

Evaluation of Soil-Water Characteristic Curve for Domestic Bentonite Buffer

국내 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선 평가

Seok Yoon^{1,*}, Jun-Seo Jeon², Changsoo Lee¹, Won-Jin Cho¹, Seung-Rae Lee², and Geon-Young Kim¹

¹Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daehakro 291, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

윤석^{1,*}, 전준서², 이창수¹, 조원진¹, 이승래², 김건영¹

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

²한국과학기술원, 대전광역시 유성구 대학로 291

(Received October 12, 2018 / Revised November 26, 2018 / Approved January 21, 2019)

High-level radioactive waste (HLW) such as spent fuel is inevitably produced when nuclear power plants are operated. A geological repository has been considered as one of the most adequate options for the disposal of HLW, and it will be constructed in host rock at a depth of 500~1,000 meters below ground level with the concept of an engineered barrier system (EBS) and a natural barrier system. The compacted bentonite buffer is one of the most important components of the EBS. As the compacted bentonite buffer is located between disposal canisters with spent fuel and the host rock, it can restrain the release of radionuclides and protect canisters from the inflow of groundwater. Because of inflow of groundwater into the compacted bentonite buffer, it is essential to investigate soil-water characteristic curves (SWCC) of the compacted bentonite buffer in order to evaluate the entire safety performance of the EBS. Therefore, this paper conducted laboratory experiments to analyze the SWCC for a Korean Ca-type compacted bentonite buffer considering dry density, confined or unconfined condition, and drying or wetting path. There was no significant difference of SWCC considering dry density under unconfined condition. Furthermore, it was found that there was higher water suction in unconfined condition than in confined condition, and higher water suction during drying path than during wetting path.

Keywords: Engineered barrier system, Compacted bentonite buffer, Soil-water characteristic curve

* Corresponding Author.

Seok Yoon, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: syoon@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2946

ORCID

Seok Yoon <http://orcid.org/0000-0001-7388-7501>

Changsoo Lee <http://orcid.org/0000-0002-3839-1348>

Seung-Rae Lee <http://orcid.org/0000-0003-0247-5512>

Jun-Seo Jeon <http://orcid.org/0000-0001-5193-7184>

Won-Jin Cho <http://orcid.org/0000-0003-3063-9334>

Geon-Young Kim <http://orcid.org/0000-0001-5502-178X>

원자력발전소를 운영하게 되면 사용후핵연료와 같은 고준위방사성폐기물이 필연적으로 발생한다. 이러한 고준위방사성폐기물을 처분하기 위해 심층처분방식이 가장 적합한 대안으로 알려져 있으며 고준위방사성폐기물은 공학적방벽과 천연방벽에 둘러 쌓여 지하 500~1,000 m 깊이의 심지층에 처분된다. 이 중 압축 벤토나이트 완충재는 공학적방벽의 가장 중요한 구성요소이다. 완충재는 처분용기와 자연 암반 사이에 위치해 있기에 주변 지하수 흐름으로부터 처분용기를 보호하고 처분용기로부터 핵종이 유출되는 것을 저지하는 역할을 한다. 주변 지하수 흐름으로 인한 완충재의 불포화 함수특성 규명은 전체 공학적방벽의 성능을 평가하는데 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실내 시험을 수행하여 국내 압축 벤토나이트 완충재의 건조밀도, 구속조건 여부, 그리고 건조 및 포화 이력에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선을 도출하여 분석하였다. 구속 조건하에서 건조밀도에 따른 함수특성곡선은 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 비구속 조건이 구속 조건에 비해 보다 큰 수분흡입력을 나타냈으며, 아울러 포화 과정보다 건조 과정에서 보다 큰 수분흡입력이 측정되었다.

중심단어: 공학적방벽, 압축 벤토나이트 완충재, 함수특성곡선

1. 서론

사용후핵연료와 같은 고준위방사성폐기물을 처분하기 위해서는 심층처분방식이 하나의 대안으로 고려될 수 있다. 고준위방사성폐기물은 지하 500~1,000 m 깊이의 심층처분장에 다중방벽(공학적방벽과 천연방벽) 개념에 의해 안전하게 처분되어야 한다. 이 중 공학적방벽은 처분시스템의 안전성을 향상하기 위하여 인간이 인위적으로 개발한 방벽으로써 처분용기(canister), 뒷채움재(backfill), 완충재(buffer), 근계영역 암반(near-field rock) 등으로 구성되어 있다[1]. 이 중 완충재는 몬토릴로나이트로 구성된 벤토나이트 점토 광물이 완충재가 지녀야 할 주요 요구 사항을 충족 시키기에 완충재로써 최적의 후보재료로 고려되고 있다[2]. 벤토나이트는 실리카 4면체 2개층과 8면체 알루미늄산화물 1개 층이 2:1의 판상구조를 이루고 있으며, 이러한 판과 판 사이에 존재하는 교환성 양이온의 종류에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 구분되며, 우리나라의 경우 경주 광산에서 Ca형 벤토나이트가 생산되고 있다.

심층처분장이 폐쇄되면, 주변 암반으로부터 지하수가 벤토나이트 완충재로 침투할 것이다. 처분장 폐쇄 후, 초기에는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열로 인해 벤토나이트 완충재가 불포화 상태에 있으며 그 후 지하수가 스며들면서 완충재는 포화상태에 도달하게 된다[3]. 이러한 완충재의 불포화 및 포화 과정은 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)에 의해 설명될 수 있으며 이는 수분함량에 따른

불포화 완충재의 수분흡수력의 척도이다[3, 4]. 이러한 함수특성곡선에 관하여 일반 토양에 대해서는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 왔으나 처분장의 압축 벤토나이트 완충재에 대해서는 상대적으로 연구가 미진한 상황이다. 스웨덴, 핀란드, 스페인 등의 처분 선도 국가를 중심으로 자국 벤토나이트에 국한되어 연구가 수행되어 왔으며[5-9], 우리나라의 경우 Lee et al. (2011) [10] 이외에는 거의 수행된 적이 없다(Table 1). Lee et al. (2011) [10]은 구속 조건에서 국내 Ca형 벤토나이트 완충재의 포화도에 따른 수분흡입력을 측정하여 함수특성곡선을 도출하였다. 실제 처분장의 공학적방벽 구성요소의 열-수리-역학 거동은 매우 복잡하게 발생할

Table 1. Previous researches for the SWCC

Bentonite type	Considering factors
FEBEX (Ca-type) [6]	<ul style="list-style-type: none"> · Confined and unconfined condition · Dry density · Temperature variation · Historical path (wetting path and drying path)
MX-80 (Na-type) [7,8]	<ul style="list-style-type: none"> · Dry density · Temperature variation · Historical path (wetting path and drying path)
GMZ (Na-type) [9]	<ul style="list-style-type: none"> · Confined and unconfined condition · Temperature variation · Historical path (wetting path and drying path)
Gyeongju (Ca-type) [10]	<ul style="list-style-type: none"> · Dry density · Temperature variation



Fig. 1. WP4C equipment for measuring SWCC.

것이다. 특히 처분용기로부터 발생하는 붕괴열과 주변 압반에서 유입되는 지하수는 벤토나이트 완충재에 직접적으로 영향을 끼치게 되기에 압축 벤토나이트 완충재의 건조 및 포화 과정에 따른 불포화 수분 특성은 전체 공학적방벽의 성능과 안전성 평가에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러므로 실제 처분장에서 발생될 수 있는 다양한 처분 환경에 대비하기 위해서는 완충재의 건조 및 포화 이력, 구속 조건 여부, 건조밀도 등과 같은 다양한 요인들에 대한 완충재의 함수특성곡선에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내의 고준위폐기물 심층처분장 완충재의 주요 후보물질인 경주 Ca형 벤토나이트의 함수특성곡선을 실내 시험을 통해 도출하였으며, 압축 벤토나이트 완충재의 건조밀도, 구속조건 여부, 그리고 건조 및 포화 이력에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 수분흡입력 특성을 분석하였다.

2. 실내 함수특성곡선 시험

2.1 시험 재료

본 연구에서는 경주시 감포읍 광산에서 (주)클라리온트 코리아에서 생산한 Ca형 경주 벤토나이트를 이용하여 함수특성곡선 시험을 수행하였다. Ca형 국내 벤토나이트는 신생대 제3기충군 지역인 한반도 동남쪽의 경주, 울산, 포항 일대에 분포하고 있다. 국내 Ca형 벤토나이트 분말의 통일 분류 결과 고소성 점토인 CH로 분류되었으며 비중은 2.71,

액성한계와 소성한계는 각각 146.7%, 28.4%였으며 소성지수는 118.3%이었다[1]. 통일분류법(unified soil classification system)은 흙을 입자크기와 입도분포 등의 기준으로 분류하는 체계를 뜻한다[11]. 또한 화학적 조성 분석 결과 SiO₂가 약 60%, Al₂O₃가 약 15%를 차지하였고, CaO는 NaO보다 약 5~6배 높은 구성비율을 나타냈다[12]. 또한 광물 조성 분석 결과 몬모릴로나이트는 약 60%, 장석 약 20%, 석영은 약 5%의 구성비율을 가졌다[13]. 본 시험에서는 벤토나이트 분말을 플로팅 다이(floating die) 방식의 하중을 재하하여 다양한 밀도의 블록으로 시료를 제작하였다. 플로팅 다이 방식의 하중 재하는 상·하부의 몰드가 동시에 시료에 압을 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[14].

2.2 시험 기기

압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선을 도출하기 위해 WP4C (Decagon Devices, Inc) 장비를 이용하여 압축 벤토나이트 완충재의 수분함량곡선을 측정하였다(Fig. 1). WP4C 장비는 식 (1)과 같이 시료 내의 물의 압력과 시료가 담긴 챔버 내의 수증기 압력이 평형상태에 도달했을 때 상대습도(P/P_0)를 측정하여 시료의 수분흡수력(ψ)을 측정하는 원리에 기반을 두고 있다[15].

$$\psi = \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

여기서 P는 증기압을 나타내며, P₀는 포화수증기압을 뜻한다. 또한 R은 기체상수, T는 절대온도, M은 물의 몰체적을 뜻한다. WP4C 장비는 냉각거울 이슬점 온도 응결 원리에 입각하여 챔버 내에 공기가 냉각거울을 지나면 거울 표면에 이슬이 맺히고, 이 때 광 검출기는 거울에서 반사된 빛으로 응결수의 존재를 감지한다. 챔버 내 시료 온도, 이슬점에서의 포화수증기압, 그리고 공기의 증기압이 측정되며 이를 바탕으로 시료의 수분흡수력은 식 (1)을 이용하여 도출될 수 있다. 함수특성곡선을 도출하기 위하여 압축 벤토나이트를 물이 들어 있는 항온 챔버에 넣고 일정 시간이 경과된 후에 함수비와 수분흡입력을 측정하였다.

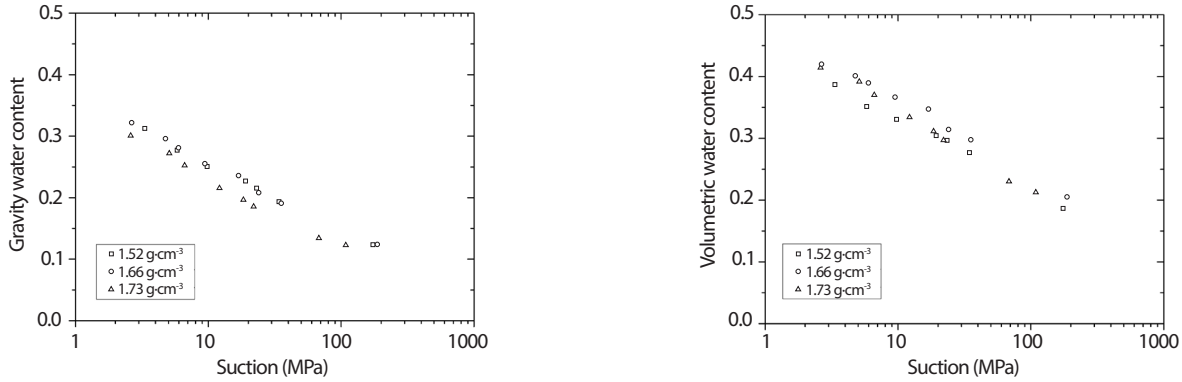


Fig. 2. SWCC for the Korean bentonite in an unconfined condition.

2.3 함수특성곡선 이론

불포화매질의 함수특성곡선은 수분흡입력과 수분함량의 관계를 나타내는 곡선으로, 토양이 수분을 흡수하고 저장하는 정도를 나타낸다[4]. 수분흡입력은 크게 압력포텐셜, 삼투포텐셜, 중력포텐셜, 그리고 매트릭포텐셜로 구성되며, 압축 벤토나이트에서는 매트릭포텐셜이 주를 이루고 있다. 압력포텐셜(pressure potential)은 외부에서 물에 작용하는 압력 때문에 생기는 포텐셜이며 압력이며, 삼투포텐셜(osmotic potential)은 매질 중에 존재하는 이온이나 용질분자에 의한 포텐셜을 뜻한다[3]. 또한 중력포텐셜(gravimetric potential)은 중력의 작용에 의해 물이 가질 수 있는 에너지이다[3]. 매트릭포텐셜(matric potential)은 자유수와 벤토나이트 흡입력에 의해 구속된 물의 에너지 차이에 의해 생기는 포텐셜로써, 매트릭포텐셜은 점토입자 사이의 거리와 관계가 있는 모세관력(capillary force)과 점토 표면의 화학조성과 관련된 흡착력(adsorptive force)으로 구성되는데, 압축점토에서는 모세관력이 주를 이룬다. 토양에서의 함수특성곡선을 모사하기 위해 다양한 모델들이 제안되었으며 그 중 식 (2)와 같은 van Genuchten [16] 모델이 압축 벤토나이트 완충재에 가장 널리 적용되고 있다[3,6,8].

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+(ah)^n} \right]^m \quad (2)$$

여기서 h 는 압력수두, a , n , m 는 맞춤계수로써 함수특성곡선 시험값을 통한 맞춤으로 구할 수 있다. 그리고 Θ 는 무차원의 값으로 정규화된 체적함수비를 나타내며, 현재

체적함수비(θ)와 잔류 체적함수비(θ_r) 차이에 대한 포화 체적함수비(θ_s)와 잔류체적함수비 차이의 비에 의해 계산된다(식 (3)).

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

단한 형태의 상대수리전도도 방정식을 유도하기 위해 Mualem (1976) [17]이 제시한 $m=1-1/n$ 의 관계식과 식 (2)와 (3)을 이용하면 체적함수비는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1+(ah)^n]^{1-1/n}} \quad (4)$$

3. 시험 결과

3.1 비구속 조건

우선 세가지 건조밀도(1.52 g·cm⁻³, 1.66 g·cm⁻³, 1.73 g·cm⁻³)의 압축 벤토나이트 시료를 제작하였으며, 25℃의 비구속 조건 하에서 시료의 함수비를 증가시키며 수분흡입력을 측정하였다(Fig. 2). 수분함량이 증가할수록 압축 벤토나이트는 팽창하였으며 초기 건조밀도가 클수록 팽창률이 증가하는 경향을 보였다. 이는 압축 벤토나이트의 팽윤압이 건조밀도에 비례하기 때문에, 건조밀도가 클수록 벤토나이트의 팽윤성도 큰 것으로 추정된다. 또한 동일한 수분흡입력에서 초기 건조밀도가 클수록 벤토나이트의 함수비는

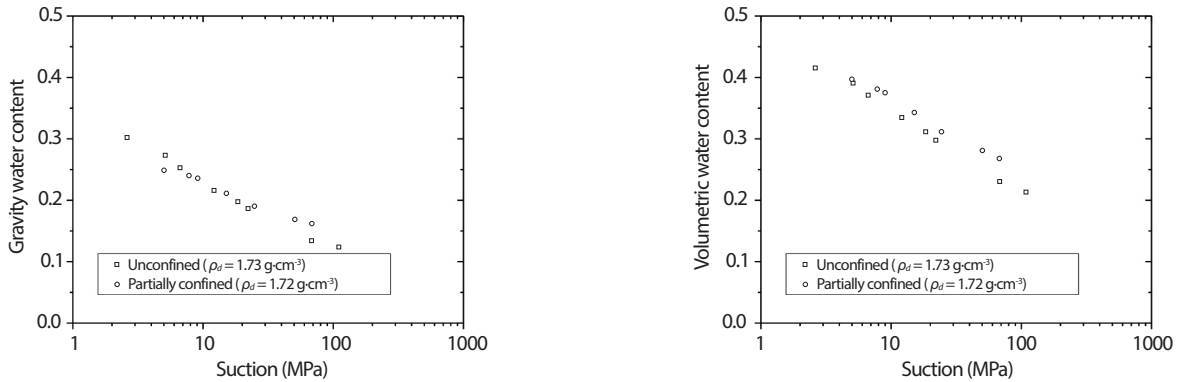


Fig. 3. Comparison of SWCC in unconfined and partially confined conditions.

대체적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 건조밀도가 클수록 간극비가 감소하기 때문에, 수분을 함유할 수 있는 능력이 감소하는 큰 것으로 생각된다. 하지만 비구속 조건하에서 건조밀도에 따른 함수특성곡선들은 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다.

3.2 부분 구속 조건

실제 고준위폐기물 심층처분장에서는 처분용기와 완충재 사이, 완충재와 자연암반 사이에는 작업의 편의성 때문에 빈 공간이 생성된다[18]. 따라서 이를 고려하여 초기에는 비구속 조건하에서 시료의 함수비를 증가시키며 시료가 수직방향으로 자유롭게 팽창할 수 있도록 하였으며, 그 후에는 구속 조건하에서 함수비를 증가시켰다. 구속 조건하에서는 원기둥 형태의 시료를 철제 금형에 고정시킨 후 금형 내부로 물을 침투시켜 시료의 부피 팽창을 억제하였다. 부분 구속 조건에 사용된 압축 벤토나이트의 초기 건조밀도는 $1.72 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 였으며 중량함수비는 16%였다. 비구속 조건(초기 건조밀도: $1.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)과 부분 구속 조건에서 측정된 압축벤토나이트의 함수특성곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 수분흡입력이 10 MPa 이상의 범위에서는 함수특성곡선들 사이에 큰 차이가 없었으나 수분흡입력이 10 MPa 이하에서는 비구속 조건에서 측정된 수분흡입력이 부분 구속 조건에서 측정된 값에 비해 약간 크게 나타났다. 이는 수분흡입력이 감소할수록 벤토나이트의 포화도가 증가하므로, 팽창이 상대적으로 더 자유로운 비구속 조건에서 수분을 흡수하는 경향이 크게 나타나는 파악된다. Villar and Lloret (2004)

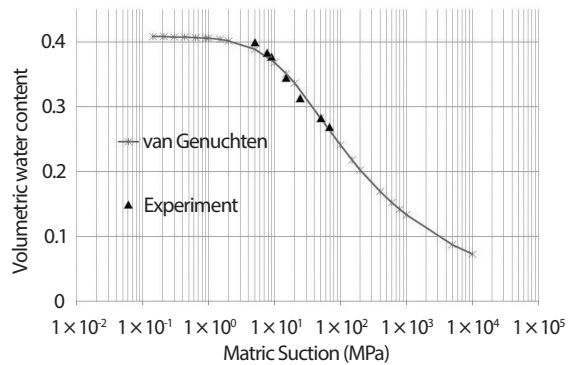


Fig. 4. Fitting curve of van Genuchten model.

[6]도 FEBEX 벤토나이트의 함수특성곡선에 대해 유사한 연구결과를 보고한 바 있다. Fig. 4는 부분 구속 조건의 포화 과정에서의 시험값과 van Genuchten 모델의 함수특성곡선을 보여주고 있다.

3.3 건조 및 습윤 과정

고준위폐기물 심층처분장에서는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열로 인해 초기 벤토나이트 완충재는 초기에는 건조되다가, 그 후에는 주변 암반으로부터 침투하는 지하수로 포화되는 과정을 거치게 될 것이다. 따라서 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선은 포화 과정의 함수특성곡선뿐만 아니라 건조 과정의 함수특성곡선도 규명할 필요가 있다. 건조 과정의 경우에는 수분이 빠져나가면서 압축 벤토나이트가 수축이 되기 때문에 부피를 일정하게 유지하는

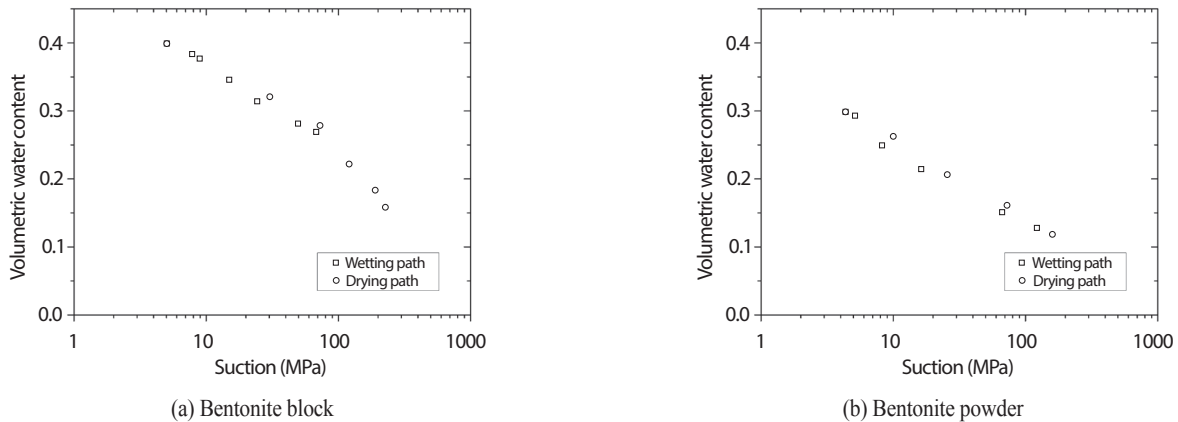


Fig. 5. SWCC for a drying and wetting path.

구속 조건에서의 함수특성곡선을 측정하는 것은 불가능하다[8]. Fig. 5(a)는 Fig. 3의 부분 구속 조건하에서 포화된 압축 벤토나이트를 건조시키면서 측정한 함수특성곡선을 나타낸 것이며, Fig. 5(b)는 벤토나이트 분말에 대해 측정한 포화 및 건조 과정에서의 함수특성곡선이다. 시험 결과, 건조 과정에서의 수분흡입력은 포화 과정에서의 수분흡입력보다 약 20~30% 크게 나타났다. 이러한 이력현상(hysteresis)은 벤토나이트 공극의 불균일성과 이로 인한 물과 벤토나이트 공극의 접촉각 변화, 벤토나이트의 수축 또는 팽창으로 인한 구조 변화 등 다양한 원인으로부터 비롯되는 것으로 알려져 있다[19]. 이는 건조 과정에서는 물과 입자의 접촉각이 작아 이에 따른 수분흡입력도 큰 것으로 파악된다 [20,21]. 부분 구속 조건에서의 포화 과정에서 측정한 함수특성곡선 시험 결과를 이용하여 식 (4)의 van Genuchten 모델의 인자 α , n 의 값을 산정한 결과, α 는 0.082, n 은 1.256이었으며, 건조과정에서의 α , n 값은 α 는 0.033, n 은 1.448로 도출되었다(Table 2).

4. 결론

본 연구에서는 고준위폐기물을 처분하기 위한 공학적 방법의 가장 중요한 구성 요소 중 하나인 압축벤토나이트 완충재의 함수특성곡선을 평가하였다. 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량과 주변 암반으로부터 유입되는 지하수에 의해 벤토나이트 완충재는 건조 및 포화 과정을 겪게

Table 2. Fitting parameters for van-Genuchten model

Fitting parameters in Eq. (4)	Wetting path	Drying path
α	0.082	0.033
n	1.256	1.448

되기에 건조 과정 및 포화 과정에서의 함수특성곡선에 대한 규명은 매우 중요하다고 할 수 있다. 미국 및 유럽에서 생산되는 압축 벤토나이트에 대한 함수특성곡선에 관한 연구는 많이 진행되고 있는 반면에 국내 경주에서 생산되는 벤토나이트의 함수특성곡선에 관한 연구는 매우 부족한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 국내 경주 벤토나이트를 사용하여 실제 고준위폐기물 심층처분장에서 발생할 수 있는 환경을 고려하여 건조밀도, 구속조건 여부, 그리고 건조 및 포화 이력에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선을 측정하였다.

우선, 상온 25°C에서 비구속 조건으로 시료의 함수비를 증가시키며 수분흡입력을 측정하였으며, 수분함량이 증가할수록 압축 벤토나이트는 팽창하였으며 초기 건조밀도가 클수록 팽창률은 증가하는 경향을 보였다. 초기 건조밀도가 클수록 수분흡수력에 따른 함수비는 대체적으로 감소하는 경향을 보였지만, 비구속 조건하에서 건조밀도에 따른 함수특성곡선은 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았다.

또한 부분 구속 조건하에서 초기 건조밀도 1.72 g·cm⁻³ 값을 지닌 압축 벤토나이트 완충재의 포화 과정에 따른 수분흡입력을 측정하였다. 부분 구속 조건과 비구속 조건의

수분 흡입력이 10 MPa 이상에서는 함수특성곡선의 큰 차이가 발생하지 않았으나 10 MPa 이하에서는 비구속 조건이 구속 조건에 비해 수분 흡입력이 약간 크게 나타났다. 이밖에, 건조 과정에 관하여도 수분흡입력을 측정하였다. 포화 과정에 비해 건조 과정에서 수분흡입력이 약 20~30% 크게 나타났으며, 압축 벤토나이트 뿐만 아니라 초기 분말 상태의 벤토나이트에 대해서도 동일한 결과를 보였다.

본 연구에서 제시한 국내 경주 벤토나이트의 완충재의 함수특성곡선 결과는 공학적방벽의 성능평가에 적합한 입력 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선을 정확하게 측정하기 위한 시험 방법들의 개발 및 비교 검증이 필요할 것으로 판단되며 아울러 실제 처분환경을 좀 더 구체적으로 모사하기 위해서는 완전 구속 조건, 온도 변화, 그리고 불포화 상태에서의 압축 벤토나이트의 수리 특성에 관한 연구도 반드시 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단의 원자력기술 개발사업과(NRF-2017M2A8A5014857) 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(18CTAP-C143742-01)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] S. Yoon, G.Y. Kim, and M.H. Baik, "A Prediction of Specific Heat Capacity for Compacted Bentonite Buffer", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 15(3), 199-206 (2017).
- [2] J.O. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Thermo-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository", *Tunnel & Underground Space*, 21(4), 264-273 (2011).
- [3] J.O. Lee, G.Y. Kim, and S. Yoon, System Planning for Measuring Coupled THM Properties of Buffer: SWRC Measurement of Unsaturated Compacted Bentonite, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-7009 (2017).
- [4] W.J. Cho, J.S. Kim, S. Yoon, and G.Y. Kim, Estimation of the Water Suction and Swelling Pressure of Compacted Bentonite at Elevated Temperature, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-7334 (2018).
- [5] J. Rutqvist, L. Zheng, F. Chen, H.H. Liu, and J. Birkholzer, "Modeling of Coupled Thermo-hydro-mechanical Processes with Links to Geochemistry Associated with Bentonite-backfilled Repository Tunnels in Clay Formations", *Rock Mech. Rock Eng.*, 47(1), 167-186 (2014).
- [6] M.V. Villar and A. Lloret, "Influence of Temperature on the Hydro-mechanical Behavior of a Compacted Bentonite", *Appl. Clay Sci.*, 26(1-4), 337-350 (2004).
- [7] P. Delage, D. Marcial, Y.J. Cui, and X. Ruiz, "Ageing Effects in a Compacted Bentonite: a Microstructure Approach", *Geotechnique*, 56(5), 291-304 (2006).
- [8] M.V. Villar, Thermo-Hydro-Mechanical Characteristics and Processes in the Clay Barrier of a High Level Radioactive Waste Repository. State of the Art Report, Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas Report, CIEMAT-1044 (2004).
- [9] M. Wan, W.M. Ye, Y.G. Chen, Y.J. Cui, and J. Wang, "Influence of Temperature on the Water Retention Properties of Compacted GMZ01 Bentonite", *Environ. Earth Sci.*, 73(8), 4053-4061 (2015).
- [10] J.O. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Suction and Water Uptake in Unsaturated Compacted Bentonite", *Ann. Nucl. Energy*, 38(2-3), 520-526 (2011).
- [11] B.M. Das, Principles of geotechnical engineering, 6th ed., Thomson Nelson, Toronto (2006).
- [12] M. Yoo, H.J. Choi, M.S. Lee, and S.Y. Lee, "Measurement of Properties of Domestic Bentonite for a Buffer of an HLW Repository", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 14(2), 135-147 (2016).
- [13] S. Yoon, W. Cho, C. Lee, and G.Y. Kim, "Thermal Conductivity of Korean Compacted Bentonite Buffer

- Materials for a Nuclear Waste Repository”, *Energies*, 11(9), 2269 (2018).
- [14] J.S. Kim, S. Yoon, W.J. Cho, Y.C. Choi, and G.Y. Kim, “A Study on the Manufacturing Characteristics and Field Applicability of Engineering-scale Bentonite Buffer in a High-level Nuclear Waste Repository”, *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 16(1), 123-136 (2018).
- [15] WP4C Dew Point PotentialMeter, Operator’s manual, Decagon Device Inc. (2015).
- [16] M.T. van Genuchten, “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898 (1980).
- [17] Y. Mualem, “A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media”, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522 (1976).
- [18] J.O. Lee, H.J. Choi, and M.S. Lee, Concept of Gap-filling in the Buffer and Backfill of an HLW Repository: In Vertical Disposal Method, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-6141 (2015).
- [19] W.J.Cho, J.S. Kim, S. Yoon, and G.Y. Kim, Estimation of the Water Suction and Swelling Pressure of Compacted Bentonite at Elevated Temperature, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-7334 (2018).
- [20] J. Atkinson, *The mechanics of soils and foundations*, 2nd ed., CRC Press, Florida (2007).
- [21] W.J. Likos, N. Lu, and J.W. Godt, “Hysteresis and Uncertainty in Soil Water-Retention Curve Parameters”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140(4), 04013050, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001071 (2014).