

완충재의 물리적 성능향상을 위한 국내 벤토나이트의 열전도도 측정실험

Measurements of the Thermal Conductivity of Domestic Bentonite for Improving the Physical Performance of Buffer

김 건 영 (Geon-Young Kim)^{1*} · 김 승 수 (Seung Soo Kim)¹ · 최 종 원 (Jong Won Choi)¹ · 박 성 완 (Seong-Wan Park)² · 배 대 석 (Dae Seok Bae)¹

¹한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
(Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-606, Korea)

²(주)한국수드케미
(SÜD-CHEMIE Korea Co., Ltd., Pohang, 790-840, Korea)

요약 : 공학적 방벽 중 완충재의 물리적 성능향상을 고찰하기 위하여 국내산 옥산 벤토나이트 원광을 사용하여 건조밀도(1.6, 1.8 g/cm³), 수분함량(5, 9.4, 15, 20 wt%), 모래함량(0, 10, 20, 30 wt%)을 변화시켜 제작한 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다. 이 중, 수분 함량의 변화에 의한 열전도도 증가 효과가 가장 컸으며 특히, 수분 함량이 15 wt% 이상일 경우 건조밀도와 모래함량의 변화와 상관없이 1.0 W/mK 이상의 값을 나타내었다. 따라서 국내의 옥산 벤토나이트 원광을 완충재의 원료로 사용할 경우, 벤토나이트 블록의 제작 용이성과 열전도 증가의 효율성을 고려하였을 때 건조밀도 1.6 g/cm³, 모래함량 10~30 wt%, 함수량 15 wt%로 벤토나이트 블록을 제조하는 것이 가장 효율적인 것으로 제안될 수 있다.

주요어 : 열전도도, 완충재, 벤토나이트, 고준위폐기물처분, 공학적 방벽

ABSTRACT : The thermal conductivities of bentonite blocks with various dry densities (1.6 and 1.8 g/cm³), water contents (5, 9.4, 15, 20 wt%) and sand contents (0, 10, 20, 30 wt%) were measured in order to investigate the improvement in physical performance of buffer as an engineered barrier. The raw material was domestic bentonite from Oksan mine located in Gyeongju city. The increase in water content was most effective for improving the thermal conductivity. Especially, the bentonite blocks with more than 15 wt% of water content showed more than 1.0 W/mK values of thermal conductivity regardless of their dry densities and sand contents. Therefore, if the domestic Oksan bentonite is used as a buffer material, we can suggest that the manufacture of bentonite block having dry density of 1.6 g/cm³, sand content of 10~30 wt% and water content of 15 wt% will be most effective considering the easiness of a manufacturing of bentonite block and the efficiency of an increase in the thermal conductivity.

Key words : thermal conductivity, buffer, bentonite, high level waste disposal, engineered barrier

*교신저자: kimgy@kaeri.re.kr

서 론

고준위방사성폐기물은 사용후 핵연료 자체 또는 이를 자원으로 재활용하기 위해 재처리할 때에 발생하는 높은 수준의 방사능을 갖는 폐기물로서 독성이 강한 장반감기 핵종을 포함할 뿐 아니라 핵종들의 붕괴로 인하여 많은 열이 발생한다. 국내에서 발생하는 고준위폐기물은 대부분 사용후핵연료이며 우리나라에서는 아직 사용후핵연료의 관리에 대한 정책이 확정되지 않았다. 그러나 결과적으로 고준위폐기물처분은 반드시 필요하며 또한 이러한 고준위폐기물 처분기술은 개발에 많은 시간을 요하기 때문에 적절한 시기에 처분장을 확보하기 위해서는 국민이 신뢰할 수 있는 고준위폐기물의 심지층 처분기술 개발을 서둘러야 하는 실정이다.

국내에서의 고준위폐기물 처분을 위한 연구개발은 과학기술부가 주도하는 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 1997년부터 추진되어 오고 있으며, 앞으로 제시될 최종 연구결과는 국내 지질환경에 적합한 한국형처분시스템의 제안과 제안될 처분 개념에 대한 종합 안전성 평가 결과이다. 한국형처분시스템의 제안은 일반적인 국내 지질조건과 연구지역의 지질 및 지하수 관련 자료에 근거하여 지질환경특성 조건하에서 처분 시설로서의 건전성 확보가 가능한 공학적 처분시스템을 개발하는 것이다. 이와 관련하여 대부분의 선진국에서는 고준위방사성폐기물의 처분을 위해 심층처분방식을 채택하고 있으며, 이 경우 처분장의 안전성은 다중방벽 개념에 근거하고 있다. 다중방벽은 폐기물고화체, 폐기물용기, 완충재, 뒷채움재, 그리고 자연 지질방벽으로 구별된다. 이 중 완충재의 주기능은 처분용기가 지하수와 접촉하는 것을 지연시킬 뿐만 아니라 처분용기를 보호하고, 용기 파손 시 핵종의 이동을 지연시키는 것이다.

이와 같은 심지층처분시 공학적 방벽에 대하여 세계 각국에서 고려하고 있는 완충재의 기능중, 우리나라는 지하수의 유입을 최소화하고 핵종의 이동을 지연시키며 화학적인 완충작용을 제공하는 것으로 고려하고 있다(OECD, 2003). 따라서 완충재가 가져야 하는 요구사항은 낮은 수리전도도, 높은 핵종저지능, 높은 팽윤성, 적절한 팽윤압, 양호한 역학적 특성, 높은 열전도도, 장기건전성 및 낮은 유기물 함량 등이다

(Dixon *et al.*, 1985; Simmons and Baumgartner, 1994; SKBF/KBS, 1983). 이번 연구는 이 중 고준위폐기물 처분기술개발을 위한 완충재의 물리적 성능향상방안의 일환으로 수행되고 있는 벤토나이트 완충재의 첨가재 영향평가의 일부로서 국내산 벤토나이트 원광을 이용하여 제작한 블록의 열전도도를 측정하여 완충재로서의 국내산 벤토나이트의 적합성을 살펴보고, 건조밀도, 수분함량 및 첨가물질로서 모래의 함량을 조절하여 제작한 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정함으로써 완충재의 물리적 성능향상방안을 고찰하여 보았다.

연구 방법

원료물질의 기본적인 화학특성을 알기 위하여 벤토나이트 원광에 대한 주원소 및 미량원소의 화학분석을 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 X-선 형광분석법(XRF, Philips PW2404) 및 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, Shimadzu ICPS-11000 III)와 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, FISIONS PlasmaTrace)를 이용하여 수행하였다. 또한 광물의 상분석을 위하여 한국기초과학지원연구원의 X-선 회절분석기(XRD, D8 Advance)를 이용하였다. 또한 벤토나이트 원광의 분말시료에 대하여 한국지질자원연구원의 레이저 빔 투사방식의 입도분석기(Mastersizer 2000)로 입도분포를 측정하였으며 모래시료에 대하여는 한국지질자원연구원에 의뢰하여 체가름시험절차(KSF 2502)에 따른 입도분석을 수행하였다.

벤토나이트 블록의 제작시 실험변수로서 건조밀도의 경우는 일본이나 스웨덴의 경우 완충재의 설계요건으로 건조밀도를 1.6 g/cm^3 로 삼고 있기 때문에(SKBF, 1999; JNC, 2000) 실험될 벤토나이트 블록의 건조밀도를 1.6 과 1.8 g/cm^3 의 두 가지로 조절하였다. 벤토나이트의 첨가물질로서 모래함량은 각각의 건조밀도에 대하여 0, 10, 20, 30 wt%로 변화시켜 각각의 블록을 제작하였다. 벤토나이트는 100°C 에서 72시간 이상 건조시키면서 항량이 될 때 까지 중량을 제어 자연수분함량을 미리 측정하였다. 측정된 자연수분함량은 9.4 wt%였다. 이 값을 근거로 벤토나이트 블록의 수분함량을 각각의 건조밀도 및 모래함량에 대하여 5, 9.4, 15, 20 wt%로 변화시켜 블록을 제작하였다. 첨가재로 사용될 모래도

블록의 제작전에 100℃에서 충분히 건조시켰다. 벤토나이트 블록 제작을 위해서는 별도의 주형을 제작하였다. 최종적으로 제조된 벤토나이트 블록의 크기는 250×250×20 mm로 하였다. 이 블록 크기를 기준으로 미리 벤토나이트의 건조 밀도와 모래함량 조건에 맞추어 중량을 재어놓은 원료 물질들을 3축 회전 혼합기를 이용하여 균질하게 혼합시켰다. 이 혼합 시료들에 대해 원하는 수분을 첨가하여 수분함량을 조절하였고 이들에 대해 500톤급의 프레스기를 이용하여 벤토나이트 블록을 제조하였다. 최종적으로 제작된 벤토나이트 블록을 Kyoto Electronics QTM-500를 이용하여 열전도도를 측정하였다. 측정 전후에는 표준물질(합성 석영, 열전도도 1.415 W/mK)로 매번 측정값들을 보정하였다.

완충재의 열전도도 요건 및 원료 물질

일반적으로 완충재의 수리전도도와 핵종의 이동성은 암반보다 작아야 하며, 처분용기내부에서 발생된 열을 완충재가 주변 암반으로 잘 전달하여 처분용기 및 처분공내에 열이 축적되지 않도록 완충재의 열전도도가 충분히 높아야 한다. 완충재의 팽윤압은 암반과 급속용기에 접촉이 잘 되도록 충분히 커야 하지만, 처분용기를 파괴할 정도로 커서는 안된다. 완충재의 조성과 두께는 핵종유출, 열역학적 성능, 경제성 및 처분용기의 부식으로 인한 팽윤 등을 고려하여 결정하여야 한다. 또한 완충재의 크기, 형태, 조성은 균질하고, 처분장에서의 이동, 거치 등의 작업이 용이하여야 한다. 현재 대부분의 나라에서 이와 같은 설계요건에 적합한 완충재 물질로서 벤토나이트를 고려하고 있으며 이 중 벤토나이트 완충재의 열전도도 향상을 위하여 모래와 같은 첨가재를 섞는 방안이 고려되고 있다.

일반적으로 처분장의 모양으로 고려되고 있는 화강암의 경우 열전도도가 약 2.8 W/mK (Han, 1993)로서 완충재보다 훨씬 크다. 따라서 완충재의 열전도도가 낮을 경우, 처분용기를 포함하여 완충재의 온도가 높아져서 완충재의 변질을 야기시킬 뿐 아니라 수분이 기화되어 증기압이 높아져서 주변 용기나 뒷채움재 등 전체 다중방벽시스템에 영향을 주게 된다(SKB, 2001). 따라서 벤토나이트 완충재의 물리적, 화학적 특성이 유지될 수 있도록 대부분의 나라에서는 처분용

기 표면의 온도가 100℃를 넘지 않도록 공학적 방법을 설계하고 있으며 이와 관련하여 처분용기와 직접 접하는 완충재의 두께를 제한하고 열전도도를 1.0 W/mK 이상으로 고려하고 있다(김승수 외, 2003). 세계 각국에서는 완충재의 성능향상을 위해서 모래를 비롯한 각종 첨가재를 벤토나이트와 혼합하여 사용하는 연구를 수행하고 있다. 벤토나이트에 모래를 첨가하면 경제적일 뿐 아니라 완충재의 취급 및 제작이 용이하게 되고 열전도도와 기체의 투과성을 높이는 효과가 있지만 상대적으로 팽윤압을 저하시키고 수리전도도를 증가시켜 지하수와의 접촉이 용이하게 된다. 따라서 적절한 완충재의 선택은 지하수 유동특성, 모암의 단열분포특성, 처분용기 및 거치방법 등의 다양한 처분장 조건을 고려하여 선택하여야 한다. 일본의 경우에는 Kunigel VI 벤토나이트에 모래를 30% 혼합한 물질을 기준 완충재로 삼고 있으며(Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000), 특히 벨기에의 경우에는 모래 뿐 아니라 흑연(graphite)을 첨가하여 완충재의 열전도도를 향상시키기 위한 방안을 고려하고 있다(ONDRAF/NIRAS, 2001).

국내에서도 경주에서 산출되는 벤토나이트에 대한 다양한 열전도도실험을 수행한 바 있으나(전관식 외, 1998; 강철형 외, 2002) 이후 국내 비금속광산의 수급현황이 급격히 변화하면서 현재 대부분의 벤토나이트광산이 폐광되거나 가행을 중지한 상태이기 때문에 현재 국내 상황에 적합한 벤토나이트 원광의 재선정이 필요하게 되었고 이에 따라 이들에 대한 완충재로서의 열전도도 특성을 포함하여 각종 물리, 화학적 특성이 필요하게 되었다. 그러나 국내산 벤토나이트는 대부분 외국산 벤토나이트에 비해 전반적으로 낮은 품위(30~75 wt% montmorillonite)를 가지며 특히 화학조성 및 원암의 암상, 광물조성 등이 산지별로 큰 차이를 보인다(노진환, 2002). 그럼에도 불구하고 완충재 비용이 공학적 방법을 위해 사용되는 총 처분비용 중 상당부분을 차지하기 때문에 완충재 및 완충재 제조기술의 국산화에 따른 처분경제성의 향상을 포함한 다양한 이득을 고려할 경우 완충재의 국산화가 절실히 요구된다(전관식 외, 1998).

이번 연구에서는 현재 가행중인 국내 벤토나이트광산의 수급현황을 고려하여 국내산 벤토나이트 원광을 이용하여 실제 벤토나이트 제품

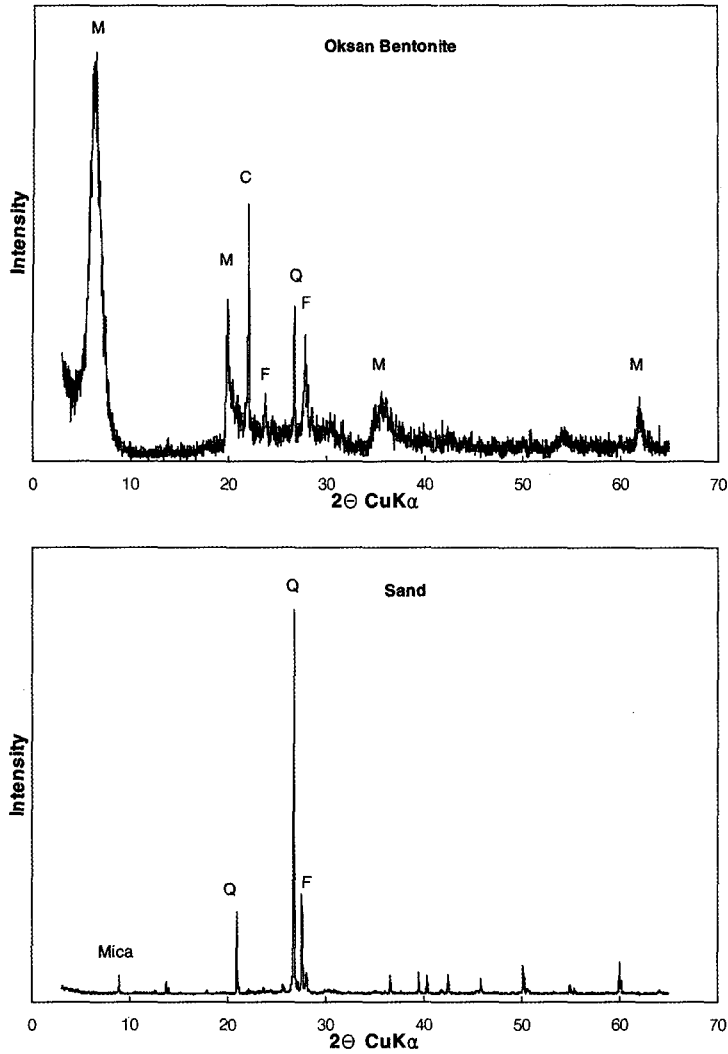


Fig. 1. XRD patterns of Oksan bentonite powder and sand from the Geum-river (M: montmorillonite, Q: quartz, F: feldspar, C: cristobalite).

을 생산하고 있는 한국수드케미주식회사가 소유, 가행하고 있는 옥산 및 나아광산의 벤토나이트 원광 중, 옥산광산의 벤토나이트 원광을 실험의 주원료로 선정하였다. 옥산광산은 경상북도 경주시 양북면 죽전리에 위치하며 감포 65호에 해당한다. 가채광량은 5만톤 이상으로 알려져 있으며 평균 몬모릴로나이트 함량은 70 wt% 정도이다. 옥산광산을 포함한 포항-경주-감포 지역의 벤토나이트 광산의 생성환경 및 광물학적 특성은 최근 산업원료광물에 대한 관심증가와 더불어 이들의 물리-화학적 특성 및 용

용광물학적 연구가 활발히 수행되어지고 있다 (고상모 외, 2002; 노진환, 2002; 노진환 외, 2003; 노진환과 고상모, 2004).

옥산 벤토나이트 원광은 실험을 위하여 경주에 소재한 한국수드케미 공장으로부터 200 mesh 이하의 분말상태로 공급되었다. 실험에 사용된 옥산 벤토나이트 원광의 XRD분석결과를 살펴보면 옥산 벤토나이트는 주로 몬모릴로나이트로 구성되어 있으며 이밖에 장석 및 석영, 그리고 소량의 크리스토팔라이트로 구성되어 있다 (그림 1). 기존 고상모 외(2002)의 연구에 의하

Table 1. Chemistry and mineral composition of Oksan bentonite

Chemistry (major, %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	*Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	L.O.I	Total
		64.28	17.37	2.79	2.64	2.97	0.83	1.97	0.35	0.01	0.09	5.96
Chemistry (trace, ppm)	Be	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Y	Nb	Mo	Cd	Cs	La
	3.00	2.23	1.68	4.31	22.99	19.74	15.24	7.33	0.21	0.19	3.59	28.01
	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Er	Yb	Hf	Pb	Bi	Th	U
	57.07	32.12	4.06	1.22	4.23	1.88	2.11	5.39	21.56	0.25	7.75	1.30
**Mineralogy	Montmorillonite			Quartz			Feldspars			Cristobalite		
	69.5			1.4			22.2			6.9		

*total Fe as Fe₂O₃, **from Koh (2002)

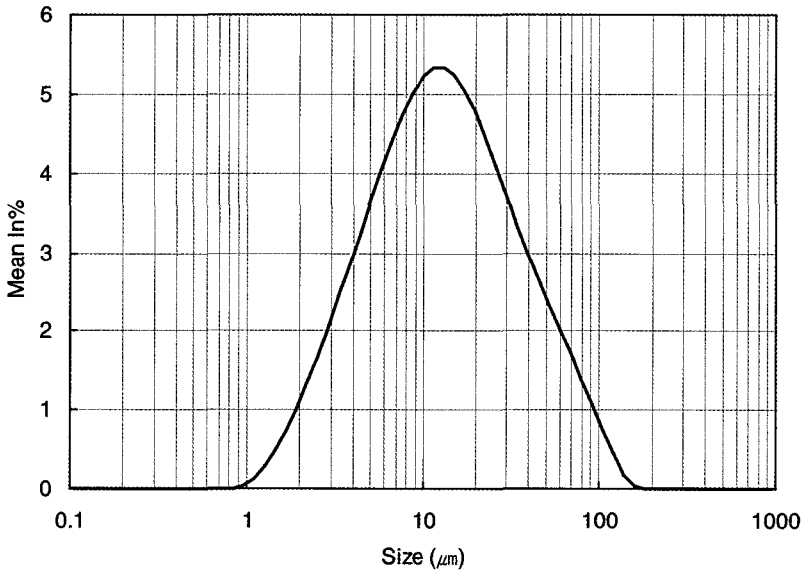


Fig. 2. Particle size distribution of Oksan bentonite powder.

면 옥산벤토나이트 원광의 광물조성은 몬모릴로나이트가 69.5%, 장석 22.2%, 크리스토팔라이트 6.9% 석영 1.4%이다. 옥산광산 원광의 화학분석결과를 표 1에 나타내었다. 옥산광산 벤토나이트는 전형적인 Ca 벤토나이트로서 2.64% CaO 함량을 갖는다. 이에 비해 Na₂O의 함량은 상대적으로 적은 양이기는 하지만 1.97%로 높은 값을 나타내는데 이는 벤토나이트 원광에 함유된 사장석의 영향으로 판단된다. 완충재의 첨가물로서 사용된 모래는 대전에 소재한 평진골 재환경사업소에서 제공된 금강의 강모래를 사용하였다. 실험에 사용된 모래의 XRD 분석결과 이들은 주로 석영과 장석, 그리고 소량의 운모류로 구성되어 있음을 알 수 있다(그림 1). 실험

에 사용된 옥산 벤토나이트 원광 분말과 모래의 입도분석 결과는 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 옥산 벤토나이트 원광 분말의 입도분포는 0.955~181.970 μm 사이에서 로그함수의 전형적인 정규분포곡선을 보이면서 11.482~13.183 μm 사이에서 최고값을 나타낸다(그림 2). 모래의 입도분포 분석결과는 0.3~0.6 mm 크기가 49.96%를 차지한다(그림 3). 전체적으로는 모래 크기(4.75 ~0.075 mm)의 입자가 97.51%를 차지하고 실트와 점토크기(> 0.075 mm)의 입자가 2.49%를 차지하는 전형적인 모래의 입도분포 범위내에 속한다.

Sieve size (mm)	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	Pan
Percent retained (%)	0%	0.03%	25.86%	49.96%	17.31%	4.34%	2.49%

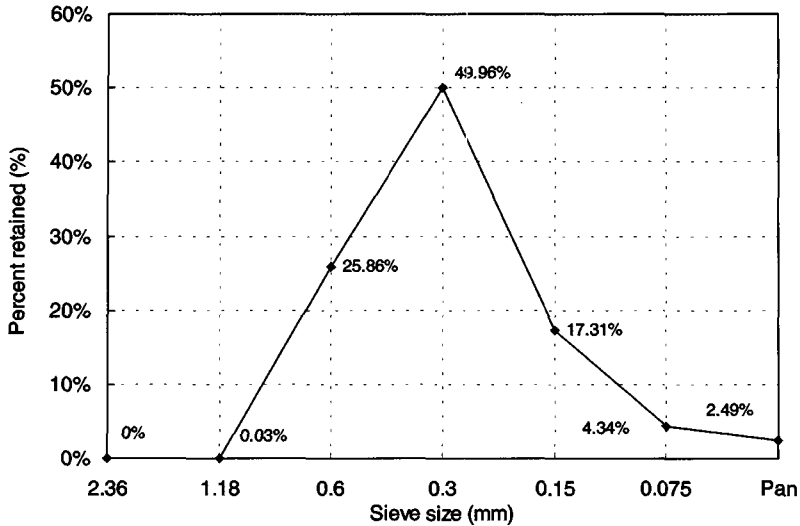


Fig. 3. Grain size distribution of sand from the Geum-river.

벤토나이트 블록의 열전도도

일반적으로 물질의 열전도도는 측정시 온도와 압력에 의해 영향을 받을 뿐 아니라 측정 물질의 공극률과 광물조성 및 조직에 의해 영향받는다(Farouki, 1981; Gilliam and Morgan, 1987; Brigaud and Vasseur, 1989; Fjeldskaar *et al.*, 1993; Middleton, 1994). 기존 연구에 의해 알려진 조암광물들의 열전도도에 의하면 스펙타이트(몬모릴로나이트)의 열전도도는 실온에서 1.8 W/mK, 석영은 7.8 W/mK, 장석은 사장석과 정장석 모두 2.3 W/mK으로서(Horai, 1971; Brigaud and Vasseur, 1989) 일반적인 벤토나이트 완충재의 열전도도 설계요건인 1.0 W/mK보다 매우 높은 값을 갖는다. 그러나 벤토나이트 블록은 다량의 수분과 공극을 포함하고 있으며 이들의 열전도도는 각각 0.6 W/mK, 0.03 W/mK (Horai, 1971)으로 알려져 있다. 따라서 공극률 및 수분함량은 벤토나이트 블록의 열전도도에 큰 영향을 주게 되며, 공극률이 낮을수록 열전도도는 증가하며 동일 건조밀도일 경우 공극을 채우는 수분의 함량이 높을수록 열전도도는 높아지게 된다. 일반적으로 벤토나이트 분말로 제조된 블록은 완충재의 열전도도 설계요건인 1.0 W/mK보다 낮은 값을 가지며 이를 향상시키기 위하여

건조밀도를 높여서 공극률을 낮추고, 공극을 공기보다 열전도도가 더 높은 수분으로 채우기 위해 수분 함량을 높이게 된다. 또한 벤토나이트보다 열전도도가 높은 물질을 첨가함으로써 열전도도의 향상을 높일 수 있다. 따라서 실험 물질의 건조밀도와 수분함량 및 첨가재의 양이 증가할수록 열전도도가 증가할 것으로 예상할 수 있다.

앞서 설명한 실험방법 및 변수에 따라 제작된 벤토나이트 블록의 열전도도 측정 실험결과를 표 2에 나타내었다. 실험 결과, 건조밀도와 수분함량이 높아질수록 열전도도가 높아졌으며 몬모릴로나이트보다 열전도도가 높은 석영과 장석으로 주로 구성된 모래의 첨가량이 높아질수록 열전도가 향상되는 결과를 보여주었다(표 2). 각 실험 변수들에 따른 열전도도향상의 비교를 위하여 측정된 열전도도 값들을 각각의 실험 변수들인 건조밀도의 증가, 모래함량의 증가, 수분함량의 증가에 따른 열전도도의 증가량과 증가율로 표시해 보았다(표 3). 동일한 수분과 모래함량 조건에서 건조밀도가 1.6에서 1.8 g/cm³로 증가할 경우 열전도도는 0.02~0.38 W/mK의 증가량을 보여준다. 자연수분함량인 9.4%를 기준으로 할 경우, 건조밀도 1.6에서 1.8 g/cm³로 증가에 의한 열전도도의 증가량은 0.09~0.38 W

Table 2. Thermal conductivities of bentonite blocks

Density (g/cm ³)	Sand contents (wt%)	Water contents (wt%)			
		5.0	9.4	15.0	20.0
1.6	0	0.48	0.60	0.98	1.21
	10	0.49	0.62	1.09	1.32
	20	0.50	0.64	1.14	1.43
	30	0.61	0.68	1.22	1.56
1.8	0	0.57	0.78	1.18	1.35
	10	0.58	0.82	1.34	1.41
	20	0.59	0.96	1.49	1.57
	30	0.63	1.01	1.60	1.73

mK이며 이는 6.9~50.0%의 증가율에 해당한다(표 3). 동일한 건조밀도와 수분함량 조건에서, 모래를 30 wt%까지 첨가하였을 경우 열전도도는 건조밀도 1.6 g/cm³와 1.8 g/cm³일 경우 각각 0.08~0.35 W/mK과 0.06~0.43 W/mK가 증가하는 것으로 측정되었다. 벤토나이트의 자연수분함량을 기준으로 할 경우에는, 30 wt%까지의 모래 첨가에 의한 열전도도의 증가량은 건조밀

도 1.6 g/cm³일 경우 0.08~0.35 W/mK이며, 1.8 g/cm³일 경우는 0.24~0.43 W/mK이다. 이는 각각 12.1~22.5%와 21.9~26.6%의 증가율에 해당한다(표 3과 그림 4). 동일한 건조밀도와 모래함량 조건에서 수분함량을 5 wt%에서 20 wt%로 증가시킬 경우, 열전도도는 건조밀도가 1.6 g/cm³일 경우 0.74~0.96 W/mK, 1.8 g/cm³일 경우 0.78~1.10 W/mK로 증가하는 것으로 측정되었다. 자연수분함량인 9.4 wt%를 기준으로 20 wt%까지 함수량을 증가시킬 경우 열전도도의 증가량은 건조밀도가 1.6 g/cm³일 경우 0.61~0.88 W/mK, 1.8 g/cm³일 경우 0.57~0.72 W/mK이며 이는 각각 101.4~128.3%와 63.3~73.5%의 열전도도 증가율에 해당한다(표 3과 그림 5). 따라서 건조밀도, 모래함량, 수분 등의 변수에 대한 열전도도의 증가량 및 증가율 결과에 의하면 함수량의 변화에 의한 열전도도 증가 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 특히, 수분 함량이 15 wt% 이상일 경우에는 건조밀도와 모래함량변

Table 3. Amounts and rates of increase in the thermal conductivity

For increase in the dry density					
Dry density (g/cm ³)	Sand content (%)	Water content (%)			
		5.0	9.4	15.0	20.0
1.6→1.8	0	0.09 (19.0%)	0.18 (29.3%)	0.20 (20.5%)	0.14 (11.4%)
	10	0.10 (19.9%)	0.23 (32.8%)	0.24 (22.3%)	0.09 (6.9%)
	20	0.08 (16.4%)	0.32 (50.0%)	0.34 (29.8%)	0.14 (9.6%)
	30	0.02 (3.4%)	0.33 (48.0%)	0.38 (31.6%)	0.17 (10.6%)
For increase in the sand content					
Sand content (%)	Dry density (g/cm ³)	Water content (%)			
		5.0	9.4	15.0	20.0
0→30	1.6	0.13 (21.6%)	0.08 (12.1%)	0.24 (19.8%)	0.35 (22.5%)
	1.8	0.06 (9.7%)	0.24 (23.2%)	0.43 (26.6%)	0.38 (21.9%)
For increase in the water content					
Dry density (g/cm ³)	Sand content (%)	Water content (%)		Water content (%)	
		5.0→20		9.4→20	
1.6	0	0.74 (154.8%)		0.61 (101.4%)	
	10	0.83 (171.7%)		0.70 (114.0%)	
	20	0.93 (184.0%)		0.79 (123.5%)	
	30	0.96 (157.5%)		0.88 (128.3%)	
1.8	0	0.78 (138.5%)		0.57 (73.5%)	
	10	0.83 (142.3%)		0.59 (72.4%)	
	20	0.98 (167.3%)		0.61 (63.3%)	
	30	1.10 (175.8%)		0.72 (70.7%)	

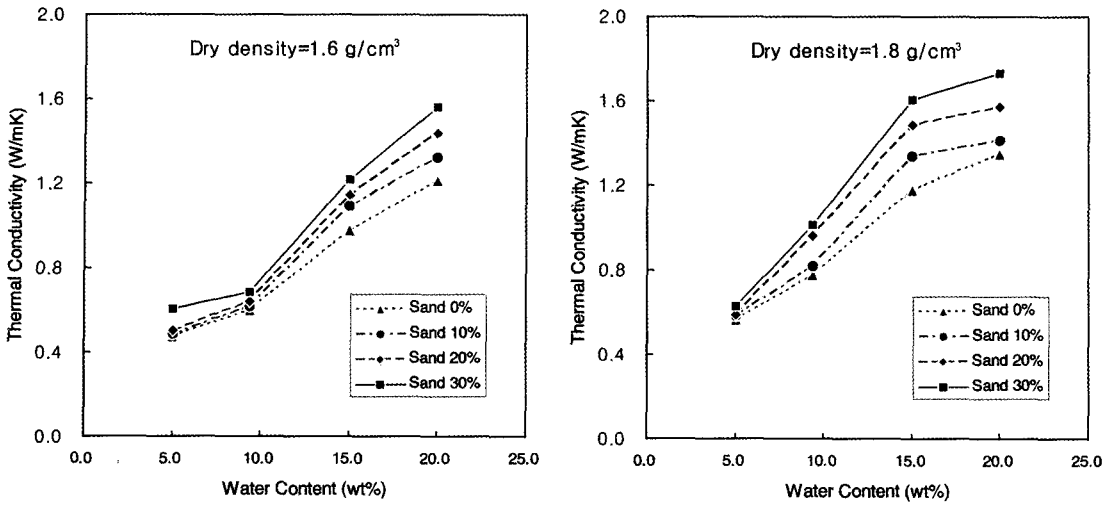


Fig. 4. Thermal conductivity plotted versus water content.

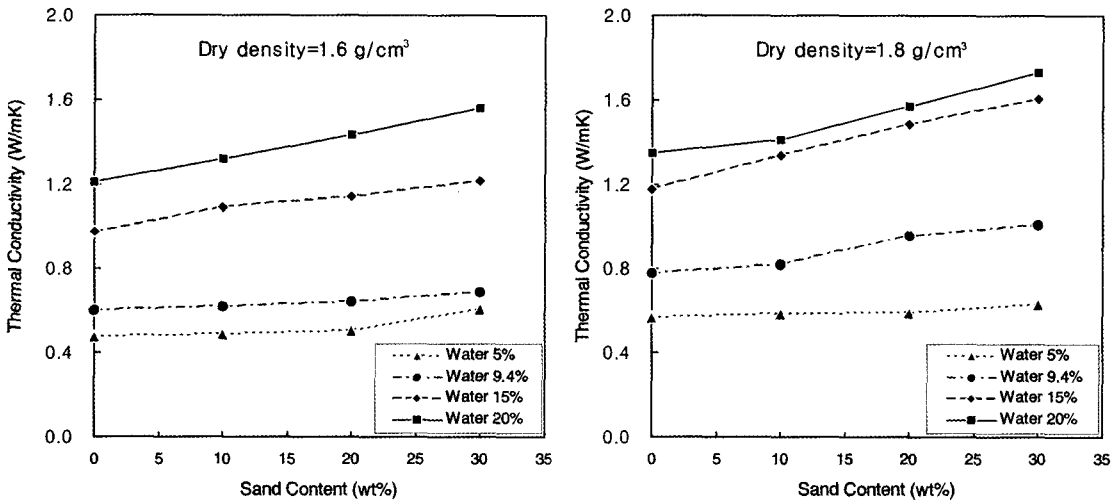


Fig. 5. Thermal conductivity plotted versus water content.

화와는 상관없이 일반적인 다중방벽개념 하에서 완충재의 열전도도값의 설계 요건인 1.0 W/mK 이상의 값을 나타내었다(표 2). 따라서 국내의 옥산 벤토나이트 원광을 원료로 사용할 경우 건조밀도 및 모래함량과 수분함량의 조절을 통해서 1.0 W/mK 이상의 열전도도값을 갖는 완충재 블록의 제작이 가능하며, 벤토나이트 블록의 제작 용이성과 열전도 증가의 효율성을 고려하였을 때 국내산 옥산 벤토나이트를 완충재로 사용할 경우 건조밀도 1.6 g/cm³, 모래함량 10~30 wt%, 함수량 15 wt%로 벤토나이트 블

록을 제조하는 것이 경제적, 기술적으로 가장 효율적인 것으로 제안될 수 있다. 그러나 앞서 설명하였듯이 이번 실험에서 사용된 국내 벤토나이트는 전형적인 Ca-벤토나이트이며, 세계 여러 나라들에서 기준완충재로 고려하고 있는 벤토나이트는 주로 Na-벤토나이트이기 때문에 이들의 물리·화학적 특성이 다르므로 기존 선진국들의 완충재 설계요건들을 근거로 국내 완충재의 설계요건을 규정하기에 다소 무리가 있을 수 있다. 또한 변수로 선택한 건조밀도, 수분함량, 불순물로서 모래의 첨가는 벤토나이트 블록의

수리전도도 및 팽윤압 등과 같은 기타 물성에 영향을 주기 때문에 앞으로 이에 대한 상호 연관성을 밝혀야 보다 명확한 최적의 벤토나이트 블록 제작 조건을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

국내산 옥산 벤토나이트 원광을 사용하여 건조밀도는 1.6과 1.8 g/cm³, 함수량은 5, 9.4, 15, 20 wt%, 첨가물로서의 모래함량은 0, 10, 20, 30 wt%로 변화시켜 제작한 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정 한 결과는 다음과 같다.

1) 동일한 수분과 모래함량 조건에서 실험에 사용된 벤토나이트의 자연수분함량인 9.4%를 기준으로 할 경우, 건조밀도 1.6에서 1.8 g/cm³로 증가에 의한 열전도도의 증가량은 0.09~0.38 W/mK이며 이는 6.9~50.0%의 증가율에 해당한다.

2) 동일한 건조밀도와 수분함량 조건에서, 벤토나이트의 자연수분함량을 기준으로 할 경우, 30 wt%까지의 모래 첨가에 의한 열전도도의 증가량은 건조밀도 1.6 g/cm³일 경우 0.08~0.35 W/mK이며, 1.8 g/cm³일 경우는 0.24~0.43 W/mK로서, 이는 각각 12.1~22.5%와 21.9~26.6%의 증가율에 해당한다.

3) 동일한 건조밀도와 모래함량 조건에서 자연수분함량인 9.4 wt%에서 20 wt%까지 함수량을 증가시킬 경우 열전도도의 증가량은 건조밀도가 1.6 g/cm³일 경우 0.61~0.88 W/mK, 1.8 g/cm³일 경우 0.57~0.72 W/mK이며 이는 각각 101.4~128.3%와 63.3~73.5%의 열전도도 증가율에 해당한다.

4) 건조밀도, 모래함량, 수분 등의 변수에 대한 열전도도 측정 실험 결과, 수분 함량의 변화에 의한 열전도도 증가 효과가 가장 크며 특히, 수분 함량이 15 wt% 이상일 경우 건조밀도와 모래함량과 상관없이 1.0 W/mK 이상의 값을 나타내었다

5) 국내의 옥산 벤토나이트 원광을 완충제의 원료로 사용할 경우 벤토나이트 블록의 제작 용이성과 열전도 증가의 효율성을 고려하였을 때 건조밀도 1.6 g/cm³, 모래함량 10~30 wt%, 함수량 15 wt%로 벤토나이트 블록을 제조하는 것이 경제적, 기술적으로 가장 효율적인 것으로 제안될 수 있다.

사 사

이 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 과제에 의하여 지원받았음을 밝히며 이에 감사한다. 또한 이 연구를 위한 벤토나이트 블록제작 실험에 도움을 준 충남대학교 임원목 석사과정 연구생과 벤토나이트 원광 분말의 입도분석에 도움을 준 한국지질자원연구원의 고정석 박사에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 강철형, 한경원, 박정화, 전관식, 조원진, 이재완, 권상기, 황용수, 이연평, 김진웅, 최종원, 김승수, 김성기 (2002) 고준위폐기물처분기술개발: 심지층처분시스템개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2336/2002.
- 고상모, 손병국, 송민섭, 박성완, 이석훈 (2002) 벤토나이트의 물리-화학적 성질을 지배하는 요인분석, 한국광물학회지, 15, 259-272.
- 김승수, 전관식, 박종목, 최종원 (2003) 사용후핵연료 처분을 위한 처분용기, 완충재, 뒷채움재의 성능 및 설계요건, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2628/2003.
- 노진환 (2002) 국내산 벤토나이트에 대한 응용광물학적 특성 평가 (I): 광물조성 및 특징과 양이온 교환 특성과의 연계성, 한국광물학회지, 15, 329-344.
- 노진환, 유재영, 최우진 (2003) 국내산 벤토나이트에 대한 응용광물학적 특성 평가 (I): 광물학적 특징, 체표면적 및 유변학적 특성과 그 연계성, 한국광물학회지, 16, 33-47.
- 노진환, 고상모 (2004) 영일 지역 제올라이트질 벤토나이트의 광물특성 및 생성환경, 한국광물학회지, 17, 135-145.
- 전관식, 조원진, 이재완, 김승수, 강문자 (1998) 고준위폐기물처분기술개발: 공학적방벽개발, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1897/98.
- Brigaud, F. and Vasseur, G. (1989) Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks, *Geophys. Jour.*, 98, 525-542.
- Dixon, D. A., Gray, M. N. and Thomas, A. W. (1985) A study on the compaction properties of potential clay-sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal, *Engineering Geology*, 21, 247-255.
- Farouki, O. T. (1981) *Thermal Properties of Soils*, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Monograph 81-1.
- Fjeldskaar, W., Prestholm, E., Guargena, G. and Stephenson, M. (1993) Mineralogical and diagenetic control on the thermal conductivity of the sedimentary sequences in the Bjørnøya Basin, Barents Sea. pp.

- 445-453 in: Basin Modelling: Advances and Applications, Dore, A. G. et al., eds, Norwegian Petroleum Society Special Publication, No. 3, Elsevier, Amsterdam.
- Gilliam, T.M. and Morgan, I.L. (1987) Shale; Measurement of Thermal Properties, Oak Ridge National Laboratory ORNLTM-10499.
- Han, U. (1993) A study on the heat generation and thermal conductivity of crustal rocks, *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, 26, 371-382.
- Horai, K. (1971) Thermal conductivity of rock-forming minerals, *Jour. Geophys. Res.*, 76, 1278-1308.
- Japan Nuclear Cycle Development Institute (2000), H-12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan, JNC-TN-1410/2000.
- Middleton, M. (1994) Determination of matrix thermal conductivity from dry drill cuttings, *A.A.P.G. Bull.* 78, 1790-1799.
- OECD (2003) Engineered barrier systems and the safety of deep geological repositories, ISBN 92-64-18498-8.
- ONDRAF/NIRAS (2001) Technical overview of the SAFIR 2 report, NIROND 2001-05E.
- Simmons, G.G. and Baumgartner, P. (1994) The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering for disposal facility, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10715, COG- 93-5.
- SKB (1999) Background report to SR 97, SR97 Waste, repository design and sites.
- SKB (2001) RD&D-Programme 2001: Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, TR-01-30.
- SKBF/KBS (1983) Final storage of spent fuel - KBS-3, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

2006년 6월 7일 원고접수, 2006년 6월 15일 게재승인.