

# Biot의 압밀 이론에 근거한 연속체 암반의 열-수리-역학 상호작용의 수치적 연구

이희석<sup>1)</sup> · 양주호<sup>2)</sup>

## A Numerical Study on Thermo-hydro-mechanical Coupling in Continuum Rock Mass Based on the Biot's Consolidation Theory

Hee-Suk Lee and Ju-Ho Yang

**ABSTRACT** As large underground projects such as radioactive waste disposal, hot water and heat storage, and geothermal energy become influential, the study, which consider all aspects of thermics, hydraulics and mechanics would be needed. Thermo-Hydro-Mechanical coupling analysis is one of the most complex numerical technique because it should be implemented with the combined three governing equations to analyze the behavior of rock mass. In this study, finite element code, which is based on Biot's consolidation theory, was developed to analyze the thermo-hydro-mechanical coupling in continuum rock mass. To verify the implemented program, one-dimensional consolidation model under the isothermal and non-isothermal conditions was analyzed and was compared with the analytic solution. The parametric study on two-dimensional consolidation was also performed and the effects of several factors such as poisson's ratio and hydraulic anisotropy on rock mass behavior were investigated. In the future, this program would be revised to be used for analysis of general discontinuous media with incorporating discrete joint model.

**Key words** : Radioactive Waste Disposal, Thermo-Hydro-Mechanical Coupling, Continuum, Finite Element Method, Consolidation, Poisson's Ratio.

**초 록** 방사성 폐기물지하처분이나 열수 및 축열 에너지저장, 지열에너지 개발 등과 같은 대규모 지하공간 프로젝트들이 대두됨에 따라 역학, 수리 및 열적 거동을 동시에 고려한 연구가 필요하게 되었다. 열-수리-역학 상호작용 해석은 열로 교란되고 지하수로 포화된 암반내의 거동을 열, 수리, 역학 3가지 지배방정식의 결합을 통해 구현하는 상당히 복잡한 수치 해석 기법 중의 하나이다. 본 연구에서는 기존의 Biot의 압밀이론에 기초한 수식화들을 이용하여 연속체 암반의 열-수리-역학적 상호작용을 모사할 수 있는 유한요소 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 검증을 위해 등온과 비등온 조건하의 일차원 압밀모델에 대한 해석을 실시하여 해석해와 비교하였다. 이차원 압밀에 대한 변수해석을 통하여 포아송비나 수리적 이방성과 같은 인자들이 매체 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 앞으로 본 프로그램에 개별체 절리 모델을 통합시켜 보다 일반적인 불연속 암반의 상호작용 거동 해석에 이용할 수 있을 것이다.

**핵심어** : 방사성폐기물 처분, 열-수리-역학 상호작용, 연속체, 유한요소법, 압밀, 포아송비.

### 1. 서 론

지하암반을 대상으로 한 기존의 연구는 주로 역학적인 안정성 해석에 국한되어 왔지만 최근 방사성 폐기물지하 처분이나 열수 및 축열 에너지저장과 지열에너지 개발 등과 같이 지하공간 개발이 다양화, 대형화됨에 따라 수리적인 거동이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 방사성 폐기물 처분의 경우 근거리 및 원거리 규모에서

지하 공동의 안정성과 핵종 이동의 가능성에 대한 평가는 암반공학, 지질공학, 토목공학 및 수리지질학 등의 여러 학문분야의 결합된 지식을 바탕으로 이루어져야 한다. 이러한 안정성 해석은 극히 미량의 핵종이 지표에 도달

1) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후 연구연구원  
2) 군복무중  
접수일 : 2000년 7월 31일  
심사 완료일 : 2000년 8월 14일

한다 할지라도 인류에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 매우 신중하고 정밀하게 이루어져야 한다. 예상되는 폐기물 처분 대상 부지는 지하수로 포화된 결정질 암반 내에 위치한다. 이런 상황에서 핵폐기물처리장의 안정성을 평가하기 위해서는 무엇보다도 핵폐기물을 지하암반에 처분했을 때 발생하는 열-수리-역학 상호작용(Thermo-Hydro-Mechanical Coupling, THM)의 메카니즘을 이해하는 것이 필수적이다(Lanru Jing et al., 1993).

지하심부의 암반은 고준위 핵폐기물이 설치되기 전에는 역학적, 수리적, 열적으로 평형상태를 유지하고 있다. 여기에 고준위 핵폐기물을 처분하면 폐기물의 핵분열로 인한 장기간 발생하는 열로 인해 평형상태는 깨어지고 위의 각 영역은 서로 복잡한 상호작용을 주고받으면서 암반의 거동을 변화시킨다. 즉 핵폐기물처분시 발생하는 열은 역학적인 특성변화와 열응력을 발생시키고 수리적으로는 공극이나 절리간극의 변화를 가져오게 됨으로 수리 유동에도 영향을 미치게 된다. 반대로 이런 역학적, 수리적 변화는 다시 열적 변화를 가져오게 된다. 열응력으로 인해 야기되는 이러한 변화는 폐기물 처분장 주변 환경에 다양한 직, 간접적인 영향을 미칠 것이다. 따라서 열-수리-역학 상호작용을 정확한 이해에 기초했을 때 폐기물 처분장 주변의 역학, 수리적 암반 거동을 제대로 해석할 수 있으며, 또한 이에 따른 안정성 및 핵종 이동 가능성을 예측할 수 있다.

선진외국의 경우에는 이런 상호작용 문제를 다루기 위해 미국, 스웨덴, 캐나다, 일본 등 8개국 학자들이 모여 1992년부터 DECOVALEX라는 국제협력 연구 프로젝트를 수행해오고 있다(Lanru Jing et al., 1993). 이 국제협력 연구과제는 열-수리-역학 상호작용 모델링에 대한 이론적 검토 및 컴퓨터코드개발, 코드 검증을 위한 실험실 연구, 그리고 현장실험으로부터의 결과 검토 등을 통해 궁극적으로 심부암반 내의 안전한 폐기물 처분을 그 목표로 하고 있다. 현재 이 프로젝트는 제 III기가 진행 중이며 이들 연구로부터 나온 성과들은 실제 폐기물 처분장의 건설과 관련된 기술적 지원에 사용되고 있다.

외국에서는 열-수리-역학적 상호작용의 해석을 위해 Noorishad et al. (1984), Lewis & Scheffler (1987), Noorishad et al. (1992), Nguyen & Selvadurai(1995), Selvadurai & Nguyen(1995), Noorishad et al.(1996) 등의 대표적인 연구들을 통해 열-수리-탄성 해석 방법의 발전을 이루어왔다. 하지만 아직까지 기본 수식화의 수치적 구현에 머물고 있고 Tsang et al.(2000)이 지적하는

폐기물 처분장에서 관련되는 다양한 THM 과정에 대한 거동을 정확히 모사하는 데는 한계가 있는 것으로 보인다(Jing et al, 1995). 국내에서는 폐기물 처분장 주변의 암반 거동 예측과 관련되어 문현구와 주광수(1991), 장근무 외(1997), 이희석 외(1998), 권상기 외(1999), 김명환 외(1999) 등에 의한 연구가 진행되어 왔지만 대부분 아직까지 개념적인 연구 수준에 머무르고 있는데, 이는 이 분야가 국내에 소개된 지 얼마 되지 않은 측면 때문이기도 하지만 구체적인 처분 프로그램이 시작되지 못했기 때문이기도 하다.

본 연구에서는 앞으로 국내 방사성 폐기물 처분장 건립시 열-수리-역학 상호작용 거동을 예측할 수 있는 다목적 프로그램 개발을 목적으로 우선 Noorishad et al. (1996) 의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 기본 수식화에 근거하여 연속체에서의 완전 열-수리-역학적 상호작용을 모사할 수 있는 유한요소 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 검증을 위해 등온과 비등온 조건하의 일차원 압밀모델에 대한 해석을 실시하였으며, 이차원 압밀 모델에 대한 변수 해석을 통하여 포아송비나 수리적 이방성과 인자들이 암반 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 상호작용의 수식화

열-수리-탄성(Thermo-Hydro-Elasticity, THE) 현상에 대한 각 식들은 에너지, 질량, 운동량의 보존식을 써서 유도될 수 있다. 식 전개는 모든 변수가 대표 요소 체적 상에서 평균화되어 있다는 가정하에 이루어진다. 해석의 단순화를 위해 대상 매질은 등방성 선형탄성(구조와)을 나타내고 유체로 완전 포화되었다고 가정한다.

### 2.1 유체 거동의 수식화

#### 2.1.1 유체 지배 방정식

포화된 탄성 다공질 매체에서의 변위장(U)을 유체와 고체의 변위 벡터( $U_r, U_s$ ), 유체의 상대속도를 속도장 벡터로 표시하고 질량 보존의 원리를 적용한 다음, 입자를 따라서 Euler적인 시간도함수연산자를 적용하면 다음과 같은 연속방정식이 된다.

$$\frac{D\hat{\rho}_1}{D^s t} + \hat{\rho}_1 \nabla \cdot V_s + \nabla \cdot \hat{\rho}_1 V_r = 0 \quad (1)$$

여기서  $V_r, V_s$ 는 각각 상대 속도 벡터 및 고체 속도

벡터이다.  $\hat{\rho}_1 = \phi \rho_1$ 의 관계가 있으며,  $\rho_1$ 은 유체의 밀도,  $\phi$ 는 매체의 공극율이다.

같은 방법으로 고체 입자에 대한 Lagrange적인 연속 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{D\hat{\rho}_s}{D^s t} + \hat{\rho}_s \nabla \cdot V_s = 0 \tag{2}$$

여기서  $\hat{\rho}_s = (1-\phi)\rho_s$ 의 관계가 있으며,  $\rho_s$ 는 고체입자 밀도로서 상수이다.  $\hat{\rho}_s = (1-\phi)\rho_s$ 를 (2)식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{1-\phi} \frac{D\phi}{D^s t} = \nabla \cdot V_s \tag{3}$$

여기서 오른쪽 항은 체적 변형률로 표시될 수 있다.

$$\nabla \cdot V_s = \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot U_s = \frac{\partial}{\partial t} (\delta_{ij} e_{ij}) = \frac{\partial e}{\partial t} \tag{4}$$

따라서 (3)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{D\phi}{D^s t} = (1-\phi) \frac{\partial e}{\partial t} \tag{5}$$

(4), (5)식을 (1)식에 대입하면 다음과 같이 유체에 대한 상대적인 질량보존방정식을 얻게 된다.

$$\phi \frac{D\rho_1}{D^s t} + \rho_1 \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot \hat{\rho}_1 V_r = 0 \tag{6}$$

일반적인 가정하에서 다공질매체 내의 유체유동에 대한 운동량 보존에 대한 식을 전개하면 직교좌표계에서의 일반화된 Darcy 방정식이 된다.

$$q = -\frac{k_1}{\eta_1} \cdot (\nabla P + \rho_1 g \nabla z) \tag{7}$$

여기서  $\eta_1$ 는 유체 점성도(dynamic viscosity),  $q = \phi V_r$ ,  $k_1$ 는 국부 투수계수 텐서  $\nabla z = \{0 \ 0 \ 1\}^T$ ,  $P$ 는 유체 압력이다.

(7)을 (6)식에 대입하면 다음의 식을 얻는다.

$$\phi \frac{D\rho_1}{D^s t} + \rho_1 \frac{\partial e}{\partial t} = \nabla \cdot \frac{\rho_1 k_1}{\eta_1} \cdot (\nabla P + \rho_1 g \nabla z) \tag{8}$$

(8)식을 더 전개하기 위해서는 유체밀도를 온도 및 압력에 연결시켜주는 상태방정식이 있어야 한다. 밀도변화가 작다고 가정할 때 유체밀도를 기준 밀도  $\rho_0$ 에 대해서

Taylor정리로 표시하면 필요한 식을 얻게 된다.

$$\rho_1 = \rho_0 + \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial T}\right)_0 (T - T_0) + \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial P}\right)_0 (P - P_0) \tag{9}$$

위 식의 계수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\beta_T = \frac{(\partial \rho_1 / \partial T)_0}{\rho_0}, \beta_P = \frac{(\partial \rho_1 / \partial P)_0}{\rho_0}$$

$\beta_T$ 는 유체에 대한 열체적팽창계수이고  $\beta_P$ 는 유체의 압축계수이다.  $\beta_T, \beta_P$ 을 (9)식에 대입하고 밀도에 대한 시간도함수연산자를 적용하면 다음을 구할 수 있다.

$$\frac{D\rho_1}{D^s t} = \rho_0 \beta_T \frac{DT}{D^s t} + \rho_0 \beta_P \frac{DP}{D^s t} \tag{10}$$

(8)식에 (10)식을 대입하고  $V_s \cdot \nabla P$ 와  $V_s \cdot \nabla T$ 항을 무시하면 다음과 같은 이동 유체에 대한 질량 및 운동량보존법칙이 조합된 최종식을 구할 수 있다.

$$\frac{\rho_1 \partial e}{\rho_0 \partial t} + \phi \beta_P \frac{\partial P}{\partial t} + \phi \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \frac{\rho_1 k_1}{\rho_0 \eta_1} \cdot (\nabla P + \rho_1 g \nabla z) \right] \tag{11}$$

### 2.1.2 유체 구성방정식

비등온인 경우에 이차미분항을 무시하면 (11)식을 Biot의 식 형태로 다시 쓸 수 있다. 등가유체 체적율을 나타내는 변수  $\xi$ 를 도입한 후, Biot의 커플링 매개변수  $\alpha$ 를 도입하여 고체입자의 압축율을 고려할 수 있도록  $\xi$ 를 일반화시키면 (11)식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left( \frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{e}{\rho_0} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \left[ \frac{\rho_1 k_1}{\rho_0 \eta_1} (\nabla P + \rho_1 g \nabla z) \right] \tag{12}$$

여기에서  $\xi = \frac{\rho_1}{\rho_0} \alpha \delta_{ij} e_{ij} + \frac{1}{M} P + \frac{1}{M} T$

$$M = 1/\phi \beta_P, (M_T = 1/\phi \beta_T) \tag{13}$$

(13)식은 열수리역학 상호작용에 대한 첫 번째 구성 방정식을 제공한다.

## 2.2 역학적 거동의 수식화

### 2.2.1 지배방정식

탄성학에서 역학운동을 하는 물체는 관성항(inertia term)이 없을 때 운동량보존법칙으로부터 다음과 같은 정적상태에서의 평형방정식(equilibrium equation)이 성립한다.

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho}_s f_i = 0 \quad (14)$$

$\bar{\rho}_s, f_i$ 는 각각 입자 평균 고체 밀도와 물체력 성분들이다.

### 2.2.2 구성방정식

탄성학에서의 역학적 구성방정식은 전체 응력성분  $\tau_{ij}$ 를 변형률 성분  $e_{ij}$ 와 유체압력 P, 그리고 열응력  $\tau_{Tij}$ 를 관련시키는 식이다. Biot(1941, 1956)은 열응력이 없는 상태로 그러한 식을 제공하였다. 온도의 증감은 다른 역학적 응력과 무관한 초기변형을 형태로 작용한다고 알려져 있다. 따라서 역학적 등방성에 대한 Biot(1941)의 응력-변형률 식은 다음과 같이 변형된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu(e_{ij} - e_{Tij}) + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl}(e_{kl} - e_{TKl}) - \alpha \delta_{ij} P \quad (15)$$

여기서  $e_{Tij}, e_{TKl}$ 은 열응력에 의한 변형률 텐서 성분들이다. 열팽창 텐서  $\beta_{ij}(=e_{Tij}/T)$ 를 가정하면 위 식은 다음과 같이 된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} e_{kl} - \tau_{Tij} - \alpha \delta_{ij} P \quad (16)$$

여기서  $e_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i}), \lambda, \mu$ 는 Lamé상수이며,

$$\tau_{Tij} = (2\mu \beta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} \beta_{kl}) T \quad (17)$$

열등방성조건하에서 (16)식은 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} e_{kl} - \gamma \delta_{ij} T - \alpha \delta_{ij} P \quad (18)$$

여기서  $\gamma = (2\mu + 3\lambda)\beta, \beta$ 는 등방 선형 고체의 열팽창 계수이다.

이 구성방정식의 종속변수들은 모두 증분형태로 간주되며 0의 응력 상태에서부터의 편차를 나타낸다. 또한 상기 식들을 전개하는데 있어서 유체와 고체간의 열접촉 평형을 가정하였다.

### 2.3 에너지 보존의 수식화

에너지 보존 방정식은 대표요소체적에 대해 에너지보존법칙을 사용하여 구하며 고체와 유체간의 열적 평형을 가정하여 다음과 같이 유도된다(Noorishad et al, 1984).

$$\begin{aligned} (\rho C)_M \frac{\partial T}{\partial t} + T \gamma \frac{\partial}{\partial t} (\delta_{ij} e_{ij}) + (1-\phi) \gamma T \frac{\partial e}{\partial t} \\ + \rho_1 C_{V1} q \cdot \nabla T = \nabla \cdot K_M \cdot \nabla T \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $(\rho C)_M$ 과  $K_M$ 은 각각 유체로 포화된 매질의 비열용량과 열전도도이며 다음과 같이 정의된다.

$$(\rho C)_M = \phi \rho_1 C_{V1} + (1-\phi) \rho_s C_{Vs}$$

$$K_M = \phi K_1 + (1-\phi) K_s$$

$C_{V1}$ 과  $C_{Vs}$ 는 일정부피상태에서의 유체와 고체의 비열상수이고  $K_1$ 과  $K_s$ 는 전체 유체열분산 텐서 및 고체열확산 텐서이다. 온도변화가 주변온도에 대해서 작다면 (19)식을 단순화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} (\rho C)_M \frac{\partial T}{\partial t} + T_0 \gamma \frac{\partial}{\partial t} (\delta_{ij} e_{ij}) + \rho_1 C_{V1} \frac{k_1}{\eta_1} (\nabla P + \rho_1 g \nabla z) \\ \nabla T = \nabla \cdot K_M \cdot \nabla T \end{aligned} \quad (20)$$

$T_0$ 는 응력이 없는 상태에서의 절대온도를 나타낸다. 정적 평형, 유체 유동, 열유동을 지배하는 기본 법칙들이 (11), (14), (20)의 지배방정식들과 (13), (18)의 구성방정식 및 (9)의 상태방정식들을 통해 고체변위, 유체압력, 거시적 매질의 온도와 상호 연결되었으므로, 이 식들은 완전 열수리역학 상호작용(fully coupled THM)을 기술한다. 위의 지배방정식들은 초기 및 경계조건과 함께 혼합 초기 및 경계치 문제로서 정의된다.

### 2.4 경계조건 및 초기조건

포화된 다공질 탄성체에 대한 일반적인 경계 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U(x, t) &= U(x, t) \text{ on } A_1 \times [0, \infty) \\ \tau(x, t) \cdot n(x) &= G(x, t) \text{ on } A_2 \times [0, \infty) \\ P(x, t) &= P(x, t) \text{ on } B_1 \times [0, \infty) \\ (k_1/h_1) \cdot (\nabla P + \rho_1 g \nabla z) \cdot n(x) &= Q_1(x, t) \text{ on } B_2 \times [0, \infty) \\ T(x, t) &= T(x, t) \text{ on } C_1 \times [0, \infty) \\ KM \cdot \nabla T \cdot n(x) &= Q_h(x, t) \text{ on } C_2 \times [0, \infty) \\ U(x, 0) &= 0 \text{ on } V \\ \tau(x, 0) &= 0 \text{ on } V \\ P(x, 0) &= 0 \text{ on } V \\ T(x, 0) &= 0 \text{ on } V \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 A, B, C는 각각 응력-변위, 압력-유체유동, 온도-열유동에 대한 경계부분을 나타낸다. V는 고려하고자 하는 부피를 나타낸다. 변위, 압력 및 온도에 대한 각각의 종속변수 U, P, T는 위와 같은 초기조건 선택에 의해 가 정된 변형률이 없는 상태와의 증분 차이를 나타낸다.

### 3. 유한요소이산화

본 연구에서는 Galerkin 유한요소법을 이용하여 연속 체요소로서 8절점 등매개 변수요소를 이용하였다. 이는 형상함수(shape function)  $\Phi^T$ 를 사용하여 각각의 U, P, T에 대해 보간될 수 있다(Cook et al., 1989).

#### 3.1 공간에 대한 이산화

앞 절에서 정식화된 세 가지의 최종적인 지배방정식들을 각각 Galerkin 유한요소 해법을 이용하여 행렬방정식으로 구성하면 다음과 같다.

$$KU + C_{UP} + C_{UT}T = F \tag{22a}$$

$$C_{PU}U + (E_f + 1 \cdot H_f)P + C_{PT}T = 1 \cdot Q_f \tag{22b}$$

$$C_{TU}U + [E_h + 1 \cdot (H_{hf} + H_h)]T = 1 \cdot Q_h \tag{22c}$$

여기에서 1\*는 시간 적분을 나타낸다. 위의 각 행렬에 대한 변수 기호 및 계수 항은 부록 및 양주호(1999)를 참조하라.

#### 3.2 시간에 대한 이산화

위의 행렬식들은 시간에 대한 증분형태로 나타내어 야하므로 시간적분상수  $\xi$ 를 도입하여 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식을 구할 수 있다(양주호, 1999).

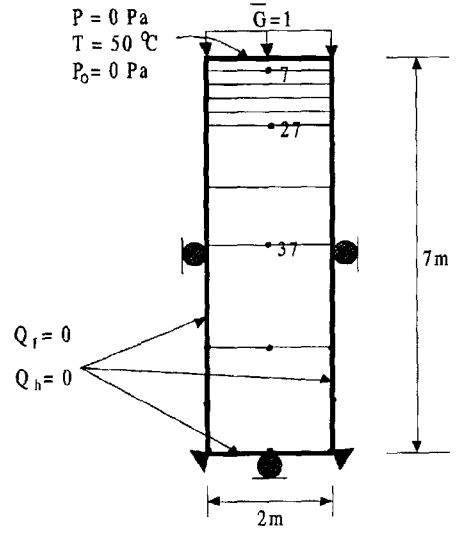
$$\begin{bmatrix} K & C_{UP} & C_{UT} \\ C_{PU} & E_f + \xi \Delta t H_f & C_{PT} \\ C_{TU} & 0 & E_h + \xi \Delta t (H_{hf} + H_h) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U^i \\ \Delta P^i \\ \Delta T^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F^i \\ \Delta t Q_f - \Delta t H_f P^{i-1} \\ \Delta t Q_h - \Delta t (H_{hf} + H_h) T^{i-1} \end{pmatrix} \tag{23}$$

여기에서  $i$ 는 시간단계 계수를 나타낸다. 일반적으로 선형 열수리탄성에 대한 시간 진행 해법(time marching solution)은 비록 초기 해에서 임의 초기 시간 단계의 선택 때문에 감쇄 진동 거동을 보이지만,  $\xi \geq 0.5$ 에 대해서는 안정하다고 알려져 있다.(Lewis & Schlegler, 1987). 위 식을 Newton-Raphson 비선형 반복 해법을 이용하여 주어진 모델에 대하여 해를 구하였다.

### 4. 모델 해석 결과

#### 4.1 일차원 압밀 및 열탄성압밀 모델

프로그램의 검증을 위해 먼저 일차원 압밀모델을 해석 하여 해석해와 비교하였다. 모델은 Fig. 1과 같이 9개의 요소로 이루어져 있고, 지표면에는 1 MPa의 단위하중 ( $\bar{G}$ )이 가해졌으며, 이 하중은 순간적으로 가해지는 것으로 가정하였다. 그리고 지하수가 지표면으로 빠져나가는 것을 모사하기 위해 수압의 경계조건을 지표면에서 0으로 구속하였다. 고체와 유체의 압축성은 없다고 가정하였



7, 27, 37 : observed node number

- $\bar{G}$  : traction(MPa)
- P : pressure(MPa)
- T : temperature(°C)
- $Q_f$  : water flow
- $Q_h$  : heat flux

Fig. 1. One-Dimensional Consolidation.

Table 1. Input parameters for the one-dimensional consolidation model.

| (a) Solid                          |                                  |   |                                    |
|------------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------------|
| E                                  | $\rho_s$                         | $\beta$   | $\phi$                             |
| 6000 MPa                           | $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ | $3.0 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$               | 0.2                                |
| k                                  | $\alpha$                         | $K_s$   | $C_{vs}$                           |
| $4.73 \times 10^{18} \text{ m}$    | 1.0                              | $0.20 \text{ J/(m} \cdot \text{sec}^\circ\text{C)}$ | $837.2 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ |
| (b) Fluid                          |                                  |   |                                    |
| $\rho_w$                           | $\eta(20^\circ\text{C})$         | $C_{v1}$  |                                    |
| $997 \text{ kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$ | $\text{N} \cdot \text{sec/m}^2$  | $4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$                   |                                    |

다. 시간적분상수는 Lewis & Schlefler(1987)에 의해 안정한 기준으로 제안된 값인 0.875를 이용하였다. Table 1은 해석에 사용된 고체 및 유체의 입력자료표를 보여준다.

동일한 조건의 모델에 대해 Aboustit(1985)가 해석한 모델과 동일한 일차원 열탄성 압밀 모델(one-dimensional thermo-elastic consolidation model)을 해석하였다. 다른 모든 물성은 Table 1과 동일하고, 표면의 온도를 50°C로 구속시켜서 온도 변화가 표면으로부터 전파하도록 하였다.

Fig. 2는 시간에 따른 최종 침하량을 나타낸 것으로서, 일차원 압밀 모델 및 열탄성 압밀 모델에서의 해석 결과를 보여주고 있다. 일차원 압밀 해석해와 비교했을 때 모델 해석 결과와 해석해가 정확하게 일치하고 있다. 또한 직접적인 비교는 힘들지만 열탄성 압밀 모델의 경우 (B) Lewis et al.(1987), Noorishad et al.(1996)의 결과와 잘 일치하였다. 즉 상부표면에 50°C의 구속온도를

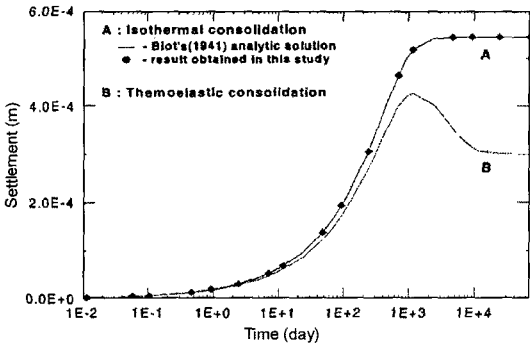


Fig. 2. Consolidated history for the one-dimensional finite-element model.

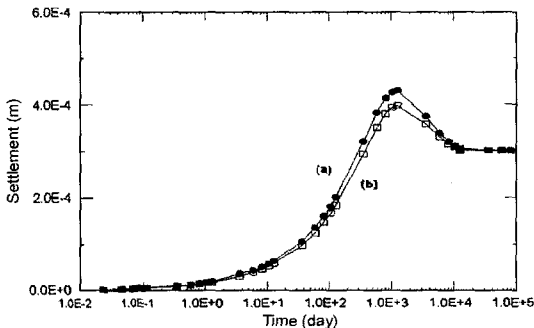


Fig. 3. Surface settlements versus time : (a) thermal expansion coefficient of the fluid  $\beta_T = 0$  ; (b)  $\beta_T = 0.63 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

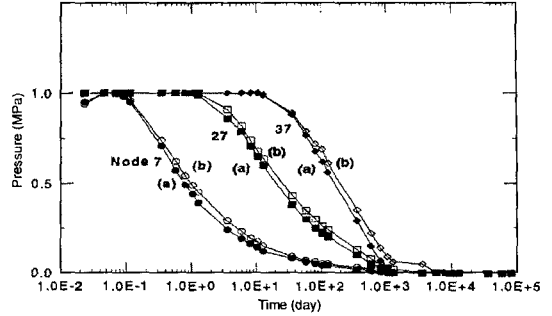


Fig. 4. Pore pressures versus time at three different nodes obtained with (a)  $\beta_T = 0$  ; (b)  $\beta_T = 0.63 \times 10^{-5}$ .

주었을 경우에는 1000일 정도 지났을 때부터 서서히 침하량이 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 압밀에 의해 배수조건이 0으로 구속된 최상부 표면으로 물이 어느 정도 빠져나감으로 인해 발생하는 침하량보다 오히려 온도전파에 의한 팽창효과가 더 지배적이 되므로 침하량이 감소하는 것으로 생각된다. 또한 이러한 경향은 10000일 정도 이후에서부터는 평형상태에 도달함에 따라 거의 일정해지는 경향을 보였다.

Fig. 3은 유체의 열팽창이 존재하는 경우, 즉 유한요소 이산화에서  $C_{PT}$ 항이 0이 아닌 경우의 침하량을 유체의 열팽창이 0인 경우와 비교한 것이다. 즉, 유체 열팽창 효과가 부가되는 경우 이 열팽창의 효과로 인해 압밀 과정에서의 침하량이 약간 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 최종 침하량은 동일한 값을 보였는데, 이를 통해 유체의 열팽창 효과는 평형이 수립되기 전까지만 지배적임을 의미한다. 따라서 시간을 고려하지 않는 정적 해석에서는 유체의 열팽창 효과는 큰 영향을 주지 않는다고 생각할 수 있다. Fig. 4는 동일한 모델 수행 결과 중 Fig. 1에 표시한 서로 다른 세 절점들에서의 시간에 따른 공극수압의 변화를 보여주고 있다. 동일한 시간에서 볼 때 지표면에 가까운 절점일수록 공극수압의 소산이 가장 빨리 일어남을 볼 수 있으며, 이는 일반적인 압밀 과정의 경향과 일치한다. 또한 마찬가지로 평형상태에 도달하기 전까지 모든 절점에서 유체 열팽창계수의 영향으로 인한 팽창압력이 발생하여, 유체의 열팽창을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 약간 공극수압이 증가함을 볼 수 있다.

#### 4.2 등온 이차원 압밀 모델

이차원 압밀 조건에서의 모델의 반응을 살펴보기 위한

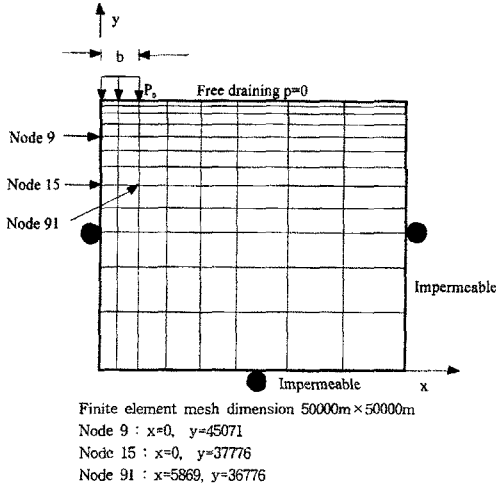


Fig. 5. Finite element mesh for consolidation of a half-space under plane strain.

Table 2. Input parameters for the two-dimensional consolidation model.

| a                                       | E                                      | P <sub>0</sub> | μ        |
|---|--|----------------|----------|
| 5869 m                                  | 35.0 GPa                               | 30 MPa         | 0.0      |
| ρ <sub>s</sub>                          | k                                      | α(Biot계수)      | M        |
| 2.2 × 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> | 6.1 × 10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> | 1.0            | 97.5 GPa |

변수해석을 위해 Fig. 5와 같은 격자망을 구성하였다. 이 모델은 지표면에 국부적으로 상당히 큰 하중이 작용하는 대규모 지반의 압밀 거동을 모사하고 있다. 해석 모델은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 50000m × 50000m로 구성하였으며, 해석은 평면변형을 조건으로 실시하였다.

모델 최상부 중심을 따라 하중 P<sub>0</sub>가 작용한다고 가정하고 모델을 대칭면으로 반쪽만 해석하였다. 즉, 상부 왼쪽 b 구간에 걸쳐 일정한 대상 하중(strip load)이 작용하며, 이 하중에 의해 물이 빠져나가는 것을 모사하였다. 최상부면은 0의 수압 조건을 사용하여 자유 배수조건을 모사하였으며, 나머지 3 면들은 불투수층으로 모사하였다. Table 2는 해석에 사용된 입력자료를 나타낸다. Biot의 압밀 계수 α는 1.0으로 가정하였으며, 나머지 자료들은 일반적인 포화된 무결 화강암질 암반의 전형적인 값들을 대상으로 하여 작성한 것이다. 해법에서의 시간적 분상수 ξ는 0.875로 하였다.

Fig. 6은 시간에 따른 공극수압대 초기공극수압 변화의 비율을 보여주고 있다. 여기에서 시간은 다음과 같은 무차원 시간 T를 도입하여 비교하였다(Selvadurai &

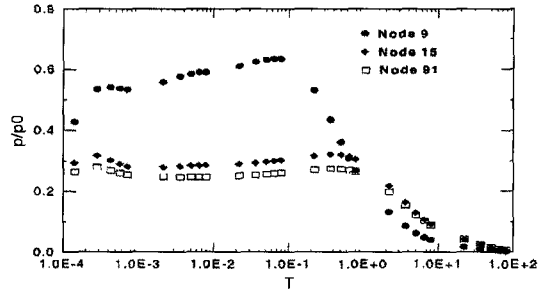


Fig. 6. Pore pressure evolution in two-dimensional consolidation.

Nguyen, 1993).

$$T = \frac{\bar{c}t}{b^2}, \text{ 여기서 } \bar{c} = \frac{2kG}{\rho_f g} \quad (24)$$

여기서, G는 전단계수, η는 유체 점성도, 그리고 k는 투수계수이다.

모델 격자망에 표시한 각 세 개의 계측 절점에 대하여 조사한 결과 시간에 따라 모든 절점에서 초기 공극수압이 약간씩 증가하다가 소산하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 대상 하중이 작용하는 부분의 바로 아래부분(절점 9)에서 특히 두드러졌으며, 이를 이차원 압밀에서의 Mandel-Cryer효과(갑작스러운 하중의 증가에 의해 공극압이 증가하고 배수에 의해 서서히 감소하는 현상)라고 한다(Nguyen and Selvadurai, 1995). 이러한 효과는 대상 하중의 크기가 증가함에 따라 더욱 뚜렷해졌다. 또한 일차원 압밀의 경우 지표에 가까운 부분부터 공극수압이 소산되었지만, 이차원 압밀은 대상 하중의 영향으로 인해 공극수압의 소산이 지연되는 것을 확인할 수 있다.

포아송비가 모델에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 (24) 식에서 무차원시간 T계수를 포아송비에 상관없도록 재정의하였다. Fig. 7은 서로 다른 포아송비에 대하여 무

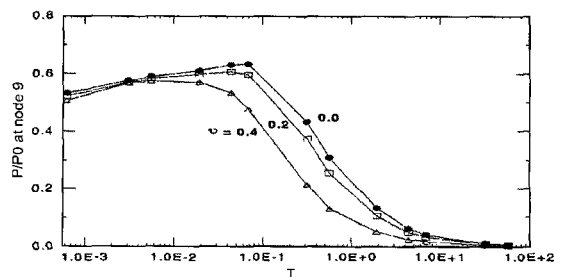


Fig. 7. Effect of Poisson's ratio-pore pressure.

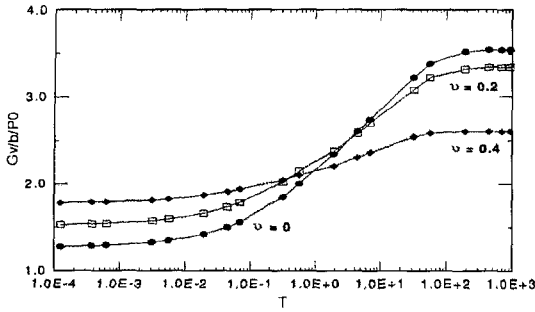


Fig. 8. Effect of Poisson's ratio-vertical settlement.

차원 시간에 대한 절점 9번에서의 초기공극수압비를 나타낸 것이다. 해석 결과 포아송비가 커짐에 따라 공극수압의 증가량이 작아짐을 알 수 있었는데, 이는 포아송비 증가에 따라 수평방향의 변위성분이 보다 변형이 많이 발생하고 그만큼 수평방향으로 응력이 개방되기 때문에 공극수압은 더 작게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 낮은 포아송비의 경우에 Mandel-Cryer 효과가 더욱 뚜렷하게 관찰되었는데, 이는 공극수압의 크기가 더욱 커지는 것과 관련되는 것으로 보인다.

Fig. 8은 하중이 가해지는 중앙부에서의 정규화된 표면 침하량  $Gv/b/P_0$ (여기에서  $v$ 는 실제침하량)를 보여주고 있다. 즉, 포아송비가 증가할수록 총 침하량은 작게 나타났으며, 초기 침하량과 총 침하량의 차이가 크지 않았다. 이는 수평방향의 변위성분을 허용하기 때문에 최종적으로 침하가 작게 일어나며, 이에 비해 반응 초기에는 하중이 가해지는 부분의 응력집중으로 인해 상대적으로 일시적인 침하가 많이 일어나는 것으로 보인다.

또한 수평과 수직 투수계수가 다른 이방성 암반의 경우에 대하여 해석을 실시하였다. Fig. 9는 절점 9와 동일한 깊이의 수평방향으로의 공극수압의 상태를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 수평 투수계수가 수직 투수계수보다 큰 경우 수평배수가 더욱 잘 일어나므로, 하

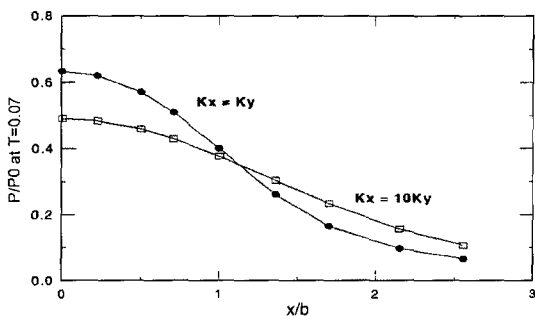


Fig. 9. Effect of permeability anisotropy-pore pressure.

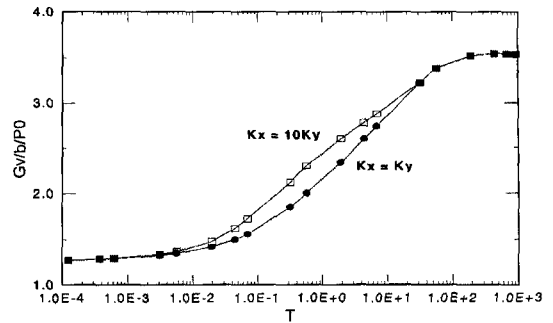


Fig. 10. Effects of permeability-settlement.

중이 가해진 부분 아래에서의 공극수압은 더욱 빨리 소산되는 것을 알 수 있다. 이에 비해, 하중이 가해진 부분에서 멀어질수록 공극수압 소산 경향이 작아지며,  $x/b$ 가 1 이상부터는 공극수압의 크기가 역전됨을 알 수 있다. 즉, 수리적 이방성이 존재하는 암반에서는 재하부에서 멀어질수록 등방성 암반에 비해 하중에 의한 공극수압의 영향을 덜 받는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 투수계수가 다른 경우 Fig. 8과 동일한 지점에서 무차원시간에 대한 침하량을 나타낸다. 수평방향의 투수계수가 수직방향의 투수계수 보다 큰 경우 수평방향으로 더욱 빨리 수리적인 유동이 발생하여 물이 배수되기 때문에 침하과정에서의 침하량이 더욱 크게 발생하였다. 하지만 평형상태에 도달하면 마찬가지로 최종적인 침하량은 동일한 값으로 수렴되었다. 이를 통해 암반의 투수계수 특성이 다른 경우 침하과정에서의 침하량에 더욱 크게 영향을 줄을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 연속체 암반에서 열-수리-역학적 상호작용을 기술하는 기본 지배방정식을 유도하여 Galerkin 유한요소법으로 구현한 유한요소 프로그램을 개발하였다. 작성된 프로그램의 검증을 위해 일차원 압밀 및 열탄성 압밀 모델을 수행하여 해석해 및 기존 연구 결과와 비교한 결과, 잘 일치함을 확인하였다. 이차원 압밀 모델에서는 Mandel-Cryer 효과가 뚜렷하게 발생하였으며 이는 지표면에 작용하는 하중의 크기에 의해 영향을 받았다. 이를 통해 일반적으로 알려진 이차원 압밀 거동과 정성적으로 일치하는 모델거동을 보였다. 이들 해석 결과를 통해, 본 코드의 타당성을 검증하였다. 또한 포아송비와 수리적 이방성과 같은 인자들이 압밀 거동에 미치는 영



향을 조사하였으며, 이들 인자들이 공극수압과 침하량 모두에 상당한 영향을 줌을 확인하였다.

본 연구는 원래 일반적인 불연속체 암반의 열-수리-역학적 상호작용 해석 거동을 해석하기 위한 시작 단계로 수행되었으며, 아직까지 불연속 암반에 바로 적용하기에는 무리가 있다.

하지만, 심부 폐기물 처분장 주변과 같이 불연속면이 거의 존재하지 않는 것으로 간주할 수 있는 연속체 암반의 기본적인 상호작용 거동 해석에 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 코드에 절리와 같은 개별체 요소를 고려하기 위한 연구가 현재 진행 중이며, 이를 통해 보다 일반적인 불연속 암반에서의 상호작용 거동 해석이 가능해질 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. 권상기, 장근무, 강철형, 1999, 심지층 고준위 방사성 폐기물 처분장의 개념 설계를 위한 구조 적 안정성 해석, 터널과지하공간(한국암반공학회지), 9.2, 102-113.
2. 김명환, 이희석, 이희근, 1999, 불연속암반에서의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 9.1, 1-11.
3. 양주호, 1999, 포화된 다공질 암반내 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석적 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
4. 이희석, 김명환, 이희근, 1998, 암반내 축열시스템의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 8.1, 17-25.
5. 장근무, 1997, KBS-3 개념에 따른 포화된 암반내 사용후 핵연료 처분을 위한 열, 수리, 역학적 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 7.1, 39-50.
6. Aboustit B. L., Advani S.H. and Lee J. K., 1985, Variational principles and Finite element solutions for thermo-elastic consolidation, Int. J. Num. and Anal. meth. in geomech. Vol. 9, 46-69.
7. Biot, M.A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys. 12, 155-165.
8. Biot, M.A., 1956, General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material, J. Appl. Mech., 23, 91-96.
9. Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., 1989, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons.
10. Lanru Jing, Rutqvist J., Stephansson O., C-F. Tsang and Kautsky F., 1993, DECOVALEX-Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories, Report of Phase I, SKI Technical report 93:21.
11. Lanru Jing, Tsang C-F., Stephansson O., 1995, DECOVALEX- an international co-operative research project on mathematical models of coupled THM

process for safety analysis of radioactive waste repositories, Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., 32.5, 389-398.

12. Lewis, R.W., Schrefler, B.A., 1987, The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, John Wiley & Sons.
13. Nguyen T. S., Selvadurai A. P. S., 1995, Coupled thermal-mechanical-hydrological behavior of sparsely fractured rock: Implications for nuclear fuel waste disposal, Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., 32.5, 465-479.
14. Noorishad, J. and Tsang C-F., 1996, Coupled thermoelasticity phenomena in variably saturated fractured porous rocks - formulation and numerical solution, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process of Fractured Media, Elsevier, p. 93-134.
15. Noorishad, J., Tsang, C-F. and Witherspoon, P.A., Theoretical and field studies of coupled hydromechanical behavior of fractured rocks-1. Development and verification of a number simulator, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 29, 401-409.
16. Noorishad, J., Tsang, C.F., and Witherspoon, P.A., 1984, Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: numerical approach", J. Geophys. Res. 89, 10365-10373.
17. Selvadurai A. P. S., Nguyen T. S., 1993, Finite Element Modelling of Consolidation of Fracture Porous Media, Proc. 46th Canadian Geotechnical conference. 361-370.
18. Selvadurai A. P. S., Nguyen T. S., 1995, Computational modelling of isothermal consolidation of fractured porous media, Computers and Geotechnics 17, 39-73.
19. Tsang C-F., Stephansson O., Hudson J. A., 2000, A discussion of Thermo-Hydro-Mechanical processes associated with nuclear waste repositories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37, 397-402.

### 부 록 1. 변수 기호

|          |                   |
|----------|-------------------|
| $C_{PT}$ | 압력 - 온도 상호작용 행렬   |
| $C_{UP}$ | 변위 - 압력 상호작용 행렬   |
| $C_{UT}$ | 변위 - 온도 상호작용 행렬   |
| $C_{vt}$ | 일정 체적에서 유체의 비열 용량 |
| $C_{vs}$ | 일정 체적에서 고체의 비열 용량 |
| $e_{ij}$ | 고체의 변형률 텐서 성분     |
| $E$      | 탄성계수              |
| $E_r$    | 유체 저류계수 행렬        |
| $E_h$    | 열 용량 행렬           |
| $f_i$    | 물체력 벡터의 성분들       |
| $F$      | 힘 벡터              |
| $g$      | 중력 가속도            |

|                      |                                       |
|----------------------|---------------------------------------|
| $H_f$                | 유체 전도도 행렬                             |
| $H_h$                | 열전도도 행렬                               |
| $H_{hf}$             | 물질 전달 전도도 행렬                          |
| $k_r$                | 고유 투수계수 텐서                            |
| $K$                  | 강성 행렬                                 |
| $K_1$                | 유체 열전도도 텐서                            |
| $K_M$                | 고체-유체 혼합물 열전도도 텐서                     |
| $K_s$                | 고체 열전도도 텐서                            |
| $M$                  | Biot의 상수, $1/\phi\beta_p$             |
| $M_T$                | Biot의 상수, $1/\phi\beta_T$             |
| $P$                  | 압력                                    |
| $\mathbf{P}$         | 압력 벡터                                 |
| $q$                  | 유체 유동 벡터                              |
| $Q_h$                | 열 유동 벡터                               |
| $Q_f$                | 유체 유동 벡터                              |
| $Q_f$                | 수직 유체 내부유동                            |
| $T$                  | 온도                                    |
| $T_0$                | 응력 변형을 개방 상태에서의 절대 온도                 |
| $\mathbf{T}$         | 온도 벡터                                 |
| $U$                  | 고체 요소 변위 벡터                           |
| $\alpha$             | Biot의 수리탄성 상호작용 계수                    |
| $\beta$              | 고체 선형 열팽창 계수                          |
| $\beta_p$            | 유체 압축률                                |
| $\beta_T$            | 유체 열 팽창 계수                            |
| $\gamma$             | 열탄성 상호작용 계수, $(2\mu + 3\lambda)\beta$ |
| $\delta_{ij}$        | 크로네킨 델타                               |
| $\Delta$             | 1차 차분 연산자                             |
| $\eta_1$             | 유체 점성도                                |
| $\lambda$            | Lame의 탄성 상수                           |
| $\mu$                | Lame의 탄성 상수                           |
| $\nu$                | 포아송비, $\lambda/2(\lambda+\mu)$        |
| $\xi$                | 유체 체적 변형률                             |
| $\rho_1, \rho_1$     | 유체 질량 밀도와 평균 유체 질량 밀도                 |
| $\rho_s, \rho_s$     | 다공질 공간의 고체 질량 밀도와 평균 고체 질량 밀도         |
| $\rho_M$             | 고체-유체 혼합물 질량 밀도                       |
| $(\rho C)_M$         | 고체 유체 혼합물 열용량                         |
| $\tau, \tau_{ij}$    | 응력 텐서와 그 성분(압축이 -)                    |
| $\tau_p, \tau_{pij}$ | 열응력 텐서와 성분                            |
| $\phi$               | 공극률                                   |
| $0$                  | 초기 조건을 나타냄                            |
| $*$                  | 시간 콘벌루션 표시                            |

부 록 2. 상호작용 행렬 요소 계수 항

$$K = \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} B_S^{nT} E^n B_S^n dv^n \tag{a1}$$

$$C_{UP} = C_{PU}^T = - \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} B_S^{nT} \alpha \frac{\rho^n}{\rho_0} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} N_S^n dv^n \tag{a2}$$

$$C_{UT} = - \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} B_S^{nT} \gamma \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} N_S^n dv^n \tag{a3}$$

$$C_{TU} = - \frac{1}{T_0} C_{PU}^T \tag{a4}$$

$$E_f = \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} N_S^{nT} \frac{1}{M^n} N_S^n dv^n \tag{a5}$$

$$H_f = \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} A_S^{nT} \frac{k_s^n}{\eta_1} A_S^n dv^n \tag{a6}$$

$$C_{PT} = - \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} N_S^{nT} \frac{1}{M_T^n} N_S^n dv^n \tag{a7}$$

$$E_h = \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} N_S^{nT} (\rho C)_M^n N_S^n dv^n \tag{a8}$$

$$H_{hf} = \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} N_S^{nT} (\rho_{01} C_{v1})^n q A_S^n dv^n \tag{a9}$$

$$H_h = \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} A_S^{nT} K_M^n A_S^n dv^n \tag{a10}$$

$$Q_f = \sum_{n=1}^{n_1} \int_{B_2^n} N_S^{nT} N_S^n \bar{Q}_f^n ds^n + \sum_{n=1}^{N^s} \int_{V^n} A_S^{nT} \frac{k_s^n}{\eta_1} \rho_1 g \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} dv^n \tag{a11}$$

$$Q_h = \sum_{n=1}^{n_2} \int_{C_2^n} N_S^{nT} N_S^n \bar{Q}_h^n ds^n \tag{a12}$$

$$F = \sum_{n=1}^{n_3} \int_{A_2^n} N_S^{nT} N_S^n \bar{G} ds^n - \sum_{n=1}^N \int_{V^n} N_S^{nT} \rho_s^n g \bar{I}_y dv^n \tag{a13}$$

---

**이 희 석**



1993년 서울대학교 공과대학 자원공  
학과, 공학사  
1995년 서울대학교 대학원 자원공학  
과, 공학석사  
1999년 서울대학교 대학원 자원공학  
과, 공학박사

Tel : 02-880-7234

E-mail : ichsuk@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후  
연수연구원

---

---

**양 주 호**



1997년 서울대학교 공과대학 자원공  
학과, 공학사  
1999년 서울대학교 대학원 자원공학  
과, 공학석사

E-mail : volvo@rockeng.snu.ac.kr

현재 군복무중

---