

고준위폐기물처분장 완충재 및 뒷채움재의

열전도도 예측을 위한 관계식

조원진^{1)*}, 이재완¹⁾, 권상기¹⁾

A Correlation to Predict the Thermal Conductivity of Buffer and Backfill Material for a High-Level Waste Repository

Won-Jin Cho, Jae-Owan Lee, Sangki Kwon

Abstract In the present design concept of a high-level waste repository, the bentonite and bentonite-sand mixture are considered as the buffer and backfill material. For the Kyungju bentonite which is a candidate material, the thermal conductivities of compacted bentonite and bentonite-sand mixture were measured. A correlation has been proposed to predict the thermal conductivity of the Kyungju bentonite and the bentonite-sand mixture as a function of the dry density, the water content and the sand fraction. The proposed correlation can predict the thermal conductivity with a difference less than 10% under the experimental conditions.

Key words Buffer, Backfill, Thermal conductivity, Bentonite, Bentonite-sand mixture

초 록 현재 제안되고 있는 고준위폐기물 심지층처분장의 설계에 따르면, 완충재와 뒷채움재의 재료로 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물이 고려되고 있다. 후보물질인 경주벤토나이트를 대상으로, 압축 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 측정하였다. 경주벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 건조밀도, 함수비 및 모래 함량의 함수로서 예측할 수 있는 관계식을 제안하였다. 제안된 관계식은 실험 조건 하에서 열전도도를 10% 이내의 오차로 예측할 수 있다.

핵심어 완충재, 뒷채움재, 열전도도, 벤토나이트, 벤토나이트-모래 혼합물

1. 서 론

우리나라는 현재 20기의 원자력발전소(가압경수로, PWR: 16기, 가압중수로, PHWR: 4기)가 가동 중에 있으며, 6기의 원자력발전소(가압경수로, PWR)가 건설 중에 있다. 따라서 전력 생산에서 원자력발전이 차지하는 비중이 점차 증대되고 있는 실정이다. 이러한 원자력발전 과정에서 발생하는 사용후핵연료(spent fuel)는 반감기가 긴 방사성핵종을 다량 함유하고 있는 고준위폐기물(high-level waste)이므로 유탄기간 동안 인간환경으로부터 격리시켜 안전하게 처분함으로써, 생태계에 영향

을 미치지 않도록 하여야 한다.

고준위폐기물을 인간 환경으로부터 안전하게 격리시키기 위한 방법으로는 인간의 손길이 미치지 않는 지하 심부의 안정된 지층에 처분하는 방안이 가장 유력시되고 있다. 고준위폐기물처분장은 원자력발전소로부터 수송되어 온 사용후핵연료를 수납, 검사한 후 내식성 금속재질의 처분용기(disposal container)에 포장 및 밀봉하는 지상시설과 밀봉된 처분용기를 지하 심부에 격리시켜 환경에 대한 위해 가능성을 차단하는 지하시설로 이루어진다. 한국형 고준위폐기물기준처분장(Korean Reference Repository, KRS)¹⁾ 및 캐나다 심지층처분장²⁾의 설계개념에 따르면, 고준위폐기물처분장 지하시설은 지하 수백 미터 깊이에 있는 심부 지층에 건설된 여러 개의 처분동굴들과 이를 연결하는 터널로 구성된다(Fig. 1). 지상시설에서 수직갱을 통해 운반된 처분용기는 처분동굴 바닥에 수직으로 굴착된 처분공(borehole) 내에 넣

¹⁾ 한국원자력연구원

* 교신저자 : wjcho@kaeri.re.kr

접수일 : 2010년 8월 9일

심사 완료일 : 2010년 8월 13일

게재 확정일 : 2010년 8월 13일

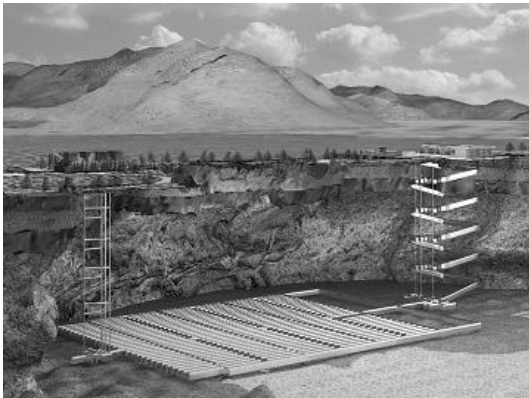


Fig. 1. Cutaway view of the Korean reference repository

어지고, 처분용기와 처분공 암반 벽 사이의 공간은 완충재(buffer material)로 충전된다(Fig. 2). 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결터널들을 뒷채움재(backfill material)로 충전시킨 후 지하시설 입구를 플러킹재(plugging material)로 막아 폐쇄한다.

완충재나 뒷채움재는 방사성폐기물처분장의 안전성을 향상시키기 위한 공학적방벽의 주요 구성요소로서, 처분장 주위암반에 존재하는 지하수가 처분장 내로 유입되어 처분용기(disposal container)를 부식시키는 것을 제한하고, 장시간 경과 후 처분용기가 부식에 의해 파손된 경우에도 방사성물질이 주위 암반으로 누출되는 것을 지연시켜 주는 역할을 한다.

고준위폐기물처분장이 폐쇄된 후 시간이 경과하면, 처분장 주위의 암반으로부터 처분장 내로 지하수가 침투하게 되며, 고준위폐기물로부터 방사성핵종의 붕괴에 따른 붕괴열이 다량 방출된다. 또 완충재 및 뒷채움재의 구성 성분인 벤토나이트는 침투된 지하수와 접촉하면 팽윤하여 주위 암반과 처분용기에 높은 팽윤압을 가하게 된다. 따라서 완충재 및 뒷채움재 내에서는 폐기물로부터의 붕괴열의 방출, 주위 암반으로부터 지하수의 침투, 지하수의 침투에 따른 완충재 및 뒷채움재의 팽윤과 이로 인한 응력변화가 동시에 일어나며, 이 열-수리-역학적 복합거동은 고준위폐기물처분장의 장기 성능에 중요한 영향을 미친다. 완충재 및 뒷채움재의 열전도도는 열-수리-역학적 복합거동을 좌우하는 중요 인자로서, 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 신속히 발산시켜, 완충재의 온도가 설정된 최고온도를 넘지 않도록 하여 공학적방벽의 장기 건전성을 유지하는데 중요한 역할을 한다.

완충재의 재료로는 압축 벤토나이트 또는 벤토나이트

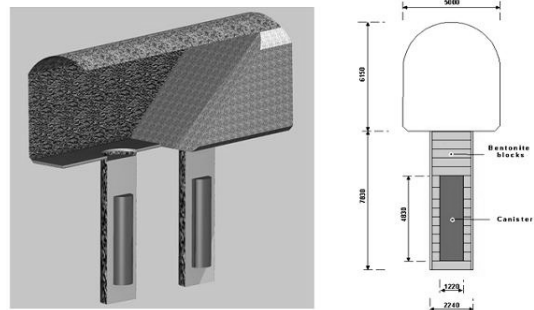


Fig. 2. Cross section of the engineered barrier system

-모래 혼합물이 제안되고 있으며, 뒷채움재 재료로는 벤토나이트-모래의 혼합물이 고려되고 있다. 그러므로 압축 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 규명하는 것은 공학적방벽의 장기 안정성을 해석하는데 매우 중요하다.

벤토나이트(bentonite)는 주 구성광물이 몬모릴로나이트(montmorillonite)이며, 그 외 장석(feldspar)과 소량의 석영(quartz) 등을 함유한다. 따라서 벤토나이트의 광물특성은 몬모릴로나이트에 의해 결정되며, 다른 점토에 비해 양이온 교환능이 높고, 팽윤특성이 양호한 장점이 있다. 몬모릴로나이트는 두 개의 규토판 사이에 한 개의 김사이트판이 끼워진 2 : 1 기본 구조를 갖고 있으며³⁾, 기본구조 사이에 양이온들이 존재하는데, 지배적인 층간이온이 Na^+ 인가 Ca^{2+} 인가에 따라 벤토나이트를 Na-벤토나이트와 Ca-벤토나이트로 구분한다.

압축 벤토나이트의 열전도도에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다. Knutsson⁴⁾, Börgesson et al.⁵⁾은 MX-80 벤토나이트에 대해, Radhakrishna⁶⁾는 Avonlea 벤토나이트에 대해 압축 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 보고하였으며, Kunigel VI 벤토나이트에 대한 열전도도도 측정되었다⁷⁾. 우리나라에서는 김건영 등⁸⁾이 경주지방에서 산출되는 벤토나이트에 대해 열전도도를 측정한 바 있으며, 조원진 등⁹⁾은 경주벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 측정하고, 수분 함량 및 모래 함량의 함수로서 열전도도를 나타낼 수 있는 실험 관계식들을 각 건조밀도 별로 제안하였다. 그러나 이러한 관계식들은 특정한 건조밀도에서 적용되므로, 완충재 및 뒷채움재의 열-수리-역학적 장기거동 해석을 위한 입력인자로 사용하기에는 한계가 있다. 따라서 이 논문에서는 다양한 건조밀도, 수분 함량 및 모래 함량 조건에서 경주 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 추정할 수 있는 단일 관계식을 제시하고자 하였다.

2. 열전도도 데이터

열전도도 예측관계식의 유도를 위해 조 등⁹⁾에 의해 보고된 압축 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도 측정 데이터를 이용하였다.

측정에 사용된 벤토나이트는 경주시 양남면에서 산출된 것으로, 몬모릴로나이트(70%)와 장석(29%)이 주성분이고 소량의 석영(~1%)을 함유하며, 주요 교환가능 양이온은 Ca^{2+} 이다. 모래는 경기도 용진군 자월도 주변에서 채취된 모래로서, 주로 석영, 장석 및 운모로 구성되어 있다. 벤토나이트와 모래의 화학조성을 Table 1과 2에 나타내었으며, 광물학적 특성은 조원진 등¹¹⁾에 의해 보고되었다.

열전도도는 압축 벤토나이트의 경우, 건조밀도가 1.2 Mg/m^3 에서 1.8 Mg/m^3 사이의 벤토나이트에 대해서, 벤토나이트-모래 혼합물의 경우, 건조밀도가 1.6 Mg/m^3 과 1.8 Mg/m^3 이고, 모래의 함량이 중량비로 10 wt%에서 30 wt% 범위에서 측정되었다.

3. 결과 및 토의

압축 벤토나이트의 열전도도 데이터를 Fig. 3에 나타내었으며, 건조밀도 1.6 Mg/m^3 및 1.8 Mg/m^3 인 압축

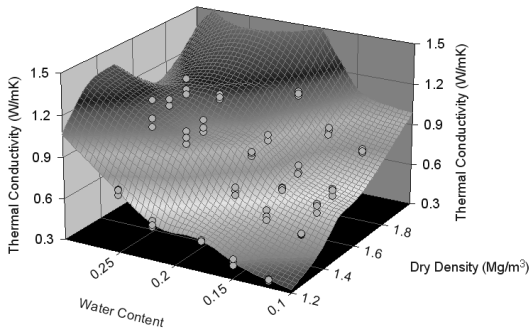


Fig. 3. Thermal conductivities of the compacted bentonite

Table 1. Chemical composition of Kyungju bentonite

Chemical constituents	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	FeO	SO_3
wt %	56.80	19.96	6.03	2.59	0.77	0.93	1.25	0.15	1.28

Table 2. Chemical composition of Jawaldo sand

Chemical constituents	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
wt %	83.32	9.789	1.32	0.48	0.31	3.55	1.46

벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도 데이터를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이, 건조 고체의 무게와 물의 무게 사이의 비로 정의되는 함수비(water content)가 일정할 때, 벤토나이트의 열전도도는 건조밀도가 증가함에 따라 증가한다. 벤토나이트의 건조밀도가 증가함에 따라 벤토나이트 입자

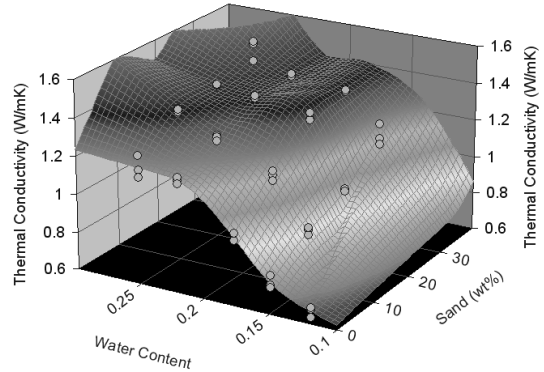


Fig. 4. Thermal conductivities of the bentonite-sand mixture with dry density of 1.6 Mg/m^3

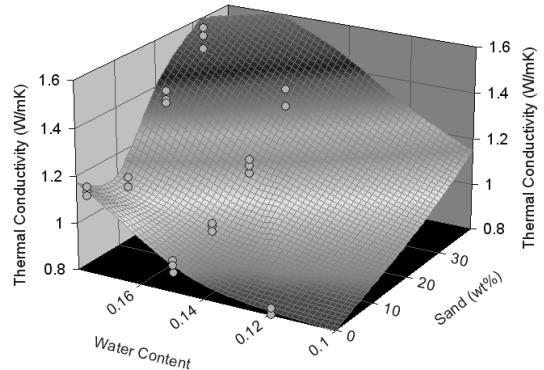


Fig. 5. Thermal conductivities of the bentonite-sand mixture with dry density of 1.8 Mg/m^3

들이 서로 밀착하게 되어, 입자 사이의 간격이 작아져서 열전달을 촉진시키기 때문에 열전도도가 증가하는 것이다. 건조밀도가 일정할 경우에, 벤토나이트의 열전도도는 함수비가 증가함에 따라 증가하였다. 이것은 벤토나이트의 함수비가 증가할수록 압축 벤토나이트의 공극 내에 존재하던 열전도도가 낮은 공기가 열전도도가 상대적으로 높은 물로 대체되기 때문이다. 또 수분 함량이 증가하면, 벤토나이트가 팽윤되어 벤토나이트 개개 입자 사이의 접촉이 좋아지고, 벤토나이트 블록 내에 존재하는 작은 균열도 메워지는 점도 열전도도 증가에 기여한다. 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도는 모래 함량이 증가할수록 커진다. 이것은 모래가 벤토나이트에 비해 입자간 밀도(inter-particle density)가 높고, 입자간의 접촉이 양호하여 열전달이 잘 일어나는데 기인하는 것으로 생각된다. 벤토나이트-모래 혼합물의 경우에도 수분 함량이 증가할수록 열전도도가 증가하며, 그 이유는 벤토나이트의 경우와 유사하다.

Fig. 3, 4 및 5로부터 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도는 모두 건조밀도와 함수비가 커질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도는 모래 함량에 따라 넓은 범위에서 분포된 값을 나타낸다. 압축 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 건조밀도, 함수비 및 모래 함량을 이용하여 나타낼 수 있는 단일 관계식을 유도하기 위하여 다음과 같은 가정이 도입되었다.

- 벤토나이트와 모래는 균일한 이성분혼합물(two-component mixture)을 형성한다.
- 혼합물은 벤토나이트의 연속 매질로 구성되어 있으며, 모래 입자는 매질 내에 분포된 불투과성 성분으로 작용한다.
- 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 공극은 초기에는 공기로 충전되어 있으며, 함수비가 증가함에 따라 물이 공기를 대체하여 공극을 충전시킨다.
- 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도는 구성 성분(벤토나이트, 모래, 물 및 공기)의 열전도도의 가중합계(weighted sum)이다.
- 총괄 열전도도(overall thermal conductivity)에 대한 각 성분의 기여는 매질의 총 단면적 중, 그 성분이 차지하는 비율에 비례하고 공기에 의한 열전달이 열전도도에 기여하는 정도는 무시할 수 있다.

이러한 가정으로부터 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도 K 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \left(\frac{A_{sand}}{A}\right)k_s + \left(\frac{A_{bentonite}}{A}\right)k_b + \left(\frac{A_{water}}{A}\right)k_w \quad (1)$$

여기서 A , A_{sand} , $A_{bentonite}$ 및 A_{water} 는 각각 혼합물의 총단면적(total cross-sectional area), 모래 및 벤토나이트가 차지하는 단면적, 공극이 차지하는 단면적 중 물에 의해 채워진 단면적이다. k_s , k_b 및 k_w 는 각각 모래, 벤토나이트 및 물의 열전도도를 나타내는 계수이다. 벤토나이트-모래 혼합물의 수리전도도를 기술하기 위해 유효 점토 건조밀도(effective clay dry density) ρ_e 개념이 Cho et al.¹²⁾에 의해 도입되었다. 유효 점토 건조밀도는 다음 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \rho_e &= \text{시스템 내의 점토의 질량} / \text{점토와 공극의 총 용적} \\ &= \frac{\rho_d(1-\omega_s)}{1 - \frac{\rho_d\omega_s}{\rho_{ts}}} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ρ_d , ω_s 및 ρ_{ts} 는 각각 혼합물의 건조밀도, 모래의 중량분률(weight fraction) 및 모래 입자의 진밀도(true density)이다. 순수한 벤토나이트에 대해서는,

$$\rho_e = \rho_d$$

이다. 이 유효점토건조밀도 개념을 이용하면, 벤토나이트의 단면적(A')과 혼합물의 총단면적(A)의 비, A'/A 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{A'}{A} = 1 - \frac{\rho_d\omega_s}{\rho_{ts}} = \frac{\rho_d(1-\omega_s)}{\rho_e} \quad (3)$$

그러면 $\frac{A_{sand}}{A}$, $\frac{A_{bentonite}}{A}$ 및 $\frac{A_{water}}{A}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{A_{sand}}{A} &= 1 - \frac{A'}{A} = 1 - \frac{\rho_d(1-\omega_s)}{\rho_e} \\ \frac{A_{bentonite}}{A} &= \left(\frac{A'}{A}\right)\frac{\rho_e}{\rho_{tb}} = \frac{\rho_d}{\rho_{tb}(1-\omega_s)} \\ \frac{A_{water}}{A} &= \left(\frac{A'}{A}\right)\left(1 - \frac{\rho_e}{\rho_{tb}}\right)S_l = \left(\frac{\rho_d(1-\omega_s)(\rho_{tb}-\rho_e)}{\rho_e\rho_{tb}}\right)S_l \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ρ_{tb} 및 S_l 은 각각 벤토나이트 입자의 진밀도와 포화도(degree of saturation)이다. 포화도는 함수비와 포화함수비의 비로 정의된다. 그러면 식 (1)은 다음과

같이 나타낼 수 있다.

$$K = \left(\frac{k_b}{\rho_{tb}}\right)\rho_d + \left(\frac{k_b}{\rho_{ts}} - \frac{k_b}{\rho_{tb}}\right)\rho_d\omega_s + k_w S_l - \left(\frac{k_w}{\rho_{tb}}\right)\rho_d S_l \quad (5)$$

그러면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$K = a\rho_d + b\rho_d\omega_s + cS_l - d\rho_d S_l \quad (6)$$

여기서 a , b , c 및 d 는 각각 $\frac{k_b}{\rho_{tb}}$, $\frac{k_b}{\rho_{ts}} - \frac{k_b}{\rho_{tb}}$, k_w 및 $\frac{k_w}{\rho_{tb}}$ 을 나타내는 계수이다. Fig. 3, 4, 5에 나타난 여러 건조 밀도에서의 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도 측정데이터를 이용하여, 다변량 회귀분석을 하면, 압축 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 예측하기 위한 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$K = 5.0936 \times 10^{-2} \rho_d + 7.3250 \times 10^{-1} \rho_d\omega_s + 2.1411 S_l - 5.9488 \times 10^{-1} \rho_d S_l \quad (7)$$

$(r^2 = 0.94)$

여기서 K 는 열전도도(W/mK), ρ_d 는 벤토나이트 또는 벤토나이트-모래 혼합물의 건조밀도(Mg/m^3), ω_s 는 모래의 중량분률(무차원), S_l 은 포화도(무차원)이다. 여기서 얻어진 계수 a , b 및 c 값은 실험과정에서 비롯된 측정 오차와 통계적 요동(fluctuations)이 내포되어 있다

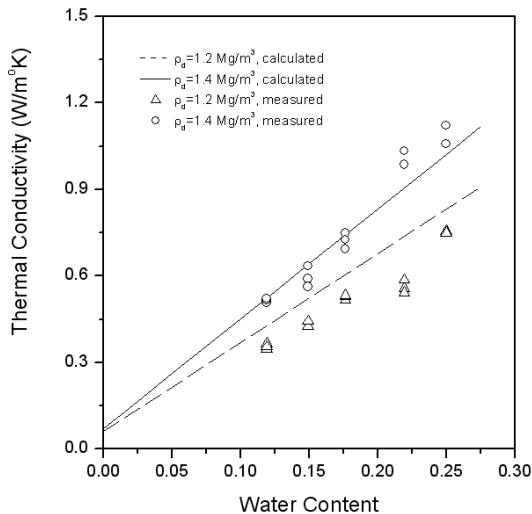


Fig. 6. Thermal conductivities of the bentonites with dry density of 1.2 and 1.4 Mg/m^3 as a function of the water content

므로, 원래의 물리적 의미와는 차이가 있다.

다양한 건조밀도와 함수비를 가진 벤토나이트에 대해 측정된 열전도도를 식 (7)에 의해 예측된 값과 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6에서 Fig. 8에 나타내었다. 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이, 측정된 열전도도와 예측된 열전도도는 서로 상당히 잘 일치하였다. 벤토나이트 열전도도의 측정치와 예측치의 비교 결과를 Fig. 9

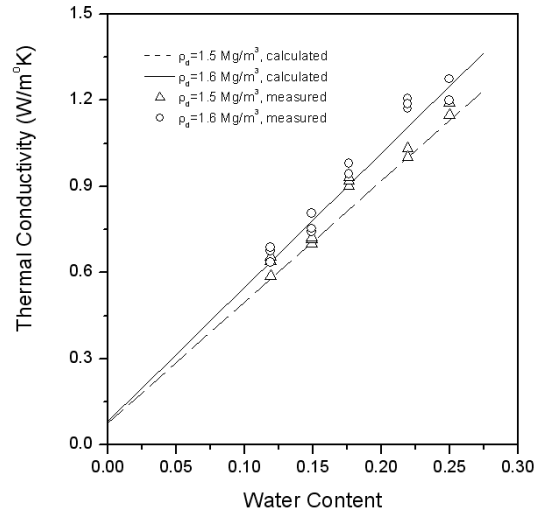


Fig. 7. Thermal conductivities of the bentonites with dry density of 1.5 and 1.6 Mg/m^3 as a function of the water content

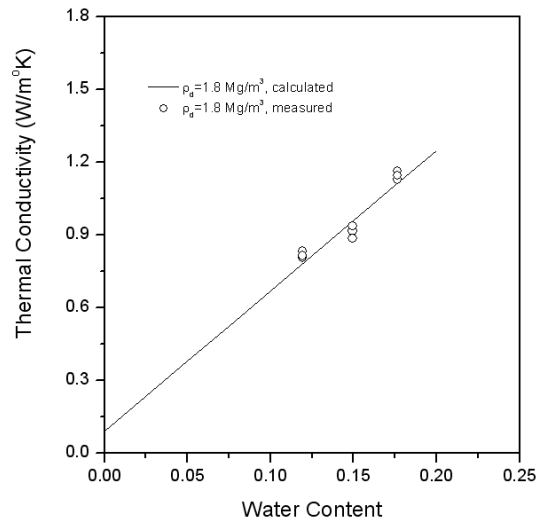


Fig. 8. Thermal conductivities of the bentonites with dry density of 1.8 Mg/m^3 as a function of the water content

에 요약하여 나타내었으며, 이 그림으로부터 열전도도의 측정치와 예측치의 오차는 10% 이하라는 것을 알 수 있다.

다양한 모래 중량분율과 함수비를 가진 건조밀도 1.6 및 1.8 Mg/m³인 벤토나이트-모래 혼합물에 대해 측정된 열전도도와 계산된 값의 비교를 Fig. 10과 Fig. 11에

나타내었다. 이 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이 몇몇 데이터를 제외하고는 측정치와 예측 값이 상호 잘 일치하였다. 다양한 함수비와 모래 함량에서 측정된 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도와 계산 값 사이의 비교를 Fig. 12에 요약하여 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도 측

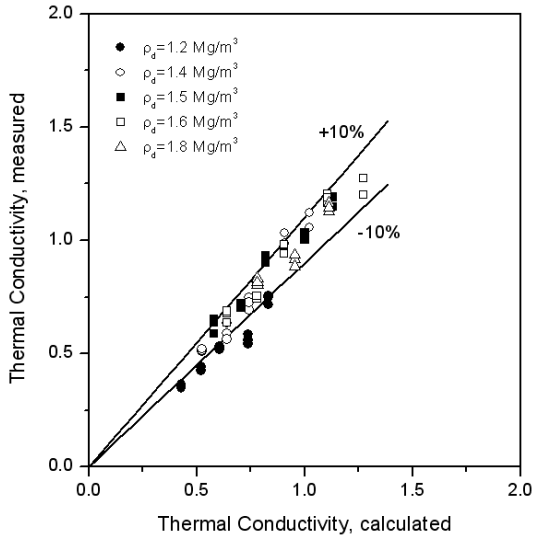


Fig. 9. Comparison between the calculated thermal conductivities and the measured data for the compacted bentonite

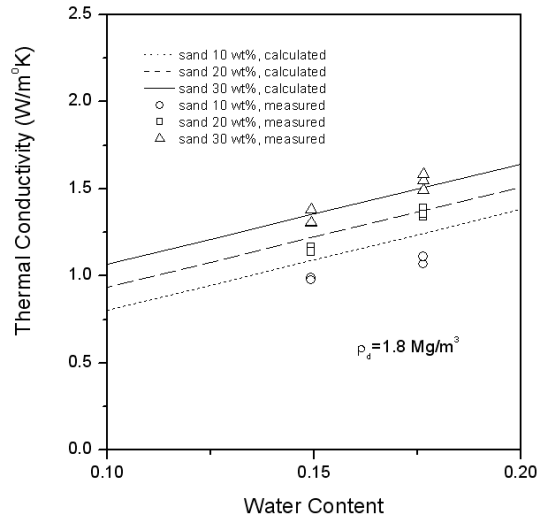


Fig. 11. Thermal conductivities of the bentonite-sand mixtures with dry density of 1.8 Mg/m³ as a function of the water content

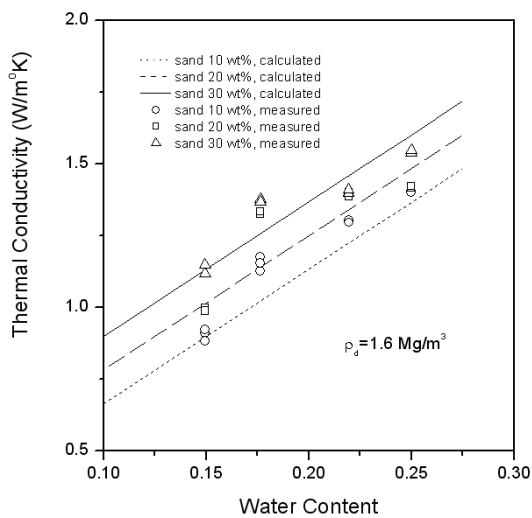


Fig. 10. Thermal conductivities of the bentonite-sand mixtures with dry density of 1.6 Mg/m³ as a function of the water content

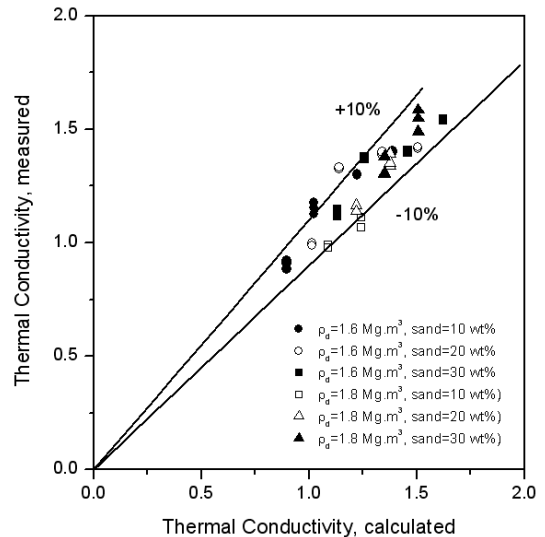


Fig. 12. Comparison between the calculated thermal conductivities and the measured data for the bentonite-sand mixture

정치와 계산치의 차이는 벤토나이트의 경우와 유사하게 10% 이하였다.

이상과 같은 결과들로부터 식 (7)이 경주 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 추정하는데 유용하다는 사실이 입증되었다. 제안된 관계식은 건조밀도가 1.2 Mg/m^3 에서 1.8 Mg/m^3 사이이고, 모래 중량분율이 0~0.3 범위에 있는 경주 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 일반적으로 물질의 열전도도는 온도에 따라 달라진다. 그러나 압축 벤토나이트의 열전도도는 20°C 에서 100°C 범위에서 거의 일정하다고 보고되었다.⁷⁾ 따라서 식 (7)은 상온에서 100°C 까지의 온도 범위에서 경주 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 10% 오차로 예측하는 데 사용될 수 있다.

4. 결 론

고준위폐기물처분장 공학적방벽의 주요 구성요소인 완충재 및 뒷채움재로 사용되는 압축 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도에 미치는 건조밀도, 함수비 및 모래 함량의 영향이 조사되었으며, 경주 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 예측할 수 있는 단일 관계식이 제안되었다. 이 관계식은 10% 오차 범위에서 경주 벤토나이트와 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도를 예측할 수 있었다. 이 관계식은 고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 거동 해석을 위한 입력 자료로 유용하게 사용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

참고문헌

1. 최희주 등, 2008, 한국형 고준위폐기물처분시스템, 기술보고서, KAERI/TR-3563 /2008, 한국원자력연구원.
2. Simmons, G. R. and Baumgartner, P., 1994, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering for a disposal facility, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10715, COG-93-5.
3. Bowles, J. E., 1984, Physical and geotechnical properties of soils, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co.
4. Knutsson, S., 1983, On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite, SKB Technical Report 83-72.
5. Börgesson, L., Fredrikson, A. and Johannesson, L.-E., 1994, Heat conductivity of buffer materials, SKB Technical Report 94-29.
6. Radhakrishna, H. S., 1984, Thermal properties of clay-based buffer materials for a nuclear fuel waste disposal vault, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-7805.
7. JNC, 1999, H12 Project to establish technical basis for HLW disposal in Japan, Supporting Report 2, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan.
8. 김건영, 김승수, 최종원, 박성원, 배대석, 2006, 완충재의 물리적 성능 향상을 위한 국내 벤토나이트의 열전도도 측정 실험, 한국광물학회지, 19, 89-98.
9. 조원진, 이재완, 권상기, 2008, 압축 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도, 방사성폐기물학회지, 6, 101-109.
10. American Society for Testing and Materials, 1991, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08.
11. 조원진, 이재완, 강철형, 전관식, 1999, 고준위폐기물처분장 완충재용 국산 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 물리화학적, 광물학적 및 역학적특성, 기술보고서, KAERI/TR-1388/99, 한국원자력연구소
12. Cho, W. J., Lee, J. O., Hahn, P. S. and Chun, K. S., 1996, Preliminary Performance Assessment of the Engineered Barriers for a Low- and Intermediate-level Radioactive Waste Repository, Nuclear Technology, 116, 115.

조 원 진



1979년 고려대학교 화학공학과 공학사
1984년 한국과학기술원 핵공학과 공학석사
1990년 한국과학기술원 핵공학과 공학박사

Tel: 042-868-8122
E-mail: wjcho@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 책임연구원

이 재 완



1975년 영남대학교 공과대학 화학공학과 학사
1983년 고려대학교 대학원 화학공학과 공학석사
1998년 한국과학기술원 원자력공학과 공학박사

Tel: 042-868-2852
E-mail: jolee@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 책임연구원

권 상 기



1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1996년 University of Missouri-Rolla, Mining Eng. 공학박사

Tel: 042-868-8914
E-mail: kwonsk@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 책임연구원