

불포화 압축 벤토나이트에서의 수확산 및 재포화

Water Diffusion and Resaturation in Unsaturated Compacted Bentonite

고은옥 · 이재완* · 조원진* · 현재혁 · 전관식*

충남대학교 환경공학과

* 한국원자력연구소

ABSTRACT

Experimental studies were carried out to investigate water diffusion in unsaturated compacted bentonite for a landfill of hazardous wastes. Water content distributions were measured and water diffusion coefficients were determined when the dry densities of compacted bentonite were in the range of 1.4 - 1.8 g/cm³. Resaturation times were also calculated to analyze the ability of the compacted bentonite to retard water movement.

The results obtained were as follows: Diffusion model described properly the water migration in unsaturated compacted bentonite. Water diffusion coefficients ranged from 4.30×10^{-6} cm²/sec to 1.93×10^{-6} cm²/sec, and decreased with increasing the dry density. The dry density of compacted bentonite was found to be an important factor to control the resaturation time by water. This study suggests that the domestic compacted bentonite should be a good barrier material against water movement in a landfill of hazardous wastes.

Key word : Water diffusion, resaturation, unsaturated compacted bentonite

I. 서론

지정폐기물의 매립시 폐기물에서 나오는 유해물질로 인하여 주변 토양이나 지하수의 오염이 유발될 수 있기 때문에 이것에 대한 대책이 요구된다. 이 때문에 지정폐기물의 매립장에서는 주위로부터 유입되는 물의 이동을 지연시키고 또한 폐기물로부터 유해물질이 환경으로 유출되는 것을 저지시키기 위해 라이너(liner)를 설치하고 있다. 지정 폐기물 매립장의 라이너 물질로는 여러 가지 천연 또는 인공 물질이 사용되고 있으며, 그 중에서 벤토나이트는 차수능력이 뛰어나고 오염물질에 대한 흡착능이 높을 뿐 아니라 장기적인 안정성이 좋기 때문에 라이너 물질로 널리 사용되고 있다¹⁾.

압축 벤토나이트를 매립장의 라이너로 사용하면 벤토나이트는 폐기물을 매립한 후 일정

기간 동안 불포화 상태로 존재하며, 이 때 압축 벤토나이트의 방벽기능은 수분함량 분포에 크게 좌우된다. 문헌에 의하면²⁾, 불포화 압축 벤토나이트를 통한 물이동은 액체 또는 증기 상으로 이루어지며 주요 이동기구는 확산인 것으로 알려져 있다. 압축 벤토나이트의 수확산 특성은 물과 매질의 물리·화학적 성질 및 라이너의 공학적 조건에 따라 결정되는데, 특히 압축 벤토나이트의 건조밀도는 매립장 설계시 불포화 상태의 물이동과 유해 물질의 유출을 제어하는 중요한 인자로 고려되고 있다.

본 연구에서는 건조밀도가 1.4, 1.6, 1.8 g/cm³인 국산 압축 벤토나이트를 대상으로 수분함량분포를 측정하여 이 매질에서의 수확산 특성을 규명하고자 하였다. 또한, 실험으로부터 얻어진 수확산 계수로부터 벤토나이트의 재포화 시간을 계산하여 차수능력을 분석하였다.

II. 이론적 배경

압축 벤토나이트가 등방성을 갖는 균일 매질로서 물의 확산이 일정한 확산계수를 가지고 1차원적으로 진행된다고 가정할 경우 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \text{①}$$

실험조건을 만족하는 식①의 초기 및 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} C &= C_0, \quad -l < x < l, \quad t = 0 \\ C &= C_s, \quad x = \pm l, \quad t > 0 \end{aligned} \quad \text{②}$$

이 때 C_s 는 물과 접촉하는 압축 벤토나이트 표면에서의 수분함량[수분g/건조벤토나이트g], l 은 x 방향의 압축 벤토나이트 길이[cm]의 1/2을 나타낸다.

압축 벤토나이트내 수분함량을 나타내는 식 ①의 해는 식 ②의 초기 및 경계 조건을 이용하여 풀면 다음의 식으로 주어진다³⁾.

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\{-D(2n+1)^2 t \pi^2 / 4 l^2\} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \quad \text{③}$$

III. 실험

벤토나이트 : 경상북도 경주시 양남면 소재 제 29호 진명광산에서 채취한 벤토나이트로 105℃에서 건조시켜 ASTM standard sieve No. 200을 통과시켰다. 이 벤토나이트는 칼슘 벤토나이트로서 70% 몬모릴로나이트(montmorillonite), 29% 장석(feldspar)과 1% 석영(quartz)을 포함하고 있으며, 양이온교환능(CEC)이 47.7 meq/100g, pH는 9.5이었다⁴⁾.

실험장치 및 방법 : 수확산 실험에 사용된 실험장치는 직경 3cm, 길이 3cm인 2개의

압축셀 양쪽에 플랜지를 끼우고 볼트로 조여 체결한다. 체결된 6개의 장치는 20°C의 항온조에 넣어 실험하며, 이 때 물은 구멍이 뚫린 양쪽 플랜지에 설치된 SUS 금속필터를 통해 압축 벤토나이트로 확산되게 한다. 실험이 시작된 후 1, 2, 3, 7, 15, 41 일 후에 압축셀을 하나씩 꺼내어 0.1 cm간격으로 자른다. 절단된 벤토나이트는 즉시 무게를 재고 오븐에 넣어 105°C에서 24시간 건조후 다시 무게를 재어 그 차이로서 압축 벤토나이트안에 포함되어 있는 수분함량을 구한다.

IV. 결과 및 토의

압축 벤토나이트의 건조밀도가 1.4, 1.6, 1.8 g/cm³일 때 거리에 따른 수분함량분포는 그림 1에 각각 도시하였다. 주어진 건조밀도에서 수분함량은 시간이 지남에 따라 증가하였고, 주어진 시간에서는 건조밀도가 클수록 수분함량이 작았다.

그림 2에서는 수확산모델의 타당성을 보기 위해, 일례로서 15일 경과한 건조밀도 1.4 g/cm³인 압축 벤토나이트의 실험결과와 모델 계산치를 비교하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 제안된 수확산모델은 대부분의 영역에서 실험결과를 잘 만족하고 있으나, 물과 벤토나이트가 접하는 앞부분에서는 실험치가 모델 계산치보다 크게 나타났다. 이것은 먼저 물과 접촉한 압축 벤토나이트의 높은 팽윤압이 충전밀도를 재배열시키기 때문으로 보인다²⁾. 즉, 물과 접촉하는 팽윤부분은 공극률이 더 커지는 반면에, 압축부분(compaction part)은 공극률이 작아져서 물과 접촉하는 부분의 벤토나이트는 과량의 물을 함유하게 된다. 또 부분적으로는 실험장치의 특성상 물과 접하는 벤토나이트 시료 앞부분의 절단시 도입되는 실험오차에 기인한다고 생각할 수도 있다.

압축 벤토나이트를 통한 수확산 계수는 식 ③을 이용하여 실험결과로부터 결정하였다. 결정된 수확산 계수는 건조밀도 1.4 g/cm³일 때 4.30×10^{-6} cm²/sec, 건조밀도 1.6 g/cm³일 때 2.75×10^{-6} cm²/sec이며, 건조밀도 1.8 g/cm³일 때 1.93×10^{-6} cm²/sec의 값을 보였다. 수확산계수는 건조밀도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 압축으로 인한 공극율이나 형상인자의 감소 뿐만아니라 압축 벤토나이트내 공극수의 점도가 증가되기 때문으로 사료된다⁵⁾.

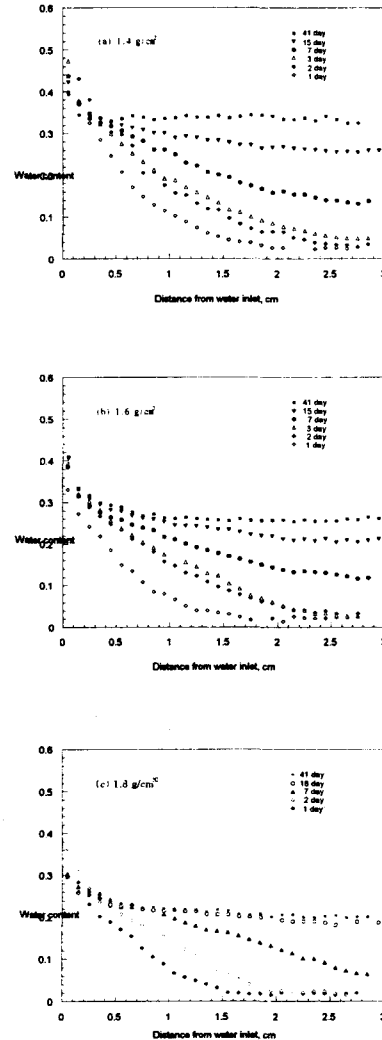


Fig 1. Measured water content in compacted bentonites with various dry densities.

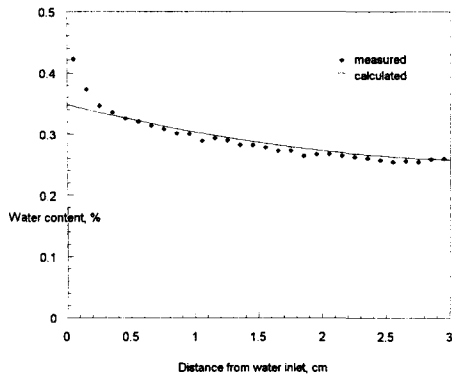


Fig 2. Measured and calculated water content distribution for sample with the dry density of 1.4 g/cm^3 (time = 15 days).

수확산계수를 이용하면 압축 벤토나이트를 재포화시키는데 걸리는 시간을 계산할 수 있다. 재포화시간은 97%이상의 포화도를 갖는 Dt/l^2 의 값으로부터 결정하였다. 압축 벤토나이트의 두께를 50 cm로 가정할 경우 이 벤토나이트가 재포화되는데 걸리는 시간은 건조밀도 1.4 g/cm^3 일 때 26.8 년, 건조밀도 1.6 g/cm^3 일 때 35.0 년 그리고 건조밀도 1.8 g/cm^3 일 때 43.9 년이었다. 이것은 압축 벤토나이트의 건조밀도가 재포화 시간을 효과적으로 제어할 수 있는 변수임을 보여주고 있다.

V. 결론

불포화 압축 벤토나이트에 대한 수확산 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 불포화 압축 벤토나이트를 통한 물의 이동은 확산모델에 의해 묘사될 수 있었다.
2. 압축 벤토나이트의 건조밀도가 $1.4 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 일 때 수확산계수는 $4.30 \times 10^{-6} \sim 1.93 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 값을 보였으며 건조밀도가 증가할수록 감소하였다.
3. 압축 벤토나이트의 건조밀도는 재포화시간을 제어하는 중요한 변수이었으며, 실험에 사용된 국산 압축 벤토나이트는 처분장이나 매립장에 적용할 경우 좋은 차수재 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) D. E. Daniel, Hydraulic Conductivity & Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM, 1994
- 2) L. Borgesson, Water Flow and Swelling Pressure in Non-saturated Bentonite-based Clay Barriers, Engineering Geology, 21, pp.229~237, 1985
- 3) J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, 1975
- 4) J. O. Lee, W. J. Cho, K. S. Chun, Swelling Pressures of a Potential Buffer Material for

- High-Level Waste Repository, J. Kor. Nucl. Soc., 31(2), 1989
- 5) S.C.H. Cheung et al. Hydraulic and Ionic Diffusion Properties of Bentonite-Sand Buffer Materials, Coupled process associated with nuclear waste repositories, Academic Press, pp.393~407,1987
 - 6) J.H. Westsik Jr., Water Migration through Compacted Bentonite Backfills for Containment of High-Level Nuclear Waste, Nuclear and Chemical Waste Management, Vol. 4, pp.291~299, 1983