

Coupled T-H-M Processes Calculations in KENTEX Facility Used for Validation Test of a HLW Disposal System

고준위 방사성 폐기물 처분 시스템 실증 실험용 KENTEX 장치에서의 열-수리-역학 연동현상 해석

Jeong Hwa Park, Jae Owan Lee, Sangki Kwon and Won Jin Cho
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yuseong-gu, Daejeon

njhpark@kaeri.re.kr

박정화, 이재완, 권상기, 조원진
한국원자력연구소. 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received October 31, 2005 / Approved June 2, 2006)

Abstract

A coupled T-H-M(Thermo-Hydro-Mechanical) analysis was carried out for KENTEX (KAERI Engineering-scale T-H-M Experiment for Engineered Barrier System), which is a facility for validating the coupled T-H-M behavior in the engineered barrier system of the Korean reference HLW(high-level waste) disposal system. The changes of temperature, water saturation, and stress were estimated based on the coupled T-H-M analysis, and the influence of the types of mechanical constitutive material laws was investigated by using elastic model, poroelastic model, and poroelastic-plastic model. The analysis was done using ABAQUS, which is a commercial finite element code for general purposes.

From the analysis, it was observed that the temperature in the bentonite increased sharply for a couple of days after heating the heater and then slowly increased to a constant value. The temperatures at all locations were nearly at a steady state after about 37.5 days. In the steady state, the temperature was maintained at 90 °C at the interface between the heater and the bentonite and at about 70 °C at the interface between the bentonite and the confining cylinder. The variation of the water saturation with time in bentonite was almost same independent of the material laws used in the coupled T-H-M processes. By comparing the saturation change of T-H-M and that of H-M(Hydro-Mechanical) processes using elastic and poroelastic material model respectively, it was found that the degree of saturation near the heater from T-H-M calculation was higher than that from the coupled H-M calculation mainly because of the thermal flux, which seemed to speed up the saturation. The stresses in three cases with different material laws were increased with time. By

comparing the stress change in H-M calculation using poroelastetic and poroelastetic-plastic model, it was possible to conclude that the influence of saturation on the stress change is higher than the influence of temperature. It is, therefore, recommended to use a material law, which can model the elastic-plastic behavior of buffer, since the coupled T-H-M processes in buffer is affected by the variation of void ratio, thermal expansion, as well as swelling pressure.

Key Words : Coupled THM process, Bentonite saturation, Material law, HLW repository

요 약

한국의 고준위폐기물 기준 처분 시스템의 공학적 방벽에서의 T-H-M(Thermo-Hydro-Mechanical) 거동 실증을 위한 KENTEX(KAERI Engineering-scale T-H-M Experiment for Engineered Barrier System)실험 장치를 대상으로 열-수리-역학 연동현상 해석을 하여 온도, 포화도 및 응력의 변화를 예측하였다. 그리고 이들 변수와 열-수리-역학의 연동현상에 사용된 세 물성법칙인 탄성물성법칙, 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-소성 물성법칙과의 관계를 분석하였다. 열-수리-역학 연동현상을 계산하는 데는 상용 유한요소 코드인 ABAQUS를 사용하였다.

열 계산에서 벤토나이트 내 온도는 히터 가열 후 초기에는 급격히 증가하다가 얼마의 시간이 경과한 후에는 거의 일정한 값에 도달하였다. 이 도달시간은 약 37.5일로 반경방향의 모든 지점(H=0.68m 일때)에서 정상상태에 도달한 것을 알 수 있었다. 즉, 히터와 벤토나이트 경계면에서는 90 ℃, 벤토나이트와 외부 셀 경계면에서는 약 70 ℃를 유지하였다. 열-수리-역학 연동현상 계산에서 시간에 따른 벤토나이트 포화도는 탄성 물성법칙, 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-소성 물성법칙의 세 경우 모두 거의 차이가 없었다. 열-수리-역학 계산 결과와 수리-역학 계산 결과의 비교에서 온도의 증가는 탄성 물성법칙 및 공극탄성 물성법칙 각각에 대해 시간이 경과함에 따라 포화도가 증가함을 초래해 포화가 빨리 진행됨을 알 수 있었다. 특히 히터에 가까운 쪽에서는 물이 침투하고 있는 쪽 보다 포화도 증가가 큰 것으로 나타나 벤토나이트가 물로 포화되기 전의 초기상태가 온도의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다. 또한 응력은 세 물성 법칙 모두 시간의 경과에 따라 증가하는 경향을 보이거나 탄성 물성법칙의 경우가 다른 두 경우보다 현저한 변화를 보이는데 이는 변형율이 탄성한계를 넘어서도 계속 작용하여 공극비 변화를 고려한 다른 두 물성법칙과 차이가 있음을 나타내고 있다. 그러나 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-소성 물성법칙의 경우에 열-수리-역학 계산 결과와 수리-역학 계산 결과를 비교하면 시간이 경과함에 따라 응력은 증가하지만 온도의 변화에 따른 서로의 응력의 차이는 작은 것을 알 수 있다. 즉 온도변화의 영향 보다는 시간에 따른 포화도 변화의 영향이 더 큰 것으로 생각된다. 따라서 벤토나이트의 열-수리-역학 연동현상 해석에서 벤토나이트는 온도의 증가로 포화가 빨라지고, 포화도 증가는 응력을 증가시키는 결과를 보이므로 공극비, 열팽창 및 팽윤압 등의 영향을 받고 있는 것으로 이해된다. 그래서 벤토나이트의 열-수리-역학 연동현상 해석에서 벤토나이트는 공극비, 열팽창 및 팽윤압 등의 영향을 받으므로 탄성과 소성을 동시에 고려할 수 있는 물성법칙을 선택하는 것이 바람직하다.

중심단어 : 열-수리-역학 연동현상, 벤토나이트 포화, 고준위 폐기물 처분, 물성법칙

I. 서론

한국의 고준위폐기물 심지층 처분 개념은 핵종의 유출을 방지하기 위해 다중방벽을 사용하고 있다. 지하 수백 미터에 위치하는 이 처분장은 천연방벽과 공학적 방벽으로 구성되는 데, 공학적 방벽은 폐기물, 처분 용기 및 완충재로 구성된다. 공학적 방벽 중에서 완충재로 벤토나이트를 사용하는 처분 시스템은 벤토나이트가 낮은 투수율을 가져 외부 지하수의 유입을 늦추고, 또 용출된 핵종을 흡착해 외부환경으로 핵종이 유출되는 것을 지연시키는 기능을 이용한 것이다. 완충재로 사용된 벤토나이트의 이런 기능과 역할이 지하의 심부 환경조건과 고준위폐기물의 특성에 맞게 처분장 운영 및 폐쇄 후에도 지속적으로 유지될 수 있는 가를 평가하는 것은 공학적 방벽의 성능을 결정하는 처분기술 중의 하나이다.

고준위 폐기물 처분장에서 공학적 방벽의 성능은 방사성폐기물의 붕괴열로 인해 영향을 받는 벤토나이트가 그 기능을 유지할 수 있는가에 의해 주로 결정된다. 즉, 지하 심부 지층의 주위 암반으로부터 지하수가 유입되고, 방사성 폐기물로부터 붕괴열이 발생되는 상황에서 완충재로 사용되는 벤토나이트의 열 특성, 재포화 특성 및 팽윤압 특성이 복합적으로 일어나는 열-수리-역학 연동 거동이 공학적 방벽의 성능을 결정한다. 그래서 공학적 방벽에서의 열-수리-역학 연동 거동 연구는 고준위폐기물 처분장의 성능 및 안전성을 평가하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 이와 관련하여 한국원자력연구소에서는 1998년 2단계 연구결과로서 기준 처분시스템(Fig.1 참조,[1])을 제안한 바 있으며 현재 공학적 방벽의 열-수리-역학 거동 실증을 위해 공학적 규모(Engineering-scale)의 KENTEX(KAERI Engineering-scale T-H-M Experiment for Engineered Barrier System) 실험장치를 설치하여 실증 실험을 수행하고 있다[2].

본 연구에서는 KENTEX 실증장치를 대상으로 벤토나이트의 열-수리-역학 연동현상 해석을 통하여 온도, 포화도 및 응력의 변화를 예측하였다. 그리고 열-수리-역학 연동현상 해석에 사용된 세 물성법칙인 탄성 물성법칙, 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-

Drucker-Prager 소성 물성법칙이 벤토나이트에서의 온도, 포화도 및 응력변화에 미치는 영향도 분석하였다.

II. 열-수리-역학 연동현상

고준위 폐기물을 지하 수백 미터의 암반에 처분하면 처분용기와 암반 사이에 채워진 벤토나이트는 암반에서 흘러나오는 지하수와 접촉하는 것과 동시에 처분용기에서 방출되는 붕괴열에 노출된다. 일정한 밀도와 수분함량을 갖는 블록 형태의 벤토나이트는 암반으로부터 흘러나오는 지하수와 접촉할 경우, 수분 함량이 변하고, 부피가 팽창하여 응력 변화 등을 초래한다. 또한 처분용기와 접촉하여 온도가 상승하는 부분에서는 열팽창으로 인해 부피변화를 초래함과 동시에 열에 의한 수분의 이동으로 인해 수분 함량의 변화에 따른 응력 변화도 초래한다. 벤토나이트 완충재로 구성되는 공학적 방벽에서의 열-수리-역학 연동현상은 Fig.2와 같은 매트릭스로 표현할 수 있다. 표의 대각선은 각각 열, 수리, 역학의 독립적인 현상과 관련 지배방정식 및 물성법칙을 나타내고, 그 외의 상호 연동된 메커니즘과 영향을 주는 물성인자를 나타내고 있다[3].

방사성폐기물 처분장에서 공학적 방벽 또는 천연방벽을 대상으로 한 연동현상(Coupled Processes)은 열해석, 수리해석 및 역학 해석 중 두개 현상과의 연동해석이나 세 공정 모두와의 연동해석 등으로 연구되어 왔고[4], KAERI(Korea Atomic Energy Research

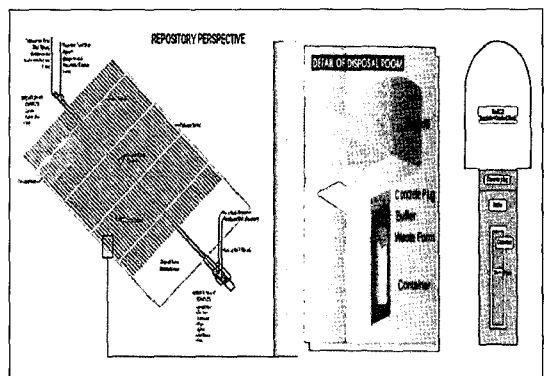


Fig. 1. Schematic view of a reference disposal system developed in 2002.

	T	H	M
T	Thermal -Energy conservation -Fourier law	-Moisture movement by thermal gradient -Moisture density change -Vaporization	-Thermal expansion, thermal stress -Thermal effect on swelling -Thermal effect on mechanical stability
H	-Heat convection -Latent heat by phase change	Hydrological -Continuity eqn. -Darcy's law	-Change of effective stress -Generation of swelling pressure
M	-Mechanical energy conservation	-Hydraulic property change -Porosity change	Mechanical -Equilibrium eqn. -Hooke's eqn.

Fig. 2. Important mechanisms in the interaction matrix for bentonite buffer.

Institute)에서도 공학적 방벽에 대한 열계산[5] 및 터널 구조 안전성에 대한 역학 계산[6] 등을 수행했으며, 국제적으로는 DECOVALEX(Development of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation) 프로젝트를 구성하여 관련 연구를 추진해왔다[7].

KENTEX 실험에 대한 주요 측정 변수의 예측을 위해 열-수리-역학 연동현상을 계산하는 데는 상용 유한요소 코드인 ABAQUS를 사용하였다. 열-수리-역학 연동현상을 해석하는 방법은 열, 수리, 역학 각각을 어떻게 조합하느냐에 따라 여러 가지 방법 [8]이 있지만, ABAQUS 코드는 변형, 공극 압력 및 온도에 대한 자유도를 함께 갖는 유한요소 격자를 갖고 있지 않기 때문에 열, 역학 및 수리 현상들이 직접 연동하는 것을 계산할 수 없는 제약성을 갖고 있어, 본 해석에서는 열계산을 먼저 한 다음 그 결과를 수리-역학 연동현상 해석에 입력 자료로 사용하여 온도의존성이 있는 파라미터(예로 열팽창계수)의 영향을 반영하는 방법을 택하여 해석하였다 [9,10].

ABAQUS를 사용한 벤토나이트 완충재에 대한 열-수리-역학 모델은 다공성 매질과 기공에 채워진 유체로 구성되며, 응력평형 방정식, 구성방정식, 에너지수지 방정식 및 질량보존 방정식 등으로 표현된다. 응력 평형방정식은 다공성 매체에 대해 임의시간의 형태를 고려할 때 이 부피에 가해지는 일에 대한 평형 방정식으로 다음과 같다.

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV + \int_V S, n \rho_w g \cdot \delta v dV \dots (1)$$

여기서 δv 는 속도, $\delta \epsilon = \text{sym}(dvd/x)$ 는 변형을, σ 는 응력, t 는 surface tractions per unit area, f 는 단위 부피당 모든 body forces(유체의 무게는 제외), S_r 는 포화도, n 은 공극율, ρ_w 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도 이다. 이 방정식의 응력에는 다음과 같은 유효응력(effective stress)의 개념이 사용된다.

$$\sigma^* = \sigma + \chi U_w I \dots (2)$$

여기서 σ 는 전체 응력, U_w 는 공극수압, χ 는 포화도의 함수, I 는 단위 매트릭스 이다.

에너지수지 식은 에너지 보존 법칙에 따라 물체의 내부에너지와 운동에너지의 시간적 변화는 물체의 체적 및 표면적이 행한 일의 변화의 합과 같다는 것에 의해 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 ρ 는 밀도이고, v 는 속도벡터이며, U 는 단위질량당 내부 에너지이고, t 는 표면 traction vector이고, f 는 body force vector 이다.

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

$$d\tau^c = H : d\epsilon + g \dots (4)$$

여기서 $d\tau^c$ 는 응력 증가 이고, H 는 material stiffness 이며, $d\epsilon$ 는 변형을 증가이고, g 는 독립적으로 기여하는 변형을 즉 예로 열팽창으로 기여하는 변형을 같은 것이다. 매질의 공극에 들어 있는 유체

에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

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

여기서 ρ_w 는 밀도이고, ρ_w^0 는 기준상태의 밀도이며, $K_w(T)$ 는 유체의 bulk modulus 이다. 온도변화에 의해 일어나는 유체의 부피팽창은

$$\epsilon_w^h = 3 \alpha_w (T - T_w^0) - 3 \alpha_w|_{T'} (T' - T_w^0) \quad \dots(6)$$

로 표현된다. 여기서 $\alpha_w(T)$ 는 유체의 열팽창계수이고, T 는 현재온도이며, T' 는 초기온도이며, T_w^0 는 기준상태의 온도이다.

질량보존법칙에 따라 유체의 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{J} \frac{d}{d} (J \rho_w S_r n) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w S_r n v_w) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 J 는 야곱 매트릭스이고, x 는 위치이다. 이를 위한 구성 방정식으로 공극에서의 흐름은 Darcy 법칙을 따른다는 가정 하에서 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 S_r 는 포화도이며, \hat{k} 는 매질의 투수계수이고, n 는 공극율, v_w 는 유속이고, ϕ 는 수두이다. 이는 일정 온도에서 유체의 이동을 나타낸 것으로 온도의 상승에 의해 공극에서 발생하는 유체의 기체 상태에 대한 이동은 고려하지 않고 있다.

다른 메커니즘과 연계되지 않은 열전달 해석만을 위해서 내부에너지의 시간적 변화율은 물체의 단위표면적 당 열유속과 단위체적당 공급되는 열의 합과 같다는 에너지수지 식을 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 U 은 내부에너지의 시간적 변화율이고, q 는 단위 표면적당 열유속이고, r 은 열원이며, V 는 체적이다. 불포화 매질영역에서 온도로 인한 대류 현상은 불포화 영역내의 흐름에 별 영향이 없어 이를 무시하고[11], 전도 열전달에 의해서만 열전달이 일어난다는 가정 하에서 휴리어 법칙이 구성방정식으로 사용된다.

III. 물성법칙 및 입력 자료

KENTEX 실증 장치의 크기는 기준 처분시스템 개념에서 제시한 공학적 방벽 크기를 1/3로 축소한 것으로, 모양은 원통형이고, 외부 셀은 두께 0.036 m, 길이 1.709 m 이고, 장치의 아래 부분과 윗부분은 후렌지로 연결되어 있고, 재질은 주철이다. 이 원통형의 내부는 높이 1.36 m, 직경 0.75 m의 공간에 벤토나이트 블록을 채웠고, 벤토나이트 영역 내부에 직경 0.41 m, 높이 0.68 m인 히터를 넣었다. 셀 외부에는 벤토나이트 외벽에 물을 공급하여 지하수의 침투를 모사할 수 있도록 축방향의 세 곳에 반경방향으로 물이 공급되며, 이의 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 히터는 1000 W를 각각 세 개 설치하여 총 3000 W를 공급할 수 있도록 하였다. Fig.3은 열-수리-역학 연동현상 계산을 위한 기하학적 모델로 KENTEX 실증장치의 개념도를 나타낸 것이다[2].

히터의 외부 표면과 벤토나이트가 접촉하는 면의 온도는 90 °C로 일정하게 유지하고 외부의 셀로부터는 물을 공급한다. 그러면 초기에 불포화 벤토나이트가 외부에서부터 포화되면서 물이 히터 방향의 내부로 침투되고, 벤토나이트는 히터와 접촉한 부분에서부터 온도가 상승하여 90 °C가 계속 유지되면서 벤토나이트의 거동에 영향을 주게 된다. 이는 처분장에 처분용기를 거치하고 벤토나이트 완충재를 채운 후 지하수가 침투하는 현상을 모사한 장치로 열-수리-역학 연동현상 해석은 이러한 현상을 상기 지배 방정식에 의해 계산하는 것이다.

열해석을 위한 입력 자료들은 Table 1에 표시하였다. 벤토나이트 블록은 경주벤토나이트 분말을 밀도

Table 1. Thermal properties used in the analysis

	벤토나이트 ¹⁾	히터 ²⁾	외부셀 ³⁾
밀도(kg/m ³)	1600.0	3580.0	7870.0
열전달계수(W/m.K)	1.0	42.0	48.14
비열(J/kg.K)	736.0	877.0	462.0

주) ¹⁾은 참고문헌 [15] 참조
²⁾는 website 의 MgO 물성값
³⁾은 L. H. Van Vlack, "Materials Science for Engineers," Addison-Wesley Publishing Company. Inc. (1970).

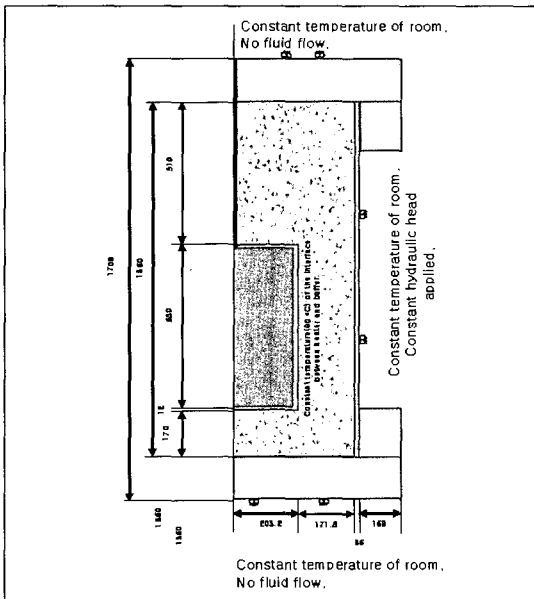


Fig. 3. Schematic view of KENTEX facility(unit:mm)

가 1600 kg/m³ 되게 압축한 것으로 초기 함수율은 13%이고, 열전달 계수와 비열은 이 조건에서의 값을 사용하였다. 히터는 원통 속에 있는 전기발열체를 MgO로 채워 열이 균등하게 전달되도록 제작하였기 때문에 MgO의 열물성값을 사용하였다. 외부 셀은 주철의 열물성값을 사용하였다.

열계산에서의 모델은 축대칭의 기하학적 형태를 갖는다고 가정하여 축대칭 유한요소 격자를 만들고 경계조건을 부여하였다. 모델의 중심축은 열 유속이 없는 것으로 하고, 외벽은 공기와 접촉하여 공기 필름을 통한 대류에 의해 열전달이 일어나는 것으로 하였다. 이때의 공기외부 온도는 25 °C 이고, 공기 필름의 대류열전달 계수는 0.7 W/m².°C를 사용하였다.

초기 온도는 25 °C를 사용하였다.

벤토나이트의 수리-역학 연동현상 해석에서 식 (4)-식(6)의 구성방정식을 결정하여야 한다. 본 계산에서는 1)탄성 거동, 2)공극탄성 거동(poroelastic behaviour), 3)공극탄성-소성 거동(poroelastic-Drucker-Prager plastic behaviour) 세 종류를 사용하였다. 탄성 거동에는 일반적으로 탄성체의 응력-변형을 관계에서 사용하는 탄성 물성법칙(elastic material law)을 사용하였다. 공극탄성 거동에는 공극물질에서 부피 또는 공극비가 변화하면서 응력-변형을 관계를 모사함으로 응력과 공극비의 관계를 모사할 수 있는 공극탄성 물성법칙(poroelastic material law)를 사용하였다. 공극탄성 거동을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\kappa}{1 + e_0} \ln(p_0/p) = J^{el} - 1 \dots\dots\dots (10)$$

여기서 e₀는 초기 공극비 이고, p₀는 초기 평균 응력이며, κ는 e-logp 관계식의 기울기로 로그 벌크 모듈러스(logarithmic bulk modulus) 이고, J^{el}은 탄성 부피비이다. 본 계산에 사용된 κ는 0.21이고, 이때 사용되는 포아송 비는 0.4 이다[12].

탄성-소성 거동에는 탄성부분은 공극탄성거동을 따르고, 소성부분은 선형 Drucker-Prager 소성 거동을 따른다고 가정하였다. Drucker-Prager 소성 모델은 평균 응력 p와 mises 응력(mises equivalent stress) q를 갖고 p-q 그래프로 나타내는 데 여기에는 점착력과 마찰각이 반영되며, 이 p-q의 응력 경로가 소성범위에 들어오면 항복면은 파괴면에 도달할 때까지 파괴면 쪽으로 움직이고, 이 항복면의 중간주응력(intermediate principal stress)에 대한 종속성을 제어하는 상수 k를 사용하며 이 모델이 벤토나이트에 대한 물성 거동을 잘 모사하고 있는 것으로 알려져 있다[13,14]. 이 Drucker-Prager 물성 법칙에 사용된 입력 자료는 β= 12.4, k= 0.93, d=1.9 MPa 들[15]로 벤토나이트에서 소성 영역이 발생하는지를 판단하게 된다.

온도변화에 따른 역학 해석은 벤토나이트, 히터 및 셀 모두에 적용되었으며 주로 열팽창 계수에 의한

Table 2. Mechanical and hydrological properties used in the analysis

	벤토나이트 ¹⁾	히터 ²⁾	외부 셀 ³⁾
Young's modulus (MPa)	1080	2.49x10 ⁵	2x10 ⁵
Uniaxial compressive strength (MPa)	4.3	-	-
Saturated permeability(m/s)	2.28 × 10 ⁻¹³	-	-
Friction angle	37	-	-
Poisson's ratio	0.21	0.18	0.3
Cohesion	1.9	-	-
Thermal expansion coefficient(1/°C)	3.8 × 10 ⁻⁴	1.08 × 10 ⁻⁵	1.13 × 10 ⁻⁵

주) ¹⁾은 참고문헌 [15] 참조
²⁾는 website www.crstran.co.uk의 MgO 물성값
³⁾은 L. H. Van Vlack, "Materials Science for Engineers," Addison-Wesley Publishing Company. Inc. (1970).

응력-변형율의 관계를 해석한다. 히터와 셀은 온도 상승 영역에서 탄성거동을 할 것으로 예상하여 탄성 물성법칙을 사용하였고, 벤토나이트는 탄성 물성법칙, 공극탄성 물성법칙 과 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성법칙을 사용하였다. 각 부분의 탄성거동 해석을 위한 물성값, 열팽창 계수와 벤토나이트의 투수 계수를 Table 2에 표시하였다.

역학적 경계조건은 중앙 축방향은 대칭 조건을 주고, 좌우면에서는 좌우 방향의 변위를, 위아래면에서는 위아래 방향에서의 변위를 각각 고정시켰다. 수리계산은 벤토나이트 영역만 해당되므로 그 경계조건은 벤토나이트와 히터 및 셀과의 접촉면은 불투수면으로 하고, 물은 벤토나이트와 셀 외부 축방향의 접촉면에서 50 KPa의 일정한 압력으로 공급되는 것으로 하였다. 벤토나이트의 초기 조건은 포화도가 0.507인 불포화 상태이고, 공극비(void ratio)는 0.695를 사용하였다.

벤토나이트는 초기에 불포화된 상태에서 외부의 물이 공급됨에 따라 점점 포화되어 가는 과정을 모사하였지만 벤토나이트의 온도 증가에 따른 물의 이동은 고려하지 않았다. 벤토나이트 영역에서 불포화 물 흐름을 계산하기 위해서는 포화도에 따른 공극수압(흡입압력)변화의 관계와 포화도에 따른 상대투수계수(relative conductivity)의 관계가 필요하다. 이를 위해서는 토양 물질에 대해 광범위하게 사용되는 다음의 van Genuchten 관계식을 사용하

였다[16].

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

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

여기서 α, β 는 van Genuchten 상수이고, λ 는 $\lambda=1-1/\beta$ 이며, ψ 는 흡입압력으로 MPa의 값을 갖는다. S 는 포화도이고, S_s 는 완전포화(1.0) 또는 최대포화 일 때의 포화도인데 통상 완전포화도의 값 1.0을 사용하고, S_r 는 잔여포화도 또는 최소포화도이다. K_r 은 상대 투수계수이고, S_e 는 유효포화도 [$S_e = (S - S_r)/(S_s - S_r)$]이다. 본 연구에서 상수 α, β 값은 0.15 1/MPa, 1.83을 각각 사용하였다 [17]. 이를 이용하여 흡입 압력과 포화도의 관계 및 포화도와 상대투수계수의 관계를 Fig. 4 및 Fig. 5에 표시하였다.

처분 시스템에 벤토나이트를 사용하는 이유 중의 하나가 차수재로서 벤토나이트의 팽윤 특성 때문이다. 보통 벤토나이트의 팽윤 특성은 팽윤압을 시간의 함수로 표현하는 것이 일반적이다. 그러나 ABAQUS에서는 포화도에 따른 팽윤압이나 부피 변형율의 변화를 주는 입력 자료를 사용할 수 없기 때문에 팽윤압을 시간의 함수로 표현한 데이터를 사용하지 않고, 다음 식과 같은 팽윤 비율(swelling ratio)을 포화도의 함수로 나타내는 입력 자료를 사용하였다[9].

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

여기서 γ 는 팽윤 계수이고, S_0 는 초기 포화도이다. 본 계산에서 팽윤 계수는 Fujita가 제시한 0.166을 사용하였다[18].

IV. 계산결과 및 고찰

열-수리-역학 연동현상 계산을 통하여 KENTEX 실증장치 내 벤토나이트에서의 온도, 포화도 및 응력의 변화를 예측하였다. 그리고 이들 변수와 열-수리-역학의 연동현상에 사용된 세 가지 물성법칙과의 관계도 분석하였다.

열해석 결과로서 Fig. 6은 시간에 따른 측정지점의 온도 변화인데, 이들 측정 지점은 유한요소 격자

가 바닥으로부터 수직방향으로 약 0.68 m높이, 수평방향은 중심축으로부터 벤토나이트 영역인 약 0.2 m에서 약 0.37 m 사이에 있는 것들이다. Fig. 6 (a)에서 R=0.203m는 벤토나이트와 히터의 접촉면에서 최대온도가 90 ℃까지 상승하여 시간이 경과함에 따라 계속 같은 온도를 유지하고 있음을 나타내고, R=0.289m는 벤토나이트의 반경방향 중간지점으로 최대온도가 약 78 ℃ 정도를 유지하고 있다. R=0.375m는 벤토나이트와 외부셀의 접촉면이고, R=0.411m는 셀 표면을 표시한 것으로 이들은 최대 온도 약 70 ℃를 나타내며 두 지점이 비슷한 온도를 나타내는 것은 셀의 열전달계수가 높고 셀 두께가 얇기 때문이다. 여기서 셀 표면은 공기와 접촉하는 경계면을 말한다. 이러한 정상상태의 온도에 도달하는 시간은 약 37.5일이 소요되었다. Fig. 6.(b)에 표

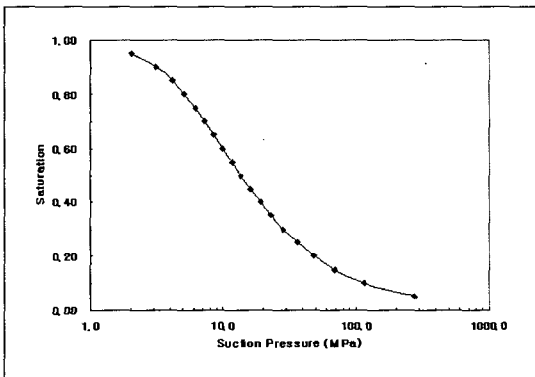


Fig. 4. Moisture retention curve used by ABAQUS for bentonite as estimated by means of the van Genuchten expression.

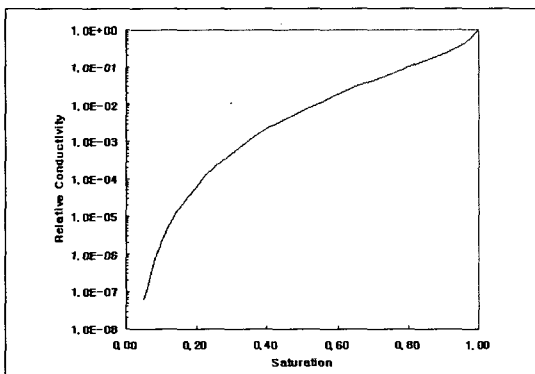
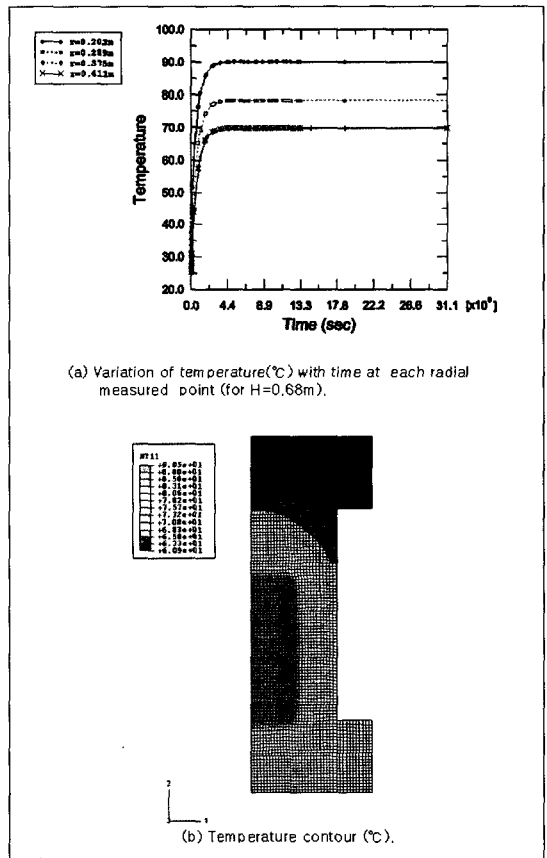


Fig. 5. Relationship between relative conductivity and saturation used by ABAQUS.



(a) Variation of temperature(°C) with time at each radial measured point (for H=0.68m).

(b) Temperature contour (°C).

Fig. 6. Variation of temperatures with time and temperature contour after 365 days.

시한 온도 등고선(temperature contour)을 보면 열원에서부터 방사형으로 열이 전달돼 가는 모습을 볼 수 있고, 윗부분이 아랫부분 보다 온도가 낮은 모양을 보이는 것은 열원의 위치가 아래로 치우쳐 있기 때문이다.

Fig. 7은 측정지점에서 반경방향으로의 온도 변화를 나타낸 것으로, 1일, 10일, 30일, 150일 및 365일 경과일 때의 온도변화를 표시하였다. 1일 경과한 후의 온도는 약 31 ℃에서 46 ℃ 사이의 분포를 보이고, 10일인 경우는 약 57 ℃에서 76 ℃의 분포를 보이고 있고, 30일경과 후에는 거의 최대 온도 분포에 접근하다가 150일 및 365일 경과에서는 두 온도 분포차가 거의 없이 최대온도 분포를 유지하고 있음을 나타내고 있다. 즉, 벤토나이트와 열원이 접촉하는 부분의 최대 온도가 90 ℃로, 외부 셀과 벤토나이트가 접촉하는 부분의 최고 온도는 70 ℃로 유지되었다.

열-수리-역학 연동현상 계산에서는 불포화 벤토나이트의 포화도와 응력의 변화를 계산하고, 이 변화에 대한 세 가지 물성법칙의 영향을 검토하였다. 벤토나이트에 물이 포화되는 것은 벤토나이트의 공극이 물을 흡수할 수 있는 능력을 나타내는 함수 포텐셜(water retention potential)에 의해 물이 공극내로 침투하는 것으로 가정한다. 물이 포화되는 이 현상에서 벤토나이트 고체입자는 자체적으로 팽윤을 하고, 공극비도 변하며, 벤토나이트의 응력도 변화 한다. 이러한 응력변화는 1) 탄성 거동, 2) 공극탄성 거동(poroelastic behaviour), 3) 공극탄성-소성 거동(poroelastic - Drucker-Prager plastic behaviour) 세

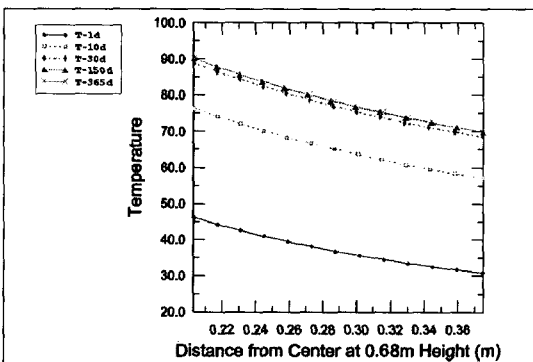


Fig. 7. Variation of temperature(°C) with radial distance and time(day).

종류의 물성법칙을 따른다고 가정하였다. 또한 온도 상승에 따른 부피 팽창의 영향은 공극에 함유된 유체와 고체입자가 분리되어 나타난다는 가정에 따라 유체는 물의 열팽창계수, 고체는 건조 벤토나이트 입자의 열팽창계수를 사용하였다. 그래서 Table 2의 함수율이 포함된 벤토나이트 열팽창 계수 대신에 물은 열팽창 계수 3.0×10^{-4} , 벤토나이트의 입자들은 열팽창이 거의 없는 것으로 가정하여 열팽창계수를 0으로 사용하였다.

반경방향의 거리에 따른 포화도의 변화를 탄성 물성법칙(e1로 표시), 공극탄성 물성법칙(pe로 표시) 및 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성법칙(pd로 표시)에 대해 각각 1일 경과(-1d로 표시), 30일 경과(-30d로 표시), 150일 경과(-150d로 표시) 및 365일 경과(-365d로 표시) 한 것을 Fig 8 (a)에 표시하였다. 이들 측정 지점은 유한요소 격자가 바닥으로부터 수직

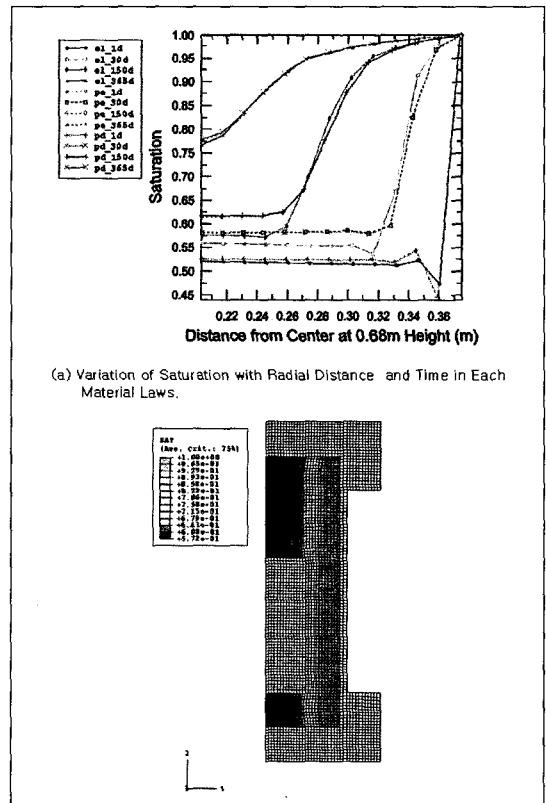


Fig. 8. Saturation of bentonite from three type material law with radial distance time and saturation contour after 365days.

방향으로 약 0.68 m 높이, 수평방향은 중심축으로부터 벤토나이트 영역인 약 0.2 m에서 약 0.37 m 사이에 있는 것들로 열분포에 사용한 측정지점과 같다. 이 그림에서 시간이 경과함에 따른 포화진행 경향은 공극탄성물성법칙(이후로 pe모델로 기술)과 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성법칙(이후로 pd모델로 기술)은 거의 비슷한 모양을 보이고 있지만 탄성 물성법칙(이후로 ei모델로 기술)은 이들과 조금 다른 모양을 보이고 있다. 1일이 경과한 후의 pe모델 및 pd모델과 ei모델을 비교해 보면 0.36 m에서부터 물이 공급되는 0.375 m 영역인 물의 흐름이 일어나는 구간에서 포화곡선은 서로 비슷하다. 시간에 따라 포화가 진행되면서 30일 경과에서는 ei모델이 다른 두 모델보다 조금 빨리 포화되는 경향을 나타내다가 150일 경과에서는 이 차이가 조금 줄어든 후에 365일 경과에서는 세 모델 모두가 거의 비슷한 포화경향을 나타내고 있다. 즉 물의 흐름이 있는 영역의 포화공정에 어떤 물성 법칙을 사용하여도 포화되는 경향에는 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 365일이 경과한 때의 비슷한 포화도 곡선을 보이는 세 물성모델 중 pd모델을 선정하여 포화도 등고선을 Fig. 8.(b)에 표시하였다. 이 그림에서 벤토나이트는 외벽쪽에서부터 열원쪽으로 포화가 진행되고 있음을 알 수 있다. 포화가 진행되는 등고선이 수직으로 거의 일정하게 보이는 것은 경계조건으로 외부벽에서의 수두압을 높이에 관계없이 일정하게 주었기 때문이고, 이 수두압과 흡입압력에 의해서 물 흐름이 일어나고 있음을 나타내고 있는 것이다.

물의 흐름이 일어나지 않는 영역인 초기 포화도를 유지하고 있는 부분에서 ei모델의 포화도와 pe 및 pd모델의 포화도를 비교해 보면 조금 다른 모양을 보이고 있다. 즉, 1일이 경과한 때의 포화도는 pe 및 pd모델이 ei모델 보다 약간 높으나, 30일 경과에서는 그 차가 더욱 커졌고, 150일 경과에서도 큰 차이를 나타냈다. 그러나 거리에 따른 포화도는 거의 차이를 보이지 않고 있다. 이 영역에서 물의 흐름이 없는 데도 포화도의 변화가 나타나는 결과는 온도의 영향으로 보았다. 그래서 온도의 영향이 없는 수리-역학 연동현상에 대한 계산을 하여 같은 위치에서 반경방향

으로의 포화도를 Fig. 9에 나타내었다.

탄성모델에 대한 온도의 영향을 보기위해 열-수리-역학(el-로 표시) 및 수리-역학(elh-로 표시)의 계산 결과를 함께 도시한 것이 Fig. 9.(a)이다. 수리-역학계산의 ei모델은 1일 경과에서 물의 흐름이 없는 영역에서 거의 초기 포화도를 유지하고 있으며, 30일 경과 및 150일 경과에서도 초기 포화도와 약간의 차이를 보이고 있을 뿐이다. 그러나 열-수리-역학계산에서 시간이 경과함에 따라 물의 흐름이 없는 영역에서 포화도의 차이가 크게 나타나므로 물의 열팽창 계수에 의한 부피 변화로 인해 포화도가 변화하는 것으로 물의 흐름이 없는 영역에서도 포화도가 온도의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 물이 흐르는 영역에서도 1일 경과 후에 차이가 없으나 30일 경과 후부터는 열-수리-역학 계산 쪽의 포화도가 높아 포화도가 온

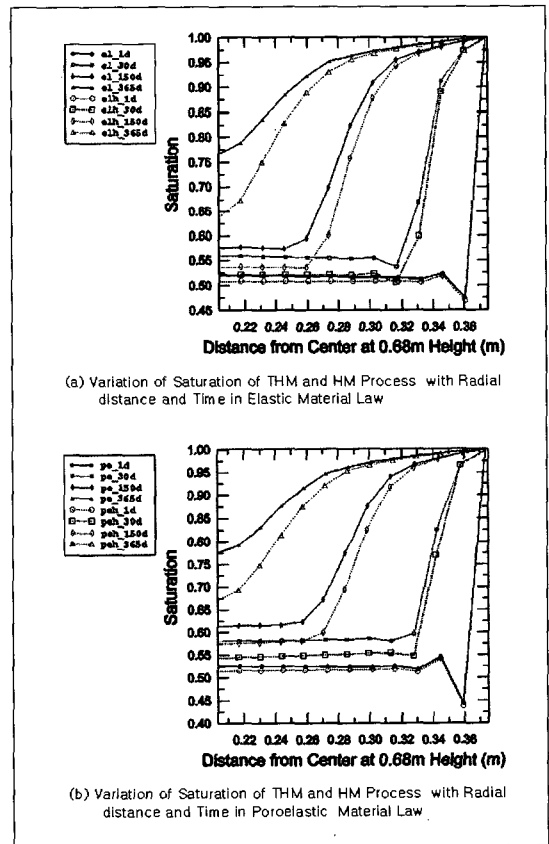


Fig. 9. Saturation of bentonite from THM and HM calculations by means of elastic material law and poroelastic material law.

도에 영향을 받고 있고, 365일 경과 후에는 이 영향이 현저하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9.(b)는 pe모델에 대한 온도의 영향을 보기 위해 열-수리-역학(pe-로 표시) 및 수리-역학(peh-로 표시)의 계산 결과를 함께 도시한 것이다. 1일에서부터 150일 각각의 시간 경과에 따른 포화도 변화는 ei 모델과 비슷한 경향을 보이지만 포화도의 크기는 ei 모델 보다 큰 것으로 나타났다. 이는 물의 흐름이 없는 영역에서도 온도 변화에 의한 물의 부피변화 뿐만 아니라 공극비와 압력 및 변형률 관계를 나타내는 pe 모델의 특성도 함께 반영되어 포화도 변화가 일어나는 것임을 알 수 있다.

또한 물의 흐름이 있는 포화 영역에서도 ei모델과 pe모델 모두 온도를 고려한 열-수리-역학 계산이 시간의 경과에 따라 수리-역학 계산 보다 포화가 빨리

진행되는 것으로 나타나 온도에 의한 열팽창이 포화에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

결국 물의 흐름이 없는 영역의 벤토나이트도 온도의 증가에 따른 열팽창으로 인해 온도가 포화도에 영향을 미치며 흐름이 있는 영역에서도 온도의 변화가 포화도에 영향을 미친다. 그래서 벤토나이트 내에서의 온도 변화가 포화도에 미치는 영향은 열팽창에 의한 것뿐만 아니라 증기상태의 흐름 및 대류에 의한 유체흐름 등도 함께 일어나므로 이런 다른 요인에 의한 영향들도 상세하게 검토할 필요가 있다.

반경방향의 수평응력 및 수직응력을 150일 및 365일 경과한 경우에 대해 세 모델 각각에 대해 Fig. 10 (a) 및 (b)에 도시하였다. 수평응력인 경우에 ei모델은 150일에서 상당히 크고, 365일에서는 더욱 증가되는 모습을 보이는 반면에 pe 및 pd모델

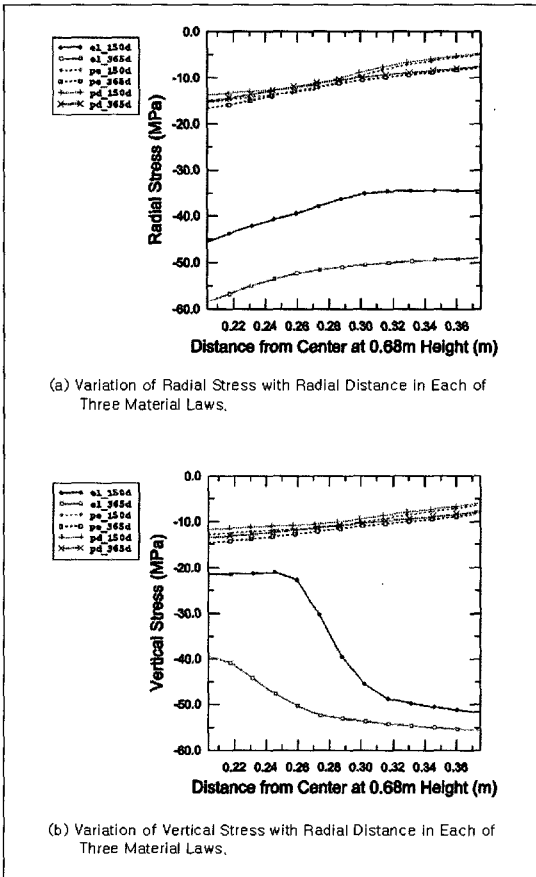


Fig. 10. Radial stress and vertical stress from each of three type material laws.

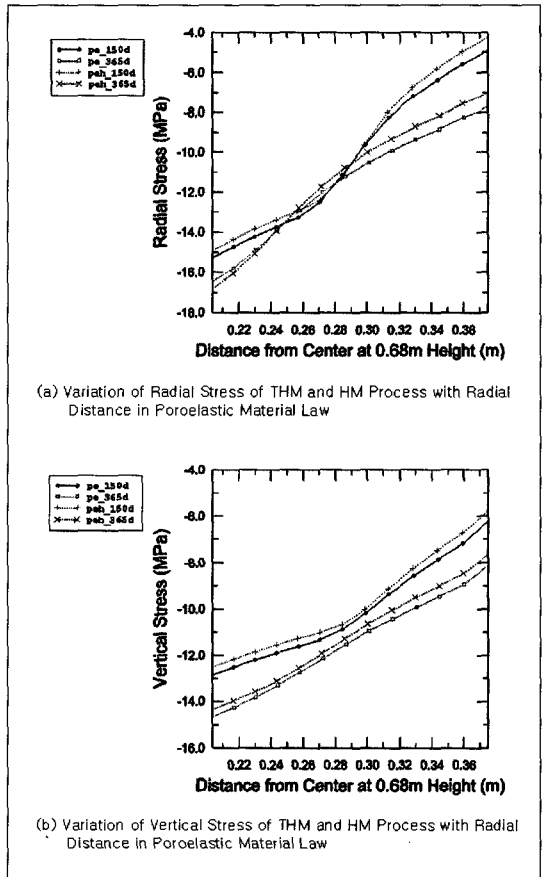


Fig. 11. Radial stress and vertical stress from THM and HM calculations by means of poroelastic material law.

은 시간의 경과에 큰 영향을 받지 않으며 두 모델이 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 본 계산에서의 이와 같은 결과는 el모델이 벤토나이트의 팽윤특성을 고려하고 있지 않아 포화에 따른 벤토나이트의 변형율이 탄성한계를 넘어서도 전부 응력으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그러나 pe 및 pd모델에서는 식 (10)에서 보는 바와 같이 공극비의 변화 등을 고려하기 때문에 포화에 따른 벤토나이트의 변형이 공극비 변화로 흡수되어 응력이 적게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 물이 유입되는 쪽에서의 응력이 팽윤 등의 영향으로 감소된 것을 나타내고 있다. 이런 현상은 본 계산에서 팽윤 비율로 표현되어 나타난 변형율이 응력으로 나타나겠지만 용기의 제한으로 인해 이의 영향은 추산할 수 없다. 즉 팽윤에 관련된 응력을 본 계산에서는 독립적으로 추산해 낼 수 없고, 열에 의한 팽창과 팽윤에 의한 팽창 및 외부 부하에 의한 팽창 등 모든 가능성의 혼합에 의해 야기되는 응력의 변화로 생각된다. 수직응력에 대한 결과도 el모델만 제외하면 수평응력과 비슷한 모양을 나타내고 있다.

온도의 영향을 보기위해 pe 및 pd모델에 대해 열-수리-역학 계산과 수리-역학 계산(peh, pdh로 표시)에서 얻은 수평 및 수직응력을 Fig. 11 (a) 및 (b)에 각각 표시하였다. Fig. 11.(a)에서 보는 바와 같이 150일 경과일 때에는 수리-역학 계산의 수평응력이 열-수리-역학 계산의 것 보다 다소 낮아 열팽창에 의한 영향을 보여주고 있다. 365일 경과일 때에도 수

리-역학 계산의 수평응력이 다소 낮은 응력을 보이고 있어 열팽창에 의한 영향을 보여주고 있으나 반경방향으로부터 0.2 m 부근에서는 오히려 수리-역학 계산이 다소 높은 응력을 보이고 있어 일반적인 경향과 상반되는 현상을 나타내고 있으므로 이는 추후 면밀히 검토할 필요가 있다. Fig. 11.(b)의 수직응력에 대한 온도의 영향도 수평응력에서 나타나는 것과 같이 열-수리-역학 계산이 열팽창에 의한 영향이 있음을 나타내고 있다. 그러나 수평응력과 다르게 수직응력은 포화에 의한 응력변화와 열팽창에 의한 응력이 중첩되는 경향을 잘 나타내고 있다. 반경방향의 응력 분포를 보면 포화가 많이 진행된 셀쪽 응력이 포화가 적게 진행된 히터쪽 보다 낮은 응력을 보이고 있다. 이는 물의 포화에 따른 팽윤압 및 공급비의 변화 등에 기인한 것으로 생각된다. 결국 응력 변화는 열팽창에 의한 영향보다는 포화도의 변화에 따른 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 pe, pd 및 el 모델 각각에 대해 365일 경과했을 때의 mises 응력을 표시한 것이다. 수평 및 수직 응력의 변화에서처럼 el 모델은 mises 응력이 다른 두 모델에 비해 상당히 크게 나타나는 반면 다른 두 모델은 그 차이가 그리 크지는 않게 나타나고 있다. Von mises 이론에 의하면 세 개의 주응력이 일정한 조건에 도달할 때까지는 탄성체이고 그 이상의 응력에서는 영구변형을 일으키는 소성체라고 하며, 이와 같은 응력이 일정한 조건을 항복조건이라고 하고, 그 값을 일축항복강도와 같게 적용하는데 이는

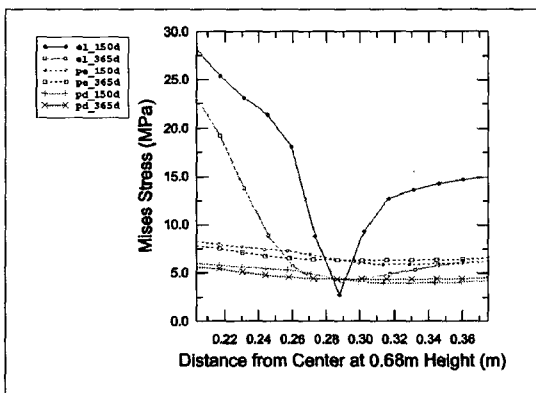


Fig. 12. Mises stress from each of three type material laws

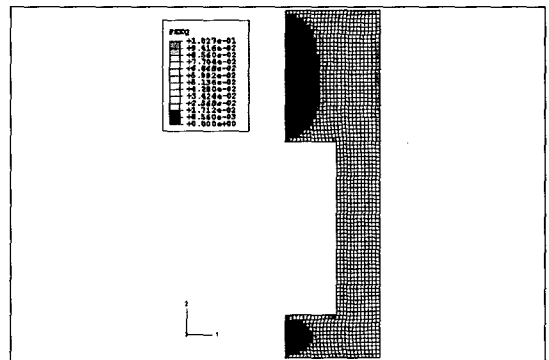


Fig. 13. Plastic flow contour from poroelastic-Drucker-Prager plastic material law after 365 days (PEEQ is equivalent plastic strain [9]).

재료의 특성치가 된다[19]. 물성값에서 볼 수 있는 것과 같이 벤토나이트 일축 압축 강도가 4.3 MPa 인 것을 감안할 때 세 모델 모두에서 소성 흐름이 나타날 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 pd 모델에 대한 소성 변형율의 등고선을 나타낸 것이다. 거의 전 영역에 걸쳐 소성 영역이 나타나고 있으며 특히 물이 입력되는 영역에서 소성 변형이 발달되고 있음을 알 수 있다. 그러나 el 및 pe 모델은 이러한 소성 변형을 표현할 수 없다. 따라서 벤토나이트의 열-수리-역학 연동현상 계산에서는 세 물성법칙 중 탄성-소성 변형을 나타내는 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성 법칙이 적합한 것으로 생각된다. 그래서 응력 변화는 물성법칙 및 포화도 변화에 모두 많은 영향을 받으며 벤토나이트의 강도를 고려하면 소성 변형이 일어날 가능성이 많아 탄성과 소성을 동시에 고려할 수 있는 물성법칙을 선택하는 것이 바람직하다. 따라서 탄성과 소성을 동시에 고려할 물성법칙과 실험결과 등을 비교하여 응력-변형을 저동을 잘 나타내는 물성법칙을 선정하는 것이 중요한 것으로 생각된다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

한국의 고준위폐기물 기준 처분 시스템의 공학적 방벽에서의 T-H-M 거동 실증을 위한 KENTEX 실험 장치를 대상으로 열-수리-역학 연동현상 해석을 하여 온도, 포화도 및 응력의 변화를 예측하였다. 그리고 이들 변수와 열-수리-역학 연동현상에 사용된 세 물성법칙인 탄성 물성법칙, 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성 법칙과의 관계를 분석하였다. 열-수리-역학 연동현상을 계산하는 데는 상용 유한요소 코드인 ABAQUS를 사용하였다.

열 계산에서 벤토나이트 내 온도는 히터 가열 후 초기에는 급격히 증가하다가 얼마의 시간이 경과한 후에는 거의 일정한 값에 도달하였다. 이 도달시간은 약 37.5일로 반경방향의 모든 지점(H=0.68m 일 때)에서 정상상태에 도달한 것을 알 수 있었다. 즉, 히터와 벤토나이트 경계면에서는 90 °C, 벤토나이트

와 외부 셀 경계면에서는 약 70 °C를 유지하였다. 열-수리-역학 연동현상 계산에서 벤토나이트 포화도는 초기에 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성법칙의 경우는 거의 비슷하나 탄성 물성법칙의 경우는 다른 것들에 비해 조금 차이가 있었다. 그러나 시간이 경과함에 따라 벤토나이트의 포화도 변화는 이들 세 물성법칙에 대해 거의 차이가 없었다. 온도의 증가는 공극탄성 물성법칙 및 탄성 물성법칙에 대해 시간이 경과함에 따라 포화도가 증가하여 포화가 빨리 진행됨을 알 수 있었다. 특히 열-수리-역학 계산 결과와 수리-역학 계산 결과의 비교에서 히터에 가까운 쪽에서는 물이 침투하고 있는 쪽 보다 포화도 증가가 큰 것으로 나타나 온도의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 응력은 세 물성법칙 모두 시간의 경과에 따라 증가하는 경향을 보이거나 탄성 물성법칙의 경우가 다른 두 경우보다 현저한 변화를 보이는데 이는 변형율이 탄성한계를 넘어서도 계속 작용하여 공극비 변화를 고려한 다른 두 물성법칙과 차이가 있음을 나타내고 있다. 그러나 공극탄성 물성법칙 및 공극탄성-Drucker-Prager 소성 물성법칙의 경우에 열-수리-역학 계산 결과와 수리-역학 계산 결과를 비교하면 온도의 영향으로 시간이 경과함에 따라 응력은 증가하지만 이들 서로의 응력의 차이는 작은 것을 알 수 있다. 반경방향의 응력 분포에서 셀쪽의 응력이 낮은 것은 벤토나이트가 포화됨에 따른 팽윤압의 변화에 의한 영향으로 응력 변화가 포화도 변화에 영향을 많이 받고 있음을 나타내고 있다. 따라서 벤토나이트의 열-수리-역학 연동현상 계산에서 벤토나이트는 공극비, 열팽창 및 팽윤압 등의 영향을 받으므로 벤토나이트의 강도를 고려하면 소성 변형이 일어날 가능성이 많아 탄성과 소성을 동시에 고려할 수 있는 공극탄성-소성 물성법칙을 선택하는 것이 바람직하다. 또한 벤토나이트 내에서 온도가 포화도 및 응력에 미치는 영향이 적지 않으므로 온도 증가에 의해 증발 또는 대류 현상 등에 대한 영향도 고려하여야 할 필요가 있는 것으로 생각된다.

이 계산은 향후 KENTEX 실험에서 얻은 실험 데이터와 계산에서 얻은 결과를 비교하여 열-수리-역학

연동현상 해석 코드의 실증에 사용될 것이다.

참고문헌

[1] C.H.Kang et al, "High Level Radwaste Disposal Technology Development / Geological Disposal System Development", KAERI/RR-2336/2002, KAERI(2002).

[2] Jae Owan Lee, Jeong Hwa Park and Won Jin Cho, "Engineering-scale T-H-M Validation Test for a HLW Disposal System", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May 2005.

[3] Moo Y. Lee, et al, "Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical Modeling for the Development of the Underground High Level Nuclear Waste Repository in the Republic of Korea", SNL and KAERI Joint Study Report, 2002.

[4] 권상기, 박정화, 최종원, 강철형, "THM coupling 메카니즘에 대한 고찰", KAERI/AR-627/2002, KAERI(2002).

[5] Jeong Hwa Park, Jung-Eui Kuh, Sangki Kwon, and Chul-Hyung Kang, " Thermal Analysis fo High Level Radioactive Waste Repository Using a Large Model", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.32, Number 3, pp.244-253, 2000.

[6] 박정화, 권상기, 최종원, 강철형, "심지층 처분장의 터널 구조 안정성에 대한 역학적 민감도 분석", KAERI/TR-1749/2001

[7] Chin-Fu Tsang, Ove Stephansson, Fritz Kautsky, and Lanru Jing, "An Overview of the DECOVALEX Project on Coupled THM Processes in Fractured Rock-Bentonite Systems", 2003 GeoProc., 2003.

[8] 권상기, 박정화, 최종원, 강철형, " THM coupling 메카니즘에 대한 고찰", KAERI/AR-627/2002, 2002.

[9] ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC., 1998.

[10]Lennart Bögsson and Jan Hernelind, "Coupled Thermo-Hydro-Mechanical calculation of the water saturation phase of a KBS-3 deposition hole", SKB-99-41, 1999.

[11]Eaton, R. R., "A numerical method for computing flow through partially saturated porous media", Numerical Methods in Thermal Problem, Vol.III, 1983.

[12]Lennart Bögesson, "Interim Report on the Laboratory and Theoretical Work in Modeling the Drained and Undrained Behavior of Buffer Materials", SKB Technical Report 90-45, 1990.

[13]Lennart Bögesson, "Interaction between Rock, Bentonite Buffer and Canister. FEM Calculations of Some Mechanical Effects on the Canister in Different Disposal Concepts", SKB Technical Report 92-30, 1992.

[14]Lennart Bögesson, Lars-Erik Johannesson, Torbjön, Jan Hernelind, "Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite element application", SKB Technical Report 95-20, 1995

[15]조원진, 이재완, 강철형, 전관식, "고준위폐기물 처분장 완충재용 국산 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 물리화학적, 광물학적 및 역학적 특성", KAERI/TR-1388/99, 1999.

[16]van Genuchten, M. Th., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Science Society of America Journal, vol. no. 5, pp. 892-898, 1980.

[17]Masakazu Chijimatsu, Tomoo Fujita, Yutaka Sugia and Wataru Taniguchi, "Evaluation of coupled Thermo-Hydro-Mechanical Phenomena in the Near Field for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste", JNC. TN8400 2000-008, 2000.

- [18]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. Materials Research Society, 1991.
- [19]이희근,양형식 외, "응용암석역학", 서울대학교출판부, 1997.