

암석의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 수치해석적 연구

안형준¹⁾ · 이희근²⁾

Numerical Study on Thermo-Hydro-Mechanical Coupling in Rock with Variable Properties by Temperature

Hyung-Jun An and Hi-Keun Lee

ABSTRACT It is necessary to study on thermo-hydro-mechanical effect at rock mass when performing project such as radiowaste disposal in deep rock mass. In this study, thermo-hydro-mechanical coupling analysis which is considered interaction and the variation of rock properties induced by temperature increase was performed for the circular shaft when applying temperature of 200°C at the shaft wall. The shaft is diameter of 2 m and under hydrostatic stress of 5 MPa. In the cases, thermal expansion by temperature increase progress from the wall to outward and thermal expansion could induce tensile stress over the tensile strength of rock mass at the wall. When rock properties were given as a function of temperature, thermal expansion increased, tensile stress zone expanded. Lately, water flow is activated by increase of permeability and decrease of viscosity.

1. 서 론

근래에 새롭게 제기되고 있는 방사성폐기물 지하처분장이나 열수저장, 지열에너지개발 등의 과제들은 지하암반의 역학적인 안정성 뿐만아니라 암반을 통한 열유동, 수리유동을 함께 고려한 연구를 요구한다. 일반적으로 자연상태의 심부암반은 역학적, 수리적, 열적으로 평형상태에 있으므로 인위적인 행위에 따른 변화는 역학적, 열적, 수리적인 상호작용을 유도한다. 예를 들어 고준위방사성폐기물 지하처분장은 고준위방사성 폐기물의 발열특성으로 인해 처분공동주변의 온도가 증가하고 이는 역학적 물성변화와 열팽창의 효과를 가져온다. 또한 수리적으로는 물의 점성도를 낮추고 유동경로인 공극이나 균열의 증가를 가져와 수리유동에 영향을 미친다.

이와 같은 암반에서의 상호작용관계는 Fig. 1과 같이 정리된다. Fig. 1에서 암반거동, 수리유동, 열전달이 주고 받는 상호작용은 유효응력, 열팽창과 같은 직접적 상호작용과 물성변화를 통한 간접적 상호작용으로 나눌 수 있다. 이 두가지 상호작용은 해석의 과정에서 각각

직접적인 상호작용은 지배방정식의 구성으로, 간접적인 상호작용은 각종 물성의 온도-압력함수화로 표현된다.

토질역학의 유효응력의 개념에서부터 시작된 상호작용해석은 1980년대들어 열을 포함한 해석이 본격적으로 연구되어 Lewis & Schrefler(1987) 등에 의해 열-수리-역학적 상호작용의 지배방정식이 체계화되었고 Witherspoon(1981) 등에 의해 암석의 절리를 고려한 해석이 수행되었다. 또한 물성변화를 고려하기 위해 Hart (1986)는 물성변화에 따른 비선형 상호작용해석을 수행하였다. 이처럼 최근의 연구들은 암반절리를 고려한 연구와 다양한 물성변화를 고려한 연구가 주류를 이루고 있으나 아직도 실제와 근접한 해석은 부족한 상태이다. 본 논문에서는 직접적 상호작용을 Lewis가 제시한 다공질매체의 열-수리-역학적 상호작용의 지배방정식¹⁾을 이용하여 표현하고 간접적상호작용의 경우 다양한 실험연구를 통한 결과들을 이용하기 위해 Wai(1982)가 Ontario화강암에 대하여 구한 온도에 따른 물성변화식²⁾과 Wei(1992)가 제시한 변형률의 함수로 표현된 투수계

1) 정회원, 코오롱건설 기술연구소 지반연구팀
2) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

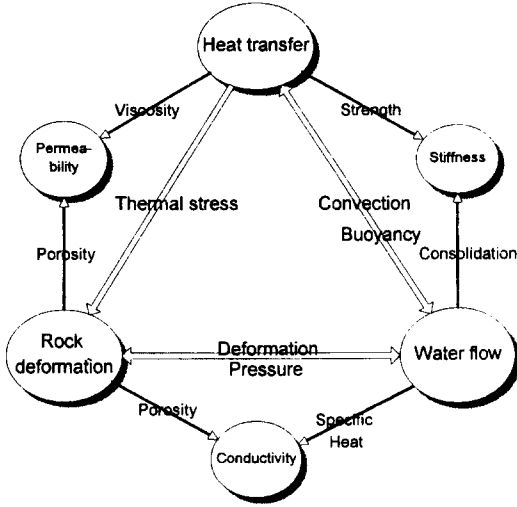


Fig. 1. Relationship of each properties and phenomena regarding rock deformation, pore water pressure and heat transport.

수식, 온도함수로 주어지는 물의 점성도변화식^{3,4)}을 이용한 수리전도도변화를 적용하여 해석의 결과가 실제상황과 근접하도록 시도하였다. 사용된 모델은 5 MPa의 정수압상태인 등방성암반에서 굴착된 원형공동으로 Kellsall(1984)과 Wei(1992)에 의해 수리-역학적 상호작용해석을 수행하는데 사용되었으며 본 논문에서는 열-수리-역학적 상호작용해석모델로 사용하였다.

2. 기본이론 및 지배방정식의 수식화

직접적 상호작용의 지배방정식은 Lewis & Schrefler(1987)이 정리한 다공질매체의 지배방정식을 사용하였으며 크게 역학적 거동, 수리유동, 열전달의 세부분의 방정식으로 구성된다.

2.1 역학적 거동의 수식화

역학적 거동의 수식화는 역학적 평형방정식에 유효응력, 열팽창의 식을 포함하여 구성된다.

$$\int_{\Omega} \delta \epsilon^T D_{\tau} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \epsilon^T m \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \epsilon^T D_{\tau} m \frac{\partial p}{\partial t} \frac{1}{3K_s} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \epsilon^T D_{\tau} m \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{\partial f}{\partial t} = 0$$

위 식에서 K_s 는 고체입자의 압축률, β_s 는 열팽창률이며 m 은 등가변수이다.

2.2 수리유동의 수식화

Darcy법칙에 의하면 경계를 통한 인입량과 배출량은 동일하다. 그러나 열-수리-역학적 상호작용은 매체내부에서의 변화 즉, 변형발생에 의한 공극률의 증가, 온도에 따른 유체의 밀도변화 등을 일으키므로 유체이동의 연속성은 경계의 입출량뿐 아니라 유체의 축적이 함께 고려되어야 한다.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{k\rho}{\mu} \nabla(p + \rho gh) \right) + (\text{유체의 축적비}) = 0 \quad (7)$$

유체의 축적비를 고려한 매체내부에서 수리유동의 연속성방정식이 구성된다.

$$\begin{aligned} & -\nabla^T \left\{ \frac{k}{\mu} \nabla(p + \rho_w gh) \right\} + \left(m^T - \frac{m^T D_{\tau}}{3K_s} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + m^T D_{\tau} c \\ & + \left\{ \frac{1-\phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_w} - \frac{1}{(3K_s)^2} m^T D_{\tau} m \right\} \frac{\partial p}{\partial t} \\ & + \left[-\phi \beta_w - (1-\phi) \beta_s + \frac{1}{3K_s} m^T D_{\tau} m \frac{\beta_s}{3} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위에서 ρ_s 는 고체의 밀도, ρ_w 는 물의 밀도, K_w 는 물의 압축률, β_w 는 물의 열팽창률이다.

이상의 매체내부의 연속성방정식과 경계에서의 연속성을 동시에 만족하기 위해서는 다음식을 만족해야 한다.

$$\int_{\Omega} a^T \bar{A} d\Omega + \int_{\Gamma} b^T \bar{B} d\Gamma = 0 \quad (13)$$

여기서 \bar{A} 는 (12)식, \bar{B} 는 경계에서의 연속성방정식으로 다음과 같이 나타난다.

$$B \equiv -n \frac{k}{\mu} \nabla(p + \rho gh) - q = 0 \quad (14)$$

여기서 n 은 단위노멀벡터이며 q 는 경계면에서 단위면적당 외부유출속도. 초기의 수압은 $p=p_0$ 로 정한다. 위의 두식을 대입하고 $a^T = -b^T$ 로 놓으면 수리유동의 지배방정식(15)로 정리된다.

$$\int_{\Omega} \left\{ (\nabla a)^T \left\{ \frac{k}{\mu} \nabla(p + \rho gh) \right\} + a^T \left[\left(m^T - \frac{m^T D_{\tau}}{3K_s} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{m^T D_{\tau} c}{3K_s} + \left(\frac{1-\phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_w} - \frac{1}{(3K_s)^2} m^T D_{\tau} m \right) \frac{\partial p}{\partial t} \right] \right\} d\Omega$$

$$+ \left[-\phi\beta_w - (1-\phi)\beta_s + \frac{1}{3K_s} m^T D_T m \frac{\beta_s}{3} \right] \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \int_{\Gamma} a^T q d\Gamma = 0 \quad (15)$$

2.3 열유동의 수식화

일반적으로 전도와 대류에 의한 열전달은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\rho_w C_w (\nabla^T T) V^a - \nabla^T \lambda \nabla T = \frac{\partial}{\partial t} \{ [(1-\phi)\rho_s C_s + \phi\rho_w C_w] T \} \quad (16)$$

여기서 H는 전도의 열유동벡터,

$\rho_s C_s$ 는 고체상의 열용량,

$\rho_w C_w$ 는 유체상의 열용량,

V^a 는 유체상의 걸보기 용량,

λ 는 매체의 열전도도이다.

T는 초기평형상태를 넘어서는 온도증분이다.

(16)식에서 유체와 고체밀도가 온도, 압력에 따라 변하므로 다음과 같이 내부 평형방정식이 만들어진다.

$$-\nabla^T \lambda \nabla T + (1-\phi)C_s T \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \phi C_w T \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + [(1-\phi)\rho_s C_s + \phi\rho_w C_w] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_w V^a T (\nabla T) = 0 \quad (17)$$

열유동의 지배방정식과 내부평형방정식과 경계에서의 평형방정식을 모두 만족해야 한다. 경계를 가로지르는 대류와 전도에 의한 열유동의 연속성은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\bar{B} \equiv n^T \rho_w C_w V^a T - n^T \lambda \nabla T - q_h = 0 \quad (18)$$

위의 (17),(18)식을 (13)식에 대입하면 다음과 같은 열전달의 지배방정식이 구성된다.

$$\int_{\Omega} (\nabla_a) \lambda \nabla d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla_a)^T \rho_w C_w V^a T d\Omega + \int_{\Omega} a^T \left[(1-\phi) \frac{C_s \rho_s}{K_s} T + \phi \frac{C_w \rho_w}{K_w} T \right] \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} a^T [(1-\phi)\rho_s C_s + \phi\rho_w C_w - (1-\phi)C_s \rho_s \beta_s T - \phi C_w \rho_w \beta_w T] \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} a^T q_h d\Gamma = 0 \quad (19)$$

위의 식에서 매체변형으로 인한 상호작용은 포함되지 않는데 이는 매체의 변형이 매우 미소하기 때문이다.

2.4 암석물성의 온도의존성

Wai는 캐나다의 선캠브리아대의 Ontario 화강편마암에 대하여 탄성계수, 포아송비, 팽창계수, 열확산도 등의 암반물성의 온도의존성을 0°C-200°C의 범위에 대하여 단순한 형태의 선형회귀식으로 정리하였다. 이중 해석에 가장 영향을 미치는 탄성계수와 열팽창계수의 회귀식은 다음과 같다.

(가) 탄성계수의 온도의존성

Ontario 화강편마암의 탄성계수는 가열, 냉각시 서로 다른 변화양상을 나타내며 가열시 탄성계수의 변화는 다음과 같다.

$$E_{\psi} = E_0, \quad 0 \leq \psi \leq 80$$

$$E_{\psi} = E_0 [1 - (\psi - 80) \times 0.0025], \quad 80 \leq \psi \leq 180,$$

여기서 ψ 는 T(실제온도) -20이며 실내온도를 감안한 값이다.

냉각에 의한 탄성계수의 변화는 다음과 같다.

$$E_{\psi} = E_0, \quad 0 \leq \psi \leq 80$$

$$E_{\psi} = E_0 [k_1 + (\psi_{\max} - \psi) \times 0.0015] \quad \psi_{\max} > 80, \quad \psi \leq 80$$

$$E_{\psi} = E_0 [k_1 + (\psi_{\max} - \psi) \times 0.0015] \quad 80 \leq \psi \leq \psi_{\max}$$

여기서 $k_1 = [1 - (\psi_{\max} - 80) \times 0.0025]$, ψ_{\max} 는 이전에 주어진 최대온도.

(나) 열팽창계수의 온도의존성

$$\alpha_{\psi} = (6 + \psi/20) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

2.5 암반의 변형과 온도변화에 의한 수리전도도의 변화

수리전도도는 투수계수와 유체의 점성도에 의해 결정된다.

본 연구에서는 투수계수는 De Paz가 제안한 변형률의 대수식으로 표현한다.

$$k_h = k_0 e^{-\beta^e \Delta \epsilon_t}$$

$$k_v = k_0 e^{-\beta^e \Delta \epsilon_h}$$

여기서 β 는 무차원변수이며 암종에 따라 다르다. 유체의 점성도 변화는 다음의 식으로 표현된다.⁴⁾

$$\mu = \frac{42.7}{(T-250)}, \quad 273 \text{ K} \leq T \leq 333 \text{ K}$$

$$\mu = \frac{27.9}{(T-278.8)}, \quad 333 \text{ K} \leq T$$

K는 절대온도.

3. 유한요소해석의 적용과 해법

3.1 유한요소지배방정식의 이산화

유한요소해석을 수행하기 위해 지배방정식을 변위, 수압, 온도에 대하여 이산화한다. 요소에서 변위, 수압, 온도의 절점변수값이 각각 \bar{u} , \bar{p} , \bar{T} 라 하고 지배방정식에 대입하면 다음과 같은 세 개의 식으로 정리할 수 있다.⁵⁾

$$K \frac{d\bar{u}}{dt} + L \frac{d\bar{p}}{dt} + TU \frac{d\bar{T}}{dt} = C + \frac{df}{dt} \quad (20)$$

$$L^T \frac{d\bar{u}}{dt} + H\bar{p} + S \frac{d\bar{p}}{dt} + TP \frac{d\bar{T}}{dt} = \bar{f} \quad (21)$$

$$TL \frac{d\bar{u}}{dt} + TR \bar{T} + TS \frac{d\bar{T}}{dt} = TG \quad (22)$$

3.2 시간에 대한 이산화

시간에 대한 이산화는 일정한 시간간격 Δt 에 대하여 다음식과 같이 나타낸다.

$$X = (1 - \alpha)X_i + \alpha X_{i+\Delta t}$$

위의 식을 적용하면 다음과 같은 수식화가 가능하다.

$$\begin{bmatrix} K & L & & TU \\ L^T & S + \alpha H \Delta t_k & & TP \\ 0 & TL & & TS + \alpha TR \Delta t_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p} \\ \bar{T} \end{Bmatrix}_{t_k + \Delta t_k} = \begin{bmatrix} K & L & & TU \\ L^T & S - (1 - \alpha)H \Delta t_k & & TP \\ 0 & TL & & TS - (1 - \alpha)TR \Delta t_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{p} \\ \bar{T} \end{Bmatrix}_{t_k} + \begin{Bmatrix} \frac{df}{dt} + c \\ \bar{f} \\ TG \end{Bmatrix}_{k\bar{\alpha}} \Delta t_k \quad (23)$$

4. 상호작용해석의 적용 및 결과

4.1 프로그램의 구성

해석에 사용된 프로그램은 Lewis(1987)에 의해 공개된 Plascon을 바탕으로 암석의 물성변화를 고려할 수 있도록 수정하여 사용하였다. 이 프로그램은 8절점요소

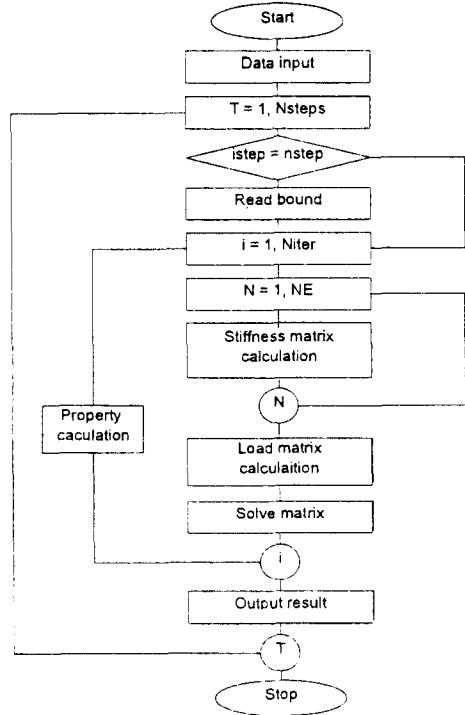


Fig. 2. Flow chart of Fully coupled F.E. analysis program.

를 사용하며 이차원 평면변형률상태로 탄성해석을 수행한다. 이 프로그램은 Lewis에 의해 일차원압밀모델을 이용한 검증이 이루어졌으므로 자세한 검증은 생략한다.¹⁾ 이 프로그램의 순서도는 Fig. 2와 같다.

4.2 수갱모델의 적용

수갱모델은 Kelsall(1984)이 사용한 모델로서 등방성암반에 굴착된 것으로 2 m의 반경에 5 MPa의 정수압상태이며 현지 수압은 0.6 MPa이다.

이 모델의 요소망은 Fig. 3과 같다. 외부경계조건은 수갱의 축으로부터 60 m지점에 주어진다. 이 거리는 Gumusoglu(1986)에 의해 무한관으로 가정하기에 적당한 값으로 주어진 것이다.

암반의 물성은 Table 1과 같다.

4.3 열-수리-역학적 상호작용해석결과

해석은 우선 공동굴착에 의한 수리-역학적 상호작용의 영향이 사라진 후 공동벽면에 200°C의 열을 가했을 때의 열-수리-역학적 상호작용에 대하여 실시하였다. 우선 공동가열전 굴착에 의한 수리-역학적 상호작용은

다음과 같다. Fig. 4에서 굴착변형에 의한 수리전도도의 변화를 나타내었다. 수리유동은 수압과 수리전도도에 의해 결정되므로 수리전도도의 변화는 수리유동에 큰 영향을 미친다. 응력재분배에 의해 공동벽면에서 변형이 발생하면 이는 수리전도도의 변화로 나타나는데 접선응력의 경우 현지응력의 2배 크기의 압축응력을 나타내므로 절리나 간극이 닫히게 되어 반경방향의 수리전도도는 초기값의 약 14%로 감소하며 반경응력은 반

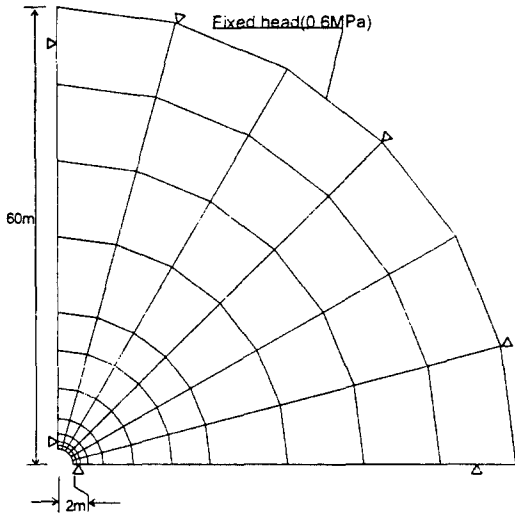


Fig. 3. Finite element mesh of shaft model.

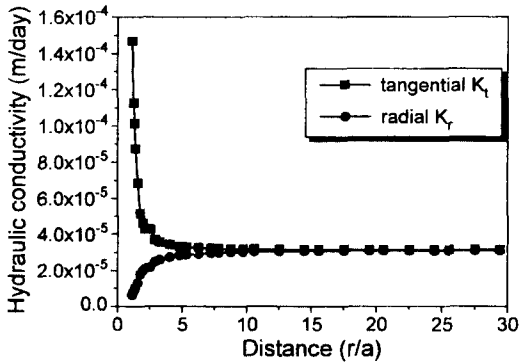


Fig. 4. Hydraulic conductivity distribution in H-M coupling analysis.

대로 압축상태에서 0에 가까워지므로 접선방향의 수리전도도는 약 6배로 증가한다. 그런데 수리유동은 공동의 반경방향으로 이루어지므로 반경방향의 수리전도도가 주된 영향을 미치게 된다. 따라서 반경방향의 수리전도도의 감소는 공동주변에서의 수리유동을 둔화시켜 수압분포를 높게 만든다. 이는 Fig. 5에서 잘 나타난다.

공동굴착으로 인한 변화가 어느정도 안정된 110일이 후 200°C의 온도로 순간적으로 가열했을 때의 결과는 Fig. 6-12와 같다. 반경방향의 변위는 Fig. 6과 같이 시간이 지나면 열팽창에 의해 공동외부로 팽창하는 경향을 나타낸다. 이때 공동벽면에서의 변위는 거의 발생

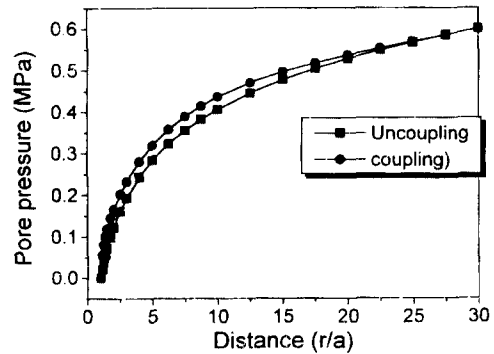


Fig. 5. Pore pressure distribution in H-M coupling analysis.

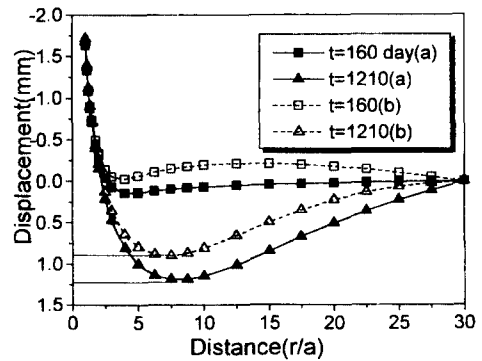


Fig. 6. Radial displacement distribution at several time in tripl coupling analysis; (a) rock properties variable, (b) rock properties constant.

Table 1. Properties of rock used in the triple coupling analysis at 20°C

Properties	E(MPa)	ν	β	K(m/day)	K_w (MPa)
Value	7500	0.25	2000	3.11×10^{-5}	0.66×10^{-5}
K_s (MPa)	β_s (°C)	β_w (°C)	(pc)s(J/m ³ K)	(pc)w(J/m ³ K)	λ (W/m°C)
0.23×10^3	0.6×10^{-5}	0.21×10^3	2.25×10^6	4.19×10^6	3.2

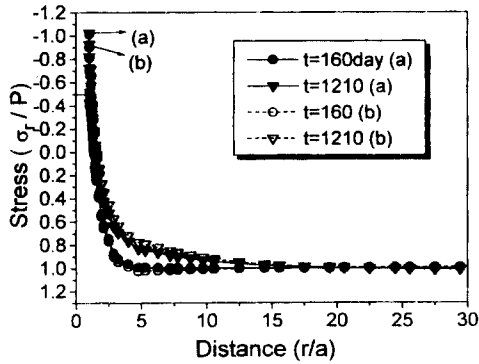


Fig. 7. Radial stress distribution at several time in triple coupling; (a) rock properties variable, (b) rock property constant.

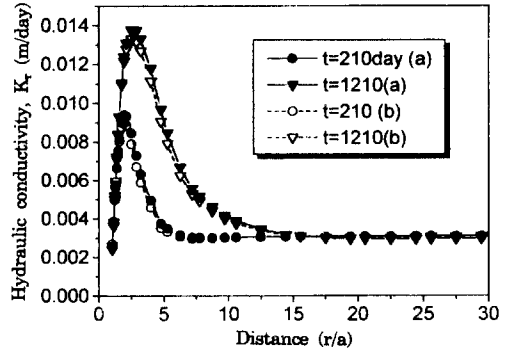


Fig. 10. Radial hydraulic conductivity distribution at several time in triple coupling analysis; (a) rock properties variable, (b) rock properties constant.

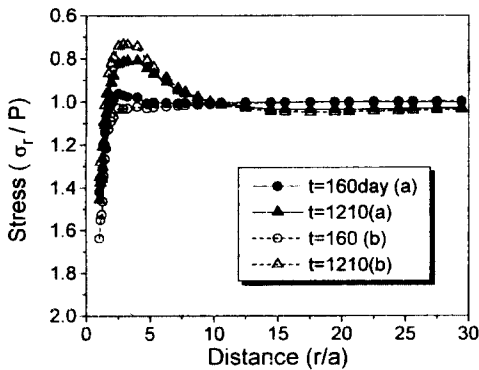


Fig. 8. Tangential stress distribution at several time in triple coupling analysis; (a) rock properties variable, (b) rock property constants.

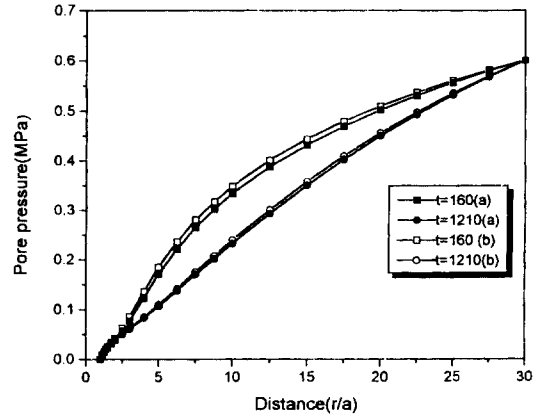


Fig. 11. Pore pressure distribution at several time in tricoupling analysis; (a) rock properties variable, (b) rock properties constant.

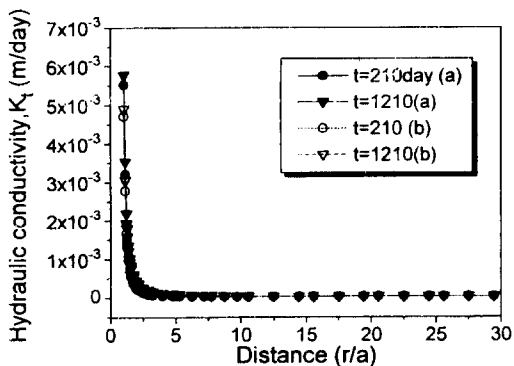


Fig. 9. Tangential hydraulic conductivity distribution at several time in triple coupling analysis; (a) rock properties variable, (b) rock properties constant.

하지 않고 주로 공동인접부 10 m범위에서 가장 큰 팽창변위가 발생하는데 1210일에 최대 1 mm정도 팽창한다. 이에 따라 Fig. 7,8에서와 같이 공동벽면에서 접

선방향의 응력은 현지응력의 2배에서 약 1.6배정도로 감소하며 반경방향응력은 인장응력으로 변화한다. 그러나 이러한 응력변화는 열팽창의 효과가 그대로 응력으로 나타난다는 가정에 따른 것이므로 실제상의 응력 값은 이와 다를 수 있다. Fig. 9,10은 공동주변의 온도 증가에 따른 수리전도도의 변화양상을 나타낸다. 그림에서 투수계수의 증가와 유체점성도의 감소로 인해 1210일의 반경방향 수리전도도는 수갱의 중심에서 약 3 m 지점에서 약 4 배정도 증가한다. 이는 특히 유체점성도가 온도변화에 민감하게 변화하기 때문이다. 온도가 20°C에서 200°C까지 변할 때 물의 점성도차이는 약 10배에 이른다. 그러나 실제로는 200°C까지 온도가 증가하는 경우 암반상태나 압력상태에 따라 기체로의 상변화를 일으킬 수 있으므로 이 결과는 실제상황과 많이

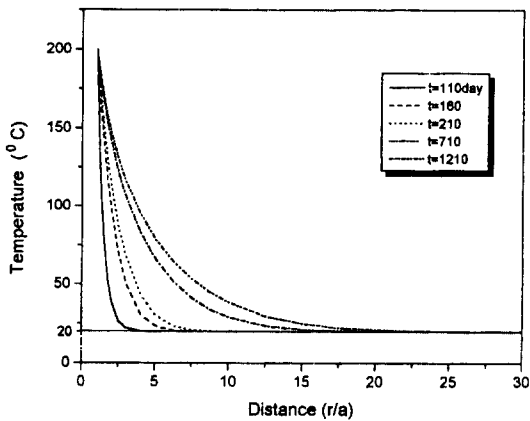


Fig. 12. Temperature distribution at several time in triple coupling analysis.

다를 수 있을 것으로 생각된다. 상변화를 일으키지 않는다는 가정에서 반경방향수리전도도의 급격한 증가는 수리유동을 활성화하여 경계에서 공동으로의 수압분포가 시간이 지남에 따라 Fig. 11과 같이 점차 감소하게 된다. 이것은 핵폐기물처분장을 대상으로 하는 경우 핵종이 누출되면 핵종이동이 보다 빨라진다는 것을 의미한다. Fig. 12에서 시간에 따른 온도분포는 일반적인 방사형 열전달의 양상을 나타낸다.

4.4 물성이 변화하는 경우의 해석결과

물성변화가 상호작용의 결과에 미치는 영향에서 가장 중요한 것은 탄성계수의 변화이다. 온도가 200°C까지 증가할 때 탄성계수의 변화양상은 암석에 따라서 각기 다르지만 약 10~30%정도인 것으로 알려져 있다.⁶⁾ Fig. 6에서 보듯이 공동주위의 온도증가에 따라 탄성계수가 감소하고 이는 열팽창을 증가시키는 효과를 가져온다. 이러한 열팽창은 응력변화에는 큰 영향을 미치지 않는데 이는 암반내에 존재하는 에너지 변화가 일정한 상황에서 탄성계수의 변화는 변형에만 영향을 미치기 때문이다. 따라서 열팽창증가는 역학적인 측면보다는 수리유동의 측면에서 더욱 중요하다. 열팽창의 증가는 변형률의 함수로 주어지는 투수계수의 증가를 일으키기 때문이다. Fig. 9,10에서 물성변화시 수리전도도는 변형의 증가에 비해 미세한 증가를 보이는데 이는 수리전도도에 점성도의 변화가 더욱 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 이상의 결과는 지하수와 암석내 광물과의 지화학적인 작용을 고려하지 않은 것으로 고온의 물이 암반을 통과할 때 화학적 작용에 의해 유동경로가 좁아

져 투수계수가 급격히 감소하는 현상이 보고되고 있는 것⁷⁾을 감안할 때 장기간에 걸친 투수계수의 변화는 이런 결과와 일치하지는 않을 것이다.

5. 결 론

암석물성의 온도의존성을 고려했을 경우, 공동벽면의 온도증가로 인한 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 공동주위의 온도증가로 인해 주변암반은 반경방향으로 팽창을 일으키고 이에 따라 반경방향으로 인장 응력대가 발생하고 접선방향의 압축응력은 감소한다.
- 2) 열전달은 투수계수의 증가와 유체점성도의 감소를 일으켜 수리전도도를 매우 증가시킨다. 이에 따라 반경방향의 수리유동이 활발해지고 경계와 공동 사이의 수압분포는 시간이 지날수록 감소한다.
- 3) 암석의 물성이 온도에 따라 변할 경우 탄성계수의 변화가 주된 영향을 미치며 탄성계수의 감소에 따라 열팽창이 증가하고 투수계수 또한 증가한다.

참 고 문 헌

1. Lewis R.W., Schrefler B.A., 1987, The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, John Wiley & Sons.
2. Wai R.S.C., Lo K.Y., Rowe R.K., 1982, "Thermal Stress Analysis in Rocks with Nonlinear Properties", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 19, pp. 211-220.
3. Wei Lingli, 1992, "Numerical Studies of the Hydro-Mechanical Behaviour of Jointed Rocks", doctor thesis, Imperial College.
4. Aboutit B.L., Advani S.H. and Lee J.K., 1985 "Variational principles and finite element simulations for thermo-elastic consolidation", Int. J. Num. and Anal. meth. in geomech. vol. 9, pp. 49-69.
5. Borsetto M., Carradori G., and Ribacchi R., (1981), "Coupled Seepage, Heat Transfer, and Stress Analysis with Application to Geothermal Problems", Num. Meth. in Heat Transfer, pp. 233-259.
6. 신회순, 정소걸, 1991, "방사성 폐기물 저장을 위한 화성암의 열역학적 거동 특성", 터널과 지하공간 창간호, pp. 49-65.
7. R. Summers, K. Winkler & J. Byerlee, "Permeability Changes During the Flow of Water Through Westerly Granite at Temperatures of 100°C-400°C", J. Geoph. Res. Vol. 83, No. B1, pp. 339-344.