

# 온도 변화를 고려한 압축 벤토나이트 완충재의 수분흡입력 평가

## Evaluation of Water Suction for the Compacted Bentonite Buffer Considering Temperature Variation

윤 석<sup>1</sup> Yoon, Seok      고 규 현<sup>2</sup> Go, Gyu-Hyun  
이 재 완<sup>3</sup> Lee, Jae-Owan      김 건 영<sup>3</sup> Kim, Geon-Young

### Abstract

The compacted bentonite buffer is one of the major components of an engineered barrier system (EBS) for the disposal of high-level radioactive waste (HLW), and it is considered the best candidate for the buffer material. The buffer is located between disposal canisters and near-field rock mass, and it interrupts the release of radionuclide from disposal canisters and protect them from the penetration of groundwater. At initial disposal condition, degree of saturation of the compacted bentonite buffer decreases because of high thermal quantities released from the disposal canisters. However, the degree of saturation of the compacted bentonite buffer gradually increases caused by inflow of groundwater. The saturated and unsaturated behavior of the buffer is a very important input data since it can determine the safety performance of EBS. Therefore, this paper investigated water retention capacity (WRC) for the Korean compacted bentonite buffer. The WRC of the compacted bentonite buffer was derived by measuring volumetric water content and water suction when temperature variation was between 24°C ~ 125°C considering decrease of degree of saturation with respect to temperature increase. The WRC was also derived with the same volumetric water content under the room temperature condition, and it showed 1 ~ 15% larger water suction than high temperature condition.

### 요 지

압축 벤토나이트는 고준위폐기물을 처분하기 위한 공학적방벽 시스템에서 중요한 구성요소 중 하나인 완충재의 후보물질로 가장 적합한 것으로 고려되고 있다. 완충재는 처분공 내 사용후핵연료가 담긴 처분용기와 근계 암반 사이에 채워지는 방벽재로서 지하수 유입으로부터 처분용기를 보호하고, 방사성 핵종 유출을 저지한다. 처분 초기에는 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량으로 인해 완충재의 포화도는 감소하지만, 그 후 주변 암반으로부터 유입되는 지하수로 인해 완충재의 포화도는 증가한다. 이렇듯 완충재는 처분 운영 조건에 따라 불포화에서 포화 상태로 도달하게 되기에 완충재의 불포화-포화 거동 특성은 공학적방벽의 전체 안전성을 좌우할 수 있는 중요한 입력자료이다. 따라서 본 연구에서는 국내 압축 벤토나이트 완충재에 대한 수분보유특성을 규명하고자 하였다. 처분 초기 온도 증가에 따라 완충재의 포화도가 감소하는 상황을 고려하여 상온에서부터 125도까지 압축 벤토나이트의 온도 증가에 따른 체적 함수비와 수분흡입력을 측정하였다. 또한 이를 상온에서 동일한 함수비에서의 수분보유능과 비교하였으며 상온에서의 수분흡입력은 1 ~ 15% 정도 크게 측정되었다.

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, 금오공과대학교 토목공학과 조교수 (Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

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

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

사용후핵연료는 방사선준위가 높은 고준위폐기물로서 천연방벽과 공학적방벽의 다중방벽 개념에 의해 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 처분된다(Cho, 2019). 천연방벽은 고준위폐기물 처분장이 설치되는 자연 암반과 지질환경을 뜻하는 것으로 인간이 인위적으로 통제하거나 조절할 수 없다. 그에 반해 공학적방벽은 사용후핵연료를 안전하게 처분하기 위하여 인위적으로 설치하는 방법으로서 처분용기(Canister), 뒷채움재(Backfill), 완충재(Buffer), 근계영역 암반(Near-Field rock) 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 이 중 완충재는 처분용기와 근계 암반 사이에 채워지는 물질로서 지하수가 처분장 내로 침투하여 처분용기와 접촉하는 것을 막고, 처분용기가 부식 등으로 기능이 상실되어 방사성핵종이 침출될 경우, 방사성핵종들이 주변 암반으로 유출되는 것을 저지하는 역할을 한다(Cho, 2017; JNC, 2000; Villar et al., 2006). 또한 완충재는 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량을 빠르게 소산시켜 처분용기 내에 열이 축적되는 것을 막아야 한다(Cho, 2017; Yoon et al., 2018). 이렇듯

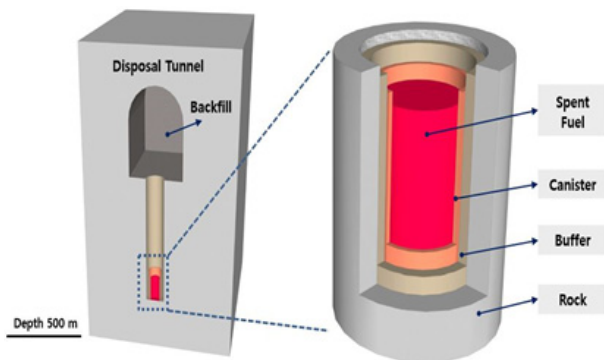


Fig. 1. Concept of engineered barrier system (Yoon et al., 2019)

처분장 설계에 있어서 완충재는 지하수 침투를 억제시키기 위하여 낮은 수리전도도를 가져야 하며, 방사성핵종에 대해 높은 수착능을 가져야 한다. 또한 처분용기로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 효과적으로 발산시키기 위해서는 높은 열전도도를 가져야 하는 등 완충재가 지녀야 할 성능이 정해져 있으며 몬모릴로나이트 광물로 구성된 벤토나이트 점토가 요구 성능을 모두 충족하기에 완충재로 가장 적합한 것으로 알려져 있다(Dixon et al., 1985; Karland, 2010; Lloret et al., 2003; Tang et al., 2008). 몬모릴로나이트는 층간 양이온이 Na<sup>+</sup>인가 Ca<sup>2+</sup>인가에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 구분된다(Cho, 2019). 현재 우리나라의 경우 경주에서 생산되는 Ca형 벤토나이트를 기반으로 연구를 수행하고 있다(Lee et al., 2011; Yoo et al., 2016; Yoon et al., 2018). Table 1은 MX-80으로 불리는 Na형 벤토나이트와 국내 Ca형 경주 벤토나이트의 성능기준을 나타낸다(Lee et al., 2014).

완충재는 설치 후 초기에는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열로 인해 포화도가 감소하지만 시간이 경과하면 주위 암반으로부터 지하수가 침투하여 포화상태에 도달하게 된다(Lee et al., 2017; Lee et al., 2019). 이러한 완충재의 포화 및 불포화 과정은 수분보유곡선(water retention capacity)에 의해 설명될 수 있으며 이는 수분함량에 따른 완충재의 수분흡입력의 척도이다. 완충재의 수분보유특성은 심층처분장 폐쇄 후 완충재에서 발생하는 열-수리-역학적 복합거동 해석을 통한 심층처분장의 안정성 평가에 있어 매우 중요하기 때문에 완충재의 수분보유능에 대해서는 국내외적으로 많은 연구가 수행되어 왔다(Delage et al., 2006; Lee et al., 2011; Nguyen-Tuan, 2014; Villar, 2004; Wan et al., 2015; Ye et al., 2012). 하지만 실제 처분장 초기 운영 조건을 고

Table 1. Functional criteria for the buffer (Lee et al., 2014)

	Na type (Sweden)	Ca type (Korea)
Material	MX-80	KJ
Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	1.59	1.6
Thermal conductivity (W/(m·K))	1.05	>1.0
Hydraulic conductivity (m/s)	<1 x 10 <sup>-12</sup>	<1 x 10 <sup>-12</sup>
Swelling pressure (MPa)	8 (700m depth)	<Hydrostatic pressure + 1.0

려하여 처분용기로부터 발생하는 고온의 붕괴열에 따라 완충재의 포화도가 감소되는 상황에서의 수분보유능에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 처분장에서 완충재의 유력한 후보 물질인 경주 벤토나이트 완충재에 대한 온도 변화에 따른 수분보유특성을 규명하고자 하였다. 처분 초기 운영 조건을 고려하여 초기 불포화 상태에서 온도 증가에 따른 체적함수비와 수분흡입력을 측정 후 상온에서 동일한 함수비에서의 수분흡입력과 비교 분석하였다.

## 2. 수분흡입력 측정

### 2.1 시험 재료

본 연구에서는 (주)클라리엔트코리아에서 생산한 경주 Ca형 벤토나이트를 사용하여 수분보유능 시험을 실시하였다. 국내 Ca형 벤토나이트는 신생대 제3기충군 지역인 한반도 동남쪽의 경주, 울산, 포항 일대에 분포하고 있다. 벤토나이트 분말의 통일분류 결과 고소성 점토인 CH로 분류되었으며, 비중은 2.71, 액성한계와 소성한계는 각각 146.7%, 28.4%였으며(Yoon et al., 2019), Table 2의 광물 조성 분석 결과를 보여준다(Yoon et al., 2018). 본 시험에서 시료는 초기 상태의 벤토나이트 분말을 플로팅 다이(floating die) 방식의 하중을 재하하여 압축 블록 형태로 제작하였다. 플로팅 다이 방식의 하중 재하는 상·하부의 몰드가 동시에 시료에 압력을 가하는 방식으로써, 시료 상부에서 가압을 하되 중간의 플로팅 방식의 성형 몰드가 하부 몰드를 눌러 상·하부가 동시에 시료에 압을 가하여 균질한 밀도의 시료를 성형할 수 있다(Kim et al., 2018; Yoon et al., 2019). 시료 성형에 사용된 금형 사이즈는 415mm × 405mm × 75mm 였으며 2000톤 용량의 프레스를 이용하여 500kg/cm<sup>2</sup> 압력

Table 2. Quantitative XRD analysis for the Korean bentonite powder (Yoon et al., 2018)

Bentonite type	KJ (Ca type)			
	1	2	3	Avg.
Sample No.	1	2	3	Avg.
Montmorillonite	63.4	61.7	60.5	61.9
Albite	19.4	22.8	20.4	20.9
Quartz	5.8	4.9	5.3	5.3
Cristobalite	4.0	4.5	3.7	4.1
Calcite	4.3	3.3	6.8	4.8
Heulandite	3.0	2.7	3.3	3.0

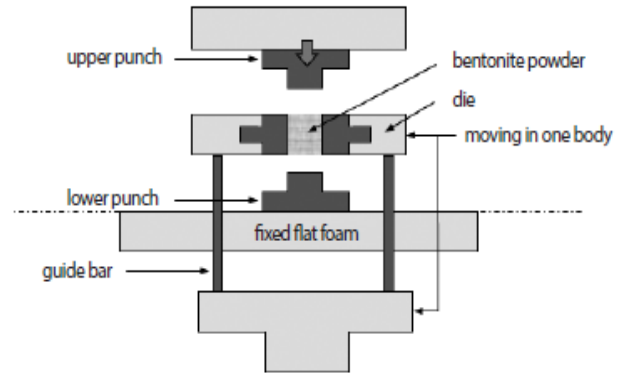


Fig. 2. Principle of floating die press (Kim et al., 2018)

을 적용하여 벤토나이트 분말을 압축하였다(Fig. 2).

완충재의 성능을 충족시키기 위한 건조밀도는 1.6g/cm<sup>3</sup> 이상이기예(Cho, 2019; Yoo et al., 2016) 본 시험에 사용된 압축 벤토나이트의 건조밀도는 여유 있게 1.74g/cm<sup>3</sup> 값으로 제작되었다.

### 2.2 수분흡입력

처분 초기 벤토나이트 완충재는 처분용기로부터 발생하는 열로 인해 불포화상태로 존재하지만 시간이 지날수록 처분용기의 열은 식고 주변 암반으로부터 지하수가 유입되어 재포화가 이루어지는데(Fig. 3), 이 때 지하수가 완충재로 침투되는 과정은 완충재의 수분포텐셜(water potential,  $\psi$ ) 특성에 의존한다. 수분포텐셜은 매질에 함유된 물이 지닌 에너지 수준을 의미하며, 에너지 수준이 높은 지점에서 낮은 지점으로 수분이 이동하면서 에너지 균형을 이루게 된다. 시스템 전체 수분포텐셜( $\psi_t$ )은 다음과 같이 압력포텐셜( $\psi_p$ ), 삼투포텐셜( $\psi_o$ ), 매트릭포텐셜( $\psi_m$ ), 중력포텐셜( $\psi_g$ ) 등으로 구성된다(Cho et al., 2018).

$$\psi_t = \psi_p + \psi_o + \psi_m + \psi_g \quad (1)$$

압력포텐셜은 외부에서 물에 작용하는 압력 때문에 생기는 포텐셜을 뜻하며 팽윤성 점토에 외력이 작용하지 않는 불구속조건인 경우 압력포텐셜은 0이 된다. 삼투포텐셜은 매질 중에 존재하는 이온이나 용질분자에 의한 포텐셜을 뜻하며 중력포텐셜은 중력에 의해 물이 가질 수 있는 에너지이다. 또한 매트릭포텐셜은 완충재 입자에 흡착되거나 공극 내 모세관력에 의해 구속된 수분과 자유수 사이의 에너지 차이에 의해 발생하는 포텐셜이

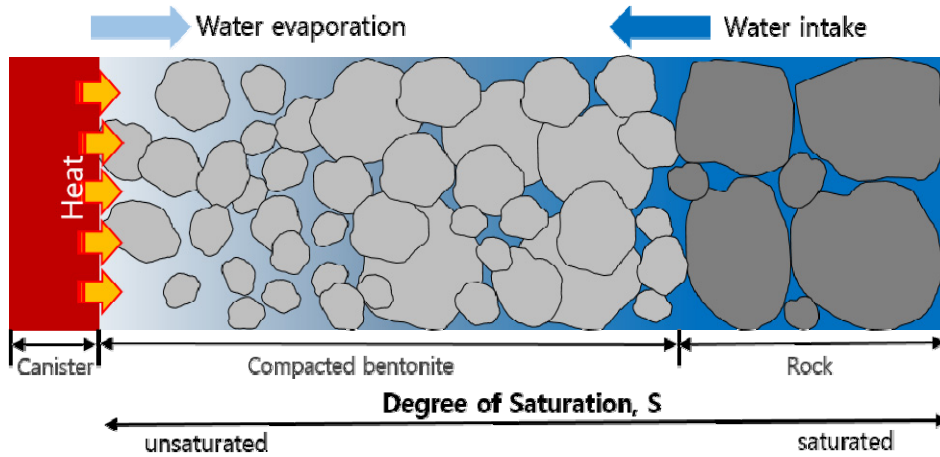


Fig. 3. Unsaturation/saturation process in compacted bentonite

다. 불포화상태의 압축 점토 속 수분은 자유수보다 에너지 상태가 낮아 매트릭포텐셜은 항상 음의 값을 지니지만 완충재가 포화될수록 매트릭포텐셜은 0에 가까워진다. 압축 벤토나이트의 경우, 매트릭포텐셜은 다른 포텐셜에 비해 그 비중이 월등히 커서 전체 수분포텐셜과 매트릭포텐셜이 동일한 의미로 사용된다(Cho et al., 2018). 수분흡입력( $s$ )은 식 (2)와 같이 수분포텐셜의 음수와 같다.

$$s = -\psi_t \quad (2)$$

수분포텐셜을 측정하는 방식은 크게 열전대 건습구 습도계(thermocouple psychrometry)를 이용하는 방식과 정전용량형 고분자박막 습도센서(capacitive thin film polymer humidity sensor)를 이용하는 방식이 있지만, 벤토나이트 완충재의 경우, 고온 고압 환경에서 시스템을 교란시키지 않고 수분포텐셜을 측정할 수 있는 정전용량형 고분자박막 습도센서 방식이 더 널리 사용된다(Lee et al., 2017).

### 2.3 시험 기기

토양을 대상으로 수분흡입력을 측정할 경우 시료에 1.5 MPa까지의 공기압을 가하는 축이동기법(axis translation technique)을 일반적으로 적용하지만, 고준위폐기물처분장에 설치되는 압축 벤토나이트와 같이 큰 수분흡입력을 갖는 시료에는 축이동기법이 적합하지 않아 VE(vapor equilibrium) 방법이 주로 적용되고 있다(Cho, 2018; Lee et al., 2017; Villar, 2004).

따라서 본 연구에서도 VE 방법을 이용하여 벤토나이트의 체적함수비에 따른 수분흡입력을 측정하였다. VE 방법은 시료 공극 내 공극수와 수증기의 수분포텐셜은 평형에 있다고 가정하며 Kelvin의 식 (3)으로부터 압축 벤토나이트의 상대습도( $RH$ )를 측정하여 수분흡입력( $s$ )을 계산한다.

$$s = -\frac{RT}{\nu_w \omega_v} \ln\left(\frac{RH}{100}\right) \quad (3)$$

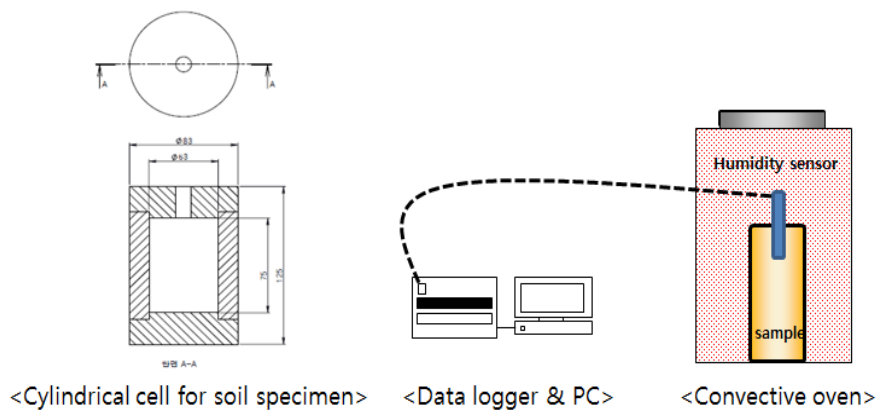


Fig. 4. Experimental apparatus for the VE method

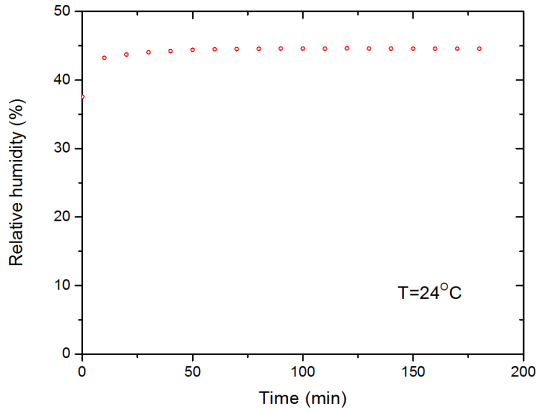
여기서  $R$ 은 기체상수( $8.3143 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ),  $T$ 는 절대온도(K),  $\nu_{w0}$ 는 물의 비체적( $0.001\text{m}^3/\text{kg}$ ),  $\omega_0$ 는 물의 물질량( $18.016 \text{ kg}/\text{Kmol}$ )을 뜻한다(Nguyen-Tuan, 2014). 상대습도 센서는 압축 벤토나이트 시료를 카빙하여 시료 중앙에 설치하였다(Fig. 4). 압축 벤토나이트 시료는 직경 50mm, 높이 70mm의 원기둥 형태로 성형되었으며 상대습도 센서의 크기는 직경 12mm 높이 30mm였다. 온도 조절은 대류식 오븐을 이용하였으며 상온으로 벤

토나이트를 식히는 과정에서 기밀성을 확보하기 위해 스테인레스 스틸 재질의 셀을 이용하였다.

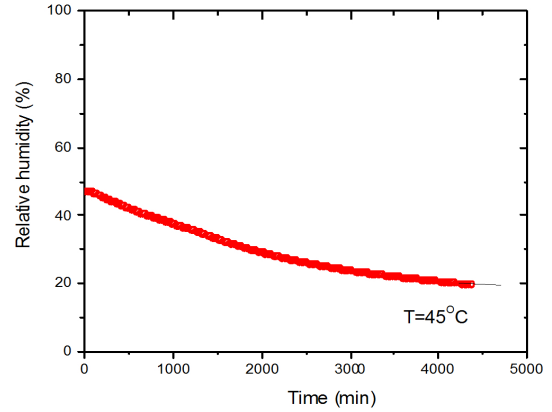
### 3. 시험 결과

#### 3.1 온도에 따른 수분흡입력

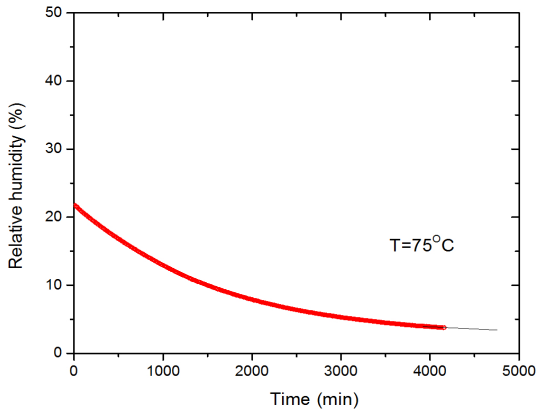
본 실험에서는 압축 벤토나이트의 온도에서의 체적



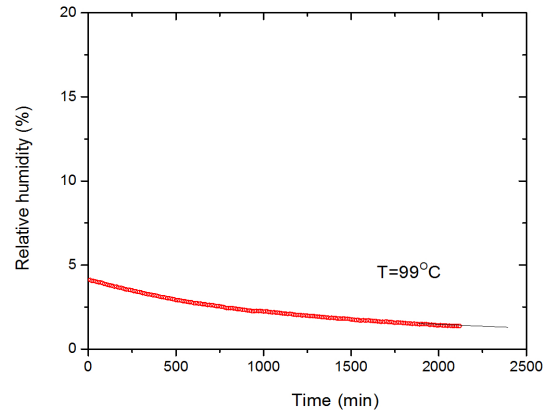
(a) Relative humidity variation when temperature is 24°C



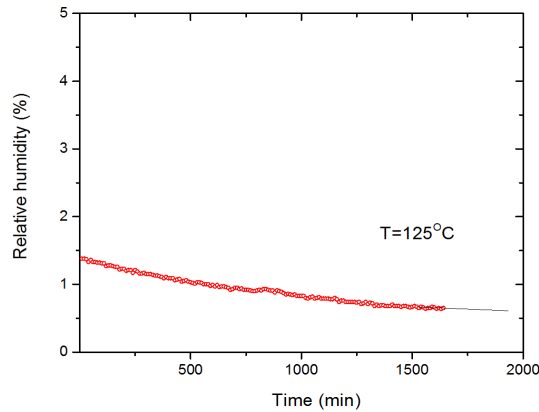
(b) Relative humidity variation when temperature is 45°C



(c) Relative humidity variation when temperature is 75°C



(d) Relative humidity variation when temperature is 99°C



(e) Relative humidity variation when temperature is 125°C

Fig. 5. Relative humidity variation under the constant temperature

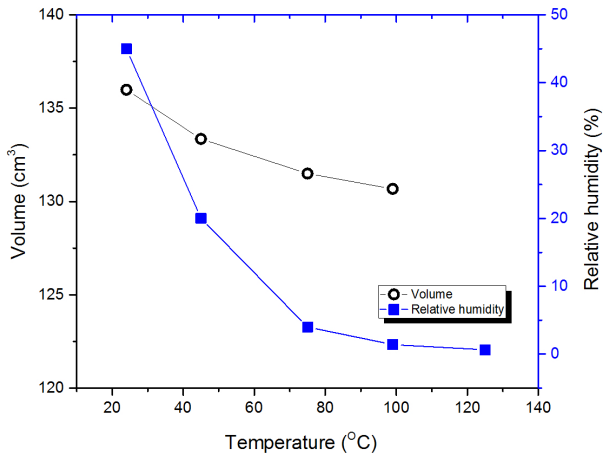


Fig. 6. Relative humidity and volume change with respect to temperature increase

함수비에 따른 상대습도를 측정하여 수분흡입력을 도출하였다. 시험에 사용된 압축 벤토나이트의 초기 중량 함수비는 12%, 초기 체적 함수비는 21%, 초기 상대습도는 45%, 초기 온도는 24도였으며 식 (3)을 이용한 초기 수분흡입력은 107MPa로 계산되었다. 우선 초기 상태에서 온도를 증가시키며 45도, 75도, 99도, 125도에 따라 상대습도를 측정하였다. Fig. 5와 같이 상온 24도를 제외하면 승온 후 대략 30시간에서 75시간 사이 상대습도가 일정하게 수렴하는 것으로 나타났으며 이때의 상대습도 값을 식 (2)에 대입하여 수분흡입력으로 환산하였다. 온도가 증가할수록 벤토나이트의 수분이 증발되기에 함수비는 감소하였으며, 이에 따라 수분흡입력은 증가하였다. 특히 99도에서는 체적함수비가 0.2%였으며, 이는 흙의 함수비를 측정하기 위한 건조로의 온도는  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  이기에 110도 근방에서는 함수비가 거의 0에 수렴하였다. Fig. 6은 온도에 따른 압축 벤토나이트의 체적변화량과 상대습도 값을 나타내고 있으며 상온에서 75도까지는 상대습도가 급격하게 감소하였으며 그 이후 거의 0에 가까워지는 경향을 보였다.

Table 4. Experimental results for Case 1 and Case 2

Temperature (°C)	Gravimetric water content	Volumetric water content	Suction (MPa)	
			Case 1	Case 2
24	0.119424	0.207522	106.8	106.8
50	0.063394	0.112337	233	230.5
75	0.031316	0.056276	469.6	454.1
99	0.0011	0.00199	819.2	729.8

### 3.2 상온에서의 수분흡입력

본 절에서는 각 온도 구간에서의 시료를 상온으로 식힌 후 동일한 함수비에서의 상대습도를 측정하였다. 3.1 절의 연속적으로 승온을 고려한 경우를 case 2로 지칭하였으며, 3.2절의 상온에서의 경우를 case 1로 정의하였다(Table 3). 즉 case 1과 case 2는 동일한 함수비에서 온도만 다른 조건을 나타낸다. Fig. 7과 Table 4에서와 같이 상온에서의 수분흡입력(Case 1)은 온도를 고려했을 때(Case 2)보다 약 1~15% 정도 크게 측정되었다. 이는 온도가 증가하면 벤토나이트 층간에 존재하던 물이 벤토나이트 집합체 사이의 거대 공극으로 이동하며 벤토나이트의 전체 포화도를 증가시키게 된다(Cho, 2018; Ma and Hueckel, 1992; Villar and Lloret, 2004). 따라서

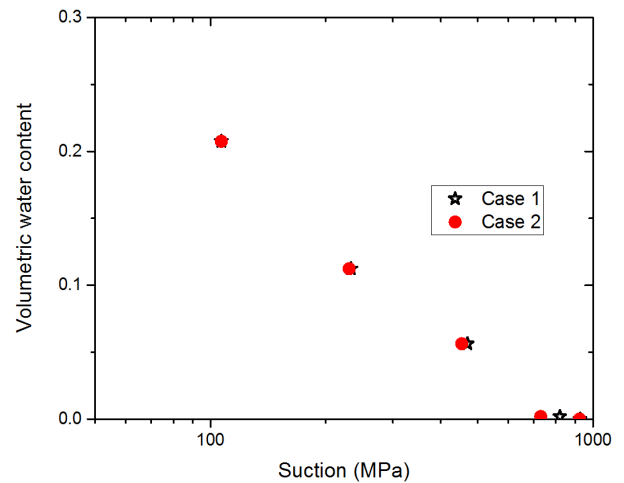


Fig. 7. Water capacity between Case 1 and Case 2

Table 3. Experimental case for measuring water retention capacity

	Experimental procedure
Case 1	1) Keep the sample from case 2 at room temperature 2) Measurement of relative humidity at room temperature
Case 2	1) Steady increase of temperature (real repository condition) 2) Measurement of relative humidity at each temperature

동일한 함수비일 때 온도가 증가하면 수분흡입력은 감소하게 된 것으로 파악된다. 온도가 고온일수록 흡입력 차이는 좀 더 크게 발생하였으나 전체적으로 Case 1과 Case 2의 수분흡입력 거동은 상당히 비슷한 경향을 나타냈다. 처분 초기 운영조건을 고려한 고온의 열량에 따른 벤토나이트의 함수비 감소를 고려한 수분흡입력 거동은 상온과는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

고준위폐기물은 공학적방벽과 자연방벽의 개념에 의해 심지층에 안전하게 처분되어야 한다. 공학적방벽의 구성요소 중 하나인 완충재는 주변 암반으로부터 유입되는 지하수가 처분용기에 접촉되는 것을 막고, 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량을 빠르게 소산시키는 역할을 하기에 완충재의 포화 및 불포화 거동은 전체 공학적방벽의 안전성을 평가하는데 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 본 논문에서는 처분 운영 초기 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량이 완충재의 포화도와 수분흡입력에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 국내 경주산 벤토나이트 분말을 플로팅 다이 방식의 하중 재하를 통하여 직경 50mm, 높이 70mm의 건조밀도 1.74g/cm<sup>3</sup>의 압축 벤토나이트 시료를 성형하였다. 압축 벤토나이트의 수분흡입력은 VE 방법을 통하여 상대습도를 계측한 후 Kelvin 식으로부터 도출하였다. 우선 온도 증가에 따른 압축 벤토나이트의 수분흡입력 거동을 분석하기 위하여 상온, 45도, 75도, 99도, 125도에서 상대습도를 계측하였다. 각 온도 단계별 대략 30시간에서 75시간쯤에 상대습도가 일정하게 수렴하였다. 온도가 증가할수록 압축 벤토나이트의 최적함수비와 상대밀도는 감소하였으며 이에 따라 수분흡입력은 증가하였다. 초기 상태에서 125도까지의 압축 벤토나이트의 상대습도는 45%에서 0.6% 근방까지 감소하였다.
- (2) 두 번째로 각 온도 구간에서의 시료를 상온으로 식힌 후 동일한 함수비에서 상대습도를 계측하여 수분흡입력을 도출하였다. 상온에서의 수분흡입력은 온도를 고려했을 때보다 1~15% 크게 도출되었다. 이는 벤토나이트의 수분흡입력은 온도가 증가하면 벤토나이트 입자 간 공극에 흡착수가 이동하면서

포화도가 증가한 것으로 사료된다. 하지만 온도를 고려한 경우와 비교했을 때 압축 벤토나이트의 전반적인 수분흡입력 거동에는 큰 차이를 보이지는 않았다.

- (3) 처분 운영 초기 온도 증가에 따른 포화도 감소를 고려한 압축 벤토나이트의 수분흡입력 거동은 상온에서의 수분흡입력과는 큰 차이를 나타내지는 않았기에 처분 초기 완충재의 건조 과정에 따른 함수특성 곡선은 상온에서의 실험 결과를 적용해도 무방할 것으로 사료된다. 하지만 그 이후 주변 암반으로부터 유입되는 지하수로 인해 완충재의 포화도는 증가할 것이며 처분용기로부터는 계속해서 붕괴열이 발생되기에 온도에 따른 완충재의 포화도가 일정한 조건에서의 수분흡입력 규명 및 함수특성곡선에 관한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 아울러 다양한 시료의 크기, 밀도 등을 추가로 고려해야 할 것이며 동일한 시험 조건에서 해외에서 생산되는 Na형 벤토나이트와의 비교 분석을 통한 고찰도 필요할 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌 (References)

1. Cho, W. J. (2017), "Radioactive waste disposal", KAERI/GP-495/2017.
2. Cho, W. J. (2019), "Bentonite barrier material for radioactive waste disposal", KAERI/GP-535/2019.
3. Cho, W. J., Kim, J. S., Yoon, S., and Kim, G. Y. (2018), "Estimation of the water suction and swelling pressure of compacted bentonite at elevated temperature", KAERI/TR-7334/2018.
4. Delage, P., Maarcial, D., Cui, Y. J., and Ruiz, X. (2006), "Ageing Effects in a Compacted Bointe: a Microstructure Approach", *Geotechnique*, Vol.56, No.5, pp.291-304.
5. Dixon, D. A., Gray, M. N., and Thomas, A. W. (1985), "A Study of the Compaction Properties of Potential Clay-sand Buffer Mixtures for Use in Nuclear Fuel Waste Disposal", *Engineering Geology*, Vol.21, pp.247-255.
6. 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.
7. JNC. (2000), "H12 project to establish technical basis for HLW disposal in Japan, Suport Report 2. Japan Nuclear Cycle Develop-

- ment 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. Kim, J. S., Yoon, S., Cho, W. J., Choi, Y. C., and Kim, G. Y. (2018), "A Study on the Manufacturing Characteristics and Field Applicability of Engineering-scale Bentonite Buffer in a High-level Nuclear Waste Repository", *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technology*, Vol.16, No.1, pp.123-136.
  10. Lee, C., Cho, W. J., Lee, J., and Kim, G. Y. (2019), "Numerical Analysis of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical (THM) Behavior at Korean Reference Disposal System (KRS) Using TOUGH2-MP/FLAC3D Simulator", *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technology*, Vol.17, No.2, pp.183-202.
  11. 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.
  12. Lee, J. O., Kim, G. Y., and Yoon, S. (2017), "System planning for measuring coupled THM properties of buffer: SWRC measurement of unsaturated compacted bentonite, KAERI/TR-7009/2017.
  13. 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", KAERI/TR-5824/2014.
  14. 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.
  15. Lloret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., and Alonso, E. E. (2003), "Mechanical behavior of Heavily Compacted Bentonite under High Suction Changes", *Geotechnique*, Vol.53, pp.27-40.
  16. Ma, C. and Hueckel, T. (1992), "Stress and Pore Pressure in Saturated Clay Subject to Heat from Radioactive Waste: a Numerical Simulation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, pp.1087-1094.
  17. Nguyen-Tuan, L. (2014), "Coupled thermo-hydro-mechanical analysis: experiment and back analysis", Ph.D Thesis, Ruhr-Universität Bochum.
  18. 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.
  19. Villar, M. V. (2004), "Thermo-hydro-mechanical characterization and process in the clay barrier of a high level radioactive waste repository", State of the Art Report. Informes Técnicos Ciemat 1044, Octubre.
  20. Villar, M. V. and Lloret, A. (2004), "Influence of Temperature on the Hydro-mechanical behavior of a Compacted Bentonite", *Applied Clay Science*, Vol.26, pp.337-350.
  21. Villar, M. V., Martín, 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.
  22. Wan, M., Ye, W. M., Chen, Y. G., Cui, Y. J., and Wang, J. (2015), "Influence of Temperature on the Water Retention Properties of Compacted GMZ01 Bentonite", *Environmental Earth Science*, Vol.73, pp.4053-4061.
  23. Ye, W. M., Wan, W., Chen, B., Chen, Y. G., Cui, Y. J., and Wang, J. (2012), "Temperature Effects on the Unsaturated Permeability of the Densely Compacted GMZ201 Bentonite under Confined Condition", *Engineering Geology*, Vol.126, pp.1-7.
  24. 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 Nuclear Fuel Cycle Waste Technology*, Vol.14, No.2, pp.135-147.
  25. Yoon S., Cho, W., Lee, C., and Kim, G. Y. (2018), "Thermal Conductivity of Korean Compacted Bentonite Buffer Materials for a Nuclear Waste Repository", *Energies*, Vol.11, pp.2269.
  26. Yoon, S., Jeon, J. S., Kim, G. Y., Seong, J. H., and Baik, M. H. (2019), "Specific Heat Capacity Model for Compacted Bentonite Buffer Materials", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.125, pp.18-25.

Received : May 24<sup>th</sup>, 2019  
 Revised : September 24<sup>th</sup>, 2019  
 Accepted : October 28<sup>th</sup>, 2019