

# 지열히트펌프 지중열교환기용 벤토나이트계 그라우트재의 열전도특성 및 기본성능

배 강

한국에너지기술연구원 에너지융합소재연구센터(kabai@kier.re.kr)

## Thermal Conductive Characteristics and Basic Properties of Bentonite Grouts for the Ground Heat Exchanger of Geo-source Heat Pump

Bai, Kang

Energy Materials and Convergence Research Department, Korea Institute of Energy Research

### Abstract

In this study, the thermal conductive characteristics and basic properties of the nine commercial products of bentonite grouts were studied. Six of the nine products for ground heat exchanger systems are imported and others for civil engineering are domestic. The thermal conductivities of all bentonite products are nearly similar among products. The free swell indexes, viscosities and filter losses of the ground heat exchanger grouts are lower than those of the civil engineering ones. These characteristics seem to increase of the fluidity to fill the bentonite slurry to bore-hall perfectly, rather than to prevent underground water penetration. Thus, the mixtures of bentonites and sands are recommended for high thermal conduction grouts.

Keywords : 벤토나이트(Bentonite), 그라우트재(Grout), 지중열교환기(Ground Heat Exchanger), 열전도도(Thermal Conductivity), 팽윤도(Free Swelling Index), 깔대기 점도(Marsh Funnel Viscosity), 여과수량(Filter Loss)

### 1. 서 론

벤토나이트는 1898년 Knight에 의해 미국 몬태나주 Fort Benton지역에 있는 팽윤성이 아주 큰 점토에 대해 처음으로 명명되었으며, 이후 상품명으로 널리 알려졌다. 이는 백악기에 생성된 스멕타이트(smectite) 그룹의 몬모

릴로나이트(montmorillonite)를 주성분으로 하는 층상구조를 갖는 점토물질로, 통상 장석, 흑운석, 석영, 방해석 등과 혼합되어 있다.<sup>1)</sup> 몬모릴로나이트는 높은 팽윤성, 팽창성, 큰 표면적, 높은 충전하, 높은 양이온 교환능, 높은 수분흡착력 등의 특성을 갖고 있어, 주물, 토목, 제지, 사료 및 농업분야 등의 여러 가지

Submit date : 2012. 11. 1, Judgment date : 2012. 11. 4, Publication decide date : 2012. 12. 26  
Communication author : Bai, Kang(kabai@kier.re.kr)

분야에 사용되고 있다.<sup>2)</sup>

몬모릴로나이트는 2개의 SiO<sub>4</sub> 4면체와 그 사이에 Al과 O로 이루어진 8면체판에 의한 2:1의 층상구조로 이루어지며, 이들 층의 표면에 흡착된 양이온이 존재하는 얇은 판상의 Si-Al-Si 구성단위가 겹쳐진 구조가 된다.(Fig. 1)

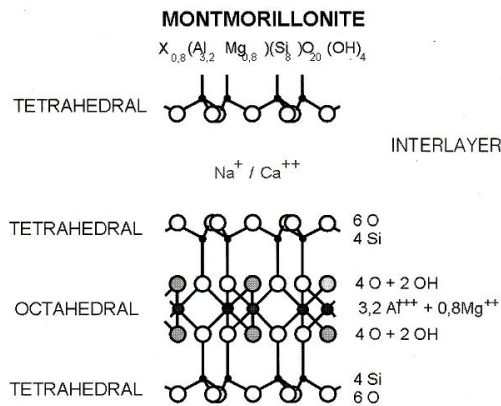


Fig. 1 Crystal structure of montmorillonite

팽윤(swelling)은 Si 층면을 따라 물이 들어가 인접한 구성단위의 층간 폭을 넓히는 현상을 말한다. 같은 구조를 하고 있는 몬모릴로나이트에서도 흡착된 양이온의 종류에 따라 팽윤이 달라진다.(Fig. 2)

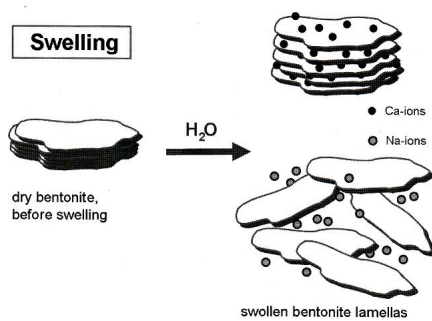


Fig. 2 Swelling phenomena

즉, Na<sup>+</sup>이온이 흡착된 경우 층간 간격이 넓어지나, Ca<sup>2+</sup>이온일 때는 물이 많이 들어가지 못하여 층간의 간격이 Na<sup>+</sup>이온일 때 보다는

좁다. Ca-몬모릴로나이트는 물을 흡수하여 단위층의 간격이 20Å 정도까지 팽윤되지만, Na-몬모릴로나이트는 150Å 이상까지 팽윤이 가능하다.<sup>3)</sup>

그리고 우리나라뿐만 아니라 전세계적으로 Ca계 벤토나이트가 주로 산출되는데, 이것을 활성화(activation)공정에 의해 층간 양이온을 Na<sup>+</sup>이온으로 치환시켜 점도 및 팽윤도가 월등히 향상된 Na계 벤토나이트로 제조하여 산업에 이용되고 있다.<sup>1)</sup>

근래 들어 보급이 급격히 증가하고 있는 지열 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)에서 수직형 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)과 U자 형상의 파이프, 그리고 이들 빈 공간을 채우는 그라우트재(grout) 등으로 구성된다. 이중 그라우트재는 지중열교환기 파이프내의 순환수와 보어홀 주변의 토양층 간의 열전달을 촉진하고, 보어홀 주변의 지하수나 지표면 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 차단하는 역할을 한다.<sup>4)</sup>

지중 열교환기용의 그라우트재는 벤토나이트, 시멘트, 콘크리트, 모래 등 다양한 재료가 있지만, 현재 국내외적으로 주로 사용되는 것은 벤토나이트계이며, 지중 환경보호 측면에서 타 재료보다 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 순수한 벤토나이트는 보어홀 주변의 토양과 또는 암반과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는 것이 단점이다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해 모래를 혼합하여 사용한다.<sup>5)</sup>

현재 국내에서는 지중열교환기 전용의 벤토나이트 그라우트재(thermal enhanced grout)가 생산되지 않은 관계로, 고가의 수입품을 사용하거나, 일반적인 토목용 벤토나이트 제품을 대체사용하고 있는 실정이다. 또한 국내에서도 벤토나이트 그라우트재에 대한 연구는 많이 행하여졌으나,<sup>6-7)</sup> 지중열교환기용 전용의 제품에 대한 연구는 행하여진바 없다.

본 연구에서는 외국에서 개발된 지중열교환기 전용제품 6종과 대체용으로 많이 사용되고 있는 국내제품 3종에 대하여, 성분분석, 열전도 특성을 분석하였으며, 그라우트제에서 요구되는 팽윤도, 점도, 투수성능 등의 기본성능을 측정하여 분석하므로써, 국내에서도 지중열교환기 전용제품을 개발하는데 도움이 되고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 대상시편

본 연구에서 사용한 벤토나이트 시편은 총 7개사의 9개 제품으로, 그중 6종은 지중열교환기용으로 개발된 제품으로, 5종은 미국에서 직접 수입했으며, 1종은 미국회사의 한국 자회사가 생산한 제품이다. 그리고 나머지 3종(2개사)의 제품은 일반적인 토목용으로 개발된 국내제품으로 지중열교환기 대체용으로 많이 쓰이고 있는 제품이다. 참고로 직접 수입한 5종의 제품명과 제조사는 High TC Geothermal Grout(CETCO Inc), Barotherm Gold(Baroid Industrial), Therm -EX Grout(Wyo-Ben Inc), Thermal Grout Lite(GeoPro Inc), Thermal Grout Select (Geo Pro Inc) 이었다. 그리고 이들을 구성하고 있는 광물의 조성을 알기위해 XRD (X-Ray Diffractometer, Phillips사 MPD)를 사용하여 피크를 얻었으며, 이를 근거로 기존의 데이터베이스를 활용하여 정성분석을 행하였다.

### 2.2 열전도 특성

벤토나이트 열전도도는 비정상탐침(non-steady-state probe, Huksenux사 TP02)을 이용하여 측정하였는데, 이는 2개의 열전대(K-type thermocouples), RTD 및 열선으로 구성되어 있다. 외부전원에 의해 내장된 열선에서 공급되는 열은 탐침을 따라 상대적으로 저온인 선단부로 향하게 되며, 열선 주변에

접촉하고 있는 토양 입자에 의해 열손실이 일어난다. 이때 두 열전대에서 시간경과에 따른 두 점의 온도차를 측정하고 공급열량을 이용하여 시료의 열전도도를 산정하며, RTD는 참고온도 측정용으로 사용된다. 또한 측정된 수치는 자동자료수집장치 (data logger, Cambell사 CR 10X) 및 컴퓨터를 사용하여 정밀하게 열전도도를 산정하였다. 본 연구에서는 벤토나이트 20, 30%를 물과 혼합한 필터케의 시편을 준비하였으며, 이를 25℃을 유지한 건조로 내에서 행하였다.

### 2.3 기본성능

팽윤도(free swelling index)는 벤토나이트가 물을 흡수하여 부피가 늘어나는 정도를 표시하는 것으로, ASTM D5890에 따라 100ml의 메스실린더에 물을 채우고 로내에서 충분히 건조된 벤토나이트 2g을 0.1g씩 천천히 자유낙하시켜, 수화하고 침강할 수 있도록 하였다. 그리고 침강된 벤토나이트와 물의 경계로 부피를 측정 후, 24시간 후에 팽윤된 부피를 측정하여 증가된 부피를 계산하였다.

그리고 벤토나이트의 점도는 측정방법이 간단하여 관련업계에서 많이 사용되고 있는 깔때기 점도(marsh funnel viscosity)를 측정하였는데, 이는 건조된 벤토나이트 60g을 증류수 1리터에 넣고, 약 3,000RPM로 5분간 교반한 혼합용액을 946ml의 깔때기(Fann사 No. 201)를 완전히 통과하는데 걸리는 시간을 측정하였으며, 1시간 후에 같은 방법으로 다시 한번 측정하였다.

또한 벤토나이트의 차수성능을 나타내는 여과수량(filter loss 혹은 fluid loss)은 API (American Petroleum Institute)의 Recommended Practice 13B-2에 의하여 측정하였으며, Marsh Funnel 점도시험과 동일한 과정을 거친 시료를 LPLT Filter Press (Fann API No 302)에 넣고, 7 Bar의 질소가스 압력을 30분간을 가하여 빠져나오는 물의 양을 측정하였다.

Table 1 Mineral analysis of bentonite grouts

	Montmorillonite	Albite	Quartz	Cristobalite	Calcite	Heulandite	Hornblende	Gypsum	Biotite	Analcite	Total
#001	62.8	25.9	4.8	4.0	2.5						100.0
#002	64.7	22.9	4.8	5.7	1.9						100.0
#003	56.5	20.4	9.0	1.4	7.1	5.7					100.1
#004	65.9	12.8	1.7	2.8		7.5	9.3				100.0
#005	57.4		42.6								100.0
#006	91.2		4.0					3.5	1.3		100.0
#007	58.0		25.2		3.2	7.5		2.7		3.3	99.9
#008	82.2		8.1			9.6					99.9
#009	79.0		6.6		4.3	9.3		0.8			100.0

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 광물조성분석

Table 1은 수집한 벤토나이트 시편 9종에 대하여 XRD에 의해 광물성분을 분석한 결과이다. 이 표에서 보듯이 주성분인 몬모릴로나이트의 함량이 제품별로 56.5-91.2%로 큰 차이가 있으나, 일반적인 토목용이나 주물용의 제품이 30-50%의 함량을 갖는 점에서, 비교적 품위가 높은 원광을 사용한 것으로 볼 수가 있다. 또한 국내 제품(#001- #004)에서 Albite가 많이 함유되는 것은 우리나라의 벤토나이트 산지인 경주, 포항지역이 신생대 제3기층에 속하여 퇴적암의 함량이 높다는 점으로 설명할 수 있다.<sup>8)</sup> 그리고 수입제품이 국내제품에 비해 몬모릴로나이트의 함량이 높고, 불순물이 적은 고품위의 벤토나이트 원광을 사용하였다고 볼 수 있다. 또한 제품별로 불순물이 다양하고 함량이 다른 점으로 보아, 별도의 정제처리를 하지 않고 채굴한 상태로 활성화 과정만 거쳐 제품화한 것으로 판단된다.

#### 3.2 열전도 특성

지중열교환기 그라우트재에서 가장 중요한 특성인 열전도도는 슬러리내의 벤토나이트의 함량과 매우 관계가 깊다. 일반적으로 그라우트재 공사시 벤토나이트 함량 15- 25%의 슬러리를 만들어 보어홀에 넣은 후, 벤토나이트가 침

강되기를 기다려 위쪽부분의 물을 제거하는 다시 같은 작업을 수차례에 걸쳐 반복하게 된다. 이때 벤토나이트 함량은 점도에 의한 작업성을 고려하여 결정하며, 최종적으로 보어홀에 존재하는 그라우트는 벤토나이트 함량이 20-30%정도가 되는 필터케익과 같은 형태가 된다.

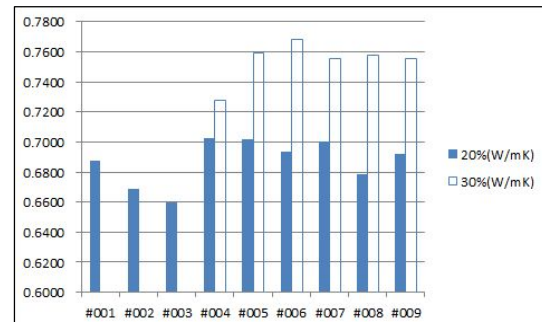


Fig. 3 Thermal conductivities of bentonite grouts

Fig. 3은 벤토나이트 함량이 20, 30%인 시편에 대한 열전도도를 측정된 결과를 보였으며, 일반 토목용으로 개발된 3종의 국산제품(#001-#003)의 30%시편은 점도가 너무 높아져 제작할 수 없었다. 실험결과에서 보듯이 벤토나이트 함량이 30%인 시편이 20%의 시편보다 열전도도가 약 10%정도 높았으며, 전용제품이 일반 토목용 제품보다 약 15%정도 높았다. 그리고 전용제품은 회사별로 5%미만의 차이를 보이므로 거의 비슷한 수준이라 할 수 있다.

그리고 Table 2에는 본 연구에서 측정된

Table 2. Thermal conductivities data of bentonite grouts

		#005	#006	#007	#008	#009
Experi- ment	20 wt%	0.7015	0.6939	0.7002	0.6786	0.6917
	30 wt%	0.7592	0.7681	0.7552	0.7574	0.7552
Company Data	30 wt%	0.7816	0.7816(28.1%)	-	0.7787	-
	Sand Mix (Times)	1.5574-2.0938 (4-8)	1.1940-2.0765 (2-8)	1.6093-1.8169 (4-6)	1.6093-1.7304 (1-5)	1.7304-2.0765 (5-8)

값과 수입된 제품의 제조회사 발표자료를 요약, 수록하였다. 또한 열전도도에 대한 모래의 영향을 보기 위하여, 기본성능이 지중열교환기용에 적합한 #004시편에 모래의 함량을 변화시켜 열전도도의 증가를 측정된 결과를 Fig. 4에 수록하였다.

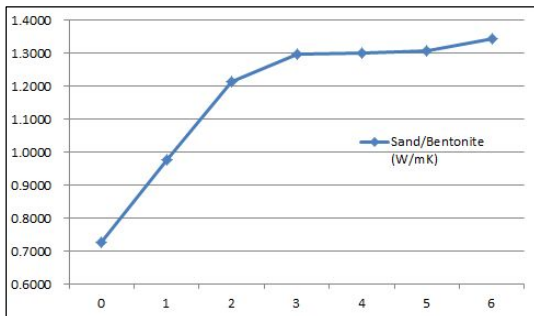


Fig. 4 Thermal conductivity change with sand addition ratio(Sand/Bentonite)

Fig. 4에서 보듯이 열전도도는 벤토나이트:모래의 중량비가 1:3 까지는 꾸준히 증가하다가 그 이후에는 포화가 되는 것으로 나타났다. 이는 입자 크기가 큰 모래 입자 사이를 벤토나이트가 메워주는 구조로, 열전도도가 상대적으로 높은 모래입자가 서로 접촉할 수 있는 한계치로 전체 필터케익의 열전도를 결정하는 것으로 판단된다. 또한 제조회사의 발표자료에 비해 상당히 낮은 값을 갖는 것은 사용된 재료인 벤토나이트와 모래의 특성이 다르고, 측정기기 및 측정법이 다른데서 오는 결과로 판단되며, 특히 벤토나이트의 종류 및 조성에 대한 광물학적 연구가 필요할 것으로

판단된다.

### 3.3 기본성능

#### 3.3.1 팽윤도(Free Swell Index)

팽윤현상은 분자가 층간 양이온과 결합함으로써 일어나는 층간의 부피팽창을 의미하며, 벤토나이트를 이루고 있는 결정면에서의 전기이중층(electrical double layer) 사이에 양이온의 제타포텐셜에 의한 반발력에 의해 생기게 된다.<sup>9)</sup>

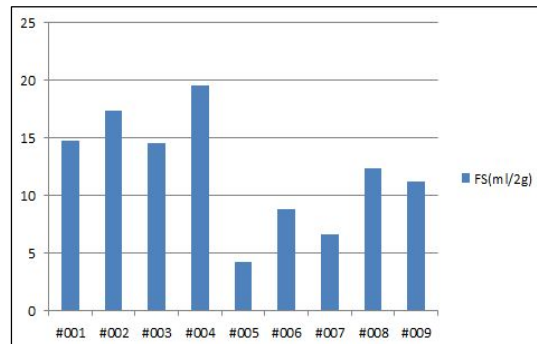


Fig. 5 Free swelling index of bentonite grouts

Fig. 5에는 입수된 9종의 시편에 대한 팽윤도를 측정된 결과를 보였으며, 국내제품(#001-#004)의 팽윤도가 외국에서 개발된 전용제품(#005-#009)에 비해 크고, 외국의 제품은 회사에 따라 팽윤도 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 이는 토목용에서는 팽윤도가 제품 성능을 결정하는 중요한 요소이지만, 지중열교환기용에서는 상대적으로 중요도가 떨어진다고 볼 수 있다. 또한 팽윤도는 일반적으로 몬모릴로나

이트의 함량에 많은 영향을 받지만, 또한 이들 시편에서는 함량에 따라 팽윤도가 정비례하지 않는 점에서, Na계 몬모릴로나이트 함량이 많은 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 이는  $Ca^{2+}$  이온은 매우 낮은 표면 포텐셜을 보이고  $Na^{+}$  이온은 높은 표면 포텐셜을 갖기 때문이며,  $Na^{+}$  이온이  $Ca^{2+}$  이온에 비해 수화력(hydration)이 훨씬 크기 때문이다.<sup>9)</sup>

### 3.3.2 깔때기 점도(Mash Funnel Viscosity)

점도는 유체의 흐름에 대한 저항력으로, 깔때기 점도는 유체를 흐르게 하는 힘(유체무게)에 대한 출구를 통과하는 유체 속도의 비(shear stress)이다. Fig. 6에는 입수된 9종의 시편에 대한 깔때기 점도를 측정된 결과를 보였으며, 국내생산제품 2종(#001, #002)은 높은 점도를 갖고 있는데, 이는 차수효과가 높은 토목용 그라우트재로 개발되었기 때문으로 판단된다. 점도는 보어홀내에 그라우트재를 채우는 작업성과 관련되며, 점도가 높은 경우에는 고르게 채워지지 않는 경우가 발생하며, 작업시간이 많이 소요된다. 그리고 한시간 후 점도가 증가하는 것은 팽윤이 진행되는 과정에서 생기는 현상으로, 특히 급격한 변화를 보이고 있는 #002 제품은 급속 팽윤 그라우트재로 개발된 점에서 기인한 것으로 판단된다.

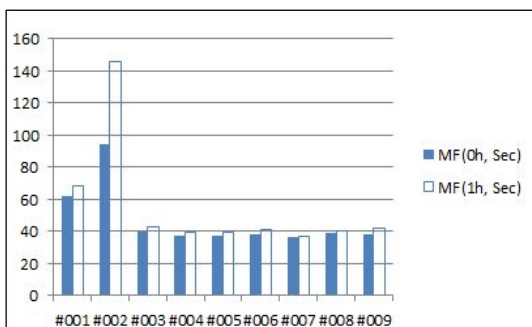


Fig. 6 Mash funnel viscosity of bentonite grouts

### 3.3.3 여과수량(Filter Loss)

지중열교환기에 사용되는 그라우트재는 보

어홀내의 지하수 유입을 방지하고, 지하수의 오염을 방지하는 벤토나이트의 차수성능을 나타내는 것으로 여과수량으로 표시할 수 있다. Fig. 7에는 입수된 9종의 시편에 대한 여과수량의 측정결과를 나타냈다. 토목용으로 개발된 국내제품 3종(#001-#003)은 낮은 여과수량을 나타내 벤토나이트의 차수성능이 뛰어난 것으로 나타났다. 그러나 외국의 전용제품은 비교적 높은 값을 나타내고 회사에 따라 많은 차이를 보이고 있었으며, 특히 XRD에 의한 광물분석 결과에서 모래 함량이 높은 #007 제품은 매우 높은 값을 갖는다.

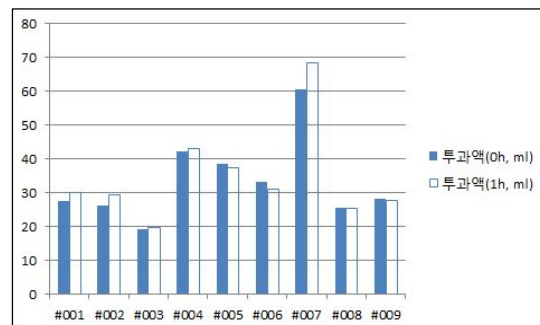


Fig. 7 Filter loss of bentonite grouts

### 3.4 요구성능

지중열교환기용 벤토나이트가 그라우트재로서 갖추어야할 성능은 토목용 그라우트재와는 차이가 있다. 즉, 토목용에서 차수성능이 가장 중요한 성능이지만 지열용에서는 그라우팅재를 채우는 작업성이 좀 더 중요한 역할을 한다. 왜냐하면 보어홀은 비교적 작은 직경에 비하여 그 깊이가 매우 깊기 때문에 이를 빈공간 없이 잘 채우기 위해서는 벤토나이트의 함량을 낮추어 유동성이 좋은(즉, 점도가 낮은) 슬러리를 부어 넣고, 침강, 보충의 작업을 여러번 거쳐서 최종적으로는 슬러리가 침강되어 농축된 필터케익 형태가 된다. 일반적으로 차수성능은 팽윤도와 관계가 있으며, 팽윤도는 점도에 영향을 미치므로, 차수성능이 좋은 토목용 그라우트재는 슬러리

의 점도가 높아지게 된다.<sup>7)</sup> 따라서 본연구의 토목용으로 개발된 #001- #003 제품은 높은 점도 때문에 30% 슬러리를 만들 수 없었던 점이 이해가 간다.

또한 그라우트재의 열전도도는 농축된 그라우팅재의 조성에 따라 결정된다. 순수한 벤토나이트의 열전도도는 팽윤, 점도에 영향을 받는다는 보고가 있지만<sup>4)</sup>, 그 차이는 10% 내외로 크지가 않다. 따라서 그라우트재의 열전도도는 벤토나이트의 개질보다도 모래와 같은 재료를 첨가해서 향상시키는 것이 효과적이라 할 수 있다.

#### 4. 결 론

지열히트펌프의 지중열교환기용 벤토나이트계 그라우트재에 대한 분말특성과 기본성능을 분석한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 벤토나이트의 함량이 높으면 높은 열전도도를 갖으며, 같은 함량에서는 제품별로 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다.
- (2) 벤토나이트에 모래를 혼합하여 사용할 경우에는 열전도도는 모래의 함량에 따라 높아지나 포화되는 현상을 보였다.
- (3) 그라우트재의 작업성을 결정하는 점도는 벤토나이트의 팽윤도와 밀접한 관계를 갖고 있었으며, 팽윤도는 몬모릴로나이트, 특히 Na계 몬모릴로나이트 함량과 관계가 있는 것으로 판단된다.
- (4) 지중열교환기용 벤토나이트의 차수성능은 토목용에 비해 떨어지는 것으로 나타났다으며, 이는 팽윤도가 비교적 낮은 점에서 기인한 것으로 판단된다.

따라서 지중열교환기용 벤토나이트는 낮은 점도를 갖아 작업성이 좋고, 벤토나이트 함량을 높혀 열전도도가 높은 슬러리를 만들 수 있어야 한다고 판단된다.

#### References

1. Park, S.W, Seo, J.H, Lee, S.H, Characteristics and Applications of Bentonites in Civil Engineering, J. Miner. Soc. Korea, 19, 1, 64-75, 2006
2. Ko, S.M, Lee, D.J, Present and Future of Bentonite Industrials, The 13th Proc. of J. Miner. Soc. Korea1, 2000
3. Fukushima, Y., X-ray Diffraction Study of Aqueous Montmorillonite Emul- sion, Clay and Clay Minerals, 32, 320-326, 1984
4. Sohn, B.H, Shin, H.J, Thermal Conductivity Measurement of Grouting Materials for Ground Heat Exchanger Borehole, Kor J. Equip Eng, 18, 6, 493-500, 2006
5. Salomone, L.A. and Marlowe, J.L., Soil and rock classification for the design of ground-coupled heat pump systems: field manual, Special Report (EPRI CU-6600), Electric Power Research Institute, 1989
6. Lim, H.J, Kong, H.J, Song, Y.S, Park, S.K, Thermal Conductivity Measurement of Grouting Materials for Geothermal Heat Exchanger, Kor J Equip Eng, 17, 4, 364-369, 2005
7. Choi, H.S, Lee, C.H, Gil, H.J, Choi, H.P, Woo, S.B, Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Grouts for Backfilling Ground Heat Exchanger, J. Kor Soc Renew Engy, 3, 4, 38-46, 2007
8. Kim, Y.S, Hu, N.H, Jung. W.S, YE, D.H, Lee, J.H, Physical and Chemical Variation of Sedimentary Rocks due to Weathering, J Korean Geoenviron Soc, 3, 2, 49-60, 2002
9. Mc Bride, M.B., Surface chemistry of soil minerals, Dixon, J.B. and Weed, S.B. (eds.) Minerals in soil environments, Soil Sci. Soc. Am., Book Series 1, Madison, WI, USA, p 35-88, 1989