

非線形 有限要素-境界要素 組合에 의한 核廢棄構造體의 無限領域解析

Coupled Nonlinear Finite Element - Boundary Element Analysis of Nuclear Waste Storage Structures Considering Infinite Boundaries

金 文 謙*
Kim, Moon-Kyum
許 澤 寧**
Huh, Taik-Nyung
吳 舜 澤***
Oh, Soon-Taek

요 약

최근 原子力의 사용이 증가함에 따라 核廢棄物을 효과적으로 처리하는 문제에 관심이 집중되고 있다. 이러한 核廢棄物을 지층내에 저장할 경우 고온의 열에 의해 核廢棄 構造體에 지대한 영향을 미치므로 지반의 熱力學的 기동을 분석할 필요성이 요구된다.

본 연구는 지반내에 처분된 고온의 使用後 核燃料에 의한 熱力學的인 應力이 集中되어 非線形 舉動이 예상되는 貯藏構造體 주변에는 非線形 有限要素를 적용하고, 線形 舉動이 예상되는 無限領域에는 線形境界要素를 사용하여, 일반적인 力學的 系와 동일한 방법으로 非線形 有限要素와 境界要素를 組合한 프로그램을 개발하였다.

使用後 核燃料 廢棄構造體와 같이 局部的인 非線形 舉動이 예상되는 구조물에서는 조합방법이 전 영역을 非線形 有限要素로 모형화하여 해석하는 것보다 효율적임을 알 수 있었다. 또한, 지층내 지반에 영향 미치는 주요 지반계수를 변화시킨 경우, 터널경계의 변위에 이러한 계수들이 어떠한 영향을 미치는가를 개발된 방법을 사용하여 검토하였다. 검토 결과, 다른 계수들의 변화보다 熱膨脹係數의 변화가 터널주위의 변위에 상당한 영향을 미침을 알 수 있었다.

Abstract

As the construction of nuclear power plants are increased, nuclear wastes disposal has been faced as a serious problem. If nuclear wastes are to be buried in the underground stratum, thermo-mechanical

* 正會員, 延世大學校 土木工學科 副教授
** 正會員, 延世大學校 産業技術研究所 先任研究員
*** 서울産業大學校 建設構造工學科, 專任講師

이 논문에 대한 토론을 1994년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1994년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

behavior of stratum must be analyzed, because high temperature distribution has a significant effect on tunnel and surrounding stratum.

In this study, in order to analyze the structural behavior of the underground which is subject to concentrated heat sources, a coupling method of nonlinear finite elements and linear boundary elements is proposed. The nonlinear finite elements (NFE) are applied in the vicinity of nuclear depository where thermo-mechanical stress is concentrated. The boundary elements are also used in finite domain where linear behavior is expected. Using the similar method as for the problem in mechanical field, the coupled nonlinear finite element-boundary element (NFEBE) is developed.

It is found that NFEBE method is more efficient than NFE which considers nonlinearity in the whole domain for the nuclear wastes depository that is expected to exhibit local nonlinearity behavior. The effect of coefficients of the rock mass such as Poisson's ratio, elastic modulus, thermal diffusivity and thermal expansion coefficient is investigated through the developed method. As a result, it is revealed that the displacements around tunnel are largely dependent on the thermal expansion coefficients.

.....

1. 序 論

國內에 核發電所가 가동된지 10년이 지나 使用後 核燃料의 廢棄에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 核廢棄物을 처리하는 최상의 방법은 오랜 기간 동안 自然生態系로부터 격리시켜 核廢棄物이 스스로 안정을 되찾을 때까지 기다리는 것이다. 특히 高準位로서 使用後 核燃料를 격리 처분하는 방법은 여러가지가 있을 수 있으나 지금까지 연구결과에 의하면 地層 內에 저장하는 것이 가장 안전하다고 알려져 있다.^[1]

使用後 核燃料를 永久處分하는 기본적인 방법은 廢棄物貯藏板(waste emplacement panel)을 出入터널(access tunnel)의 周邊에 설치하는 것이다.^[2] 貯藏板은 처리된 核燃料筒(canister)을 배치한 것으로 이것이 熱源이 된다. 이 열원은 自體의 에너지를 周邊에 擴散시키게 되므로 貯藏構造體와 地盤에 심한 熱應力을 일으키게 되고, 構造系는 力學的 系와 熱力學系의 合成에 의하여 지배되게 된다. 따라서 出入터널 구조체와 지반의 안정성을 검토하여 설계하기 위해서는 溫度分布 및 熱應力을 해석하는 것이 필수적이다.

엄밀한 의미에서 應力 또는 變形率과 溫度分布는 서로 相互作用을 하나, 실제 문제에서 應力 또는 變形率이 溫度分布에 미치는 영향을 무시할 수

있는 만큼 미소하다.^[3] 따라서, 核廢棄 構造體와 같은 熱應力 문제는 주어진 溫度條件에 의한 溫度分布의 결정을 그 첫 段階로 하고, 溫度分布에 따른 應力解析은 後續段階로 하여 해석을 수행할 수 있다. 이러한 構造系를 해석하는 방법으로 사용되는 것은 explicit한 溫度解析과 implicit한 應力解析으로서, 應力解析은 3次元理論解析의 方法(線形, 同質, 等方), 2次元 有限差分法(多層, 線形), 2次元 有限要素法(多層 및 線形 및 非線形), 3次元 有限要素法(多層, 주로 線形), 2次元 境界要素法(同質, 等方, 주로 線形) 등을 들 수 있다.^[4] 일반적으로 타당성이 인정되는 것은 核燃料 發散熱의 傳達은 線形式에 의한 理論解析을 따르고, 이 熱應力과 動力에 의한 應力集中과 安定性 검토는 有限要素解析을 따르는 것이다.

核廢棄 貯藏構造體 周邊은 굴착에 의한 力學的 應力과 核에너지에 의한 熱力學的 應力이 集中되게 되고 따라서 이 부분 재료의 舉動도 非線形性이 커지게 된다. 이에 반하여 無限領域에서는 應力集中이 심하지 않고 그 舉動은 線形的이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 非線形性이 강한 貯藏構造體 周邊에서는 非線形有限要素를 사용하고, 非線形性이 약한 無限領域에서는 線形境界要素를 사용하여 組合解析을 실시하고자 한다. 核廢棄 貯藏構造體는 地下 300m이상의 深層에 건설되므로 構造

體는 無限境界를 갖는다고 하여도 무리가 아니다. 따라서, 본 연구에서의 境界는 無限帶에 설정하고, 線形 境界要素에 필요한 基本解는 Kelvin 解에 의존하도록 한다. 일반적으로 출입터널에서 문제가 되는 부분은 터널 交叉部에서 떨어진 貯藏板이 설치되는 부분으로^[5] 이 부분의 舉動은 平面變形率 상태라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 해석은 平面變形率 解析으로 제한한다. 또한, 이렇게 개발된 組合解析방법을 사용하여, 일반적으로 알려져 있는 岩盤體의 彈性係數, 포아손比, 熱膨脹係數 등 諸盤 材料常數들의 변화가 廢棄構造體의 變位에 미치는 영향을 분석하도록 한다.

2. 熱源에 의한 溫度分布

無限領域 內에 熱源이 존재하고 있는 경우의 溫度分布를 결정하기 위하여, 주어진 位置와 時間에서 一時에 一定한 熱을 발생시키는 瞬間熱源(instantaneous heat source)에 의한 溫度分布를 생각한다. 외부와 차단된 系에서의 溫度變化 T는 에너지 보존의 법칙에 의하여 다음과 같은 Fourier의 熱傳導方程式을 만족시킨다.

$$\kappa \nabla^2 T = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

여기서, k는 熱傳導係數이고, c는 比熱, ρ는 密度이다. 力學的系가 溫度分布에 미치는 영향은 미소하므로, 본 연구에서는 k가 一定하다고 생각한다. 식(1)의 兩邊을 ρc로 나누면 다음과 같이 된다.

$$\kappa \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2}$$

여기서, κ는 熱擴散係數(thermal diffusivity)로서 k/ρc이다. 식(2)의 微分方程式을 만족시키는 하나의 解로서 다음과 같은 溫度變化 T를 생각할 수 있다.^[6]

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{8(\pi \kappa t)^{3/2}} \text{Exp}(-r^2/4\kappa t) \tag{3}$$

여기서, $r = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}$ 로써, 점 (x_0, y_0, z_0) 으로부터 점 (x, y, z) 까지의 거리이

다. 식(3)은 점 (x_0, y_0, z_0) 에 위치하고 時間 t=0에서 시작하는 強度가 Q인 瞬間點熱源(instantaneous point heat source)에 의한 無限領域 內에서의 溫度分布를 나타내고 있다.

점 (x_0, y_0) 를 통과하며 z축에 대하여 평행으로 배치된, 時間 t=0에서 均一強度 Q dz를 가진 瞬間點熱源(instantaneous point heat source)인 경우는 식(3)을 z축으로 無限帶까지 積分하면 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T(x, y, t) &= \frac{Q}{8(\pi \kappa t)^{3/2}} \int_{-z}^z \text{Exp}(-r^2/4\kappa t) dz \\ &= \frac{Q}{4\kappa t} \text{Exp}(-r^2/4\pi \kappa t) \end{aligned} \tag{4}$$

使用後 核燃料를 저장하는 경우와 같이 熱源이 점 (x_0, y_0) 를 통과하고 터널軸인 z축에 대하여 평행하며, t=0 부터 t=τ때까지 熱이 單位時間當 Q만큼 일정하게 발생하는 連續線熱源(continuous line heat source)인 경우는 식(4)를 時間에 대하여 積分함으로써 溫度分布를 결정할 수 있다. 즉,

$$T = \frac{-Q}{4(\pi \kappa)} \int_{-r^2/4\kappa t}^{-r^2/4\kappa \tau} \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau \tag{5}$$

이다.

3. 有限要素 領域에서의 熱應力解析

식(5)와 같이 주어지는 不均一 溫度分布에 의하여 構造體는 變形을 일으키게 된다. 等方性 線形 彈性體에서 溫度變化 T에 따른 應力과 變形率의 관계는 Hooke 法則에 따라 다음과 같다.

$$d\sigma_{ij} = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} d\epsilon_{kk} + 2\mu d\epsilon_{ij} - 2G \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha \delta_{ij} T \tag{6}$$

여기서 μ는 Lamé의 常數, ν는 포아손비이며, δ_{ij}는 Kronecker delta이다. 식(6)의 제3항이 온도 변화에 의한 初期應力增分이다. 2次元 문제에 대하여 식(6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x - \alpha T \\ \epsilon_y - \alpha T \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, E는 彈性係數이고 α 는 熱膨脹係數이다. 식(7)을 増分형식의 벡터로 표현하면

$$\{d\sigma\} = [C] (\{d\epsilon\} - \{d\epsilon_0\}) \quad (8)$$

이된다. 여기서 $\{d\sigma\}$ 는 應力増分벡터, $\{d\epsilon\}$ 는 全體變形率増分벡터, $\{d\epsilon_0\}$ 는 溫度에 의한 變形率増分벡터이다. 또한, [C]는 係數系列로서 非線形系에서는 接線係數行列로 代치된다. 接線係數行列의 要素 C_{ijkl}^T 는 線形係數行列의 要素 C_{ijkl} , 降伏함수 F, 塑性포텐셜 Q에 의하여 다음 식과 같이 쓸수 있다.¹⁷⁾

$$C_{ijkl}^T = C_{ijkl} \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} C_{pqkl} C_{ijrs} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{rs}}}{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} C_{pqrs} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{rs}} - \frac{\partial F}{\partial \epsilon_{pq}^p} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{pq}}} \quad (9)$$

關聯흐름法則(associated flow rule)에 의하면 $Q=F$ 이고, 接線係數行列은 對稱 行列이 된다.

變形率-變位 관계는 節點 變位増分 $\{du\}$ 를 사용하면

$$\{d\epsilon\} = [B]\{du\} \quad (10)$$

이다. 한 有限要素에 있어서 가상變位 $\{u_v\}$ 에 의한 가상외부일 W_{EV} 는 節點 荷重増分을 $\{dF\}$ 라 하면

$$W_{EV} = \{u_v\}^T \{dF\} \quad (11)$$

이다. 가상변위 $\{u_v\}$ 에 適合한 가상변형률을 $\{\epsilon_v\}$ 라 하면 $\{\epsilon_v\} = [B]\{u_v\}$ 이므로, 要素에서의 內部가상일 W_{IV} 는 要素의 領域을 Ω_e 라 하면

$$\begin{aligned} W_{IV} &= \int_{\Omega_e} \{\epsilon_v\}^T \{d\sigma\} d\Omega \\ &= \{u_v\}^T \int_{\Omega_e} [B]^T [C] [B] d\Omega \{du\} \\ &\quad - \{u_v\}^T \int_{\Omega_e} [B]^T [C] \{d\epsilon_0\} d\Omega \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 가상변위의 原理에 의하여 $W_{IV} = W_{EV}$ 이므로 다음과 같은 平衡方程式을 얻을 수 있다.

$$[K]_{FE} \{du\} = \{dF_0\} + \{dF\} \quad (13)$$

여기서, $[K]_{FE}$ 는 有限要素의 剛性度 行列이고 $\{dF_0\}$ 는 온도변화에 따른 變形率増分 $\{d\epsilon_0\}$ 에 의한 節點荷重으로서 각각

$$[K]_{FE} = \int_{\Omega_e} [B]^T [C] [B] d\Omega \quad (14)$$

$$\{dF_0\} = \int_{\Omega_e} [B]^T [C] \{d\epsilon_0\} d\Omega \quad (15)$$

이다.

4. 境界要素領域에서의 熱應力解析

物體力을 무시할 때 應力増분에 대한 平衡條件式은

$$d\sigma_{k,i} = 0 \quad (17)$$

이고, 이로부터 加重殘差方程式(weighted residual equation)을 구성하면 다음과 같이 된다.¹⁸⁾

$$\begin{aligned} cdu_m^i + \int_{\Gamma} du_k t_{mk}^i d\Gamma &= \int_{\Gamma} du_k t_{mk}^i d\Gamma \\ &\quad + 2G \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha \int_{\Omega} T \delta_{ki} \epsilon_{ki}^i d\Omega \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, du_m^i 는 i점에서 x_m 方向으로의 變位를 표시하며, u_{mk}^i 와 t_{mk}^i 는 각각 i점에서 x_m 方向으로 작용하는 單位荷重에 의한 x점에서 x_k 方向으로 變位와 表面力을 나타낸다. 식(18)에서 溫度變化 T에 대한 領域積分項을 분리하여 db_k 로 표시하고 變形率과 變位關係를 이용하면 다음과 같이 된다.

$$db_k = 2G \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha \int_{\Omega} u_{k,j}^i \epsilon_{kj}^i T d\Omega \quad (19)$$

식(19)는 領域 Ω 에 걸쳐 積分해야 되므로 이 積分을 境界積分으로 변환해야 된다. 領域積分을 境

界積分으로 변환하기 위해서는 Galerkin 텐서를 사용할 수 있다.⁹⁾ 2次元 문제에서 Galerkin 텐서는

$$G_{ki}^* = \frac{1}{8\pi G} r^2 \ln(1/r) \delta_{ki} \quad (20)$$

이고 여기서 r은 單位荷重이 작용하는 載荷點에서 變位 및 表面力가 발생되는 점까지의 거리이다. Galerkin 텐서와 基本解 u_{ki}^* 의 관계는

$$u_{ki}^* = G_{ki,i}^* - \frac{1}{2(1-\nu)} G_{ki,ii}^* \quad (21)$$

이다. 식(21)를 식(19)에 代入, 整理하면

$$db_k = G \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \alpha \int_{\Omega} G_{ki,ij}^* T d\Omega \quad (22)$$

이 된다. 正常狀態 熱傳導(steady-state heat conduction)인 경우는 $T_{,ii} = 0$ 이므로 식(22)은 다음과 같이 된다.

$$db_k = G \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \alpha \int_{\Gamma} [G_{ki,ij}^* T - G_{ki,ii}^* T_{,j}] n_j d\Omega \quad (23)$$

이제 식(20)을 식(23)에 代入하면

$$db_k = \frac{(1+\nu)}{4\pi(1-\nu)} \alpha \int_{\Gamma} \left[\left\{ \ln(1/r) - \frac{1}{2} \right\} n_k - r_{,k} r_{,i} n_i \right] T d\Gamma - \frac{(1+\nu)}{4\pi(1-\nu)} \alpha \int_{\Gamma} \left[\ln(1/r) - \frac{1}{2} \right] r_{,k} r_{,i} \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma \quad (24)$$

임을 구할 수 있다. 여기서 n_k 는 境界面에서 垂直 벡터의 k 成分이며, 또한 $\partial T / \partial n$ 은 온도의 垂直 벡터 방향으로의 變化率이다. 따라서 모든 적분항은 境界적분으로 치환된다.

식(24)를 形狀函數 $\{\Phi\}$ 를 이용하여 정리하면 아래와 같이 나타난다.

$$\{c\}\{du\} + \sum_{j=1}^N \left[\int_{\Gamma_j} \{t^*\}\{\Phi\}^T d\Gamma \right] \{du\} = \sum_{j=1}^N \left[\int_{\Gamma_j} \{u^*\}\{\Phi\}^T d\Gamma \right] \{dt\} + \{db\} \quad (25)$$

식(25)의 積分項을 數值積分하기 위한 형태로 표현하면

$$\{c\}\{du\} + \sum_{j=1}^N \left[\sum_{m=1}^L |J|_m W_m(\{t^*\}\{\Phi\}_M^T) \right] \{du\} = \sum_{j=1}^N \left[\sum_{m=1}^L |J|_m W_m(\{u^*\}\{\Phi\}_M^T) \right] \{dt\} + \{db\} \quad (26)$$

이 된다. 여기서, $|J|$ 는 Jacobian 行列式이며, W 는 Gauss 積分의 加重值이다. 식(26)을 行列로 나타내면 다음과 같다.

$$[H]\{du\} = [G]\{dp\} \quad (27)$$

여기서, $\{dp\} = \{dt\} + [G]^{-1}\{db\}$ 를 의미한다. 식(27)의 양변에 $[G]^{-1}$ 를 곱하면

$$[G]^{-1}[H]\{du\} = [C]\{du\} = \{dp\} \quad (28)$$

이 된다.

有限要素와 境界要素의 組合은 一般 力學的 系에서와 동일한 방법에 의하여 조합될 수 있다.¹⁰⁾

5. 使用後 核燃料 貯藏構造體

상술된 바와 같은 비선형유한요소와 境界要素의 조합방법을 이용하여, 그림1과 같은 使用後 핵연료의 貯藏구조체를 해석하도록 한다. 해석대상은 반지름이 10m이고 x축에 수평하게 1m간격으로 604m³ °C/yr의 4개 집중열원이 작용하며, y축에 대하여 대칭인 무한영역내의 원형터널로써 평면변형률문제로 해석한다.⁶⁾ 지반의 조건으로서 탄성계수가 45GPa, 포아손비가 0.1, 열팽창계수가 0.6×10⁻⁵ m/°C인 경우를 택하였다. 또한 지반은 탄성-완전소성 재료로 생각하여 점착력이 8×10⁻³MPa이고 마찰각이 40°인 Mohr-Coulomb 조

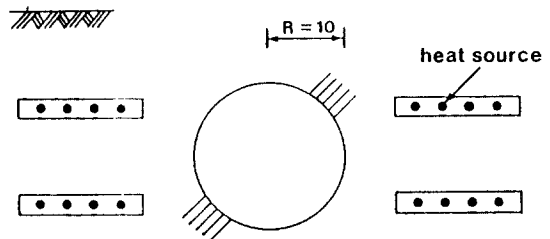


그림 1. 使用後 핵연료 구조체

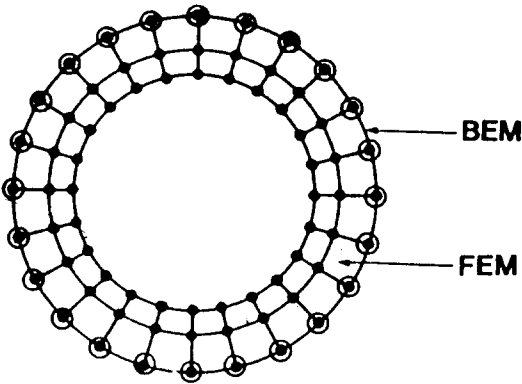


그림 2. 조합해석을 위한 요소망

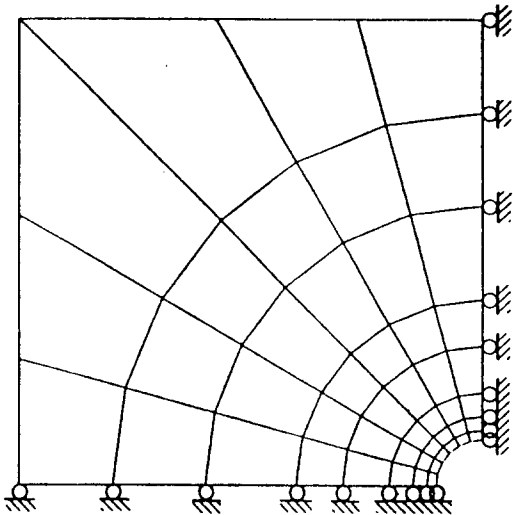


그림 3. 비선형 유한요소해석을 위한 유한요소망(자유지지)

건을 사용하였다.

조합해석에서는 그림2와 같이 동공의 반경방향으로 5m의 2층 유한요소망을 구성하고 유한요소의 외곽에 경계요소를 사용하였다. 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 동일한 대상에 대하여 비선형 유한요소 해석은 병행하였다. 유한요소해석에 있어서는 그림 3에서와 같이 외곽경계를 자유지지로 한 경우와 그림 4에서와 같이 외곽경계를 고정지지로 한 경우를 해석하였다. 자유지지로 해석한 변위는 정해의 상한값으로, 고정지지로 해석한 변위는 하한값으로 생각될 수 있다.

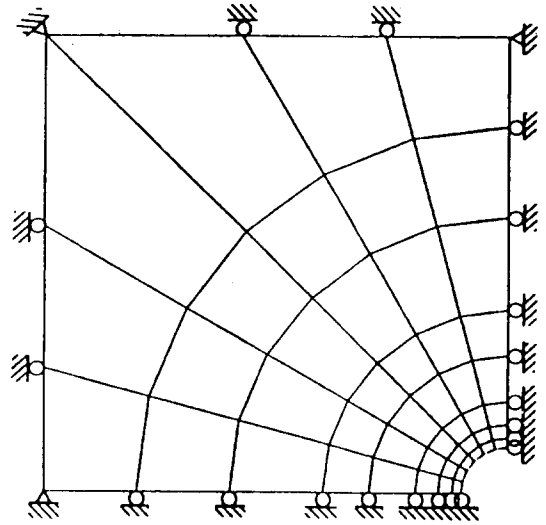


그림 4. 비선형 유한요소해석을 위한 유한요소망(고정지지)

표 1. 무한영역내 원형터널의 비선형해석에 의한 수직변위

각도 (o)	FEM(FREE) (CM)	FEBEM (CM)	FEM(FIXED) (CM)
0	0.223	0.215	0.179
15	0.220	0.210	0.177
30	0.211	0.193	0.169
45	0.192	0.166	0.153
60	0.158	0.129	0.123
75	0.108	0.081	0.076
90	0.000	0.000	0.000
105	-0.108	-0.081	-0.076
120	-0.158	-0.129	-0.123
135	-0.192	-0.166	-0.153
150	-0.211	-0.193	-0.169
165	-0.220	-0.210	-0.177
180	-0.223	-0.215	-0.179

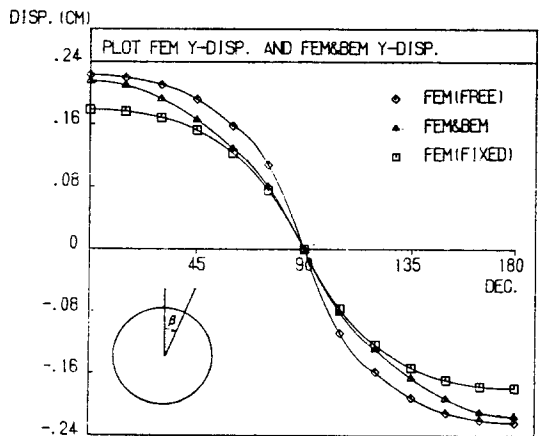


그림 5. 비선형해석에 의한 수직변위

전체하중을 3단계로하여 각 단계에서 0.5, 0.8, 1.0의 하중이 작용하는 것으로 하였다. 표1과 그림 5는 경계조건을 달리한 비선형유한요소해석과 조합해석에 의한 변위결과를 표시하고 있다. 표1과 그림5에서 보는 바와 같이 수직변위의 상한값으로 생각할 수 있는 자유지지의 비선형유한요소해석과 수직 변위의 하한값으로 생각할 수 있는 고정지지의 비선형유한요소해석의 범위내에 조합해석에 의한 수직변위값이 존재하므로 조합방법에 의한 프로그램이 타당함을 알 수 있다. 그림 6은 자유지지의 비선형 유한요소와 비선형 유한요소-경계요소를 조합한 해석에 의하여 소성영역을 비교한 것이다. 응력의 크기에 따라 소성영역은 지하 구조물의 안정성 검토에 중요한 역할을 하므로 이에 대한 검토가 필요하다. 해석결과에서 차이점은 볼 수 있으나 그림에서와 같이 차이가 발생하는 Gauss점에서의 응력비 α 를 비교하면 그 오차가 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 조합해석에 의한 해석의 소성영역 결과도 타당함을 알 수 있었다. 또한, 조합방법은 비선형 유한요소해석에서 선형 거동이 예상되는 부분까지 비선형을 고려해야 하는 불편과 이에 따른 불필요한 자료의 양을 줄일 수 있었다. 따라서, 핵연료 폐기구조체와 같이 열역학적 응력에 의하여 국부적인 비선형성이 발생

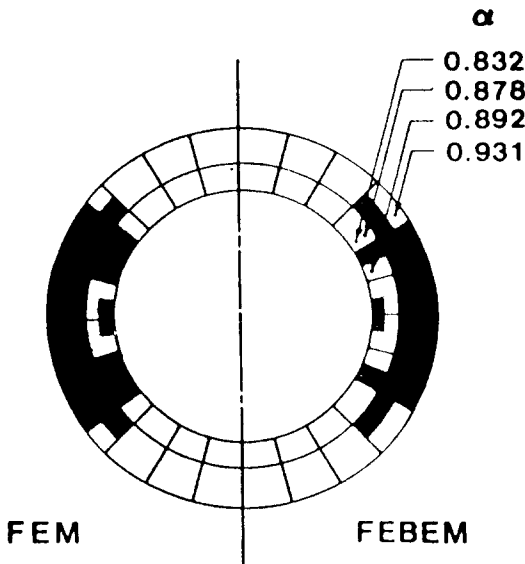


그림 6. 소성영역의 비교

표2. 각 경우별 계수

번 호	CASE	포아송비	탄성계수 (Gpa)	열확산계수 (m/yr)	열팽창계수 (1/°C)
포아송비	CASE P1	0.10	45	25.23	0.6×10^{-5}
	CASE P2	0.15	45	25.23	0.6×10^{-5}
	CASE P3	0.20	45	25.23	0.6×10^{-5}
탄성계수	CASE E1	0.10	45	25.23	0.6×10^{-5}
	CASE E2	0.10	50	25.23	0.6×10^{-5}
	CASE E3	0.10	55	25.23	0.6×10^{-5}
열확산계수	CASE D1	0.10	45	25.23	0.6×10^{-5}
	CASE D2	0.10	45	31.54	0.6×10^{-5}
	CASE D3	0.10	45	47.30	0.6×10^{-5}
열팽창계수	CASE A1	0.10	45	25.23	0.6×10^{-5}
	CASE A2	0.10	45	25.23	0.8×10^{-5}
	CASE A3	0.10	45	25.23	1.0×10^{-5}

되는 구조물에서는 조합방법이 효율적임을 알 수 있었다.

사용후 핵연료 폐기구조체의 구조거동에 미치는 매개변수의 영향을 분석하기 위하여 표2에 해석에 반영한 암반체의 재료상수들을 표시하였다. 표에 표시된 각 계수의 범위는 Wai, Lo와 Rowe에 의하여 실험적으로 제시된 기준에 의거하였다. [11] 지반의 항복조건을 점착력이 $9 \times 10^{-3} \text{MPa}$ 이고 마찰각이 40° 인 Mohr-Coulomb 조건을 동일하게 사용하였다. 그림7 부터 그림14는 각 매개변수에 의한 터널주위의 수직, 수평변위를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와같이 터널주위의 수직변위와 수평변위는 탄성계수, 포아송비, 열팽창계수가 증가함에 따라 증가한 반면, 열확산계수의 경우는 반대의 결과가 나타났다. 열확산 계수, 탄성계수, 포아송비의 변화에 따른 변위의 변화보다 열팽창

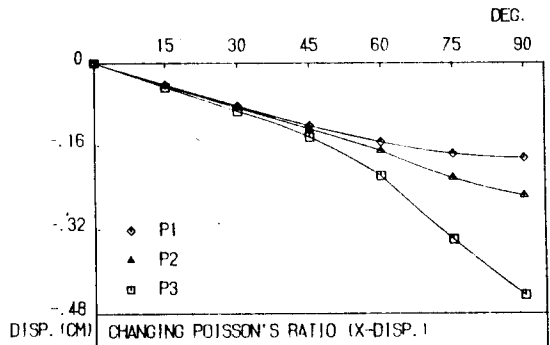


그림 7. 포아송비를 변화시킨 경우 수평방향의 변위

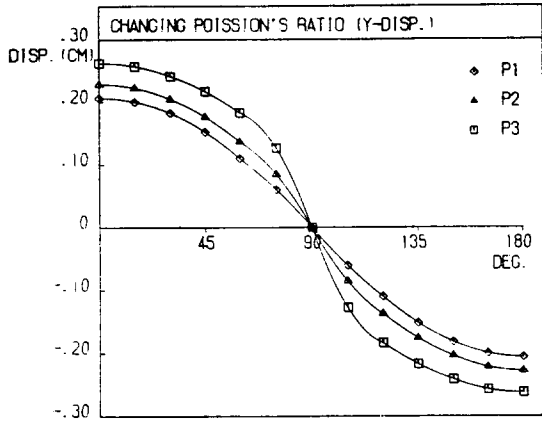


그림 8. 포아송비를 변화시킨 경우 수직방향의 변위

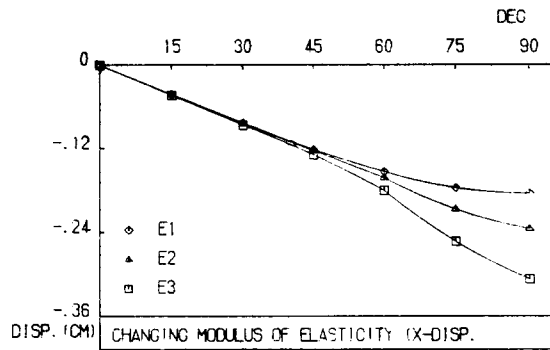


그림 9. 탄성계수를 변화시킨 경우 수평방향의 변위

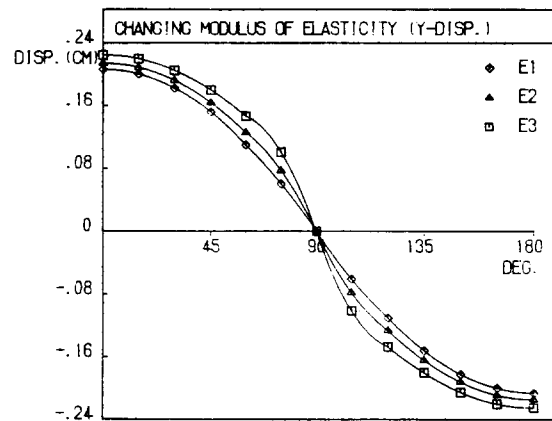


그림 10. 탄성계수를 변화시킨 경우 수직방향의 변위

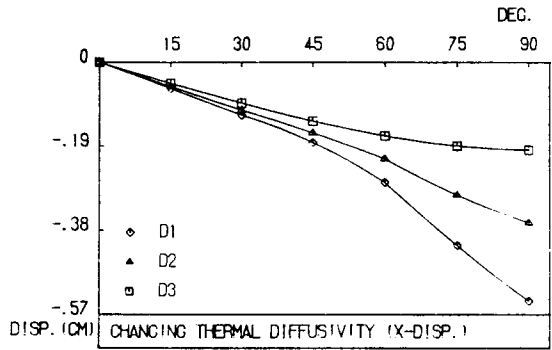


그림 11. 열확산계수를 변화시킨 경우 수평방향의 변위

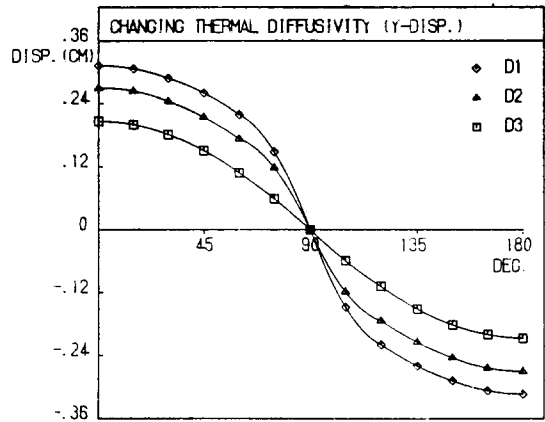


그림 12. 열확산계수를 변화시킨 경우 수직방향의 변위

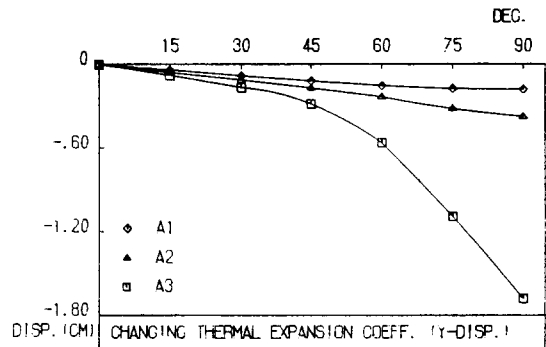


그림 13. 열팽창계수를 변화시킨 경우 수평방향의 변위

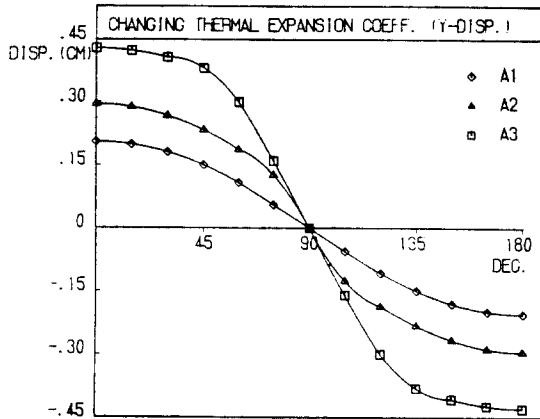


그림 14. 열팽창계수를 변화시킨 경우 수직방향의 변위

계수의 변화에 따른 변위의 변화가 훨씬 큼을 알 수 있었다. 따라서 지층 내에 열하중이 작용하는 경우 암반의 거동을 해석할 때 열팽창계수의 결정이 상대적으로 중요함을 알 수 있었다.

6. 結 論

본 연구에서는 사용후 핵연료폐기구조체의 문제를 효율적으로 해석하기 위하여 비선형유한요소와 경계요소의 합리적인 조합방법에 대하여 고찰하였다. 열하중이 작용하는 구조체의 해석을 위하여 비선형유한요소 영역에서는 온도변화의 영향을 절점하중으로 대치하고, 선형경계요소에서는 온도항의 영역적분을 Galerkin tensor에 의하여 경계적분으로 전환하여, 이를 조합하였다. 조합된 해석방법을 핵폐기구조체의 모형에 적용하여 비선형유한요소 해석과 비교하므로써 그 타당성과 효율성을 검증하였다.

그리고 핵연료기폐구조체와 같이 열역학적 응력에 의하여 국부적인 비선형성이 발생하는 구조물에서는 조합방법이 효율적임을 알 수 있다. 또한 터널주위의 수직변위와 수평변위는 탄성계수, 포아손비, 열팽창계수가 증가함에 따라 증가한 반면, 열확산계수의 경우는 반대의 결과가 나타났으며, 열확산계수, 탄성 계수, 포아손비의 변화에 따른 변위의 변화보다 열팽창계수의 변화에 따른 변위의 변화가 훨씬 큼을 알 수 있었다. 따라서 지층

내에 열하중이 작용하는 경우 암반의 거동을 해석할 때 열팽창계수의 결정이 상대적으로 중요함을 알 수 있었다.

參考文獻

[1] Kays, W.M. and Hossaini-Hashemi, F., "Calculation of Media Temperatures for Nuclear Sources in Geologic Depositories by a Finite Length Line Source Superposition Model", Nuclear Engineering and Design, vol.67, 1981, pp.339-347.

[2] Day, D.A., "Deep Storage of Nuclear Waste:Structural Issues", Journal of the Energy Division, ASCE, vol.106, no. EY2, 1980, pp.201-212.

[3] Boley, B.A. and Weiner, JH, Theory of Thermal Stresses, John Wiley & Sons, 1960, pp42-74.

[4] 김문겸, 정연구 "사용 후 핵연료의 폐기처분장 구조물의 설계개념", 대한토목학회지, 제 35권, 제6호, 1987, pp.103-104.

[5] St.John, C., Analysis of Underground Excavations in the Vicinity of a Waste Isolation Panel, Agbabian Associates, Rep.no.R-8327-5718, 1984.

[6] Carslaw, H.S. and Jaeger J.C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press, London, 1959.

[7] Bathe, K.J., Ozdemir, H., and Wilson, E. L., Static and Dynamic Geometric and Matrial Nonlinear Analysis, University of California, Berkeley, Rep.no.UCSESM 74-4, 1974, pp.74-85.

[8] Brebbia, C.A., Telles, J.C.F., and Wrobel, L.C., Boundary Element Techniques, Springer-Verlag, 1984.

[9] Danson, D.J., "A Boundary Element Formulation of Problems in Linear Isotropic Elasticity with Body Forces", Proceedings of the 3rd International Sem-

- inar on Boundary Element Methods, 1981, pp.105-122.
- [10] Kim, M.K., Cheung, S.H., and Hwang, H.J., "A Coupling of Nonlinear Finite Elements and Boundary Elements", Emerging Technologies in Structural Engineering and Mechanics, 1988, pp. 66-77.
- [11] Wai, R.S.C., Lo, K. Y., and Rowe, R. K., "Thermal Stress Analysis in Rock with Nonlinear Properties", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 19, 1982, pp.211-220.

(접수일자 : 1993. 5. 31)