

## An Analysis of the Water Saturation Processes in the Engineered Barrier of a High Level Radioactive Waste Disposal System

### 고준위폐기물 처분시스템 공학적 방벽에서의 지하수 포화공정 해석

Jeong Hwa Park<sup>1)</sup>, Jae-Owan Lee and Sangki Kwon

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yuseong-gu, Daejeon

박정화<sup>1)</sup>, 이재완, 권상기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received December 01, 2010 / Revised December 30, 2010 / Approved January 16, 2011)

#### Abstract

An engineering scale test, which is called KENTEX, was carried out to understand and to analyze the coupled thermal, hydrological and mechanical phenomena in the engineered barrier system(EBS) of Korean reference disposal system. Using the experimental data obtained from KENTEX, the water saturation processes in bentonite could be analyzed. From the comparison between the model calculation using ABAQUS and the experimental results, the difference of the water content between them in the unsaturating part was large because the drying phenomena due to moisture redistribution by the temperature gradient could not be included in the model. In the saturating part, the difference of the water content between them was decreased gradually and showed to be small in the full saturation. And the time of about 95% saturation could be estimated about 500 days from the model calculation and experimental results. Also it could be known that the moisture redistribution in the unsaturated part could not be affected on the saturation time of bentonite in the repository. Therefore, it is considered that this model could be used to quantitatively predict the water saturation time in bentonite as EBS for the disposal system.

**Key words** : Saturation Processes, Engineered Barrier, Bentonite Buffer, Coupled THM, Disposal System, KENTEX

#### 요약

한국형 기준 처분시스템의 공학적 방벽에서의 열-수리-역학 복합 현상을 실증하기 위한 공학적 규모 실증실험 장치인 KENTEX에서 얻은 열, 수리, 역학적 실험 데이터를 이용하여 벤토나이트의 포화공정을 해석하였다. ABAQUS를 사용한 모델계산의 함수율과 실험 결과의 비교에서 불포화 영역에서는 온도상승으로 인해 초기 수분이 감소하는 수분 재분포 공정을 모델에 포함시키지 않아 함수율의 차가 컸다. 포화 영역에서는 실험에서 초기 수분보다 낮은 함수율에서부터 지하수로 포화가 진행되지만 모델과 실험에서 얻은 함수율 값의 차이가 점점 감소해 완전포화에 도달할 때에는 두 함수율 값이 거의 비슷한 결과를 보여주었다. 포화도 약 95%에 이르는 시간은 실험결과와 계산 결과가 서로 비슷한 약 500일 정도로 예측할

1) Corresponding Author. E-mail : njhpark@kaeri.re.kr

수 있었다. 그리고 불포화 영역의 수분 재분포가 벤토나이트의 완전포화에 도달하는 시간에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 본 해석기법을 사용하면 지하처분연구시설의 완충재인 벤토나이트의 포화시간을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

**중심단어** : 포화공정, 공학적 방벽, 벤토나이트 완충재, 열-수리-역학 복합현상, 처분, 실증실험

## I. 서론

고준위폐기물 처분장에서는 처분용기로부터 유출된 핵종이 생태계로 이동하는 것을 지연시키기 위해 공학적 방벽과 천연 방벽으로 구성된 다중방벽 시스템 개념을 채택하고 있다. 공학적 방벽(engineered barrier system, EBS)은 처분용기, 완충재, 되메움재로 구성되는데 이들은 고준위 폐기물에서 방출하는 열, 심부지하로부터 침투되는 지하수, 지층 하중 등의 영향을 받고 있다. 특히 지하수 침투를 지연시키는 벤토나이트 완충재에서는 열팽창, 확산, 지하수 흐름, 변형, 팽윤 등의 현상들이 서로 복잡하게 영향을 주며 일어난다. 처분장에서 벤토나이트는 초기에 열로 인해 건조가 일어나지만 시간이 경과함에 따라 지하수 침투로 인해 포화되는 공정을 거치게 되는데 이 포화되는 공정거동은 열, 수리 및 역학 현상을 해석하는 THM 복합공정(Thermo-hydro-mechanical coupled processes)을 해석함으로써 예측할 수 있다. 공학적 방벽인 완충재뿐만 아니라 주변의 단열암반을 포함하는 시스템에 대한 THM 복합공정에 대해서는 국제적으로 DECOVALEX 프로젝트등과 같은 국제공동연구가 추진되어왔다[1].

한국형 기준 처분시스템(Korea reference disposal system, KRS)은 2002년도에 고준위폐기물 처분연구 결과로 제시되었는데 처분용기, 완충재, 되메움재로 구성되는 공학적 방벽 중에서 완충재로는 경주 벤토나이트를 사용하고, 화강암반을 천연방벽으로 고려하는 것으로 되어있다[2]. 완충재인 경주 벤토나이트와 화강암반에서 일어나는 현상을 규명하여 THM 복합공정에 대한 해석 기법 개발 및 공학적 방벽의 성능 및 안전성을 평가하기 위한 현장실험(in-situ test)은 KRS 개발에 필수적인 요소이다. 현장실험에 앞서 공학적 방벽인 벤토나이트에서 일어나는 열, 수리, 역학적 현상을 이해하고, 성능을 평가하기 위해 공학적 규모의 KENTEX(KAERI Engineering-scale THM Experiment for Engineered Barrier System)를 만들어 실증실험을 수행하였다. 이 실험에서는 벤토나이트에서 일어나는 열전달, 지하수 유동 및 응력 변화 등을 측정하였다[3].

KENTEX 실험은 벤토나이트에서 열전달, 지하수 유동 및 응력 변화의 각 공정이 서로 영향을 주며 복합적으로 일어나는

현상을 나타내고 있다. 처분장에서는 벤토나이트가 어느 정도 건조된 상태에서 사용되므로 지하수 접촉에 의해 포화가 시작된다. 벤토나이트는 함수율이 증가함에 따라 팽윤 및 공극율 변화로 열, 역학 및 수리적 불성변화가 일어난다. 이로 인해 열적 제한조건, 크리프(creep) 거동, 완충재의 구조안정성, 용기 부식 및 핵종이동 등에 영향을 준다. 이러한 현상은 벤토나이트가 포화된 이후부터 일어나는 것으로 처분 성능 및 안전성에 영향을 미치는 중요한 인자이므로 벤토나이트가 지하수에 의해 포화되는데 소요되는 시간을 예측할 필요가 있다. 본 연구에서는 KENTEX 실험에 대해 상용 유한요소코드인 ABAQUS를 사용하여 벤토나이트 완충재 포화시간을 예측하고[4] 실험결과와 비교하였다. 벤토나이트 포화공정을 모델링하는 데는 지하수 유동, 포화특성곡선 및 수리전도도, 팽윤, 공극율 변화, 공극압, 온도의 영향 및 물성법칙의 적용 등 여러 인자들을 고려하였다.

## II. 실증실험 개요

KENTEX는 KRS에서 제시한 공학적 방벽 크기를 1/3로 축소한 것으로 지하수를 공급할 수 있는 외곽 원통, 벤토나이트 블록, 가열 시스템 및 센서와 계측장비로 이루어져 있다(Fig.1). 직경 0.75m, 높이 1.36m의 원통형 벤토나이트 블록 내부 중심부에 처분용기를 모사한 직경 0.41m, 높이 0.68m의 원통형 가열시스템을 놓았다(Fig.2). 이 가열시스템은 3개의 가열체를 갖고 있으며 각각은 1kW로 총 3kW의 전력을 공급할 수 있고, 내부는 마그네슘산화물로 채워져 있다. 벤토나이트 블록은 경주에서 생산되는 칼슘 벤토나이트로 제조하였으며, 평균 건조 밀도는 1,500kg/m<sup>3</sup>, 함수율은 13wt% 이고, 사용된 블록의 총 개수는 176개 이다. 열 공급은 벤토나이트와 가열시스템의 접촉부위 온도가 90℃로 유지되도록 온도 조절 장치를 설치하여 조절하였으며, 통상 한 개의 가열체를 사용하고, 나머지는 예비 상태로 놓아두었다.

이 장치는 히터를 가열하고 조절하는 부분, 지하수를 일정 압력으로 공급해주는 부분, 센서로부터 측정되어 들어오는 온도, 습도 및 압력에 대한 데이터를 저장 및 기록하는 부분

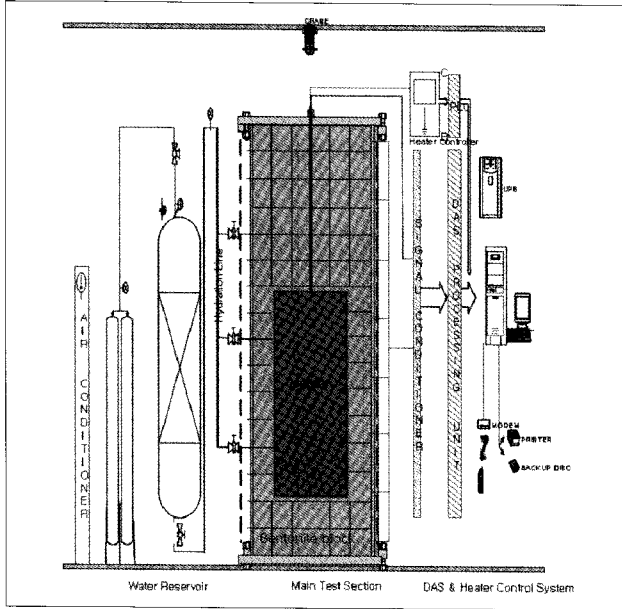


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up of KENTEX facility [3].

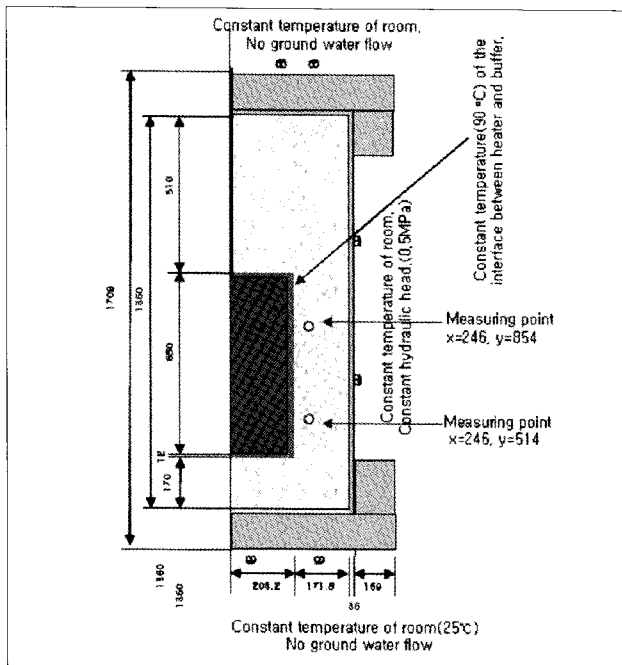


Fig. 2. Dimensions of KENTEX facility(unit: mm)[3].

으로 구성된다. 벤토나이트 벽면과 외곽 스테인리스스틸 사이에 1.8mm의 부직포를 2겹으로 넣어 지하수가 벤토나이트에 균일하고 일정하게 유입되도록 하였다. 운전은 초기에 지하수의 공급 없이 가열하여 히터와 벤토나이트 블록 경계면이 90℃가 되도록 하였다. 이후에 지하수 탱크에서 지하수가 일정하게 공급되도록 한 후에 경계면의 온도는 90℃, 지하수 공급 압력은 0.5MPa로 유지하면서 실험을 계속하였다. 초기

운전조건을 설정한 후에 정상가동 상태에서 입력되는 전력은  $160 \pm 10$  W이었고 정상상태로 운전한 기간은 약 330일 정도였다. 실증실험장치의 벤토나이트 블록에 설치된 센서는 온도센서 52개, 습도센서 7개, 압력센서 8개 이다. 장치에 대한 자세한 사양, 센서 사양 및 설계, 설치 및 운전방법 등은 참고문헌[3]에 수록되어 있다.

KENTEX 실험은 중심부에서 열이 공급되어 외부로 흐르게 하고, 외부에서 지하수가 공급되어 내부로 침투하게 한다. 지하수 유동은 열전달에 비해 느리게 진행되기 때문에 벤토나이트 포화공정은 불포화 영역과 포화 영역으로 나눌 수 있다. 불포화 영역은 열이 유입되는 쪽으로 온도가 높고 지하수 침투가 일어나기 전이며 벤토나이트의 초기 수분이 증발 및 유동 등의 열확산에 의한 재분포로 건조가 일어난다[5]. 포화 영역은 지하수가 침투되어 포화가 진행되는 영역이다. 측정 결과를 살펴보면 온도, 습도 및 압력 모두가 초기에 교란상태를 보이는데 이는 벤토나이트 블록과 블록 사이에 간극이 존재하여 이것이 지하수 유동 통로 역할을 하다가 벤토나이트가 지하수에 의해 팽윤되어 간극이 막힘으로써 정상상태로 회복되는 것을 뜻한다. 습도와 압력이 교란을 보인 후에 어느 정도 시간이 지나 서서히 증가하기 시작하는 것은 앞에 설명한 불포화 영역과 포화 영역을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

### III. 실증실험 결과 해석 및 고찰

#### 가. 열-수리-역학 모델

벤토나이트의 포화 공정을 해석하기 위해서는 벤토나이트에서의 열, 수리, 역학적 복합 현상을 함께 해석할 필요가 있다. 벤토나이트 완충재에 대한 열-수리-역학 모델은 다공성 매질과 공극에 채워진 유체로 구성되며, 응력평형 방정식, 구성방정식, 에너지수지 방정식 및 질량보존 방정식 등으로 표현된다. 이들 각 방정식들은 ABAQUS에서 다음과 같이 표현된다. 응력 평형방정식은 다공성 매체에 대해 임의시간의 형태를 고려할 때 이 부피에 가해지는 일에 대한 평형방정식으로 다음과 같다.

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{v} dS + \int_V \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{v} dV + \int_V S_r n \rho_w g \cdot \delta \mathbf{v} dV \dots (1)$$

여기서  $\delta \mathbf{v}$  는 속도(m/sec),  $\delta \epsilon = \text{sym}(\partial \mathbf{v} / \partial \mathbf{x})$  는 변형율,  $\sigma$  는 응력(MPa),  $\mathbf{t}$  는 마찰력 (surface tractions)(N),  $\mathbf{f}$  는 단위 부피당 모든 물체력(body forces)(유체의 무게는 제외)(N),  $S_r$  은 포화도,  $n$  은 공극율,  $\rho_w$  는 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $g$  는 중력가속도(kg/m<sup>2</sup>.sec)이다. 이 방정식의 응

력에는 다음과 같은 유효응력(effective stress)의 개념이 사용된다.

$$\bar{\sigma}^* = \sigma + \chi u_w I \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 전체 응력,  $u_w$ 는 공극수압(MPa),  $\chi$ 는 포화도의 함수,  $I$ 는 단위 매트릭스이다.

에너지수지 식은 에너지 보존법칙에 따라 물체의 내부 에너지와 운동에너지의 시간적 변화는 물체의 체적 및 표면적 이 행한 일의 변화의 합과 같다는 것에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \int_V (\frac{1}{2} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + \rho U) dV = \int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\mathbf{v}$ 는 속도벡터,  $U$ 는 단위질량당 내부 에너지(J/kg)이다.

다공성매질에 대한 구성방정식은 매질자체에 대한 것과 유체에 대한 것으로 나누어 표현하는데 고체 매질에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$d\tau^c = \mathbf{H} : d\epsilon + \mathbf{g} \quad (4)$$

여기서  $d\tau^c$ 는 응력 증가,  $\mathbf{H}$ 는 강성(material stiffness),  $d\epsilon$ 는 변형을 증가,  $\mathbf{g}$ 는 독립적으로 기여하는 변형을 즉 예로 열팽창, 팽윤 등으로 기여하는 변형들이다. 매질의 공극에 들어 있는 유체에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho_w}{\rho_w^0} \approx 1 + \frac{u_w}{K_w} - \epsilon_w^h \quad (5)$$

여기서  $\rho_w$ 는 밀도,  $\rho_w^0$ 는 기준상태의 밀도,  $K_w(T)$ 는 유체의 체적계수(bulk modulus)(MPa)이다. 온도변화에 의해 일어나는 유체의 부피팽창은

$$\epsilon_w^h = 3\alpha_w(T - T_w^0) - 3\alpha_w T^t (T^t - T_w^0) \quad (6)$$

로 표현된다. 여기서  $\alpha_w(T)$ 는 유체의 열팽창계수(1/°C),  $T$ 는 현재온도(°C),  $T^t$ 는 초기온도,  $T_w^0$ 는 기준상태의 온도이다.

질량 보존법칙에 따라 유체의 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_w^h = 3\alpha_w(T - T_w^0) - 3\alpha_w T^t (T^t - T_w^0) \quad (7)$$

여기서  $J$ 는 야곱 매트릭스,  $x$ 는 위치이다. 이를 위한 구성 방정식으로 공극에서의 흐름은 Darcy 법칙을 따른다는

가정 하에서 다음과 같이 주어진다.

$$S_r n v_w = - k \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (8)$$

여기서  $S_r$ 는 포화도,  $k$ 는 매질의 투수계수(permeability) (m/sec),  $n$ 는 공극율,  $v_w$ 는 유속,  $\phi$ 는 수두(hydraulic head)(m)이다. 이는 일정 온도에서 유체의 이동을 나타낸 것으로 온도의 상승에 의해 공극에서 발생하는 유체의 기체 상태에 대한 이동은 고려하지 않고 있다.

다른 메커니즘과 연계되지 않은 열전달만을 위해서 내부 에너지의 시간적 변화율은 물체의 단위표면적당 열유속과 단위체적당 공급되는 열의 합과 같다.

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV \quad (9)$$

여기서  $\dot{U}$ 는 내부에너지의 시간적 변화율,  $q$ 는 단위 표면적당 열유속(J/m²sec),  $r$ 은 열원(J/m³sec),  $V$ 는 체적(m³)이다. 불포화 매질영역에서 온도로 인한 대류 현상은 불포화 영역 내의 흐름에 별 영향이 없어 이를 무시하고, 전도 열전달에 의해서만 열전달이 일어난다는 가정 하에서 Fourier 법칙이 구성방정식으로 사용된다[6, 7].

### 나. 벤토나이트 포화 공정 해석

KENTEX 실험에서는 열, 수리, 역학적 현상이 모두 일어나 이들이 상호 영향을 미치기 때문에 열-수리-역학 복합현상을 모델링하였지만 벤토나이트에서 유체 이동이 일어나는 포화공정에 대해서 주로 분석하였다. 외부에서 유입되는 지하수는 이미 열평형에 도달하여 온도구배가 형성된 벤토나이트에 침투하면서 외곽부터 완전 포화상태(fully saturated state)에 이르게 된다. 다공성매질인 벤토나이트의 완전 포화상태 수리전도도는 경주 칼슘 벤토나이트를 이용하여 얻은 다음의 경험식에서 구한 건조밀도 1,500Kg/m³ 일 때의  $2.28 \times 10^{-13}$  m/s를 사용하였다[8].

$$\log K_s = - 4.07 \rho_d - 6.13 \quad (10)$$

여기서  $K_s$ 는 포화 상태에서의 수리전도도(m/s),  $\rho_d$ 는 건조밀도(kg/m³)이다.

외부에서 유입되는 지하수 유동은 수리전도도가 낮아 상당히 느리기 때문에 벤토나이트 내부는 지하수로 불포화된 상태가 유지된다. 불포화 상태에서 벤토나이트 공극에는 유체와 기체가 함께 존재하게 되는데 기체는 보통 공기로 공

극내의 증기압과 평형을 이루는 증기와 혼합되어 있다. 이들이 공극에 이상(two phase)으로 존재하는 상태이지만 유체측면에서 보면 유체의 유동 속도는 낮기 때문에 다공성 매질에서의 유동을 표현하는 Darcy 법칙이 적용된다고 가정할 수 있다. 불포화 영역에서 Darcy 법칙을 적용하려면 수두차와 수리전도도를 알아야 한다. 불포화 영역에서 공극을 통해 흐르는 유체는 삼투압 현상에 의해 형성되는 흡입압력에 의해 형성되는 수두차에 의존한다. 이러한 공극압력은 함수율(water content)변화에 따른 흡입압력(suction pressure) 변화로 표현되며 포화특성곡선(saturation characteristic curve 또는 water retention curve)이라 부른다. 포화특성곡선을 정량화하는 여러 실험적 해석이 제안되어 있다[9]. 공극크기 분포가 광범위한 토양에서의 거동 해석에 van Genuchten 포화특성함수가 많이 사용되므로[10] 본 해석에서도 이를 사용하였다. 이 van Genuchten 관계식은 다음과 같다.

$$S = (S_s - S_r) [1 / (1 + |\alpha\psi|^\beta)]^{(1-1/\beta)} \dots\dots\dots (11)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 van Genuchten 상수로 실험 파라미터,  $\psi$ 는 흡입압력(MPa)이다. S는 포화도,  $S_s$ 는 완전포화 또는 최대포화일 때의 포화도인데 통상 완전포화도의 값 1.0을 사용하고,  $S_r$ 은 잔여포화도 또는 최소포화도이다. 불포화 영역에서 삼투압에 의해 일어나는 유동에 대한 수리전도도는 포화특성함수와 관계가 있다. van Genuchten의 포화특성함수를 이용하여 Mualem이 유도한 상대 수리전도도(relative hydraulic conductivity)를 벤토나이트 불포화 영역에 사용하였다. 이 식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_r = \sqrt{S_e} \{1 - [1 - (S_e)^{1/\lambda}]^2\}^2 \dots\dots\dots (12)$$

여기서  $K_r$ 은 상대 수리전도도,  $\lambda$ 는  $\lambda=1-1/\beta$ ,  $S_e$ 는 유효포화도 [ $S_e = (S - S_r) / (S_s - S_r)$ ]이다. 상대 수리전도도는 불포화 수리전도도와 완전 포화 수리전도도의 비이다. van Genuchten 실험 파라미터  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 결정하기 위해 경주 칼슘 벤토나이트에 대한 함수율과 흡입압력을 thermocouple psychrometer 방법으로 측정한 데이터가 Table 1에 있다 [11]. 이 측정 데이터를 이용하여 구한 상수  $\alpha$ ,  $\beta$ 값은 각각 0.11 (1/MPa), 1.65이고, 이를 포화특성곡선으로 표현한 것이 Fig.3이다. Fig.4는 계산된  $\beta$ 값과 식(12)를 이용하여 얻어진 상대 수리전도도 변화를 보여준 것이다.

경주 벤토나이트의 두께가 0.05m 이고, 한쪽 면이 지하수

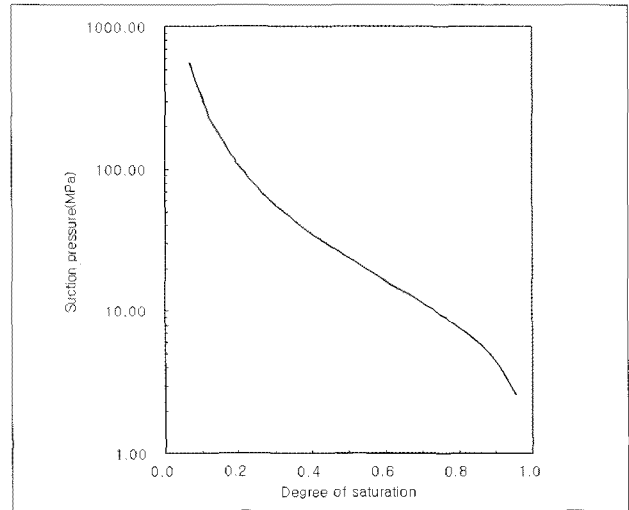


Fig. 3. Water retention curve for the bentonite as determined from fitting experimental data to van Genuchten relationship.

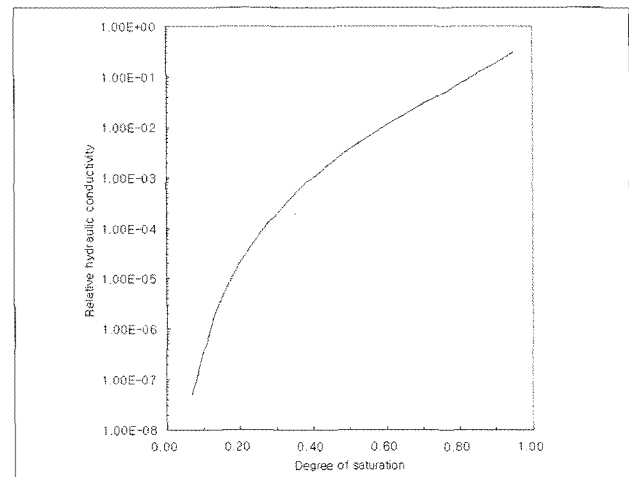


Fig. 4. Relationship between relative conductivity and saturation for the bentonite as determined from the Mualem-van Genuchten relationships.

Table 1. Water potentials of the samples with various water contents

Sensor	Sample type	Water content (%)	Water potential (MPa)
PSYPRO*	Powder	3.4	-108.18
		5.4	-112
		6.04	-101.51
		7.4	-86.13
		10.5	-81.2
		14.4	-61.63
		21.5	-7.11
		26.2	-3.37
		31.3	-1.49
		35.7	-1.36

에 접촉해 있다고 가정하고, 칼슘 벤토나이트 실험에서 측정된 완전 포화상태의 수리전도도와 불포화 상태의 흡입압력 및 상대 수리전도도를 사용하여 불포화 칼슘 벤토나이트에서의 지하수 유동을 계산한 결과는 Fig.5와 같다. 지하수가 유입되는 위치(Fig.5의 왼쪽에서부터 오른쪽으로 포화가 진행되는 방향)에서는 빠르게 포화되고 이로부터 멀어져 갈수록 포화속도는 느려지고 있지만 계산 모델의 중앙에 위치한 격자의 모든 측정 위치(Fig.5에서 node number로 표시)에서 완전 포화에 이르는 시간은 한 곳에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 0.05m 두께의 벤토나이트를 지하수로 포화시키는데 걸리는 시간은 약 92일 정도인 것으로 확인되었다[12].

경주 칼슘 벤토나이트에 대해 얻은 포화특성곡선과 상대 수리전도도를 사용한 포화과정 계산값과 지하수 확산 실험값을 비교하여 이들이 어느 정도 유효한가를 분석함으로써 열, 수리, 역학 복합공정에서 일어나는 포화공정을 해석하는데 사용한 포화특성곡선과 상대 수리전도도의 타당성을 확인할 수 있다. 고은옥 등은 칼슘 벤토나이트에 대한 수분 확산실험을 수행하였다[13]. 이 실험에서 밀도가 각각 1,400kg/m<sup>3</sup>, 1,600kg/m<sup>3</sup>, 1,800kg/m<sup>3</sup> 인 시료를 만들어 높이 0.03m, 직경 0.03m인 원통에 넣은 두개의 원통을 수평으로 연결하고, 지하수에 담가 놓아 확산에 의해 지하수가 침투되도록 하였다. 실험을 진행하면서 설정된 시간에 벤토나이트를 꺼내 0.001m 간격으로 자른 후 시료를 건조시키는 방법으로 수분변화를 측정하였다. 밀도 1,600kg/m<sup>3</sup> 에 대한 실험 결과와 계산 결과를 함께 표시한 것이 Fig.6 이다. 이 그림에서 1일이 경과한 후의 실험값과 계산값 및 41일이 경과한 후의 이들 값은 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 포화의 중간단계에서 나타나는 실험결과와 계산결과

차이는 실험에서 얻은 함수율은 일정 간격으로 자른 시료의 전체 값인 반면에 계산결과는 한 직선상의 점에서의 값을 사용하는데서 오는 것일 수도 있다. 그리고 7일 및 15일이 경과한 후의 실험값은 침윤선(wetting front)이 전 지역에 걸쳐 퍼져있는 것으로 나타나는 것은 수리전도도가 완전 포화상태의 수리전도도와 큰 차이가 없어 수분 흐름이 빠르다는 것을 정성적으로 확인할 수 있다. 반면에 계산값은 침윤선(wetting front)이 형성되면서 수분이 침투하는 쪽은 빨리 포화되어 실험값보다 크지만 수분이 침투되는 쪽에서 먼 곳은 수분 흐름이 늦어 실험값보다 작게 나타나고 있는 것은 Fig.3의 포화특성곡선과 Fig.4의 상대 수리전도도에서 포화도가 낮은 쪽의 수리전도도가 낮기 때문인 것으로도 분석할 수 있다. 결국 수분 함량을 측정하는 실험적 오차인지 상대 수리전도도에서 오는 오차인지는 본 실험 결과로 분별하기가 어려웠다. 벤토나이트에서의 수분 흐름은 불포화 영역에서 삼투압이 주를 이루는 것을 감안할 때 정확한 포화특성곡선을 얻는 것은 벤토나이트 수리해석에서 중요하므로 포화특성곡선을 얻는 실험의 정확도를 높여야 하고 또 함수율과 흡입압력의 상관관계식을 개선하는 시도도 필요할 것으로 판단된다.

경주 칼슘 벤토나이트의 포화 특성곡선과 확산실험 등을 분석한 결과 포화특성곡선과 확산실험 등의 실험을 수행하는 데는 데이터의 신뢰성을 높여야 하지만 완전 포화에 이르는 시간은 수렴하고 있는 것으로 분석되어 포화공정의 포화 시간을 계산하는데 불포화 영역에서 이들 데이터를 사용할 수 있는 것으로 판단하였다.

벤토나이트는 지하수가 침투함에 따라 함수율이 증가하면서 팽윤이 일어난다. 부피변화로 야기되는 팽윤압은 벤토

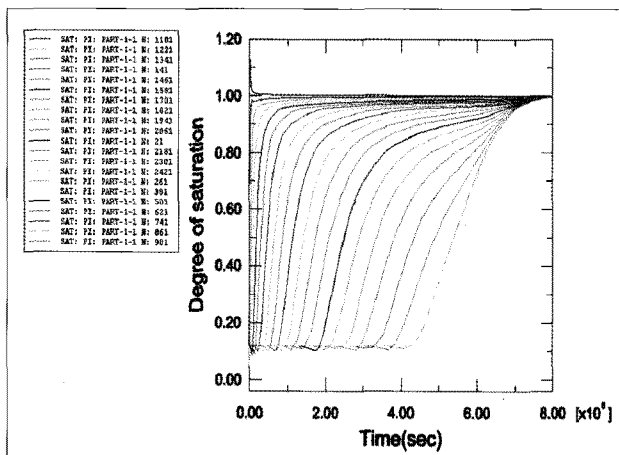


Fig. 5. Variation of saturation as function of time in 5cm thickness of bentonite. (Saturation curve at each node number of center line which is started at the surface contacted with water).

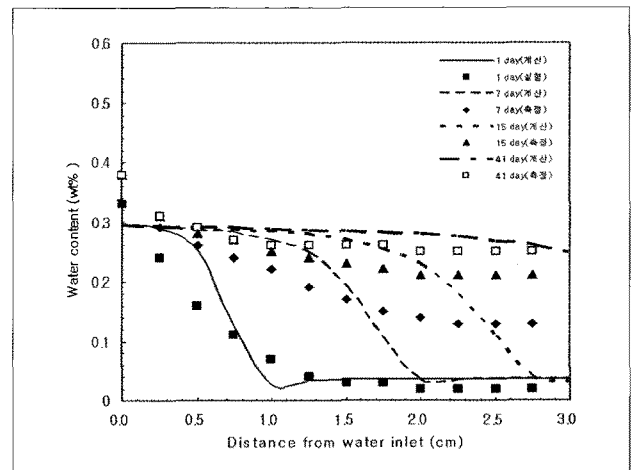


Fig. 6. Comparison between measured and calculated value in water uptake test.

나이트의 역학적 특성에 영향을 미치는데 보통 시간 경과에 따른 압력 증가로 나타난다. 그러나 ABAQUS에서는 이를 직접 구현할 수 없어 간접적인 방법으로 다음 식과 같은 팽윤비율(swelling ratio)을 포화도의 함수로 나타내어 팽윤에 따른 변형율을 식(4)의 g 항에 합하여 전체 응력 변화를 계산하고 있다.

$$\epsilon = \gamma(S - S_0) \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $\gamma$ 는 팽윤계수,  $S_0$ 는 초기 포화도이다. 본 계산에서 팽윤계수는 Fujita가 제시한 팽윤비율 0.166을[14] 사용하면 실험에서 측정된 압력보다 상당히 높은 압력변화를 보이기 때문에 측정값과 비슷한 경향을 갖도록 팽윤비율을 1/20로 낮춘 0.0083을 사용하였다. 이외에 수리-역학(HM) 해석에 필요한 물성값은 Table 2에 표시하였다. 열해석 및 응력해석에 필요한 물성값은 열-수리-역학 복합현상을 해석한 참고문헌[15]에 수록되어 있다.

**다. 포화과정 해석 결과**

KENTEX 실험은 원통의 외부표면에서 균일하게 지하수가 침투하고 또 중심부의 히터 표면에서 열이 균일하게 방사된다고 가정하여 2차원 축방향 대칭 격자모델(axisymmetric solid element)을 사용하여 해석하였다. 열해석 경계조건은 히터표면온도 90℃, 외부경계면은 대류열전도도 10W/m<sup>2</sup>K, 중심부는 대칭조건 이고 초기온도는 23℃, 외부 실내온도는 25℃ 이다. 역학해석 경계조건은 x축은 x방향만 제한하고, y축은 y방향만 제한하며 중심부는 대칭조건 이다. 수리해석 경계조건은 지하수 유입 경계면은 0.5MPa의 수압 이고, 그 외의 벤토나이트 경계면은 불투수층으로 하였다(Fig.2 참조). 자세한 내용은 참고문헌[12]에 기술되어 있다. 벤토나이트 포화과정을 측정하기 위한 습도 센서는 R=0.246m(반경방향으로 히터로부터의 거리), H=0.514m(축방향으로 장치 바닥에서부터의 거리)에 위치하고 있다(Fig.2 참조). 이 지점에서 측정된 실험값(exp)과 세 개의 모델 즉 유체이동만 고려한 모델(nsw, 식(7) 및 (8)만 사용), 열과 유체이동을 고려한 모델(nswt, 식(4)의 g 항에서 열팽창만 포함) 및 열, 유체이동, 응력을 모두 고려한 모델(thm, 식(4)의 g 항에서 열팽창 및 팽윤압 포함)의 계산값을 시간경과에 대한 함수율(wt%)로 보여준 것이 Fig.7 이다. 실험 및 계산으로 얻은 값을 함수율(wt%)로 표시하는 방법은 다음 식을 사용하였다.

$$\omega = nS\rho_w / \rho_d \dots\dots\dots (14)$$

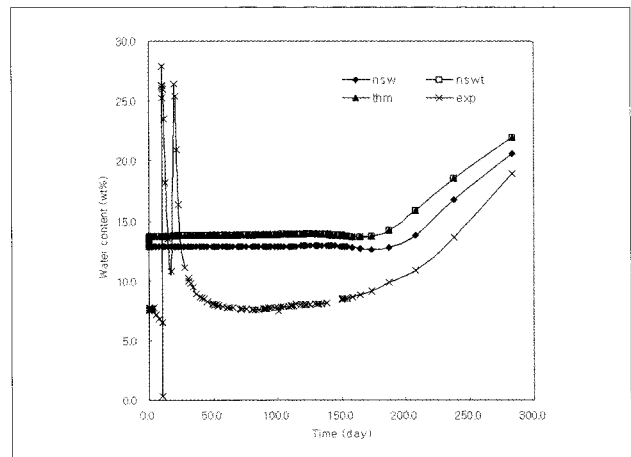
여기서  $\omega$ 는 함수율(wt%)을 나타낸다.

Fig.7에서 보면 측정값(exp)은 초기 약 50일 이전에서 함수율이 불안정한 모습을 보이며 교란되고 있다. 이는 초기에 벤토나이트 블록과 블록 사이의 간극으로 지하수가 빠르게 침투되어 센서주변이 포화된 후에 벤토나이트가 팽윤하여 간극을 막고 열의 공급으로 건조가 일어나는 현상에 의한 교란으로 볼 수 있다. 약 50일 이후부터 벤토나이트 함수율이 약 7.5wt%를 약 100일 가까이 유지하는 것은 열전달이 평형을 이룬 상태에서 초기 수분의 재분포가 이루어진 것으로 불포화 영역에서 지하수가 침투되기 전에 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 초기 함수율이 13wt%인데 비해 수분 재분포에 의한 함수율이 7.5wt%로 낮아지는 것은 Fig.3의 포화 특성곡선에서 보면 상대 수리전도도를 감소시키는 결과를 초래하므로 불포화 영역에서 온도 상승에 의한 수분 이동 현상이 지하수 침투 속도를 감소시킬 수 있음을 의미하고 있다. 또한 R=0.246m인 측정 위치의 온도가 약 60℃이며 히터 쪽으로 이동할수록 90℃로 높아지고, 벤토나이트의 포화도가 감소함에 따라 상대 수리전도도는 더 감소하여 벤토나

**Table 2. Mechanical and hydrological properties used in the analysis**

	bentonite 1)	heater 2)	outer shell 3) (stainless steel)
Young's modulus (MPa)	1080	2.49x10 <sup>5</sup>	2x10 <sup>5</sup>
Uniaxial compressive strength (MPa)	4.3	-	-
Saturated permeability (m/s)	2.28x10 <sup>-15</sup>	-	-
Friction angle (°)	37	-	-
Poisson's ratio	0.21	0.18	0.3
Cohesion (MPa)	1.9	-	-
Thermal expansion coefficient(1/°C)	3.8x10 <sup>-4</sup>	1.08x10 <sup>-5</sup>	1.13x10 <sup>-5</sup>

1) reference [15]  
 2) MgO material properties from website www.crystran.co.uk  
 3) L. H. Van Vlack, "Materials Science for Engineers," Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1970).



**Fig. 7. The comparison between the measured and the calculated water contents as a function of time (height 0.514m, radius 0.246m).**

이트가 포화되는 시간은 증가될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 불포화 영역에서의 모델 계산 결과에서 열의 영향을 고려하지 않은 모델(nsw)은 함수율 13wt%를 유지하고, 열을 고려한 모델(nswt, thm)은 초기보다 약간 높은 함수율을 유지하는 것은 열팽창에 의한 것으로 판단되지만 nswt와 thm의 함수율이 같은 것은 불포화 영역에서 팽윤이 안 일어나고, 팽윤에 따른 부피팽창은 공극율에 변화를 미치 수리전도도가 변화할 가능성은 있지만 여기서는 이의 영향이 적다고 가정하여 함수율에 영향을 미치지 않는 것으로 모델링하였기 때문이다. 그러나 실험 결과와 편차가 큰 것은 불포화 영역에서 공극율 변화 보다는 수분 재분포의 영향이 크다고 판단되므로 모델에 이를 반영하여야 한다고 판단되었다. 그래서 부피 팽창 또는 압축에 따른 공극율 변화 및 수증기압 변화 등을 모두 포함하는 열확산 계수(thermal diffusivity)를 측정하여 불포화 영역에 사용하고 있다.

이 측정위치에서 지하수 침투가 시작되는 것은 실험에서는 약 150일부터 이고, 계산에서는 약 180일부터 이다. 실험에서는 약 150일부터 함수율이 서서히 증가하다 180일 이후부터는 조금 빠른 증가를 보이면서 계산값에 접근하고 있는 모습을 보이고 있다. 측정위치 R=0.246m에 지하수가 도달하면 함수율 7.5wt% 이던 것이 초기 함수율 13wt%까지 포화되는데 걸리는 시간은 약 75일 정도 소요되는 것으로 보인다. 즉, 온도 상승에 따른 수분 재분포에 의한 함수율 7.5wt%가 유지되는 시간은 약 100일, 초기 함수율 13wt%에 이르는 시간은 약 75일 이다. 불포화 영역에서 수분 재분포가 일어나 함수율이 감소한 후에 증가하여 초기 함수율에 도달한 후부터는 계산 값에 접근하면서 포화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 한 지점에서 측정된 결과이지만 이와 같은 경향은 시간이 300일 이상으로 경과함에 따라 실험값과 계산값이 한 곳에 수렴할 수 있으므로 불포화 영역의 수분 재분포는 그 영역에서의 함수율 변화를 초래할 뿐이지 포화시간을 결정하는데 큰 영향을 주지 않을 수도 있음을 이 실험과 계산 결과에서 보여주고 있다. 불포화 영역에서와 마찬가지로 포화 영역에서 nswt와 thm의 함수율이 같은 것은 팽윤에 따른 부피팽창이 함수율에 영향을 미치지 않는 것으로 모델링하였기 때문이다.

약 500일이 경과한 후에 KENTEX 실험장치를 외부에서 반경방향으로 드릴링(drilling)하여 시료를 채취해 건조방법으로 함수율을 측정된 값과 각 모델에서 계산한 값을 Fig.8에 표시하였다. 세 모델(no disp: 변형이 없는 모델로 유체 유동만 해석함, nswt: 팽윤압이 없는 열-수리-역학모델, thm20: 팽윤압을 고려한 열-수리-역학 모델) 모두 충분히 포

화되면 서로의 계산값에 차이가 없고, 완전 포화된 후에는 온도, 팽윤압의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 실험값(exp)은 지하수가 공급되는 쪽으로 갈수록 점점 커져 지하수 유입 경계면에서는 실험값이 급격히 증가하고 있다. 이는 벤토나이트가 완전 포화일 때의 함수율보다 상당히 큰 값으로 경계면의 수압(지하수 공급압)에 의해 벤토나이트가 과포화 된 상태인 것으로 볼 수 있다. 결국 약 500일 정도에서 측정값이나 모델 예측 값이 거의 일치하므로 이를 벤토나이트가 완전 포화되는 포화 시간으로 볼 수 있다. 특히 R=0.246m의 위치에서 실험값 및 계산값이 거의 95%로 포화되고 있음을 알 수 있다. 그러나 실험에서 히터에 가까운 곳의 함수율은 측정을 못했으므로 이 영역에서 높은 온도로 인해 생성된 기체상태의 수분이 어느 정도 지하수 유동을 지연시키는지 판단할 수 없어 벤토나이트 포화 시간에 어느 정도 영향을 미치는지에 대해서는 정밀한 실험과 모델이 필요할 것으로 생각된다.

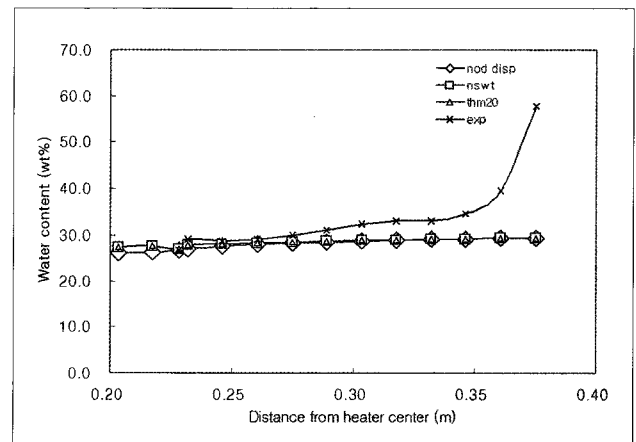


Fig. 8. The comparison between the measured and the calculated water contents as a function of radial distance in the full saturation (after 501 day).

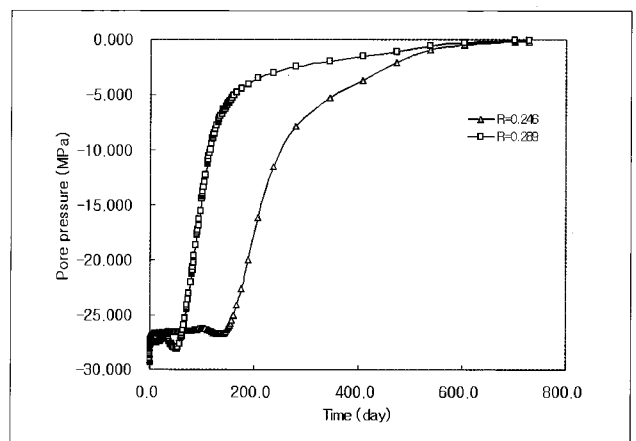


Fig. 9. Variation of pore pressure as function of time (height 0.854m).



Fig. 9는 높이 0.854m에서 반경방향  $R=0.289\text{m}$  및  $R=0.246\text{m}$ 인 위치에서의 시간에 따른 공극압력(pore pressure)의 변화를 보여준 것이다. 실험에서 얻은 함수율 변화와 비교 검토하기 위해  $R=0.246\text{m}$  위치의 공극압력을 보면 포화특성곡선에서 초기 함수율과 공극율에 따라 입력된 공극압력(29.89 MPa)은 초기단계에서 온도의 영향으로 약간 감소하다 일정한 값을 유지한다. 모델링에서 함수율이 온도상승에 의한 열팽창으로 초기함수율 보다 증가했기 때문에 유효응력법칙에 따라 공극압력이 감소한 것으로 해석된다. 그러나 불포화 영역의 수분 재분포에 따른 함수율 변화로 인한 공극압의 변화는 예측할 수 없어 이 영역에서 공극압력은 일정하게 유지되었다. 지하수 유입으로 포화가 시작되는 약 180일 시점부터 공극압력은 함수율 증가에 따라 서서히 감소한 후에 완전 포화가 이루어지면 사라지게 된다. 벤토나이트 입자 사이의 공극에 지하수가 침투됨에 따라 흡입압력이 감소하다가 완전 포화가 이루어지면 사라지는 것은 흡입압력이 공극압력으로 작용하여 지하수 유동이 일어나 포화 공정이 진행되는 것을 의미하고 있다.

제안된 벤토나이트 포화공정 모델링을 사용하여 반경방향의 두 지점( $R=0.246\text{m}$ ,  $R=0.289\text{m}$ )에서 계산한 포화도를 시간에 따라 보여준 것이 Fig. 10이다.  $R=0.246\text{m}$ 의 위치인 경우에 불포화 영역은 온도 상승에 의해 포화도가 초기 포화도보다 약간 높아진 후 거의 일정한 값을 유지하다가 지하수 유입으로 포화가 시작되는 약 180일 부근부터 포화도가 증가하기 시작하여 약 600일 정도에 수렴하고 있다. Fig. 7에 설명한 실험에서는 함수율이 계산값에 접근하면서 약 300일까지 계속 증가하는 것으로 실험이 마무리되지만 Fig. 8에서 500일에 시료를 채취하여 얻은 함수율은 거의 완전 포화상태인 것으로 나타나 이 실험에서 완전 포화상태의 함수율은 500일 정도에 수렴하고 있다고 볼 수 있다. 모델에서는 Fig. 7 및 Fig. 8의 함수율이 지하수 침투 후의 포화 영역에서는 실험값과 비슷하게 변화하고 있다. 또한 이들 그림에서와 비슷하게 Fig. 9에서의 공극압력 변화도 약 600일 정도에서 사라지고 있어 모델에서는 포화 시간이 600일 정도인 것을 보여주고 있다. 모델에 불포화 영역의 수분 재분포 현상이 포함되지 않고 있지만 실험 결과와 모델 결과의 비교에서 알 수 있듯이 포화 시간에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 해석할 수 있다. 그래서  $R=0.246\text{m}$ 의 위치에서 실험값 및 모델 계산이 95%이상의 포화도에 도달하는 시간은 약 500일로 일치하기 때문에 이 모델로 고준위폐기물 처분시스템의 완충재인 벤토나이트의 포화 시간을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 KENTEX 실험에서 함수율 변화를 얻

은 실험결과가  $R=0.246\text{m}$  한 위치뿐이고, 히터와 접촉한 부분의 높은 온도에서 지하수 증발에 따른 수증기 압력 증가가 유체 이동에 미치는 영향, 포화특성곡선의 신뢰도 등에 따른 영향에 대한 상세한 고찰이 필요한 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

처분시스템의 공학적 방벽에 대한 실증실험을 위한 공학적 규모 실증실험 장치인 KENTEX 실험에서 얻은 열, 수리, 역학적 데이터를 이용하여 벤토나이트의 포화공정을 해석하였다. 실험결과와 해석에서 포화공정은 두 영역으로 나눌 수 있다. 외부로부터 지하수가 침투되기 전을 불포화 영역으로 그 후를 포화 영역으로 나누었다. 불포화 영역에서는 초기 수분이 온도 상승으로 인해 재분포 되는데 온도가 높은 쪽에서는 건조 현상이 일어나 함수율이 초기 함수율 보다 상당히 감소되고 있음을 알 수 있었다. 포화 영역에서는 지하수가 침투되면서 감소된 함수율에서부터 포화가 진행되어 함수율이 증가하면서 완전 포화에 도달하였다. 모델 계산의 결과와 실험 결과의 비교에서 불포화 영역에서는 모델에 수분 재분포 공정을 포함시키지 않아 함수율의 차이가 크게 나타났다. 포화 영역에서는 포화가 진행됨에 따라 두 값의 차이가 점점 감소해 완전 포화에 도달할 때에는 두 값이 거의 비슷한 결과를 보여주었다. 500일이 지나 드릴링 기법으로 측정된 함수율은  $R=0.246\text{m}$ 인 위치에서 95% 정도이고, 모델계산 결과에서도 95% 함수율에 도달하는 시간이 약 500일 정도였다. 이는 벤토나이트 포화 시간이 500일 정도이며, 불포화 영역의 수분 재분포가 벤토나이트의 완전 포화에 도달하는 포화시간에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 본 해석기법을 사용하면 처분공에 설치되는 벤토나이트 완충재의 포화시간을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 주관하는 원자력기술개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

- [1] Chin-Fu Tsang, Ove Stephansson, Firtz Kantsky and Lanru Jing, "An overview of the DECOVALEX project on coupled THM processes in fractured

- rock-bentonite system", 2003 Geo Proc., pp 3-13, (2003).
- [2] C.H.Kang et al, "High Level Radwaste Disposal Technology Development/Geological Disposal System Development", KAERI/RR-2336/2002, KAERI, (2002).
- [3] 이재완, 권상기, 박정화, 조원진, "고준위폐기물처분장 공학적 방벽의 열적-수리적-역학적 거동 연구: 공학적 규모 실증실험", KAERI/TR-3429/2007, (2007).
- [4] Lennart Bórgesson, Jan Hernelind "DECOVALEX I Case 3: Calculation of the Big Ben experiment-coupled modelling of the thermal, mechanical and hydraulic behaviour of water-unsaturated material in a simulated deposition hole", SKB Technical report 95-29, (1995).
- [5] E. E. Alonso, J. Alcoverro, F. Coste, L. Malinsky, V. Merrien-Soukatchoff, I. Kadiric, T. Nowak, H. Shao, T. S. Nguyen, A.P.S. Selvadurai, G. Armand, S. R. Sobolik, M. Itamura, C. M. Stone, S. W. Webb, A. Rejeb, M. Tijani, Z. Maouche, A. Kobayashi, H. Kurikami, A. Ito, Y. Sugita, M Chijimatsu, L. Bórgesson, J. Hernelind, J. Rutqvist, C.-F. Tsang, P. Jussila, "The FEBEX benchmark test: case definition and comparison of modelling approaches", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42, pp 611-638, (2005).
- [6] 박정화, 이재완, 권상기, 조원진, "고준위 방사성 폐기물 처분시스템 실증실험용 KENTEX 장치에서의 열-수리-역학 연동현상 해석", 방사성폐기물학회지, 4(2), pp 117- 131, (2006).
- [7] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, ABAQUS Manuals, HKS Inc. (2003).
- [8] 조원진, 전관식, 이재완, "고준위 폐기물 처분장 완충재용 국산 압축 벤토나이트의 수리전도도에 미치는 건조 밀도와 온도의 영향", KAERI/TR-1223/99, KAERI, (1999).
- [9] J. S. Y. Wang, T. N.Narasimhan, "Processes, mechanisms, parameters, and modeling approaches for partially saturated flow in soil and rock media." SAND88-7054, (1993).
- [10] Mikko P. Ahola, Goodluck I. Ofoegbu, Asadul H. Chowdhury and Sui-Min Hsiung, "ThermoHydro-Mechanical coupled modeling: Big-Ben experiment, TC3 DECOVALEX-PHASE III", CNWRA 94-021,(1994).
- [11] Sun Im Jeon, Jae Owan Lee, Won Jin Cho, "Measurement of bentonite-water potential using a thermocouple psychrometer", Transactions of the Korean Nuclear Society, Autumn Meeting, (2007).
- [12] 박정화, 이재완, 권상기, 조원진, "한국형 고준위 폐기물 처분을 위한 공학적 방벽의 실증실험에 대한 열-수리-역학 연계공정 해석", KAERI/TR-3952/2009, KAERI, (2009).
- [13] 고은옥, 이재완, 조원진, 현재혁, 전관식, "불포화 다짐 벤토나이트의 수확산 및 재포화", 한국폐기물학회지 제 4권, 제 1호, (1999).
- [14] Fujita, T., K. Hara, Y. Yusa, and N. Sasaki. "Application of Elasto-Plastic Model to Mechanical and Hydraulic Behavior of Buffer Material under Water Uptake in a Repository", Materials Research Society Symposium, Vol. 212. (1991).
- [15] 조원진, 이재완, 강철형, 전관식, "고준위폐기물 처분장 완충재용 국산 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 물리화학적, 광물학적 및 역학적 특성", KAERI/TR-1388, (1999).