

三次元 境界要素法 BEAP3D에 의한 採掘空洞 安定性 評價

鄭小杰¹⁾ · 金任鎬¹⁾ · 曹永道¹⁾

Stability Analysis for Mine Openings by a Three Dimensional Boundary Element Method-BEAP3D

So-Keul Chung, Im-Ho Kim and Young-Do Cho

ABSTRACT A three dimensional boundary element method-BEAP3D was applied to the stability analysis of the mine openings not only to improve the stability during mining operations but also to serve the evaluation of the mine openings for further utilization. Stability analysis on the stability of the room-and-pillar stopes underneath of the old mine openings and the openings to be created by the newly proposed sublevel stoping method at the Nowhado Pyrophyllite Mine, showed that rock mass around the old and new stopes would be stable. Six stopes of a sublevel stoping designed for the Choongmu Limestone Quarry would be stable, too. A sublevel stoping method consisting of six stopes was similarly suggested for the Keumpyung Quartzite Mine. The stability can be guaranteed through out six stopes. Since mining starts from the bottom 1st sublevel to the uppermost sublevel, the safety of the stopes will improve together with the mining process. It would highly be recommended to investigate in-situ rock properties and the rock stresses for future studies. Even though the rock around the uppermost part and the bottom of all the stopes have a very high factor of safety, spot reinforcements such as rock bolting would be recommended to mitigate the intermediate and minor principal stresses acting in a tensile mode.

1. 서 론

자원개발로 인한 환경문제가 대두되기 이전, 우리 나라에 부존되어 있는 대부분의 대규모 광체는 노천채광법에 의해 개발되어 왔으나 최근 들어 개발에 따른 환경보전 문제, 경관훼손, 자연생태계 파괴 등 환경문제에 부딪치면서 갱내 채광이 널리 권장되고 있다. 본 논문에서는 광체의 형태가塊狀이며淺部に賦存하고 있는 납석과 국내 최대 매장량을 가지고 있는 석회석 및 규석 등을 대상으로 갱내 채광법을 적용할 때 가능한 채수율을 최대한 높일 수 있는 안전한 채광법의 설계와 다른 한 편으로는 채광완료후 채굴공동을 활용하는 것을 목표로 채굴작업장 주위 암반내에 작용하는 응력분포와 암반내에 유도되는 변위의 분석을 통해 채굴공동의 안정성을 평가하고자 하였다. 이를 위해서는 모든 채광장의 작업이 완료된 시점에서 채굴공동의 안전율이 가장 작게 나타날 것으로 예상할 수 있어, 앞으로 채굴완료후 채굴공동을 활용할 것에 대비해서도 채굴

이 완료된 시점에 대해 전산 모델링을 하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 이와 같은 대규모의 광상에서는 대부분의 갱도가 광체속에 굴진되고 채광장 역시 광체내부에 형성된다. 채굴공동의 안정성을 평가하기 위해 먼저 각 채광 대상 광체의 기본적인 암반물성과 암반의 파괴기준, 그리고 초기지압조건 등을 토대로 캐나다의 CANMET(Canada Centre for Mineral and Energy Technology) MRL(Mining Research Laboratories) (1993)에서 개발한 3차원 탄성 경계요소 S/W인 BEAP3D(Three dimensional Boundary Element Analysis Program for the elastic problem)를 적용하였다. 이 S/W는 지금까지 세계 각국에서 채광장의 안정성 평가에 활용되어 여러 사용자에게 의해 검증된 바 있다(Grant D. R., Hudyma M. R., and Diering J. A. C., 1991; Grant D. R., Potvin Y. and Pocque P., 1993; Yu Y. S. and Closset L., 1990; Yu Y. S., Closset L., Toews N.

1) 한국자원연구소

A., Thomson S. and Hamel G., 1991).

첫째, 민경산업 蘆花島 蠟石鑛山을 대상으로, 下部鑛體의 개발을 위해 설계된 中段採鑛法(Sublevel Stopping) 채굴공동 주위 암반에 대한 안정성 평가와 더불어 주방식 채광법에 의해 채굴이 이미 완료된 舊探區의 하부에 남아 있는 광석을 회수하기 위하여 설계된 새로운 柱房式(Room and Pillar Stopping) 채광법을 적용할 때 채광장 주위의 암반 구조물에 대한 안정성을 분석하였다(김임호, 정소걸 등, 1995). 둘째, 충무화학 정선 석회석 광산을 대상으로 대규모 심부 채광법인 중단채광법의 적용에 따른 채굴공동의 안정성 평가를 실시하였다(김임호, 정소걸, 조영도, 1996). 셋째, 현재 연간 약 10만 톤의 생산규모를 가진 대규모 규석광산을 대상으로 설계된 중단채광법을 적용할 때의 채굴공동에 대한 안정성을 평가하였다(김임호, 정소걸, 조영도, 1996).

2. 3차원 경계요소법

2.1 이론적 배경

본 안정성 평가에 적용된 3차원 경계요소법의 이론적 바탕은 Lachat와 Watson(1976)에 의해 개발된 것으로서 해석 영역(Region)을 다음과 같이 k개의 세부영역(Subregion)으로 나누어 적분해를 구한다.

$$C_{ij}^{(k)}(x)u_j^{(k)}(x) + \int_{S_{(k)}} T_{ij}^{(k)}(x, y)u_j^{(k)}(y) dS_y = \int_{S_{(k)}} U_{ij}^{(k)}(x, y)t_j^{(k)}(y) dS_y \quad (1)$$

$$T_{ij}^{(k)}(x, y) = \frac{1}{8\pi(1-\nu^{(k)})r^2} \left\{ (1-2\nu^{(k)}) \left[n_i^{(k)}(y) \frac{(x_j - y_j)}{r} - n_j^{(k)}(y) \frac{(x_i - y_i)}{r} \right] + \left[(1-2\nu^{(k)})\delta_{ij} + 3 \frac{(x_i - y_i)(x_j - y_j)}{r^2} \right] n_x^{(k)}(y) \frac{(x_s - y_s)}{r} \right\} \quad (2)$$

$$U_{ij}^{(k)}(x, y) = \frac{1 + \nu^{(k)}}{8\pi E^{(k)}(1 - \nu^{(k)})r} \left\{ (3 - 4\nu^{(k)})\delta_{ij} + \frac{(x_i - y_i)(x_j - y_j)}{r^2} \right\} \quad (3)$$

여기서 $u_j^{(k)}(x)$ 는 세부영역 $R^{(k)}$ 의 표면 $S^{(k)}$ 상의 한 점 x 의 j^{th} 번째 요소의 변위이며, 마찬가지로 $u_j^{(k)}(y)$ 는 세부영역 $R^{(k)}$ 의 표면상의 한 점 y 의 j^{th} 번째 요소의 변위이다. 또한 $t_j^{(k)}(y)$ 는 j^{th} 번째 요소에 작용하는 힘이며, $C_{ij}^{(k)}(x)$ 는 x 에서의 Cauchy 상수, dS_y 는 적분할 미소요소의 면적이며 k 는 세부영역의 번호이다. 그리고 $E^{(k)}$ 는 세부영역 $R^{(k)}$ 의 영률, $\nu^{(k)}$ 는 세부영역 $R^{(k)}$ 의 포아송비이며, δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이고, r 은 x 와 y 사이의 거리이다.

위의 식(1)에 대한 수치해석적 해를 구하면, 세부영역 $R^{(k)}$ 내의 한점 x 에서의 변위 및 응력은 다음과 같이 주어진다.

$$u_i^{(k)}(x) = \int_{S_{(k)}} U_{ij}^{(k)}(x, y)t_j^{(k)}(y) dS_y - \int_{S_{(k)}} T_{ij}^{(k)}(x, y)u_j^{(k)}(y) dS_y \quad (4)$$

$$\delta_{ij}^{(k)}(x) = \int_{S_{(k)}} D_{lij}^{(k)}(x, y)t_l^{(k)} dS_y - \int_{S_{(k)}} S_{lij}^{(k)}(x, y)u_l^{(k)}(y) dS_y \quad (5)$$

여기서,

$$D_{lij}^{(k)}(x, y) = \frac{1 - 2\nu^{(k)}}{8\pi(1 - \nu^{(k)})r^2} \left[\delta_{li}r_{,j} + \delta_{lj}r_{,i} - \delta_{ij}r_{,l} + \frac{3}{(1 - 2\nu^{(k)})}r_{,i}r_{,j}r_{,l} \right] \quad (6)$$

$$S_{lij}^{(k)}(x, y) = \frac{(1 - 2\nu^{(k)})G^{(k)}}{4\pi(1 - \nu^{(k)})r^3} \left\{ 3 \frac{\partial r}{\partial n} \left[\delta_{ij}r_{,l} + \frac{\nu^{(k)}}{(1 - \nu^{(k)})} (\delta_{li}r_{,j} + \delta_{lj}r_{,i}) - \frac{5}{(1 - \nu^{(k)})}r_{,i}r_{,j}r_{,l} \right] + \frac{3\nu^{(k)}}{1 - 2\nu^{(k)}} [n_i r_{,j} r_{,l} + n_j r_{,i} r_{,l}] + 3r_{,i} r_{,j} r_{,l} + n_j \delta_{li} + n_i \delta_{lj} - \frac{1 - 4\nu^{(k)}}{1 - 2\nu^{(k)}} n_l \delta_{ij} \right\} \quad (7)$$

위 식에서 $G^{(k)}$ 는 세부영역 $R^{(k)}$ 에서의 剪斷係數이다. 그리고,

$$r_{,i} = \frac{\partial r}{\partial x_i} = \frac{(x_i - y_i)}{r} \quad (8)$$

$$\frac{\partial r}{\partial n} = \frac{\partial r}{\partial x_i} n_i = \frac{(x_i - y_i)}{r} n_i \quad (9)$$

n_i 는 세부영역 $R^{(k)}$ 위의 한 점 y 에서의 외향 법선벡터이다.

주어진 모델에 대하여 서로 다른 두 조건에서 응력해석이 가능하다. 첫째 조건은 Windows 환경하에서 Solver인 응력해석 프로그램을 집행하는 것이고, 둘째는 OS 즉, DOS 환경하에서 바로 응력해석 프로그램을 집행할 수 있다.

2.2 Pre-and-Post Processing

안정성 평가에서는 캐나다의 CANMET에서露天 및坑内採掘設計를 위해 개발한 Mine Designer(Pre-and-Post Processing 용, 1993)와 BEAP3D(탄성 경계요소법 S/W)를 이용하였으며 채굴에 의해 형성되는採掘空洞周圍 암반내에 응력분포 및 안정성을 평가하였다.

안정성 평가를 위해 첫번째 작업인 채굴공동의 모델링(Pre-processing)은 다음과 같은 순서로 수행된다. 즉, 채광설계圖面을 이용하여 각採區斷面圖를 작성하고 채구의 모서리에 대한 3차원 좌표를 기입함으로써 입력 준비를 완료하고 다음으로 이 도면을 보면서 Mine Designer(Windows 환경에서 수행됨)의 도움으로 채구의 각 모서리 좌표를 입력하여 채구의 입체 모델 즉, BEAP3D 응력해석境界要素網을 형성하는데, 이 때 Digitizer로써 각 모서리 좌표를 바로 입력할 수도 있다. 각각의 3차원 모델은 이들을 둘러싸고 있는 면으로 구성되며 결국 이 면으로써 경계요소망이 구성되는데, 이렇게 하여 작성된 각 면 요소별로 해당되는 암반물성 및 파괴조건, 초기지압조건, 응력해석 변수 등을 부여하면 전산모델링 준비는 완료된다. 모델링이 완료되면, 다음 단계인解析結果處理(Post-processing)를 하게된다. 해석이 정상적으로 진행되면 각要素別로應力과變位를計算하여 그結果를 Windows環境下에서 그래픽으로 나타나도록 도와주는 Mine Designer의 Post-processing 모듈로 연결될 수 있으며 이 때에는 해석결과 나타난 응력분포 및 모델의 변형정도를 그래픽으로 나타낼 수 있다. 응력분포는 응력 9개 성분과 주응력 성분 그리고 모델상에 주응력 크기와 방향도 나타낼 수 있다. 또한 각 요소의 안전율(Safety Factor)을 파괴조건에 따라 그래픽화할 수 있어 결과를 그래픽으로 보고 공동의 안정성을 평가할 수 있으며, 각 요소로부터 멀리 떨어져 있는 암반내의 응력 및 변위상태도 분석할 수 있는 기능도 가지고 있다.

3. 전산모델링

3.1 입력자료

채광으로 형성되는 채굴공동 주위에 작용하는 초기 응력 조건은 초기응력 측정을 하지 않고 탄성암반내에 자중 및 포아송비에 의해 결정할 경우와 초기응력을 실제로 측정하였을 경우로 나뉘어지는데, 후자의 경우 각 채구의 방향에 알맞게 설정된 새로운座標系로軸變換해서 계산된 값을 프로그램의 입력자료로 활용하였다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[\Sigma] = [C][\Sigma_0][C]^T$$

여기서, $[\Sigma_0]$ 은 초기지압을 측정하였을 때의 초기지압 조건 행렬이며, $[C]$ 는 좌표 축변환 행렬로서 다음과 같이 나타낸다.

$$[C] = \begin{Bmatrix} \cos(x', x) & \cos(x', y) & \cos(x', z) \\ \cos(y', x) & \cos(y', y) & \cos(y', z) \\ \cos(z', x) & \cos(z', y) & \cos(z', z) \end{Bmatrix}$$

$[C]^T$ 는 $[C]$ 의 Transpose이다. 또한 x', y', z' 등은 초기지압을 측정하였을 때의 직교좌표계의 3축으로서 각각西에서東,南에서北,海水面으로부터上向을 나타내며, x, y, z 등은 채광장의採區方向과 관련된 축으로서 x 축은 x' 축으로부터陽의 방향으로回轉한 값을 사용하고, y 축은 y' 축으로부터 양의 방향으로회轉한 값을 사용한다. 본 안정성 평가에서 적용된應力의 단위는 MPa이며, 압축응력을陰으로 그리고引張應力을陽으로 표시하였다. 채굴 공동의 안정성이 평가된 세 광산에 대한 초기응력 자료는 Table 1에서 보는 바와 같다.

암반의 영률을 SI 단위로 나타낸 결과를 사용하였으며, 이 값은 실험실에서試片으로 측정된 값을 토대로 시추코어의 RQD 값 및 현지암반평가를 통한 RMR 값을 고려하여 현지암반의 영률을 대표할 수 있도록 보정하였다.

Table 1. Initial stress state at the bottom of the lower most sublevel stopes of three mines.

Mines	Stress component					
	σ_{xx}	σ_{xy} (σ_{yx})	σ_{xz} (σ_{zx})	σ_{yy}	σ_{yz} (σ_{zy})	σ_{zz}
Nowhado Mine	-4.41	-0.48	-0.44	-3.16	-0.56	-4.55
Choongmu Mine	-18.9	0	0	-4.4	0	-4.4
Keumpyung Mine	-10.96	0	0	-2.91	0	-2.91

다. 즉, 실험실에서 영률을 측정하는 대상 암편은 현지 암반 보다 결함이 적기 때문에 실험실에서 측정한 영률은 일반적으로 현지 암반의 영률 보다 크게 나타난다. 따라서 실험실에서 계측된 값을 다음과 같이 RMR 값 혹은 RQD 값에 相應하도록 補正(Hoek, E. and E. T. Brown, 1988, Serafim, J. L. and J. P. Pereira, 1983) 하였다.

Serafim & Pereira(1983) 및 Bieniawski(1978)에 의하면 RMR로부터 현지암반의 변형계수는 다음과 같은 추정식을 사용하며 여기서 변형계수의 단위는 GPa 이다.

$$E_m = 2 \cdot RMR - 100 \text{ for } RMR \geq 55,$$

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \text{ for } RMR \leq 55$$

그리고, 탄성이론 및 Hoek & Brown에 의하면 현지 암반의 단축압축강도(q_m), 인장강도(S_t), 점착력(C_m)은 다음식으로부터 추정할 수 있다.

$$q_m = S_c \cdot \sqrt{s}$$

$$S_t = \frac{1}{2} S_c \cdot [m - \sqrt{m^2 + 4s}]$$

$$C_m = \frac{q_m}{2} \frac{1}{\tan(45^\circ + \varphi/2)}$$

여기서, S_c 는 실험실 시험으로부터 구한 단축압축강도, φ 는 내부마찰각이다. 그리고 m 및 s 값은 RMR 값과 이에 의해 분류된 암반조건에 따라 정해지는 암반강도지수이며, Bieniawski (1987)에 의하면 이는 다음과 같이 RMR 값과 삼축압축시험으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$m = m_1 \exp \left[\frac{RMR - 95}{13.4} \right]$$

$$s = \exp \left[\frac{RMR - 100}{6.3} \right]$$

여기서 m_1 값은 $s=1$ 로 하고 실내 삼축압축시험을 수행함으로써 구할 수 있으나, 본 논문에서는 산정된 RMR 값으로부터 대상지역의 암종에 대한 m 및 s 값을 Hoek & Brown에 의한 분류 기준에서 선택하였다.

암반의 포아송비는 실험실 시험으로부터 결정된 값을 적용하였으며, 암반의 강도는 실험실에서 측정된 암편의 強度를 바탕으로 영률과 같은 방법으로 보정하여 결정하였다. 그리고 암반의 摩擦角과 粘着力 역시 현지 암반 평가지수인 RMR 값을 기초로 보정한 값을 사용하였다.

BEAP3D S/W의 應力解析 프로그램에서는 經驗的 파괴조건(Hoek-Brown, 1980)과 Drucker-Prager(1952)의 파괴조건이 암반의 安全率 평가에 이용되고 있으며, 특히 Drucker-Prager의 파괴조건은 암반내 最大 主應力 및 最小 主應力은 물론 中間 主應力도 고려하므로 암반의 실제 舉動을 고려할 수 있는 장점이 있어 본 논문에서는 이 破壞條件을 현지암반의 파괴기준으로 설정하였다. Drucker-Prager 파괴기준의 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = (J_2)^{1/2} + \alpha I_1 - \kappa$$

여기서, I_1 와 J_2 는 각각 다음과 같다. 즉,

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\} / 6$$

이를 임의의 2차원 좌표계에 적합하게 나타내면 다음과 같다.

$$R = c \cos \varphi - \sin \varphi (\sigma_x + \sigma_y) / 2$$

위 식에서 α 와 κ 는 常數이며, c 와 φ 는 점착력 및 마찰각이다. 또한 R 은 암반의 파괴가 일어날 때 Mohr 원의 반경을 나타내며, $(\sigma_x + \sigma_y) / 2$ 는 이 때의 평균법선응력을 나타낸다.

Table 2. Input data of the stability analysis by the BEAP3D calculated after Hoek, E. and E. T. Brown(1988) and Serafim, J. L. and J. P. Pereira(1983) for three mines.

Mines	Input Data	Young's Modulus(MPa)	Poisson's Ratio	Uniaxial Compressive Strength(MPa)	Cohesion (MPa)	Friction Angle (°)
Nowhado Mine		10,000	0.16	34.8	5.24	57.1
Choongmu Mine		3,143	0.19	34.8	10.2	47.5
Keumpyung Mine		30,000	0.27	8.93	1.8	46.2

이상과 같은 과정으로 세 광산에 대한 전산 모델링의 입력자료는 Table 2와 같다.

3.2 전산해석

설계된 坑內 採鑛法을 現場에 適用 할 때 採掘作業場 周圍 空洞의 安定性이 확보되어야 안전한 조업이 보장 될 수 있다. 이를 위해서는 모든 채광장의 작업이 완료 된 시점에서 채굴공동의 안전율이 가장 작게 나타날 것으로 예상할 수 있어, 앞으로 채굴완료후 채굴공동을 활용할 것에 대비해서도 채굴이 완료된 시점에 대해 전산 모델링을 하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 중단채광법의 대상지역에서는 전체 채광장을 모두 모델링하며, 주방식 채광장은 채광장의 절반에 해당하는 지역을 모델링하였다. 본 안정성 평가에서는 다음과 같은 순서로 채굴공동의 모델링과 경계요소법에 의한 응력 해석을 실시하였다.

첫째, BEAP3D 패키지의 Pre-Processing 모듈인 Mine Designer의 도움으로 응력해석 경계요소망을 구성한다(예, Fig. 1 및 Fig. 3)

둘째, 암반물성 및 파괴조건, 초기지압조건, 계산변수 등의 순서로 전산해석에 필요한 모든 입력자료를 만든다.

셋째, 구성된 3차원 경계 요소망과 입력자료를 토대로 BEAP3D S/W에 의해 응력해석 프로그램을 집행한다.

넷째, 해석된 결과는 채굴에 의해 형성된 공동주위 암반내 응력 및 각 지점에 대한 변위의 크기이며, 각 요소 내에서의 응력 및 변위의 크기를 나타내는 입체 도형을 모니터로 출력한다. 이들 결과는 암반내 응력 9개 성분, 변위 3성분, 3개의 주응력, 안전율 분포 등으로서 칼라프린터로 프린트할 수 있다.

마지막으로 모델링이 완성된 모델에 대하여 서로 다른 두 조건에서 응력해석이 가능하다. 첫째 조건은 Windows 환경하에서 Solver인 응력해석 프로그램을 집행하는 것이고, 둘째는 OS 즉, DOS 환경하에서 바로 응력해석 프로그램을 집행할 수 있는데 前者의 경우가 後者 보다 執行時間이 적게 소요되나 최근 Windows 95 이상의 OS에서는 Windows 환경하에서 바로 집행해도 무방할 것으로 생각된다.

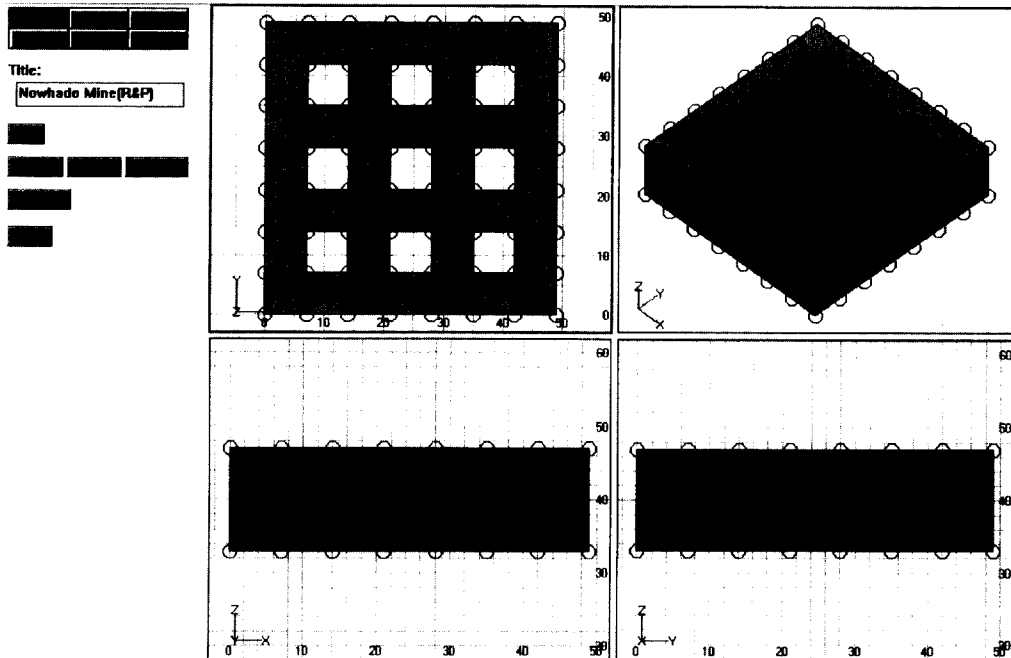


Fig. 1. Three dimensional boundary element mesh for the stress analysis of the room and pillar stopes (Nowhado Mine).

4. 현장적용 연구

4.1 적용사례 (I) : 노화도 납석광산

민경산업 노화도 납석광산은 광체의 형태가 괴상이며 천부에 부존하고 있는데, 지금까지는 주방식 채광법을 적용하여 상부 광체를 채굴함으로써 채광실수율이 저조하고 채굴공동의 유지가 문제시되었으나, 광체가 완경사이며, 맥폭이 50 m에 달해 대규모 광체에 적합한 중단채광법의 현장적용이 요구되었다. 따라서, 본 논문에서는 주방식 채광법을 적용한 상부 채광지역에 대한 채굴공동의 안정성 평가와 중단채광법을 적용할 때 형성될 채굴공동에 대한 안정성을 평가하고자 하였다. 주방식 채광법의 鑛柱는 가로 7 m × 세로 7 m, 높이 10 m 크기의 광주를 전체 18개 형성하고 광주와 광주 사이를 채광하는 방법을 채택하였으며, 구채광장에 있는 잔주의 가로와 세로의 길이는 새로운 하부 채광장의 광주와 동일한 크기를 가지나 높이는 14 m로 되어 있다. 한편 새로운 주방식 채광장의 상부와 구채구의 하부 사이에는 두께 10 m의 Crown Pillar를 두었다

(Fig. 1). 그리고 중단채광장은 전체 5개의 채구로 구분되고 각 채구는 폭 30 m, 길이 최소 152 m로부터 177 m까지 설계되었으며 채구와 채구사이에는 10 m의 폭을 가지는 殘柱(Rib Pillar)를 두어 채광장의 안전유지도를 도모하고자 하였다(Fig. 2).

해석결과 주방식 채광장에 대해서는, 舊採鑛場 및 하부 채광장 전체에서 殘柱를 제외한 곳의 안전율은 최소한 2.6 이상인 것으로 나타나지만 상하부 채광장의 잔주에서의 안전율은 최소 1.5까지로 나타나고 있다. 따라서 하부채광장의 채굴시에 수평방향의 Rock Bolting을 시공하여 이 지역에 발달되어 있는 鉛直方向의 절리면을 따른 잔주의 파괴를 방지하면 구채광장 하부 광체의 채광이 가능할 것으로 분석된다(Fig. 3). 한편, 본 주방식 채광장내 채굴공동의 변형을 측정하여 전산 모델링 결과와 대비함으로써 전산해석결과와의 검증은 시도하였다. 지중변위계로는 길이 6 m의 4점 MPBX를 사용하였으며, 총 2조의 지중변위계를 설치 측정하였다. 계측결과, 변위증가율이 거의 나타나지 않고 있어 이 압반은 변형을 일으키지 않고 안정된 상태로 유지되고 있다고 판

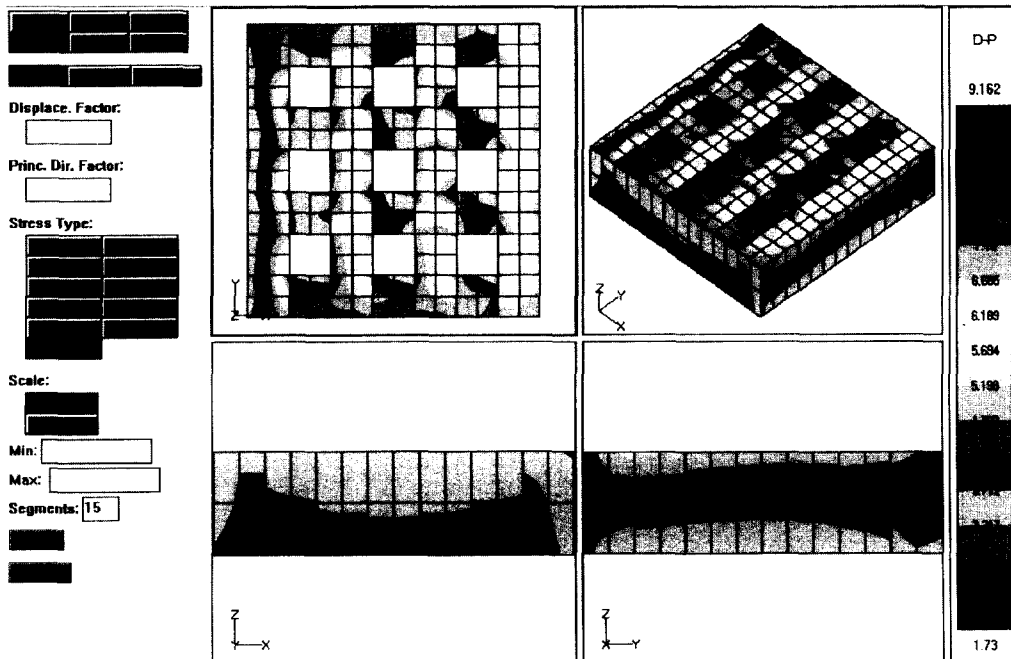


Fig. 2. Three dimensional boundary element mesh for the stress analysis of openings of the sublevel stoping method(Nowhado Mine).

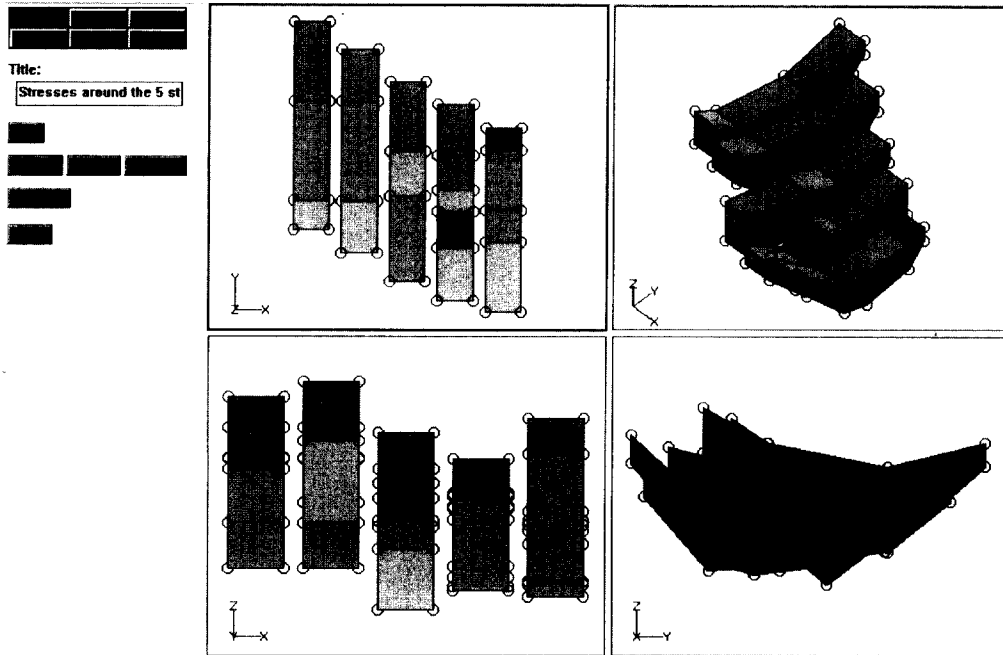


Fig. 3. Distribution of the expected safety factor(after Drucker-Prager's criterion) around the room and pillar stopes(Nowhado Mine).

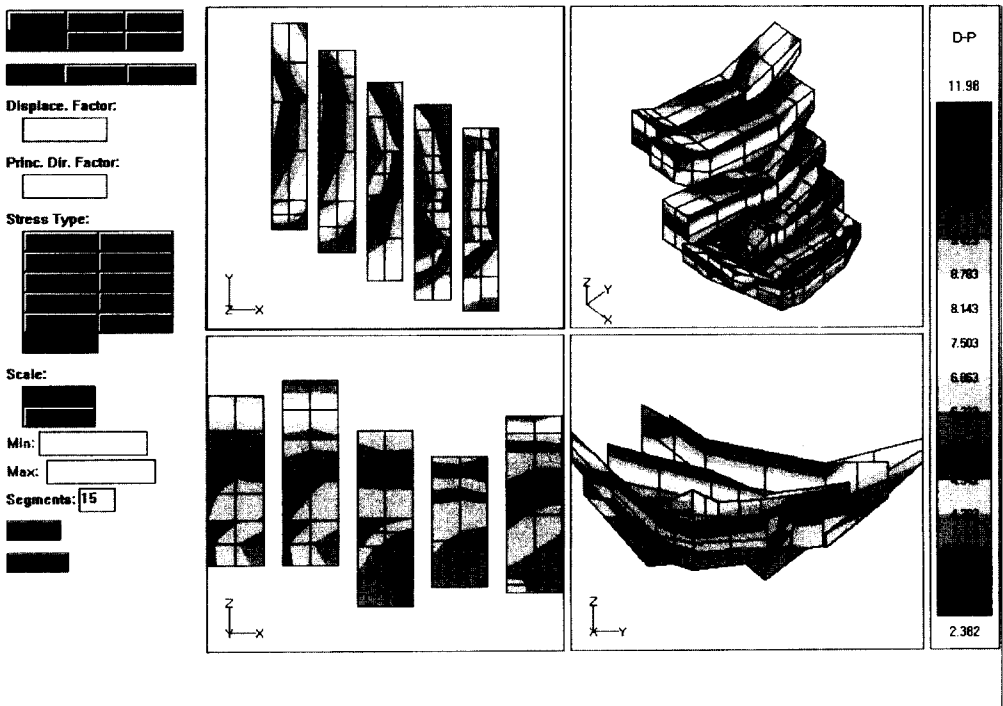


Fig. 4. Distribution of the expected safety factor(after Drucker-Prager's criterion) around the openings of the sub-level mining method(Nowhado Mine).

단된다. 그러나, 구 채광장의 잔광회수를 하여 채광실수율을 높이기 위해서는 잔광회수 방안에 따라 채광을 하면서 지속적인 지중변위계의 변위량을 측정하여야 하며 공동주위의 응력과 안전에 대한 추가 연구가 따라야 할 것이다.

또한, 중단채광장에 대한 안정성을 평가한 결과, 전 채구 사이의 광주 및 상하반 암반에서의 역학적인 안전율이 3 이상 최대 10 까지로서 채굴공동은 안전하게 유지될 것으로 판단되는데 이와 같이 안전율이 크게 나타나는 것은 Drucker-Prager의 파괴조건 적용시에 중간주응력이 고려되어 안전율이 계산되었기 때문으로 생각된다(Fig. 4).

4.2 적용사례(II) : 충무화학 정선 석회석 광산

충무화학 정선 석회석 광산은 노천채광에 의해 소량 생산하고 있으나, 산림훼손허가를 얻기 곤란하여 현재 허가를 득한 구역의 노천채광이 완료되면 갱내채광으로 전환해야 할 것으로 본다. 89년도부터 실시한 총 37공의 시추공이 밀집된 광체의 형태에 가장 적합하고

기계화가 가능한 중단봉락법을 설계하였고, 설계된 갱내 채광법을 적용할 때 채굴공동의 안정성을 평가하였다. 전체 채광장 방향은 광체의 심도 변화가 심하지 않으며 기 굴진된 갱도의 방향과 일치시키기 위하여 N10°E로 하였으며, 채광장 폭은 30 m이고 각 채광장 사이에 20 m의 간주를 설치하여 총 6개의 채광장으로 분할하여 설계하였다(Fig. 5).

전산모델링 결과(Fig. 6) 각 채광장과 채광장 사이의 광주 측벽 부근에서의 안전율은 전반적으로 2.5 이상으로 나타나 채광장 부근의 갱도 시설물 및 채굴공동이 안전하게 유지될 수 있을 것으로 평가 된다. 각 채광장의 최상부 및 최하단에서는 비교적 높은 안전율을 보이고 있으나 이 지역에서의 중간 주응력 및 최소 주응력이 인장응력으로 나타나고 있어 각 채광장의 최상부 및 최하단 부근에서 채광작업을 하는 동안에 낙방을 예방하기 위한 부분적인 보강(예, Rock Bolting)이 필요할 것으로 생각된다. 제 I 채광장으로부터 제 V 채광장의 남단 측벽 및 북단 측벽에서의 안전율은 최소 5.6, 최대 10.4를 보이고 있고 제 VI 채광장의 남단 측벽에서는

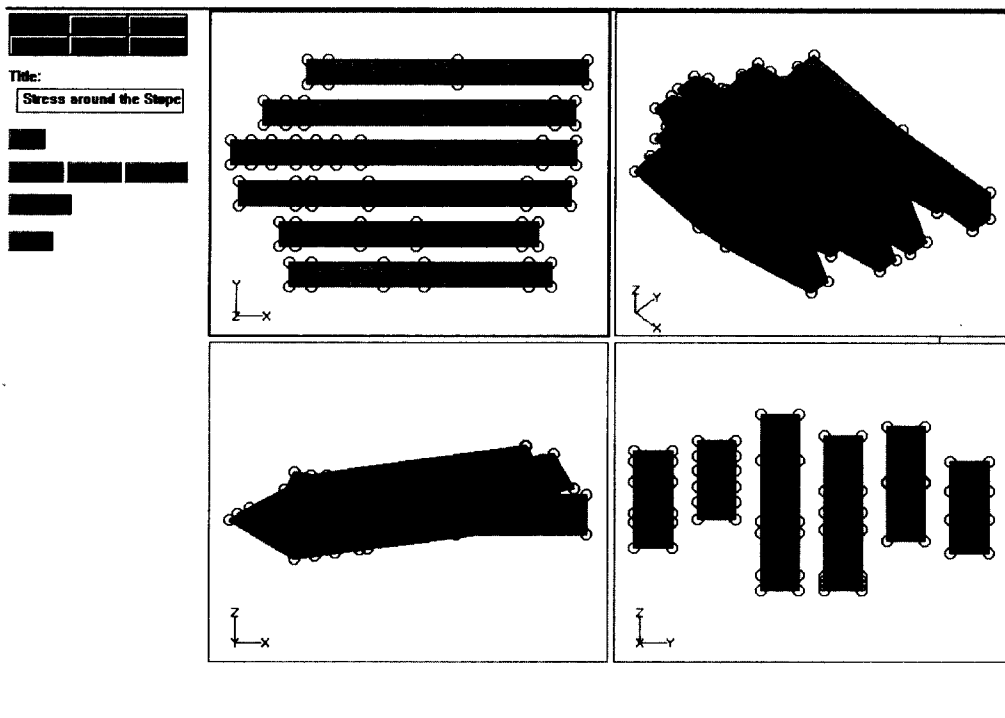


Fig. 5. Three dimensional boundary element mesh for the stress analysis of openings of the sublevel stoping method(Choongmu Mine).

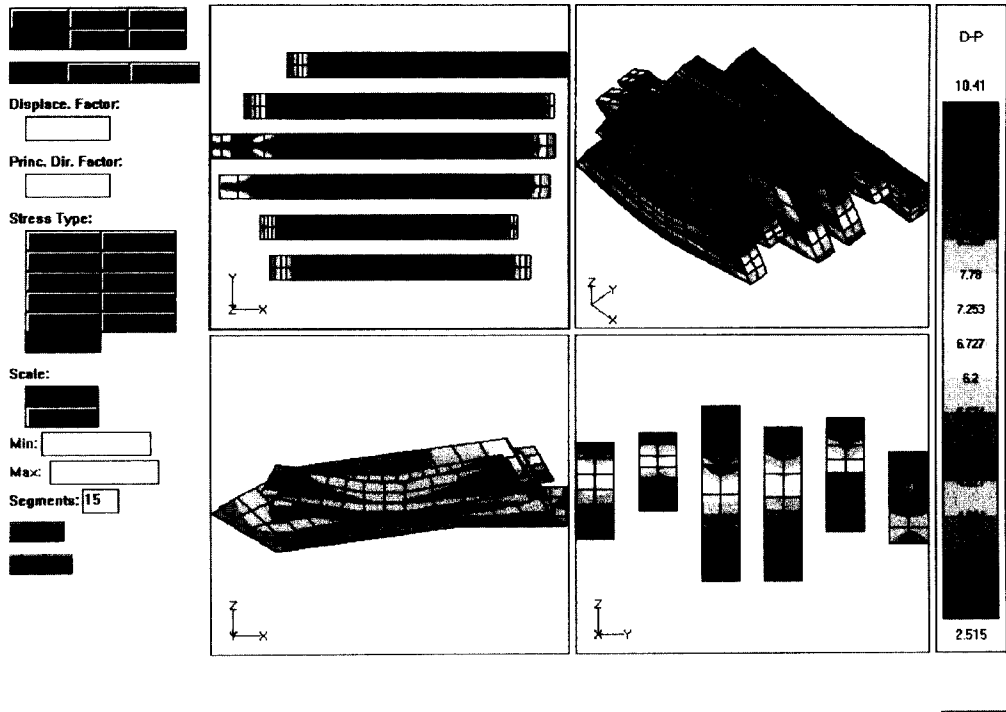


Fig. 6. Distribution of the expected safety factor(after Drucker-Prager's criterion) around the openings of the sub-level mining method(Choongmu Mine).

최소 3.5, 최대 5.1의 안전율을 보이고 있다. 각 채광장 사이의 광주 측벽에서의 안전율 분포를 살펴보면 전반적으로 심도가 증가함에 따라 안전율이 감소하고 있다. 이는 채광작업이 진행됨에 따라 (즉 채굴공동의 크기가 증가함에 따라) 채광장의 안전율이 감소함을 의미하고 있다. 따라서, 본 광산의 채광시 안전 관리는 채광작업이 하부 Sublevel로부터 상부 Sublevel로 진행이 됨에 따라 채광장 하부의 갱도 시설물에 대한 적절한 안전 점검이 필요할 것으로 보이며, 특히, 본 안정성 평가에서 현지암반의 물성과 초기지압조건이 고려되지 않고 안정성이 평가됨으로써 안전율이 지역에 따라서는 본 안정성 평가에서 평가된 것 보다 더욱 작을 가능성도 있기 때문에 현지암반평가를 비롯한 초기지압 측정이 선행된 안전성 평가가 차후에 다시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.3 적용사례(III) : 금평 규석광산

금평 규석광산은 연산 약 10만톤을 생산하는 광산으로 93년도부터 생산을 시작하였다. 현재의 개발방식은 4개의 계단을 형성한 노천채광방식이나 37번 국도 가시 지역에 위치하고 있고 속리산 문장대에서 훼손지역이 육

안으로 관찰되므로 산림훼손 허가를 얻기가 어려울 뿐만 아니라, 노천채광장의 지표 지형이 급경사 지역으로 벤치 형성이 어려워 갱내 채광이 불가피한 광산이다. 금평 광산의 갱내채광 대상지역은 현 노천채광장에서 서쪽으로 수평거리 250 m에 위치한 지역을 대상으로 하며 북동방향 능선하부이다. 채광장 방향은 N59°W 방향으로 설정하며 채광장 최상부에서 지표까지의 지표 보안광주는 50 m 이상으로 하고 채광장의 폭은 20 m, 광주의 폭은 30 m를 원칙으로 하여 총 여섯개의 채광장을 설계하였다(Fig. 7).

전산 모델링 결과(Fig. 8) 각 채광장과 채광장 사이의 광주 측벽 부근에서의 안전율은 전반적으로 1.4 이상으로 나타나는데, 본 논문에서 파괴기준을 설정할 때 현장의 암반평가 결과를 이용하여 암반의 역학적 특성을 보정한 값을 적용하여, 상대적으로 보수적인 파괴기준이 설정된 점을 감안하면, 1.4 이상의 안전율을 가지면 채광장 부근의 갱도 시설물 및 채굴공동이 안전하게 유지될 수 있을 것으로 평가된다. 아울러 각 채광장의 채굴순서는 제 1 중단으로부터 제 2 중단, 그리고 제 3 중단에 이르기까지 심도가 점점 감소되면서 작업을 진행

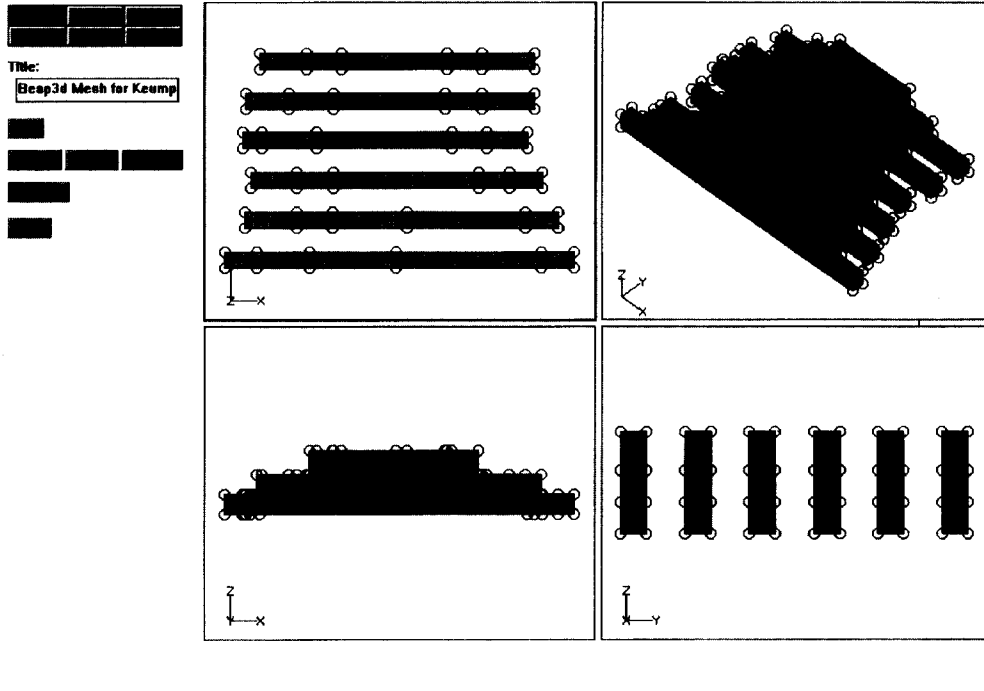


Fig. 7. Three dimensional boundary element mesh for the stress analysis of openings of the sublevel stoping method(Keumpyung Mine).

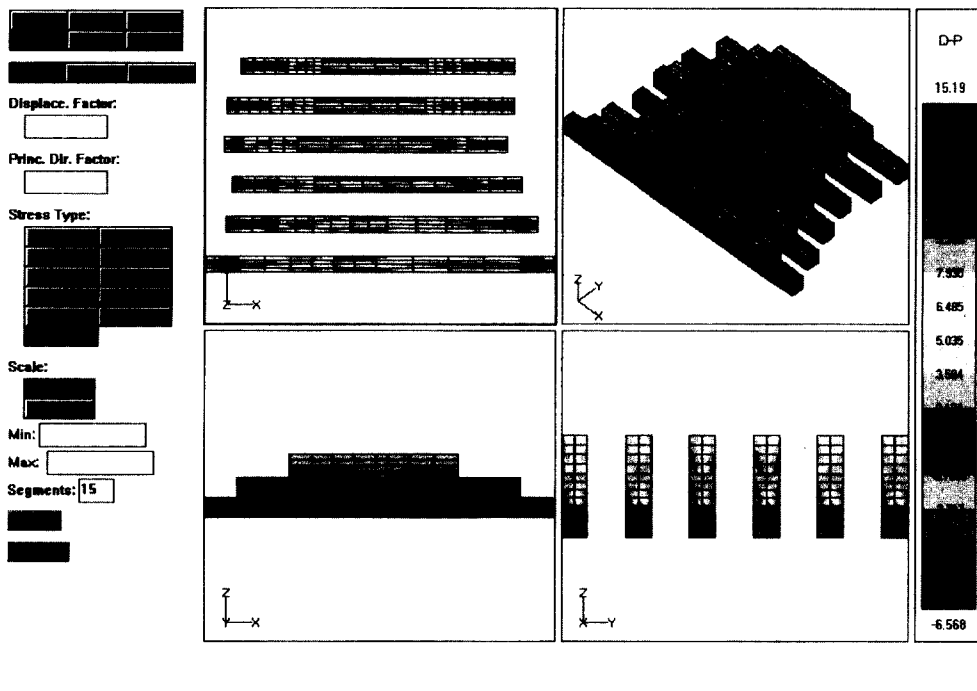


Fig. 8. Distribution of the expected safety factor(after Drucker-Prager's criterion) around the openings of the sub-level mining method(Keumpyung Mine).

하기 때문에 채굴 진행과 더불어 채광장 주위의 갱도시설의 안정성은 점점 향상될 것으로 평가된다. 한편 각 채광장의 최상부 및 최하단에서는 비교적 높은 안전율을 보이고 있으나 이 지역에서의 중간주응력 및 최소주응력이 인장응력으로 나타나고 있어 각 채광장의 최상부 및 최하단 부근에서 채광작업을 진행하는 동안에 인접하는 갱도시설을 안전하게 유지하기 위해 Rock bolt와 같은 부분적인 보강이 바람직할 것으로 판단된다.

또한 본 안정성 평가에서 초기지압조건을 가정하여 안정성이 평가됨으로써 안전율이 지역에 따라서는 본 논문에서 평가된 것 보다 더욱 작을 가능성이 있기 때문에 갱도 굴진시에 보다 체계적인 암반평가와 초기지압측정으로 채굴방향 및 채광장과 채광장 사이의 鑛柱에 대한 정밀 설계가 이루어져야 할 것으로 본다.

5. 결론 및 고찰

대규모 광체를 대상으로 갱내 채광법을 적용할 때 채굴작업장 주위의 갱도시설이 안전하게 유지되고 나아가 채굴공동의 안정성이 확보되면 채굴이 완료된 이후 채굴공동을 활용할 목적으로 세 개의 서로 다른 광체를 대상으로 BEAP3D에 의한 안정성 평가를 실시해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 노화도 납석광산의 주방식 채광장에 대해서는, 舊探鑛場 및 허부 채광장 전체에서 殘柱를 제외한 곳의 안전율은 최소한 2.6 이상인 것으로 나타나지만 상하부 채광장의 잔주에서의 안전율은 최소 1.5 까지로 나타나고 있다. 한편, 중단채광장에 대한 안정성을 평가한 결과, 전 채구 사이의 광주 및 상하반 암반에서의 역학적 안전율이 3 이상 최대 10 까지로서 채굴공동은 안전하게 유지될 것으로 판단되는데 이와 같이 안전율이 크게 나타나는 것은 Drucker-Prager의 파괴조건 적용시에 중간 주응력이 고려되어 안전율이 계산되었기 때문으로 생각된다.

둘째, 충무화학 정선 석회석 광산의 경우는 채광장과 채광장 사이의 광주 측벽 부근에서의 안전율은 전반적으로 2.5 이상으로 나타나 채광장 부근의 갱도 시설물 및 채굴공동이 안전하게 유지될 수 있을 것으로 평가된다.

셋째, 금평 규석광산의 경우는 각 채광장과 채광장 사이의 광주 측벽 부근에서의 안전율이 전반적으로 1.4 이상으로 나타나는데, 본 논문에서 파괴기준을 설정할 때 현장의 암반평가 결과를 이용하여 암반의 역학적 특성

을 보정한 값을 적용하여, 상대적으로 보수적인 파괴기준이 설정된 점을 감안하면, 채광장 부근의 갱도 시설물 및 채굴공동이 안전하게 유지될 수 있을 것으로 평가된다.

넷째, 각 적용사례에서 채광장은 전반적으로 심도가 증가함에 따라 안전율이 감소하고 있는데 이는 채광작업이 진행됨에 따라 (즉 채굴공동의 크기가 증가함에 따라) 채광장의 안전율이 감소함을 의미하고 있다. 따라서, 중단채광법을 적용할 경우 안전 관리는 채광작업이 허부 Sublevel로부터 상부 Sublevel로 진행이 됨에 따라 채광장 하부의 갱도 시설물에 대한 적절한 안전 점검이 필요할 것으로 보이며, 특히, 본 안정성 평가에서 현지암반의 물성과 초기지압조건이 고려되지 않고 안정성이 평가됨으로써 안전율이 지역에 따라서는 본 논문에서 평가된 것 보다 더욱 작을 가능성도 있기 때문에 현지암반평가를 비롯한 초기지압 측정이 선행된 안전성 평가가 차후에 다시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

다섯째, 각 채광장의 채굴심도가 점점 감소되면서 작업을 진행하기 때문에 채굴 진행과 더불어 채광장 주위의 갱도시설의 안정성은 점점 향상될 것으로 평가된다.

여섯째, 각 채광장의 최상부 및 최하단에서는 비교적 높은 안전율을 보이고 있으나 중간주응력 및 최소주응력이 인장응력으로 나타나고 있어 각 채광장의 최상부 및 최하단 부근에서 채광작업을 진행하는 동안에 인접하는 갱도시설을 안전하게 유지하기 위해 Rock bolt와 같은 부분적인 보강이 바람직할 것으로 판단된다.

이상의 모델링 및 해석 결과를 종합해 볼 때, BEAP 3D 패키지는 Pre-and-Post 기능을 잘 갖추고 있어 모델링 과정이나 해석결과의 처리 작업시에 그래픽에 의해 개인용 컴퓨터로 충분히 소화해 낼 수 있는 장점이 확인되었으며, 等方彈性體로 가정할 수 있는 塊狀의 암반내에 구조물을 설계할 때, 또한 채굴 공동의 활용 방안을 위한 안정성 평가를 위해, 본 논문에서 적용한 BEAP3D 패키지가 편리하게 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. MRL Lab. & GEMCOM Services Inc. (1993) BEAP User Manual, CANMET, Canada, 66p.
2. Grant D. R., Hudyma M. R., and Diering J. A. C. (1991) Three dimensional stress analysis using BEAP, Computer application in the min-

- eral industry, Department of Min. & Min. Proc. Eng., UBC, Canada, pp.643-654.
3. Grant D. R., Potvin Y. and Pocque P. (1993) Three dimensional stress analysis technique applied to mine design at Golden Giant Mine, First Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics, March 27-30 1993, Montreal, Quebec, pp.5-15.
 4. Yu Y. S. and Closset L. (1990) BEAP3D-A Boundary Element Application Package for three-dimensional Stress Analysis of Mine Structures, Proceedings-Stresses in Underground Structures, Oct. 2-3, Ottawa, Ontario, Canada, pp.140-150.
 5. Yu Y. S., Closset L., Toews N. A., Thomson S. and Hamel G. (1991) A practical mining application using the BEAP3D software package, Computer application in the mineral industry, Department of Min. & Min. Proc. Eng., UBC, Canada, pp.713-722.
 6. 김입호, 정소걸, 조영도, 한공창, 선우춘, 류창하, 류시영 (1995) Study for the Mechanization of Mining Method for Large Scale Ore Bodies, KR-94(C)1-5, 연구보고서(KIGAM Research Report), 250p.
 7. 김입호, 정소걸, 조영도 (1996) Study for the Mechanization of Mining Method for Large Scale Ore Bodies, KR-95(C)-8, 연구보고서(KIGAM Research Report), 112p.
 8. 김입호, 정소걸, 강선덕, 조영도 (1997) Study for the Mechanization of Mining Method for Large Ore Bodies, 연구보고서(KIGAM Research Report), KR-97(C)-24, 117p.
 9. Lachet J. C. and Watson J. O. (1976) Effective Numerical Treatment of Boundary Integral Equations: A Formulation for Three-Dimensional Elastostatics; Int. J. for Numerical Method in Engineering, 10, pp.991-1005.
 10. Thomson S. (1993) Mine Designer-An automated graphical data generation program integrating numerical modelling with the mine design process(Version 2.0), MRL 93-087(TR), 60p.
 11. Hoek, E. and E. T. Brown, 1988, The Hoek-Brown Failure Criterion-a 1988 Update, Rock Engineering for Underground Excavation, Proc. of 15th Canadian Rock Mechanics Symp. Toronto, October 1988, pp.31-38.
 12. Serafim, J. L. and J. P. Pereira, 1983, Considerations of the Geomechanical Classification of Bieniawski, Proc. of the Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction, Vol. 1, pp.II.33-42.
 13. Bieniawski Z. T. (1978) Determining rock mass deformability-experience from histories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 15, pp.237-247.
 14. Hoek E. and E. T. Brown (1980) Empirical strength criterion for rock mass, J. Geotech. Eng. Div. ASCE 106, pp.1013-1035.
 15. Bieniawski Z. T. (1987) Strata control in mineral engineering, A. A. Balkema, Rotterdam, 212p.
 16. Drucker D. C. and W. Prager (1952) Soil mechanics and plastic analysis or limit design, Quarterly of applied mathematics, vol. 10, pp.157-165.