, *National Rural Electric Cooperative Association*.