터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 8, 1998, pp. 26~36

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 8, 1998, pp. 26-36
J. of Korean Society for Rock Mech.

고준위 방사성폐기물 처분장에서의 THM 상호반응의 수학적 모델 개발

황용수[1] · 김진웅[2] · 강철형[2]

Mathematical Modelling on THM Coupling in High-Level Radioactive Waste Repository

Yong-Soo Hwang, Jhin-Wung Kim and Chul-Hyung Kang

ABSTRACT To assess the groundwater flow near high-level radioactive waste repositories, it is important to understand the effect of coupling among thermal, hydraulic, and mechanical effects. In this paper, detailed mathematical approach to model the groundwater flow near the waste form surrounded by buffer, influenced by decay heat of radioactive waste along with stress change is developed. Two cases (1) before the full expansion of buffer and (2) after the full expansion of buffer are modelled. Based on the mathematical models in this paper, detailed numerical study shall be pursued later.

1. 서 론

고준위 방사성 폐기물은 방사성 붕괴로 인하여 열을 발생 시켜 이로 인하여 주변 암반 내의 응력 및 지하수 유동이 변하게 된다. 만일 붕괴열로 인한 영향이 지하수 유동을 증진시킨다면 이러한 붕괴열을 고려한 시나리오는 처분장 안전성 평가에 있어서 중요한 사안이 될 것이다. 그리고 처분장에는 붕괴열로 인한 지하수압 변화 현상 뿐 아니라 동굴 굴착으로 인한 응력 변화가 동시에 발생하게 된다. 이러한 문제는 다공성 암반일 경우에도 매우 복잡한 상호 반응에 관한 연구로 귀착된다. 본 연구에서는 우선 THM 상호 반응 연구의 첫 단계로 이러한 복잡한 현상을 단순화하여 단열대가 없는 다공성 암반에서의 THM 상호 반응에 관한 지배 방정식을 도출하였다.

그리고 이와 같이 도출된 구성 법칙을 이용하여 실제 고준위 방사성폐기물 처분장에서 일어날 수 있는 두 가지 경우, (1) 완충재 층이 아직 팽윤을 마치기 전과 (2) 팽윤이 충분하여 처분 용기와 완충재 사이에 틈새가 없을 경우에 관하여 지하수 유동을 예측 평가할 수 있는 수학적 모델링을 제시하고자 한다.

2. THM 상호 반응 해석을 위한 구성 법칙 도출

2.1 구성 법칙(Constitutive Law) 관련 연구 현황

사용후 핵연료는 원자력발전소에서 나온 뒤 10여년 이상의 기간동안 소내/소외 저장 시설에서 저장된 다음 재활용 과정을 거치거나 직접 기반암에 영구 처분되게 된다. 처분공(deposition hole)에 처분된 방사성 핵종들은 방사성 붕괴열을 발생하게 된다. 또한 동굴 굴착의 영향으로 주변 암반 내의 응력 분포도 변화하게 된다. 이러한 열적 역학적 변화는 필연적으로 암반 내 지하수 유동에 영향을 미친다.[1-3] 일반적으로 지하수에 열 응력이 가해지는 경우 처분장 주변의 지하수압을 증가시키고, 방사성 핵종들이 처분 용기로부터 지하수에 용해되어 유출될 경우 이를 빠르게 자연 방벽 시스템으로 이동시켜 핵종 이동을 촉진한다고 간주된다.

이들 현상에 관한 연구는 1980년대부터 활발히 수행되어 왔다. 이러한 연구는 크게 구성 법칙(constitutive law)을 개량하는 이론 연구[4-6]와 이를 응용한 평가 연구[7,8] 및 평가 결과 실증을 위한 실증 연구[9-12]로 대별되어 수행되고 있다. 다공암반(porous medium)에서 지하수, 열, 응력의 상호 반응을 기술하는 구성 법칙에 대한 연구는 1920년대부터 시작[7]되었다. 이러한 연구들은 초기에는

1) 한국원자력연구소 선임연구원
2) 한국원자력연구소 책임연구원

열 영향을 고려하지 않은 단순 현상을 기술하다가 1980년대 들어서 고준위 방사성폐기물 연구 분야에서 처분장 인접 지역내 열, 지하수, 응력 상호 반응 평가를 위해 개량되어 왔다.

2.2 이론적 배경

구성 이론을 개발하기 위하여 고체와 지하수로 채워진 포화 상태(fully saturated)인 암반 내에서 조절 부피(control volume)를 고려한다. 이 조절 부피에서의 각종 반응들은 온도, 지하수압, 속도, 응력, 변형 등의 영향을 받는다. 편의상 이 논문에서는 다음과 같은 아래 첨자들이 사용된다.

f는 지하수 상태,

s는 고체 상태,

$_o$는 초기 상태,

그리고 t는 전체, 즉 지하수 상태와 고체 상태의 합을 의미한다.

구성 요소 법칙 도출을 위해 우선 지하수와 고체가 공존하는 다공성 매질 내의 조절 부피 내에서 물질 보존의 법칙을 기술하는 연속 법칙이 필요하다:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho_f) + \nabla(\phi\rho_f v_f) = 0 \tag{1}$$

여기서 ϕ는 다공성 암반의 공극률,

v는 지하수 공극내 유동 속도(pore velocity),

ρ_f는 지하수의 밀도이다.

한편 암반의 변위를 고려하면,

$$\nabla(\phi\rho_f v_s) = \phi_o\rho_{f_o}\nabla v_s + v_s\nabla\phi_o\rho_{f_o} = \phi_o\rho_{f_o}\nabla v_s \tag{2}$$

격자 좌표계에서의 탄성이론에 따르면,[1)]

$$\begin{aligned}\nabla v_s &= \frac{\partial v_{x_s}}{\partial x} + \frac{\partial v_{y_s}}{\partial y} + \frac{\partial v_{z_s}}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right) = \frac{\partial \bigtriangledown E_s}{\partial t}\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, u는 고체의 변위(displacement) 벡터,

u_x, u_y, u_z는 고체 변위 벡터의 구성 성분,

v_s는 고체의 이동 속도,

v_{x_s}, v_{y_s}, v_{z_s} 고체 이동 속도의 구성 성분이며,

변형률은 아래와 같이 정의된다.

$$\bigtriangledown E_s = E_{xx} + E_{yy} + E_{zz} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \tag{4}$$

방정식(2), (3)과 (4)를 이용하면 방정식(1)은 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{\partial(\phi\rho_f)}{\partial t} + \nabla(\phi\rho_f(v_f - v_s)) + \nabla\left(\phi\rho_f\frac{\partial \bigtriangledown E_s}{\partial t}\right) = 0 \tag{5}$$

변형(deformation) 전후의 지하수 질량의 보존성을 이용하여 우리는 다음 식을 도출할 수 있다.

$$\phi\rho_f V_t = \phi_o\rho_{f_o}V_{f_o} \tag{6}$$

여기서 V_t는 변형 후의 전체 부피이다.

방정식 (6)을 정리한 후 지하수 부피 변동이 적음을 고려하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\phi\rho_f &\approx \phi_o\rho_{f_o}\left(1 - \frac{\nabla V_t}{V_{t_o}}\right) \\ &= \phi_o\rho_{f_o}\left(1 - \frac{\nabla V_f}{V_{f_o}} - (1-\phi_o)\frac{\nabla V_s}{V_{s_o}}\right)\end{aligned} \tag{7}$$

일반적으로 고체의 열에 대한 팽창률은 액체의 열에 대한 팽창률보다 작다고 간주된다. 이를 수식으로 표현하면

$$\nabla V_s / V_{s_o} \ll 1$$

이를 이용하면 방정식 (7)은 다음과 같이 정리된다.

$$\phi\rho_f \approx \phi_o\rho_{f_o}\left(1 - \frac{\nabla V_t}{V_{t_o}}\right) = \phi_o\rho_{f_o}\left(1 - \frac{\nabla V_f}{V_{f_o}}\right) \tag{8}$$

만일 공극(pore) 내 지하수가 탄성을 가진 다면, 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\phi\rho_f = \phi_o\rho_{f_o}(1 - \nabla E_f) \tag{9}$$

방정식 (9)에 선형 이론을 적용하면 우리는 다음 식을 얻는다.

$$\nabla(\phi\rho_f(v_f - v_s)) = \phi_o\rho_{f_o}\nabla(v_f - v_s) \tag{10}$$

지하수의 변화(change in fluid)를 다음과 같이 정의한다.

$$\zeta = \phi_o(\nabla E_s - \nabla E_f) \tag{11}$$

이러한 정의와 Darcy 법칙을 사용하면 탄성 다공 암반에서 지하수 유동을 기술하는 다음과 같은 법칙에 도달

하게 된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla q_f = 0 \qquad (12)$$

한편 고체와 액체의 변위를 모두 고려한 상태에서의 Darcy의 속도는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$q_f = \phi_o (v_f - v_s) = -\frac{k}{\mu}\nabla P \qquad (13)$$

여기서, k는 다공 암반의 투수계수,

μ는 지하수의 점성계수, 그리고

P는 공극에서의 지하수압(pore pressure)이다.

국부적인 momentum 평형 법칙으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla T = 0 \qquad (14)$$

여기서, T는 텐서로 표현되는 응력(stress tensor)이다. 텐서의 등방성에 의하면

$$T_{ij} = T_{ji} \qquad (15)$$

실질적으로 다공 암반내 지하수 투수계수가 낮으므로 열전달에 확산(conductive)이 주도적으로 작용한다고 볼 수 있다. 이 경우 붕괴열에 의한 다공 암반내 열전달은 아래와 같은 파라볼릭 형태의 미분 방정식으로 표기될 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - k\nabla^2\theta = 0 \qquad (16)$$

여기서, θ는 다공 암반 내 지하수와 고체 암반을 혼합했을 때(bulk)의 상대 온도로서 실제 온도에서 열변화가 없는 상태의 암반 내의 온도를 뺀 상대온도, k는 아래와 같이 정의되는 유효 열 확산계수(effective thermal diffusivity),

$$k = \frac{K'}{\rho C_v} \qquad (17)$$

K'는 아래식(18)과 같이 정의되는 유효 열용량(effective heat capacity), 그리고 C_v는 지하수와 고체 암반 혼합체의 단위 열용량(the specific heat capacity of the bulk of groundwater and solid rock mixture)이다.

$$K' = (1-\phi)K_s' + \phi K_f' \qquad (18)$$

$$\rho C_v = (1-\phi)\rho_f C_{v_s} + \phi\rho_f C_{v_f} \qquad (19)$$

여기서, K_s'와 K_f'는 각기 고체 암반과 지하수의 열용량, C_{v_S}와 C_{v_f}는 각기 고체 암반과 지하수의 단위 열용량(specific heat capacities)이다.

기본적인 응력-변형 관계로부터,[5] 상대 지하수압, 즉 실제 지하수압에서 대기압을 뺀 상대압이 0일 때 등온조건에서 다음과 같은 변형률에 관한 식이 얻어진다:

$$E_{ij_1} = \frac{1}{2G}\left[T_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\nabla T\delta_{ij}\right] \qquad (20)$$

여기서, E_{ij_1}는 물이 빠진 공극에서 (i, j) 변형률 성분,

ν는 bulk Poisson's ratio, 그리고

δ_{ij}는 Kronecker Delta 함수이다.

상대 지하수압이 0이 아닐 때 이러한 지하수압에 의한 변형률은 아래식으로부터 구해진다.

$$E_{ij_2} = \frac{1}{3H}P\delta_{ij} \qquad (21)$$

Nur and Byerlee[7]의 관계식으로부터

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \qquad (22)$$

여기서, K와 K_s는 물이 빠진 암반과 고체 암반의 모듈을 각각 의미한다.

이제 위의 두 식을 선형적으로 더하여 등온조건이며 지하수 상대압이 0이 아닌 경우에 변형률을 다음과 같이 표현한다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2G}\left[T_{ij} - \frac{\nu}{(1+\nu)}\nabla T\delta_{ij}\right] + \frac{1}{3H}P\delta_{ij} \qquad (23)$$

온도 변화에 따른 변형 변화까지 고려하면 위의 방정식(23)은 다음과 같이 고쳐질 수 있다[7]:

$$E_{ij} = \frac{1}{2G}\left[T_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\nabla T\delta_{ij}\right] + \frac{1}{3H}P\delta_{ij} + \frac{\alpha_s}{3}(\theta - \theta_o)\delta_{ij} \qquad (24)$$

여기서, E_{ij}는 비등온, 0이 아닌 상대 지하수압이 걸려 있는 다공성 암반 내의 변형률, 그리고 α_s는 고체 암반의 팽창률이다.

방정식(4)와 유사하게, 방정식(24)로부터

$$\nabla E = \frac{1}{3K}\nabla T + \frac{P}{H} + \alpha_s(\theta - \theta_o) \qquad (25)$$

여기서 혼합 모듈(Bulk module)을 아래와 같이 정의하자

$$K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (26)$$

방정식(25)를 응력에 관하여 정리하면,

$$\nabla T = 3K\nabla E - 3\frac{K}{H}P - 3K\alpha_s(\theta - \theta_0) \quad (27)$$

방정식(27)을 방정식(23)에 대입하면

$$T_{ij} = 2G\left[E_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu}\nabla E\delta_{ij}\right] - \frac{K}{H}P\delta_{ij} - \alpha_s K(\theta-\theta_0)\delta_{ij} \quad (28)$$

지하수내 변화를 고찰하기 위하여 고체 암반에 대해 다음과 같은 식을 구하자.

$$(1-\phi)\rho_s = (1-\phi_0)\rho_{s_0}(1-\nabla E_s) \quad (29)$$

이를 방정식 (12)에 넣은 후 정리하면

$$\xi = \phi_0\rho_f - \frac{\rho_{f_0}}{\rho_{f_0}} + \phi_\nabla - \phi_0\rho_s - \frac{\rho_{s_0}}{\rho_{s_0}} \quad (30)$$

여기서,

$$\phi_\nabla = \frac{1-\phi}{1-\phi_0} \quad (31)$$

K_f와 K_s를 아래와 같이 정의하면,

$$\rho_f = \rho_{f_0}\left[1 + \frac{P}{K_f} - \alpha_f(\theta-\theta_0)\right] \quad (32a)$$

$$\rho_s = \rho_{s_0}[1 + - \alpha_s(\theta-\theta_0)] \quad (32b)$$

여기서, $\alpha_s''=\alpha_s$는 이체 부피 열팽창계수(second cubical thermal expansion coefficient)이다.
공극률의 정의로부터

$$\frac{\phi-\phi_0}{1-\phi_0} = \nabla E - \nabla E_s \quad (33)$$

따라서 방정식 (33)은 아래와 같이 고쳐진다.

$$\frac{\phi-\phi_0}{1-\phi_0} = \frac{1}{3H}(\nabla T + 3P) \quad (34)$$

또한 방정식 (30)를 정리하면

$$\xi = \phi_0\frac{P}{K_f} - \phi_0\frac{P}{K_s''} + \frac{1}{3H}(\nabla T + 3P) - X_1$$
$$= \frac{1}{3H}\left(\nabla T + \frac{3P}{B}\right) - X_1 \quad (35)$$

여기서,

$$X_1 = \phi_0(\alpha_f - \alpha_s'')(\theta-\theta_0) \quad (36)$$

$$\frac{1}{B} = H\left(\frac{1}{H} + \phi_0\left(\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_s''}\right)\right) = 1 + \phi_0\left(\frac{\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_s''}}{\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s}}\right) \quad (37)$$

St. Venant의 compatibility 방정식을[7] 다음 조건들과 함께 사용하면,

$$T_{ij} = T_{ji} \quad (38)$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial j} = 0 \quad (39)$$

변형률에 관한 지배 방정식을 얻는다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E_{xy} + \frac{\partial^2}{\partial x\partial y}(E_{xx} + E_{yy} + E_{zz}) = 0 \quad (40)$$

방정식 (40)을 정리하면,

$$(1+\nu)\nabla^2 T_{xy} + \frac{\partial^2 T_{zz}}{\partial x\partial y} + \frac{X_2}{H}\frac{\partial^2 P}{\partial x\partial y} + X_2\frac{\partial^2\theta}{\partial x\partial y} = 0 \quad (41)$$

여기서,

$$X_2 = \frac{2G(1+\nu)\alpha_s}{3} \quad (42)$$

Compatibility 방정식으로부터,

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E_{xx} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}(E_{xx} - E_{yy} - E_{zz}) = 0 \quad (43)$$

여기서

$$\frac{\partial^2 E_{xx}}{\partial x^2} = \frac{1}{2G}\frac{\partial^2 T_{xx}}{\partial x^2} - \frac{\nu}{2G(1+\nu)}\frac{\partial^2\nabla T}{\partial x^2} + \frac{1}{3H}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\alpha_s}{3}\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \quad (44)$$

$$\frac{\partial^2 E_{yy}}{\partial x^2} = \frac{1}{2G}\frac{\partial^2 T_{yy}}{\partial x^2} - \frac{\nu}{2G(1+\nu)}\frac{\partial^2\nabla T}{\partial x^2} + \frac{1}{3H}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\alpha_s}{3}\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \quad (45)$$

$$\frac{\partial^2 E_{zz}}{\partial x^2} = \frac{1}{2G}\frac{\partial^2 T_{zz}}{\partial x^2} - \frac{\nu}{2G(1+\nu)}\frac{\partial^2 \nabla T}{\partial z^2} + \frac{1}{3H}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\alpha_s}{3}\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \tag{46}$$

방정식 (41)을 정리하면,

$$\nabla^2[(1+\nu)T_{ij} - \nu\nabla T\delta_{ij}] + \frac{\partial^2 \nabla T}{\partial i \partial j} + \frac{X_2}{H}\left(\nabla^2 P\delta_{ij} + \frac{\partial^2 P}{\partial i \partial j}\right) + X_2\alpha_s\left(\nabla^2\theta\delta_{ij} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial i \partial j}\right) = 0 \tag{47}$$

물이 빠지지 않은 상태에서(undrained) Poisson 비를 정의하면,

$$\nu_u = \frac{3\nu + B(1-2\nu)(1-\frac{K}{K_s'})}{3 - B(1-2\nu)(1-\frac{K}{K_s'})} \tag{48}$$

윗 식으로부터

$$\frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu_u)} = \frac{1-2\nu}{H}\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)} = \frac{2G(1+\nu)}{H} \tag{49}$$

따라서,

$$\frac{X_2}{H} = \frac{2G(1+\nu)}{3H} = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu_u)} \tag{50}$$

이를 이용하면,

$$(1+\nu)\nabla^2\nabla T - 3\nu\nabla^2\nabla T + \nabla^2\nabla T + \frac{12(\nu_u-\nu)}{B(1+\nu_u)}\nabla^2 P + \frac{8G(1+\nu)}{3}\alpha_s\nabla^2\theta = 0 \tag{51}$$

응력에 관한 지배 방정식을 종합하면,

$$\nabla^2\nabla T + \frac{6(\nu_u-\nu)}{B(1+\nu_u)(1-\nu)}\nabla^2 P + \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s\nabla^2\theta = \nabla^2\left(\nabla T + \frac{6(\nu_u-\nu)}{B(1+\nu_u)(1-\nu)}P + \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s\theta\right) = 0 \tag{52}$$

방정식(52)를 변형하면,

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - c\nabla^2\right)\left(\nabla T + \frac{3}{B}P\right) = c\frac{2X_2}{(1-\nu)}\alpha_s\nabla^2\theta + \frac{X_2 G(1+\nu_u)}{(\nu_u-\nu)}\phi_o(\alpha_f - \alpha_s)\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{53}$$

여기서,

$$c = \frac{k}{\mu}\frac{2G(1-\nu)}{(1-2\nu)}\frac{B^2(1+\nu_u)^2(1-2\nu)}{9(1-\nu_u)(\nu_u-\nu)} \tag{54}$$

방정식(53)은 아래와 같이 간략히 표현된다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - c\nabla^2\right)(\nabla T + \frac{3}{B}P) = b\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{55}$$

여기서,

$$b = \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\left[\frac{c}{k}\alpha_s + \frac{B(1-\nu)(1+\nu_u)}{2(\nu-\nu_u)}\phi_o(\alpha_f - \alpha_s'')\right] \tag{56}$$

X 방향으로의 변형만을 고려한다면 나머지 방향의 변형 및 응력 변화는 아래와 같이 간략히 표현된다.

$$E_{yy} = E_{zz} = \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0 \tag{57}$$

$$\nabla T = T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} = T_{xx} + 2G\frac{2\nu}{1-2\nu}\nabla E - \frac{2K}{H}P - 2\alpha_s K(\theta - \theta_o) \tag{58}$$

방정식(58)을 변화시키면,

$$\nabla T = T_{xx} + \frac{4G\nu}{1-2\nu}\left[\frac{1-2\nu}{2G(1+\nu)}\nabla T + \frac{P}{H} + \alpha_s(\theta-\theta_o)\right] - 2\frac{K}{H}P - 2\alpha_s K(\theta-\theta_o) \tag{59}$$

따라서, 응력변화의 xx, yy, zz 성분(trace)은,

$$\nabla T = \frac{1+\nu}{1-\nu}T_{xx} - \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)H}P - \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s(\theta-\theta_o) = \frac{1+\nu}{1-\nu}T_{xx} - \frac{6(\nu_u-\nu)}{B(1-\nu)(1+\nu_u)}P - \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s(\theta-\theta_o) \tag{60}$$

T_{xx} = 상수로 가정하면,[6]

$$\left(\frac{3}{B} - \frac{6(\nu_u-\nu)}{B(1-\nu)(1+\nu_u)}\right)\left(\frac{\partial}{\partial t} - c\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)P = b\frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{2X_2}{(1-\nu)}\alpha_t\left(\frac{\partial}{\partial t} - c\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\theta = \left[b + \frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s\left(1-\frac{c}{k}\right)\right]\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{61}$$

이제 우리는 상대 지하수압이 0이 아니고 온도에 의한 영향이 있을 때 다공 암반에서 THM조건에서의 지

하수 유동을 기술할 1차원 천이적 지배 방정식을 구하게 되었다. 이 지배 방정식을 아래와 같이 새로운 상수 c와 b'을 도입하여 간단하게 표시하면,

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}-c\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)P=b'\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{62}$$

여기서,

$$b'=\left\{b+\frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s\left(1-\frac{c}{k}\right)\right\}$$

$$\frac{1}{\dfrac{3(1-\nu+\nu_u-\nu_u-2\nu_u+2\nu)}{B(1-\nu)(1+\nu_u)}}=$$

$$\frac{B(1-\nu)(1+\nu_u)}{3(1+\nu-\nu_u-\nu_u-\nu\nu_u)}\left[b+\frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}\alpha_s(1-\frac{c}{k})\right]$$

$$=\frac{B(1-\nu)(1+\nu_u)}{3(1-\nu_u)(1+\nu)}\frac{4G(1+\nu)}{3(1-\nu)}$$

$$\left[\alpha_s+\frac{B(1-\nu)(1+\nu_u)}{2(\nu_u-\nu)}\phi_o(\alpha_f-\alpha_s'')\right]=\frac{4GB(1+\nu_u)}{9(1-\nu_u)}$$

$$\times\left[\alpha_s+\frac{B(1-\nu)(1+\nu_u)}{2(\nu_u-\nu)}\phi_o(\alpha_f-\alpha_s'')\right] \tag{63}$$

3. 지배 방정식의 의미

지배 방정식(62)를 수학적인 측면에서 우선 살펴본다. 방정식(62)는 파라볼릭형태의 선형 미분 방정식으로 2개의 경계조건, 즉 고준위 방사성폐기물 처분 용기(열원)와 인접 다공암반 지반체 경계면에서의 지하수 유동에 관한 조건, 일반적으로 충전재가 없는 경우 아직 크립 반응이 완료되지 않아 처분 용기와 인접 암반체 사이에 공극(void)이 있다면 보수적으로 경계면에서 상대 지하수압은 0으로 놓을수 있고, 아주 멀리 떨어진 암반 내에서는 상대 지하수압이 자중에서 대기압을 뺀 값으로 놓을 수 있다.

지배 방정식(62)는 경계치 및 초기치가 주어지지 않더라도 그 자체로서 몇가지 점을 시사한다. 이 지배 방정식은 우변은 상대 지하수압 변화에 대한 선원항(source) 역할 뿐 아니라 싱크(sink) 역할도 한다는 점을 물리적 고찰을 통해 알 수 있다. 즉 초기에는 암반 내 상대온도, 즉 실제온도에서 변화를 받지 않은(undisturbed) 암반 내 온도를 뺀 온도가 0이기 때문에 처분 용기에서 나오는 붕괴열의 전달에 의하여 주변 암반의 온도는 상승하여 $b'\frac{\partial\theta}{\partial t}$ 항이 열원으로 작용하게 된다. 그러나 일정시간이 경과하면 처분장 인접암반에서의 온도는 이미 어느정도 상승한다. 반면에 방사성 붕괴로 인하여 처분 용기 안에서 발생하는 열원은 줄어들게 된다. 이로 인하여 처분장 인접지역에서는 실제온도가 내려가게 된다. 즉 $b'\frac{\partial\theta}{\partial t}$이 더이상 소스가 아니라 싱크의 역할을 하게 된다. 그러나 같은 시간에 처분장에서 떨어진 암반에서는 방사성 붕괴열로 인한 열전달이 막 시작이 되어 $b'\frac{\partial\theta}{\partial t}$이 소스 역할을 하게 된다. 따라서 같은시간이라고 하더라도 거리에 따라 $b'\frac{\partial\theta}{\partial t}$은 소스가 되기도 하고 싱크가 되기도 한다.

이를 물리적으로 해석하면 초기에는 붕괴열에 의해 처분장 주변의 공극에는 높은 압력이 걸려 상대적으로 압력이 낮은 공극으로 지하수 유동이 흐르게 된다. 그러나 시간이 경과하면 처분장에서 아주 가까운 공극에는 열원이 줄어들게 되어 압력 감소가 일어나고 이로부터 얼마 멀지 않은 지역에서는 계속하여 열전달에 의한 지하수압 상승이 일어나게 된다. 따라서 이 경우에는 지하수가 처분 용기 방향으로 흐르는 일종의 역류 현상이 발생하게 된다. 이와 동시에 이 지점으로부터 멀리 떨어진 지점에서는 아직 방사성 붕괴열로 인한 지하수압 증가가 일어나지 않기 때문에 지하수가 처분 용기로부터 외부로 흐르는 방향, 즉 우리가 통념적으로 정방향으로 간주하는 방향으로 지하수 유동이 계속 있게 된다. 이러한 물리적 고찰은 고체는 변형을 하지 않는(rigid)다는 관점에서 보면 불가능하다. 그러나 실제적으로는 암반 고체와 지하수를 함유하고 있는 공극 모두 탄성 성질을 띠고 있기 때문에 이와같은 현상이 가능해 진다.[13]

4. 1-D Full THM Coupling Model

4.1 서 론

앞에서 탄성이론이 적용될 수 있는 조건에서 다공 암반 내에서의 THM 상호 반응을 기술하는 지배 방정식을 도출하였다. 이제부터 앞에서 도출한 상호 반응 모델을 기반으로 실제 심지층 처분장 조건에서의 TM 영향에 의한 지하수 유동 변화를 규명해 보고자 한다. 이를 위하여 결정질 암반을 단순화하여 유효 다공 암반으로 가정한다.

이 논문에서는 방사성 붕괴열이 처분장 주변 지하수 유동속도를 얼마만큼 변화시킬 것인가를 정량적으로 평가하기 위한 새로운 수학적 접근 방법론을 제시하고자 한다.

4.2 평가 시스템 설정

일반적으로 처분 개념에서는 공학적 방벽과 자연 방벽이 모두 중요하게 고려되고 있다. 일본이나 한국과 같이 인구밀도가 조밀한 국가에서는 처분장 안전성 향상을 위해서 공학적 방벽의 중요성이 부각된다. 공학적 방벽과 주변 암반에서는 방사성 붕괴열로 인한 영향 및 굴착으로 인한 영향으로 처분장 안전성에 중요한 영향을 미치는 지하수 유동속도와 경로가 변화하게 된다. 따라서 이러한 지하수 유동변화 현상을 정량적으로 규명하기 위하여 다음과 같은 두가지 경우에 대한 수학적 고찰을 수행하고자 한다.

1) 완충재 팽윤이 완료되기 전 시간대에서의 지하수 유동 변화

이 경우에는 사용후 핵연료 처분용기와 공학적 방벽 사이에 빈 공간이 완충재의 충분한 팽윤이 일어나지 않아 여전히 존재한다고 가정한다. 일반적으로 공학적인 관점에서 사용후 핵연료 처분용기와 공학적 방벽의 설치를 용이하게 하기 위해 처분 용기와 공학적 방벽 사이에는 빈 공간이 존재하게 된다. 이 공간은 벤토나이트의 팽윤으로 말미암아 일정 시간이 경과하면 자연적으로 사라지게 된다. 그러나 만일 공학적 방벽의 성능이 잘못되어 예정대로 팽윤이 충분히 일어나지 않거나, 혹은 팽윤이 미처 완료되기 전 용기 파손 등으로 인하여 처분 용기 내부로 지하수가 유입되는 사태가 일찍 발생하게 될때 등 여러가지 경우에 상대적으로 높은 자중으로 인하여 처분 용기로부터 멀리 떨어져 있던 지하수가 상대적으로 지하수압이 낮은, 보수적으로 빈 공간이 존재하고 이의 지하수압은 대기압으로 가정될 수 있는, 처분장 인접 지역으로 유입되게 된다. 이 경우에 대한 수학적 모델링은 다음과 같다.

이 경우에 대한 지배 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = c_i' \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial P_1}{\partial r}\right) + b' \frac{\partial \theta_1}{\partial t}, \quad t>o,\ a<r<b \tag{64}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = c_i' \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial P_2}{\partial r}\right) + b' \frac{\partial \theta_2}{\partial t}, \quad t>o,\ r<b \tag{65}$$

여기서,

$P_1(r, t)$는 공학적 방벽에서의 상대 지하수압,

$P_2(r, t)$는 암반에서의 상대 지하수압,

$$P_i(r,t) = P^*_i(r,t) - P^*_o, \quad i=1,\ 2 \tag{66}$$

$P^*_i(r, t)$는 방벽에서의 실제 지하수압,

P^*_0는 처분장 심도에서의 자중,

첨자 1은 완충재 지역,

첨자 2는 주변 다공암반,

c'는 보정된 compressibility, b'는 보정된 열 상수이다.

$$\theta(r,t) = \hat{\theta}(r,t) - \theta_0 \quad t>0,\ a<r<b \tag{67}$$

$\hat{\theta}(r, t)$는 처분장에서의 온도,

θ_0는 처분장 심도에서의 암반 내 초기 온도,

a는 처분공의 반경, 그리고

b-a는 인공 방벽의 두께이다.

부대 조건은 아래와 같다.

$$P_1(a,t) = P_{atm} - P^*_o \equiv -P_o \quad t>0 \tag{68}$$

$$P_1(b,t) = P_2(b,t) \quad t>0 \tag{69}$$

$$-\varepsilon_1 \frac{k_1}{\mu_1}\frac{\partial P_1}{\partial r}\Big|_{r=b} = -\varepsilon_2 \frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial P_2}{\partial r}\Big|_{r=b} \quad t>0 \tag{70}$$

여기서,

ε은 공극률, k는 투수계수, μ는 점성계수이며,

$$P_2(\infty,t) = 0 \quad t>0 \tag{71}$$

$$P_1(r,0) = 0 \quad a<r<b \tag{72}$$

$$P_2(r,0) = 0 \quad r>b \tag{73}$$

THM 상호 반응현상을 규명하기 위하여 우선 온도분포를 구한다. 아래 방정식은 다공 암반에서의 열전달을 기술한 것이다.

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} - \chi_1 \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial r}\right) = 0 \quad a<r<b,\ t>0 \tag{74}$$

여기서, χ_i는 i 지역에서의 열 전도도이다.

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} - \chi_2 \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r}\right) = 0 \quad r<b,\ t>0 \tag{75}$$

여기서 우리는 보수적으로 열 전달을 해석하기 위하여 처분용기 크기는 처분공 크기와 같다고 가정하였다.

이 방정식들의 부대 조건들은 아래와 같다.

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = Q_0 f(t), \ t>0 \qquad (76)$$

여기서,

λ는 열 확산 계수,

Q_0는 처분 용기 표면에서의 초기 열 선속,

$$\theta_1(r, 0)=0, \quad a<r<b \qquad (77)$$

$$\theta_2(r, 0)=0, \quad r>b \qquad (78)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \Big|_{r=b} = -\lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r} \Big|_{r=b}, \quad t>0 \qquad (79)$$

$$\theta_1(b, t)=\theta_2(b, t), \quad t>0 \qquad (80)$$

$$\theta_2(\infty, t)=0, \quad t>0 \qquad (81)$$

이들 방정식의 해는 완전한 해석적 방법으로는 구해질 수 없으나 다음과 같이 라플라스 변환된 형태로는 표시된다.

$$\bar{P}_1(\eta, s)=\sum_{i=1}^{4} X_{1i}(\eta)\,\overline{Y_{1i}(s)} \qquad (82a)$$

$$\bar{P}_2(\eta, s)=\sum_{j=1}^{2} X_{2i}(\eta)\,\overline{Y_{2j}(s)} \qquad (82b)$$

여기서,

$$\eta=\frac{r}{a} \qquad (83a)$$

$$p=\frac{\chi_2}{\chi_1} \qquad (83b)$$

$$c=\frac{b}{a} \qquad (83c)$$

$$q_0=Q_0\,\frac{a^2}{\lambda_1} \qquad (83d)$$

$$\lambda=\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \qquad (83e)$$

$$f_1=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\,\frac{k_2}{k_1}\,\frac{\mu_1}{\mu_2} \qquad (83f)$$

$$D_1=\frac{c_1'}{\kappa_1} \qquad (83g)$$

$$D_2=\frac{c_2'}{\kappa_1} \qquad (83h)$$

$$X_{11}(\eta)=\frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}}\eta}}{\eta} \qquad (84a)$$

$$X_{12}(\eta)=\frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}}\eta}}{\eta} \qquad (84b)$$

$$X_{13}(\eta)=\frac{e^{-\sqrt{s}\,\eta}}{\eta} \qquad (84c)$$

$$X_{14}(\eta)=\frac{e^{\sqrt{s}\,\eta}}{\eta} \qquad (84d)$$

$$X_{21}(\eta)=\frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{D_2}}\eta}}{\eta} \qquad (84e)$$

$$X_{22}(\eta)=\frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}\eta}}{\eta} \qquad (84f)$$

$$\overline{Y_{11}(s)}=\frac{1}{a}\left[I_1^*(s)-\frac{I_6(s)}{J_4(s)}\,e^{2\sqrt{\frac{s}{D1}}}\right] \qquad (85a)$$

$$\overline{Y_{12}(s)}=\frac{1}{a}\,\frac{I_6(s)}{J_4(s)} \qquad (85b)$$

$$\overline{Y_{13}(s)}=\frac{1}{a}\,\frac{H_1(s)}{s\left(1-\frac{1}{D_1}\right)} \qquad (85c)$$

$$\overline{Y_{14}(s)}=\frac{1}{a}\,\frac{H_2(s)}{s\left(1-\frac{1}{D_1}\right)} \qquad (85d)$$

$$\overline{Y_{21}(s)}=$$

$$\frac{1}{a}\left[e^{\sqrt{\frac{s}{D}}c}\left\{e^{\sqrt{\frac{s}{D}}c}-e^{\sqrt{\frac{s}{D}}(2-c)}\right\}\frac{I_6(s)}{J_4(s)}-I_5(s)\right] \qquad (85e)$$

$$\overline{Y_{22}(s)}=\frac{H_3(s)}{sa\left[\frac{1}{p}-\frac{1}{D_2}\right]} \qquad (85f)$$

$$A_1^*(s)=-A_2^*(s)e^{2\sqrt{\frac{s}{D_1}}}+I_1^*(s) \qquad (86a)$$

$$A_2^*(s)=\frac{I_6(s)}{J_4(s)} \qquad (86b)$$

$$A_3^*(s)=$$

$$e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}}c}\left\{e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}c}-e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}(2-c)}\right\}\frac{I_6(s)}{J_4(s)}-I_5(s) \quad (86c)$$

$$A_4^*(s)=\frac{H_1(s)}{s\left(1-\frac{1}{D_1}\right)} \quad (86d)$$

$$A_5^*(s)=\frac{H_2(s)}{s\left(1-\frac{1}{D_1}\right)} \quad (86e)$$

$$A_6^*(s)=\frac{H_3(s)}{s\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{D_2}\right)} \quad (86f)$$

$$h_1=[1+c\sqrt{s}]e^{-\sqrt{s}c} \quad (87a)$$

$$h_2=\frac{q_0\overline{f(s)}}{1+\sqrt{s}}e^{\sqrt{s}} \quad (87b)$$

$$h_3=\frac{1-\sqrt{s}}{1+\sqrt{s}}e^{2\sqrt{s}} \quad (87c)$$

$$h_4=e^{\sqrt{s}c}[1-c\sqrt{s}] \quad (87d)$$

$$h_5=\lambda[1+c\sqrt{\frac{s}{p}}]e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c} \quad (87e)$$

$$h_6=\frac{q_0\overline{f(s)}}{1+\sqrt{s}}e^{\sqrt{s}[1+\frac{c}{\sqrt{p}}-c]} \quad (87f)$$

$$h_7=e^{[\frac{1}{\sqrt{p}}+1]\sqrt{s}c}-\frac{1-\sqrt{s}}{1+\sqrt{s}}e^{\sqrt{s}[2+\frac{c}{\sqrt{p}}-c]} \quad (87g)$$

$$H_1(s)=-\frac{b_1{}'sH_1^*(s)}{D_1} \quad (88a)$$

$$H_2(s)=-\frac{b_1{}'sH_2^*(s)}{D_1} \quad (88b)$$

$$H_3(s)=-\frac{b_2{}'sH_3^*(s)}{D_2} \quad (88c)$$

$$H_1^*(s)=h_2-h_3H_2^* \quad (89a)$$

$$H_2^*(s)=\frac{h_1h_2-h_5h_6}{h_5h_7+h_1h_3-h_4} \quad (89b)$$

$$H_3^*(s)=h_6+h_7H_2^* \quad (89c)$$

$$I_1(s)=-\frac{P_p}{s}-A_4^*(s)e^{-\sqrt{s}}-A_5^*(s)e^{\sqrt{s}}, \quad (90a)$$

$$I_2(s)=A_6^*(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c}-A_4^*(s)e^{-c\sqrt{s}}-A_5^*(s)e^{c\sqrt{s}} \quad (90b)$$

$$I_3(s)=-c\sqrt{s}A_4^*(s)e^{-\sqrt{s}c}+c\sqrt{s}A_5^*(s)e^{-\sqrt{s}c}$$
$$-A_4^*(s)e^{-\sqrt{s}c}-A_5^*(s)e^{\sqrt{s}c} \quad (90c)$$

$$I_4(s)=cf_1\sqrt{\frac{s}{p}}A_6^*(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c}+f_1A_6^*(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c}$$
$$=f_1A_6^*(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c}\left[c\sqrt{\frac{s}{p}}+1\right] \quad (90d)$$

$$I_5(s)=I_2^*(s)e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}}c} \quad (90e)$$

$$I_6(s)=J_3(s)I_5(s)+J_1(s)I_1^*(s)-\{I_3(s)+I_4(s)\} \quad (90f)$$

$$I_1^*(s)=I_1(s)e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}} \quad (91a)$$

$$I_2^*(s)=I_2(s)-e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}}c}I_1^*(s) \quad (91b)$$

$$J_1(s)=\left[c\sqrt{\frac{s}{D_1}}+1\right]e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}}c} \quad (92a)$$

$$J_2(s)=\left[c\sqrt{\frac{s}{D_1}}+1\right]e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}c} \quad (92b)$$

$$J_3(s)=f_1\left[c\sqrt{\frac{s}{D_2}}+1\right]e^{-\sqrt{\frac{s}{D_2}}c} \quad (92c)$$

$$J_4(s)=J_1(s)e^{2\sqrt{\frac{s}{D_1}}}$$
$$+J_2(s)+J_3(s)e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}}c}\left\{e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}c}-e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}(2-c)}\right\} \quad (92d)$$

이제 마지막 일은 속도를 다시 구하는 것이다. Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$v_1=-\frac{K_1}{\mu_1}\frac{\partial P_1}{\partial r}=-\frac{K_1}{\mu_1 a}\frac{\partial P_1}{\partial \eta} \quad (93a)$$

$$v_2=-\frac{K_1}{\mu_2}\frac{\partial P_2}{\partial r}=-\frac{K_2}{\mu_2 a}\frac{\partial P_2}{\partial \eta} \quad (93b)$$

상기 방정식을 라플라스 변환하면,

$$\overline{v_1}(\eta,s)=-\frac{K_1}{\mu_1 a}\sum_{i=1}^{4}\frac{\partial X_{1i}(\eta)}{\partial \eta}\overline{Y_{1i}}(s) \quad (94a)$$

$$\overline{v_2}(\eta,s)=-\frac{K_2}{\mu_2 a}\sum_{j=1}^{2}\frac{\partial X_{2j}(\eta)}{\partial \eta}\overline{Y_{2j}}(s) \quad (94b)$$

상기 두 방정식도 수치 해석적인 방법으로 역변환된다.

2) 팽윤 종료후의 지하수 유동

완충재가 팽윤하고 난 후 처분 용기와 주변 완충재 사이에 수두차이는 없어지게 되므로 아래와 같이 경계조건이 바뀌게 된다.

$$\frac{\partial P_1}{\partial r}\Big|_{\eta=1}=0,\quad t>0,\ a<r<b \quad (68')$$

이에 따라 위 방정식은 다음과 같이 계수가 변화하게 된다.

$$A_1^*(s)=J_5(s)A_2^*(s)+I_7(s) \quad (86a')$$

$$A_2^*(s)=\frac{I_9(s)}{J_7(s)} \quad (86b')$$

$$A_3^*(s)=\frac{J_6(s)I_9(s)}{J_7(s)}-I_8(s) \quad (86c')$$

$$I_7(s)=\frac{e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}}}{1+\sqrt{\frac{s}{D_1}}}\left[\{\sqrt{s}-1\}e^{\sqrt{s}}A_5^*(s)-\{\sqrt{s}+1\}e^{-\sqrt{s}}A_4^*(s)\right] \quad (90a')$$

$$I_8(s)=e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}}c}I_8^*(s) \quad (90b', 91a')$$

$$I_8^*(s)=I_2(s)-I_7(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}}c} \quad (91b')$$

$$J_5(s)=e^{2\sqrt{\frac{s}{D_1}}}\frac{\sqrt{\frac{s}{D_1}}-1}{1+\sqrt{\frac{s}{D_1}}} \quad (92a')$$

$$J_6(s)=e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}}c}\left[J_5(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}}c}+e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}c}\right] \quad (92b')$$

$$J_7(s)=J_2(s)+J_3(s)J_6(s)-J_1(s)J_5(s) \quad (92c')$$

$$I_8(s)=e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}}c}I_8^*(s) \quad (92d')$$

$$I_9(s)=J_3(s)I_8(s)+J_1(s)I_7(s)-\{I_3(s)+I_4(s)\} \quad (92e')$$

이들을 제외한 다른 모든 표현은 팽윤이 미처 종료되기 전과 동일하다.

5. 결 론

이 논문에서는 복잡한 THM 현상을 보다 정확하게 이해하기 위하여 간단한 심지층 다공 매질을 대상으로 고준위 방사성 폐기물을 영구처분 했을 경우, 처분장 인접 지역에서의 THM 영향을 정성적 및 정량적으로 해석할 수 있는 지하수압, 응력, 및 방사성 붕괴열의 상호반응을 규명하는 지배 방정식을 도출하였다. 도출된 지배 방정식은 일반적으로 사용되는 구성 법칙들과는 달리 비등온, 상대지하수압이 0이 아닌 처분장 조건에서의 상호 반응을 선형적으로 표현 할 수 있었다. 비록 이러한 지배 방정식에 특정 초기조건과 경계조건들을 대입하지 않더라도 우리는 정성적으로 수학적 지식과 방사성 붕괴열에 대한 기본이론 이해를 통해 상호 반응의 의미를 예측할 수 있었다.

또한 도출된 지배 방정식을 근간으로 처분장 주변 지반체에서의 지하수 유동을 기술하는 수학적 모델을 1차원 천이적 환경에서 구하였다. 만일 우리가 고려하는 지하 매질이 다공성 반무한영역일 경우 도출된 지배 방정식에 의하면 THM은 지하수나 유출된 핵종이동을 가속화 시키는 현상이 아니라 오히려 저감시키는 하나의 방벽(barrier) 역할을 할 수도 있다.

하지만 벤토나이트 충전재가 인공방벽으로 사용되는 경우에는 이와 같은 현상은 다르게 나타날 것이다. 즉 완전 포화상태의 벤토나이트의 팽윤은 일반적인 심지층 처분 환경 조건에서 상당한 압력 증가를 야기할 것이다.[14] 이 경우에는 본 연구에서 고려하지 못한 경계조건 때문에 처분 용기로의 역류 현상보다는 외부로의 지하수 및 핵종 유출이 발생하게 될 것이다. 물론 여기서 주의해야 할 점은 이러한 공정이 충전재가 가지는 순기능을 상쇄할 만큼 큰 영향을 미치지는 않을 것이라는 점이다. 즉 충전재는 높은 지연계수와 낮은 투수계수로 인하여 충분히 오랜 시간 동안 처분 용기에서 유

출된 방사성 핵종들을 외부로 유출하지 못하게 하는 기능을 수행할 것으로 예상된다. 그러나 충전재 및 주변 암반 경계조건에서는 상당한 압력이 부과되므로 이로 인한 지하수 유동 가속화 현상이 발생할 것으로 예상된다. 그러나 일반적으로 고려되는 처분 심도에서는 이러한 추가 압력으로 인한 암반의 소성변위는 없을 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제시된 수학적 모델링과 국내 암반 물성자료를 이용한 지하수 유동 변화를 평가하도록 하겠다.

참 고 문 헌

1. J. Claesson *et al.*, "Thermoelastic Stress due to an Instantaneous Finite Line Heat Source in an Infinite Medium", SKB TR 96-11, SKB, 1996.
2. J. Claesson *et al.*, "Temperature Field Due to Time-dependent Heat Sources in a Large Rectangular Grid, Derivation of Analytic Solution", SKB TR 96-12, SKB, 1996.
3. J. Claesson *et al.*, "Thermoelastic Stress Due to a Rectangular Heat Source in a Semi Infinite Medium, Derivation of an Analytical Solution", SKB TR 96-13, SKB, 1996.
4. A. E. H. Love, "A Treatise on Mathematical Theory of Elasticity", Fourth Edition, New York, 1927.
5. H. Bouwer, "Ground Water Hydrology", McGraw-Hill, 1978.
6. T. H. Pigford *et al.*, "Mass Transfer in a Salt Repository", UCB-NE-4058, University of California, Berkeley, 1985.
7. A. Nur and J. D. Byerlee, "An Exact Effective Stress Law for Elastic Deformation of Rock Salt with Fluids", *J. of Geophysical Research*, **76**, 1971.
8. V. V. Paciauskas and P. A. Domencio, "Characterization of Drained and Undrained Responses of Thermally Loaded Repository Rocks", *Water Resources Research*, **18**, 1982.
9. D. F. Mctigue, "Thermoelastic Response of Fluid-saturated Porous Rock", *J. of Geophysical Research*, **91**, 1986.
10. J. Israelsson, "Decovalex I-Bench Mark Test 3", SKB TR 95-29, SKB, 1995.
11. L. Borgesson *et al.*, "Decovalex Test Case 2", SKB TR 95-28, SKB, 1995.
12. L. Borgesson *et al.*, "Decovalex Test Case 3", SKB TR 95-29, SKB, 1995.
13. 황용수 외, "Brine Migration in a Salt Repository", Nuclear Technology, Vol. 90, May 1990.
14. SKB, "Final Disposal of Swedish Spent Fuel, KBS-3", 1983.