

온도 변화를 고려한 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선 모델 평가

An Evaluation of Soil-Water Characteristic Curve Model for Compacted Bentonite Considering Temperature Variation

윤 석¹ Yoon, Seok 전 준 서² Jeon, Jun-Seo
고 규 현³ Go, Gyu-Hyun 김 건 영⁴ Kim, Geon-Young

Abstract

A geological repository has been considered as an option for the disposal of high-level radioactive waste (HLW). The HLW is disposed in a host rock at a depth of 500~1,000 meters below the ground surface based on the concept of engineered barrier system (EBS). The EBS is composed of a disposal canister, buffer material, backfill material, and gap-filling material. The compacted bentonite buffer is very important since it can restrain the release of radionuclide and protect the canister from the inflow of ground water. The saturation of the buffer decreases because high temperature in a disposal canister is released into the surrounding buffer material, but saturation of the buffer increases because of the inflow of ground water. The unsaturated properties of the buffer are critical input parameters for the entire safety assessment of the engineered barrier system. In Korea, Gyeongju bentonite can be considered as a candidate buffer material, but there are few test results of the unsaturated properties considering temperature variation. Therefore, this paper conducted experiment of soil-water characteristic curve for the Gyeongju compacted bentonite considering temperature variation under a constant water content condition. The relative error showed approximately 2% between test results and modified van-Genuchten model values.

요 지

심층 처분 방식은 고준위폐기물을 처분하기 위한 가장 적합한 대안으로 고려되어지고 있다. 고준위폐기물은 공학적 방벽시스템에 의해 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 처분된다. 공학적방벽시스템의 구성 요소로는 처분용기, 완충재, 뒷채움재 및 겹채움재가 있다. 이 중 벤토나이트 완충재는 지하수 유입으로부터 처분용기를 보호하고, 방사성 핵종 유출을 저지하는 역할을 하기 위해 심층 처분시스템에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 초기에는 처분용기로부터 발생하는 고온의 열량으로 인해 완충재의 포화도는 감소하지만, 그 후 주변 암반으로부터 유입되는 지하수로 인해 완충재의 포화도는 증가한다. 이렇듯 완충재의 불포화 거동 특성은 공학적방벽의 전체 안전성을 좌우할 수 있는 중요한 입력자료이다. 국내의 경우 경주에서 생산되는 벤토나이트가 완충재의 주요 후보물질로 고려될 수 있는데 국내

1 정희원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)
2 정희원, 한국건설기술연구원 건축안전연구센터&지진안전연구센터 수석연구원 (Member, Senior Reseracher, Building Safety Research Center & Seismic Safety Research Center, KICT, Tel: +82-31-910-0405, Fax: +82-31-910-0713, junseojeon@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)
4 비희원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원 (Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

벤토나이트 완충재의 온도를 고려한 불포화 거동 특성에 대한 연구는 매우 미진한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 국내 압축 벤토나이트 완충재의 온도 증가에 따라 함수비가 일정한 조건에서의 함수특성곡선을 도출하였으며, 시험 값과 온도가 고려된 수정 van-Genuchten 모델 값과의 상대오차는 약 2%를 나타냈다.

Keywords : Compacted bentonite, Engineered barrier system, Modified van-Genuchten model, Soil-water characteristic curve, Temperature variation

1. 서론

원자력에너지는 국내 전력 총 생산량의 30%를 차지하고 있으며, 원자력발전소를 운영하게 되면 사용후핵연료가 필연적으로 발생한다. 사용후핵연료는 방사선준위가 높은 고준위폐기물로서 강한 방사선을 배출하여 인체에 매우 위험하기에 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 안전하게 처분되어야 한다(IAEA, 2006). 고준위폐기물은 자연 암반 상태의 천연방벽과 인간이 인위적으로 개발한 공학적방벽 개념에 의해 심지층에 처분된다(Cho, 2019). 공학적방벽시스템은 사용후핵연료가 담긴 처분용기(Canister), 뒷채움재(Backfill), 완충재(Buffer), 갭채움재(Gap-filling material) 등으로 구성되어 있다. 이 중 완충재는 처분용기와 근계 자연 암반 사이에 설치되는 물질로서 처분용기로부터의 방사성 핵종의 유출을 저지하고 주변 지하수의 침투를 억제하는 역할을 한다(JNC, 2000; Villar et al., 2006). 사용후핵연료의 안전한 심층 처분을 위해 완충재가 지녀야 할 열-수리-역학-화학적인 특성과 관련하여 다양한 성능 기준치가 제시되어 있으며 이러한 성능을 모두 충족시키는 물질로 몬모릴로나이트 광물로 구성된 벤토나이트 점토가 가장 적합한 것으로 알려져 있다(Dixon et al., 1985; Lloret et

al., 2003; Kim et al., 2019; Yoon et al., 2020). 벤토나이트는 층간 양이온의 종류에 따라 크게 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 구분되며(Cho, 2019), 현재 우리나라의 경우 경상북도 경주에서 생산되는 Ca형 벤토나이트를 기반으로 연구를 수행하고 있다. Table 1은 국내 처분시스템에 적합한 완충재의 열-수리-역학 기준치를 보여주고 있다(Lee et al., 2011).

벤토나이트 분말의 초기 자연 함수비는 대략 10~12% 정도로 완충재는 벤토나이트 분말을 일정한 건조밀도로 압축된 형태로 처분장에 설치되며, 벤토나이트 분말은 갭채움재로 적용될 수도 있다(Kim et al., 2019). 처분 초기에는 처분용기에서 발생하는 고온의 붕괴열로 인해 압축 벤토나이트 완충재의 포화도가 초기 상태보다 더욱 감소하지만 시간이 경과하면 주변 암반으로부터 지하수가 침투하기에 고온의 조건에서도 포화도는 증가하게 된다(Cho et al., 2018; Lee et al., 2019; Yoon et al., 2019). 이러한 완충재의 불포화 및 포화 거동은 함수비와 수분흡입력의 척도인 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)에 의해 설명될 수 있다. 이러한 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선에 관한 연구는 유럽을 중심으로 활발하게 진행되고 있으나(Blatz et al., 2008; Jacinto et al., 2009; Lloret et al., 2003; Nguyen-Tuan, 2014; Villar et al., 2006), 국내 경주 벤토나이트에 관한 연구는 많이 미진한 상황이다. Yoon et al.(2019)은 국내 경주 벤토나이트를 가지고 처분 초기 환경에서의 온도가 증가할수록 함수비가 감소하는 조건에서 함수특성곡선을 도출하였다. 하지만 처분 중장기 환경인 온도가 증가할수록 함수비가 일정한 조건에서의 국내 압축 벤토나이트의 함수특성곡선에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Yoon et al.(2019)이 수행하였던 처분 운영 초기 환경에서의 함수특성곡선 시험에서 더 나아가 국내 벤토나이트 완충재에 대해 온도가 증가할수록 함수비가 일정한 조건에서의 함수특성곡선을

Table 1. Functional criteria of buffer for a Korean HLW repository (Lee et al., 2011)

Basic properties	Reference value
Dry density (Mg/m ³)	> 1.6
Hydraulic conductivity (m/s)	< 10 ⁻¹²
Swelling pressure (MPa)	< 15
Unconfined compression strength (MPa)	> 4.9
Young's modulus (x 10 ² MPa)	> 5.9
Poisson's ratio	0.05 ~ 0.21
Cohesion (kPa)	500 ~ 1000
Internal friction angle (degree)	27 ~ 37
Coefficient of consolidation (m ² /yr)	0.018 ~ 0.115
Thermal conductivity (W/m·K)	> 0.8
Organic carbon content (wt %)	< 0.3

평가하고자 하였다. 25°C, 48°C, 75°C, 99°C 각 단계별로 압축 벤토나이트의 함수비를 일정하게 유지한 상태로 초기 함수비와 수분흡입력을 측정하여 함수특성곡선을 도출하였으며, 시험 결과를 수정 van-Genuchten 함수특성곡선 모델에 대입하여 국내 압축 벤토나이트의 온도에 따른 함수특성곡선 모델을 제시하였다.

2. 실내 함수특성곡선 시험

2.1 시험 재료

본 연구에서는 (주)클라리언트코리아에서 생산한 국내 Ca형 벤토나이트 분말을 균질하게 압축하여 시료를 조성하였다. 통일분류법에 근거한 국내 Ca형 벤토나이트 분말은 소성이 큰 점토인 CH로 분류되었으며, 비중은 2.71, 액성한계와 소성지수는 각각 146.7%, 118.3%였다 (Yoon et al., 2020). 또한 XRD 분석방법을 이용한 정량적인 광물 조성 분석 결과 몬모릴로나이트가 약 60%, 장석이 약 20%, 석영이 약 5%의 구성 비율을 나타냈다 (Table 2). 함수특성곡선 시험에 사용된 시료의 크기는 직경 50mm, 높이 70mm의 원기둥 형태였으며 Table 1과 같이 벤토나이트 완충재의 건조밀도는 1.6g/cm³ 이상의 값이 요구되기에 본 시험에 사용된 압축 벤토나이트의 건조밀도는 1.61g/cm³ 값을 나타냈다.

2.2 시험 기기

심층 처분환경에서의 완충재의 불포화 및 포화 과정은 완충재의 수분포텐셜 특성에 따라 달라진다(Cho et al., 2018; Lee et al., 2017). 압축 벤토나이트의 수분포텐셜은 매트릭포텐셜로 불리며 이는 극성을 가진 물 분자가 불포화 매질 표면에 흡착되는 부착력과 공극 내의

Table 2. Quantitative XRD analysis for the Korean bentonite powder (Yoon et al., 2019)

Bentonite type	Gyeongju bentonite (%)			
	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

모세관력에 의해 생기는 물의 에너지를 뜻한다(Lee et al., 2017). 압축 벤토나이트는 일반 토질과 달리 수분흡입력이 매우 크기에 VE(vapor equilibrium) 방법을 통해 수분흡입력을 도출하는데, 이는 벤토나이트 시료의 공극 내 공극수와 수증기의 포텐셜은 평형에 있다고 가정하며 식 (1)과 같이 Kelvin 식에 의거하여 상대습도(RH)를 계측하여 수분흡입력(s)을 도출할 수 있다(Blatz et al., 2008).

$$s = -\frac{RT}{\nu_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{RH}{100}\right) \quad (1)$$

여기서 R은 기체상수(8.3143J/(mol·K)), T는 절대온도(K), ν_{w0} 는 물의 비체적(0.001m³/kg), ω_v 는 물의 물질량(18.016kg/Kmol)을 나타낸다(Nguyen-Tuan, 2014; Yoon et al., 2019). 압축 벤토나이트의 상대 습도를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 압축 벤토나이트에 드릴로 구멍을 뚫어 상대 습도 센서를 삽입하였다. 또한 온도 증가에 따른 압축 벤토나이트의 함수비를 일정하게 유지하기 위하여 시료를 철제 셀에 넣어 부피변화가 발생하지 않도록 구속조건을 구현하였다. 또한 센서 설치부와 셀 본체 뚜껑 사이는 고온에 잘 견디는 접착제로 마감하였으며 온도 조절은 대류식 오븐을 이용하였다.

3. 시험 결과 및 토의

3.1 함수특성곡선 이론

함수특성곡선은 불포화 특성을 결정하는 기본물성의

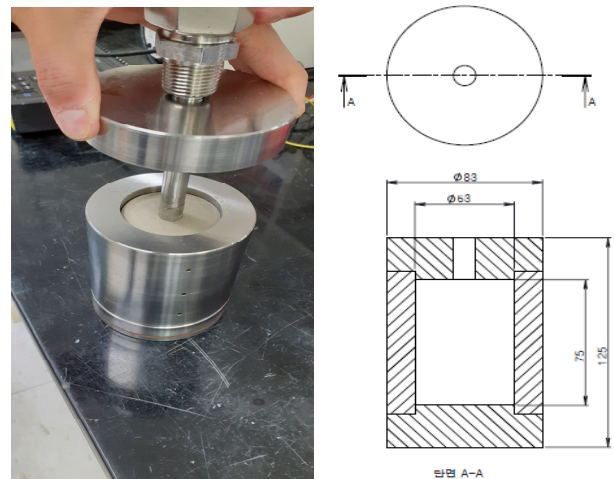


Fig. 1. Experimental system for the VE technique

로 수분흡입력에 따른 시료 내부의 체적함수비와의 상관관계를 나타낸다. 많은 연구자들이 대부분 실내 실험을 통해 함수특성곡선식을 제안하였으며, van-Genuchten (1980)은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \left(\frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (2)$$

여기서, θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 는 잔류체적함수비, s 는 수분흡입력, P_0 와 λ 는 맞춤 계수를 뜻한다. Lloret and Villar(2007)는 FEBEX 벤토나이트의 열-수리-역학적 거동을 실험적으로 분석하였으며, 수리학적 거동인 함수특성곡선 분석은 구속조건, 온도, 건조밀도를 고려하였다. 특히 부피변화가 발생하지 않는 구속조건의 경우에는 40°C에서 건조밀도 1.65g/cm³, 1.70g/cm³의 조건, 60°C에서 1.65g/cm³의 조건, 그리고 80°C에서 1.6g/cm³과 1.7g/cm³의 조건일 때의 함수특성곡선을 구하였다. 이를 바탕으로 경험식 (3)을 도출하였다.

$$w = (a + bn) \left[1 + \left(\frac{s}{P_0 e^{-\eta(n-n_0)} e^{-\alpha(T-T_0)}} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (3)$$

여기서, w 는 함수비(%), n 은 간극비, s 는 수분흡입력 (MPa), T 는 온도(°C)이며, a , b , P_0 , λ , n , n_0 , α , T_0 는 각각 10.4, 41.89, 12.68MPa, 0.211, 7.97, 0.4, 0.00647 그리고 20°C였다. 이후 Villar et al.(2010)는 20~120°C 온도변화가 건조밀도 1.5g/cm³~1.75g/cm³를 가지는 FEBEX 벤토나이트의 수리-역학적 물성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였고, van-Genuchten 식을 수정하여 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$w = [37.5 + n^{0.32} e^{-0.001(T-20)}] \left[1 + \left(\frac{s}{21.9 e^{-8.2(n-0.4)} e^{-0.001(T-20)}} \right)^{\frac{1}{1-0.295}} \right]^{-0.295} \quad (4)$$

식 (4)의 수정 van-Genuchten 모델은 FEBEX 벤토나이트를 이용한 다양한 온도에서의 함수특성곡선을 상당히 잘 모사하였으며, 실험값과 모델값의 상대오차는 1.2% 이하로 보고되었다(Villar et al., 2010).

3.2 시험 결과

본 연구에서는 처분 중장기 환경을 고려하여 온도가 증가해도 압축 벤토나이트의 함수비를 일정하게 유지하면서 함수특성곡선 시험을 수행하였다. 현재 국내 처분시스템의 벤토나이트 완충재의 안전성을 확보하기 위한 최고 한계 온도는 100°C 이하로 규정하고 있기에 (Choi et al., 2019; Lee et al., 2019), 본 시험에서는 25°C, 48°C, 75°C, 99°C에서 각 온도별로 압축 벤토나이트의 함수비와 수분 흡입력을 측정하였다. 시험에 사용된 압축 벤토나이트의 초기 중량 함수비는 11.9%였으며, 중량 함수비를 20.7%까지 서서히 증가시키면서 시험을 진행하였다. Fig. 2와 같이 일정한 온도에서의 상대습도가 일정하게 유지될 때까지 시험을 수행하였으며 그 때의 상대습도 값을 식 (1)에 대입하여 수분흡입력을 도출하였다. 25°C를 제외하고는 승온 후 대략 3~4시간 이후 상대습도 값이 일정하게 유지되었다. Fig. 3(a)는 온도 증가에 따른 일정한 함수비에서의 수분흡입력 변화를 보여주고 있으며, Fig. 3(b)는 함수비 증가에 따른 일정한 온도에서의 수분흡입력 값을 나타내고 있다. 온도가 증가할수록 압축 벤토나이트의 수분흡입력은 상온에 비해 약 30~70% 정도 감소하였다. 함수비가 작을수록 수분흡입력 값의 절대적인 감소는 크게 나타났으나, 상온 대비 수분흡입력의 감소 비율은 함수비가 큰 영역에서 큰 경향을 보였다. 이는 온도가 증가할수록 벤토나이트 층간 영역에 있었던 물이 입자 집합체 사이의 거대 공극으로 이동하게 되며(Cho et al., 2018; Ma and Hueckel, 1992), 이는 거대 공극으로 이동된 물의 부피가 커서 벤토나이트의 포화도를 증가시키게 되기에 수분흡입력은 감소하는 것으로 판단된다.

온도에 따른 함수특성곡선 시험 값을 식 (2)의 수정 van-Genuchten 모델식에 대입하여 Table 3과 같이 맞춤 변수들을 도출하였다. 본 시험에서는 압축 벤토나이트의 건조밀도가 1.61g/cm³ 일 때만 수행되었기에 식 (2)의 간극비 변화가 없으며, 이에 따라 지수(exponential)의 승수가 0이 되어 결국 1로 계산되어 함수비 변화에 영향을 주지 않는다. 맞춤변수는 MathWorks사의 MATLAB 프로그램 내 Curve Fitting Toolbox을 이용하여 도출하였다. 25°C에서 시험값을 기준값으로 설정하여 48°C, 99°C 시험값을 바탕으로 맞춤변수를 도출하고 75°C 시험데이터를 이용하여 검증하였다. Fig. 4는 모델값과 시험값의 함수특성곡선 거동을 나타내고 있으며, 경주 압

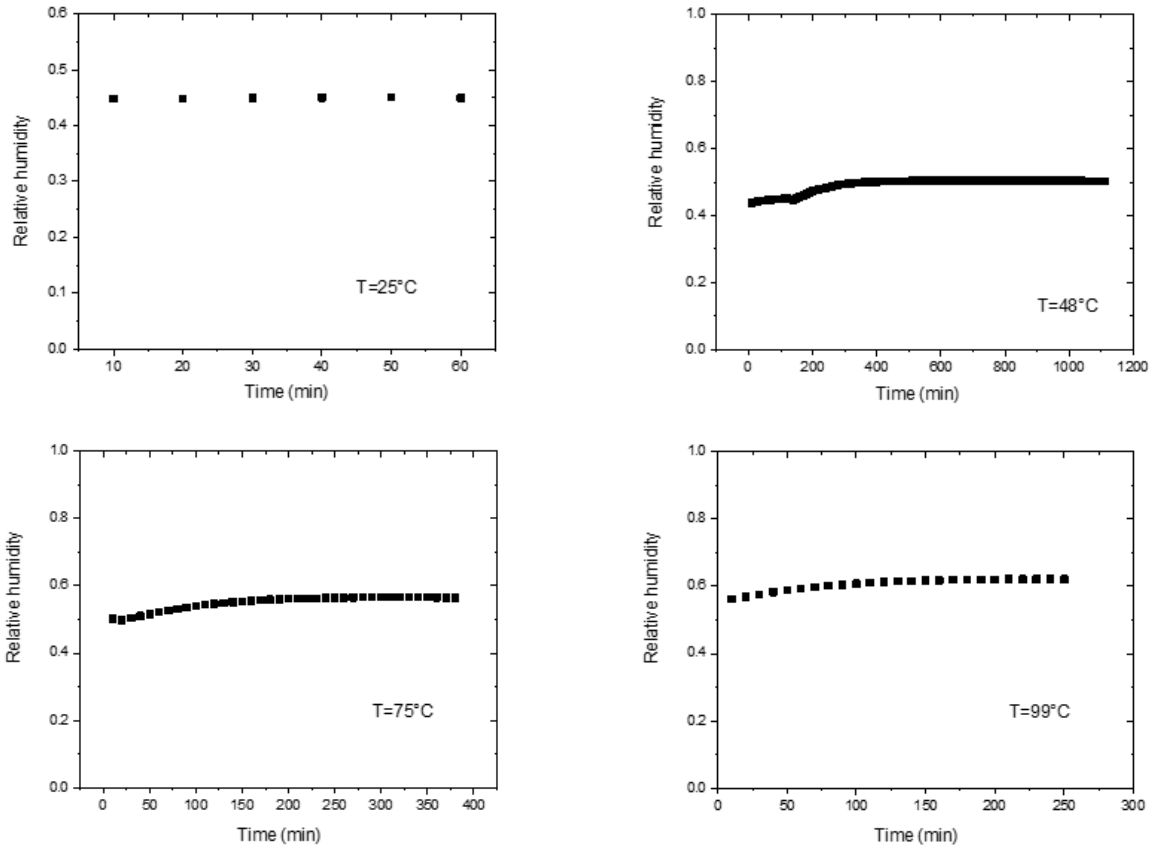


Fig. 2. Relative humidity variation

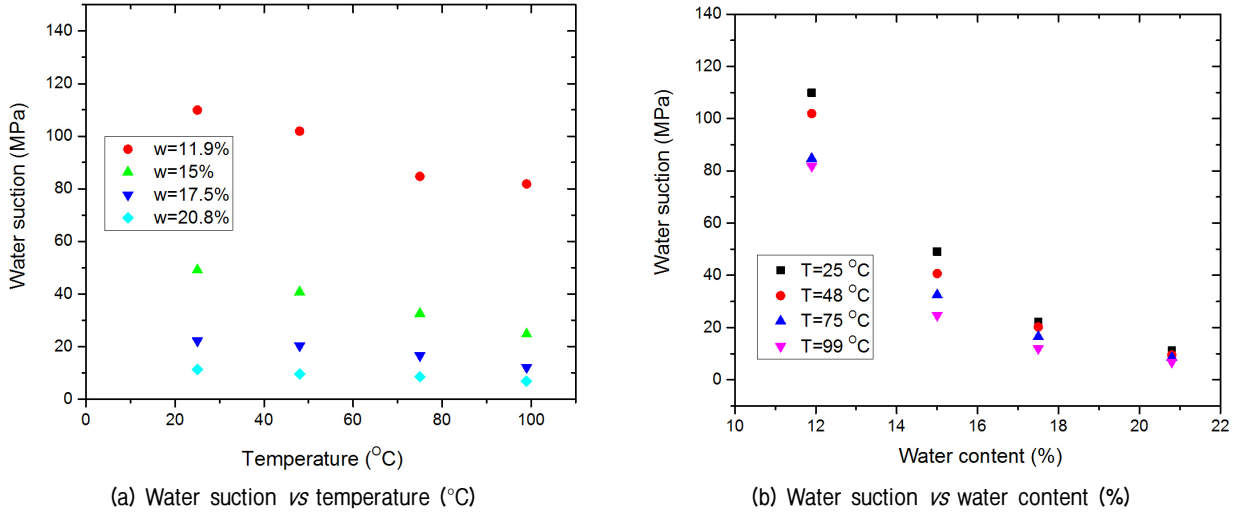


Fig. 3. SWCC considering temperature variation

Table 3. Fitting parameters for modified van-Genuchten model

a	n	b	c	P_o	α	λ
33.550	0.406	0.302	0.001	10.180	0.001	0.247

축 벤토나이트의 시험값과 수정 van-Genuchten 모델값의 상대오차는 약 2% 내외를 나타냈다. 따라서 온도를 고려한 수정 van-Genuchten 모델은 경주 압축 벤토나이트

트 완충재의 함수특성곡선 거동을 적절하게 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 Yoon et al.(2019)은 동일한 경주 압축 벤토나이트가 온도 증가에 따라 함수비가 감소하는 조건에서의 함수특성곡선 시험을 수행하였다. 처분 운영 초기 처분 용기와 맞닿아있는 벤토나이트 완충재의 함수비는 처분 용기에서 발생하는 고온의 열량에 의해 감소할 것이

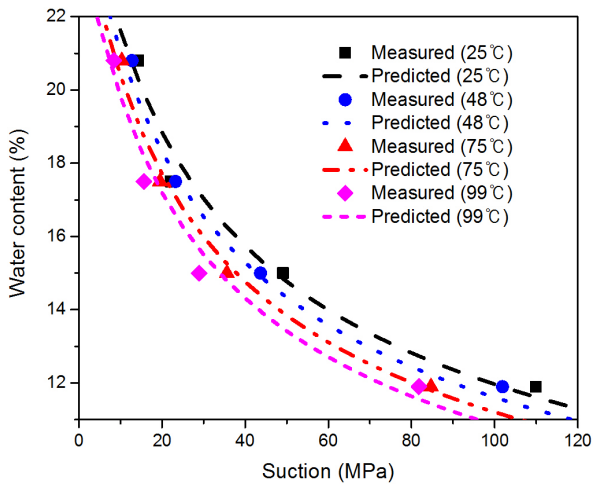


Fig. 4. Measured and predicted SWCC results

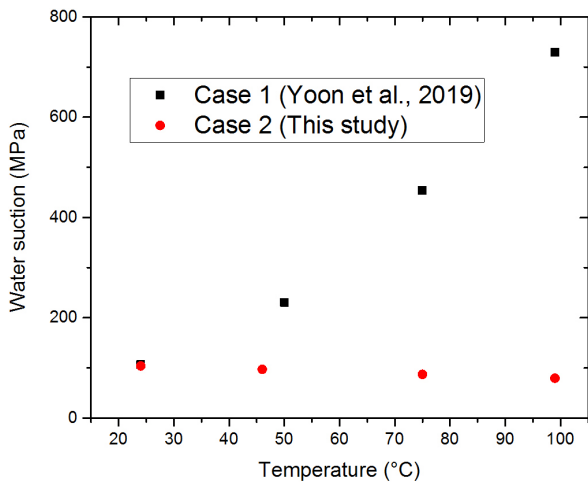


Fig. 5. Water suction with respect to temperature increase

기에 수분흡입력은 온도 증가에 따라 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 본 시험 결과는 온도가 증가하여도 함수비가 일정한 조건이기에 온도가 증가하면 수분흡입력은 감소하는 것으로 나타났으며 Fig. 5는 Yoon et al.(2019)의 결과(Case 1)와 본 시험(Case 2)과의 온도에 따른 수분흡입력의 변화를 나타낸다. 이와 같이 처분 초기 및 중장기 환경에 따른 압축 벤토나이트의 함수특성곡선은 큰 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 원자력발전소에서 발생하는 고준위폐기물을 처분하기 위한 공학적방벽시스템의 구성 요소인 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선에 미치는 온도의 영향을 실제 시험을 통해 규명하였고, 이를 바탕으로 온도를 고려한 거동 모델을 분석하였으며 다음과

같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 우선, 국내 경주 벤토나이트 분말을 압축하여 건조 밀도 1.61g/cm^3 값을 갖도록 직경 50mm, 높이 70mm의 원기둥 형태로 시료를 제작하였다. 시료의 초기 함수비는 11.9%였으며, 그 후 20.7%까지 함수비를 서서히 증가시키며 온도 증가에 따라 시료의 상대습도가 일정하게 수렴해질 때 상대습도를 계측하였으며, 상대습도 값을 Kelvin 식에 대입하여 압축 벤토나이트의 수분흡입력을 도출하였다. 본 연구에서는 처분 중장기 환경을 고려하여 온도 증가에 따라 압축 벤토나이트의 함수비가 일정하게 유지되는 조건을 구현하였으며 25°C, 48°C, 75°C, 그리고 99°C에서 수분흡입력을 측정하여 함수특성곡선을 도출하였다. 온도가 증가할수록 벤토나이트 층간 영역에 있었던 물은 벤토나이트 집합체 사이의 거대 공극으로 이동하게 된다. 이는 벤토나이트 전체의 포화도를 증가시키는 요인이 되기에 온도가 증가할수록 수분흡입력은 감소하는 경향을 보였다. 온도에 따른 압축 벤토나이트의 함수특성곡선 시험 데이터가 이용하여 수정 van-Genuchten 모델에 적용해 보았으며, 그 결과 시험값과 모델값의 상대오차는 약 2% 내외를 보였다. 수정 van-Genuchten 모델은 국내 경주 압축 벤토나이트의 온도에 따른 함수특성곡선 거동을 정확하게 묘사할 수 있음을 알 수 있다.

(2) 또한 본 논문에서는 기존에 연구되었던 처분 운영 초기 온도 증가에 따른 함수비 감소를 고려한 압축 벤토나이트의 수분흡입력 거동과 비교 분석하였다. 처분 운영 초기에는 처분용기에서 발생하는 고온의 열량에 의해 압축 벤토나이트 완충재의 함수비는 감소하게 되기에 수분흡입력은 급격히 증가하는 경향을 보인다. 하지만 시간이 흐를수록 주변 암반으로부터 유입되는 지하수로 인해 완충재의 함수비는 서서히 증가하기에 고온의 상태에서도 완충재의 함수비는 일정하게 유지된다. 본 연구를 통해 처분 중장기 환경에서의 온도 증가를 고려한 압축 벤토나이트 완충재의 함수특성거동은 처분 초기와는 완전히 다른 경향을 보인다는 것을 알 수 있었기에 처분 초기 및 중장기 환경에 따른 완충재의 특성 규명이 반드시 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서 제시한 온도를 고려한 국내 압축 벤토나이트의 함수특성곡선 결과와 거동 모델은 국내 처분시스템의 성능 해

석을 위한 중요한 입력자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며 아울러 온도 외에 다양한 영향인자를 고려한 압축 벤토나이트의 불포화 거동 특성에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 원자력 기술개발사업(2017M2A8A5014857)과 개인기초연구사업(2020R1F1A072379)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- Blatz, J. A., Cui, Y. J., and Oldecop, L. (2008), "Vapour Equilibrium and Osmotic Technique for Suction Control", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.26, pp.661-673.
- Cho, W. J. (2019), "Bentonite barrier material for radioactive waste disposal", KAERI/GP-535/2019.
- 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.
- Choi, Y. C., Cho, W. J., Lee, J. O., and Kim, G. Y. (2019), "Experimental Data Analysis during Initial In-DEBS Operation", *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technology*, Vol.17, No.5, pp.81-95.
- 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.
- IAEA (2006), "Geological disposal of radioactive waste. Safety Requirement", IAEA Safety Standards Series.
- Jacinto, A. C., Villar, M. V., Gomez-Espina, R., and Ledesma, A. (2009), "Adaptation of the van Genuchten Expression to the Effects of Temperature and Density for Compacted Bentonites", *Applied Clay Science*, Vol.42, pp.575-582.
- JNC. (2000), "H12 project to establish technical basis for HLW disposal in Japan, Support Report 2. Japan Nuclear Cycle Development Institute.
- Kim, G. Y., Lee, J. O., Cho, W. J., and Baik, M. H. (2019), "In-situ demonstration of engineered barrier system (In-DEBS) for characterization of coupled THM behavior in KURT", *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 1-14.
- Kim, M. S., Jun, J. S., Kim, M. J., Lee, J., and Lee, S. R. (2019), "A Multi-objective Optimization of Initial Conditions in a Radioactive Waste Repository by Numerical Thermo-hydro-mechanical Modeling", *Computers and Geotechnics*, Vol.114, pp.103106.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lloret, A. and Villar, M. V. (2007), "Advances on the Knowledge of the Thermo-hydro-mechanical behaviour of Heavily Compacted "FEBEX" Bentonite", *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.32, pp.701-715.
- 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.
- 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.
- Nguyen-Tuan, L. (2014), "Coupled thermo-hydro-mechanical analysis: experiment and back analysis", Ph.D Thesis, Ruhr-Universität Bochum.
- van Genuchten, M. T. (1980), "A Closed-form Equation Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, Vol.44, pp.892-898.
- Villar, M. V., Gomez-Espina, R., and Lloret, A. (2010), "Experimental Investigation into Temperature Effect on Hydro-mechanical behaviours of Bentonite", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.2, No.1, pp.71-78.
- 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.
- Yoon, S., Go, G. H., Lee, J. O., and Kim, G. Y. (2019), "Evaluation of Water Suction for the Compacted Bentonite Buffer Considering Temperature Variation", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.11, pp.7-14.
- Yoon, S., Jeon, J. S., Chang, S., Lee, D. H., Lee, S. R., and Kim, G. Y. (2020), "Characteristics of Water Suction for a Korean Compacted Bentonite", *Nuclear Technology*, Vol.206, pp.514-525.

Received : September 11th, 2020

Revised : September 22nd, 2020

Accepted : September 22nd, 2020