

고준위 방사성폐기물 영구 처분장 Near Field에서 반-해석해를
사용한 THM 상호 반응 평가

Assessment of THM Coupling in the Near Field of the Potential
HLW Repository by Semi-Analytic Approach

황 용수, 서 재동*, 강 철형, 이 연명, 김 성기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
충남대학교*
대전광역시 유성구 궁동

요약

방사성 붕괴열로 인한 고준위 방사성폐기물 영구 처분장에서의 방사선적 안전성 및 구조적 안정성 영향 평가에 관하여 현재 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 이 논문에서는 방사성 붕괴열- 주변 벤토나이트 방벽 및 암반에서의 응력 재분배- 지하수 유동 속도의 변화의 상호 반응을 고찰하여 방사성 붕괴열로 인한 처분장 주변 지하수 유동의 변화 현상을 규명하였다. 이를 위하여 선형 탄성 이론에 근거한 구성 법칙 지배 방정식에 관한 해가 처분장 조건을 모사하는 적절한 경계 및 초기 조건에 관하여 수치적 라플라스 역변환법을 이용한 반-해석적 형태로 도출되었다. 이러한 반-해석해와 벤토나이트 방벽과 화강암반층에 적합한 물성 데이터를 사용하여 평가한 결과 방사성 붕괴열이 주변 지하수에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다. 따라서 처분장 장기 안전성을 종합 평가할 시 방사성 붕괴열로 인한 추가적인 지하수 유동은 방사성 핵종의 지하 매질에서의 이동에 심각한 영향을 미치지 않는 것으로 본 모델 조건에서는 판명되었다.

Abstract

Many fundamental R&D's on the effect of the THM coupling on the structural stability as well as the long term post-closure radiological safety are performed world-wide. In this paper, the impact of coupling among decay heat in spent fuel, stress redistribution in the bentonite buffer layer as well as the adjacent rock, and change in the groundwater velocities in the near fields is analyzed using the semi-analytic approach. The linear thermo-elastic constitutive equation is solved with proper boundary and initial conditions in the vicinity of the potential repository. The final solution, semi-analytic one, is calculated by the Talbot's numerical Laplace transform method. Numerical illustrations with input data describing physical properties of bentonite and

granite show that the values of groundwater velocities in the rock as well as bentonite are so low that the advective transport of the radionuclides, potentially released into the buffer from the canisters, can be neglected in the total system performance assessment under the conditions given in this mathematical model.

1. 서론

고준위 방사성폐기물 처분장 종합 안전성 평가에서 관심을 끄는 현상 중의 하나는 고준위 방사성폐기물 붕괴열로 인한 주변 벤토나이트 방벽층과 암반에서의 응력 재분포에 따른 역학적 안정성과 지하수 유동의 변화 현상이다. 방사성 붕괴열로 인한 주변 지하수 유동 평가에 관해서는 국내외에서 많은 연구[1-6]가 진행되었는 바, 이러한 연구들의 초점은 방사성 붕괴열로 인하여 발생하는 “추가적인” 지하수 유동 속도의 변화가 종합안전성평가에 영향을 어느 정도 미치는가를 규명하는 것이다. 이 논문에서는 방사성 붕괴열이 지하수 유동에 미치는 영향에 대하여 full coupling을 모사하는 구성 법칙으로부터 출발하여 벤토나이트 방벽과 암반의 2 layer에서의 지하수 유동을 기술하는 수학적 모델링을 개발하여 현재 국내에서 고준위 방사성폐기물 처분 후보 매질로 고려되고 있는 화강암반에서의 방사성 붕괴열로 인한 추가적인 지하수 유동 속도를 정량적으로 평가해 보고자 한다.

2. 수학적 모델링

고준위 방사성폐기물을 처분공에 거치한 후 초기에는 주변 암반은 불포화 상태로 있게되나 지하수의 침투로 말미암아 비교적 짧은 시간에 재충전되게 되고, 이와 더불어 지하수를 함유한 벤토나이트의 팽윤으로 인하여 처분공 주변의 응력은 변화하게 된다. 이와 같은 천이적 변화 기간이 끝난 후에 처분공 주변은 재포화 상태로 도달한 후, 새로운 평형 상태를 맞게 된다. 이러한 경우, 처분공 주변의 지하수압에 관한 지배 방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = c_i' \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial P_1}{\partial r}) + b' \frac{\partial \theta_1}{\partial t}, \quad t > 0, \quad a < r < b \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = c_i' \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial P_2}{\partial r}) + b' \frac{\partial \theta_2}{\partial t}, \quad t > 0, \quad r > b \quad (2)$$

여기서, $P_1(r, t)$ 는 벤토나이트 방벽층에서의 상대 지하수압,

$P_2(r, t)$ 는 화강암반에서의 상대 지하수압,

c' = 보정된 compressibility,

b' = 보정된 열 상수,

$\theta(r, t)$ = 처분장에서의 상대 온도,

$a =$ 처분공의 반경, 그리고

$b - a =$ 공학적 방벽의 두께이다.

방정식 (1)과 (2)의 부대 조건들은 아래와 같다.

$$\frac{\partial P_1}{\partial r} \Big|_{r=1} = 0, \quad t > 0, \quad a < r < b \quad (3)$$

$$P_1(b, t) = P_2(b, t) \quad t > 0 \quad (4)$$

$$-\varepsilon_1 \frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial r} \Big|_{r=b} = -\varepsilon_2 \frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial r} \Big|_{r=b} \quad t > 0 \quad (5)$$

여기서, $\varepsilon =$ 공극률,

$k =$ 투수계수,

$\mu =$ 점성 계수이며,

$$P_2(\infty, t) = 0 \quad t > 0 \quad (6)$$

$$P_1(r, 0) = 0 \quad a < r < b \quad (7)$$

$$P_2(r, 0) = 0 \quad r > b \quad (8)$$

THM 상호 반응 현상을 규명하기 위하여 우선 처분장 주변 벤토나이트 방벽과 주변 화강암반에서, 하나의 고준위 방사성폐기물 처분 용기로부터 발생하는 붕괴열로 인한 주변 온도 분포를 다음과 같은 지배 방정식으로부터 구한다.

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} - x_1 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial r}) = 0 \quad a < r < b, \quad t > 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} - x_2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r}) = 0 \quad r < b, \quad t > 0 \quad (10)$$

이 열 전달 방정식들의 부대 조건들은 아래와 같다.

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = Q_0 f(t), \quad t > 0 \quad (11)$$

여기서, $\lambda =$ 열 확산 계수,

$Q_0 =$ 처분 용기 표면에서의 초기 열 선속,

$$\theta_1(r, 0) = 0, \quad a < r < b \quad (12)$$

$$\theta_2(r, 0) = 0, \quad r > b \quad (13)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \Big|_{r=b} = -\lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r} \Big|_{r=b}, \quad t > 0 \quad (14)$$

$$\theta_1(b, t) = \theta_2(b, t), \quad t > 0 \quad (15)$$

$$\theta_2(\infty, t) = 0, \quad t > 0 \quad (16)$$

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

$$\overline{P_1}(\eta, s) = \sum_{i=1}^4 X_{1i}(\eta) \overline{Y_{1i}(s)} \quad (17a)$$

$$\overline{P_2}(\eta, s) = \sum_{j=1}^2 X_{2j}(\eta) \overline{Y_{2j}(s)} \quad (17b)$$

여기서,

$$\eta = \frac{r}{a} \quad (18a)$$

$$p = \frac{x_2}{x_1} \quad (18b)$$

$$c = \frac{b}{a} \quad (18c)$$

$$Q_0 = Q_0 \frac{a^2}{\lambda_1} \quad (18d)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (18e)$$

$$f_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{k_2}{k_1} \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (18f)$$

$$D_1 = \frac{c_1}{x_1} \quad (18g)$$

$$D_2 = \frac{c_2}{x_1} \quad (18h)$$

$$X_{11}(\eta) = \frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}} \eta}}{\eta} \quad (19a)$$

$$X_{12}(\eta) = \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} \eta}}{\eta} \quad (19b)$$

$$X_{13}(\eta) = \frac{e^{-\sqrt{s} \eta}}{\eta} \quad (19c)$$

$$X_{14}(\eta) = \frac{e^{\sqrt{s} \eta}}{\eta} \quad (19d)$$

$$X_{21}(\eta) = \frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{D_2}} \eta}}{\eta} \quad (19e)$$

$$X_{22}(\eta) = \frac{e^{-\sqrt{\frac{s}{p}} \eta}}{\eta} \quad (19f)$$

$$\overline{Y_{11}(s)} = \frac{1}{a} \left[I_1^*(s) - \frac{I_6(s)}{J_4(s)} e^{2\sqrt{\frac{s}{D_1}}} \right] \quad (20a)$$

$$\overline{Y_{12}(s)} = \frac{1}{a} \frac{I_6(s)}{J_4(s)} \quad (20b)$$

$$\overline{Y_{13}(s)} = \frac{1}{a} \frac{H_1(s)}{s(1 - \frac{1}{D_1})} \quad (20c)$$

$$\overline{Y_{14}(s)} = \frac{1}{a} \frac{H_2(s)}{s(1 - \frac{1}{D_1})} \quad (21d)$$

$$\overline{Y_{21}(s)} = \frac{1}{a} \left[e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} \left\{ e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} - e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} (2-c)} \right\} \frac{I_6(s)}{J_4(s)} - I_5(s) \right] \quad (21e)$$

$$\overline{Y_{22}(s)} = \frac{H_3(s)}{\text{sa} \left[\frac{1}{p} - \frac{1}{D_2} \right]} \quad (21f)$$

$$A_1^*(s) = J_5(s) A_2^*(s) + I_7(s) \quad (22a)$$

$$A_2^*(s) = \frac{I_9(s)}{J_7(s)} \quad (22b)$$

$$A_3^+(s) = \frac{J_8(s)I_3(s)}{J_7(s)} - I_8(s) \quad (22c)$$

$$A_4^+(s) = \frac{H_1(s)}{s \left(1 - \frac{1}{D_1}\right)} \quad (22d)$$

$$A_5^+(s) = \frac{H_2(s)}{s \left(1 - \frac{1}{D_1}\right)} \quad (22e)$$

$$A_6^+(s) = \frac{H_3(s)}{s \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{D_2}\right)} \quad (22f)$$

$$h_1 = [1 + c\sqrt{s}]e^{-\sqrt{s}c} \quad (23a)$$

$$h_2 = \frac{q_0 \overline{f(s)}}{1 + \sqrt{s}} e^{\sqrt{s}} \quad (23b)$$

$$h_3 = \frac{1 - \sqrt{s}}{1 + \sqrt{s}} e^{2\sqrt{s}} \quad (23c)$$

$$h_4 = e^{\sqrt{s}c} [1 - c\sqrt{s}] \quad (23d)$$

$$h_5 = \lambda \left[1 + c\sqrt{\frac{s}{p}}\right] e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c} \quad (23e)$$

$$h_6 = \frac{q_0 \overline{f(s)}}{1 + \sqrt{s}} e^{\sqrt{s}(1 + \frac{c}{p} - c)} \quad (23f)$$

$$h_7 = e^{[\frac{1}{p} + 1]\sqrt{s}c} - \frac{1 - \sqrt{s}}{1 + \sqrt{s}} e^{\sqrt{s}(2 + \frac{c}{p} - c)} \quad (23g)$$

$$H_1(s) = -\frac{b_1 s H_1^+(s)}{D_1} \quad (24a)$$

$$H_2(s) = -\frac{b_1 s H_2^+(s)}{D_1} \quad (24b)$$

$$H_3(s) = -\frac{b_2 s H_3^+(s)}{D_2} \quad (24c)$$

$$H_1^+(s) = h_2 - h_3 H_2^+ \quad (25a)$$

$$H_2^+(s) = \frac{h_1 h_2 - h_5 h_6}{h_5 h_7 + h_1 h_3 - h_4} \quad (25b)$$

$$H_3^+(s) = h_6 + h_7 H_2^+ \quad (25c)$$

$$I_1(s) = -\frac{P_p}{s} - A_4^+(s)e^{-\sqrt{s}c} - A_5^+(s)e^{\sqrt{s}} \quad (26a)$$

$$I_2(s) = A_6^+(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c} - A_4^+(s)e^{-c\sqrt{s}} - A_5^+(s)e^{c\sqrt{s}} \quad (26b)$$

$$I_3(s) = -c\sqrt{s}A_4^+(s)e^{-\sqrt{s}c} + c\sqrt{s}A_5^+(s)e^{-\sqrt{s}c} - A_4^+(s)e^{-\sqrt{s}c} - A_5^+(s)e^{\sqrt{s}c} \quad (26c)$$

$$I_4(s) = cf_1\sqrt{\frac{s}{p}}A_6^+(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c} + f_1A_6^+(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c} = f_1A_6^+(s)e^{-\sqrt{\frac{s}{p}}c} \left[c\sqrt{\frac{s}{p}} + 1 \right] \quad (26d)$$

$$I_5(s) = I_2^+(s)e^{\sqrt{\frac{s}{p}}c} \quad (26e)$$

$$I_6(s) = J_3(s)I_5(s) + J_1(s)I_1^+(s) - \{I_3(s) + I_4(s)\} \quad (26f)$$

$$I_7(s) = \frac{e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}}}{1 + \sqrt{\frac{s}{D_1}}} [\{\sqrt{s}-1\} e^{\sqrt{s}} A_5^+(s) - \{\sqrt{s}+1\} e^{-\sqrt{s}} A_4^+(s)] \quad (26g)$$

$$I_8(s) = e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} I_8^+(s) \quad (26h)$$

$$I_1^+(s) = I_1(s) e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}}} \quad (27a)$$

$$I_2^+(s) = I_2(s) - e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} I_1^+(s) \quad (27b)$$

$$I_8^+(s) = I_2(s) - I_7(s) e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} \quad (27c)$$

$$J_1(s) = \left[c \sqrt{\frac{s}{D_1}} + 1 \right] e^{-\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} \quad (28a)$$

$$J_2(s) = \left[c \sqrt{\frac{s}{D_1}} - 1 \right] e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} \quad (28b)$$

$$J_3(s) = f_1 \left[c \sqrt{\frac{s}{D_2}} + 1 \right] e^{-\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} \quad (28c)$$

$$J_4(s) = J_1(s) e^{2\sqrt{\frac{s}{D_1}}} + J_2(s) + J_3(s) e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} \left\{ e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} - e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} (2-d)} \right\} \quad (28d)$$

$$J_5(s) = e^{2\sqrt{\frac{s}{D_1}}} \frac{\sqrt{\frac{s}{D_1}} - 1}{1 + \sqrt{\frac{s}{D_1}}} \quad (28e)$$

$$J_6(s) = e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} \left[J_5(s) e^{-\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} + e^{\sqrt{\frac{s}{D_1}} c} \right] \quad (28f)$$

$$J_7(s) = J_2(s) + J_3(s) J_6(s) - J_1(s) J_5(s) \quad (28g)$$

$$I_8(s) = e^{\sqrt{\frac{s}{D_2}} c} I_8^+(s) \quad (28h)$$

$$I_9(s) = J_3(s) I_8(s) + J_1(s) I_7(s) - \{I_3(s) + I_4(s)\} \quad (28i)$$

이제 마지막 수학적 도출은 처분장 주변의 멘토나이트 방벽과 화강암반에서의 Darcy 속도를 구하는 것이다. Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$v_1 = -\frac{K_1}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial r} = -\frac{K_1}{\mu_1 a} \frac{\partial P_1}{\partial \eta} \quad (29a)$$

$$v_2 = -\frac{K_2}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial r} = -\frac{K_2}{\mu_2 a} \frac{\partial P_2}{\partial \eta} \quad (29b)$$

상기 방정식들을 라플라스 변환하면,

$$\bar{v}_1(\eta, s) = -\frac{K_1}{\mu_1 a} \sum_{i=1}^A \frac{\partial X_{1i}(\eta)}{\partial \eta} \bar{Y}_{1i}(s) \quad (30a)$$

$$\bar{v}_2(\eta, s) = -\frac{K_2}{\mu_2 a} \sum_{j=1}^2 \frac{\partial X_{2j}(\eta)}{\partial \eta} \bar{Y}_{2j}(s) \quad (30b)$$

방정식 (30)에서 표현된 라플라스 변환된 Darcy 속도식들은 Talbot가 개발한 수치적 라플라스 역변환 법[7]에 의하여 계산된다.

3. 입력 자료

전 절에서 유도된 반-해석해를 사용하여 처분장 주변 벤토나이트 방벽 및 화강암반에서의 THM 상호 반응 영향 평가를 위한 입력 자료는 크게 고준위 방사성폐기물의 열적 특성 이력과 벤토나이트 및 화강암반 물성 특성치로 대별된다. 본 연구에서는 현재 한국원자력연구소 고준위 방사성폐기물 처분연구에서 잠정 결정한 45,000 MWT의 PWR 사용후핵연료를 기준 고준위 방사성폐기물[8]로 가정하고 이의 열 이력을 수치적 평가에 사용하였다. 또한 국내 심지층 화강암에 대한 실측 데이터 값이 불충분하여, 해외 문헌 조사를 통하여 화강암반에 관한 물성치를 구하였다. 본 논문에서 사용한 벤토나이트의 물성치는 MX-80의 물성치이다. 벤토나이트 및 화강암반에 관한 물성치[9-10]는 표 1에 요약되어 있다.

표 1. 벤토나이트 및 화강암반의 물성치

	Bentonite	Granite
Conductivity, λ	1.4 W/m K	3.0 W/m K
Heat capacity, ρC_v	3.4e+6 J/m ³ K	2.4e+6 J/m ³ K
Drained bulk modulus, K	8.3e+9 Pa	31.7e+9 Pa
Fluid bulk modulus, K_f	2.0e+9 Pa	2.0e+9 Pa
Solid bulk modulus, K_s	2.1e+11 Pa	34.8e+9 Pa
Shear modulus, G	1.8e+9 Pa	20.9e+9 Pa
Porosity, ϕ_D	0.3	0.002
Permeability, k	6.0e-21 m ²	1.0e-20 m ²
Fluid expansivity, α_f	3.0e-4 /K	3.0e-4 /K
Solid expansivity, α_s	0 /K	9.0e-6 /K
Fluid viscosity, μ	1.0e-3 Pa s	1.0e-3 Pa s
Pore-pressure modulus, B	0.437	0.746
Poisson's ratio, ν	0.4	0.23
Undrained Poisson's ratio, ν_u	0.44	0.24
Modified thermal constant, b'	3.76e+5 Pa/K	2.64e+5 Pa/K
Modified compressibility, c'	0.8m ² /yr	87.56m ² /yr
Thermal diffusivity, κ	4.1e-7 m ² /s	1.3e-6 m ² /s

4. 계산 결과 및 논의

그림 1은 Origen-2를 이용하여 계산한 기준 고준위 방사성폐기물의 시간에 관한 열 이력을 지수 함수들의 형태로 표시한 결과물을 도시한 것이다. 그림 1에서 나타난 바와 같이 지수 함수들로 표시한 열 이력 함수는 대부분의 시간대에서 실제 열 이력을 잘 표시하는 것으로 나타났다. 따라서 지수함수로 표시된 열 이력은 방정식 (11)의 $f(t)$ 로 수학적 해석에서 사용된다. 본 논문에서는 이러한 방사성 붕괴열로 인한 지하수 유동 속도 변화 현상을 다음과 같은 두 경우로 구분하여 살펴 보았다.

- (1) 처분공 주변에 벤토나이트 방벽층을 설치하지 않고 단순히 화강암반만 존재한다고 가정
한 경우
- (2) 처분공과 화강암반 사이에 벤토나이트 방벽층을 설치한 경우

**1) 처분공 주변에 벤토나이트 방벽을 설치하지 않고 단순히 화강암반만 존재한다고 가
정한 경우**

이러한 붕괴열 이력을 가진 고준위 방사성폐기물의 거치로 말미암아 처분공 주변의 온도는 상승하게 된다. 그림 2는 처분공 주변에 벤토나이트 방벽을 설치하지 않았을 경우 처분공으로부터 거리와 시간에 따른 지하 화강암반에서의 온도 상승을 도시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 처분공 주변의 온도는 고준위 방사성폐기물의 붕괴열이 차츰 감소함에 따라, 시간이 경과할수록 감소하는 경향을 보여준다. 이와 같이 열 분포가 변화하게 되면 암반 내의 유효 응력(effective stress) 및 지하수압도 변화하게 된다. 그림 2는 방사성 붕괴열로 인한 지하수압 변화를 도시한 것이다. 그림 3에서 도시된 바와 같이 전체적으로 지하수압은 암반 내 온도 하강에 따라 시간이 경과할수록 하강하게 된다. 그리고 대부분의 경우 지하수압의 각 지점에서의 지하수압 구배는 음의 값을 가지게 되어 Darcy 속도는 양의 값을 띠게 된다. 그러나 국부적으로 자세히 관찰하면 일정 시간이 경과한 후에는 특정 지점들에서는 지하수압의 구배가 양이 되어 Darcy 속도가 음이 되는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 현상은 방사성 붕괴열의 급격한 감소로 말미암아 열 응력이 동반하여 급격히 감소하여 발생하는 독특한 현상이다. 이러한 현상이 발생하면 그 지점에서의 지하수 유동 방향은 처분장 외부로 향하는 것이 아니라 처분공 방향이 된다. 따라서 이러한 지하수의 일시적인 역류 현상은 지하수에 용해되어 유출되는 방사성 물질의 이동을 억제하는 기구로서 작용하게 되어 처분장 안전성 향상에 순기능으로 작용하게 된다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 전체적인 Darcy 속도는 연간 mm 정도의 수준으로 매우 미미하며, 일정 기간이 지난 후에는 전술한 바와 같이 지하수 역류 현상을 나타나게 한다. 따라서 이러한 수준의 지하수 유동 속도 변화는 전체적인 처분 안전성에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

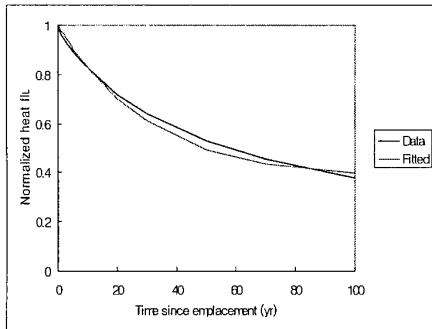


그림 1. 기준 핵연료의 열 이력 그래프

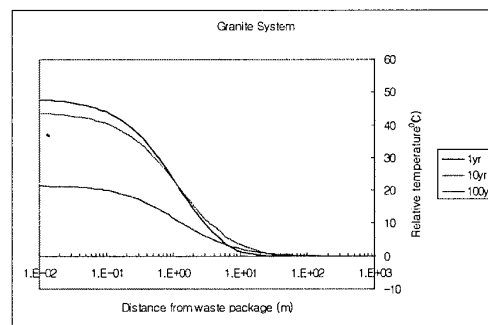


그림 2. 화강암반 층만 존재할 경우 시간과 공간에 따른 상대 온도 분포도

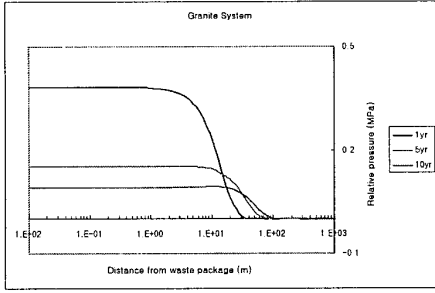


그림 3. 화강암반 층만 존재할 경우
상대 지하수압 분포

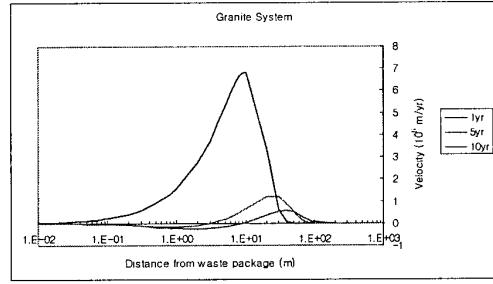


그림 4. 화강암반 층만 존재할 경우
Darcy 속도 분포

2) 처분공과 화강암반 사이에 벤토나이트 방벽을 설치한 경우

현재 국내에서 고려하고 있는 고준위 방사성 폐기물 심지층 처분 개념에서는 스웨덴, 핀란드의 경우와 유사하게, 처분공과 주변 암반 사이에 적절한 두께의 벤토나이트 공학적 방벽을 설치하도록 되어 있다. 그림 5는 이러한 개념 하에서 지하 매질들에서의 온도 분포를 도시한 것이다. 이러한 열 분포의 변동은 열 응력을 변화시켜 처분장에서의 지하수압을 변화시킨다. 그림 6은 두 매질에서의 온도 분포를 도시한 것이다. 이러한 온도 분포에 따라 지하수압이 변화하게 되는 바 자세한 변화는 그림 6에 도시되어 있다. 온도 변화에 기인한 지하수압의 변화로 말미암아 발생하는 추가적인 Darcy 속도는 그림 7과 8에 도시되어 있다. 이들 그림에서 나타나는 바와 같이 열 응력으로 인한 추가적인 Darcy 속도 값은 지하수압 구배가 변하는 벤토나이트 방벽과 화강암반층 경계 부근에서 비교적 크게 나타나나 그 값은 연간 cm 수준에 머물고 있다. 그리고 벤토나이트 방벽이 없는 경우와 동일하게 일정 시간이 경과한 후 지하수 유동의 역전 현상도 나타난다.

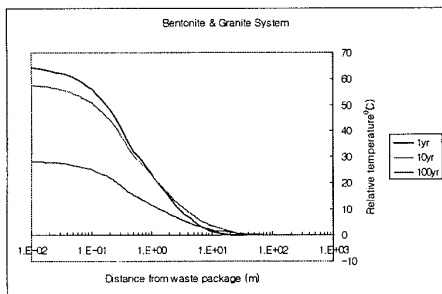


그림 5. 벤토나이트/화강암반 층에서의
온도 변화 분포도

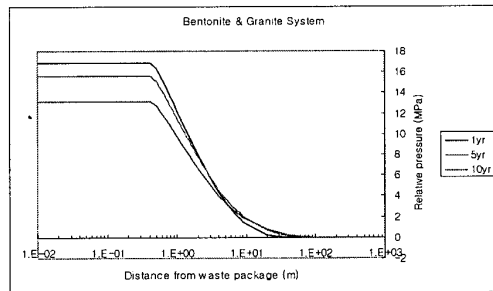


그림 6. 벤토나이트/화강암반 층에서의
지하수압 변화 분포도

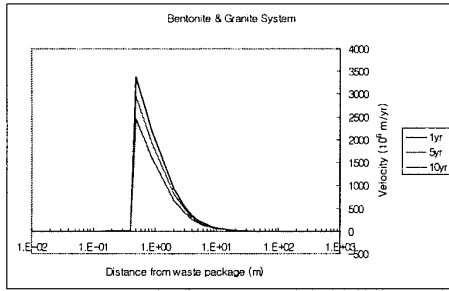


그림 7. 거치후 1-10년 사이 Darcy
속도 변화 분포도

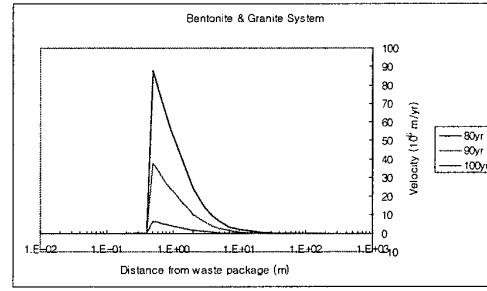


그림 8. 거치후 30-100년 사이 Darcy
속도 변화 분포도

5. 결론

선형 열탄성 이론을 적용한 구성 법칙을 이용하여 심부 화강암반층에 고준위 방사성폐기물을 영구 처분하였을 경우 방사성 붕괴열로 인한 “추가적인“ 지하수 유동 속도 증가 현상을 규명하기 위한 수학적 모델링이 개발되었으며 이를 이용하여 (1) 벤토나이트 방벽을 설치하지 않을 경우와 (2) 벤토나이트 방벽을 설치한 경우와 같은 두 가지 경우에 대해 Darcy 속도의 변화를 정량적으로 규명하였다.

계산 결과 방사성 붕괴열로 인한 지하수 유동 속도의 추가적인 증가량은 두 경우 모두 매우 미미하게 나타났고 특정한 시간대 이후에는 국부적인 구간에서 방사성 붕괴열의 급격한 감소로 인한 열 응력 및 이에 따른 지하수압의 변화로 말미암아 지하수 유동의 역전 현상이 발생하여 안전성 측면에서는 순기능으로 작용함이 규명되었다.

하지만 이러한 연구의 최종 결론을 도출하기 위해서는 이 연구에 다음과 같은 사항이 추가적으로 규명되어야 할 것이다.

- (1) 본 계산에서 사용된 암반 및 벤토나이트 물성치들이 국내 암반 및 벤토나이트 물성치들을 잘 대표하고 있는가를 실험실 및 현장 실험 등을 통한 규명
- (2) 본 수학적 모델의 근간이 되는 선형 열 탄성 이론이 국내 심지층 결정질 암반에도 무리 없이 적용 가능한지 실험을 통한 검증 여부 및 기존 열 탄성 이론의 개선 작업
- (3) 본 계산에서는 하나의 처분공에서 발생하는 열원을 사용하였는 바 실제 처분장 열적 조건을 만족하는 모델링 개선 작업

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음

참고 문헌

1. L. Jing et al., "DECOVALEX Report of Phase I", SKI TR 93-31, 1993.

2. L. Jing et al., "DECOVALEX Report of Phase II", SKI TR 94-16, 1994.
3. L. Jing et al., "DECOVALEX Report of Phase III", SKI TR 95-80, 1995.
4. 황 용수 외, "고준위 방사성폐기물 처분장에서의 THM 상호 반응 이론 연구, Part I: 수학적 모델링", 대한암반공학회지 1998년 3월호.
5. 황 용수 외, "Analyses of Mass Transfer in a Nuclear Repository in Salt", Water Resources Research vol 28 No 7 July 1992.
6. 황 용수, "DECOVALEX project 현황과 전망", 대한암반공학회지, 1997년 9월호.
7. A Talbot et al., "The Accurate Numerical Inversion of laplace Transforms", Journal of Inst. Math. Appl. Vol 23, No 97, 1979.
8. 최 종원 외, "심지층 처분시스템 개념 설정을 위한 기준 사용후핵연료 선정 및 특성 분석", KAERI/TR-914/97 1997.
9. L. Borgesson et al., "Interaction between Rock, Bentonite Buffer and Canister", SKB/TR/92-30, Sweden, 1992.
10. J. Israelsson et al., "DECOVALEX-BMT3: THM Modeling", SKB/TR/95-30, Sweden, 1995.