

A Review on Measurement Techniques and Constitutive Models of Suction in Unsaturated Bentonite Buffer

불포화 벤토나이트 완충재의 수분흡입력 측정기술 및 구성모델 고찰

Jae Owan Lee*, Seok Yoon, and Geon Young Kim

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

이재완*, 윤석, 김건영

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(Received August 13, 2019 / Approved September 16, 2019)

Suction of unsaturated bentonite buffers is a very important input parameter for hydro-mechanical performance assessment and design of an engineered barrier system. This study analyzed suction measurement techniques and constitutive models of unsaturated porous media reported in the literature, and suggested suction measurement techniques and constitutive models suitable for bentonite buffer in an HLW repository. The literature review showed the suction of bentonite buffer to be much higher than that of soil, as measured by total suction including matric suction and osmotic suction. The measurement methods (RH-Cell, RH-Cell/Sensor) using a relative humidity sensor were suitable for suction measurement of the bentonite buffer; the RH-Cell /Sensor method was more preferred in consideration of the temperature change due to radioactive decay heat and measurement time. Various water retention models of bentonite buffers have been proposed through experiments, but the van Genuchten model is mainly used as a constitutive model of hydro-mechanical performance assessment of unsaturated buffers. The water characteristic curve of bentonite buffers showed different tendencies according to bentonite type, dry density, temperature, salinity, sample state and hysteresis. Selection of water retention models and determination of model input parameters should consider the effects of these controlling factors so as to improve overall reliability.

Keywords: Suction, Water characteristic curve, Water retention model, Unsaturated bentonite, Buffer, High-level waste repository

* Corresponding Author.

Jae Owan Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: jolee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4921

ORCID

Jae Owan Lee <http://orcid.org/0000-0003-0405-4041>

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

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

불포화 벤토나이트 완충재의 수분흡입력은 공학적방벽의 수리-역학적 성능평가 및 설계에 있어 매우 중요한 입력인자이다. 본 연구에서는 문헌에 보고된 불포화 다공성매질의 수분흡입력 측정기술과 구성모델을 분석하고, 고준위폐기물처분장의 벤토나이트 완충재에 적합한 수분흡입력 측정기술과 구성모델을 제안하였다. 문헌 분석결과, 벤토나이트 완충재의 수분흡입력은 일반토질보다 훨씬 높은 값을 가지며, 매트릭수분흡입력과 삼투흡입력을 포함하는 총수분흡입력을 측정하여 사용하였다. 벤토나이트 완충재의 수분흡입력 측정에는 상대습도센서를 이용한 측정방법(RH-Cell, RH-Cell/Sensor)이 적합하였으며, 핵종 붕괴열에 의한 온도변화와 측정 소요시간을 고려했을 때에는 RH-Cell/Sensor 방법이 더 선호되었다. 벤토나이트 완충재의 수분보유모델은 실험을 통해 여러 가지 모델이 제안되었지만, 불포화 완충재의 수리-역학적 성능평가 구성모델로는 대부분 van Genuchten모델이 사용되었다. 벤토나이트 완충재의 수분특성곡선은 벤토나이트의 종류, 건조밀도, 온도, 염도, 측정 시 시료상태와 이력과정에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 수분보유모델의 선정 및 모델인자 결정에는 신뢰도 향상을 위해 이러한 인자들의 영향이 고려되어야 한다.

중심단어: 수분흡입력, 수분특성곡선, 수분보유모델, 불포화벤토나이트, 완충재, 고준위폐기물처분장

1. 서론

고준위방사성폐기물(High-Level radioactive Waste, HLW)의 처분방식으로는 심지층처분이 유력하다[1]. 현재의 처분개념[2, 31]에 의하면, 심지층처분장은 지하 수백 미터의 지반이 안정되고 균열이 적은 암반층(host rock)에 건설되며, 폐기물은 처분용기(disposal container)에 밀봉한 후 처분공(deposition borehole)에 정착하고, 처분용기와 처분공 암벽 사이 공간에는 완충재(buffer)로 충전한다. 그리고 처분공이 모두 폐기물로 채워지면 처분장 내 처분터널은 뒷채움재(backfill)로 채운 후 폐쇄하게 된다(Fig. 1).

고준위폐기물처분장에서 완충재는 공학적방벽의 주요 구성요소이다. 처분장으로의 지하수 유입을 억제하고, 방사성핵종의 유출을 저지 및 지연시키며, 외부 응력으로부터 처분용기를 보호하고, 또한 폐기물로부터 발생하는 붕괴열(radioactive decay heat)을 밖으로 분산 시키는 중요한 역할을 한다. 완충재 물질로는 높은 팽윤능, 낮은 수리전도도, 높은 핵종 저지능 및 양호한 장기건전성을 갖는 벤토나이트가 대부분의 나라에서 고려되고 있으며, 처분공에서 벤토나이트는 방벽성능을 높이기 위해 고밀도의 블록형태로 제작하여 설치하게 된다[2, 3, 18, 19].

처분용기와 처분공 암벽 사이에 설치된 벤토나이트 완충재는 설치 후 얼마 동안 폐기물로부터 발생하는 붕괴열과 처분공 주위 암반에서 유입되는 지하수의 상호작용에 의해

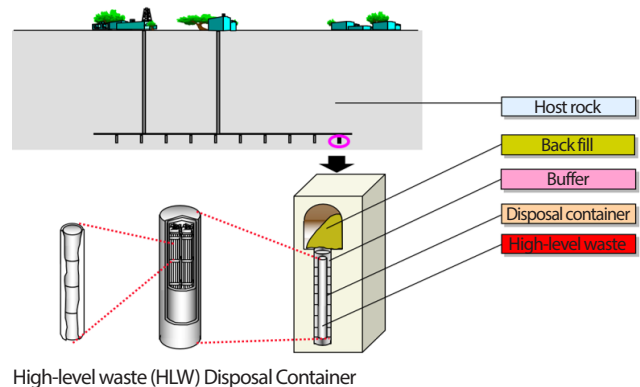


Fig. 1. Schematic picture of an HLW repository and its engineered barrier system (EBS).

초기에는 불포화 상태(unsaturated state)를 이루다가 시간이 경과하면서 포화상태에 도달하게 되는데, 불포화상태의 완충재 특성은 처분장의 운영기간과 폐쇄 후 수 백년 동안의 공학적방벽 성능을 좌우한다. 수분흡입력은 불포화 매질의 수분 흡입 척도로서, 수분함량에 따른 수분흡입력(수분특성곡선)과 구성모델은 완충재의 불포화특성 파악 및 수리-역학적(hydro-mechanical) 성능평가에 사용되는 중요한 모델 입력자료이다.

불포화 다공성매질의 수분흡입력(즉, 수분특성곡선) 측정과 구성모델 개발은 일반토질을 대상으로 하는 토목 및 환경 분야에서는 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 기술이 보편화

되었다. 그러나 고밀도 블록형태로 설치되는 처분장의 벤토나이트 완충재는 일반 토질과는 달리 팽윤능(swelling capacity)과 수분흡입력이 높고 방사성 붕괴열에 의한 온도변화를 고려해야 하기 때문에 측정장치가 복잡하다. 또한 표준화된 측정방법이 확립되어 있지 않기 때문에 기술 진입장벽이 높은 연구분야로서, 스웨덴, 스페인, 프랑스 등 일부 처분선도국을 중심으로 수행되고 있고[3,4], 우리나라에서는 Lee et al. [5], Yoon et al. [6] 이외에는 수행된 사례가 없는 실정이다.

이와 관련하여, 본 논문에서는 불포화 다공성매질의 수분흡입력 개념을 소개하고, 문헌에 보고된 수분흡입력 측정기술과 구성모델을 분석하여, 향후 우리나라에서 건설될 고준위폐기물처분장 불포화 벤토나이트 완충재의 수리-역학적 성능평가를 위한 수분흡입력 측정 및 구성모델 선정 기술을 제시하고자 한다.

2. 수분흡입력(suction)

수분흡입력은 불포화 매질이 수분을 가지려고 하는 단위 면적당 힘을 말한다. 불포화매질의 수분흡입력(s)은 수분포텐셜(water potential, ψ)을 측정해서 결정하며, 측정 수분포텐셜의 음수 값과 같다.

$$s = -\psi \quad (1)$$

단위는 압력으로 표시하며, 보통 MPa이나 수두(m)를 사용한다.

물리화학적으로, 수분포텐셜은 단위량의 물이 매질을 통해 이동할 수 있는 에너지이다. 자유수의 기준포텐셜에 대한 매질 공극수의 포텐셜로서, 동일한 조건의 용액과 자유수의 화학포텐셜 차이를 물의 부분몰체적으로 나눈 값으로 정의된다.

$$\psi \equiv \frac{\mu - \mu^o}{V_w} \quad (2)$$

단, μ = 용액 중 물의 화학포텐셜(J/Mol)

μ^o = 대기압에서 자유수의 화학포텐셜(J/Mol)

V_w = 물의 몰체적($m^3 \cdot mol^{-1}$)으로, 1몰체적은 $1.8 \times 10^{-5} m^3 \cdot mol^{-1}$ 이다.

일반적으로 온도가 일정할 경우 수분포텐셜(total potential)은 매트릭포텐셜(matric potential, ψ_m), 삼투포텐셜(osmotic potential, ψ_o), 외부압력포텐셜(pressure potential, ψ_p), 중력포텐셜(gravimetric potential, ψ_g)의 합으로 표시된다.

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_p + \psi_g \quad (3)$$

자유수의 경우 수분포텐셜은 영(zero)의 값을 가지고, 매트릭포텐셜, 삼투포텐셜, 압력포텐셜, 중력포텐셜에 의한 영향이 커질수록 보다 큰 음수의 값을 가진다. 총수분포텐셜 중, 매트릭포텐셜(ψ_m)은 극성을 가진 물 분자가 불포화매질 표면에 흡착되는 부착력과 공극 내의 모세관력에 의해 생기는 물의 에너지이다. 불포화매질 입자의 표면이나 공극의 모세관에는 물이 강하게 흡착 보유되기 때문에, 매트릭포텐셜은 항상 음의 값을 가진다. 삼투포텐셜(ψ_o)은 매질 중에 존재하는 이온이나 용질분자에 의한 포텐셜로서, 이온이나 용질은 수화현상으로 물 분자들을 끌어당기기 때문에 용질의 농도가 높아지면 물의 포텐셜 값은 낮아지게 된다. 압력포텐셜(ψ_p)은 외부에서 물에 작용하는 압력에 의해 생기는 포텐셜로, 압력이 클수록 그에 따라 포텐셜의 값이 증가한다. 중력포텐셜(ψ_g)은 중력의 작용에 의해 물이 가질 수 있는 에너지이다. 기준점을 중심으로 그 보다 높은 위치에 있으면 양의 값을, 그 보다 낮은 위치에 있으면 음의 값을 가진다.

불포화 벤토나이트 완충재의 수리 및 역학적 거동을 평가하기 위해서는 수분함량에 따른 수분흡입력 분포가 필요하다. 불포화매질의 수분함량에 따른 수분흡입력 분포는 수분특성곡선(water characteristic curve)으로 나타낸다. 수분특성곡선은 $\log s - \theta$ 의 형태로 표시하며, θ 는 보통 체적수분함량을 사용하나, 중력수분함량(gravimetric water content, ω)이나 포화도(degree of saturation, S_s)로 표시하기도 한다. 체적수분함량과 중량수분함량 및 포화도 간에는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{aligned} \theta &= \omega \times \frac{\rho_d}{\rho_w} \\ \theta &\equiv \frac{V_w}{V_b} \\ \omega &\equiv \frac{M_w}{M_s} \end{aligned} \quad (4)$$

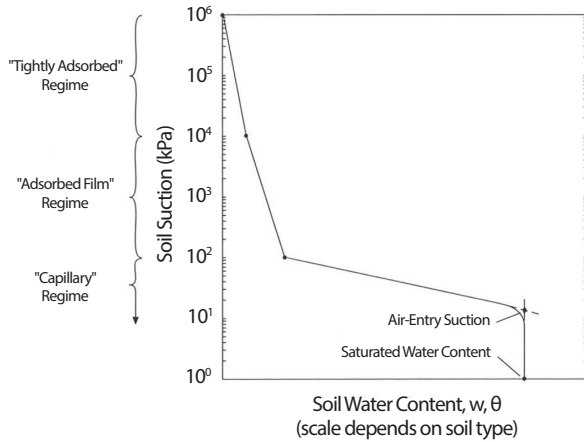


Fig. 2. Mechanistic explanation of water characteristic curve by McQueen and Miller [7].

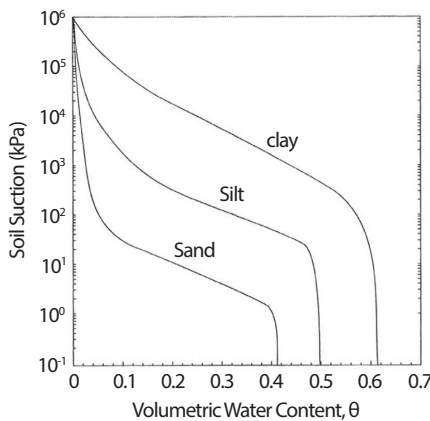


Fig. 3. Typical water characteristic curves of sand, silt, and clay [7].

$$S_r = \frac{\omega(\frac{\rho_p}{\rho_w})}{e} \tag{5}$$

$$S_r \equiv \frac{V_w}{V_v}$$

$$\text{void ratio } e \equiv \frac{n}{1-n}$$

여기서, ρ_d 는 불포화매질의 건조밀도, ρ_w 는 물의 밀도, V_w 는 물의 체적, V_v 는 공극(pore)의 체적, V_b 는 불포화매질의 벌크체적(bulk volume), M_w 는 물의 질량, M_s 는 건조 불포화매질의 질량, ρ_p 는 불포화매질 입자의 밀도, n 는 공극율(porosity)이다.

불포화매질의 수분흡입력은 포화상태에 가까워질수록

작아지고, 건조상태가 될수록 더 강한 흡입력을 보인다. McQueen and Miller [7]에 의하면, 수분특성곡선은 수분흡입력에 따라 3 영역("Tightly Adsorbed" 영역, "Adsorbed Film" 영역, "Capillary" 영역)으로 나누어지고, 각 영역에서의 흡입메카니즘(retain mechanism)은 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, "Tightly Adsorbed" 영역은 수분흡입력이 $10^6 \sim 10^4$ kPa사이로 분자결합(molecular bonding)메카니즘에 의해 물이 흡수되고, $10^4 \sim 10^2$ kPa 사이의 "Adsorbed Film" 영역은 경막생성메카니즘에 의해, $10^2 \sim 0$ kPa사이의 "Capillary" 영역은 모세관현상 메카니즘에 의해 흡수된다. 불포화매질의 수분특성곡선은 매질의 종류에 따라 그 형태가 다르다. 모래, 미사, 점토의 전형적인 수분특성곡선은 Fig. 3과 같다. 모래는 비표면적(specific surface area)과 표면전하(surface charge)가 상대적으로 적기 때문에 "Tightly Adsorbed" 영역이 매우 제한되어 있고, 주로 모세관현상 메카니즘에 의한 "Capillary" 영역이 대부분을 차지한다. 공기-흡입 압력(air-entry pressure)은 모래입자에 의해 생성된 큰 공극 때문에 비교적 낮은 값을 보인다. 반면에, 점토는 높은 비표면적과 표면전하 때문에 짧은 범위에서의 표면작용(short-range surface interaction)이 주로 작용하고, 그 결과 수분흡입력은 대부분 "Tightly Adsorbed" 영역과 "Adsorbed Film" 영역의 높은 값을 가진다. 공기-흡입 압력도 다른 매질에 비해 상대적으로 큰 값을 보인다. 그리고 미사(silt)의 수분특성곡선은 모래와 점토의 중간 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 측정기술

불포화 다공성매질의 수분흡입력 측정방법은 직접측정 방법과 간접측정방법으로 나눌 수 있다[8]. 직접측정방법으로는 axis-translation technique, tensiometer, suction probe 방법이 있으며, 이 방법은 매트릭수분흡입력 측정에만 가능하여 높은 수분흡입력 측정에는 제한이 있다. 대신, 간접측정방법은 매트릭수분흡입력 뿐만 아니라 삼투수분흡입력, 총수분흡입력 등 모든 유형의 수분흡입력 측정이 가능하여 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 간접측정방법으로는 relative humidity sensor, psychrometer technique, squeezing technique, time domain reflectometry 등의

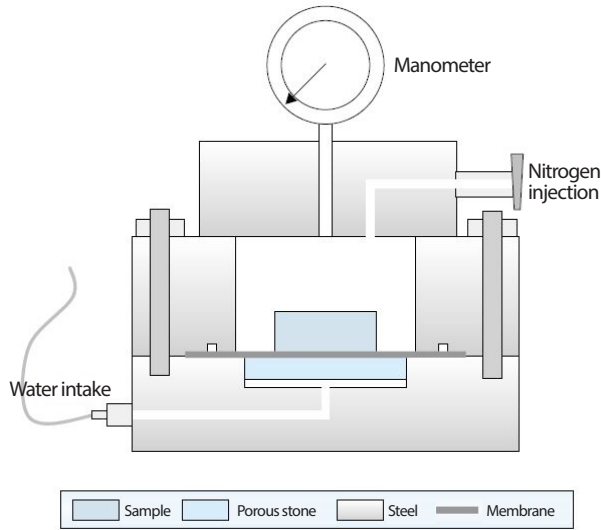


Fig. 4. Schematic diagram of the suction-measuring device of the AT technique [9].

방법이 있다. 이들 측정방법 중에서, 낮은 수분흡입력 측정에는 직접측정방법의 axis-transition technique 방법이 사용되고, 높은 수분흡입력 측정에는 간접측정방법의 relative humidity sensor 방법이 주로 사용되고 있다.

3.1 Axis-translation technique (AT) 측정방법

AT 측정방법은 낮은 수분흡입력 측정에 널리 사용되는 방법으로, 일반토목분야에서는 오래 전부터 사용되어 왔다. 이 방법은 측정 시 가압으로 인한 시료 공극 내 액상과 기상의 압력변화는 동일하다는 전제를 한다. Fig. 4는 AT 방법의 수분흡입력 측정장치의 개념도이다[9]. 챔버의 아래쪽에 높은 공기유입값(HAEV = high air entry value)의 다공판을 두고, 그 위에 측정시료를 둔다. 공기유입값이 큰 다공판은 반투막(membrane)과 같이 물은 통과시키고, 기체(공기 혹은 질소)에 대해서는 불투과성을 가진다. 밀폐 챔버(chamber) 내부를 공기로 가압하면 시료 내 공기압력이 증가하고, 시료와 다공판이 접촉하고 있는 경계면에서는 물의 흡수가 일어나며 평형에 도달할 때까지 진행된다. 이때 흡수되는 물의 수압은 보통 대기압이다. AT 방법에 의해 측정된 불포화시료의 수분흡입력(s)은 매트릭흡입력(matric suction)으로 다음의 식을 이용해서 결정한다.

$$s = U_a - U_w \tag{6}$$

여기서, U_a 는 가압 공기압력, U_w 는 흡수되는 물의 압력을 나타낸다. 보통 U_w 의 게이지압은 영(zero)이므로, 시료의 흡입력은 가압 공기압력과 같게 된다. AT 방법으로 측정된 수분흡입력은 매트릭흡입력에 대한 부분만 고려한다. 최대 1.5 MPa까지의 수분흡입력 측정에 사용되며, 높은 흡입력을 갖는 팽윤성 불포화매질에의 적용에는 한계가 있다. 챔버에 1.5 MPa 이상의 압력을 가하면 공극 내 공동(cavitation)이 생길 수 있기 때문이다. 또, 이 방법은 시료에서 기체의 연속성(continuity)을 가정하기 때문에 닫힌 기체(occluded gas)가 존재할 경우 측정된 흡입력이 실제보다 큰 값을 가질 수도 있다.

3.2 Relative humidity sensor (RH) 측정방법

RH 측정방법은 AT 측정방법의 한계를 개선한 것으로, 매트릭흡입력 뿐만 아니라 삼투흡입력, 압력흡입력, 중력흡입력을 포함하는 총수분흡입력(total suction)을 측정할 수 있다. 시료 공극(pore) 내 공극수와 수증기의 경계면(interface)에서는 수증기만 통과하고, 공극수 내 이온은 통과하지 못한다고 가정한다. 또 시료 공극 내 공극수와 수증기의 포텐셜은 평형(vapor equilibrium)에 있다고 가정한다. 이 경우, 수증기 포텐셜의 음수값, 즉, 총수분흡입력(s)과 수증기의 상대습도(RH) 사이의 열역학적 관계는 Kelvin의 식을 따른다.

$$s = -10^{-6} \frac{R \times T}{V_w} \ln \left(\frac{RH}{100} \right) \tag{7}$$

여기서, R 은 기체상수($8.3143 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T 는 절대온도, V_w 는 물의 몰체적($1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)이다. RH 측정방법은 벤토나이트 완충재와 같이 큰 수분흡입력(최대 500 MPa까지 가능)을 갖는 팽윤성 점토(expansive clay)의 수분흡입력 측정에 적합하며, RH-Cell 방법과 RH-Cell/Sensor 방법으로 나눌 수 있다.

RH-Cell 방법: 불포화 압축시료의 공극에 물과 공기가 존재하고, 이 때 공극수압과 수증기압은 상대습도에 의해 조절된다는 원리를 이용하는 방법이다[9]. RH-Cell 측정방법의 장치 개념도는 Fig. 5와 같다. 이 장치에서, 상대습도 조절

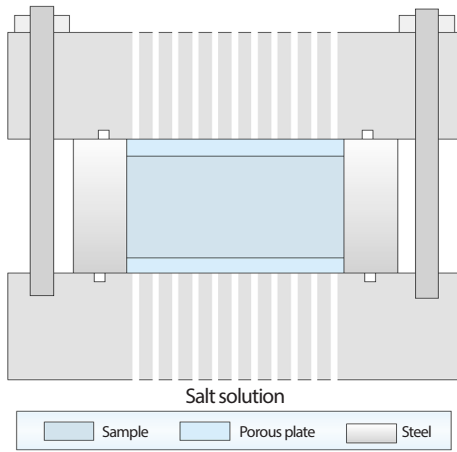


Fig. 5. Schematic diagram of the suction-measuring device of the RH-Cell technique [9].

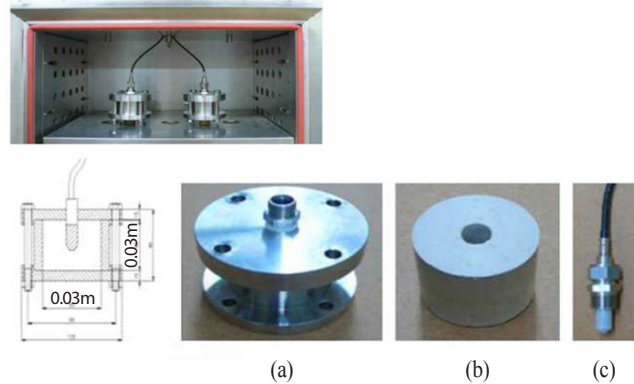


Fig. 7. Schematic diagram of the suction-measuring device of the RH-Cell/Sensor technique installed in a convective oven with temperature-controller: (a) sample holder (b) compacted bentonite sample (c) relative humidity sensor [12].



Fig. 6. Schematic diagram of the suction-measuring device of the RH-Cell/Sensor technique with silicone-rubber heater (SRH) [11].

은 황산용액 같은 염 용액(salt solution)을 사용하고, 총수분 흡입력은 측정시료가 염용액의 수증기압과 열역학적 평형에 도달할 때의 염용액의 활성도(A_w), 즉 상대습도를 측정하여 식(7)로부터 결정한다. 염용액의 활성도와 수증기의 상대습도는 $A_w = RH/10$ 의 관계를 갖는다. 황산용액의 활성도는 Gmitro & Vermeulen [10]이 제안한 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$A_w = 7 \times 10^{-8}p^4 - 6 \times 10^{-6}p^3 - 0.0001p^2 - 0.0019p + 0.9927 \quad (8)$$

여기서, p 는 황산용액의 무게 백분율이다. 황산용액 사용 시에는 주의가 필요하다. 황산용액의 활성도는 온도에 따라 달라지기 때문에 측정기간 동안 온도는 일정하게 유지되어야 한다. 시료와 주변 대기 사이에 물이 이동할 경우 용액의 밀도가 달라진다. 측정 전후에는 반드시 피크노미터(pycnometer)를 이용해서 용액의 밀도 변화도 체크해야 한다. RH-Cell 측정방법은 약 500 MPa까지의 수분흡입력을 측정할 수 있다.

RH-Cell/Sensor 방법: 이 방법은 센서를 이용해서 일정한 수분함량과 건조밀도로 압축된 시료의 상대습도를 측정하고, Kelvin 식으로부터 수분흡입력을 계산하는 방법이다. 시료는 미리 필요한 양 만큼의 물과 혼합하여 비닐팩에 넣고 밀봉한 후, 평형에 도달할 수 있도록 일정기간 동안 보관한다. 압축 블록은 이렇게 준비된 시료를 몰드(mold)에 넣고 원하는 건조밀도로 압축, 파라핀 호일(paraffin foil)에 싸서 안정화 될 수 있도록 몇 일 더 보관한다. 측정센서는 압축 블록에 드릴로 구멍을 뚫어 설치하고 셀(cell)에 체결한다. 상대습도는 센서로부터 전기적 신호를 받아 송신기(transmitter)를 통해 측정된다. RH-Cell/Sensor 측정방법에서 사용하는 상대습도 센서는 아주 작은 습도 변화에도 민감하게 반응하는 정전용량 센서(capacitive sensor)가 좋다. 시료의 총수분흡입력은 Kelvin의 식(7)를 이용해서 측정 상대습도로부터 결정하게 된다. RH-Cell/Sensor 측정방법은 RH-Cell 방법에 비해 온도에 따른 수분특성곡선의 측정이 쉽다. 그러나

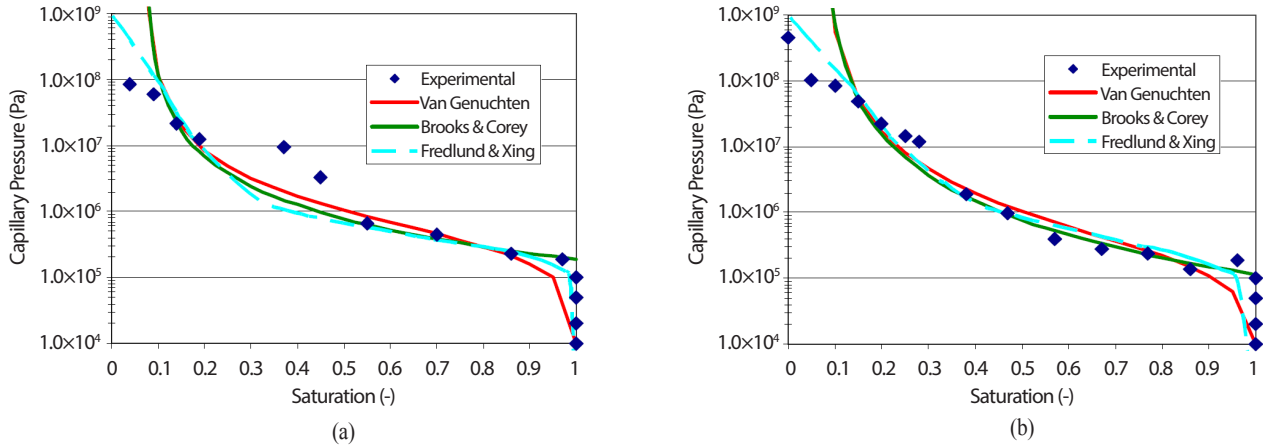


Fig. 8. Brooks-Corey model, van Genuchten model, Fredlund –Xing model for Volclay bentonite/ crushed rock mixture (dry density=1.6 Mg·m⁻³) with (a) pure water and (b) Äspö water [15].

셀의 기밀성을 확보하기 위해서는 센서 설치부와 셀 본체 뚜껑 사이에 고온에 잘 견디는 접착제로 마감하는 것이 필요하다. 온도 조절방법으로는, Villar et al. [11]은 실리콘-고무로 된 히터(silicone-rubber laminated heater)를 셀 주위에 설치하여 조절하였고(Fig. 6), Lee et al. [12]은 셀을 대류식 오븐(convective oven)에 설치하여 조절하였다(Fig. 7). 온도 영향을 보기 위해 설정온도를 바꿀 때는, 상대습도가 충분히 안정화 된 후에 실시한다. 그리고 실험이 끝난 후에는 압축 벤토나이트를 셀에서 꺼집어내어 건조밀도와 수분함량의 변화가 있었는지 최종 확인을 해야 한다. RH-Cell/Sensor 측정방법도 RH-Cell 방법과 마찬가지로 약 500 MPa까지의 흡입력을 측정할 수 있다.

4. 수분보유모델(water retention model)

수분보유모델은 불포화 다공성매질의 수리 및 역학적 거동 예측에 사용되는 구성모델로서, 일반토양에서부터 처분장의 벤토나이트 완충재물질에 이르기까지 여러 재료를 대상으로 많은 모델이 제안되었다. 그 중에서, Brooks-Corey 모델, van Genuchten 모델, Fredlund-Xing 모델이 널리 사용되어 왔다. Brooks-Corey 모델은 초기에 제안된 것으로, 공극크기의 분포인자를 지수로 하는 모델이다. 수분흡입력-대-수분함량 관계는 불완전한 S자 모양(Fig. 8)을 하며 다음 식으로 표현된다.

$$S_{r,eff} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{s_a}{s}\right)^\lambda \quad (9)$$

여기서, $S_{r,eff}$ 는 유효 포화도(effective degree of saturation), θ 는 측정시료의 체적수분함량, θ_s 는 포화시료의 체적수분함량, θ_r 는 잔류 체적수분함량(residual volumetric water content)으로 시료에 공기를 계속 유입시켜 흡입력을 증가시켜도 물이 더 이상 빠지지 않은 시점에서의 수분함량, s 는 수분흡입력, s_a 는 공기유입값(air-entry value), λ 는 공극의 크기와 관련된 실험상수이다. 공기유입값은 포화시료에서 공기를 유입시켰을 때 시료 중의 물이 빠지기 시작할 시점에서의 공기압을 나타낸다. van Genuchten 모델은 Brooks-Corey 모델보다 정교한 모델로써, Fig. 8에서 보는 바와 같이, S자 모양의 수분흡입력-대-수분함량 관계를 가지며 식 (10)과 같은 비선형 방정식으로 주어진다[13].

$$S_{r,eff} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (as)^n}\right]^m \quad (10)$$

α 는 공기유입값의 역수, n 은 공극크기 분포에 관한 매개변수로서 곡선의 형태와 관련이 있으며 1보다 큰 값을 갖는다. m 은 $1 - (1/n)$ 로 표시된다. Fredlund-Xing 모델은 van Genuchten 모델과 같이 S자 모양의 수분흡입력-대-수분함량 관계를 가지며, 수분흡입력의 적용 범위가 앞의 두 모델보다 더 넓다. 매트릭수분흡입력(matric suction)의 최대값을 10⁵ MPa 로 가정하고, 포화상태, 즉, 체적수분함량=1 일 때 수분흡입력은 0, 완전 건조상태(체적수분함량=0)일 때는

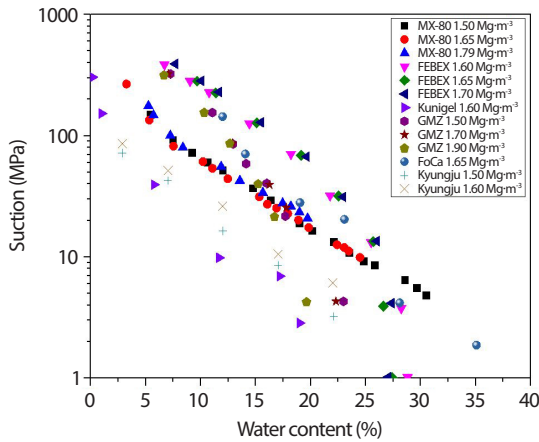


Fig. 9. Comparison of water characteristic curve of bentonite buffer materials reported in literature.

무한대를 나타내는 수분특성곡선을 토대로 제안한 모델이다[14, 15].

$$S_{r,eff} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = C(s) \left[\frac{1}{\ln \left\{ e + \left(\frac{s}{\alpha} \right)^m \right\}} \right] \quad (11)$$

$$C(s) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{s}{s_{res}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1000}{s_{res}} \right)} \right]$$

C(s)는 수분함량 감소에 따른 수분흡입력의 증가를 보정하기 위한 함수로서, 수분흡입력이 작을수록 1에 가까워진다. e는 자연상수, s_{res}는 잔류수분함량에서의 수분흡입력이다. 식(9), 식(10), 식(11)에서, 모델상수들은 모델계산치와 실험에서 구한 수분특성곡선을 최적화(optimization) 방법을 이용하여 커브피팅(curve-fitting)하여 결정한다.

처분장 벤토나이트 완충재물질에 대한 수분보유모델은 대부분 van Genuchten 모델과 Fredlund-Xing 모델을 이용, 실험결과와의 비교를 통해 모델상수를 결정한 모델들이 제안되었다. 그러나, 실제 처분장 완충재의 THM 성능 해석 및 평가를 위한 구성모델로는 van Genuchten 모델이 주로 사용되었다[16-18].

5. 요약 및 토의

문헌 분석결과에 의하면, 일반 토목 환경분야에 사용되는 토질의 수분흡입력은 매트릭스수분흡입력 측정만으로 가능

하나, 벤토나이트 완충재 물질의 경우는 높은 삼투수분흡입력도 함께 고려해야 하기 때문에 총수분흡입력을 측정하여 사용한 것으로 확인하였다.

처분장의 벤토나이트 완충재는 높은 팽윤능과 방사성핵종으로부터의 붕괴열에 의한 온도변화의 영향을 고려해야 하기 때문에 수분흡입력 측정장치가 복잡하고, 또한 표준화된 측정방법이 확립되어 있지 않기 때문에 신뢰성 있는 실험 데이터를 확보하기 위해서는 측정 시 전문지식과 많은 경험 이 요구되었다.

벤토나이트 완충재의 총수분흡입력 측정방법으로는 RH sensor 측정방법이 주로 사용되었으며, 온도변화 및 측정 소요시간의 단축을 위해서는 RH-Cell 방법보다 RH-Cell/Sensor 방법이 더 선호되었다. 처분장 벤토나이트 완충재의 수리 및 역학적 성능평가를 위한 구성모델로 사용되는 수분보유모델은 최근에 많은 연구가 수행되고 있지만, 실제 성능평가에는 van Genuchten모델이 널리 사용되었다.

수분보유모델의 모델인자는 수분특성곡선에 의해 좌우된다. 선행연구[5, 11, 19-30]에 의하면, 수분특성곡선은 벤토나이트의 종류, 건조밀도, 온도, 염도, 측정 시 시료상태와 이력과정에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 벤토나이트의 종류에 따라 큰 차이를 보였고, 건조밀도에 대해서는 상대적으로 적은 차이를 보여주었다(Fig. 9). 온도의 영향은 벤토나이트의 종류에 따라 서로 상반된 경향을 보였는데, MX-80, Kunigel 벤토나이트는 높은 온도에서 더 큰 수분흡입력을 보인 반면, FEBEX, FoCa, Kyeonju 벤토나이트는 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 수분특성곡선에 대한 염도의 영향은 크지 않았지만, 증류수에 비해 약간 높은 수분흡입력을 보였다. 또한, 수분특성곡선은 측정 시 시료상태(구속과 비구속)와 이력현상(습윤과정과 건조과정)에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 그러므로 불포화 벤토나이트 완충재의 수리 및 역학적 성능평가에 대한 신뢰도 향상을 위해서는 이러한 인자들의 영향을 고려한 다양한 수분특성곡선 측정 실험이 수행되어야 하며, 성능평가에 대한 입력자료는 이 실험 결과를 바탕으로 결정된 인자값들을 사용하여야 할 것이다.

6. 결론

본 논문에서는 불포화 다공매질의 수분흡입력 측정기술 및 구성모델을 분석하고, 그 결과를 토대로 고준위폐기물처

분장의 벤토나이트 완충재에 적합한 수분흡입력 측정기술과 구성모델을 조사하였다. 문헌 분석결과, 수분흡입력은 일반토질에서는 매트릭수분흡입력 측정으로 가능하나, 벤토나이트 완충재의 경우는 매트릭수분흡입력과 삼투흡입력을 포함하는 총수분흡입력(total suction)을 측정하여 사용하였다. 벤토나이트 완충재의 수분흡입력 측정은 장치가 복잡하고 측정방법도 아직 표준화 되어 있지 않아, 신뢰성 있는 실험데이터의 확보를 위해서는 전문지식과 많은 경험이 요구되었다. 벤토나이트 완충재의 수분흡입력 측정방법으로는 relative humidity sensor를 이용한 측정방법(RH-Cell, RH-Cell/Sensor)이 적합하였으며, 방사성핵종의 붕괴열에 의한 온도 변화 및 측정 소요시간을 고려했을 때는 RH-Cell/Sensor 측정방법이 더 선호되었다. 처분장 벤토나이트 완충재의 수리 및 역학적 성능평가 구성모델로서, 실험을 통해 제안된 수분 보유모델은 다양하게 제안되고 있지만, 실제 수리 및 역학적 성능평가에는 대부분 van Genuchten 모델이 사용되었다. 그러나 불포화 벤토나이트 완충재의 수분특성곡선은 벤토나이트의 종류, 건조밀도, 온도, 염도, 측정 시 시료상태(구속, 비구속)와 이력과정(습윤과정, 건조과정)에 따라 서로 다른 경향을 보이기 때문에 완충재의 수리 및 역학적 거동 해석 및 성능평가에 대한 신뢰도 향상을 위해서는 이러한 인자들의 영향을 고려한 구성모델 개발과 모델입력인자의 측정도 병행되어야 할 것으로 판단된다. 본 논문의 완충재 수분흡입력 측정기술 및 구성모델에 대한 고찰 결과는 향후 우리나라에서 건설될 고준위폐기물처분장의 완충재 성능평가 및 설계를 위한 수분흡입력 측정시험과 수리-역학적 거동 모델링 연구에 기초자료로 유용하게 사용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다 (과제번호: NRF-2017M2A8A5014857).

REFERENCE

[1] OECD/NEA, "Timing of high level waste disposal",

NEA No. 6244, OECD (2008).

- [2] Svensk Kambranslehantering AB (SKB). Design and Production of the KBS-3 Repository, SKB TR-10-12 (2010).
- [3] M.V. Villar, "Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite from Cabo de Gata: A Study applied to the use of bentonite as sealing materials in high level radioactive waste repositories", ENRESA Publication Technica, 04/2002 (2002).
- [4] M.V. Villar, "MX-80 bentonite. Thermo-hydro-mechanical characterization performed at CIEMAT in the context of the prototype project", CIEMAT/DIAE/54540/2/04 (2004).
- [5] J.O. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Suction and water uptake in unsaturated compacted bentonite", Ann. Nucl. Energy, 38, 520-526 (2011).
- [6] S. Yoon, J.S. Jeon, C. Lee, W.J. Cho, S.R. Lee, and G.Y. Kim, "Evaluation of soil-water characteristic curve for domestic bentonite buffer", J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 17(1), 29-36 (2019).
- [7] I.S. McQueen and R.F. Miller, "Approximating soil moisture characteristics from limited data: Empirical evidence and tentative model", Water Resour. Res., 10(3), 521-527 (1974).
- [8] P. Hu, Q. Yang, and P. Li, "Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory", Electronic J. Geotech. Eng., 15, 1-14 (2010).
- [9] M.V. Villar, "Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite from Cabo de Gata: A Study applied to the use of bentonite as sealing materials in high level radioactive waste repositories", ENRESA Publication Technica, 04/2002 (2002).
- [10] J.I. Gmitro and T. Vermeulen, "Vapor-liquid equilibria for aqueous sulfuric acid", An. I. Ch. E. J., 10(5), 740 (1964).
- [11] M.V. Villar, "MX-80 bentonite. Thermo-hydro-mechanical characterization performed at CIEMAT in the context of the prototype project", CIEMAT/DIAE/54540/2/04 (2004).

- [12] J.O. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Suction and water uptake in unsaturated compacted bentonite", *Ann. Nucl. Energy*, 38, 520-526 (2011).
- [13] M. van Genuchten, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898 (1980).
- [14] D. G. Fredlund and A. Xing, "Equations for the soil-water characteristic curve", *Can. Geotech. J.*, 31, 521-532 (1994).
- [15] I. Engelhardt, "Inverse modeling of gas, water and heat flow in bentonite/crushed rock backfill", *Proc. TOUGH Symp. 2003*, LBNL, Berkeley, USA (2003).
- [16] J.O. Lee, H. Choi, and G.Y. Kim, "Numerical simulation studies on predicting the peak temperature in the buffer of an HLW repository", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 115, 192-204 (2017).
- [17] W.J. Cho and S. Kwon, "Effects of variable saturation on the thermal analysis of the engineered barrier system for a nuclear water repository", *Nucl. Technol.*, 177, 245-256 (2012).
- [18] M. Chijimatsu, Fujita, A. Kobayashi, and M. Nakano, "Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 24, 403-424 (2000).
- [19] 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, 4053-4061 (2015).
- [20] A. Seiphoori, A. Ferrari, and L. Laloui, "Water retention behaviour and microstructural evolution of MX-80 bentonite during wetting and drying cycles", *Geotechnique*, 64(9), 721-734 (2014).
- [21] M.V. Villar, and A. Lloret, "Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite", *Appl. Clay Sci.*, 26, 337-350 (2004).
- [22] A. Lloret, M.V. Villar, M. Sanchez, A. Gens, X. Pintado, and E.E. Alonso, "Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes", *Geotechnique*, 53(1), 27-40(2003).
- [23] A. Lloret, M.V. Villar, and E. Romero, "Final report on thermo-hydro-mechanical laboratory tests", FEBEX report 70-UPC-L-7-13., 158, Barcelona (2004).
- [24] T. Kanno, T. Fugita, S. Takeuchi, H. Ishikawa, K. Hara, and M. Nakano, "Coupled Thermo-hydro-mechanical modelling of bentonite buffer material", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 23, 1281-1307 (1999).
- [25] M. Chijimatsu, T. Fujita, Y. Sugita, and W. Taniguchi, "Evaluation of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Phenomena in the Near Field for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste", *JNC TN8400 2000 - 008*, Japan (2000).
- [26] T. Nishimura and J. Koseki, "Changing of properties of unsaturated compacted bentonite due to hydration effort", *J. Environ. Sci. Eng.*, B7, 92-102 (2018).
- [27] B. Chen, L. Qian, W.M. Ye, Y.J. Cui, and J. Wang, "Soil-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite", *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 25(4), 788-793 (2006).
- [28] W.M. Ye, Q. Wang, Y.G. Chen, and B. Chen, "Advances on buffer/backfill properties of heavily compacted Gaomiaozi bentonite", *Proc. of Int. Symp. on Geoenviron. Eng.*, ISGE2009, 8-10, Hangzhou, China (2009).
- [29] W.M. Ye, J. Zhu, B. Chen, Y. Chen, and Y. Cui, "Experimental investigation on soil-water retention properties of compacted GMZ01 bentonite with consideration of temperature and initial dry density", 10th Asian Regional Conference of IAEG (2015).
- [30] W. Sun, D. Sun, L. Fang, and S. Liu, "Soil-water characteristics of Gaomiaozi bentonite by vapor equilibrium technique", *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 6, 48-54 (2014).
- [31] H.J. Choi, J.Y. Lee, D.K. Cho, S.K. Kim, S.S. Kim, K.Y. Kim, J.T. Chung, M.S. Lee, J.W. Choi, and J.O. Lee. Korean Reference HLW disposal system, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-3563/2008 (2008).