

터널과 지하공간, 한국암반역학회  
Vol. 1, 1991, pp. 181~203

## 등방 및 이방성 암반내 공동의 열역학적 거동에 관한 전산모델연구

문현구<sup>1)</sup>, 주광수<sup>2)</sup>

### A Study on the Thermo-mechanical Behavior of Underground Openings in Isotropic and Structurally Anisotropic Rock Masses

Hyun Koo Moon<sup>1)</sup>, Kwang Sue Jue<sup>2)</sup>

#### ABSTRACT

The effects of geologic structures such as rock joints and bedding planes on the thermal conductivity of a discontinuous rock mass are studied. The expressions for the equivalent thermal conductivities of jointed rock masses are derived and found to be anisotropic. The degree of anisotropy depends primarily on the thermal properties contrast between the joint phase and surrounding intact rock, the joint density expressed as volume fraction and the inclination angle of the joint.

Within the context of 2-dimensional finite element heat transfer scheme, the isotherms around a circular hole are analyzed for both the isotropic and anisotropic rock masses in 3 different thermal boundary conditions, i.e. temperature, heat flux and convection boundary conditions. The temperature in the stratified anisotropic rock mass is greatly influenced by the thermal properties of the rock formation in contact with the heat source. Using the excavation-temperature coupled elastic plastic finite element method, analyzed is the thermo-mechanical stability of a circular opening subjected to 100° C at a depth of 527m. It is found that the thermal stress concentration was enough to deteriorate the stability and form a plastic yield zone around the opening, in contrast to the safety factor greater than 2 resulted from the excavation-only analysis.

이 논문은 1990년도 문교부 한국학술진흥재단의 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

\* 1991년 11월 接受

1) 正會員. 한양대학교 공과대학 자원공학과 조교수

2) 한양대학교 공과대학 자원공과 대학원 석사과정

## 1. 序 論

암반에 분포하는 불연속면은 미소균열(크랙), 절리, 단층 및 층리면 등과 같이 현미경적 스케일서부터 공학적 스케일에 이르기까지 다양한 크기를 갖는다. 암석을 여러 종류의 광물 입자 또는 결정으로 구성된 고체로 볼 때 크랙들은 주로 이 입자들의 경계에 분포한다. 화강암, 반려암, 현무암 등 결정질 암석에 분포하는 입자경계크랙(Grain boundary crack)들을 SEM(Scanning electron microscope)등 전자현미경으로 관찰할 경우 그 방향성은 매우 불규칙하게 나타난다.<sup>1)</sup> 이와같이 일관된 방향성이 없이 분포하는 크랙은 화강암은 물론 사암에서도 관찰되고 있으며 이는 과거에 이 암석들이 받은 구조응력(Tectonic stress)상태를 유추할 수 있는 자료가 되기도 한다.<sup>2,3)</sup> 무수히 많은 크랙들이 일정한 방향성이 없이 분포할 경우 암석의 열역학적 성질은 통계적 의미에서 등방성과 균질성을 갖게 된다. 물론 외부에서 가해진 응력에 의해 형성되는 2차 크랙은 압축응력하에서 최대 주응력의 방향으로 전진하며 그 결과 과거 구조응력의 영향을 받았던 암석은 이 응력유도크랙(Stress-induced crack)들에 의해 이방성을 띄게 된다. 한편 절리가 발달한 암반의 경우 절리면에 수직한 방향과 평행한 방향으로의 열역학적 성질의 차이는 이방성의 대표적인 예가 되며 이를 통상 구조적 이방성(Structural anisotropy)이라 부른다. 이 이방성의 정도는 절리의 방향과 밀도분포, 절리와 주위 암석의 열역학적 성질의 격차 혹은 대비(Properties contrast)등에 따라 변화한다.

암반을 연속등방체로 볼 것인가 아니면 이방성 고체로 볼 것인가하는 문제는 분석코자 하는 구조물의 크기와 불연속면의 크기 및 간격(또는 밀도분포)에 따라 달라진다. 직경 수 cm의 시추공과 수m 또는 수십m폭의 지하공동을

비교할 때 전자는 크랙을 포함한 암석을 대상으로 한다고 볼 수 있으며 후자는 절리를 포함한 암반을 대상으로 한다고 볼 수 있다. 전자와 같이 암석을 연속등방체로 보고 그 역학적 거동을 분석하는 방법은 무수히 많은 모래입자들로 구성된 사질토의 거동을 분석할 때 입자 하나 하나를 분석하는 대신 사질토 전체를 하나의 균질체로 간주하는 토질역학의 관점과 일치한다. 반면 암반의 경우 불연속면들의 방향성과 밀도에 따라 구조적 이방성의 정도가 달라지며 이는 암반역학이 다른 역학분야와 구별되는 중요한 특성중 하나라 할 수 있다.

본 연구에서는 암반내에 다양한 종류의 불연속면들이 임의의(Arbitrary)방향성과 밀도분포를 갖고 분포한다는 가정하에 이들 불연속면들이 암반의 이방성 열전도 특성에 어떠한 영향을 미치며 굴착과 같은 역학적인 경계조건뿐만 아니라 각종 열경계조건하에서 이방성 암반의 온도분포와 이로 인해 발생하는 열응력의 상태를 파악코자 시도하였다. 이론적인 측면에서 단순한 절리암반의 등가 열전도계수(Equivalent thermal conductivity)를 유도하였고, 수치해석적 측면에서는 이방성 열전도 특성을 가진 암반에 각종 열경계 조건이 주어질 경우 온도분포를 계산하는 열전달 유한요소법을 연구하였다. 모델실험은 균질 암반과 불균질 층상 암반을 대상으로 이방성의 정도와 지층간 열전도성의 대비(Conductivity contrast)를 변화시키면서 열원이 위치한 원형 공동주변의 온도분포에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

고준위 방사성폐기물 동굴처분의 경우 사용후 연료(Spent fuel)가 방출하는 높은 열은 주변암반에 열응력을 발생시킨다. 초기현장응력은 저장터널과 Canister borehole굴착에 의해 1차적으로 응력 재분배 현상을 겪게되며 그 후 열원을 설치함으로써 발생하는 열응력에 의해

2차 응력 재분배가 일어난다. 따라서 열응력 해석은 암반내 공동굴착에 대한 전통적인 탄소성 응력해석과 병행되어야 하며 하나의 연결된 프로그램(Temperature-excavation coupled program)내에서 수행되는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 지하 500m 암반에 위치한 원형공동을 대상으로 열전달 해석과 탄소성 열응력 해석을 수행하였다.

## 2. 암반의 이방성 열전도계수

열전도계수, 열팽창계수, 비열 등은 일반적으로 물질의 열적 성질을 대표하는 계수들로서 암반의 열역학적 해석에 필수적으로 요구되는 중요한 입력자료에 속한다. 열적 성질에 있어 직교이방성을 가진 암석의 경우 열류량(Heat Flux)  $\{q_i\}$ 와 온도구배(Temperature Gradient)  $\{\phi_{ij}\}$ 의 관계는 열전도 계수텐서(또는 행렬)  $[k_{ij}]$ 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\{q_i\} = [k_{ij}] \{\phi_{ij}\} \quad (1)$$

여기서  $i$ 와  $j$ 는 직교좌표축  $x_1, x_2, x_3$ (또는  $x, y, z$ )를,  $\phi_{ij}$ 는 각 축방향의 온도구배  $\partial\phi/\partial x_i$ 를 나타내며, 열전도계수  $k_{ij}$ 는 3개 대각선 성분  $k_{11}, k_{22}, k_{33}$ 을 제외한 나머지 성분은 모두 0(영)이 된다. 물론 균질등방성 암석(Intact Rock)의 경우  $k_{11}=k_{22}=k_{33}=\text{상수 } k_{\text{rock}}$ 이 된다.

직교이방성 좌표계( $x_1, x_2, x_3$ )로부터 각도  $\theta$ 만큼 회전한 새로운 좌표계( $x'_1, x'_2, x'_3$ )에서의 열전도 계수행렬  $[k'_{ij}]$ 는 열류량에 대한 좌표변환  $\{q_i\} = [T]^t \{q_i\}$ 와 온도구배에 대한 좌표변환  $\{\phi_{ij}\} = [T]^t \{\phi'_{ij}\}$ 를 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$[k'_{ij}] = [T]^t [k_{ij}] [T] \quad (2)$$

여기서  $[T]$ 는 방향여현으로 구성된  $(3 \times 3)$  직교행렬(Orthogonal matrix)로서 회전축 선택

에 따라 그 구성 성분이 달라지며 어깨글자  $t$ 는 전치행렬을 나타낸다.

### 2.1 단일 수평절리를 포함한 암반의 열전도계수

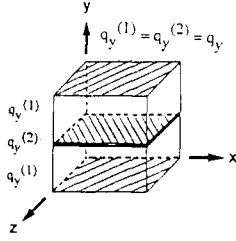
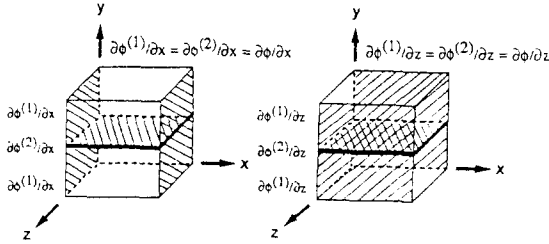
공학적 관점에서 절리틀 암반내 불연속면의 대표적인 형태로 간주하고 절리가 암반의 열전도성에 미치는 영향을 분석하였다. 절리는 미시적인 관점에서 볼 경우 일반적으로 절리벽면의 거칠기와 굴곡에 의해 수많은 접촉점(또는 접촉면)과 그 사이의 공간 즉 틈새(Aperture)가 형성되어 있다.

공기와 물의 열전도계수  $0.02\text{W/m}^\circ\text{C}$ 와  $0.60\text{W/m}^\circ\text{C}$ 를 암석의 열전도계수  $0.20-4.0\text{W/m}^\circ\text{C}$ 와 비교할 때 유체의 흐름이 심하지 않다면 보편적으로 절리는 열전도성을 감소시키는 역할을 한다고 볼 수 있다.<sup>4)</sup> 이 감소현상은 물론 절리벽면의 접촉상태, 충전상태 및 충전물의 종류 등에 따라 변화한다. 이와 같은 절리의 영향을 공학적 해석에 포함시키는 방법의 하나로서 본 연구에서는 절리를 낮은 열전도성 혹은 필요에 따라 높은 열전도성을 가진 박층(Thin layer)으로 모델하였다.

불연속 암반(이하 “절리암반(Jointed rock mass)”)으로 약칭)의 열전도 거동을 분석하는 첫 단계는 단일수평절리를 가진 암반모델의 열류량과 온도구배의 관계를 분석하고 등가 열전도계수를 유도하는 과정에서 시작된다. ( $x, y, z$ ) 직교좌표계에서 절리면이  $y$ 축에 수직하고  $xz$  평면에 평행할 경우(Fig.1) 절리와 주변암석에서의 열류량은 다음과 같이 표현된다.

$$q_x^{(p)} = q_x + \Delta q_x^{(p)}, \quad q_y^{(p)} = q_y, \quad q_z^{(p)} = q_z + \Delta q_z^{(p)} \quad (3)$$

여기서  $p=1$ 이면 암석(Intact Rock),  $p=2$ 이면 절리를 나타내며,  $q_x, q_y, q_z$ 는 각각  $x, y, z$  축 방향의 평균열류량(Average Heat Flux),

(a) Equilibrium of Heat Flux  $\perp$  Joint Plane

(b) Compatibility of Temperature Gradient//Joint Plane

**Fig. 1. Thin-Layer Model of Rock Joint: Equilibrium of Heat Flux & Compatibility of Temperature Gradient in Jointed Rock**

$\Delta q_x^{(p)}$ 와  $\Delta q_z^{(p)}$ 는 열류편차(Heat flux deviation)를 나타낸다. 한편 온도구배는 다음과 같이 표현된다.

$$\partial\phi^{(p)}/\partial x = \frac{\partial\phi}{\partial x},$$

$$\partial\phi^{(p)}/\partial y = \partial\phi/\partial y + \Delta(\partial\phi^{(p)}/\partial y), \quad \partial\phi^{(p)}/\partial z = \partial\phi/\partial z \quad (4)$$

여기서  $\partial\phi/\partial x$ ,  $\partial\phi/\partial y$ ,  $\partial\phi/\partial z$ 는 각각 x, y, z 축방향의 평균온도구배(Average temperature gradient),  $\Delta(\partial\phi^{(p)}/\partial y)$ 는 암석 혹은 절리에서의 y축방향의 온도구배 편차를 나타낸다. 절리와 주변암석에 각각 (1)식을 적용하면

$$\{q_i^{(p)}\} = -[k_{ij}^{(p)}] \{\phi_j^{(p)}\} \quad (5)$$

이고 여기에 (3)식과 (4)식을 대입하면 다음 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} q_x + \Delta q_x^{(p)} \\ q_y \\ q_z + \Delta q_z^{(p)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11}^{(p)} & k_{12}^{(p)} & k_{13}^{(p)} \\ k_{12}^{(p)} & k_{22}^{(p)} & k_{23}^{(p)} \\ k_{13}^{(p)} & k_{23}^{(p)} & k_{33}^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial\phi/\partial x \\ \partial\phi/\partial y + \Delta(\partial\phi^{(p)}/\partial y) \\ \partial\phi/\partial z \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)식으로부터 온도구배편차와 열류편차에 대한 표현을 얻은 후 다음과 같은 편차의 성질을 적용하면 평균열류벡터와 평균온도구배의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum V^{(p)} \Delta q_x^{(p)} &= 0, \quad \sum V^{(p)} \Delta q_z^{(p)} = 0, \\ \sum V^{(p)} \Delta(\partial\phi^{(p)}/\partial y) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\sum V^{(p)}$ 는 체적분율 가중평균을 의미하며  $V^{(p)}$ 는 절리와 주변암석의 체적분율을 나타낸다. 이상의 유도과정을 통해 얻어진 평균 온도구배와 평균 열류벡터의 관계식으로부터 다음과 같은 9개의 등가 열전도계수를 구하였다.

$$\begin{aligned} k_{21}^* &= [\sum f^{(p)} k_{12}^{(p)} / k_{22}^{(p)}] / [\sum f^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ k_{22}^* &= 1 / [\sum f^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ k_{23}^* &= [\sum f^{(p)} k_{23}^{(p)} / k_{22}^{(p)}] / [\sum f^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ k_{11}^* &= [\sum f^{(p)} k_{11}^{(p)}] + k_{21}^* [\sum f^{(p)} k_{12}^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ &\quad - [\sum f^{(p)} (k_{12}^{(p)})^2 / k_{22}^{(p)}] \\ k_{12}^* &= k_{21}^* \\ k_{13}^* &= [\sum f^{(p)} k_{13}^{(p)}] + k_{23}^* [\sum f^{(p)} k_{12}^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ &\quad - [\sum f^{(p)} k_{12}^{(p)} k_{23}^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ k_{31}^* &= k_{13}^* \\ k_{32}^* &= k_{23}^* \\ k_{33}^* &= [\sum f^{(p)} k_{33}^{(p)}] + k_{23}^* [\sum f^{(p)} k_{23}^{(p)} / k_{22}^{(p)}] \\ &\quad - [\sum f^{(p)} (k_{23}^{(p)})^2 / k_{22}^{(p)}] \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 식(8)에서 계산된 등가열전도계수들을 이용하면 하나의 수평절리가 xz면에 평행할 경우 온도구배로부터 열류량을 계산하거나 또는 열류량으로부터 온도구배를 계산할 수 있다. 전자의 경우

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11}^* & k_{12}^* & k_{13}^* \\ k_{12}^* & k_{22}^* & k_{23}^* \\ k_{13}^* & k_{23}^* & k_{33}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial\phi/\partial x \\ \partial\phi/\partial y \\ \partial\phi/\partial z \end{bmatrix} \quad (9)$$

이때 등가 열전도계수행렬  $[k_{ij}^*]$ 는 대칭성을 가지며 비대각선 성분들은 절리와 암석의 열전도 커플링(Coupling)효과에 기인한다. 한편 후자의 경우는 등가 열저항계수행렬  $[\omega_{ij}^*]$ 에 의해 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\begin{bmatrix} \partial\phi/\partial x \\ \partial\phi/\partial y \\ \partial\phi/\partial z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \omega_{11}^* & \omega_{12}^* & \omega_{13}^* \\ \omega_{12}^* & \omega_{22}^* & \omega_{23}^* \\ \omega_{13}^* & \omega_{23}^* & \omega_{33}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix}$$

여기서 열저항 계수행렬  $[\omega_{ij}^*]$ 는 식(8)에서 얻어진 등가 열전도계수행렬  $[k_{ij}^*]$ 의 역행렬에 해당하며 역시 대칭행렬이다. (9)와 (10)식에 나타난 비대각선 커플링 성분들은 어떤 주어진 방향으로 작용하는 열류량 또는 온도구배가 이에 직교하는 2개 축방향으로 각각 온도의 변화 또는 열류량을 발생시킴으로써 절리암반의 전체적인 열전도 거동에 일반 이방성을 부여한다. 이 일반 이방성은 균열 또는 절리의 방향성과 밀접한 관계에 있으며 특히 수치해석 모델에서 사용되는 좌표계와 암반의 주 이방성축(Principal axes of anisotropy)이 상이할 경우 항상 나타나는 현상이다.

2.2 경사절리를 포함한 암반의 열전도계수

다수의 경사절리에 대한 일반적인 분석의 기초단계로서 임의의 경사각(Arbitrary dip angle)을 가진 단일절리가 암반요소 전체의 열전도성에 미치는 영향을 분석하였다. (X, Y, Z)좌표계에서 단일 수평절리를 포함하는 6면체 암반요소를 Z축으로 하여 각도  $\theta$ 만큼 시계반대방향으로 회전시켰을 때 새로운 직교좌표계(x, y, z)에 설정된 6면체 암반요소는 경사각이  $\theta$ , 주향이 z축 방향인 절리를 내포하게 된다(Fig. 2). 따라서 새로운 좌표계에서의 열류벡터  $\{q_x, q_y, q_z\}$ 와 온도구배 벡터  $\{\partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y, \partial\phi/\partial z\}$ 의 관계를 다음과 같이 정의할 때

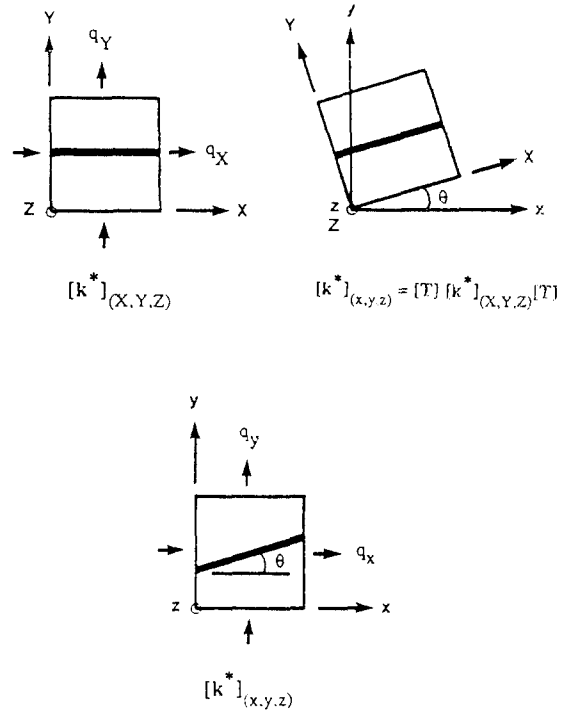


Fig. 2. Rotation of Coordinate System and Transformation of Thermal Conductivity Coefficient Matrix for an Inclined Joint

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx}^* & k_{xy}^* & k_{xz}^* \\ k_{yx}^* & k_{yy}^* & k_{yz}^* \\ k_{zx}^* & k_{zy}^* & k_{zz}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial\phi/\partial x \\ \partial\phi/\partial y \\ \partial\phi/\partial z \end{bmatrix} \quad (11)$$

구하고자 하는 것은 (3x3)행렬  $[k^*]_{(x,y,z)}$  즉 단일 경사절리를 포함한 암반의 열전도계수행렬이 된다. 식(2)에서 사용된 열류벡터와 온도구배벡터의 좌표변환식을 (X, Y, Z)와 (x, y, z)의 2개 좌표계에 적용하고 직교좌표 변환행렬의 성질  $[T]^{-1}=[T]^t$ 와  $[[T]^t]^{-1}=[T]$ 를 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} k_{xx}^* & k_{xy}^* & k_{xz}^* \\ k_{yx}^* & k_{yy}^* & k_{yz}^* \\ k_{zx}^* & k_{zy}^* & k_{zz}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11}^* & k_{12}^* & k_{13}^* \\ k_{12}^* & k_{22}^* & k_{23}^* \\ k_{13}^* & k_{23}^* & k_{33}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서 경사절리를 포함하는 암반의 등가 열전도계수는 식(8)에서 계산된 9개 열전도계수와 절리의 경사각  $\theta$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} k_{xx}^* &= (k_{11}^* + k_{22}^*)/2 + [(k_{11}^* - k_{22}^*)/2] \cos 2\theta + k_{12}^* \sin 2\theta \\ k_{yy}^* &= (k_{11}^* + k_{22}^*)/2 - [(k_{11}^* - k_{22}^*)/2] \cos 2\theta - k_{12}^* \sin 2\theta \\ k_{xy}^* &= -[(k_{11}^* - k_{22}^*)/2] \sin 2\theta + k_{12}^* \cos 2\theta \\ k_{yx}^* &= k_{xy}^* \\ k_z^* &= k_{33}^* \\ k_{xz}^* &= k_{13}^* \cos\theta + k_{23}^* \sin\theta \\ k_{yz}^* &= k_{23}^* \cos\theta - k_{13}^* \sin\theta \\ k_{zx}^* &= k_{xz}^* \\ k_{zy}^* &= k_{yz}^* \end{aligned} \quad (13)$$

경사절리를 포함한 암반의 등가 열전도계수 행렬  $[k^*]_{(x, y, z)}$ 는 대칭성을 가지며 6개 독립성분들로 구성된 직교행렬(Orthotropic matrix)로서 2차 텐서(Second order tensor)의 특성을 지니고 있다. 이는 식(13)의  $k_{xx}^*, k_{yy}^*, k_{xy}^*$ 에 대한 표현이 2차원 응력의 좌표변환식과 일치하고 있다는 사실로부터 입증된다.

탄성이론에서는 응력과 변형률 즉 2차 텐서들을 4차 텐서(Fourth order tensor)인 탄성계수행렬이 연결시켜 주고 있으나 열전도 문제에서는 열류벡터와 온도구배벡터 즉 1차 텐서들간의 관계를 2차 텐서인 열전도 계수행렬이 연결시킨다는 차이점이 있다. 이러한 하위 차수로의 전환(Degeneration)에 의해 열전도 문제는 탄성 문제보다 훨씬 간단한 형태를 취할 뿐만 아니라 이 두가지 문제는 개념적으로도 응력 대 열류량, 변형률 대 온도구배, 변위 대 온도, 탄성계수 대 열전도계수, Elastic Compliance 대 열저항계수 등 상호 밀접한 대응관계에 있

다.<sup>5)</sup>

### 3. 열전달 전산모델

#### 3.1 열전달 지배 미분방정식과 경계조건!

전도 및 대류에 의한 물체의 열전달 거동에 관한 이론은 근본적으로 물체의 열에너지 보존의 법칙에 근거하고 있다. 즉 Fig. 3과 같이(x,

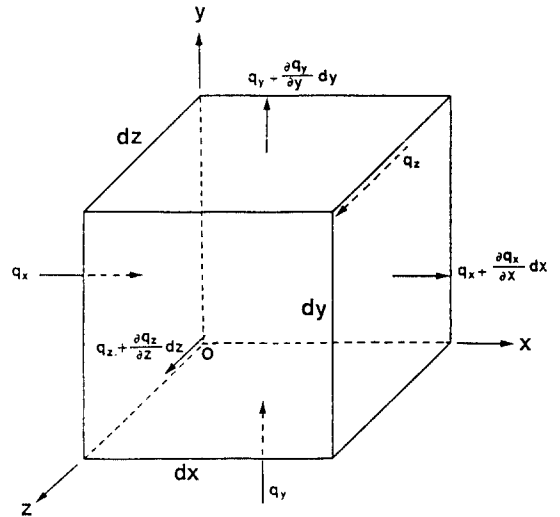


Fig. 3. Heat Flow through a Differential Volume Element( $dV = dx \, dy \, dz$ )

y, z) 직교좌표계에서 정의된 단위요소의 변장이  $dx, dy, dz$ , 체적  $dV = dx dy dz$ , 각 축방향의 열류량들  $q_x, q_y, q_z$ , 요소내부에 작용하는 체적열원(Volumetric heat source)을  $Q$ 라 할 때 이 단위요소가 받는 유효열류(Net heat flow)는 다음과 같다.

$$(Q - \partial q_x / \partial x - \partial q_y / \partial y - \partial q_z / \partial z) dV \quad (14)$$

이 유효열류에 의해 발생하는 열에너지 변화율은

물체의 비열(C), 밀도( $\rho$ ), 시간(t)에 따른 온도변화율 ( $\partial\phi/\partial t$ )에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$(\rho C \partial\phi/\partial t)dV \quad (16)$$

열에너지 보존법칙에 의해 (14)=(15)가 되는 조건과 식(11)에서 주어진  $q_x, q_y, q_z$ 에 대한 표현 그리고 식(13)에서 증명된 등가 열전도계수의 대칭성을 이용하면 다음과 같은 비정상 열전달 (Transient heat transfer)에 관한 지배방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} k_{xx}^* \partial^2\phi/\partial x^2 + k_{yy}^* \partial^2\phi/\partial y^2 + 2(k_{xy}^* \partial^2\phi/\partial x\partial y \\ + k_{yz}^* \partial^2\phi/\partial y\partial z + k_{xz}^* \partial^2\phi/\partial x\partial z) \\ + Q = \rho C \partial\phi/\partial t \end{aligned} \quad (16)$$

본 연구에서 다루는 전산모델실험은 2차원에서의 정상 열전달(Steady-state heat transfer) 문제에 그 범위를 한정하고자 한다. 따라서 상기 미분 방정식은 다음 형태를 취한다.

$$k_{xx}^* \partial^2\phi/\partial x^2 + k_{yy}^* \partial^2\phi/\partial y^2 + 2k_{xy}^* \partial^2\phi/\partial x\partial y + Q = 0 \quad (17)$$

2차원 및 3차원 열전도 해석은 주어진 열경계 조건하에서 미분방정식 (16)또는 (17)을 만족시키는 물체 내부의 온도분포(또는 열류량)를 계산하는 과정이다. 이때 물체의 외곽경계  $\Gamma$ 는 일반적으로 다음 3가지 형태의 경계조건을 취한다(Fig. 4).<sup>6)</sup>

(1)온도경계조건 : 외곽경계의 일부분  $\Gamma_1$ 에

지배방정식의 종속변수인 온도  $\phi(=\phi_0)$ 의 값이 주어질 경우. (2)열류경계조건 : 외곽경계의 일부분  $\Gamma_2$ 에 수직으로 작용하는 열류량  $q(=q_0)$ 의 값이 주어질 경우. (3)대류경계조건 : 외곽경계의 일부분  $\Gamma_3$ 에서 대류현상이 일어날 경우, 즉  $\Gamma_3$ 에서 대류에 의한 열손실(또는 유입) $q_c$ 가 주어질 경우. 경계면  $\Gamma_3$ 의 대류계수를  $h$ , 알고 있는 유체의 온도를  $\phi_f$ ,  $\Gamma_3$ 에서의 (미지의)온도를  $\phi_b$ 라 하면  $q_c = h(\phi_b - \phi_f)$ 가 된다. 따라서 이

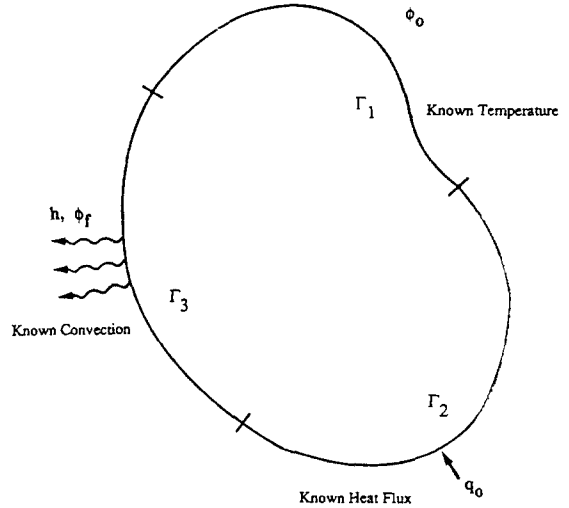


Fig. 4. Three Types of Thermal Boundary Conditions:  $\Gamma_1$ (Temperature),  $\Gamma_2$ (Heat Flux),  $\Gamma_3$ (Convection) Boundary Conditions

대류경계조건은 열류경계조건에서의  $q_c$ 대신  $q_c = h(\phi_b - \phi_f)$ 를 대입한 것과 같다. 2차원에서 이 두가지 경계조건을 표현하면 다음과 같다.

$$(k_{xx}^* \partial\phi/\partial x + k_{xy}^* \partial\phi/\partial y) \cos\theta + (k_{xy}^* \partial\phi/\partial x + k_{yy}^* \partial\phi/\partial y) \sin\theta = -M\phi_b + S \quad (18)$$

여기서 대류경계조건은  $M=h, S=h\phi_f$ , 열류경계조건은  $M=0, S=\pm q_0$ 를 취한다.<sup>7)</sup> 이때 (+)부호는 열유입, (-)부호는 열방출을 의미한다.

### 3.2 2차원 열전달 유한요소 프로그램

경계조건( $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ )를 만족시키는 미분방정식 (17)의 해를 구하는 수치해석범용 가장 효과적인 방법은 각 유한요소의 형상함수를 가중함수로 사용하는 Galerkin의 가중잔차법(Weighted residual method)이다. 미분법칙, 가우스의 발산정리, 경계조건 등을 이용하여 단일 유한요소에 이 Galerkin 방법을 적용하면 Galerkin의 잔차는 다음 형태를 취한다.

$$\{R^{(e)}\} = [K^{(e)}] \{\Phi^{(e)}\} - \{F^{(e)}\} \quad (19)$$

여기서  $[K^{(e)}]$ 와  $\{F^{(e)}\}$ 는 열경계조건에 의해 수정된 각 요소의 강성행렬과 힘벡터,  $\Phi^{(e)}$ 는 절점의 온도를 나타낸다. 이때 단일요소에 대한 잔차  $\{R^{(e)}\} = \{0\}$ 인 조건으로부터 얻어지는 방정식  $\{F^{(e)}\} = [K^{(e)}] \{\Phi^{(e)}\}$ 는 구조해석에서 보편적으로 사용되는  $\{F^{(e)}\} = [K^{(e)}] \{U^{(e)}\}$ 와 동일한 형태를 취한다.

다수의 절점과 요소로 구성된 유한요소망 전체영역에 대한 Galerkin의 잔차를 0으로 함으로써 전체 힘벡터(Global force vector)  $\{F\}$ 와 전체 온도벡터(Global temperature vector)  $\{\Phi\}$ 의 관계는 다음 표준형태를 취한다.<sup>8)</sup>

$$\{F\} = [K] \{\Phi\} \quad (20)$$

여기서  $[K]$ 는 전체 강성행렬(Global stiffness matrix)로서 요소 강성행렬 $[K^{(e)}]$ 의 성분들로 조합된 실정대칭(Symmetric positive definite) 행렬이다.

본 연구에서 사용한 열전달 유한요소 프로그램 HT2는 주프로그램과 4개의 부프로그램들로 구성되어 있다. 전체적인 계산과정은 Fig.5와 같다. 삼각형과 사각형의 2개 요소형태를 기초로 하여 작성된 이 프로그램은 모든 요소에 절리가 존재할 수 있다는 가정하에 전처리 과정에서 계산된 등가 열전도 계수행렬 $[k^*]$ 를 입력자료로 받도록 하였다. 먼저 요소와 절점에 관한 기본적인 입력자료로 부터 형상함수 $[N]$ 과 구배행렬  $[B]$ 를 계산한 다음 각 요소의 열전도계수를 이용하여 요소 강성행렬과 힘벡터를 계산한다(Subroutine ELSTIF). 이를 이용하여 1차적으로 전체 강성행렬 $[K]$  및 전체 힘벡터  $\{F\}$ 를 조립한 후 주어진 열경계조건을 적용하여 다시 수정한다(Subroutine ASSEM). 이 과정을 거쳐 형성된 방정식으로부터 가우스 전진소거와 후진대입법을 이용하여 해를 얻는

다(Subroutine DECOMP & SOLVE). 한편 온도 구배  $\{\partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y\}$ 는 위에서 얻어진 각 절점의 온도와 절점좌표로부터 계산되었고, 최종적으로 각 요소의 열전도계수와 온도구배를 이용하여 열류량을 계산하였다.

### 3.3 원형공동 주변암반의 온도분포

원형공동 주변암반의 응력분포는 굴착에 의한 응력집중현상과 열경계조건에 의한 열응력(Thermal stress)발생의 두가지 원인에 기인한다고 볼 수 있다. 전자에 관한 연구는 해석적 방법과 각종 실험을 통해 이미 정립된 상태에 있으며 터널과 갱도의 설계 및 시공 등 응용문제에 지침이 되는 기본적 개념을 제공해 왔다. 반면 후자의 경우 지열에너지 이용 및 고준위 핵폐기물처분 등의 연구분야에서 그 중요성이 인식되어 왔으나 아직 많은 연구를 필요로 한다.

열응력 해석과 그 응용에 앞서 다루어져야 할 사항에는 여러가지가 있으나 우선 다음 두가지 문제를 선정해 보았다. (1)등방 및 이방성 암반내에 원형공동을 굴착하고 여기에 열원을 위치시킬때 주변암반의 열역학적 거동을 정확히 예측하기 위해서는 어떠한 열경계조건을 선택해야 하며 이를 구체적으로 어떻게 적용할 것인가하는 모델설정의 문제. (2)유한요소법에 의한 열응력 해석의 신빙성은 1차적으로 정확한 온도계산에 의존한다고 볼 때 열전달 프로그램 HT2로부터 계산된 원형공동 주변의 온도분포는 얼마나 정확한가 하는 정확성 평가문제. 이 두가지 문제를 해결하기 위해 본 연구에서 시도한 실험내용은 첫째, 모델의 경계조건과 대상물질의 열전도성을 여러가지로 변화시키면서 등온선(Isotherm)의 변화를 고찰하였으며, 둘째, 유한요소법과는 별개의 독립된 이론식으로 부터 원형공동 주변의 온도를 예측하고 이를 유한요소 모델실험 결과와 비교하였



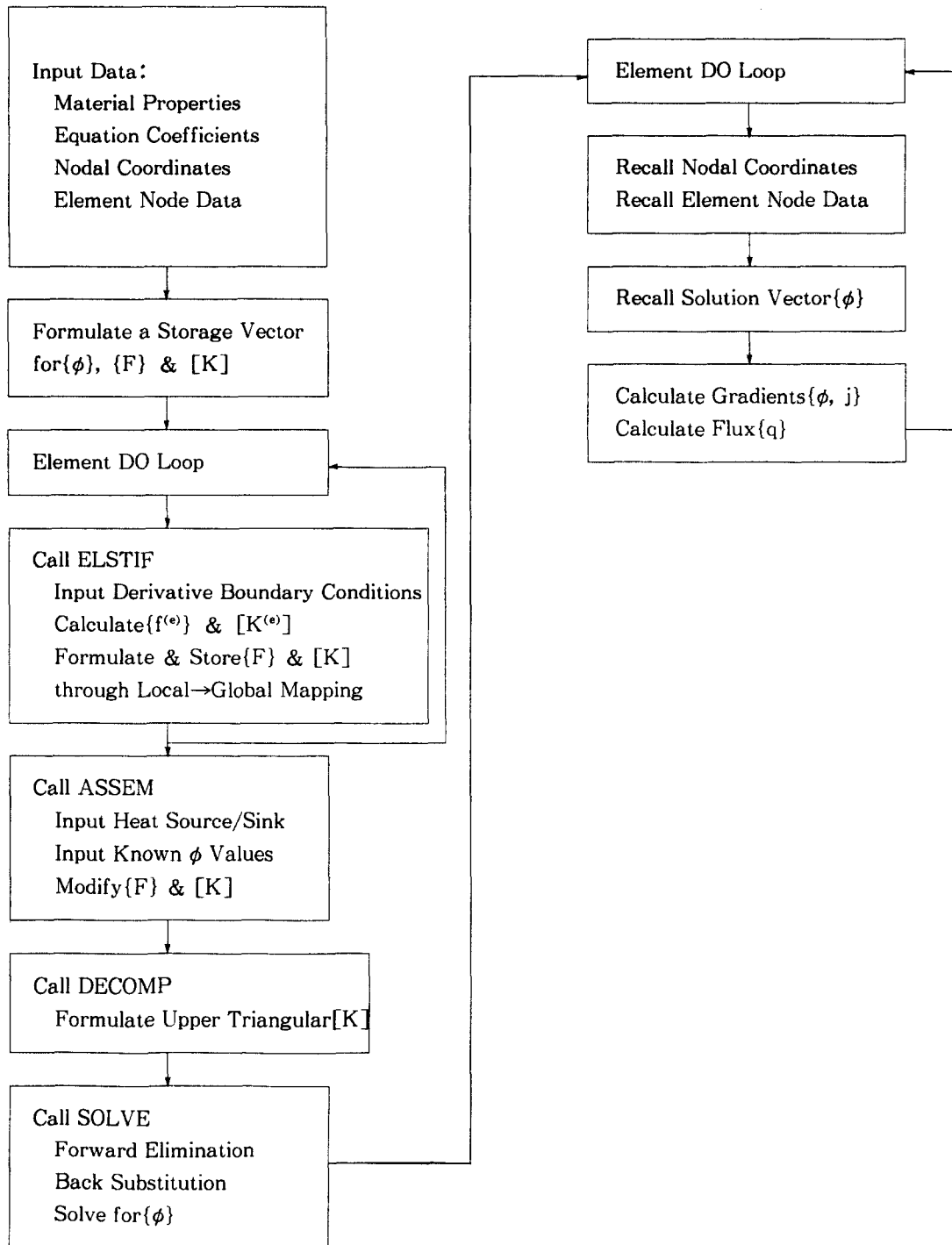


Fig. 5. Flow Diagram for HT2 Program

다.

본 실험에 사용한 모델은 가로 세로 52m의 정방형 영역에 직경 6.5m의 원형공동이 중앙에 위치하고 있으며 대칭성을 이용하여 그 1/4영역만을 유한요소망으로 설정하였다. 따라서 가로 세로 26m의 이 요소망은 193개의 요소와 284개의 절점으로 구성되었으며 공동반경의 8

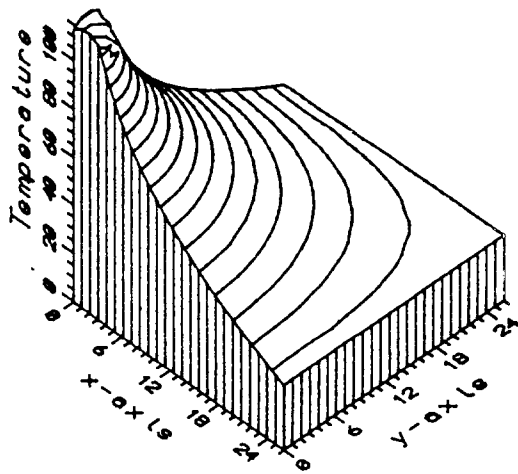
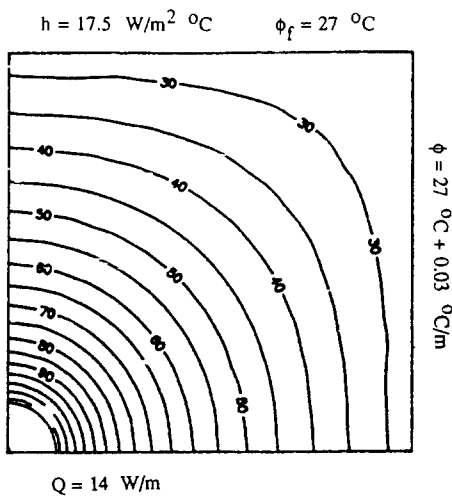


Fig. 6. Isotherms around a Circular Opening in Isotropic Rock Mass (Heat Output: 14W/m, Geothermal Gradient Considered)

배가 되는 위치에 외곽경계를 설치하였고 좌측과 하부 경계에는 대칭성에 의해 열교환이 차단되는 절연조건을 지정하였다. 상부경계를 지표면으로 가정하고 지면의 대류계수를  $17.5W/m^2$  °C, 대기온도를 27°C로 잡았으며, 우측경계는 지하증온율  $3°C/100m$ 에 따라 온도가 증가토록 하였다. 암석의 열전도 계수는  $2W/m^2$ 로 가정하였고 공동벽면에는  $14W/m$ 의 열원을 위치시켰다. 이때 계산된 절점의 온도를 등온선으로 나타내면 Fig.6과 같다. 공동의 벽면에서 최대 온도집중현상을 보이며 암반내 12m까지 동심원을 이루며 급격한 온도구배를 따라 감소하였으며 외곽경계에 가까워지면 이 온도구배는 점차 완만해지고 등온선의 형상도 원형에서 외곽경계의 형상(사각형)을 따라가는 경향을 보인다. 이 모델실험에서 지하증온율이 온도분포에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있을 정도이다. 한편 공동벽에 300°C, 외곽경계에 27°C의 온도를 지정할 경우에도 유사한 등온선 분포를 얻었다(Fig. 7).

이와는 대조적으로 이방성 암반의 경우 등온선 분포는 이방성의 정도에 따라 현저한 차이를 보였다. Fig.8은 수평/연직 열전도계수의 비 ( $k_{xx}/k_{yy}$ )가 10일 경우 얻어진 결과로서 연직 방향으로 급격한 온도변화를 보인다. 등온선은 열전달이 용이한 수평축을 장축으로 하는 타원형을 이룬다. 이러한 온도구배는 원형공동에 대한 응력해석에 있어 초기 수평응력이 연직응력보다 클 경우 발생하는 천정과 바닥에서의 높은 응력구배와 유사한 성격을 띄고 있다. Fig.9는 수평/연직 열전도 계수의 비가 100일 경우 얻어진 등온선 분포도로서 측벽에 나타나는 비교적 균일한 온도변화와 천정상부에서의 급격한 온도강하가 대조적이다.

한편 프로그램에서 계산된 온도의 정확도를 평가하기 위해 Thick-wall cylinder 문제를 모

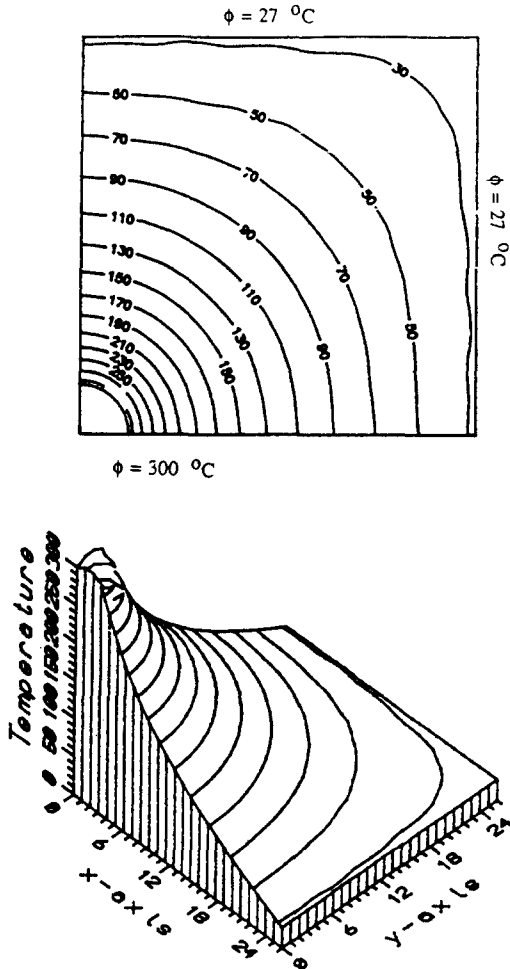


Fig. 7. Isotherms around a Circular Opening in Isotropic Rock Mass (300°C in the Opening, 27°C at the External Boundary)

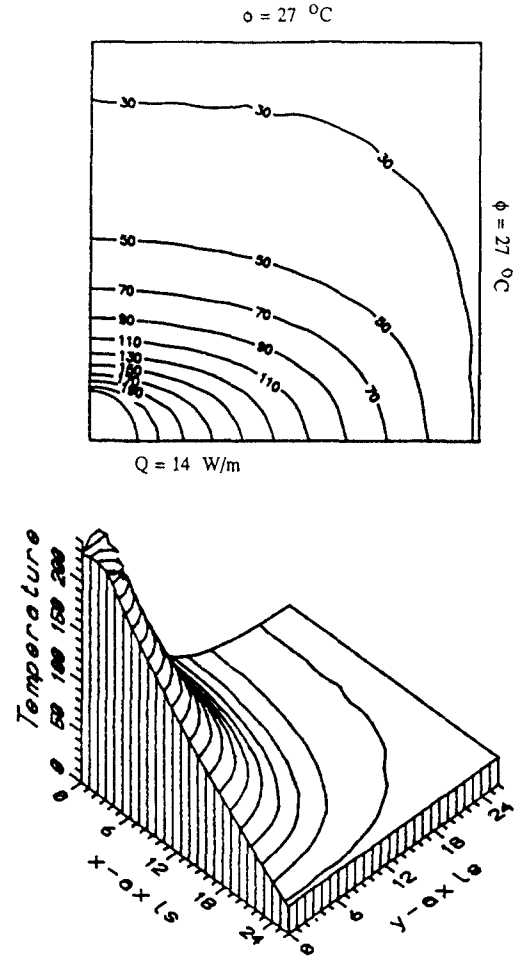


Fig. 8. Isotherms around a Circular Opening in Anisotropic Rock Mass ( $k_{xx}/k_{yy}=10$ , Heat Output: 14W/m, 27°C at the External Boundary)

델로 선택하였다. 정상 열전도를 가정할 경우 내경  $a$ , 외경  $b$ 를 가진 Thick-wall cylinder의 온도분포는 다음 이론식으로 표현된다.<sup>9)</sup>

$$T = (T_i - T_o) \log(b/r) / \log(b/a) \quad (21)$$

여기서  $r$ 은 공동중심으로부터 거리,  $T_i$ 는 원통 내벽의 온도,  $T_o$ 는 원통 외벽의 온도로서 본

연구에서는 0°C로 가정하였다. 내경  $a=3.25m$ , 외경  $b=26m$ , 공벽( $r=a$ )의 온도  $T_i=100°C$ , 외곽경계의 온도를 0°C로 지정했을 때 HT2 프로그램에서 계산된 절점의 온도와 식(21)을 이용하여 얻어진 온도를 비교한 결과 0.05%이내의 정밀도가 입증되었다.

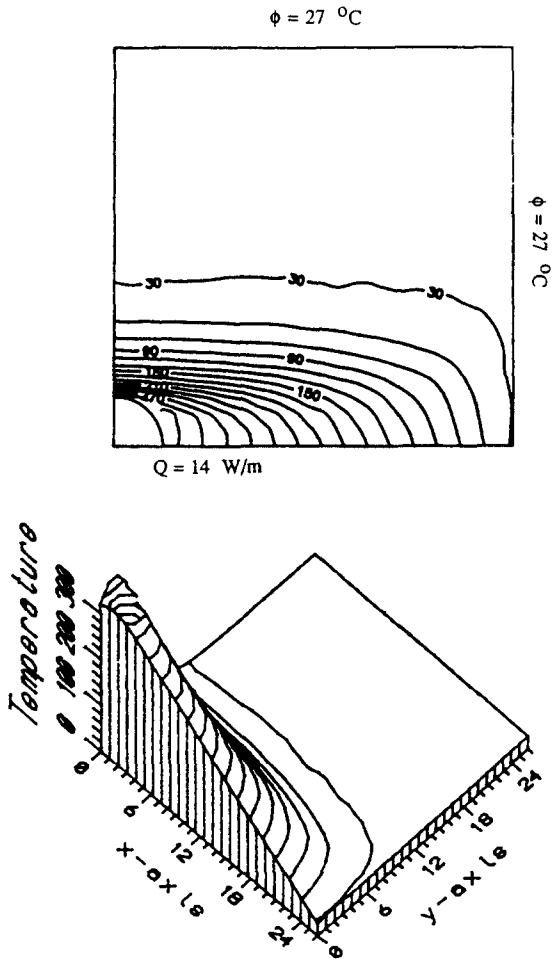


Fig. 9. Isotherms around a Circular Opening in Anisotropic Rock Mass ( $k_{xx}/k_{yy} = 100$ , Heat Output :  $14W/m$ ,  $27^{\circ}C$  at the External Boundary)

### 3.4 불균질 이방성 암반내 온도분포

열전달 해석의 대상암반으로서 엄밀한 의미에서 균질 등방성을 만족시킬 수 있는 토질조건은 현실적으로 찾기 어렵다. 따라서 모델을 실제 현장 지질조건에 근접시키기 위한 방법으로 우선 층상 지질구조를 가정하였으며 각 지층마다 상이한 이방성 열전도계수를 부여하였

다. 두께 28m의 지층 중심에 직경 6.5m의 원형공동을 설치하고 상하부에 14m두께의 다른 암층을 가정하였다. 공동벽의 온도는  $300^{\circ}C$ 를 유지한다고 보았으며 외곽경계의 온도는  $27^{\circ}C$ 로 가정하였다. Fig. 10은 1/4대칭성을 이용하여 제작된 유한요소망으로서 284개의 절점과 513개의 요소로 구성되었으며 상부지층을 지층(1), 원형공동이 위치한 지층을 지층(2)로 명명하였다.

이방성 불균질 층상 암반의 경우 각 지층의 열전도계수를 모두 이방성으로 하고 그 이방성의 정도를 증가시킬 때 등온선이 어떻게 변화하는지 알아보았다. Table 1의 처음 세가지 경우(Case 1, Case 2, Case3)는 지층(1)의 수직/수평 열전도계수의 비율 증가시켰다. 이 여섯개 상이한 모델중 Case 1과 Case 3의 등온선 분포를 비교한 결과는 Fig.11과 같다. 즉 층상 암반의 온도분포는 열원이 설치된 지층의 이방성에 따라 매우 민감하게 변화함을 알 수 있

Table 1. Anisotropic Thermal Conductivity Coefficients Used for Heterogeneous (Layered) Rock Mass Models

Model	Layer	$k_{xx}(W/m^{\circ}C)$	$k_{yy}(W/m^{\circ}C)$
Case 1	(1)	1	2
	(2)	0.5	1
Case 2	(1)	1	2
	(2)	0.25	1
Case 3	(1)	1	2
	(2)	0.125	1
Case 3	(1)	0.5	1
	(2)	1	2
Case 5	(1)	0.25	1
	(2)	1	2
Case 6	(1)	0.125	1
	(2)	1	2

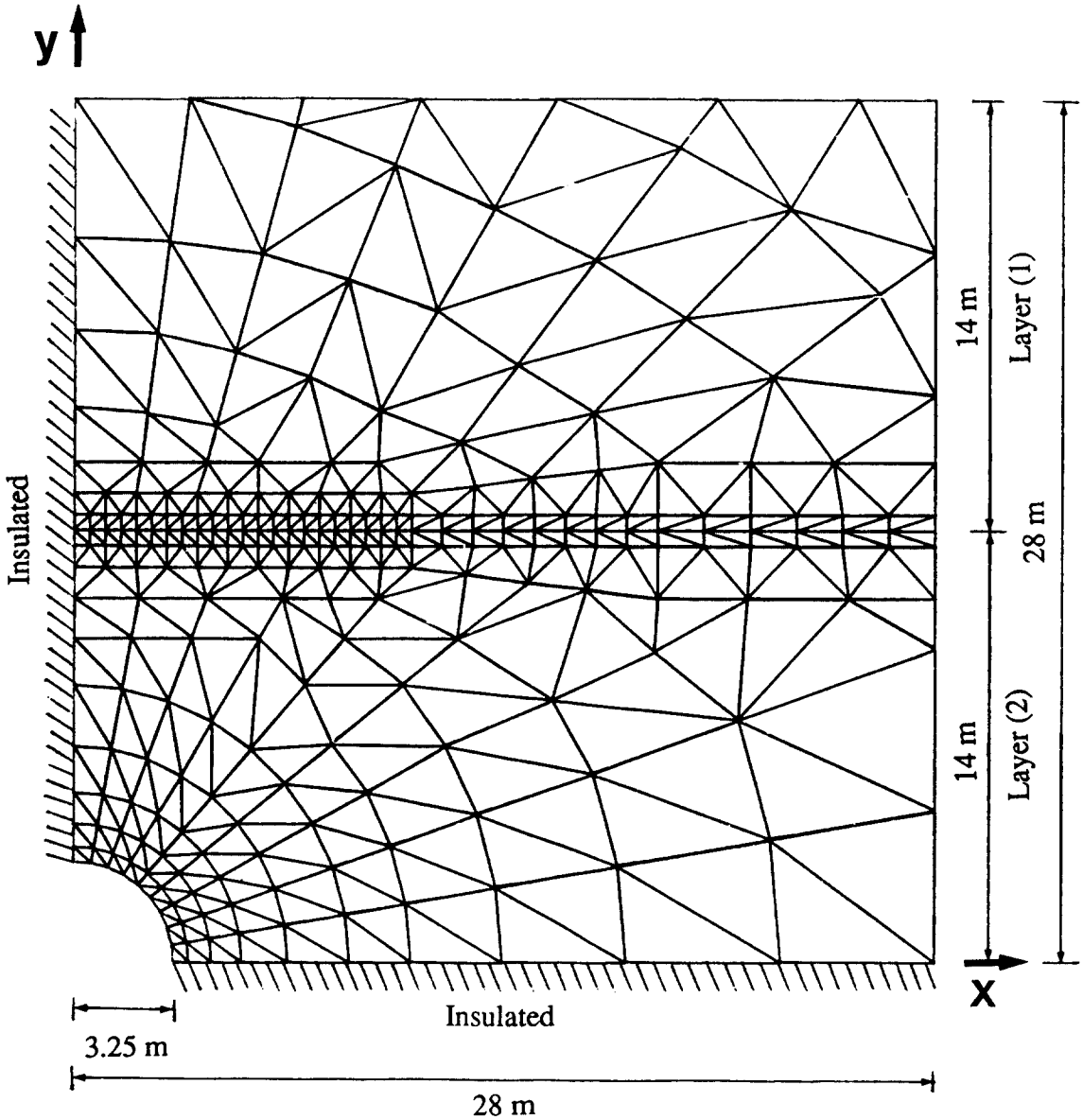


Fig. 10. A Finite Element Mesh Used to Study the Effects of Thermal Anisotropy and Heterogeneity on the Temperature Distribution around a Circular Opening

다. 반면 Case4와 Case6을 비교한 결과(Fig. 12)에 의하면 열원과 직접 접하지 않은 지층의 이방성은 등온선 분포에 별 영향을 주지 못함을 알 수 있다. Fig.13과 Fig.14는 지층경계에서의 온도구배의 불연속성을 나타내며 이는

지층(1)(2)의  $y$ 축방향의 열전도계수의 차이( $k_{yy}^{(2)}/k_{yy}^{(1)}=0.5$  또는 2)에 기인한다. Table2는 각 지층의 이방성  $k_{yy}/k_{xx}=2$ 로 일정하게 유지하면서 지층간 불균질성( $k_{yy}^{(1)}/k_{yy}^{(2)}$  또는  $k_{yy}^{(2)}/k_{yy}^{(1)}$ )을 2에서 8까지 증가시켜 본 여섯가지 실험

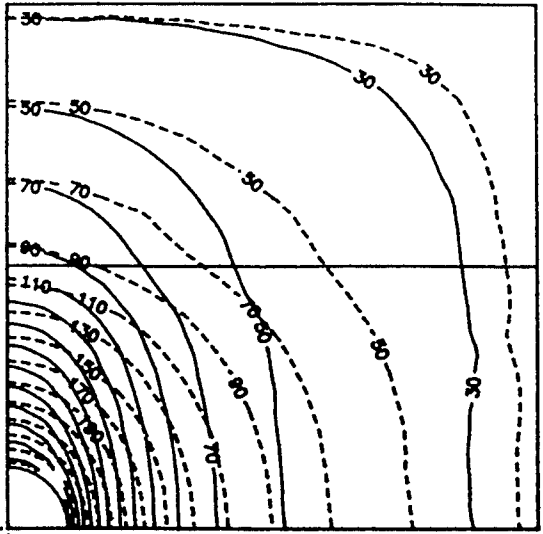


Fig. 11. Isothermal Comparison between the Case 1 and Case 3:  
Case 1:..... Case 3:—

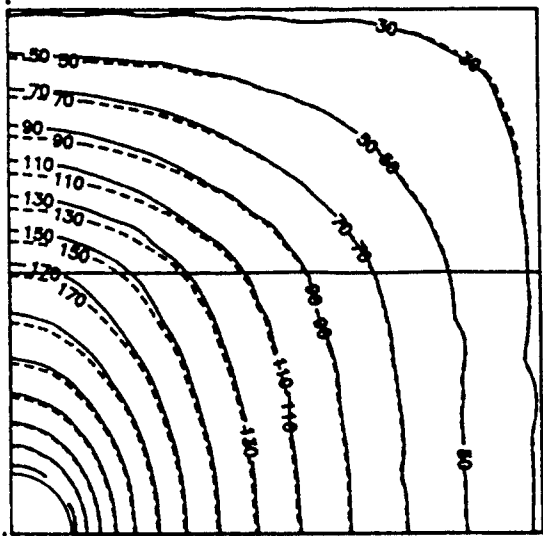


Fig. 12. Isothermal Comparison between the Case 4 and Case 6:  
Case 4:..... Case 6:—

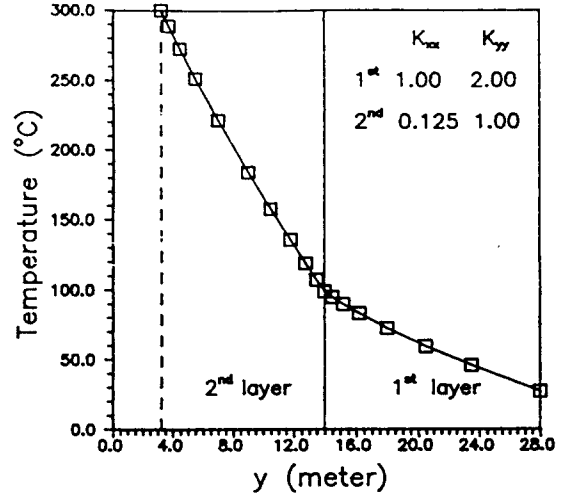


Fig. 13. Temperature Gradient across the Bedding Plane for the Case 3

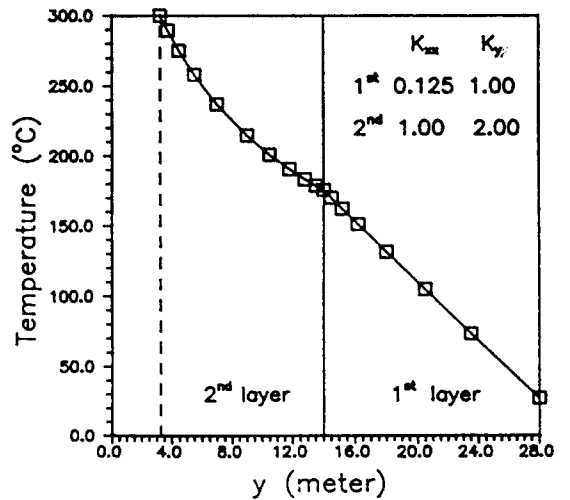


Fig. 14. Temperature Gradient across the Bedding Plane for the Case 6

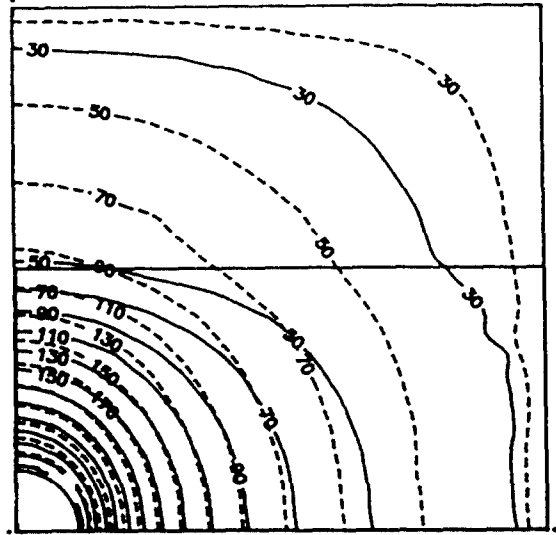
계획이다. 처음 세가지 경우(Case 7, Case 8, Case9)는 열원에 인접한 지층(즉 지층(2))의 열전도계수가 지층(1)보다 2, 4, 8배 낮아지는 경우이며 나머지는(Case 10, Case 11, Case 12)는 반대로 지층(1)의 열전도 계수가 지층(2)보다

2, 4, 8배 낮아지도록 하였다. Case7과 Case9

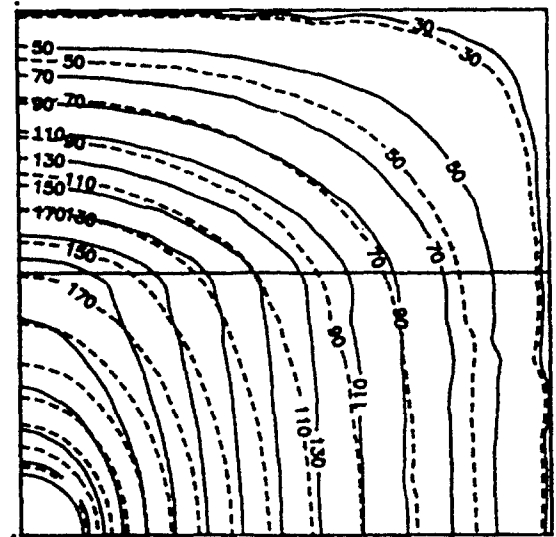
**Table 2. Anisotropic Thermal Conductivity Coefficients Used for Heterogeneous (Layered) Rock Mass Models**

odel	Layer	$k_{xx}(W/m^{\circ}C)$	$k_{yy}(W/m^{\circ}C)$
Case 7	(1)	1	2
	(2)	0.5	1
Case 8	(1)	1	2
	(2)	0.25	0.5
Case 9	(1)	1	2
	(2)	0.125	0.25
Case 10	(1)	0.5	1
	(2)	1	2
Case 11	(1)	0.25	0.5
	(2)	1	2
Case 12	(1)	0.125	0.25
	(2)	1	2

를 비교한 결과 열원에 접한 지층의 열전도계수가 낮아질수록 공동 주변의 온도구배는 높아지며 고온대의 발달이 열원 주변에만 국한되는 경향을 보인다(Fig.15). 한편 Case10과 Case12를 비교하면 열전도성이 양호한 지층에 열원을 설치할 경우 그 외곽 지층의 열전도계수가 낮아질수록 고온대의 범위는 상대적으로 넓어지는 경향을 보인다(Fig.16). Case9와 Case12의 경우 층리면을 경계로 나타나는 온도구배의 불연속 현상은 Fig. 17, Fig. 18과 같다. 이 불연속 현상의 주된 원인은 층리면에 수직인 방향의 열전도계수  $k_{yy}$ 의 불균질성(즉  $k_{yy}^{(2)}/k_{yy}^{(1)} = 0.5$  또는 2)에 있다.



**Fig. 15. Isothermal Comparison between the Case 7 and Case 9:**  
Case 7:..... Case9:—



**Fig. 16. Isothermal Comparison between the Case 10 and Case 12:**  
Case 10:..... Case12:—

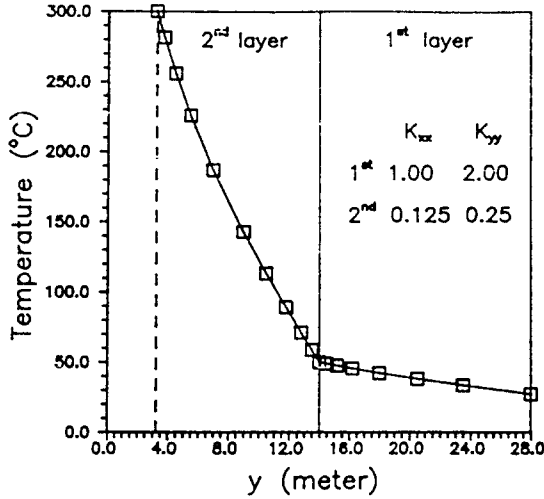


Fig.17. Temperature Gradient across the Bedding Plane for the Case 9

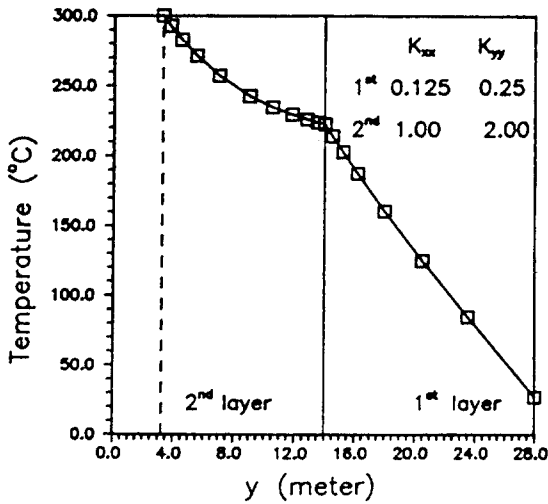


Fig.18. Temperature Gradient across the Bedding Plane for the Case 12

#### 4. 熱應力 解析

##### 4.1 열응력 유한요소 프로그램

유한요소법을 이용한 전통적인 지하구조물

해석은 공동굴착에 의한 초기 현장응력의 재분배 및 응력집중과 주변암반의 안정성 평가에 관심의 초점을 두고 있다. 열응력 해석은 굴착에 의한 응력 변화에 추가하여 암반의 온도상승(또는 하강)에 의한 열팽창(또는 수축)과 이에 수반된 열변형률과 열응력을 계산하여야 하고 이 두가지 응력을 종합하여 안전계수를 산출하는 과정이 필요하게 된다.

본 연구에서 사용된 온도-굴착연결(Temperature-excavation coupled) 프로그램 U2HT는 주프로그램과 8개 부프로그램들로 구성되어 있다. 이 중 전통적인 탄소성 응력해석과 구별되는 프로그램상의 특징은 부프로그램 TMODUL과 TFORCE이다. 이 두개의 부프로그램은 열전달 프로그램 HT2에서 계산된 요소망의 온도분포를 입력자료로 이용하여 열응력, 열변형률 및 절점의 변위와 합을 계산하고 그 결과는 다시 주프로그래에 돌아가 굴착에 대한 응력해석 과정과 합류하여 안전계수를 계산한다. U2HT의 전반적인 계산과정은 Fig.19와 같다.

##### 4.2 원형공동 주변암반의 열응력분포

본 연구에 사용된 열응력해석 프로그램(U2HT)의 신빙성을 확인하기 위해 Thick-wall cylinder문제를 선택하였다. Timoshenko & Goodier에 의한 Thick-wall cylinder열응력 문제의 일반해<sup>9)</sup>로부터 다음과 같은 2차원 축대칭 평면변형률 조건에서의 열응력해를 유도하였다.

$$\sigma_r = [(1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu)] [\epsilon_r + (\nu/(1-\nu))\epsilon_\theta - ((1+\nu)/(1-\nu))\alpha T] \quad (22)$$

$$\sigma_\theta = [(1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu)] [\epsilon_\theta + (\nu/(1-\nu))\epsilon_r - ((1+\nu)/(1-\nu))\alpha T] \quad (23)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha ET \quad (24)$$



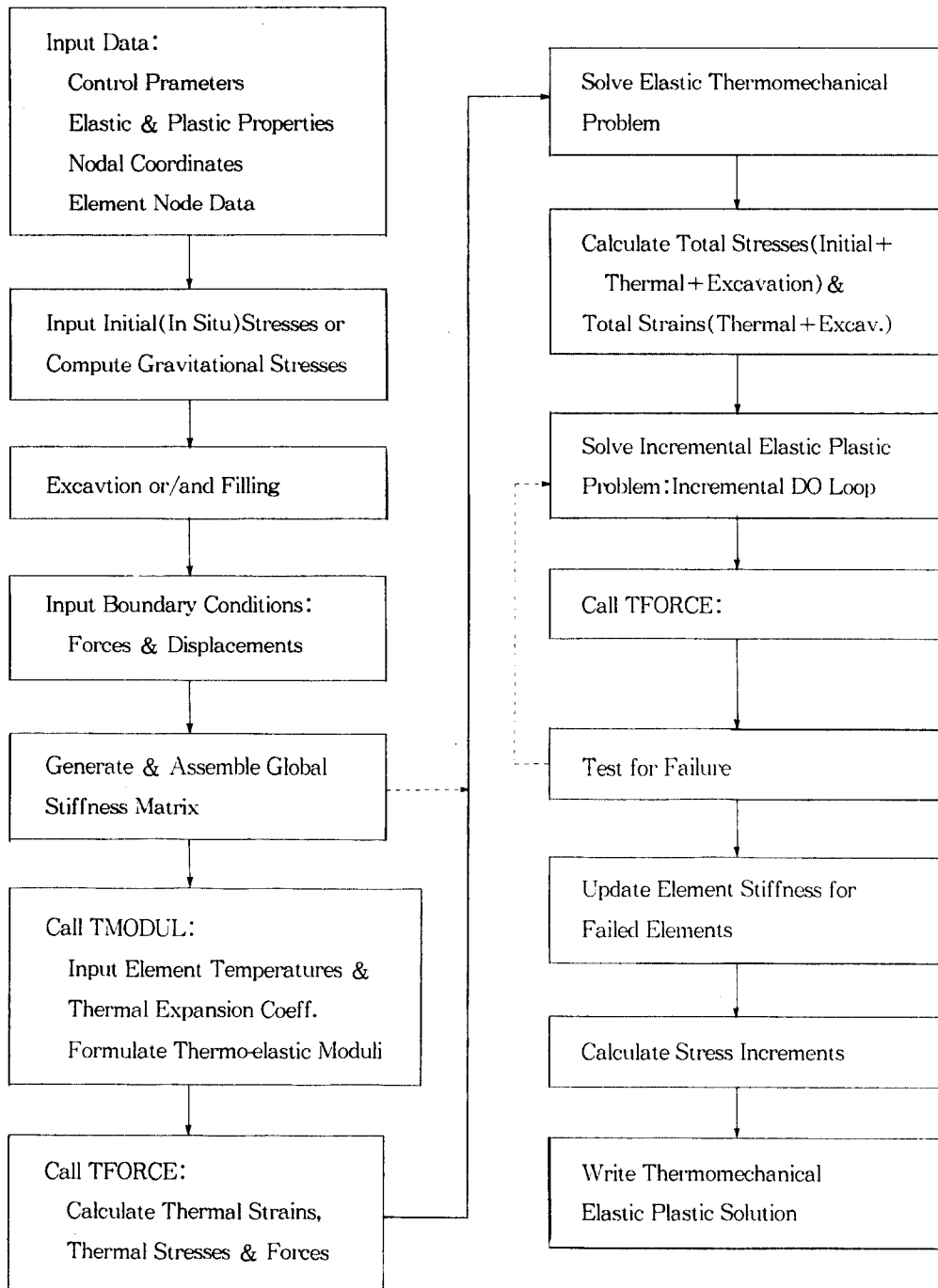


Fig. 19. Flow Diagram for U2HT Program

여기서  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ 는 각각 Radial stress, Circumferential stress, Axial stress; E는 Young율,  $\nu$ 는 Poisson비,  $\alpha$ 는 열팽창계수, 온도 T는 식(2)로부터 계산되며 Radial strain  $\epsilon_r$ , circumferential strain  $\epsilon_\theta$ 는  $\epsilon_r = \partial_r u$ ,  $\epsilon_\theta = u/r$ 이고 Radial displacement u는 다음과 같이 표현된다.

$$u = [\alpha(1+\nu)] \left[ \frac{(T_i - T_o) \log(b/a)}{(r/(b^2 - a^2))((1 - 3\nu)/(1 + \nu))} + \frac{(b^2 - a^2)/4 - (a^2 \log(b/a))/2}{(1/r)[(b^2 - a^2)/4 - (a^2 \log(b/a))/2] + (1/r)} + \frac{(a^2/(b^2 - a^2))}{(1/r)[(b^2 - a^2)/4 - (a^2 \log(b/a))/2] + (1/r)} + \frac{(r^2 \log(b/r)/2 - (a^2 \log(b/a))/2 + (r^2 - a^2)/4)}{(1/r)[(b^2 - a^2)/4 - (a^2 \log(b/a))/2] + (1/r)} \right] \quad (27)$$

식(22), (23), (24)으로부터 계산된 열응력과 UHT 프로그램을 실행하여 얻어진 응력을 비교하였다. Fig. 20은 수평축으로부터의 각도  $\theta = 45^\circ$

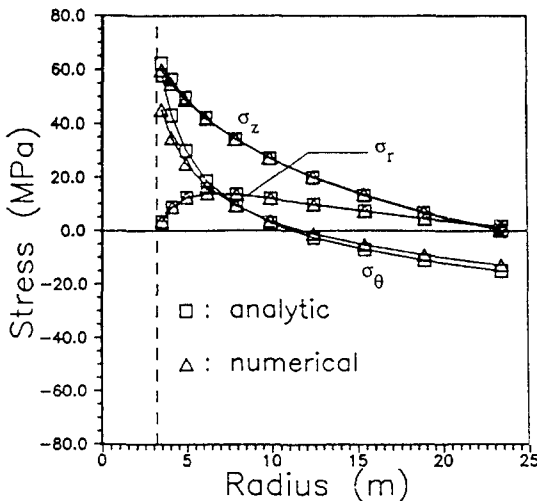


Fig.20. Comparison between Analytic and Numerical Solutions of Thermal Stresses around a Circular Hole( $\theta = 45^\circ$ )

에서의 각 응력성분  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ 의 변화를 비교한 결과로서 공벽에 인접한 지점을 제외하고 일반

적으로 잘 일치하고 있다. 공벽 근처에서의 차이는 주어진 반경 r에서의 Point stress와 체적(면적)을 가진 각 요소의 평균응력을 비교함으로써 발생하는 결과로서 이는 특히 응력구배가 심한  $\sigma_\theta$ 의 경우 두드러지게 나타난다. 균열선단(Crack tip)에서의 응력을 이론과 수치해석으로 비교할 때에도 이와 같은 현상이 일어난다.<sup>10)</sup>

열원이 위치한 원형공동 주변의 열응력의 특징은 이론에서 예측된 바와 같이 각도  $\theta$ 에 무관하다. 반경 r이 증가함에 따라  $\sigma_r$ 는 압축응력에서 인장응력상태로 전환하며,  $\sigma_\theta$ 는 압축응력으로서 약간 증가하는 경향을 보이다가 점차 감소하며 원통 내벽과 외벽에서 0에 수렴한다. 축응력  $\sigma_z$ 는 원통내벽에서  $\sigma_\theta$ 와 일치하며 반경이 증가하면서 점차 감소하여 외벽에서 0에 수렴한다.

### 4.3 고온 고압 조건에서의 원형공동 주변압반의 안정성

심부암반에 원형공동을 굴착하고 여기에 고온의 열원을 설치할 경우 공동 주변압반의 열역학적거동 및 안정성을 파악하기 위해 평면변형을 조건하에서 2차원 모델실험을 수행하였다. 가로 세로 54m의 영역을 대상으로 하여 그 중심에 직경 6m의 원형공동을 위치시켰다. 이 영역의 상부 경계는 지표로부터 500m하부에 위치하도록 하였으며 심도에 따라 증가하는 초기 현장응력과 지온상승율을 감안하여 1/2대칭 유한요소망을 제작하였다(Fig.21). 가로 27m 세로 54m의 이 요소망은 336개의 요소와 349개의 결점으로 구성되었으며 공동내부의 요소들은 굴착과정에서 공기로 치환되도록 하였다.

이 모델은 사암 암반을 대상으로 하였으며 사용된 열탄성 및 강도는 다음과 같다. Young

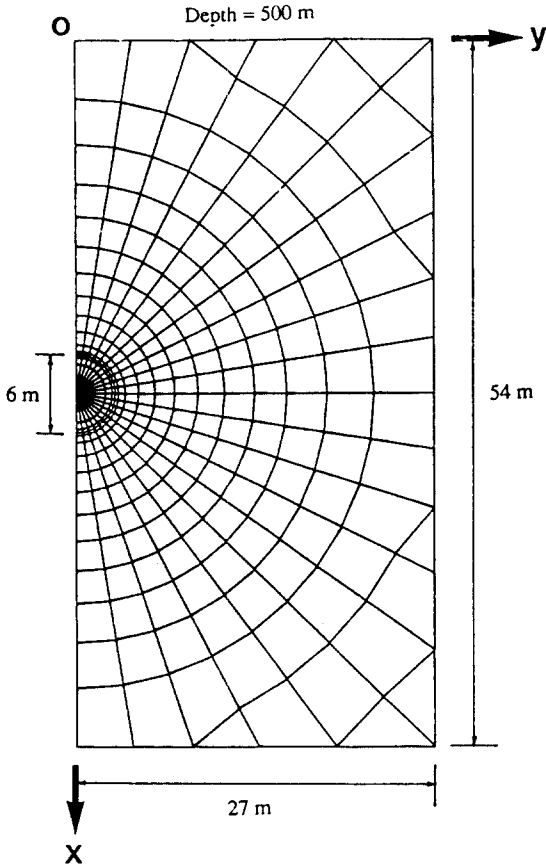


Fig.21. A 2-D Finite Element Mesh Used for Elastic Plastic and Thermomechanical Stability Analysis of a Circular Hole

을  $E=65\text{GPa}$ , 전단탄성계수  $G=27\text{GPa}$ , Poisson비  $\nu=0.2$ , 열팽창계수  $\alpha=8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 압축강도  $C_0=108\text{MPa}$ , 인장강도  $T_0=15.1\text{MPa}$ , 전단강도  $R_0=23.3\text{MPa}$ , 암석의 단위중량  $\gamma=27\text{KN/m}^3$ . 초기 현장응력은 지표로부터 각 요소의 중심점까지의 심도  $H$ 와 암석의 단위중량 및 Poisson비를 이용하여 계산하였다. 공동이 굴착되기 전 (i)번 요소의 연직응력은  $(\sigma_x)_0^{(i)} = \gamma H^{(i)}$ , 횡구속(Lateral confinement)을 가정한 각 요소의 수평응력은  $(\sigma_y)_0^{(i)} = (\sigma_z)_0^{(i)} = [\nu/(1-$

$\nu)]\gamma H^{(i)}$ 로부터 계산되었다.

공동 굴착만을 수행했을 경우 주변암반의 변위벡터, 주응력벡터 및 안전계수는 Fig. 22, Fig.23, Fig.24와 같다. 천정상부 암반의 침하와

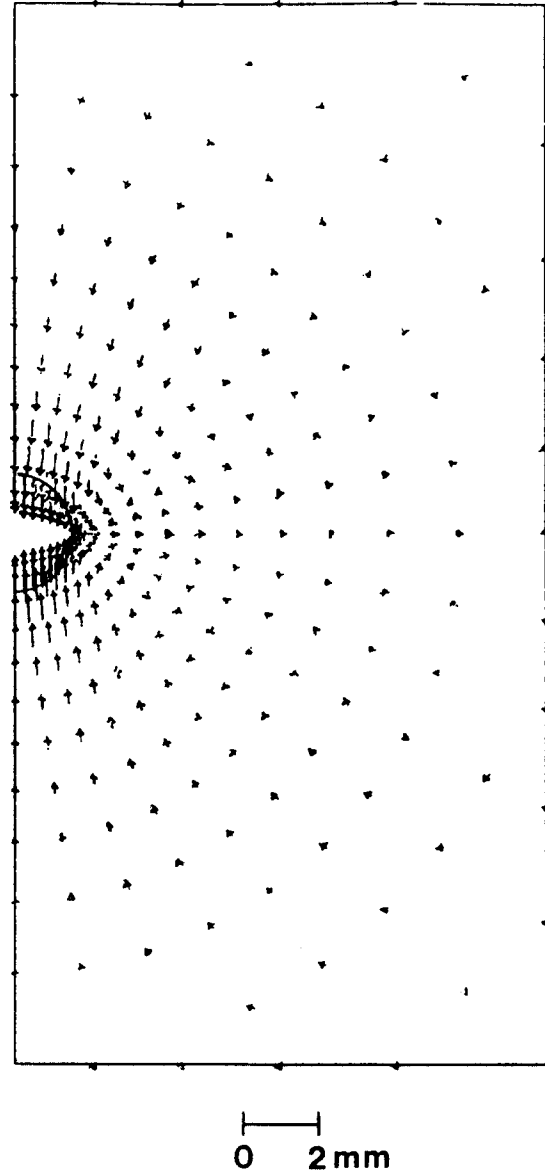


Fig.22. Deformation of the Rock Mass due to Excavation of a Circular Hole(Elastic Plastic Analysis)

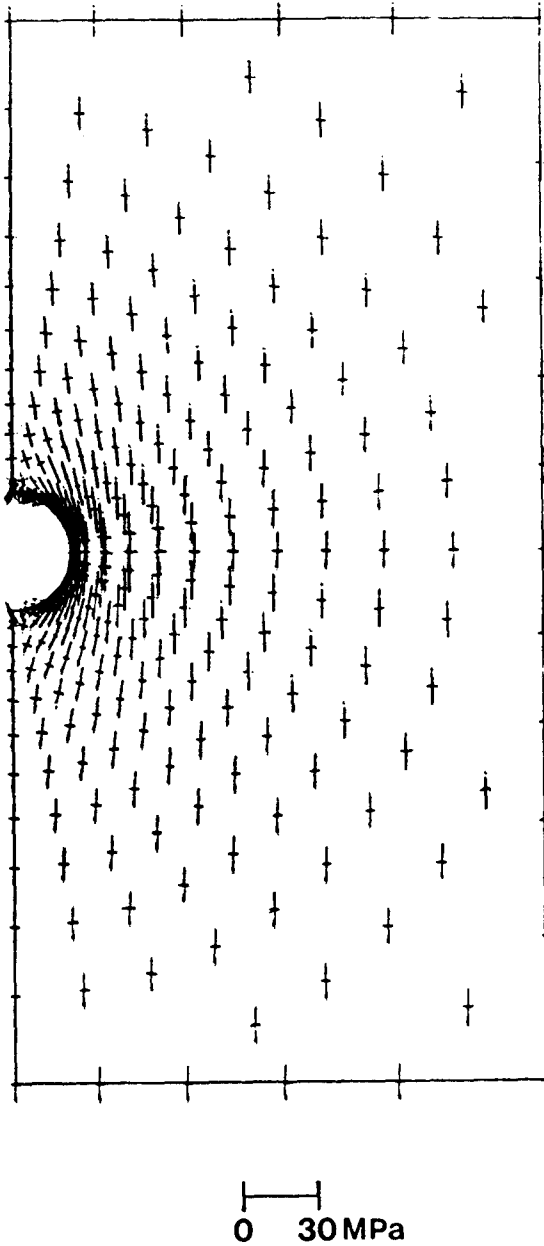


Fig.23. Major & Minor Principal Stresses due to Excavation of a Circular Hole(Elastic Plastic Analysis)

바닥상승으로 인해 변형후 공동의 형상은 타원형으로 변하며 양측벽은 바깥으로 밀려 나가는

경향을 보인다. 응력재분배에 의한 공동주변에서의 주응력 분포상태는 양측벽에서 33MPa의 최대 압축응력이 발생하였고 천정과 바닥에서 부분적으로 약간의 인장응력이 발생하였다(최대 0.64 MPa). 공동 주변압반의 안전계수는 그 분포 특성상 3개 지역으로 분류할 수 있다. 즉 양측벽 굴착면 부근에서의 안전계수는 2-4

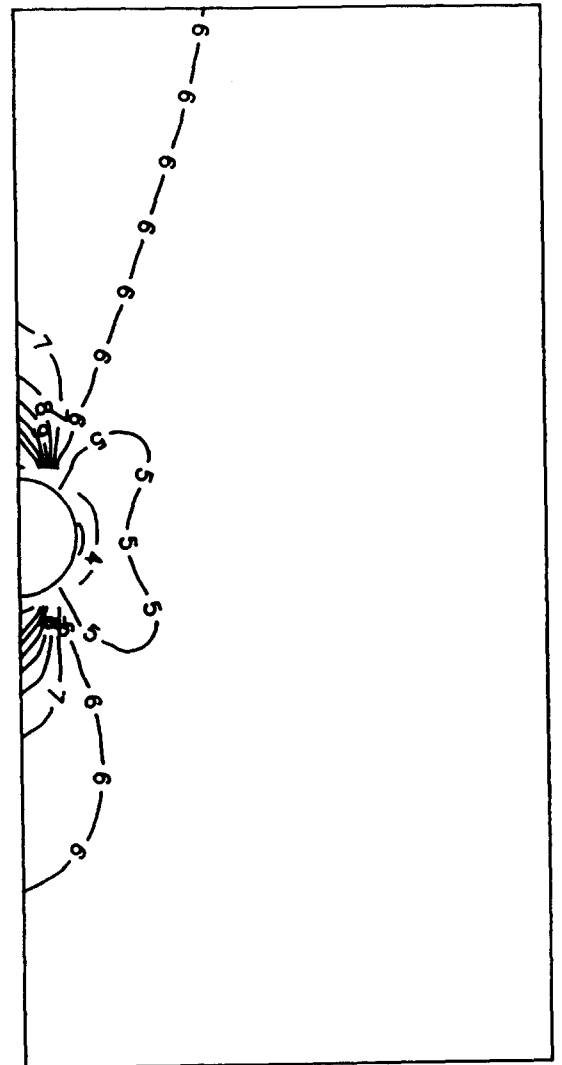


Fig. 24. Safety Factor Contours around a Circular Hole(Mechanical Elastic Plastic Analysis)

로서 안전성이 가장 불량한 지역에 속한다. 반면 천정상부와 바닥하부 암반에서는 7-19의 높은 안전계수를 유지하는 지역이다. 여타지역은 안전계수 5-6이 분포하며 암반 전체가 탄

성 거동을 보인다.

굴착된 원형공동에 100°C의 열원을 설치할 경우 암반의 변형과 주응력 및 안전계수를 분석하여 보았다(Fig. 25, Fig.26, Fig. 27). 변형

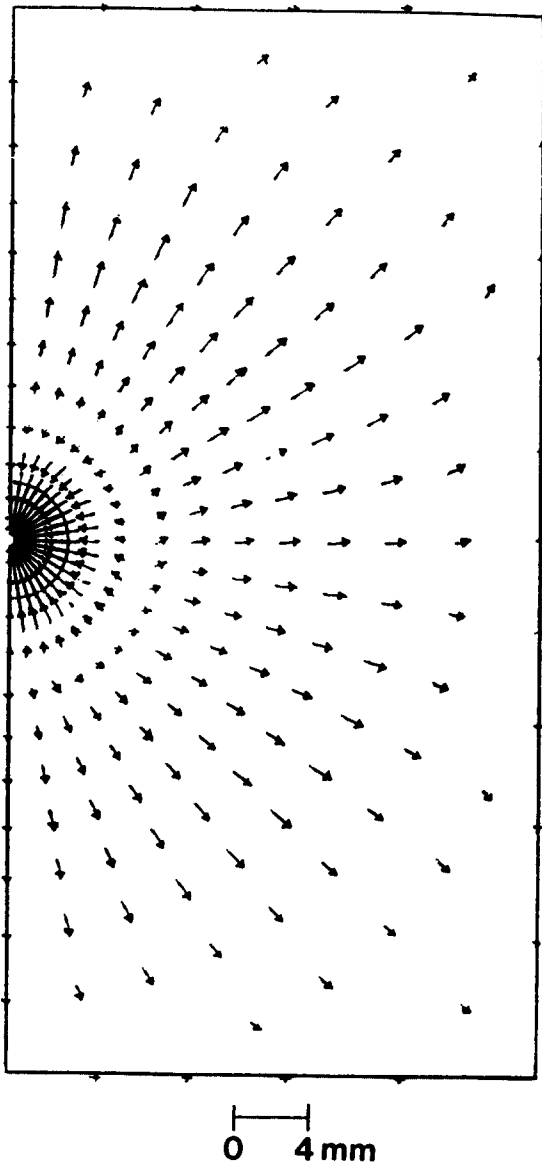


Fig. 25. Deformation of the Rock Mass due to Thermal Loading & Excavation of a Circular Hole(Thermomechanical Elastic Plastic Analysis)

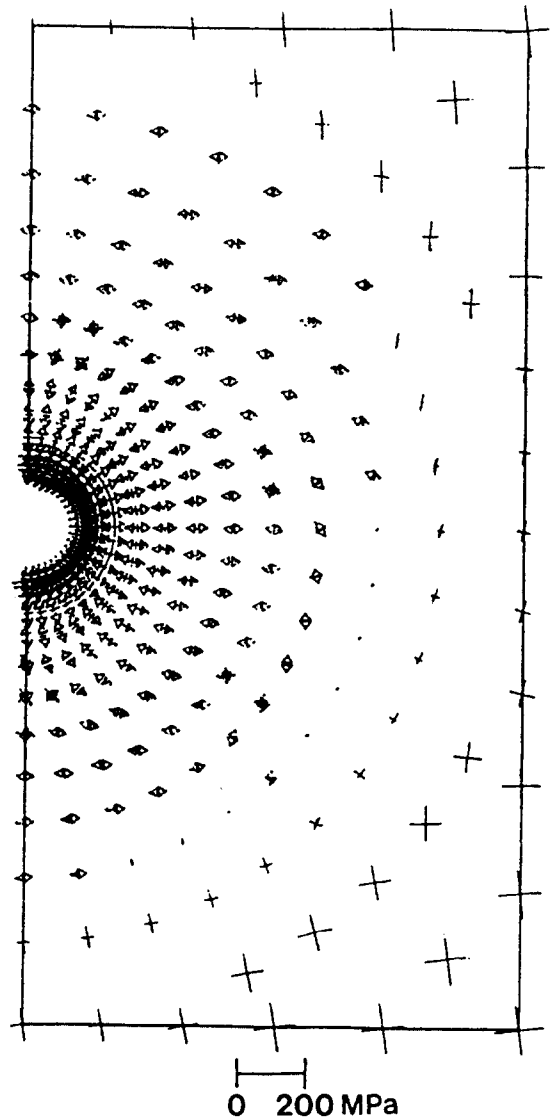


Fig.26. Major & Minor Principal Stresses due to Thermal Loading & Excavation of a Circular Hole(Thermomechanical Elastic Plastic Analysis)

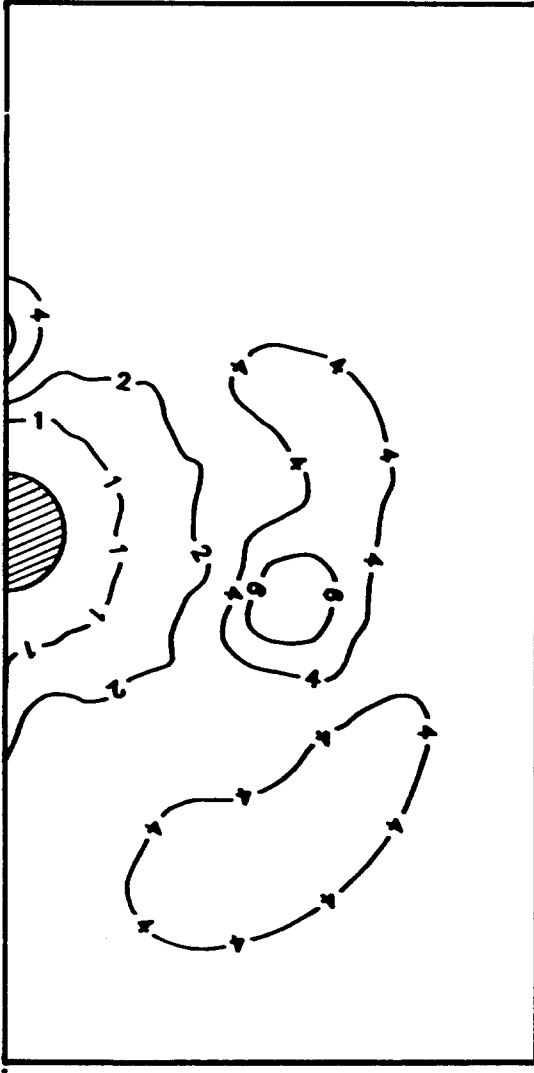


Fig. 27. Safety Factor Contours around a Circular Hole due to Excavation and Thermal Loading (Thermomechanical Elastic Plastic Analysis)

거동의 특징은 공동중심으로부터 반경 7m의 원을 경계로 그 내부에서는 공동 안쪽으로 외부에서는 바깥으로 변형하는 특이한 현상을 보였다. 이와 같은 변형특성은 열응력 분포에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그 결과 공동 주변에 인장-압축의 2축 응력상태(Tension-

compression biaxial state of stress)가 발생하였고 외곽경계에 가까워지면서 최대 최소 주응력은 모두 압축 응력상태가 되었다. 공동벽에서 Circumferential stress는 압축응력으로, Radial stress는 인장응력으로 작용하고 있으며 심한 열응력 집중현상을 보인다. 이 응력은 공동에서 멀어짐에 따라 점차 소멸되는 경향을 보이며 반경 23m에서부터 외곽경계의 영향을 받아 압축응력 상태로 전환되었다. 한편 안전계수 분포상태는 공동벽에서 약 5m까지 안전계수 1이하의 소성대가 분포하며 그 바깥에서는 전반적으로 탄성 거동을 보인다. 이 해석결과는 온도의 영향을 무시하고 굴착만을 해석한 결과(Fig. 24)와 좋은 대조를 이룬다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1)현장 암반에 분포하는 미소균열, 절리, 층리, 단층 등 다양한 크기의 불연속면들은 암반의 역학적 성질뿐만 아니라 열적 성질에도 중요한 영향을 미친다. 특히 암반의 열전도계수는 불연속면의 방향과 밀도에 기인하는 구조적이방성을 띄게 된다. 본 연구에서는 이 이방성 열전도계수를 예측하는 이론적 방법을 개발하고 전산 프로그램화 하였다. 9개 성분으로 구성된 절리 암반의 일반 이방성 등가 열전도계수행렬은 절리와 암석의 열전도성과 절리의 밀도(체적분율)및 경사각에 의해 결정된다.

(2)일반 이방성 열전도 특성을 가진 불연속 암반의 온도분포를 계산하는 2차원 열전달 유한요소 프로그램 HT2를 작성하고 온도, 열류, 대류 등 열경계 조건하에서 신빙성 시험을 수행하였다.

암반의 열전달 이방성이 원형공동 주변암반

의 등온선 분포에 미치는 영향을 분석하고 이를 등방성 암반의 경우와 비교함으로써 불연속면에 의한 구조적 이방성의 중요성을 확인하였다. 원형공동에 고온의 열원이 설치될 경우 주변암반의 등온선 분포는 등방성 암반의 경우 동심원, 이방성 암반의 경우 타원형을 이루며 이 타원의 장단축은 열전도 이방성의 축과 일치한다. 총상 암반 전체의 온도분포에 가장 큰 영향을 주는 변수는 열원에 바로 인접한 지층의 열전도계수와 이방성의 정도였으며 층리면에서 관찰된 온도구배의 불연속성은 지층경계에 수직한 방향으로의 열전도계수의 차이 즉 불균질 열전도성에 기인한다.

(3)탄소성 열응력해석을 위해 작성된 2차원 유한요소 프로그램 U2HT를 이용하여 열원이 위치한 원형공동 주변암반의 열응력 분포를 파악하였으며 유도된 Thick-wall cylinder의 이론해와 비교하였다. 심부 암반내 핵폐기물 동굴처분과 같은 고온 고압 조건에서의 암반의 열역학적 거동과 공동의 안정성을 파악하기 위해 사암 암반을 대상으로 2차원 열탄소성 유한요소 모델실험을 수행하였다. 심도 527m에 원형공동을 굴착하고 100°C의 열원을 설치하였다. 공동굴착만을 해석한 결과와 굴착후 열원을 설치했을 경우를 분석한 결과를 비교함으로써 주변암반에 미치는 열응력의 영향을 평가하였다. 굴착만을 수행할 경우 암반의 안전계수는 2이상 되어 전체적으로 탄성 거동을 보였으나 열원이 설치된 후 공동벽에서의 심한 열응력 집중과 공동주변에서의 인장응력대의 발달 등으로 인해 공동주변에 소성대가 발생하였다.

Vol. 178, 162-164.

- 2) Sangha, C. M., C.J. Talbot & K.K. Dhir, 1974, Microfracturing of a Sandstone in Uniaxial Compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Abstr., Vol. 11, 107-113.
- 3) Sprunt, E.S. & W.F. Brace, 1974, Direct Observation of Microcavities in Crystalline Rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 11, 139-150.
- 4) Carslaw, H.S. & J.C. Jaeger, 1980, Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed. Oxford, p 510.
- 5) Hashin, Z., Analysis of Composite Materials - A Survey, J. Appl. Mech., Vol. 50, 481-505.
- 6) Cook, R. D., 1981, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, p 537.
- 7) Segerlind, L. J., 1984, Applied Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, p427.
- 8) 문현구, 1990, 연속등방 및 이방성 암반내 지하공동의 열역학적 거동에 관한 전산모델 연구, 한국 학술진흥재단 최종보고서, p87.
- 9) Timoshenko, S.P. & J. N. Goodier, 1970, Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Company, p 567.
- 10) Nuismer, R. J., 1978, Applications of the Average Stress Failure Criterion: Part I - Tension, J. Composite Materials, Vol. 12, 238-249.

#### 參 考 文 獻

- 1) Brace, W.F., E. Silver, K. Hadley & C. Goetze, 1972, Cracks and Pores: A Closer Look, Science,