

고준위폐기물 처분시설 완충재의 온도변화에 따른 열물성

Thermal Properties of Buffer Material for a High-Level Waste Repository Considering Temperature Variation

윤 석¹ Yoon, Seok 김 건 영² Kim, Geon-Young
박 태 진³ Park, Tae-Jin 이 재 광² Lee, Jae-Kwang

Abstract

The buffer is one of the major components of an engineered barrier system (EBS) for the disposal of high-level radioactive waste (HLW). As the buffer is located between a disposal canister and host rock, it is indispensable to assure the disposal safety of high-level radioactive waste. It can restrain the release of radionuclide and protect the canister from the inflow of groundwater. Since high quantity of heat from a disposal canister is released to the surrounding buffer, thermal properties of the buffer are very important parameters for the analysis of the entire disposal safety. Especially, temperature criteria of the compacted bentonite buffer can affect the design of HLW repository facility. Therefore, this paper investigated thermal properties for the Kyungju compacted bentonite buffer which is the only bentonite produced in South Korea. Hot wire method and dual probe method were used to measure thermal conductivity and specific heat capacity of the compacted bentonite buffer according to the temperature variation. Thermal conductivity and specific heat capacity were decreased dramatically when temperature variation was between 22°C~110°C as degree of saturation decreased according to the temperature variation. However, there was little variation under the high temperature condition at 110°C~150°C.

요 지

완충재는 고준위폐기물을 처분하기 위한 공학적방벽 시스템에서 중요한 구성요소 중 하나이다. 완충재는 처분공 내 사용후핵연료가 담긴 처분용기와 암반사이에 채워지는 물질로써 고준위폐기물의 안전한 처분을 위해 필수적인 요소라고 할 수 있다. 완충재는 지하수 유입으로부터 처분용기를 보호하고, 방사성 핵종 유출을 저지한다. 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량은 완충재로 전파되기에 완충재의 열물성은 처분시스템의 안전성 평가에 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히, 완충재의 설정온도는 고준위폐기물 처분시설의 설계에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 온도변화에 따른 국내 경주산 압축 벤토나이트 완충재에 대한 열물성을 규명하고자 하였다. 열선법과 이중 탐침법을 이용하여 온도변화에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도와 비열을 측정하였다. 22°C와 110°C 구간에서는 온도 증가에 따라 포화도가 변화되기에 열전도도와 비열은 급격하게 감소하는 경향을 보였으나 110°C와 150°C 사이의 고온 구간에서는 열전도도와 비열의 추가 변화가 거의 발생하지 않았다.

Keywords : Compacted bentonite buffer, Thermal conductivity, Specific heat capacity, Temperature variation

1 정회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI, Tel: +82-42-868-2946, Fax: +82-42-868-8055, syoon@kaeri.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원 (Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)

3 비회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 선임연구원 (Senior Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

원자력 발전소의 연료로 쓰고 난 사용후핵연료는 방사선준위가 높은 고준위폐기물로서 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 공학적방벽의 개념에 의해 안전하게 처분되어야 한다. 공학적방벽은 Fig. 1과 같이 사용후핵연료가 담긴 처분용기(Canister), 뒷채움재(Backfill), 완충재(Buffer), 근계영역 암반(Near-Field rock) 등으로 구성되어 있다(Choi et al., 2014). 이 중 완충재는 처분용기와 암반사이에 채워지는 물질로서 물리적 충격으로부터 처분용기를 보호하고 지하수 유입을 최소화하여 처분용기 내의 핵종이 암반으로 유출되는 것을 저지하는 역할을 한다(Choi et al., 2014; Villar et al., 2006). 또한 완충재는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 발산시키는 역할을 하는데 만약 붕괴열을 효과적으로 발산시키지 못하면 처분용기 내에 열이 축적되어 폐기물 및 처분용기의 장기건전성에 악영향을 끼친다(Cho et al., 1997; JNC 2000; Wersin et al., 2006).

이에 따라 완충재에 적합한 후보물질을 선정하기 위해 다양한 연구가 이루어졌으며, 그 결과 주로 몬모릴로나이트의 벤토나이트가 가장 적합한 물질인 것으로 알려져 있다(Karland, 2010; Lee et al., 2011). 몬모릴로나이트는 알루미늄 8면체의 내부치환에 의해 충전하가 발생하는 광물이며, 층간사이에 존재하는 교환성 양이온의 종류에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 구분된다(Madsen, 1988). 현재 우리나라의 경우 경주에서 생산되는 Ca형 벤토나이트를 기반으로 연구를 수행하고 있다(Lee et al., 2014; Yoo et al., 2016). 압축 벤토나이트 완충재가 가져야 할 성능은 다양하며 이 중 열적 특성은 공학적방벽의 전체 성능평가에 있어 매우 중요하다. 특히, 공학적방벽 시스템에서 완충재의 온도는

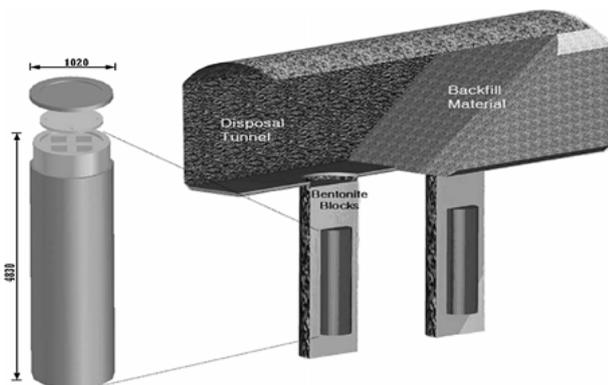


Fig. 1. Concept of engineered barrier system (Lee et al., 2007)

100°C 이하로 규정하고 있으며 이는 처분공 사이의 간격을 결정짓기에 처분시설의 설계에 결정적인 영향을 끼칠 수 있다(Cho and Kim, 2016). 처분면적의 감소를 위해 100°C 이상의 고온에서의 완충재의 특성 변화에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있으며, 100°C 미만에서의 압축 벤토나이트 완충재의 열물성 규명에 관한 연구는 많이 진행되었지만(Lee et al., 2013; Lee et al., 2016; Tang et al., 2008; Wang et al., 2015), 100°C 이상의 고온조건에서의 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 100°C 이상의 고온에서의 국내 경주산 Ca형 압축 벤토나이트 완충재에 대한 온도 변화에 따른 열전도도와 비열을 실험적으로 규명하고자 하였다.

2. 실내 열물성 실험

2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 경주산 Ca형 벤토나이트는 신생대 제 3기충군 지역인 경주, 울산, 포항 일대에 주로 분포하고 있다(Lee et al., 2011). Fig. 2는 벤토나이트 분말의 체가름 실험을 통한 입도 분포곡선을 나타내고 있으며 동일분류 결과 고소성 점토인 CH로 분류되었다. 벤토나이트 분말의 비중은 2.71, 액성한계와 소성한계는 각각 146.7%, 28.4%였으며 소성지수는 118.3%였다. 또한 Yoo et al.(2016)은 본 실험에 사용된 Ca형 벤토나이트에 대한 광물학적, 화학적 특성 등에 대해 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 벤토나이트 분말을 다이플로팅(die floating) 방식의 하중을 재하하여 압축 벤토나이트 완충재를 제작하였으며 시료의 균질성을 확보하기 위

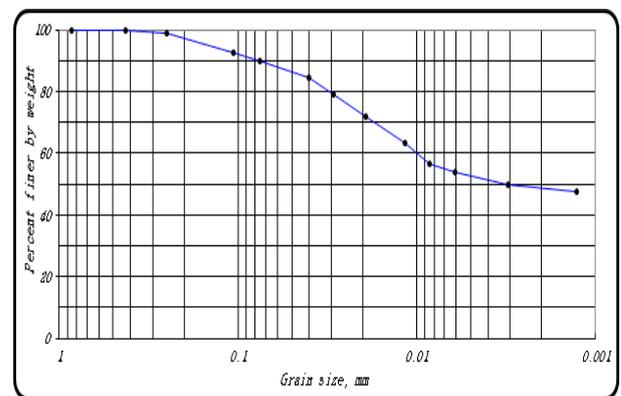


Fig. 2. Particle size distribution of bentonite powder

하여 Fig. 3과 같이 정수압 기법(cold isostatic press)을 적용하여 시료를 성형하였다. 국내 경주산 Ca형 압축 벤토나이트 완충재의 건조밀도는 1.6t/m^3 이상의 값을 가져야 하기에(Yoo et al., 2016) 본 연구에서는 $1.6\sim 1.8\text{t/m}^3$ 의 건조밀도 값을 갖는 시료를 조성하였다.

2.2 실험 기기

압축 벤토나이트 완충재의 열적 물성은 크게 열전도



Fig. 3. Cold isostatic press



(a) KD2-pro

(b) QTM-500 probe

Fig. 4. Thermal properties Analyzers

도와 비열로 나뉘어 있다. 열전도도는 비정상 열선법을 이용한 QTM-500(Kyoto Electronics, Japan) 장비를 이용하여하였으며 비열은 KD2-pro(Decagon Device, USA)의 이중 탐침법을 사용하였다. 비정상 열선법은 온도와 저항 간의 관계가 잘 알려진 백금선에 일정한 열량을 가하여 가열 시간과 열선의 온도 상승과의 관계를 이용하는 방법이다(ASTM C1113/C1113M-09). 또한 이중 탐침법은 무한 선형열원이론을 기반으로 하나의 탐침에 열을 가한 후 다른 탐침에 도달할 때의 시간과 온도를 이용하여 체적 비열을 측정한다(Bristow et al., 1994; Yoon et al., 2016). Fig. 4는 실험에 사용된 장비를 나타내고 있다. QTM-500에 사용된 압축 벤토나이트 완충재 시료의 사이즈는 $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 20\text{mm}$ 크기의 직육면체 형태였으며, 이중 탐침법에 사용된 시료의 사이즈는 직경 30mm , 높이 40mm 크기의 원기둥 형태였다. 이중 탐침법의 경우 탐침 삽입 전 탐침이 시료에 잘 들어갈 수 있도록 사전 천공 후 탐침과 시료와의 원활한 열전달을 위해 열전달 윤택제인 썬더 구리스를 도포하여 실험이 수행되었다.

3. 실험 결과

3.1 열전도도 측정 결과

압축 벤토나이트의 열전도도는 건조밀도와 함수비에 비례한 것으로 알려져 있다(JNC, 2000; Lee et al., 2013; Yoon et al., 2017). 특히 온도의 경우, 온도가 증가하면 점토광물을 구성하고 있는 수분이 증발되기에 이는 함

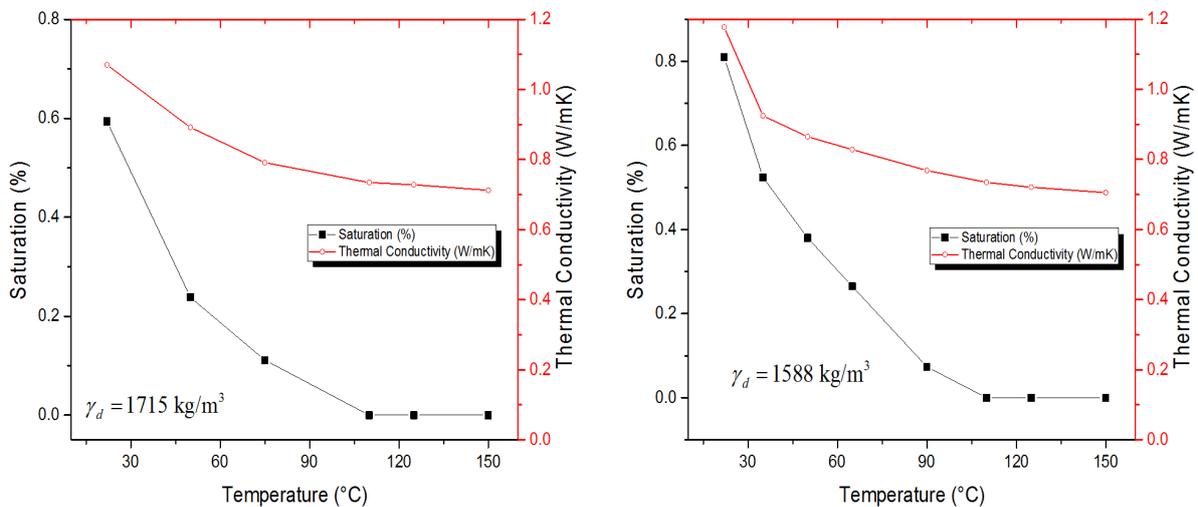


Fig. 5. Variation of saturation and thermal conductivity

수비의 감소를 초래한다. 본 연구에서는 세 가지 건조밀도 값에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 함수비와 열전도도 값을 측정하였다. 건조밀도와 함수비는 ASTM D2216 및 KS 2306에 따라 110±5°C의 건조로에서 노건조한 후 질량변화를 토대로 측정하였다. Table 1은 22°C에서 150°C까지 함수비 및 포화도, 그리고 열전도도 값을 보여주고 있다. Fig. 5는 건조밀도 1.588t/m³ 일 때와 1.715t/m³ 일 때 온도에 따른 포화도 및 열전도도 변화를 보여주고 있다. 각 단계별 온도의 지속시간은 48시간으로 설정하였으며 QTM-500의 probe를 건조로에 설치하여 열전도도를 측정하였다. 초기 포화도가 60~80%인 경우 온도 상승에 따른 포화도의 감소가 크기에 이는 열전도도의 뚜렷한 감소를 나타내었다. 즉, 상온에서 50°C 정도 까지는 온도변화에 따른 포화도가 크게 감소되었기에 열전도도 값이 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 하지만 50°C 이후는 열전도도 감소폭이 크지 않았다. 또한 완전 건조 후 110°C에서 150°C까지의 열전도도는 1~5% 내외로 큰 변화가 발생하지 않았다. 이는 110°C 이후는 압축 벤토나이트 완충재의 자유수가 제거된 이후 점토 입자 내의 흡착수의 제거량은 크지 않은 것으로 판단되며 110°C 에서 150°C 까지 제거된 수분은 전체 수분의 대략 5~15% 정도를 나타냈다.

3.2 비열 측정 결과

압축 벤토나이트의 열전도도 특성에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있는 반면에 비열에 대한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 하지만 처분시설의 공학적방벽 설계에 있어서 비열 또한 중요한 열적 인자이기에 본 연구에서는 열전도도와 동일한 조건에서 온도 변화에 따라 비열을 측정하였다. 역시, 세 가지 건조밀도 값에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 함수비와 비열 값을 측정하였다. Table 2는 22°C에서 150°C까지 함수비 및 포화도, 그리고 비열 값을 보여주고 있으며 각 단계별 온도의 지속시간은 48시간으로 설정하였다. 열전도도 측정과 같이 이중 탐침을 건조로 내에 설치하여 비열 값을 측정하였다. 열전도도와 마찬가지로 비열 또한 건조밀도와 포화도 값에 비례하는 경향을 보였다. 하지만 상온에서 110°C 까지는 비열 값이 뚜렷이 감소하였으나 110°C 이후 150°C 까지는 반드시 감소하는 경향만을 보이지는 않았다. 이는 일반적으로 물의 열전도도가 공기의 열전도도에 비해 15배 정도 높으나, 비열의 경우 4배 정도 높다보니 열전도도에 비해 비열 값의 변화가 다소 적은 것으로 판단된다.

Table 1. Thermal conductivity vs temperature

Dry density (t/m ³)	Temperature (°C)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Thermal conductivity (W/(m·K))
1.772	22	0.125	0.642	1.0653
	110	0	0	0.7538
	125	0	0	0.7509
	150	0	0	0.7488
1.715	22	0.127	0.594	1.0702
	50	0.051	0.238	0.8918
	75	0.024	0.111	0.7912
	110	0	0	0.7344
	125	0	0	0.7282
	150	0	0	0.7123
1.588	22	0.211	0.801	1.1775
	35	0.137	0.524	0.9244
	50	0.099	0.380	0.8647
	65	0.069	0.265	0.8280
	90	0.019	0.074	0.7684
	110	0	0	0.7345
	125	0	0	0.7205
	150	0	0	0.7053

Table 2. Specific heat capacity vs temperature

Dry density (t/m ³)	Temperature (°C)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Specific heat capacity (kJ/(kg·K))
1.726	22	0.121	0.577	1.490
	70	0.036	0.172	1.192
	110	0	0	1.133
	125	0	0	1.027
	150	0	0	0.930
1.622	22	0.1271	0.5939	1.563
	110	0.0510	0.2384	1.035
	125	0.0238	0.1112	0.844
	150	0	0	0.971
1.528	22	0.1297	0.4544	0.820
	110	0	0	0.697
	125	0	0	0.700
	150	0	0	0.724

3.3 건조상태에서의 열물성 변화

압축 벤토나이트의 완충재는 온도 증가에 따라 포화도가 감소하기에 열전도도와 비열 또한 감소하는 경향을 보였다. 본 단원에서는 포화도가 일정한 상태에서의 온도에 따른 열전도도와 비열 값을 계측하고자 하였다. 포화도를 일정하게 통제하기가 어렵기에 완전 건조시켜 포화도가 0일 때 열전도도와 비열을 측정하였다. Table

Table 3. Thermal properties with respect to temperature variation

Dry density (t/m ³)	Temperature (°C)	Degree of saturation (%)	Thermal conductivity (W/(m·K))
1.734	22	0	0.7148
	50		0.7332
	70		0.7361
	90		0.7402
	110		0.7383
1.588	22	0	0.7330
	50		0.7696
	70		0.7752
	90		0.7254
	110		0.7345
Dry density (t/m ³)	Temperature (°C)	Degree of saturation (%)	Specific heat capacity (kJ/(kg·K))
1.691	22	0	0.956
	50		0.935
	70		0.885
	90		0.917
	110		0.930

3과 Fig. 6은 상온에서 110°C 까지의 온도 변화에 따른 열전도도와 비열 값을 나타내고 있다. 온도에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도와 비열 값은 거의 일정한 것을 알 수 있다. 즉 포화도가 0인 상태에서 자유수가 완전히 제거되었을 때는 수분 함량의 변화가 없기에 전체 압축 벤토나이트 완충재의 열물성에는 거의 차이가 없는 것으로 판단된다. Fig. 1에서의 실제 처분시설의 공학적방벽 구조에서 처분용기와 접해있는 부분은 고온에 따라 완전 건조된 이후 열물성 값은 일정한 값을 나타낼 것으로 생각된다. 또한 자연 암반과 접해있는 벤토나이트 완충재의 경우 암반으로부터의 지하수 유입과 처분 용기로부터 전파되는 열량에 의해 열물성 거동은 복합적으로 변화될 것이기에 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

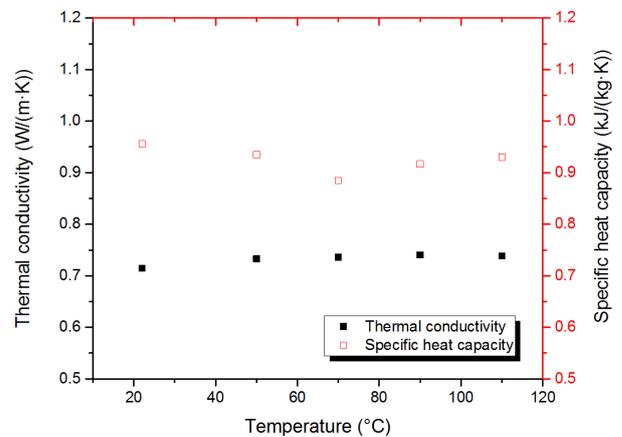


Fig. 6. Variation of thermal properties considering temperature change

4. 결론

사용후핵연료와 같은 고준위폐기물은 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 공학적방벽의 개념에 의해 안전하게 처분되어야 한다. 공학적방벽의 구성요소 중 하나인 완충재는 사용후핵연료를 담고 있는 처분 용기에서 발생하는 고온의 열량을 주변 암반으로 전파하는데 중요한 역할을 하기에 완충재의 열물성은 전체 공학적방벽 설계에 있어서 가장 중요한 인자 중 하나라고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 원자력발전소에서 발생하는 고준위폐기물을 처분하기 위한 심층 처분시스템에서의 압축 벤토나이트 완충재의 온도변화에 따른 열전도도와 비열 값의 변화를 실험적으로 규명하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 국내 경주산 벤토나이트인 KJ-II 분말을 이용하여 건조밀도 $1.6\sim 1.8\text{t/m}^3$ 범위의 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도를 측정하였다. 우선, 압축 벤토나이트 완충재의 설계 온도인 100°C 이하 구간과 최고 150°C 까지 온도 변화에 따라 열전도도를 측정하였으며, 측정 결과 상온에서 50°C 정도까지는 온도변화에 따른 포화도의 감소폭이 크기에 열전도도 값도 이에 비례하여 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 하지만 50°C 이후는 열전도도 감소폭이 크지 않았으며, 특히 완전 건조 후 110°C 에서 150°C 까지의 온도 범위에서 열전도도는 1~5% 내외로 큰 변화가 발생하지 않았다. 이는 110°C 이후는 벤토나이트의 자유수가 제거된 이후 점토 입자 내의 흡착수가 제거될 것인데 이의 제거량이 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 압축 벤토나이트의 열전도도는 건조밀도와 포화도에 비례함을 알 수 있었다.

(2) 또한, 건조밀도 $1.6\sim 1.8\text{t/m}^3$ 사이의 값을 갖는 압축 벤토나이트 완충재의 비열도 측정하였으며, 열전도도와 마찬가지로 비열 또한 건조밀도와 포화도 값에 비례하는 경향을 보였다. 하지만 상온에서 110°C 까지는 비열 값이 뚜렷이 감소하였으나 110°C 이후 150°C 까지는 반드시 감소하는 경향만을 보이지는 않았다. 이는 일반적으로 포화도 및 건조밀도가 열전도도에 미치는 영향은 큰 반면에 비열에 대한 영향은 크지 않은 편은 것으로 판단되며, 특히 110°C 에서 150°C 까지의 구간에서는 증가 혹은 감소와 같은 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다.

(3) 공학적방벽 시스템에서 완충재의 온도는 100°C 이하로 규정하고 있으며 이는 처분공 사이의 간격을 결정짓기에 처분시설의 설계에 결정적인 영향을 끼칠 수 있다. 처분 면적의 감소를 위해 벤토나이트 완충재의 설계 온도에 대한 연구가 필요하며 본 연구에서는 최고 150°C 까지의 범위 내에서 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도와 비열을 측정하였다. 열물성 측면에서 고려해봤을 때, 압축 벤토나이트 완충재의 열물성은 상온에서 110°C 까지의 범위와 달리, $110^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 범위에서는 상대적으로 큰 차이를 보이지는 않았으며 이는 열물성 측면을 고려하였을 때 요구되는 처분면적을 획기적으로 감소시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 기존의 처분장 설계에서 벤토나이트는 100°C 를 넘지 않도록 설계하는데, 150°C 까지 온도를 올렸을 때 비열이나 열전도도에 큰 차이가 나지 않으므로 설계온도를 상향할 여지가 있다. 물론 처분시설에서 완충재는 열-수리-역학적인 복합거동 특성을 보이기에 단순히 열적 거동 특성뿐만 아니라 150°C 에서의 흡착수의 변화, 장기 변질 특성, 그리고 지하화적인 특성 규명 등에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 원자력기술개발사업(NRF-2017M2A8A5014857)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM C1113/C1113M-09, "Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (platinum resistance thermometer technique)", ASTM International.
2. ASTM D2216-10, "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International.
3. Bristow, K. L., White, R. D., and Klutner, G. J. (1994), "Comparison of Single and Dual Probes for Measuring Soil Thermal Properties with Transient Heating", *Australian Journal of Soil Research*, Vol.32, pp.447-467.
4. Cho, W. J., Chun, K. S., Lee, J. O., and Kang, M. J. (1997), "Analysis of Functional Criteria for Buffer Material in the High-level Waste Repository", KAERI/TR-933/97.
5. Cho, W. J. and Kim, G. Y. (2016), "Reconsideration of Thermal Criteria for Korea Spent Fuel Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.88, pp.73-82.

6. Choi, H. J., Kim, K. S., Cho, W. J., Lee, J. O., and Choi, J. W. (2014), "HLW Long-term Management System Development: Development of Engineered Barrier System Performance", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-3859.
7. JNC. (2000), "H12 Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Support Report 2. Japan Nuclear Cycle Development Institute.
8. Karnland, O. (2010), "Chemical and Mineralogical Characterization of the Bentonite Buffer for the Acceptance Control Procedure in a KBS-3 Repository", *Svensk Kärnbränslehantering AB Report*, SKB TR-10-60.
9. Lee, J. O., Cho, W. J., and Kwon, S. (2011), "Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository", *Tunnel and Underground Space*, Vol.21, No. 4, pp.264-273.
10. Lee, J. O., Lee, M. S., Choi, H. J., Lee, J. Y., and Kim, I. Y. (2014), "Establishment of the Concept of Buffer for an HLW Repository: An Approach", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-5824.
11. Lee, J. O., Choi, H. J., and Lee, J. Y. (2016), "Thermal Conductivity of Compacted Bentonite as a Buffer Material for a High-level Radioactive Waste Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 94, pp.848-855.
12. Lee, J. Y., Cho, D. K., Choi, H. J., and Choi, J. W. (2007), "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.44, No.12, pp. 1565-1573.
13. Lee, M. S., Choi, H. J., Lee, J. O., and Lee, J. P. (2013), "Improvement of the Thermal Conductivity of a Compact Bentonite Buffer", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-5311.
14. Madsen, F. T. (1988), "Clay Mineralogical Investigations Related to Nuclear Waste Disposal", *Clay Minerals*, Vol.33, No.1, pp. 109-129.
15. Tang, A. M., Cui, Y. J., and Le, T. T. (2008), "A Study on the Thermal Conductivity of Compacted Bentonite", *Applied Clay Science*, Vol.41, pp.181-189.
16. Villar, M. V., Martin, P. L., and Barcala, J. M. (2006), "Modification of Physical, Mechanical and Hydraulic Properties of Bentonite by Thermo-hydraulic Gradients", *Engineering Geology*, Vol.81, pp. 284-297.
17. Wang, Min., Chen, Y. F., Zhou, Song., Hu, Ran., and Zhou, C. B. (2015), "A Homogenization-based Model for the Effective Thermal Conductivity of Bentonite-sand-based Buffer Material", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp.43-49.
18. Wersin, P., Johnson, L. H., and Snellman, M. (2006), "Impact of Iron Released from Steel Components on the Performance of the Bentonite Buffer: A Preliminary Assessment Within the Framework of the KBS-3H Disposal Concept", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol.932, pp.95-102.
19. Yoo, M., Choi, H. J., Lee, M. S., and Lee, S. Y. (2016), "Measurement of Properties of Domestic Bentonite for a Buffer of an HLW Repository", *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, Vol.14, No.2, pp 135-147.
20. Yoon, S., Lee, S. R., Kim, Y. S., Kim, G. Y., and Kim, K. (2016), "Prediction of Ground Thermal Properties from Thermal Response Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.7, pp.5-14.
21. Yoon S., Lee, M. S., Kim, G. Y., Lee, S. R., and Kim, M. J. (2017), "A Prediction of Thermal Conductivity for Compacted Bentonite Buffer in the High-level Radioactive Waste Repository", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.7, pp. 55-64.

Received : July 26th, 2017

Revised : September 4th, 2017

Accepted : October 11th, 2017