터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제14권 제2호, 2004년 4월, pp. 142~153

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 14, No. 2, 2004, pp. 142-153
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

지층암반의 불균질성이 3차원 광역응력장에 미치는 영향

조상호[1)]*, 中村圭太[2)], 川崎了[2)], 양형식[3)], 佐藤稔紀[4)], 中間茂雄[4)], 金子 勝比古[2)]

Influence of the Rock Mass Inhomogeneity Caused by Layer Geometry on the Regional Stress Field

Sang-Ho Cho, Keita Nakamura, Simai Kawasaki, Hyung-Sik Yang, Minoriki Sato, Shikeyuu Nakama and Katsuhiko Kaneko

Abstract To investigate the influence of the rock mass inhomogeneity caused by layer geometry on the regional stress distribution, the cuboid models considering a homogenous rock mass, inhomogeneous rock mass with plane layers and with uneven layers were analyzed and discussed. It was confirmed that the structure and existence of layers in rock mass affected the regional stress distribution. An approach based on an inverse analysis of the measured local stresses and the 3D finite element analysis was suggested, and used to estimate the regional stress field of the homogeneous and inhomogeneous models, which consist of the surface geometry of ground and both the surface and layer geometry respectively. Additionally, the approach of the regional stress considering the layer geometry in the rock mass was verified to estimate the regional stress field for a site.

KeyWords Rock mass inhomogeneity, Layer geometry, Stress field

초 록 지층지형에 의한 암반 불균질성이 3차원 응력장에 미치는 영향을 고찰하기 위해서, 등방 직육면체모델, 평탄한 지층을 가진 직육면체모델, 오목한 지층을 가진 직육면체모델에 대해서 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과로부터, 지반 내에 존재하는 지층의 형상은 암반 내 광역응력장에 큰 영향을 미치고 있음을 명확히 하였다. 현장계측결과로부터 광역응력장을 역해석하는 광역응력장 평가법에 지표면을 가진 균질모델과 지표면과 지층지형을 가진 불균질 모델을 적용하고, 지층지형에 의한 암반 불균질성이 현장계측결과에 미치는 영향을 고찰하였다. 추가로, 지층지형 모델을 고려한 광역응력장 평가법의 타당성에 대해서 검토하였다.

핵심어 암반 불균질성, 지층모양, 응력장

1. 서 론

암반 중에 방사성 폐기물 처분장, 지하발전소, 지하석유비축기지 등 대규모 지하구조물을 건설하는 경우에는 설계 및 시공의 최적화 또는 안전성을 확보하기 위해 광역적 또는 장기적인 암반의 안전성이 요구된다. 이러한 이유로 지금까지 다수의 초기응력측정법이 제안되고 개량되어 실용화의 수준까지 도달하였다. 그러나 이러한 측정법의 대부분은 측정대상영역의 체적(10^{-2}~10^{1} m^3)이 작고 지하공동의 크기(10^{3} m^3)와 비교해서 점 데이터로 평가할 수 밖에 없었다. 또한 실제 현장측정의 경우 경비 및 측정 입지때문에 측정데이타 수가 한정되어 있으며, 특히 수압파쇄법의 경우 평면내 응력(2차원)만을 계측할 수 있으므로 응력성분수도 한정되어 있다. 또한, 측정된 초기응력 데이터는 다양한 요인(암석결정크기로부터 지각판 크기의 범위까지 존재하는 불연속성이나 암석 및 암반의 불균질성 등)에 기인하여 불균질하다는 것은 잘 알려져 있으며, 현장계측에 의한 3차원적인 초기응력의 공간분포를 평가하는 것은 어려운 실정이다. 또한 측정지역의 지형도 초기응력에 큰 영향 요소가 될 수 있는데, 특히 한반도는 심한 습곡작용을 받은 복잡한 지형이므로, 지하 천부의 지압 평가 시에는 충분히 고려해야 할 요인이 될 것이다. 실제로 지하 천부에서 주응력의 방향은 지표면의 형상을 따라 변하며 수압파쇄 균열 또한 지형에 평행한 방향으로 발생하는 경우가 많다는 조사

[1)] 정회원, 일본 북해도대학 대학원 공학연구과 연구원
[2)] 일본 북해도대학 대학원 공학연구과
[3)] 정회원, 전남대학교 지구환경시스템공학부 교수
[4)] 핵연료싸이클개발기구 東濃지구학센타 지질환경연구그룹
*교신저자(Corresponding Author): chosh@geo9-er.eng.hokudai.ac.jp
접수일: 2004년 3월 19일
심사 완료일: 2004년 4월 6일

보고도 있다(이희근 외, 1997). 그러므로, 암반의 불균질성을 고려한 3차원적인 초기응력의 공간분포를 정량적으로 평가할 필요성이 있다.

초기응력 측정결과로부터 응력해석에서의 광역응력장을 추정하는 방법은 水田 등 (1997), Kaneko 등(1998, 2000)에 의한 제안되었지만, 이들 연구는 지표 지형만을 고려한 균질암반에 한정되어 있다. 본 연구에서는 현장의 광역응력장을 평가하기에 앞서, 지층지형에 의한 암반의 불균질성이 광역응력장에 미치는 영향을 고찰하기 위해 지층을 고려하지 않은 균질 등방의 탄성체 암반모델과 두 종의 지층을 고려한 탄성체 암반모델을 작성하여 해석하고 고찰하였다. 지층 지형을 고려한 광역응력장 평가법의 유용성 및 타당성을 검토하기 위해, 현장계측결과로부터 광역응력장을 역해석하는 광역응력장 평가법에 지표면을 가진 균질모델과 지표면과 지층지형을 가진 불균질 모델을 적용하였다. 해석모델은 3차원 유한요소모델로서 현장의 표고데이터와 지층 데이타를 이용하여 작성하고 다른 변위경계조건을 고려하였다. 또한 지표와 지층지형에 의한 암반의 불균질성이 광역 응력장에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 3차원 광역 응력장 평가법

2.1 3차원 광역 응력해석

암반 내의 응력은 중력 및 지각변동 등의 작용과 함께 지형 및 지질에 의한 교란을 받은 것으로 고려된다. 따라서 만일 지형 및 지질에 의한 교란을 제거 하고, 여기에 존재하는 초기 응력장이나 변형률장을 가정할 수 있다면, 암반내의 응력은 이 초기 응력장(virgin stress field)이 지형 및 지질의 영향에 의해 응력 재배치된 2차응력 또는 유도응력(induced stress)이라고 생각할 수 있다. 암반 내의 임의의 좌표점 x에서의 국소응력 $\sigma_{ij}^{L}(x)$는, 광역응력 σ_{ij}^{G}의 함수 또는 광역변형률 ε_{ij}^{G}의 함수로 고려할 수 있는데, 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij}^{L}(\boldsymbol{x}) = F(\boldsymbol{x}, \sigma_{ij}^{G}) \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^{L}(\boldsymbol{x}) = G(\boldsymbol{x}, \varepsilon_{ij}^{G}) \quad (2)$$

단, 위의 식 중에 F 및 G는 지형 및 지질의 영향에 의한 응력의 교란을 나타내는 함수이다. 여기 F 및 G의 함수를 결정하기 위해서는 대상지역의 지표와 지층 지형을 고려한 3차원 모델을 작성하고 그 모델에 대한 3차원 응력해석을 실시할 필요가 있다. 광역 응력장과 광역 변형률장을 해석대상으로 하는 경우, 해석모델은 넓은 범위를 고려하여야 하며, 지표면 형상 및 지층구조를 표현할 수 있어야만 한다. 따라서, 지형과 지층의 3차원 모델링에는 광대한 영역에서의 복잡한 형상의 모델이 요구되어 통상의 공동해석 등과 비교해서 극히 광대한 계산용량 및 계산시간이 필요하게 된다. 그러므로 컴퓨터 성능 및 계산비용 등을 고려해서 현실적으로 가능한 범위 내에서 해석을 수행 할 필요가 있다.

광대역의 탄성 연속체 응력해석은 유한요소법, 경계요소법, 유한차분법 등이 일반적으로 적용 가능하나, 지표 및 지층지형 불연속성의 관점으로부터 해석의 적용성을 고려하면 유한요소법이나 유한차분법이 유리하다. 유한요소법(Kawasaki 등, 2003)과 유한차분법(Li와 Mizuta, 2003)에서는 각각의 요소에 대해 물성치 및 구성식을 고려하는 것이 가능하므로 지층별 영역에 다른 물성을 적용하는 것이 비교적 간단하다. 그러나, 단층과 같은 불연속면의 경우에는 경사나 형상에 따라서 특수한 모델링이 필요하게 된다. 이에 반해서 경계요소해석법(Li와 Mizuta, 2003)은 변위불연속요소를 채용하면 지층은 단층의 경사나 형상에 관계없이 용이하게 작성이 가능하다. 그러나 지층과 같은 영역별 물성치를 고려하기 위해서는 다영역형으로 프로그램 확장이 필요하게 되어, 이와 함께 계산용량이 대폭 증대하게 된다.

본 연구에서는 다른 암반물성치를 가진 지층을 고려한 광대한 영역의 모델을 해석해야 하므로, 계산용량의 단축을 위해 강성 행렬의 0이 아닌 성분만을 일차원 배열로 저장하는 알고리즘과 계산시간 단축을 위해 연립방정식의 해법으로서 ICCG법(小國力, 1991)을 채용한 3차원 유한요소해석법(Kaneko 등, 1998)을 적용하기로 하였다.

2.2 3차원 광역응력장 평가

앞에서 설명한 식 (1)과 (2)의 함수 F와 G가 광역 응력해석으로부터 결정되면 국소응력을 구할 수 있는데, 이 국소응력을 계측된 국소응력으로 역해석하면 광역응력을 산정할 수 있게 된다. 즉 통상의 암반 내 응력해석과 본 연구의 광역응력평가는 단지 정해석과 역해석의 문제이다. 이러한 관점을 기본으로 水田 등 (1997)은 초기상태에서 지표면이 수평한 경우를 고려해, 광역응력 σ_{ij}^{G}를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\sigma_{ij}^{G} = k_{ij}\ \rho g z \quad (3)$$

여기서, ρ는 암석밀도, g는 중력가속도, z는 지표면으로부터의 심도를 의미한다. 또한 k_{ij}는 광역응력계수로 불리는 대칭 tensor이고, 독립 성분 수는 응력성분 수와 동일하게 6개이다. 水田 등(1999)은 식 (3)을 확장하여 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$\sigma_{ij}^{G} = S_{ij} + k'_{ij}\ \rho gz \quad (4)$$

단, S_{ij} 및 k'_{ij} 는 $S_{xz} = S_{yz} = S_{zz} = 0$, $k'_{zz} = 1$, $k'_{xz} = k'_{yz} = 0$인 대칭 tensor이고, 이 들의 독립 성분 수는 6개이다. 따라서 어떠한 경우라도 독립적인 6종의 광역응력 조건에서 측정지역의 기하형상을 고려한 3차원 해석을 하고 그 결과를 이용하여 현장의 초기응력(측정 국소응력)을 역해석하면 광역응력을 나타내는 tensor를 결정할 수 있게 된다.

Kaneko 등 (2000)은 3차원 응력해석으로부터 계산된 국소응력과 수압파쇄법에 의해 계측된 측정 결과로부터 광역 응력장을 추정하기 위해 광역응력장 평가법을 제안하였다. 구체적으로 설명하면, 먼저, 암반 내 임의의 좌표점 $\tilde{X}$ 에서 국소응력 $\sigma_{ij}^{L}(\tilde{X})$을 응력과 변형률의 선형관계로부터 평가하는 관측방정식을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\sigma_{ij}^{L}(\tilde{X}) = \sigma_{ij}^{0}(\tilde{X}, \rho g) + c_x \sigma_{ij}^{X}(\tilde{X}, \varepsilon_{xx0}) + c_y \sigma_{ij}^{Y}(\tilde{X}, \varepsilon_{yy}^{0}) + c_{xy}\ \sigma_{ij}^{XY}(\tilde{X}, \gamma_{xy0}) \quad (5)$$

여기서, $c_x = \varepsilon_{xx}^{G} / \varepsilon_{xx0}$, $c_y = \varepsilon_{yy}^{G} / \varepsilon_{yy0}$, $c_{xy} = \gamma_{xy}^{G} / \gamma_{xy0}$이며, ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0}는 초기조건으로서 광역변형률을 나타내는 정수이다. 측정점 $\tilde{X}_n$(단, n = 1~N이고, N은 측정점의 수이다)에서 측정된 국소응력을 $\sigma_{ij}^{M}(\tilde{X}_n)$으로 표현하면, 해석치를 측정치에 일치시키는 조건은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{ij}^{M}(\tilde{X}_n) = \sigma_{ij}^{L}(\tilde{X}_n) : \ n = 1\sim N \quad (6)$$

즉, 3차원 응력해석에서 경계조건인 광역변형률을 임의의 일정치로 가정하여 측정점에서의 국소응력을 계산해 두고, 식 (6)의 관계로부터 측정치에 대응하는 광역변형률의 값을 산정할 수 있게 된다. 단, 수압파쇄법에서 측정된 수평면 내의 응력은 $\sigma_{xx}^{M}(\tilde{X}_n)$, $\sigma_{yy}^{M}(\tilde{X}_n)$, $\sigma_{xy}^{M}(\tilde{X}_n)$의 3개 응력성분이 되므로, 식 (6)은 3$N$행의 식을 고려하는 것으로 된다. 또한, 암반의 단위체적중량과 탄성계수를 아는 값으로 가정하면 $\sigma_{ij}^{0}(\tilde{X}, \rho g)$를 구할 수 있게 되며, 식 (6)의 연립방정식에서 응력 3성분에 대해서 미지수는 c_x, c_y, c_{xy}가 된다. 여기서 c_x, c_y, c_{xy}는 최소자승법을 이용하여 구하는 것으로 하면 연립방정식은 식 (7)과 같이 된다.

$$c = (A^t A)^{-1} A^t s \quad (7)$$

단,

$$A = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^{X}(\tilde{X}_1, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xx}^{Y}(\tilde{X}_1, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xx}^{XY}(\tilde{X}_1, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yy}^{X}(\tilde{X}_1, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yy}^{Y}(\tilde{X}_1, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yy}^{XY}(\tilde{X}_1, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{xy}^{X}(\tilde{X}_1, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xy}^{Y}(\tilde{X}_1, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xy}^{XY}(\tilde{X}_1, \gamma_{xy0}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{xx}^{X}(\tilde{X}_N, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xx}^{Y}(\tilde{X}_N, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xx}^{XY}(\tilde{X}_N, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{yy}^{X}(\tilde{X}_N, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{yy}^{Y}(\tilde{X}_N, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{yy}^{XY}(\tilde{X}_N, \gamma_{xy0}) \\ \sigma_{xy}^{X}(\tilde{X}_N, \varepsilon_{xx0}) & \sigma_{xy}^{Y}(\tilde{X}_N, \varepsilon_{yy0}) & \sigma_{xy}^{XY}(\tilde{X}_N, \gamma_{xy0}) \end{pmatrix}$$

$$s = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^{M}(\tilde{X}_1) - \sigma_{xx}^{0}(\tilde{X}_1, \rho g) \\ \sigma_{yy}^{M}(\tilde{X}_1) - \sigma_{yy}^{0}(\tilde{X}_1, \rho g) \\ \sigma_{xy}^{M}(\tilde{X}_1) - \sigma_{xy}^{0}(\tilde{X}_1, \rho g) \\ \vdots \\ \vdots \\ \sigma xx^{M}(\tilde{X}_N) - \sigma xx^{0}(\tilde{X}_N, \rho g) \\ \sigma yy^{M}(\tilde{X}_N) - \sigma yy^{0}(\tilde{X}\,\mathrm{N}, \rho g) \\ \sigma xy^{M}(\tilde{X}_N) - \sigma xy^{0}(\tilde{X}\,\mathrm{N}, \rho g) \end{Bmatrix}, \quad c = \begin{Bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_{xy} \end{Bmatrix}$$

앞에서 설명한 평가법을 이용해 얻은 해석치 $\sigma_{ij}^{L}(\tilde{X}_n)$와 실제의 현장에서 측정하여 구한 $\sigma_{ij}^{M}(\tilde{X}_n)$는 오차를 포함하게 되는데 어느 하나의 관측점 $\tilde{X}$ 에서 해석치와 측정치의 오차 $e^{L}(\tilde{X})$를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{L}\left(\tilde{x}\right) = \sqrt{\left\{\sigma_{xx}^{L}\left(\tilde{x}\right) - \sigma_{xx}^{M}\left(\tilde{x}\right)\right\}^2 + \left\{\sigma_{yy}^{L}\left(\tilde{x}\right) - \sigma_{yy}^{M}\left(\tilde{x}\right)\right\}^2 + \left\{\sigma_{xy}^{L}\left(\tilde{x}\right) - \sigma_{xy}^{M}\left(\tilde{x}\right)\right\}^2} \quad (8)$$

오차 $e^{L}(\tilde{X})$는 전 측정점에 대해서 평가되므로 전 측정점에 대한 해석의 오차는 다음과 같이 평가 할 수 있다.

$$\mathrm{e} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} e^{L}\left(\tilde{x}\right) \quad (9)$$

본 장에서 서술한 광역 응력평가법의 해석순서를 개략적으로 Fig. 1에 나타내었다.

3. 지층구조를 고려한 3차원 광역응력해석

3.1 해석모델과 경계조건

지층구조의 영향이 광역응력분포에 미치는 영향을 검토하기 위해서 직육면체 균질모델, 평면지층 모델, 오목지층 모델을 작성하여 응력해석을 수행하였다. Fig. 2는 지표면이 평면이고 단일 지층인 균질한 직육면체 모델을 나타내고 있으며, 모델의 크기는 X, Y, Z방향으로 각

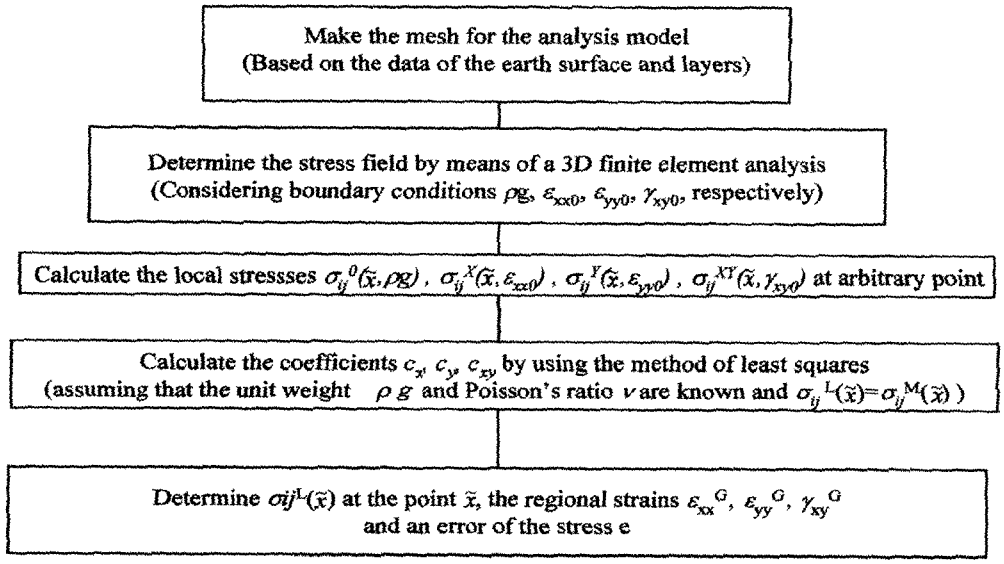


Fig. 1. Flowchart for the estimation approach of the regional stress field

각 1,000 m, 1,000 m, 500 m이다. 절점수 및 요소수는 각각 67,626과 62,500이고 적용된 영률 E는 6.0 GPa, 포아송 비 ν는 0.3, 단위체적중량 ρg는 26.0 kN/m^{3}으로 하였다. Fig. 3은 지표면으로부터 심도 200 m에 지층 경계가 있는 모델로서 상부층의 물성치를 제외한 모든 해석조건은 Fig. 2의 직육면체 모델과 동일하다. 상부층의 영률 E는 2.0 GPa, 포아송 비 ν는 0.3, 단위체적중량 ρg는 19.0 kN/m^{3}이다. Fig. 4는 지표면으로부터 심도 200 m와 300 m 사이에 걸쳐 하나의 오목한 지층경계가 존재하는 모델로 하여 해석조건은 Fig. 3의 모델과 동일하게 하였다. 지층경계는 별도의 접합부 요소를 적용하지 않았다.

경계조건으로서 관측방정식 (5) 중의 자중(ρg)과 초기 광역변형률(ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0})을 대상영역의 모델에 독립적인 경계조건으로 하여 해석을 실시하였다. 먼저, 자중만을 고려한 해석을 위해서는 각요소의 중량(밀도 ρ×중력가속도 g×요소체적)을 연직 방향으로 적용시켰으며, 지표면에 해당되는 상부면은 전방향(X, Y, Z 방향)에 대해서 자유경계조건을 주었으며, 나머지 5면(측면, 하면)에 대해서는 면에 수직인 방향만 고정시키고 나머지 방향은 자유경계조건으로 하였다. 모델에 이와 같은 조건을 고려해서 응력해석을 하면 식 (5)에 자중과 관련된 광역 응력장을 구할 수 있게 된다. 다음으로 X방향 변형률(ε_{xx0})을 경계조건으로 하는 경우에는, X축에 수직인 한 면 내의 절점에 X방향 변형률(ε_{xx0})을 고려하기 위해 압축하는 방향(모델내부방향)으로 강제

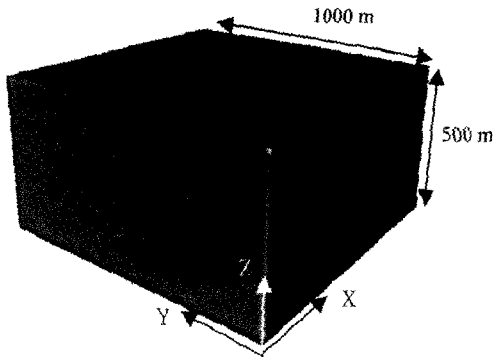


Fig. 2. Finite element model for a homogeneous rock mass

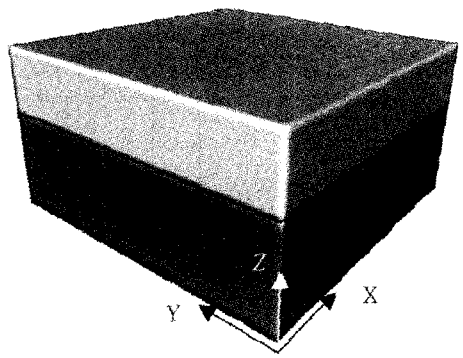


Fig. 3. Finite element model for an inhomogeneous rock mass with plane layers

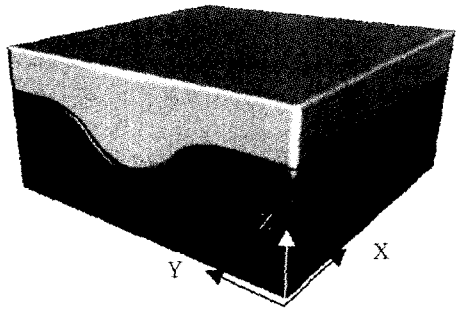


Fig. 4. Finite element model for an inhomogeneous rock mass with uneven layers

변위조건을 적용하였다. 해석에 있어서는 ε_{xx0} = -1/1000의 강제변위를 적용하였다. 이때 지표면의 *X, Y, Z* 방향을 모두 자유경계조건으로 하고 나머지 5면에 대해서는 면에 수평한 방향을 모두 자유경계로 하였으며 면에 수직한 방향은 모두 고정 경계조건으로 하였다. 단 강제변위가 고려되는 면은 면에 수직인 *X* 방향 만을 자유경계조건으로 하였다. *Y* 방향 변형률(ε_{yy0})의 경우에는, *Y*축에 수직인 한 면 내의 절점에 *Y* 방향 변형률(ε_{yy0})을 압축하는 방향(모델 내부방향)으로 고려하였다. 이때 지표면의 *X, Y, Z*방향을 모두 자유 경계조건으로 하고 나머지 5면에 대해서는 면에 수평한 방향을 모두 자유경계조건으로 하였으며 면에 수직한 방향은 모두 고정 경계조건으로 하였으나, 단 ε_{yy0}가 고려된 면에 수직인 Y방향은 자유경계조건으로 하였다. *XY*면 전단변형률(γ_{xy0})의 경우에는 지표면의 3방향은 자유경계조건으로 하고, 하면은 면에 수평방향을 자유경계로 하고 수직인 방향은 고정경계로 한다. *XY*면 전단변형률(γ_{xy0})의 표현방법으로서 Fig. 5와 같이 강제변위를 적용하였다.

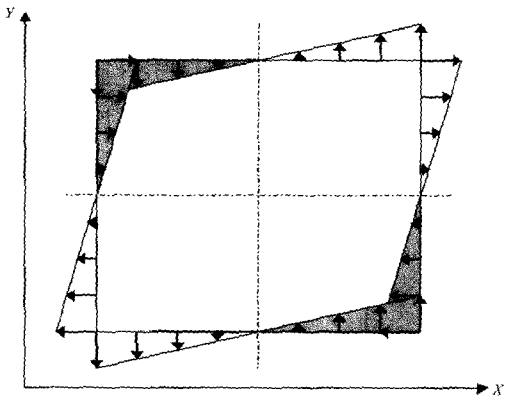
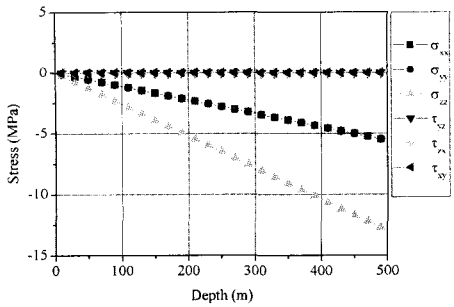


Fig. 5. Schematic diagram for the application of a shear deformation on the analysis model (top view)

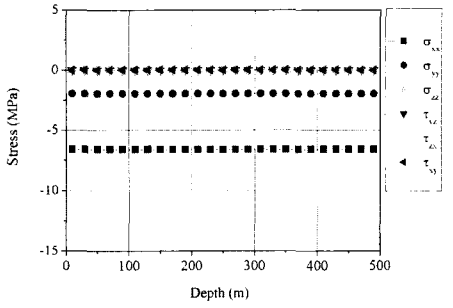
3.2 해석결과

지표면이 평면이고 균질한 단일지층의 직육면체 모델(Fig. 2)에 4가지 경계조건 ρg, ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0}을 각각 적용한 결과를 Fig. 6 (a) ~ (d)에 나타내었다. 그림 중의 응력 축에서 압축응력은 부(-), 인장응력은 정(+)으로 나타내고 있으며, 심도는 모델의 지표면 중심점으로부터 하부방향으로의 깊이를 의미한다. Fig. 6(a)는 자중만을 고려한 경우의 응력상태 $\sigma_{ij}^{0}(\vec{X}, \rho g)$를 보여주고 있다. 살펴보면 σ_{zz}는 심도에 비례해서 증가하는 경향을 보이며, 이 값은 이론 관계($\sigma_{zz} = \rho g Z$= 26.0×심도)와 일치함을 알 수 있다. σ_{xx}와 σ_{yy}는 측압비의 영향으로 0.43 σ_{zz}의 크기를 보여 이론값과 일치함을 보이고 있다. Fig. 6 (b)는 초기 광역변형률ε_{xx0}를 경계조건으로 한 해석결과로서 응력상태$\sigma_{ij}^{X}(\vec{X}, \varepsilon_{xx0})$를 나타내고 있다. 모든 응력 성분들은 심도에 따라 일정한 값을 보이고 있으며, σ_{xx}는 이론 관계($\sigma_{xx} = E\ \varepsilon_{xx0}$)와 동일하게 -6 MPa의 값을 보이고 있다. σ_{yy} 역시 이론 관계($\sigma_{yy} = \nu\ \sigma_{xx}$)와 동일하게 -1.8 MPa의 값을 나타내고 있다. Fig. 6 (c)는 경계조건으로서ε_{yy0}를 고려한 해석결과로 응력상태 $\sigma_{ij}^{Y}(\vec{X}, \varepsilon_{yy0})$를 나타내고 있다. 여기 응력상태는 Fig. 6 (b)와는 응력성분(σ_{xx}, σ_{yy})만 다르게 동일한 값을 보이고 있다. Fig. 6 (d)는 경계조건으로서ε_{xy0}를 고려한 경우의 응력상태 $\sigma_{ij}^{XY}(\vec{X}, \varepsilon_{xy0})$를 나타내고 있다. 응력성분$\sigma_{xy}$이외의 성분은 모두 0으로 되었고, σ_{xy}는 이론 관계(σ_{xy}= E / $2(1+\nu)\times\gamma_{xy0}$)과 동일한 값인 2.3 MPa를 보이고 있다.

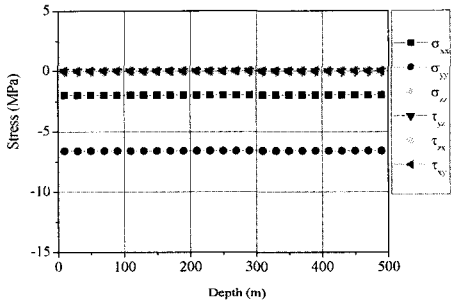
다음으로 지표면이 평면이고 평면 지층 경계가 있는 직육면체 모델(Fig. 3)에 4가지 경계조건(ρg, ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0})을 각각 적용한 결과를 Fig. 7 (a) ~ (d)에 나타내었다. Fig. 7 (a)의 지층경계부근(타원표시)에서 σ_{zz}의 기울기에 비교적 큰 변화를 보이고 있는데, 이는 단위체적중량이 19.0 kN/m^{3}에서 26.0 kN/m^{3}으로 변화하고 있기 때문이다. Fig. 7 (b)에서는 응력성분σ_{xx}와 σ_{yy}는 상반영역과 하반영역의 지층경계(타원표시)를 사이에 두고 3배 정도로 증가하는 경향을 볼 수 있는데, 이것은 적용된 영률이 상반과 하반의 차이가 3배이기 때문이다. 이 결과로부터 경계조건으로서 일정 변위를 고려했을 때 영률이 큰 영역에서는 영률이 작은 영역보다 큰 응력치가 발생함을 알 수 있다. Fig. 7 (c)는 응력성분(σ_{xx}, σ_{yy})만 다르게 Fig. 7 (b)과 동일한 경향을 보이고 있다. Fig. 7 (d)에서 볼 수 있듯이 전단성분(τ_{yz}, τ_{zx}, τ_{xy})의 경우에도 상반영역과 하반영역의 지층경계(타원표시)를 사이에 두고 3배 정도로 증가하는 경향을 볼 수가 있다. 이 결과로부터 경계조건으로서 일정 변위를 고려했을 때 영률이 큰 영역에서는 영률이 작은 영역보



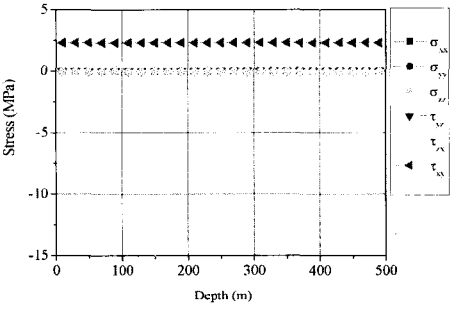
(a) $\sigma_{ij}^{0}(\widetilde{X}, \rho g)$



(b) $\sigma_{ij}^{X}(\widetilde{X}, \varepsilon_{xx0})$

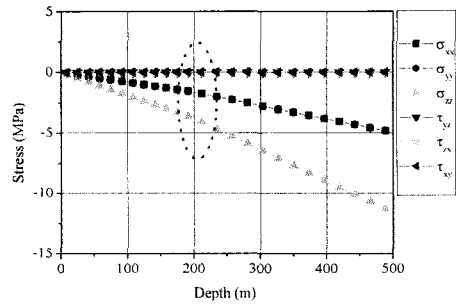


(c) $\sigma_{ij}^{Y}(\widetilde{X}, \varepsilon_{yy0})$

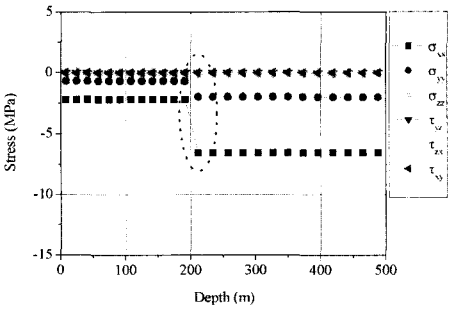


(d) $\sigma_{ij}^{XY}(\widetilde{X}, \varepsilon_{xy0})$

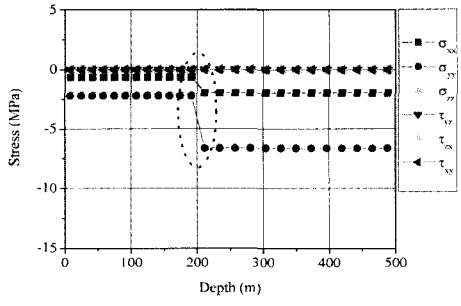
Fig. 6. Stress distributions for a homogeneous rock mass



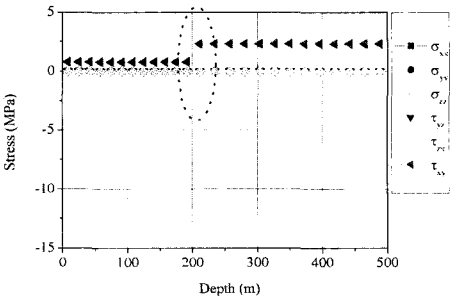
(a) $\sigma_{ij}^{0}(\widetilde{X}, \rho g)$



(b) $\sigma_{ij}^{X}(\widetilde{X}, \varepsilon_{xx0})$



(c) $\sigma_{ij}^{Y}(\widetilde{X}, \varepsilon_{yy0})$



(d) $\sigma_{ij}^{XY}(\widetilde{X}, \varepsilon_{xy0})$

Fig. 7. Stress distributions for an inhomogeneous rock mass with plane layers

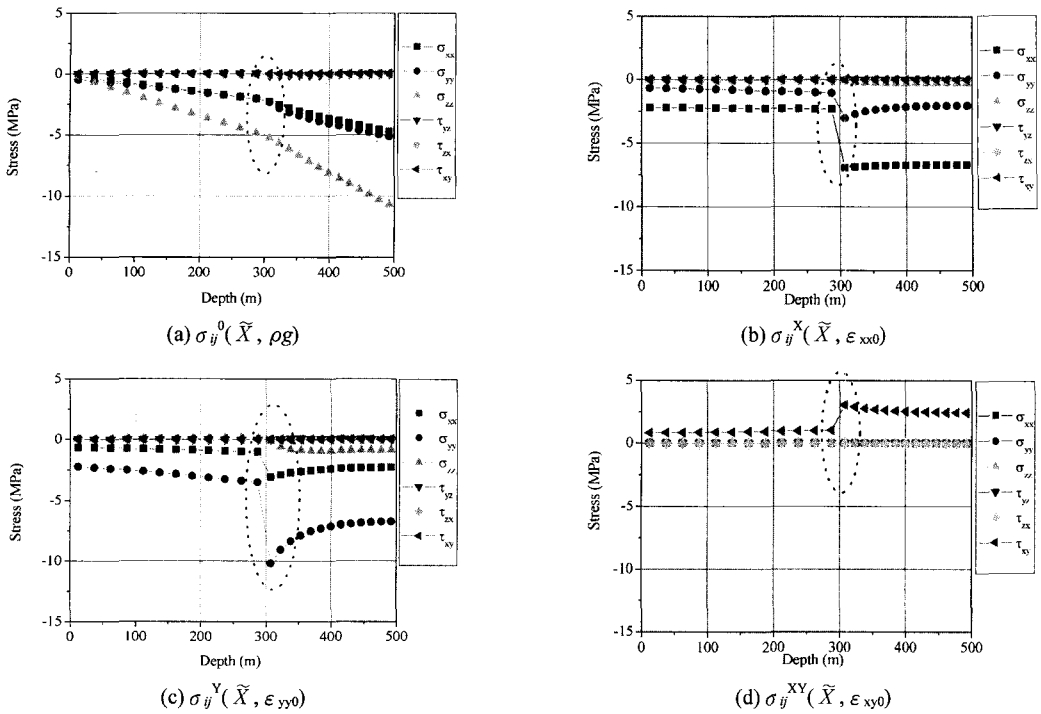


Fig. 8. Stress distributions for an inhomogeneous rock mass with uneven layers

다 큰 응력치가 발생함을 알 수 있다.

지표면이 평면이고 오목한 지층 경계가 있는 직육면체 모델(Fig. 4)에 4가지 경계조건(ρg, ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0})을 각각 적용하여 해석한 결과를 Fig. 8 (a) ~ (d)에 나타내었다. 이 결과들과 앞에서 설명한 Fig. 6 (a) ~ (d)과 비교했을 때 암반 내 응력분포에 변화가 있음을 알 수 있다. Fig. 8 (a)를 살펴보면 심도 300 m 부근(타원표시)에서 응력 값의 기울기에 변화를 보이고 있다. 이것은 모델의 중심을 기준으로 하여 Z 방향으로 응력 값을 표시하고 있기 때문에 지층경계가 300 m에 위치하고 있기 때문이다. Fig. 8 (b)의 경우 Fig. 7 (b)의 응력 값과 비슷하게 보이고 있으나, 지층경계부근(타원표시)에서 약간 높은 응력 값을 보이고 있다. 이것은 지층형상에 기인된 현상으로 판단된다. 이것과 관련해서, Fig. 8 (c)의 지층경계부근(타원표시)을 살펴보면 특히 응력성분 σ_{yy}에 현저한 변화를 찾아 볼 수 있다. σ_{yy}는 지층부근에서 큰 값을 보이다가 심도가 깊어짐에 따라 안정된 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인으로서 Fig. 9와 같이 암반모델에 압축방향으로 작용하는 강제변위를 고려하면, 암반 내 발생되는 응력은 암반이 단단한 쪽으로 먼저 전달되기 때문에 영률이 큰 하반의 응력집중이 발생하게 된다. 특히 하반의 상부 중앙에

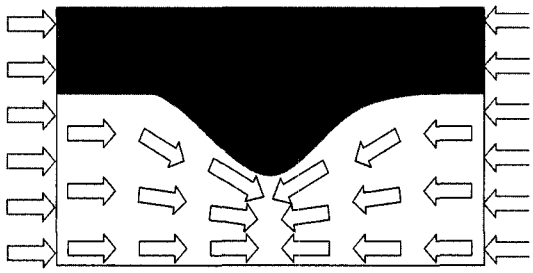


Fig. 9. Description of a stress concentration due to uneven layers in a rock mass

가장 큰 응력집중이 발생되고, 심도가 증가할수록 응력치는 정상상태(균질모델)에 가까워지게 된다. Fig. 8 (d)의 경우도 동일하게 해석이 가능하다. 위 결과로부터 광역 응력장은 지표 및 지층지형에 의해 크게 변화될 수 있음을 명확히 하였다.

4. 3차원 광역응력장 평가

4.1 해석대상지역 및 해석모델

2장에서 제시한 광역응력 평가법과 3장에서 수행된 지층구조에 의한 암반 불균질성을 고려한 응력해석법

의 타당성 및 현장 적용성을 고려하기 위해서 현장 계측데이터를 사용하여 3차원 광역응력장을 평가하였다.

해석대상은 東濃광산(Kawasaki 등, 2003)을 포함한 1 km사방의 영역으로, 지층지형에 의한 광역응력장의 영향을 검토하기 위해 지표지형 만을 고려한 균질한 모델(Fig. 10)과 지표지형과 지층구조를 고려한 불균질 모델(Fig. 11)을 작성하였다. 모델의 X 방향은 동서방향으로서 정방향(+)은 동쪽을 나타내고, Y 방향은 남북방향을 나타내고 있으며 정방향은 북쪽을 나타내고 있다. 요소의 최대길이는 20 m로 하였다. 균질한 모델(Fig. 10)의 경우, 절점수 및 요소수는 3장에서 사용된 모델과 동일하며 적용된 영률 E는 2.0 GPa, 포아송비 ν는 0.3, 단위체적당중량 ρg는 26.0 kN/m^{3}이다. 불균질한 모델(Fig. 11)의 경우는 절점수 및 요소수는 3장에서 사용된 모델과 동일하나, 지층별로 다른 물성치가 적용되었다(Table 1참조). 상층의 경우 영률 E는 2.0 GPa, 포아송비 ν는 0.3, 단위체적당중량 ρg는 18.0 kN/m^{3}이며, 중간층은 영률 E가 2.0 GPa, 포아송비 ν는 0.3, 단위체적당중량 ρg는 19.0 kN/m^{3}로 하였으며, 하층의 경우에는 영률 E를 6.0 GPa, 포아송비 ν는 0.3, 단위체적당중량 ρg는 26.0 kN/m^{3}으로 하였다. 본 해석에 사용된 현장 계측데이터는 수압파쇄법에 의해 계측된 데이터(Kawasaki 등, 2003)를 사용하였다. 시추공의 수는 5개로서, 데이타수는 47개이며, 최대 · 최소 주응력과 최대 주응력의 방향데이터로서 해석모델결과에 직접 적용할 수 없으므로 동서방향은 X 방향(+), 남북방향은 Y 방향(+)의 직교 좌표계를 사용하여 $\sigma_{xx}^{M}(\tilde{X})$, $\sigma_{xy}^{M}(\tilde{X})$의 응력성분으로 변환하였다. 비교에 $\sigma_{yy}^{M}(\tilde{X})$, 사용될

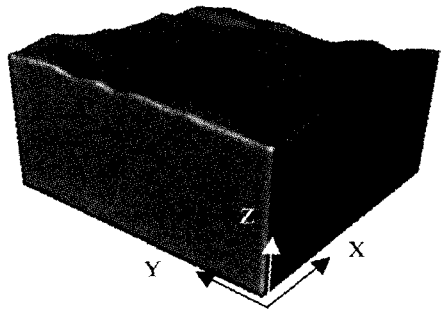


Fig. 10. Finite element model for a homogenous rock mass with the surface of earth

Table 1. Rock mass properties for homogenous and inhomogeneous models

		Young's modulus E (GPa)	Poison's ratio ν	Unit weight ρg (kN/m^3)
Homogeneous model		2	0.3	26
Inhomogeneous model	Upper	2	0.3	18
	Middle	2	0.3	19
	Lower	6	0.3	26

시추공의 X, Y좌표는 (4816.2, -508)으로서 Fig. 10과 11의 지표면에 흑점으로 표시되어 있다.

4.2 해석결과 및 고찰

균질한 모델에 4가지 경계조건(ρg, ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0})

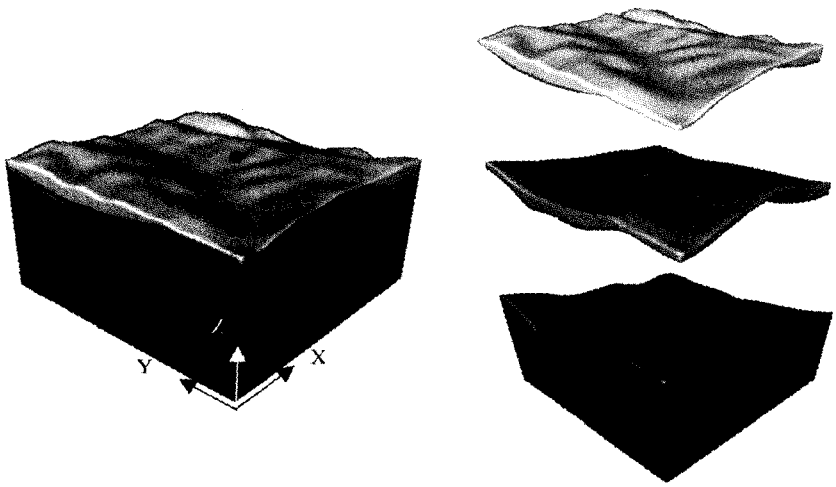


Fig. 11. *Finite element model for an inhomogenous rock mass with the surface of earth and two layers*

을 각각 적용한 해석결과를 Fig. 12 (a)~(d)에 나타내었다. 여기서 응력상태는 앞에서 설명한 계측지점을 기준으로 심도에 따라 표시하고 있다. Fig. 12 (a)는 자중만을 고려한 경우의 응력 상태 $\sigma_{ij}^{0}(\tilde{X}, \rho g)$를 보여 주고 있으며, 직육면체 균질모델의 응력상태(Fig. 6 (a))와 유사하다. Fig. 12 (b)는 광역변형률 ε_{xx0}를 경계조건으로 한 경우의 응력상태 $\sigma_{ij}^{X}(\tilde{X}, \varepsilon_{xx0})$를 나타내고 있다. 이 응력상태는 3장의 직육면체 모델의 해석결과에서 찾아 볼 수 없었던 지표면의 기복에 의한 영향 응력상태의 변화(타원표시)를 보이고 있다. Fig. 12 (c)는 광역변형률 ε_{yy0}를 경계조건으로 한 경우에도 응력상태로서 지표지형의 영향에 의한 교란된 응력상태(타원표시)를 보이고 있다. 특히 σ_{yy}의 값이 크게 나타나고 있으며, 심도가 증가함에 따라 응력값은 정상상태(균질모델)에 가까워 지고 있다. 이러한 원인으로서 모델의 중심지는 지표면이 오목하게 들어간 형태로서 응력상태는 Fig. 9의 하반부와 비슷한 원리로 응력집중의 영향을 받은 것으로 해석된다.

불균질한 모델에 4가지 경계조건(ρg, ε_{xx0}, ε_{yy0}, γ_{xy0})을 각각 적용한 결과를 Fig. 13(a)~(d)에 나타내었다. Fig. 13 (a)는 자중만을 고려한 경우의 응력상태로서 170 m 부근, 즉 제3지층이 존재하는 영역(타원표시)에서 응력곡선의 기울기가 증가하고 있음을 보이고 있다. Fig. 13 (b)의 응력상태를 살펴보면 지표면에서 영향은 적으나 제 3지층이 존재하는 부근(타원표시)에서 크게 증가함을 알 수 있다. Fig. 13 (c)는 ε_{yy0}를 초기경계조건으로 한 경우로서 지표면 부근의 응력에 교란을 보이고 있다. 특히 σ_{yy}은 지층경계 부근(타원표시)에서 크게 증가하고 심도가 깊어짐에 따라 다시 정상응력상태로 되는 경향을 찾아 볼 수 있다. 이는 오목한 지층모델의 해석결과(Fig. 8 (c))와 비슷한 양상으로서, 영률이 큰 하반에 발생하는 응력집중현상으로 설명이 가능하다. 그러므로 심도 170 m부근의 지층(제 3지층)의 형태는 오목하게 동서로 뻗어 있는 형태임을 추측할 수 있으며, 이것은 Fig. 11의 그림 가운데 우측의 하반의 지층지형에서 확인할 수 있다. 살펴보면 Y 방향의 중앙부에 오목한 형태의 지층이 X 방향 즉 동서방향으로 길게 놓여져 있음을 볼 수 있다.

지표지형만을 고려한 균질 암반모델(Fig. 10)에 각 경계조건을 고려한 결과로부터 계산된 응력성분 $\sigma_{ij}^{L}(\tilde{X})$와 현장계측결과를 이용하여 광역응력을 평가하였다. 먼저 최소자승법으로 구한 광역변형률은 ε_{xx}^{G}=-3.66x10^{-4}, ε_{yy}^{G}=-4.16x10^{-4}, γ_{xy}^{G} =2.24x10^{-4}이고 오차는 e=3.70 MPa이 되었다. Fig. 14(a)에 광역변형률의 평가에 사용

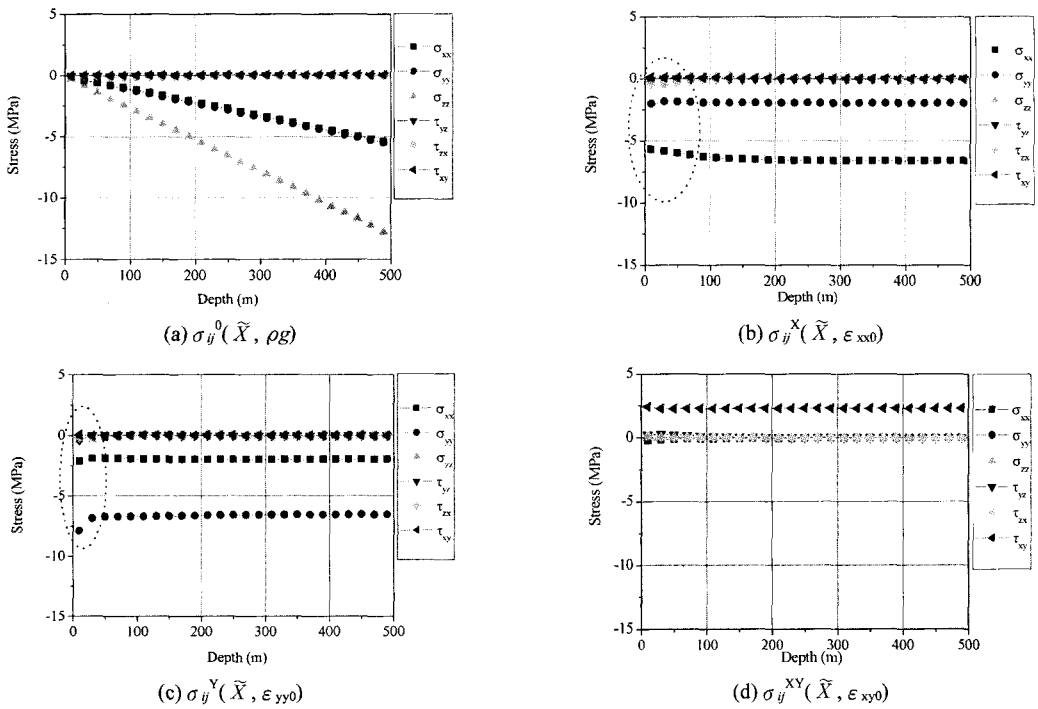


Fig. 12. Stress distributions for an inhomogeneous rock mass with the surface of earth

된 응력성분들과 현장계측결과를 비교하였다. 현장계측 응력 σ^m_{xx}, σ^m_{yy}을 살펴보면 대체로 심도에 따라 증가하는 경향을 보이나 심도 150~200 m 범위에서 급작스럽게 증가하다 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면에 현장계측성분에 해당하는 응력성분 σ_{xx}, σ_{yy}는 심도에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 지표와 지층지형을 고려한 불균질 암반모델(Fig. 11)을 이용하여 계산된 결과를 이용하여 평가된 광역변형률은 ε_{xx}^G=-6.31x10^{-4}, ε_{yy}^G=-6.36x10^{-4}, γ_{xy}^G=5.05x10^{-4}이고 오차는 e=2.59 MPa이 되어, 균질한 모델에 비해서 평가법의 신뢰도가 높아졌다. Fig. 14 (b)에 광역변형률의 평가에 사용된 응력성분과 현장계측결과를 비교하였다. 살펴보면, 응력성분 σ_{xx}와 σ_{yy}는 현장계측응력 σ^m_{xx}, σ^m_{yy}과 비슷하게 심도에 따라 증가하다가 심도 150~200 m의 범위에서 급작스럽게 증가하고 있음을 찾아 볼 수 있다. Table 2는 위에서 서술한 광역변형률

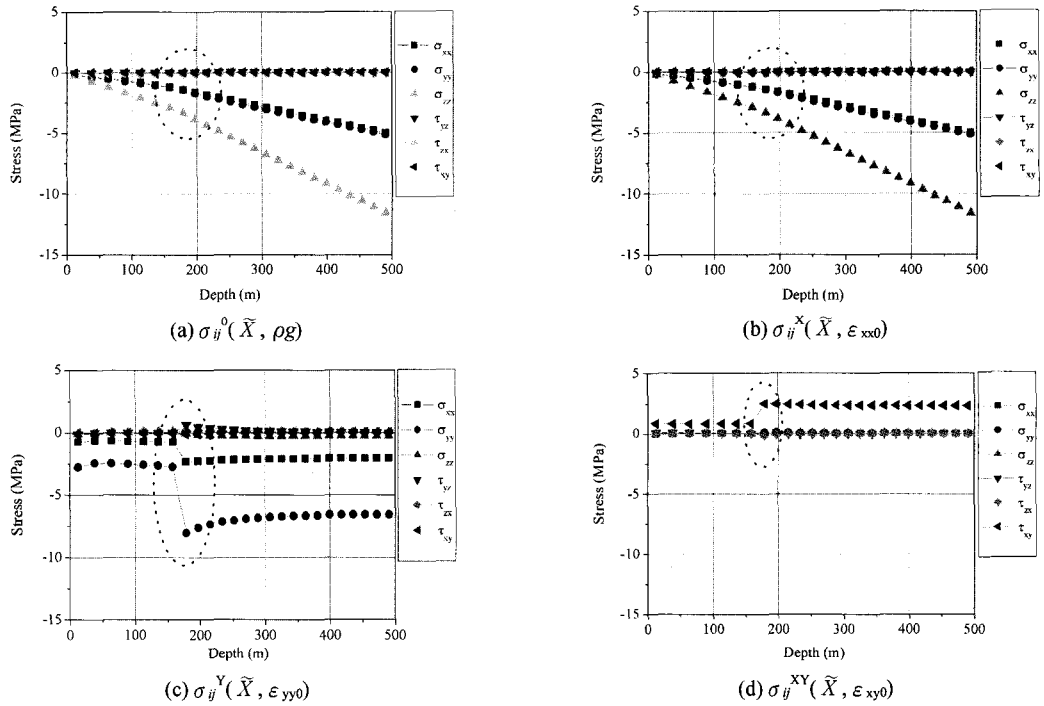
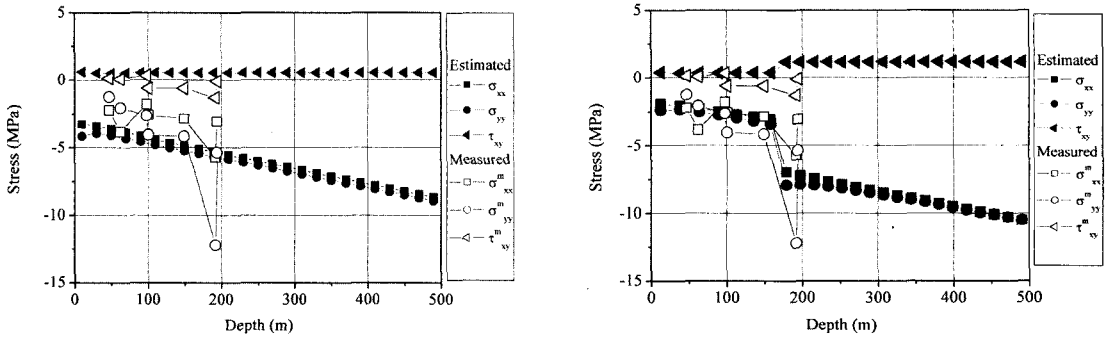


Fig. 13. Stress distributions for an inhomogeneous rock mass with with the surface of earth and two layers



(a) Homogeneous rock mass model with the surface of earth

(b) Inhomogeneous rock mass model with the surface of earth and layers

Fig. 14. Comparison of the measured stresses and estimated stresses

Table 2. Estimated regional strain for the analysis models

Model	ε_{xx}^{G}	ε_{yy}^{G}	γ_{xy}^{G}	Error e (MPa)
Homogeneous model	-3.66x10^{-4}	-4.16x10^{-4}	2.24x10^{-4}	3.70
Inhomogeneous model	-6.31x10^{-4}	-6.36x10^{-4}	5.05x10^{-4}	2.59

과 오차를 정리하여 보여주고 있다. 오차는 지표와 지층지형을 고려한 경우가 적은 값을 보이고 있다. 그러나 응력성분 τ_{xy}는 계측응력 τ^{m}_{xy}와 심도 100~200 m의 범위에서 다른 경향을 보이고 있다. 이러한 원인으로서 현장 암반 내 존재하는 불균일성에 기인된 계측응력의 기복이나 오차에 의한 영향으로 사료된다. 본 연구에서는 현장에서 계측된 데이터를 그대로 적용하였으나, 보다 더 정밀한 광역 응력장을 평가하기 위해서는 많은 계측결과로부터 신뢰성 높은 데이터를 평가, 선정하여 적용해야 할 것으로 생각된다.

결과적으로 위의 비교로부터, 지표지형과 지층을 고려한 광역 응력 평가법이 신뢰성이 높다는 것을 알 수 있었다. 또한 암반모델의 영역을 복수로 나누고 다른 물성치를 적용함으로써 지층지형을 고려한 모델의 응력해석이 상당히 유효함을 확인하였다.

위의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 지표와 지층지형을 고려한 광역응력 평가법의 유효성을 밝힐 수 있었으나, 실용화를 위해서는 더 많은 연구와 고찰이 필요할 것으로 사료된다. 예를 들면 수압파쇄법에 의한 초기응력 측정 결과 및 암석물성, RQD데이터를 정밀하게 분석하고 지층심도에 따른 암반물성치(탄성계수, 포아송 비) 등을 고려함으로써 제안된 평가법의 정밀도를 높일 수 있으리라 생각된다.

5. 결 론

지표와 지층지형에 의한 암반 불균질성이 3차원 응력장에 미치는 영향을 고찰하기 위해서, 등방 직육면체모델, 평탄한 지층을 가진 직육면체모델, 오목한 지층을 가진 직육면체모델에 대해서 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 위 결과로부터, 광역응력장은 지표 및 지층지형에 크게 변화될 수 있음을 명확히 하였다. 특히 오목한 지층을 가진 직육면체 모델의 경우, 하반의 상부 중앙에 큰 응력집중이 발생하였으며 심도가 깊어짐에 따라 정상응력상태에 가까워지게 되었다.

현장계측결과를 이용한 광역응력장을 역해석하는 광역응력장 평가법에 지표 및 지층지형을 고려한 3차원 응력해석을 적용하여 현장의 광역응력장을 평가하였다. 지표지형 만을 고려한 균질 암반모델과 지표와 지층지형을 고려한 불균질 암반모델을 응력해석에 적용하여 광역변형률을 평가하였다. 전자의 모델로부터 평가된 광역변형률은 ε_{xx}^{G}=-3.66x10^{-4}, ε_{yy}^{G}=-4.16x10^{-4}, γ_{xy}^{G} = 2.24x10^{-4}이고 오차는 e=3.70 MPa이었다. 후자의 모델로부터 평가된 광역변형률은 ε_{xx}^{G}=-6.31x10^{-4}, ε_{yy}^{G}= -6.36x10^{-4}, γ_{xy}^{G}=5.05x10^{-4}이고 오차는 e=2.59 MPa로서 지표지형 만을 고려한 균질 암반모델보다 낮은 오차를 보였다. 결과적으로 지표지형과 지층을 고려한 광역응력평가법이 신뢰성이 높았다.

참고문헌

1. 이희근 외, 1997, 응용암석역학, 서울대학교 출판부, p.198.
2. Li, G and Y. Mizuta, 2003, Inverse three-dimensional modeling for determination of in-situ state of stresses, Proc. 3rd Int. Symp. Rock Stress, Kumamoto, Japan, 413-418.
3. Kaneko, K., M. Kato and N. Nakamura, 1998, Three dimensional stress analysis method of open cut slope. *Limestone* 292: 15-21. (in Japanese).
4. Kaneko, K., N. Nakamura, Y. Obara, K. Ito, T. Yoneda and M. Kato, 2000, Estimation of global stress state in Mt. Torigata region. *Shigen-to-Sozai* 116,572-576. (in Japanese).
5. Kawasaki, S., N. Nakamura, T. Sato, S. Nakama & K. Kaneko, 2003, Estimation of regional stress and stress distribution, Proc. 3rd Int. Symp. Rock Stress, Kumamoto, Japan, 419-424.
6. 水田義明 외, 1997, 局所岩盤應力 測定結果로부터 廣域 應力場의決定, 資源素材, No. A, 142-145.
7. 小國力 編著, 1991, 行列計算 소프트웨어, 丸善株式會社.

조 상 호
1998년 전북대학교 자원공학과 학사
2000년 전남대학교 자원공학과 석사
2003년 북해도대학 대학원 공학연구과 박사

Tel: +81-11-706-6325
E-mail: chosh@geo-er.eng.hokudai.ac.jp
현재 북해도대학 대학원 공학연구과 연구원

川崎了
현재 일본 북해도대학 대학원 공학연구과

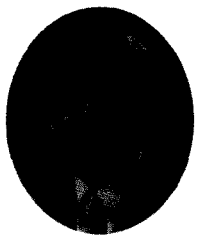
佐藤稔紀
핵연료싸이클개발기구 東濃지구학센타 지질환경연구그룹

金子 勝比古

1970년 교토대학 자원공학과 학사
1972년 교토대학 자원공학과 석사
1986년 교토대학 공학연구과 박사

Tel: +81-11-706-6322
E-mail: kaneko@geo-er.eng.hokudai.ac.jp
현재 북해도대학 대학원 공학연구과 교수

中村圭太
현재 일본 북해도대학 대학원 공학연구과



양 형 식
1979년 서울대학교 자원공학과 학사
1981년 서울대학교 자원공학과 석사
1981년 서울대학교 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr
현재 전남대학교
건설지구환경공학부 교수

中間茂雄
핵연료싸이클개발기구
東濃지구학센타 지질환경연구그룹