

고준위 폐기물 처분장 벤토나이트 완충재의 수분 흡인(suction) 특성

이재완, 조원진

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

jolee@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위폐기물처분장에서 완충재의 가장 중요한 역할은 폐기물로의 지하수 유입을 최소화하고, 지하수에 의해 용해된 방사성 핵종이 주위 암반으로 유출되는 것을 저지하는 것이다. 벤토나이트는 수리전도도가 매우 낮고, 높은 핵종저지능을 갖기 때문에 이러한 완충재 재료로서 널리 선호되고 있다. 벤토나이트 완충재는 폐기물 처분 후 얼마동안 핵종 붕괴열의 영향을 받으면서 지하수와 접촉하기 때문에 불포화상태 (unsaturated state)로 존재하며, 이 때 벤토나이트를 통한 지하수의 흐름은 수분흡인특성에 의해 좌우된다. 그러므로 벤토나이트 완충재의 수분흡인특성연구는 처분장의 재포화 (resaturation) 예측과 처분장 완충재의 성능 및 안전성 평가를 위해서 선행되어야 할 중요한 연구대상이다. 벤토나이트 완충재의 수분흡인특성은 수분함량과 흡인력의 상관관계를 나타내는 수분보지곡선 (water retention curve)에 의해 특징 지워진다. 지금까지 문헌에 보고된 수분보지곡선은 대부분 분말 벤토나이트에 대한 것으로 압축벤토나이트에 적용할 수 있는 자료는 많지 않으며, 또한 고준위폐기물 처분장 조건에서 예상되는 완충재 내 온도변화가 수분보지곡선에 어떤 영향을 미치는지에 대한 보고가 거의 없는 실정이다. 이와 관련하여 본 연구에서는 고온, 고압용 습도센서를 이용하여 국산벤토나이트를 대상으로 상대습도를 측정하고, 그 결과로부터 벤토나이트의 수분흡인력을 결정하는 방법을 조사하였으며, 이 방법에 따라 분말과 압축벤토나이트의 수분보지곡선을 비교분석하였다. 또한 완충재의 온도변화가 수분보지곡선에 미치는 영향도 규명하고자 하였다.

2. 실험 및 결과

실험에 사용된 벤토나이트는 경주산 벤토나이트로 원광을 분쇄 한 후 200 메쉬(mesh) ASTM (American Society for Testing and Materials) 망체를 통과한 것을 사용하였다. 분말 벤토나이트의 입도분포는 Fig. 1과 같고, 액성한계와 소성한계는 각각 162%와 39%이며, 소성지수는 123%이었다. 광물분석 결과, 벤토나이트는 몬모릴로나이트 (montmorillonite, 70 %)와 장석(feldspars, 29%)을 주성분으로 하고, 소량의 석영 (quartz, ~1%)을 포함하였다. 화학조성은 SiO₂ 56.8%, Al₂O₃ 20.0%, Fe₂O₃ 6.0% 및 기타 미량성분으로 되어 있다. 벤토나이트의 주요 교환가능 양이온은 Ca²⁺ 이고, 양이온교환능은 57.6 meq/100g이다. 분말 벤토나이트 시료의 수분함량은 데시케이터 (desiccator)를 이용하여 조절하였다. 시료를 110°C에서 24시간 동안 건조 한 후, 필요한 양 만큼 유리접시에 옮겨 증류수 (distilled and demineralized water)가 든 데시케이터에 넣고, 일정한 시간 간격으로 스푼으로 저어주며 목표 수분함량에 도달할 때까지 기다렸다가 사용하였다. 압축벤토나이트는 양방향 유압프레스 (bi-axial hydraulic press)를 이용, 수분함량이 조절된 벤토나이트를 압축 (건조밀도 1.5 Mg/m³)하여, 직경 5x10⁻² m, 높이 5x10⁻² m의 크기로 만들었으며, 가운데는 직경 1.2x10⁻² m, 깊이 2.5x10⁻² m 홀(hole)을 뚫어 습도센서를 설치할 수 있도록 하였다. 그리고 압축 한 벤토나이트 시편은 균일한 수분분포를 갖도록 하기 위해 밀봉백 (zip bag)에 넣어 3일간 데시케이터에 두었다가 실험에 사용하였다. 분말 또는 압축벤토나이트의 상대습도는 Fig. 2의 측정장치를 이용하여 여러 가지 실험조건 (수분함량 (%) : 3, 7, 12, 17, 22; 온도 (°C) : 25, 35, 45, 55, 70, 90)에서 측정되었으며, 수분 흡인력(S)은 측정 상대습도로부터 Kelvin의 법칙을 이용하여 결정하였다.

$$S = -10^{-6} \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{RH}{100}\right)$$

여기서, R는 기체상수 (8.3143 J/K · mol), T는 절대온도, V_w는 물의 몰체적 (1.80x10⁻⁵ m³/mol), RH는 상대습도이다.

습도센서로부터 얻어진 벤토나이트의 상대습도는 대부분 수 시간 이내에 정상상태에 도달하였다. 본 연구에서는 실험 시작 후 3일에는 벤토나이트의 상대습도가 충분히 정상상태에 도달했다고 보고 그 때의 값을 최종 상대습도로 간주하였다. 대부분의 벤토나이트 시료는 100% 이하의 값을 보였다. 그러나 HMT 334 습도센서를 이용해서 수분함량이 22% 이상인 압축벤토나이트 시료의 상대습도를 측정하고, 그 결과로부터 수분흡인력을 결정하는 데는 한계가 있었다.

Kelvin법칙을 이용하여 상대습도로부터 결정된 벤토나이트의 수분흡인력은 온도가 일정할 경우 수분함량이 증가할수록 감소하였으며, 수분함량 < 10% 범위에서는 압축벤토나이트의 수분흡인력이 분말벤토나이트보다 더 큰 값을 보였으나, 수분함량 > 10% 범위에서는 반대의 경향을 보였다. 벤토나이트의 수분흡인력은 낮은 수분함량 범위에 대해서는 대체로 온도변화에 민감하지 않았다. 그러나 높은 수분함량에서는 70℃까지는 별로 변화가 없다가 90℃에는 크게 감소하였다, 건조밀도가 1.5 Mg/m³인 압축벤토나이트의 수분보지곡선을 다음의 van Genuchten 함수에 적용한 결과,

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}}$$

n과 a는 각각 1.4166과 2.5493x10³의 값을 가졌다.

3. 결론

본 연구를 통하여 여러 가지 수분함량과 최대 90℃ 온도조건에서 습도센서를 이용한 분말 및 압축벤토나이트의 수분흡인력 결정방법을 제시하였다. 실험결과, 벤토나이트의 수분흡인력은 일정한 온도에서 수분함량이 증가할수록 감소하였다, 분말 및 압축벤토나이트의 수분흡인력은 서로 차이가 있었으며, 약 10%의 수분함량을 기준으로 대소관계가 서로 바뀌었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 벤토나이트 완충재의 재포화 예측 및 완충재의 성능 및 안전성에 기초자료로 활용될 것이다.

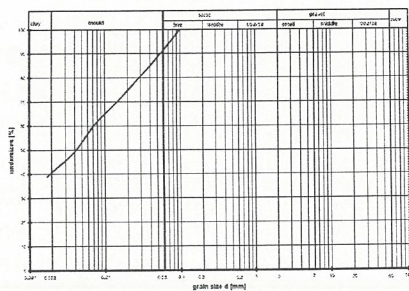


Fig. 1 Particle size distribution of bentonite powder.

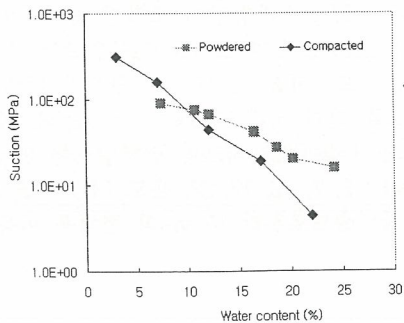


Fig. 3 Water retention curves for powdered and compacted bentonites.

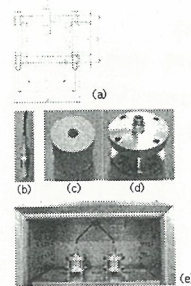


Fig. 2 Experimental apparatus for measuring the relative humidity.

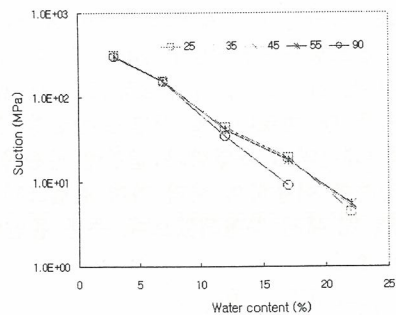


Fig. 4 Effect of temperature on the bentonite-water retention curve.