

# The Method for Evaluating Unsaturated Hydraulic Conductivity of the Bentonite-buffer Using Relative Humidity

## 상대습도를 이용한 벤토나이트 완충재의 불포화 수리전도도 평가방안

Hang-Bok Lee\*, Jin-Seop Kim, Young-Chul Choi, Heui-Joo Choi, and Kyungsu Kim  
Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

이항복\*, 김진섭, 최영철, 최희주, 김경수  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received October 28, 2013 / Revised January 8, 2014 / Approved January 9, 2014)

Unsaturated hydraulic conductivity of the bentonite-buffer was evaluated using the relative humidity data. The method for calculating unsaturated hydraulic conductivity was deduced from the general analytical equation representing the movement of water in unsaturated media, which was applied to the experimental results of water infiltration tests for identifying the behavior of unsaturated hydraulic conductivity according to the water saturation. Unlike the saturated condition, the hydraulic gradient and water flux were irregularly changed, and the unsaturated hydraulic conductivity was increased with increasing the experimental time. Swelling of bentonite grains due to the water absorption increased the volume and size of pore within bentonite, resulting in the increase of water velocity and unsaturated hydraulic conductivity. This result suggested the necessity of further investigation on the correlation between the swelling degree of bentonite-buffer and unsaturated hydraulic conductivity. The method used in this study can be useful technique for evaluating long-term hydraulic performance of bentonite-buffer in the radioactive waste disposal system.

**Keywords:** Unsaturated hydraulic conductivity, Relative humidity, Bentonite-buffer, Long-term hydraulic performance

상대습도 데이터를 이용하여 벤토나이트 완충재 블록의 불포화 수리전도도 변화를 평가하였다. 불포화 매질에서의 물의 흐름을 나타내는 일반적인 분석해를 통해 상대습도를 통한 불포화 수리전도도 계산방안을 도출하였고, 이를 실제 수행한 실내 물 유입 실험 결과에 적용하여 포화가 진행됨에 따라 변화하는 완충재 불포화 수리전도도 양상을 확인하였다. 일반적인 포화 상태와는 확연히 다르게 수두 구배와 물의 유출량이 시간에 따라 불규칙하게 변화하는 결과를 나타냈으며, 벤토나이트 완충재의 불포화 수리전도도는 시간에 따라 증가하는 경향을 보였다. 수분 흡수로 인한 벤토나이트 입자 팽창 때문으로 인한 매질 내 공극의 파괴 및 크기 확대가 불포화 수리전도도값의 증가를 야기하는 것으로 판단되었고, 이러한 결과는 완충재 블록의 팽창 정도와 수리전도도의 상관성에 관한 추후 연구의 필요성을 제시하였다. 본 연구에서 수행된 불포화 수리전도도 평가 방안은 방사성폐기물 처분 시 완충재의 장기적인 수리학적 성능평가에 유용한 기술로 사용될 수 있을 것이다.

**중심 단어:** 불포화 수리전도도, 상대습도, 벤토나이트 완충재, 장기간 수리학적 성능

\*Corresponding Author.

Hang-Bok Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: hblee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4909

## 1. 서론

방사성폐기물처분장에서 완충재는 공학적방벽의 중요한 구성요소 중 하나로서, 주위 암반으로부터 지하수 유입을 최소화하고, 지하수에 의해 용해된 핵종이 폐기물로부터 유출되는 것을 방지하며, 외부의 역학적 충격으로부터 폐기물과 처분용기를 보호하는 역할을 수행한다. 우리나라뿐만 아니라 일본 및 유럽의 처분 선진국에서도 완충재 물질로 벤토나이트를 사용하고 있다[1,2]. 처분장에서 벤토나이트 완충재는 방사성폐기물로부터 발생하는 붕괴열, 주위 암반으로부터의 지하수 유입 및 완충재로 사용된 압축벤토나이트 자체로부터 발생하는 높은 팽윤압에 의해 크게 영향을 받기 때문에 처분장의 성능 및 안전성 평가를 위해서는 열-역학-수리 특성에 관한 지표 데이터의 획득이 필요하다[3].

완충재 블록의 열적 특성은 처분된 폐기물로부터 발생되는 붕괴열을 주위 암반으로 신속히 발산시켜, 폐기물고화체, 처분용기 및 완충재의 온도가 설정된 최고온도를 넘지 않도록 하는데 중요한 역할을 한다. 이를 위해서 완충재의 온도는 100℃ 이하로 유지되어야 한다는 기준을 가지고 있고, 이는 완충재 내부에 설치된 온도 센서를 통해 실시간으로 측정될 수 있다[4]. 또한 완충재가 방벽재로서 밀봉역할을 제대로 하기 위해서는 팽윤능이 커야하지만 다른 한편으로는 처분용기와 주위 암반에 과도한 부하를 주지 않도록 팽윤압이 적정하게 유지되어야 한다. 그 기준은 2 MPa 이상 15 MPa 이하로 제시되고 있으며 압력 센서를 이용해 장기간 모니터링이 가능하다[5]. 마지막으로 방사성폐기물처분장에서 완충재의 가장 중요한 요구사항은 수리전도도가 가능한 낮아야 한다는 것이며 그 기준은  $10^{-12}$  m/s 이하 유지를 목표로 하고 있다[5]. 수리전도도가 높아 지하수의 유입이 용이하게 되면 완충재가 차수방벽의 역할을 제대로 수행할 수 없기 때문이다. 대부분의 벤토나이트의 수리전도도 관련 실험과 연구는 포화 상태에서 수행되었고, 실시간으로 포화 정도에 따라 변화하는 불포화 상태 수리전도도 평가방안에 대한 논의는 거의 없는 실정이다[6]. 온도와 팽윤압과는 달리 완충재의 수리전도도는 직접적으로 측정할 수 없는 데이터이므로, 측정이 용이한 다른 물리량을 통해서 완충재 내의 불포화 수리전도도를 정확하게 평가할 수 있는 효율적인 방안이 필요하다.

본 연구에서는 상대습도센서를 이용하여 시간에 따른 벤토나이트 완충재블록의 불포화 수리전도도를 평가하는 방법에 대해 살펴보았다. 우선 상대습도 데이터와 불포화 수리전도도의 상관관계를 이론적으로 살펴 본 후, 실제 수행한 실

내실험 자료를 활용하여 상대습도를 통한 불포화 수리전도도 값을 계산해보았다. 이를 통해 물의 포화가 진행됨에 따라 변화하는 벤토나이트 완충재 블록의 수리학적 특성을 판단하였고, 이는 향후 처분실중실험과 현장 처분에서 완충재의 장기적인 차수성능 모니터링 방안으로 제시되었다.

## 2. 이론적 배경

지하수의 수리전도도는 포화 상태에 따라 Darcy's law로 표현되는 포화 수리전도도와 Richard's equation의 형태로 평가되는 불포화 수리전도도로 나눌 수 있다[7,8].

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \quad (2)$$

식 (1)은 포화 수리전도도를 나타내는 것으로  $q$ 는 물의 유량(water flux),  $K$ 는 포화 수리전도도(hydraulic conductivity),  $h$ 는 총 수두(total head),  $x$ 는 거리를 의미한다. 포화대에서 수리전도도는 지하수 유량과 수두 구배에 따라서 결정되는 것으로 변하지 않는 고정된 값을 보인다. 식 (2)은 불포화 수리전도도로서 이는 함수비에 따라 변화하는 값으로, 시간에 따른 함수비의 변화와 거리에 따른 포텐셜의 변화에 의해 결정되며,  $\theta$ 는 함수비,  $t$ 는 시간,  $x$ 는 수평거리,  $K(\theta)$ 는 불포화 수리전도도(unsaturated hydraulic conductivity),  $\phi$ 는 포텐셜구배를 나타낸다. 포텐셜구배는 중력, 삼투력, 유체의 응집력과 표면장력에 의한 매트릭 포텐셜로 이루어져 있고 불포화대에서는 주로 흡입력(suction pressure)값을 의미한다. 벤토나이트 완충재 내부는 불포화 상태이기 때문에 수리전도도를 평가하기 위해서는 이 Richard's equation을 이용해야 한다. 완충재 불포화 수리전도도 식 유도 과정을 간단히 살펴보면, 먼저 연속방정식 개념에 의해서 식 (3)에 나타나는 것처럼 일정 도메인 내에서 입구에서 출구로의 수평적 유량 변화는 동일 부피 내 시간에 따른 포화도의 변화와 일치한다.

$$-\frac{\Delta q}{\Delta x} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \rightarrow -\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

앞의 연속방정식에 의해 유도된 관계식 (3)을 Darcy's

law에 대입하면 다음의 식 (4)과 같이 표현되고,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \frac{\partial h}{\partial x} \right] \quad (4)$$

총 수두는  $h=z+\varphi$ 인데, 수평방향의 경우 높이의 변화가 없고, 이 때 K는 함수비에 따라 변화하는 값으로 표현된다. 완충재 블록이 원통형의 모양으로 바깥쪽으로부터 중심을 향해 지하수의 흐름이 발생하기 때문에 수평거리 x는 반지름의 길이 r로 대체되어, 최종적으로 식 (5) 형태의 원통형 벤토나이트 완충재의 불포화 수리전도도 평가 식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ K(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] \quad (5)$$

### 3. 상대습도를 이용한 불포화 수리전도도 평가 과정

불포화 수리전도도를 구하기 위해서는 수리 수두구배 값과 시간에 따른 함수비의 변화 값이 필요하다. 먼저 식 (6)에 나타난 Kelvin's law를 이용하여 실험을 통해 측정할 수 있는 데이터인 상대습도 값을 흡입력으로 변환시켜줄 수 있다 [9].

$$s = - \left( \frac{\rho_w RT}{M_w} \right) \ln \left( \frac{RH}{100} \right) \quad (6)$$

s는 흡입력(suction pressure)를 의미하고, R은 보편기체 상수로서 8.31432 J/ml K의 값을 가지고, T는 절대 온도를 나타내며,  $M_w$ 은 수증기의 분자량으로 18.016 g/mol의 값이고,  $\rho_w$ 는 물의 밀도 1000 kg/m<sup>3</sup>이고, RH는 상대습도 값을 나타

낸다. 이를 통해 시간과 위치에 따른 흡입력 분포 곡선을 구할 수 있고, 각 측정 지점에서 접선을 연장하였을 때의 기울기를 계산하면 거리 변화에 따른 흡입력의 변화 즉 압력 수두 구배 값을 얻을 수 있다. 불포화 상태에서는 흡입력을 통한 압력 수두가 수리 수두를 의미하기 때문에 각 위치에서 시간에 따른 수두구배  $\frac{\partial \varphi}{\partial r}$  을 도출해 낼 수 있다.

다음으로 불포화 조건 하에서 물의 유량 변화는 서로 다른 위치에서 시간에 따른 함수비의 변화를 통해 산출해낸다. 그러므로 최소 두 지점 이상의 위치에서 상대습도 측정데이터가 필요하고, 그 개수가 많아질수록 매질 내에 보다 정밀한 수리전도도 계산이 가능해진다. 흡입력(suction pressure)과 함수비(water content)의 관계를 나타내는 아래 수분 보유 곡선식 (water retention curve)을 이용하여 시간에 따른 함수비 차이를 계산한다[10].

$$\theta = \left[ \frac{1}{1+(0.026 \times s)^{1.42}} \right]^{0.29} \quad (7)$$

위 식은 실험에 의해 얻어진 경험식으로서 매질의 특성에 따라 관계가 변화하기 때문에 반드시 실험에 사용되는 것과 같은 매질에서의 실험식이 필요하다. 이를 통해 계산된 각 시간 차이에 의한 함수비의 변화와 해당되는 완충재의 부피를 합산하여 시간에 따른 각기 다른 위치에서 완충재 내의 유량 (water flux) 변화  $\frac{\partial \varphi}{\partial r}$  을 구한다. 이렇게 구해진 수리 수두구배 값과 유량 변화 값을 불포화 수리전도도 평가 식 (5)에 적용하여 최종적으로 시간이 경과되면서 벤토나이트 포화가 진행됨에 따라 변화하는 수리전도도를 계산하게 된다. 위에서 설명한 일련의 불포화 수리전도도 평가 과정들은 Fig. 1에 표현되어 있다.

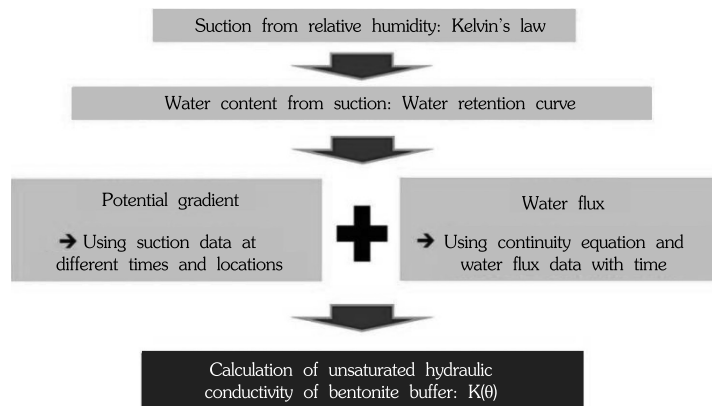


Fig. 1. Evaluation process of unsaturated hydraulic conductivity.

Table 1. Chemical composition of Kyeongju bentonite

Chemical constituents	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	FeO	SO <sub>3</sub>	MnO
Weight %	56.80	19.96	6.03	2.59	0.77	0.93	1.25	0.15	1.28	0.04

## 4. 검증 실험

### 4.1 벤토나이트 완충재 블록 특성

본 실험에서 완충재로서 사용된 벤토나이트는 경북 경주시 양남면 소재 진명광산에서 채취한 것으로 몬모릴로나이트 70%, 장석 29%, 석영 ~1%의 구성비율을 가졌으며, 화학 조성은 Table 1과 같다 [11]. 대부분 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 차지하였고, CaO는 NaO보다 높은 구성비율을 나타내고 있다. 블록은 추후 현장실증실험에 적용될 것을 고려하여 디스크 형태와 도넛 형태로 직경 25 cm, 높이 4.3 cm로 제작되었고, 본 실험에서는 디스크 형태의 블록만을 사용하였다(Fig. 2). 물리적 성질로는 방사성폐기물처분장에 적합한 완충재 성능 기준 중 보수적인 기준을 만족하는, 비중 2.74, 초기수분함량 13.80wt%, 건조밀도 1.6 Mg/m<sup>3</sup>, 공극률 0.42의 값을 나타냈다 [12].

벤토나이트 완충재의 수리학적 작용과 중요하게 연관되는 수분보유곡선 (water retention curve)을 다음과 같이 구하였다(Fig. 3). 이는 앞선 식 (7) 에 관계식으로 도출되어 표

현되어 있고, 수분함량 (water content) 과 흡인력 (suction pressure) 의 상관관계를 나타내는 것으로서 매질에 따라 각기 다른 수분흡인특성을 보인다. 일반적으로 벤토나이트의 흡인력은 수분함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 온도에는 크게 영향을 받지 않는다[3].

### 4.2 실험장치

벤토나이트 완충재 블록의 불포화 수리전도도를 평가하기 위해 간단한 형태의 물 주입 실내실험이 수행되었다(Fig. 4). 2개의 디스크 형태 벤토나이트 블록 안에 3개의 상대습도 센서를 수직적으로 설치하고, 그 틈새는 벤토나이트 파우더를 이용해 밀봉하였다. 블록의 맨 윗부분과 아랫부분은 실리콘 처리하여 오직 블록 옆면을 통한 수평적 물의 유입만을 유도하였다. 조립된 벤토나이트 블록은 스틸 수조 안에 위치시켰으며, 나머지 부분을 모래로 채움으로써 블록 내부로 물이 천천히 유입되도록 하였다. Fig. 5에 보이는 것처럼 상대습도 센서는 완충재 블록 바깥 벽면으로부터 4 cm (채널: Ch 1), 8 cm (채널: Ch 2), 12 cm (채널: Ch 3)의 거리에 삽입되

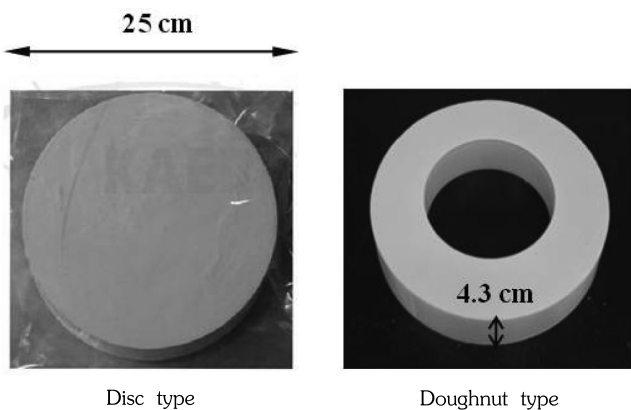


Fig. 2. Compacted bentonite block.

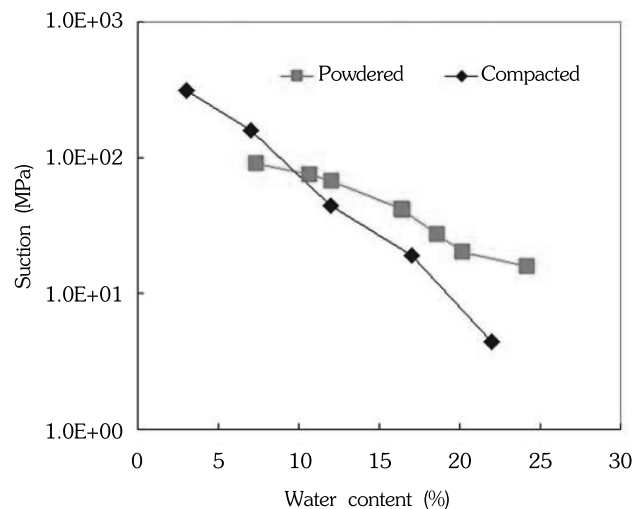


Fig. 3. Water retention curve of Kyeongju bentonite.



있으며, 센서가 일렬로 위치할 경우 인접하여 발생할 수 있는 물의 유입 및 방해 문제를 예방하기 위해 120° 분포로 세 개의 센서가 가장 멀리 떨어질 수 있게 설계하였다 (Fig. 5).

Fig. 6은 실험에 사용된 상대습도 계측 센서와 데이터 획득 시스템을 나타내고 있다. 실험에 사용된 상대습도 센서는 PcMin52로 바디부분은 스틸 재질로 이루어져 있으며 온도와 습도가 동시에 계측되고,  $\pm 2\%$ 의 습도 계측오차를 가진

다. 센서 길이는 8 cm, 지름은 1.2 cm이며 매우 적은 파워를 소비하고, 세팅 하는데 걸리는 시간이 짧은 장점을 지니고 있다. 센서는 데이터 획득 시스템에 연결되어 실시간으로 습도와 온도 데이터가 저장되고, 샘플링 구간과 범위 조절이 가능하고 데이터 값들은 모두 전기신호 (V)로 표시된다. 전원을 공급하는 전원 공급 장치가 필요하며, 데이터는 USB (Universal Serial Bus)를 통해 엑셀 파일의 형태로 나타나 추

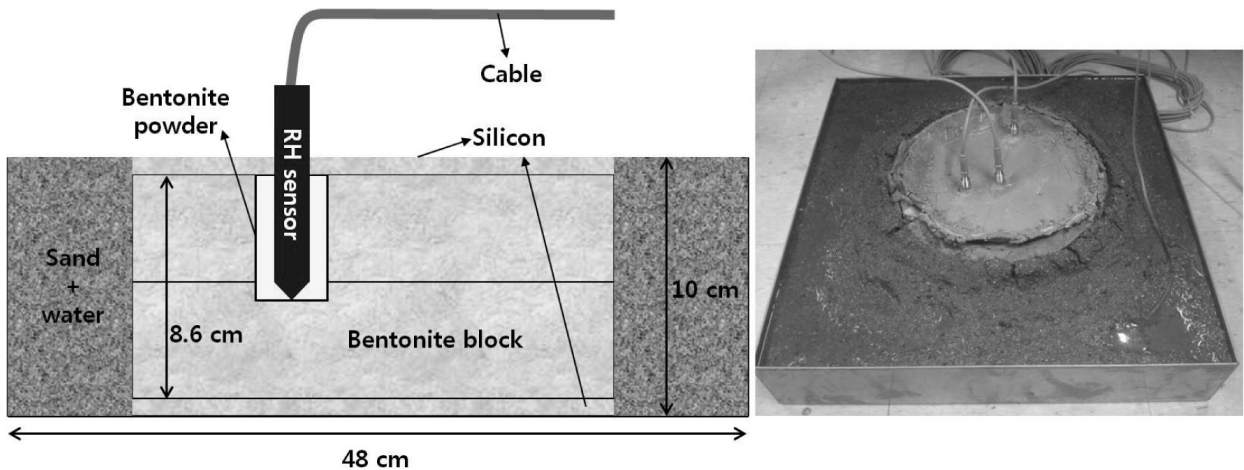


Fig. 4. Schematic diagrams of the water infiltration test.

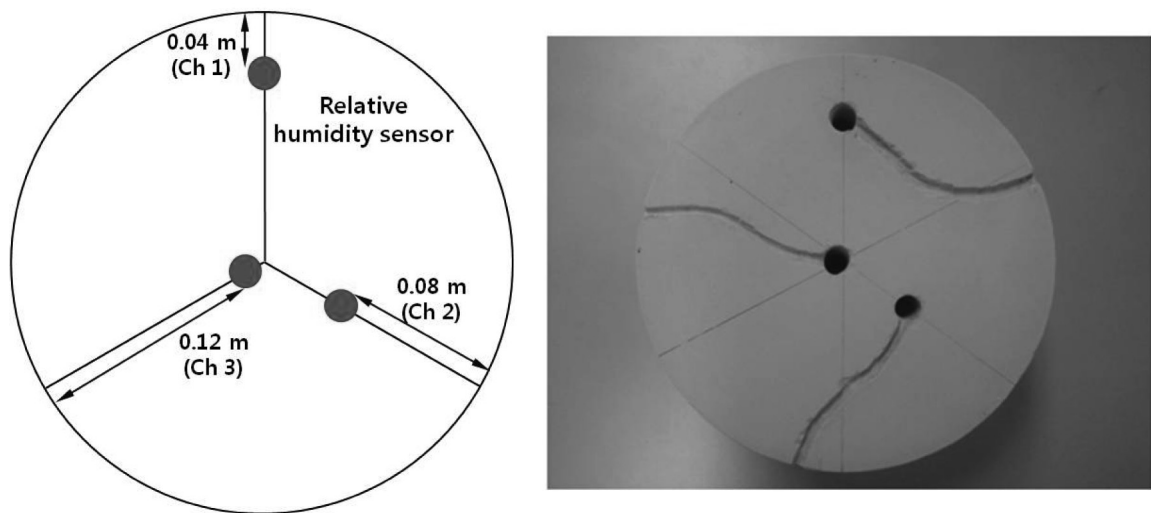


Fig. 5. Installation of relative humidity sensors in bentonite block.

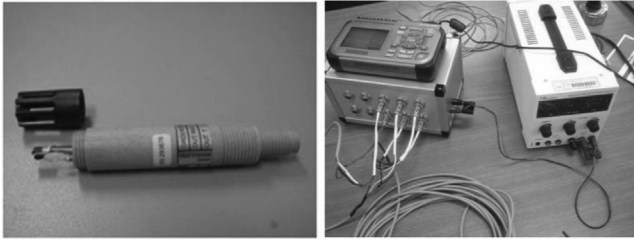


Fig. 6. Relative humidity sensor and data acquisition system.

후 컴퓨터를 이용한 데이터 정리 작업을 용이하게 한다. 또한 다채널의 형태로 한번에 10개까지 센서가 연결되어 동시다발적인 데이터 획득이 가능하다.

### 4.3 실험결과

Fig. 7은 각기 다른 위치에서 시간에 따른 상대습도 변화를 나타내고 있다. 세 위치에서 모두 56%정도의 동일한 초기 상대습도 값을 보였고, 가장 바깥쪽에 위치한 Ch 1센서의 경우 물이 주입된 지 약 15일 후에 완전 포화되는 것을 관찰하였고, 보다 안쪽에 위치한 Ch 2와 Ch 3은 물 주입 후 22일이 지나 시험이 종료될 때까지 각각 88%, 82%의 상대습도 증가를 보였다. Ch 1은 상대습도 값이 초기부터 꾸준히 증가하는 모습을 보이는 반면, Ch 2와 Ch 3은 실험시작 후 2-3일 정도까지 상대습도가 감소했다가 그 이후 계속 증가하는 경향을 보였다. 이는 실험실 배경 습도의 영향으로 판단되고, 블록 바깥쪽은 물의 포화에 바로 반응을 보이지만 안쪽으로 갈수록 서서히 변화되기 때문에 실험 시작 전 드라이 상태의 완충재 블록 상대습도 평형 모니터링을 통해 초반 상대습도 데이터의 이상저감을 방지하는 작업이 필요하다.

실내실험을 통한 벤토나이트 완충재 내 시간에 따른 상대습도 변화 데이터와 불포화 수리전도도 분석해를 이용하여 불포화 수리전도도를 다음과 같이 평가하였다. Fig. 8은 상대습도 데이터로부터 얻어진 시간에 따른 각기 다른 위치에서의 흡입력 변화를 보여주고 있다. 시간이 지나면서 물의 포화가 진행됨에 따라 벤토나이트 완충재가 물을 흡수하는 능력인 흡입력 값은 점차 감소하게 된다. 바깥쪽에 위치한 센서일수록 상대적으로 포화가 빠르고 높은 상대습도 값을 나타내며 이에 따라 작은 흡입력 값을 갖게 된다. 유도된 흡입력 분포에서 각기 다른 시간의 각 위치 별 (4 cm, 8 cm)

위치에서의 점선의 기울기를 계산하면 Fig. 9에 나타난 것처럼 각 위치에서 모두 시간에 따라 수두 구배 값이 계속 변화하는 형태를 얻을 수 있고, 이를 통해 일정한 값을 나타내는 포화대와는 다른 불포화상태의 수두 구배 양상을 확인할 수 있다. Fig. 10은 시간에 따른 각기 다른 위치에서 완충재 내의 유량 (water flux) 변화를 보여주고 있다. Ch 1 (4 cm)의 경우에는 시간이 경과함에 따라  $1.63 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  에서 변화하면서  $4.99 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  까지 유량이 증가하였고, Ch 2 (8 cm)의 경우에도 초기  $3.39 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  의 유량 값에서  $1.47 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  로 증가하는 경향을 보였다. 포화 상태에서는 유량이 일정하게 시간에 따라 변화하지 않지만, 완충재 내 불포화 상태에서는 유량이 시간에 따른 함수비 차이에 의해 평가되므로, 포화가 진행됨에 따라 지속적으로 변하는 함수비로 인해 완충재 내 유량도 불규칙한 형태를 나타낸다.

위와 같이 구한 시간에 따른 완충재 내 수리수두구배 변화와 유량 변화 값을 불포화 수리전도도 평가 식에 적용하여 최종적으로 Fig. 11에 나타나는 시간에 따른 각기 다른 위치에서 불포화 수리전도도 변화 양상을 확인할 수 있다. Ch 1 (4 cm)에서는 초기 수리전도도  $1.11 \times 10^{-14} \text{ m/s}$  에서 포화가 마무리 되어감에 따라  $9.85 \times 10^{-14} \text{ m/s}$  로 약 9배 정도 상승하였으며, Ch 2 (8 cm)에서는  $3.39 \times 10^{-15} \text{ m/s}$  에서  $1.47 \times 10^{-14} \text{ m/s}$  로 약 5배 정도의 수리전도도 증가를 나타냈다. 이 같은 포화도 증가에 따른 벤토나이트 완충재의 수리전도도 증가 현상은 매질의 미세 구조와 연관 지어 생각해 볼 수 있다. Cui [13] 등의 연구자들은 수은공극측정기와 주사전자현미경을 이용하여 벤토나이트 매질이 수분을 흡수함에 따라 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 그들은 벤토나이트 내부가  $0.35 \mu\text{m}$  의 큰 공극과  $0.025 \mu\text{m}$  의 미세 공극으로 이루어져 있음을 확인하였다. 벤토나이트 입자는 물을 흡수함에 따라 부풀어 오르면서 팽창하게 되는데 이를 팽창 (swelling) 현상이라 하고, 벤토나이트가 일정 부피 틀 안에 갇혀서 팽창을 제한 받게 될 경우에는 공극들의 크기와 부피가 점차 줄어들어 궁극적으로는 거의 사라지게 된다. 그러나 팽창이 지속적으로 자유롭게 일어날 수 있는 상황에서는 벤토나이트 입자 팽창에 따라 크고 작은 공극들의 부피가 함께 증가하여, 결론적으로 벤토나이트를 통한 물의 흐름속도와 수리전도도 증가를 야기하게 된다. Fig. 12에 보이는 것처럼 본 실내실험은 완충재 블록을 강제적인 틀 안에 설치하지 않고 주변에 모래를 채웠기 때문에, 벤토나이트가 계속 팽창하여 블록 반지름의 크기가 12.5 cm에서 15 cm 이상으로 증가하고 또한 내부가 갈라지면서 다양한 틈새를 만들었다. 이렇게 발생한 틈

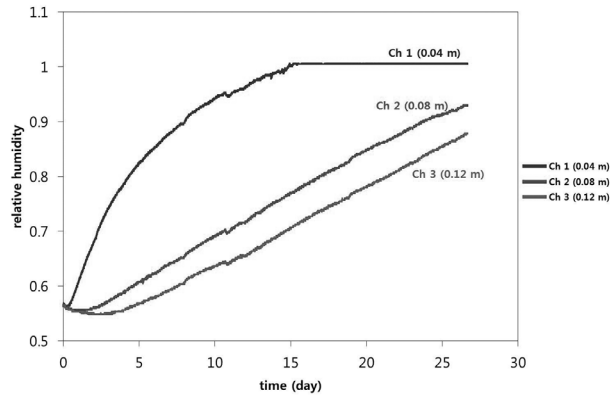


Fig. 7. Relative humidity changes versus time for water infiltration test.

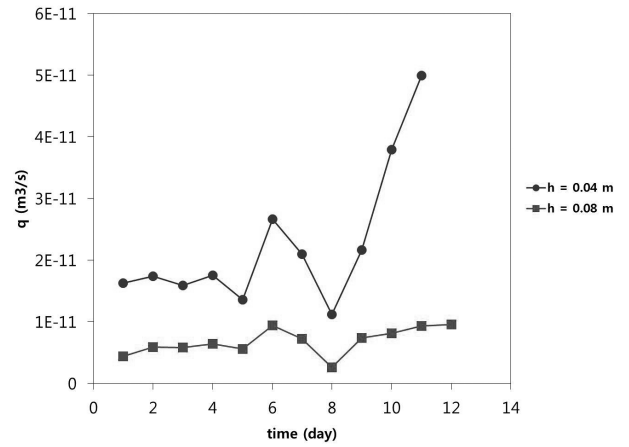


Fig. 10. Evolution of water flux during infiltration.

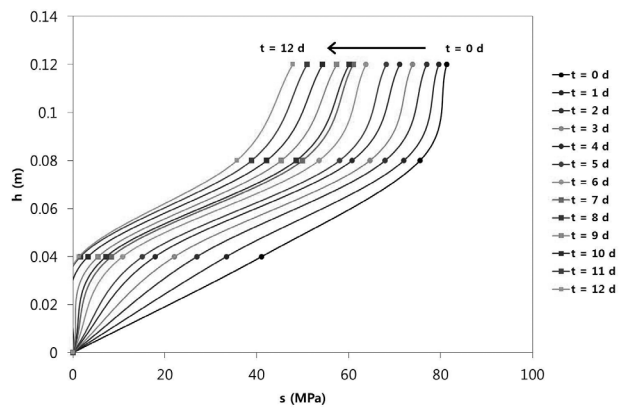


Fig. 8. Suction profile at different times.

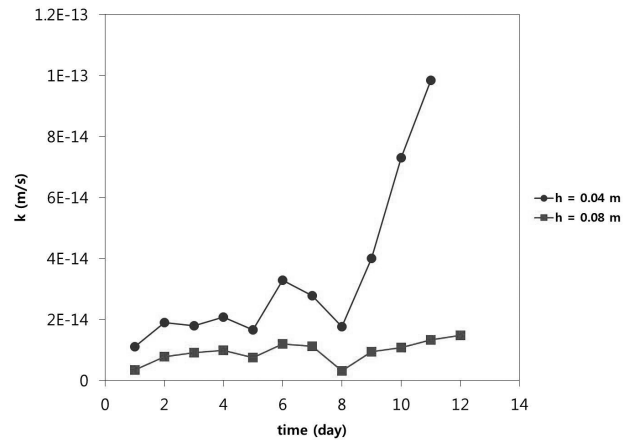


Fig. 11. Hydraulic conductivity versus time at different locations.

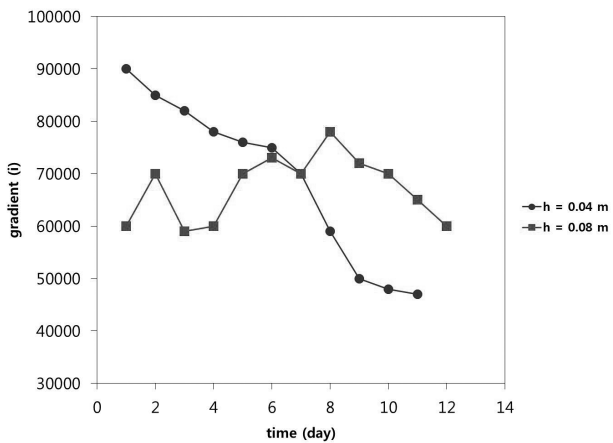


Fig. 9. Evolution of hydraulic gradient during infiltration.

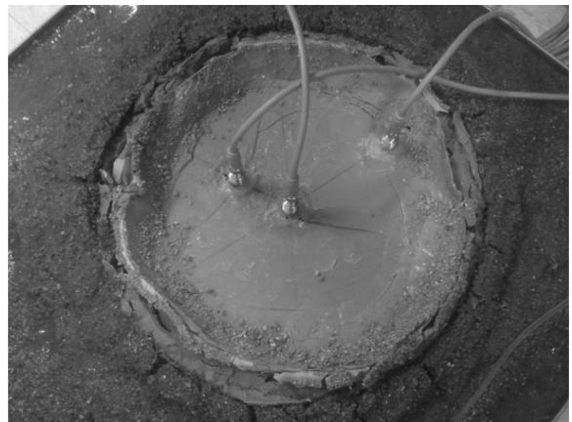


Fig. 12. Swelling of bentonite-buffer.

새와 커진 공극들을 통해 외부의 물이 더 빠르게 유입되어 시간이 지나고 포화가 진행됨에 따라 불포화 수리전도도가 증가하는 경향을 나타내게 된 것이라 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구를 통해 상대습도 데이터를 이용하여 벤토나이트 완충재 블록의 불포화 수리전도도 변화를 평가하였다. 실내 물 유입 실험을 통해 각기 다른 위치에서 시간에 따른 상대습도 변화 값을 획득하였고, 이를 불포화 수리전도도 평가 분석해에 적용시켜 수리전도도를 계산하였다. 포화 상태와는 다르게 시간에 따라 변화하는 수두 구배와 유량 변화 양상을 나타냈으며, 불포화 수리전도도는 두 위치에서 모두 포화가 진행됨에 따라 증가하는 현상을 확인하였다. 이는 수분 흡수로 인한 벤토나이트 입자 팽창으로 인해 매질 내 공극의 부피와 크기가 증가함에 따라 발생하는 변화로 판단되었다.

벤토나이트 블록 팽창의 제한 여부에 따라 물의 유입 정도와 수리전도도 변화 양상이 변화할 수 있고, 이는 완충재가 처분공 안에 어느 정도 크기로 설계되고 위치하는 지와 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 벤토나이트 블록이 자유롭게 팽창할 수 있는 조건에서 수행한 본 연구와 더불어, 변형되지 않는 일정 틀 내에서 벤토나이트 팽창을 제한하는 실험을 준비 및 진행 중에 있다. 이러한 다양한 조건에서의 벤토나이트 불포화 수리전도도 평가는 추후 폐기물 처분사업에서 완충재의 수리학적 차폐능력 검토와 장기모니터링에 유용하게 활용될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

[1] Power Reactor and nuclear fuel development corporation, "Research and development on geological disposal of high level radioactive waste", PNC TN1410 93-059 Tokai, Japan (1992).

[2] H. Coulon, A. Lajudie, P. Debrabent, R. Atabek, M. Jordia, and R. Andre Japan, "Choice of French clays as engineered barrier components for waste disposal", Scientific Basis for Nuclear Waste Management, pp. 813-824 (1987).

[3] J.O. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Thermal-hydro-mechanical properties reference bentonite buffer for a Korean HLW repository", Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 21(4), pp. 264-273 (2011).

[4] J.W. Choi, H.J. Choi, and J.Y. Lee, HLW Disposal System Development, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/RR-2765/2006 (2006).

[5] W.J. Cho, J.O. Lee, K.S. Chun, and H.S. Park, "Analysis of Functional Criteria for Buffer Material in a High-level Radioactive Waste Repository", Journal of the Korean Nuclear Society, 31(1), pp. 116-132 (1999).

[6] W.J. Cho, J.O. Lee, and C.H. Kang, "Hydraulic conductivity of compacted soil-bentonite mixture for a linear material in landfill facilities", Environmental Engineering Research, 7(3), pp. 121-127 (2002).

[7] H. Darcy, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris (1856).

[8] L.A. Richards, "Capillary conduction of liquids through porous mediums", Physics, 1(5), pp. 318-333 (1931).

[9] D.G. Fredlund and H. Rahardjo, "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons Inc., NY, p. 517 (1993).

[10] J.O. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Suction and water uptake in unsaturated compacted bentonite", Annals of Nuclear Energy, 38, pp. 520-526 (2011).

[11] J.H. Lee, M. Lee, H.J. Choi, and J.W. Choi, "Temperature Effect on the Swelling Pressure of a Domestic Compacted Bentonite Buffer", Journal of the Korean Nuclear Society, 8(3), pp. 207-213 (2010).

[12] Korea Atomic Energy Research Institute, Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository, KAERI Technical Report, p.33, KAERI/TR-3729/2009 (2009).

[13] Y.J. Cui, C. Loiseau, and P. Delage, "Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction



controlled hydration. In: Juca, J.F.T., de Campos, T.M.P., Marinho, F.A.M. (Eds.)", Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, pp. 593-598, Recife, Brazil (2002).