

## 심부 급경사 연약층의 채굴 진행에 따른 주변 암반 거동의 탄소성 해석 및 현장계측

정소걸<sup>1)</sup>, 신중호<sup>1)\*</sup>

### Elasto-plastic Analysis and In-situ Measurement on Rock Behaviors with Stepwise Excavation of the Steep Soft Seam at a Great Depth

So-Keul Chung and Joong-Ho Synn

**Abstract** For the deep underground excavation site with the geological complexity of soft seam and hard rock, the numerical analysis and in-situ measurement on the behaviors of roadway and surrounding rock according to stepwise excavation of the steep soft seam are carried out. The strata behavior is modeled using elasto-plastic FEM considering the empirical failure criteria of Hoek & Brown and the strain-softening model. Hydraulic pressure capsule, MPBX and tape extensometer are installed around the roadway for the in-situ measurement of rock stress and deformation. Despite the complexity of geology and excavation procedure, the elasto-plastic analysis considering the empirical failure criteria of Hoek & Brown and the strain-softening model shows good agreement with the in-situ measurement. Comparison of numerical modeling with in-situ measurement enables to predict the behaviors of the roadway and to obtain design parameters for the excavation and support at depth.

**KeyWords** Steep soft seam, Stepwise excavation, Elasto-plastic analysis, Strain-softening model, In-situ measurement

**초 록** 연약층과 견고한 암반층이 습곡형태로 혼재된 지질조건의 지하 심부 채굴 현장을 대상으로, 심부 급경사 연약층의 단계적 굴착 진행에 따른 갱도 및 주변 암반의 거동 양상을 전산해석과 현장계측을 통하여 비교 분석하였다. 전산해석에서는 Hoek & Brown의 경험적 파괴기준 및 변형률연화모델을 적용한 탄소성 해석 기법을 이용하였다. 현장계측에서는 유압캡슐, 지중변위계, 내공변위계를 갱도 및 주변 암반에 설치하여 응력과 변위를 계측하였다. 경험적 파괴조건 및 변형률연화모델을 이용한 탄소성 해석은, 현장 지질조건 및 채굴과정의 복잡함에도 불구하고 현장계측결과와 유사한 양상을 보여주어 타당성을 검증할 수 있었다. 이러한 전산해석 및 현장계측의 비교를 통해 지하 굴착 갱도의 변형 거동 과정을 예측하고 이후의 굴착 및 지보보강 설계의 지침을 제공할 수 있을 것이다.

**핵심어** 급경사 연약층, 단계적 채굴, 탄소성해석, 변형률연화모델, 현장계측

## 1. 서 론

자원개발 뿐만 아니라 다양한 지하공간의 활용을 위한 지하개발이 점차 심부화됨에 따라 심도증가에 따른 지압 및 이와 관련된 암반거동 문제의 중요성은 더욱 증대되고 있다. 특히, 파쇄대나 연약층이 견고한 암반층에 협재되어 있거나 습곡형태를 가지는 복잡한 지질

구조조건에서, 지하 굴착에 따른 채굴적 및 주변 암반의 거동 양상은 지질구조와 지압 등의 복합적 작용에 의해 다양한 형태로 나타날 수 있다.

이러한 조건에서의 안전한 지하개발을 위해서는 지하 굴착 공간의 규모, 형태와 지반특성을 잘 고려한 역학적 안정성 해석을 통한 예측 및 현장에서의 굴착 진행에 따른 암반거동 계측을 이용한 적정지보 설계 평가 기법 등이 선행적으로 확보되어야 한다.

본 연구에서는 지하 심부이면서 연약층과 견고한 암반층이 습곡형태로 혼재되어 있는 지질구조조건으로서 약 700 m 심도의 채굴작업장을 가진 국내 석탄광

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

\*교신저자(Corresponding Author): jhsynn@kigam.re.kr

접수일: 2004년 8월 23일

심사 완료일: 2004년 8월 26일

지역을 대상 현장으로 하여, 심부 급경사 연약층(탄층)의 단계적 굴착 진행에 따른 하반 갱도 및 주변 암반의 거동 양상을 탄소성 해석과 현장계측을 통하여 비교 분석하였다.

기존에 김영구 외 (1991)는 같은 현장 모델을 대상으로 탄소성 수치해석 논문을 발표한 바가 있는데, 그 내용을 보면 이론 설명 부분에서는 취성 암석의 변형률연화모델에 대한 설명과 필요성을 기술하였지만 실제 해석과정 부분에서 언급하였듯이 파괴 이후의 변형률연화 및 물성변화 등을 고려하지 못한 완전탄소성모델(변형률연화계수,  $\beta=0$  으로 가정)의 일반적인 탄소성 해석을 하였다. 이로 인해 실제 현장계측결과와 해석결과에 많은 차이를 나타내는 한계를 보였다.

이러한 기존 연구의 한계를 해결하고 보다 나은 실제적 현상의 모델링 기법을 개발하기 위하여, 본 연구에서는 Hoek & Brown의 경험적 파괴기준의 적용과 아울러 암석과 같은 취성재료의 특성인 파괴 이후의 변형률연화모델 및 파괴 이후의 물성(영률) 변화를 적용한 탄소성 해석 기법을 도입하였다. 그리고 현장계측과의 비교를 위해, 연약 탄층대 하부 암반에 있는 수평 연층 갱도 주변에 유압캡슐과 지중변위계(MPBX) 및 갱도 내부에 tape extensometer를 설치하여 상부 채굴 진행에 따른 거동을 계측하였다.

이러한 탄소성 해석 및 현장계측 결과를 비교 분석함으로써, Hoek & Brown의 경험적 파괴기준 및 변형률연화모델을 적용한 탄소성 해석 기법의 타당성을 검증하고, 한편으로 심부의 복잡한 지질구조에 놓여있는 굴착 갱도와 주변 암반의 거동 양상 파악을 통해 이후 굴착 진행에 따른 거동과 안정성 예측에 대하여 검토하였다.

## 2. 탄소성 해석 기법

일반적으로 탄소성 해석 방법은 완전탄소성 또는 변형률경화 거동을 보이는 재료에는 적합하지만, 취성 거동을 보이는 암반에의 직접적 적용에는 제약이 있다. 이러한 취성 암반의 거동은 변형률연화이론에 따라 모델링할 수 있다. 여기서는 기본적인 탄소성해석이론을 바탕으로 변형률연화모델에서 암석의 소성변형률과 이에 대응하는 응력 결정을 위해 Hoek & Brown (1988, 1997)의 경험적 파괴기준을 적용하였다. 변형률연화모델은 Lee & Mizuta (1977)에 의해 제안된 최대응력 이후의 응력-변형률 관계식을 이용하였다.

### 2.1 파괴조건 및 소성포텐셜

현장 암반에 대한 파괴기준은 신선한 암석 자체 뿐만

아니라 불연속면과 취약면 또는 이들이 나타내는 이방성에 의한 역학적 특성을 고려해야 한다. 여기서는 이러한 개념의 파괴기준으로서 Hoek & Brown (1988, 1997)이 제안한 (1)식의 경험적 파괴기준을 적용하였다. 여기서  $m$ 과  $s$ 는 암반특성에 관련된 상수로서  $m$ 은 암석의 취성도와 관계되며  $s$ 는 암반의 풍화도와 관계된다.  $m$ 은 신선한 암반인 경우의  $m$ 값으로서 암종에 따라 다른 값을 가진다 (Hoek & Brown, 1997). 그리고  $\sigma_c$ 는 일축압축강도,  $RMR$ 은 Bieniawski에 의해 제안된 암반평가방법인 Rock Mass Rating (Singh, 1999)에 의한 암질지수값,  $\sigma_1$ 은 최대주응력,  $\sigma_3$ 는 최소주응력이다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + [m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2]^{1/2} \quad (1)$$

비교란 암반;

$$m = m_i \exp\left[-\frac{RMR-100}{28}\right], \quad s = \exp\left[-\frac{RMR-100}{9}\right]$$

교란 암반;

$$m = m_i \exp\left[-\frac{RMR-100}{14}\right], \quad s = \exp\left[-\frac{RMR-100}{6}\right]$$

경험적 파괴조건식으로부터 소성포텐셜을 나타내면 (2)식과 같으며, 특히 인장파괴시의 소성포텐셜은 (3)식으로 된다.

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 - [m\sigma_c\sigma_1 + s\sigma_c^2]^{1/2} = 0 \quad (2)$$

$$F = \sigma_1 + \frac{1}{2} \sigma_c [m - (m^2 + 4s)^{1/2}] = 0 \quad (3)$$

### 2.2 변형률연화모델

암석의 파괴강도 이후의 응력-변형률 관계는 Lee & Mizuta (1977)가 제시한 바와 같이 다음의 지수함수로 표현될 수 있다.

$$Y = Y_0 \exp\left[-\beta \left\{ \varepsilon_1 - \varepsilon_3 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2G} \right\}^{\lambda - \mu \sigma_3} \right] \quad (4)$$

여기서,  $Y$ : 최대강도 이후 임의점에서의 항복응력

$Y_0$ : 초기항복응력

$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2G}$ : 소성 변형률

$G$ : 강성률

$\beta, \lambda, \mu$ : 재료상수

$\sigma_3$ : 구속압(confining pressure)

$\varepsilon_1, \varepsilon_3$ :  $\sigma_1, \sigma_3$ 에 대응하는 변형률(strain)

임의의 점에서의 응력상태와 변형률을 알면 (4)식으

로부터 파괴이력이 없는 암반의 항복응력을 구할 수 있다. 전산해석에서 사용되는 변형률연화지수  $\Gamma$ 는  $Y/Y_0$ 에 해당되므로 (4)식으로부터 (5)식과 같이 표현된다. 따라서  $\Gamma$ 는 소성변형률 ( $\epsilon_p$ )와 구속압 ( $\sigma_3$ )의 함수이며 변형률연화계수  $\beta, \lambda, \mu$ 로써 결정할 수 있다. 이들 변형률연화계수는 암석에 따라 다른 값을 가지는 재료상수로서, 여러 구속압조건인 삼축압축시험을 통해 얻어진 전과정 응력-변형률 관계로부터 다차원 회귀분석을 통해 구할 수 있다.

$$\Gamma = \exp[-\beta \epsilon_p^\lambda - \mu \sigma_3] \quad (5)$$

### 2.3 초기응력법에 의한 탄소성해석

초기응력법 (Zienkiewicz et al, 1969)은 비선형 문제를 일련의 근사해로 풀어가는 방법으로서, 하중증분 과정에서 먼저 각 절점에서 탄성변형률 증분과 응력 증분을 구하고 여기서 실제 응력 증분을 뺀 증분차를 물체력 (body force)으로 환산한다. 그리고 재료의 변형을 허용하면서 물체력을 제거하면 변형률과 이에 대응하는 응력변화가 일어난다. 이렇게 얻은 결과가 파괴조건을 만족하지 않으면 다시 물체력으로 재료 전체에 재분배하는 과정을 수렴할 때까지 반복한다.

여기서는 완전탄소성 조건으로 가정하여 증분을 계산하고 구해진 응력 및 변형률을 (4)식에 대입하여  $Y$ 를 계산하고 다음으로 (5)식에 의하여  $\Gamma$ 를 결정하여, (2)식 및 (3)식의 함수  $F$ 를 단계별로 변화시켜 변형률연화를 일으키는 응력-변형률 관계를 해석하였다.

### 3. 대상 현장의 지질 및 계층시스템

심부 급경사 연약층의 단계적 채굴 진행과 같은 상황은 석탄층의 중단분락식 채굴 현장에서 잘 나타난다. 대상 현장의 지층 구조는 Fig. 1과 같다. 협재된 탄층의 경사는 45°내외이고 폭은 평균적으로 3 m 정도이다. 상하반은 견고한 사암으로 이루어져 있다. 본 연구의 대상영역은 Fig. 1에서 600 ML~550 ML의 범위로서 수직고는 약 50 m이다. 중단분락식 채굴 방식에서는 이 구간을 4개의 중단 (sub-level)으로 나누어 600 ML에서부터 550 ML까지 단계적으로 하향 채굴한다.

각 중단별 단계적 하향 채굴 진행에 따른 550 ML의 하반 갱도 및 암반의 거동을 조사하기 위하여, 채굴적 하부에 위치하고 있는 550 ML 갱도 (Fig. 1 참조)와 그 주변 암반내에 Fig. 2와 같이 응력 및 변형 계측시스템을 설치하였다. 암반응력 측정을 위하여 3개의 유압캡슐 (hydraulic pressure capsule)을 갱도 상부쪽 암반내

7~8 m 깊이에 각각 설치하였다. 지중변위 측정을 위하여 4개의 다점지중변위계 (MPBX)를 갱도의 상하 좌우에 각각 9~15 m의 최대측점 깊이로 설치하였다. 그리고 갱도단면변형 측정을 위하여 3개 측선의 갱도단면변형측정기 (tape extensometer)를 갱도내에 설치하였다.

### 4. 해석모델 및 입력자료

#### 4.1 해석모델

해석모델은 600 ML~550 ML의 영역을 대상으로 하였다. 모델 크기는 242 m × 320 m (심도범위 × 수평범위)에 해당되며 모델의 상부는 지표로부터 475 m 심도이고 하부 경계는 717 m 심도이다.

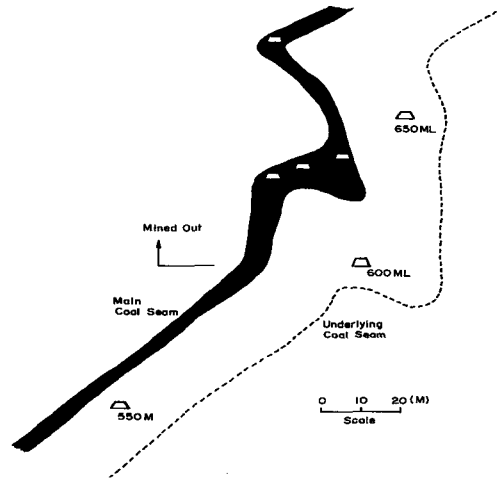


Fig. 1. Sectional view of geology around the measuring site

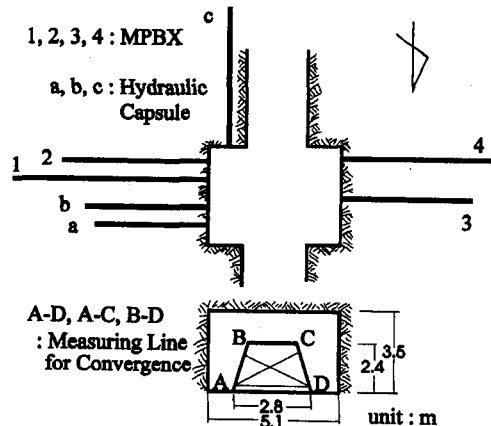


Fig. 2. In-situ measuring system of rock stress and deformation

Fig. 3은 탄소성 유한요소해석을 위한 모델이다. 현장의 채굴방식은 중단분락식이므로 중단별 단계적 채굴 진행에 따른 해석을 위하여 600 ML 하단, 550 ML 1중단, 550 ML 2중단, 550 ML 3중단, 550 ML 하단 순으로 5단계의 채굴진행단계로 나누었다. 각 중단별로 채굴이 진행되면 그 중단에 해당되는 요소군을 제거하여 채굴적이 형성되도록 하였다.

본 해석에서는 암석 및 연약 탄층 요소를 균질등방체로 가정하였고 평면변형률조건을 적용하였다. 파괴기준으로는 Hoek & Brown의 경험적 파괴기준을 이용하였고 암석 요소의 경우는 파괴 이후 변형률연화거동과 물성(영률) 변화를 고려하였다.

4.2 입력자료

탄소성 해석을 위한 암반물성 및 파괴조건계수는

Table 1 및 Table 2와 같다. 본 해석에서는 파괴 후에 암석 물성의 변화를 고려하였다. Table 1에서, 파괴후의 영률은 파괴전 값의 50%로 저하되도록 하였고, 파괴 이후 사암의 강도는 변형률연화모델에 의해 소성변형 진행에 따라 달라지는 것이므로 나타내지 않았다.

파괴조건계수는 RMR을 기준으로 정하였다. 양호한 사암의 RMR은 70, 파쇄 또는 불량한 사암의 RMR은 40으로 조사됨에 따라, 이들 값을 각각 파괴 전후 사암의 RMR값으로 적용하여 m, s 값을 계산하였다. 연약층인 석탄의 경우는 RMR을 측정할 수 없으므로 석탄의 연약성을 고려하여 RMR을 0으로 가정하고 m, s 값을 정하였다. 그리고 변형률연화계수에 있어서 석탄의 경우는 본 심도지역의 초기응력 수준의 구속압에서는 완전탄소성 또는 변형률경화 거동을 할 것으로 예측되므로 β값을 0으로 하였다.

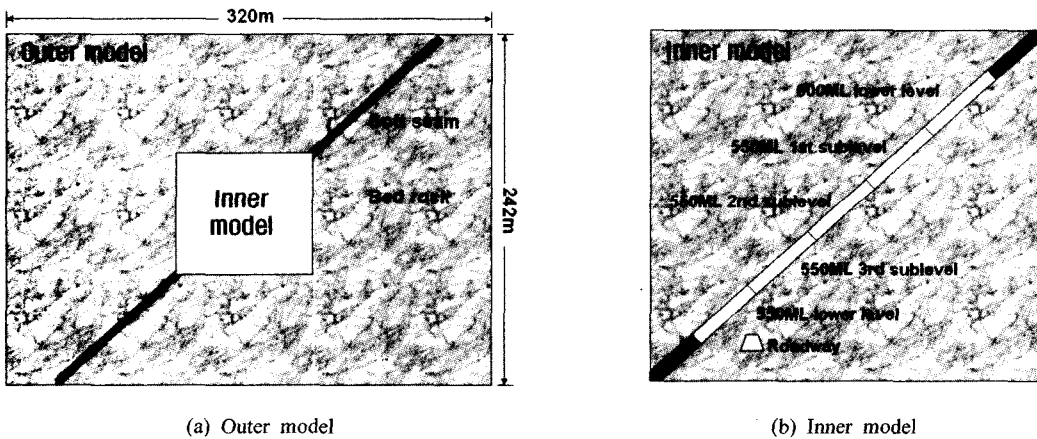


Fig. 3. The model for elasto-plastic analysis

Table 1. Mechanical properties for elasto-plastic analysis

Type	$\sigma_c$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$
Sandstone	173.7	6178	0.18
Coal	0.9	153.7	0.26
Failed sandstone	-	3089	0.18

\*  $\sigma_c$ : Uniaxial compressive strength, E; Young's modulus,  $\nu$ : Poisson's ratio

Table 2. Parameters for failure criteria

Type	Hoek-Brown parameter		Strain-softening parameter		
	m	s	$\beta$	$\lambda$	$\mu$
Sandstone	1.3	0.01	500	1.4	$-2.30 \times 10^{-3}$
Coal	0.016	$0.13 \times 10^{-6}$	0	1.31	$-3.56 \times 10^{-3}$
Failed sandstone	0.14	0.0001	500	1.4	$-2.30 \times 10^{-3}$

초기지압조건은 550 ML에서 측정된 값 (Kim et al., 1991)을 이용하여 각 심도별로 다음 식과 같이 환산하여 유한요소망의 초기응력치로 적용하였다.

$$\sigma_v = \sigma_m + \gamma \Delta H, \quad \sigma_h = K_0 \sigma_v \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_m$ 은 550 ML 심도에서 측정된 연직응력값이고  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$ 는 측정심도와  $\Delta H$ 의 심도차가 나는 지점에서의 연직응력과 수평응력이다.  $\gamma$ 는 암반의 단위중량이고  $K_0$ 는 수평응력 대 연직응력의 비인 측압계수이다. 550 ML에서 측정된 연직응력은 17.6 MPa이고 수평응력은 8.5 MPa로서 측압계수는 0.483이다.

### 5. 해석 결과

#### 5.1 채굴적 상하반내 응력분포 변화

600 ML 하단 채굴 완료 단계에서 직상하부 암반에서 일부 이완이 일어나고 하반 갱도 주위에서 압축응력 집중이 발생하였으나 그 외에는 큰 응력변화가 없는 것으로 나타났다. 550 ML 1중단 채굴부터 하반갱도에 인접한 암반에서 이완이 일어나고 채굴경계면 상하반에서 응력집중이 증가하기 시작하였다. 550 ML 하단 채

굴 완료시에는 하반갱도를 포함한 상하반의 넓은 지역에서 응력이 이완되어 압축응력이 거의 소멸하거나 낮은 인장응력권이 형성되었다. 그리고 채굴 전과정에 걸쳐 채굴적 전방의 상하반에서 발생하는 수평응력집중도가 수직응력집중도보다 크게 나타났다.

채굴적 상반에서의 단계적 채굴 진행에 따른 응력분포 변화는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 최대응력집중 즉, 선행압은 채굴경계면 전방 3~4 m 지점에서 나타났으며 그 크기는 채굴적에서 멀어질수록 작아져서 채굴적 폭의 약 7배 거리인 14.1 m 지점 (Fig. 5)에서는 거의 약화되었다. 채굴적에 인접한 0.35 m 지점 (Fig. 4)의 경우, 600 ML 하단 채굴완료시에 수평응력 및 연직응력의 최대집중도는 각각 1.62 및 1.25이고, 550 ML 하단 채굴완료시에는 각각 3.59 및 2.22로 증가하였다.

채굴적 하반에서의 단계적 채굴 진행에 따른 응력분포 변화는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 하반에서는 상반과 달리 선행압이 뚜렷이 나타나지는 않았으며, 550 ML 1중단 채굴까지는 수평응력 및 연직응력 모두 초기응력의 1.0~1.3배 정도였다. 550 ML 2중단 채굴부터는 오히려 채굴적과 하반 갱도의 사이 암반에서 하반 갱도 형성의 영향을 받아 응력교란이 심하고 응력집중도도 크게 나타났다. 이는 채굴 진행에 따라 채굴작업장의

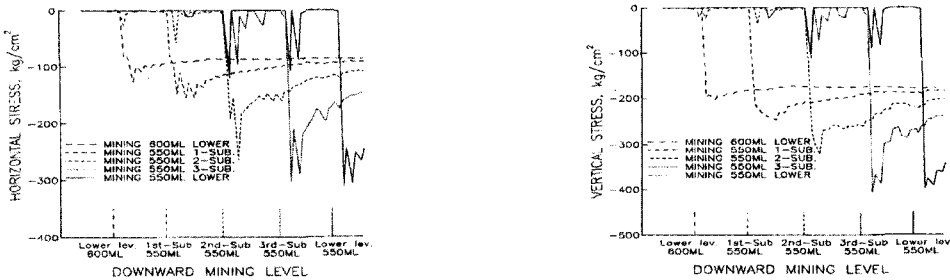


Fig. 4. Variation of stress concentration in the hanging wall 0.35m distant from the excavated seam

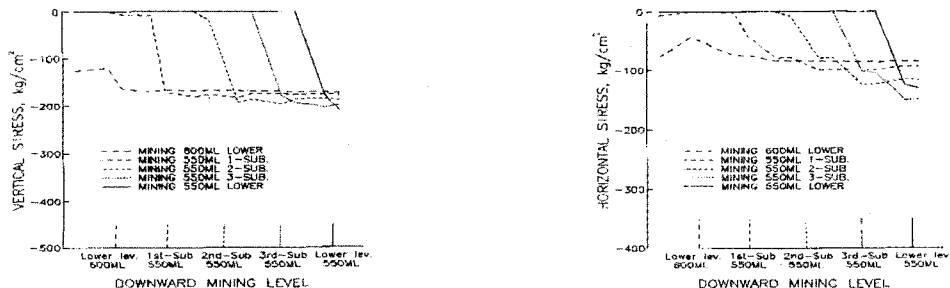


Fig. 5. Variation of stress concentration in the hanging wall 14.1m distant from the excavated seam

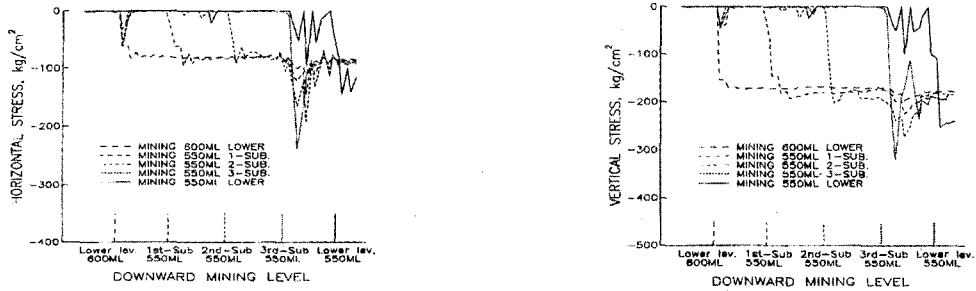


Fig. 6. Variation of stress concentration in the footwall 0.35m distant from the excavated seam

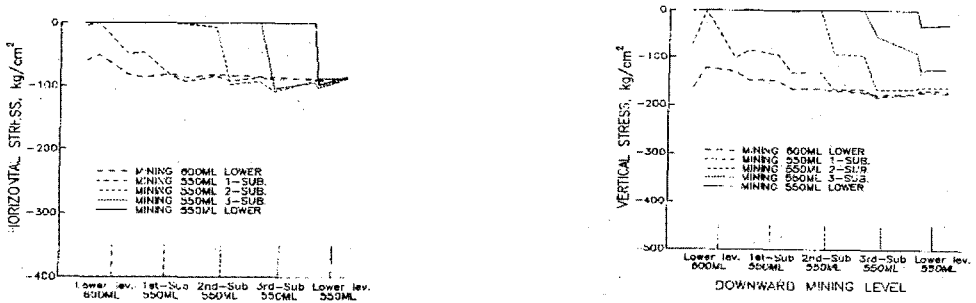


Fig. 7. Variation of stress concentration in the footwall 14.1m distant from the excavated seam

하반갱도 영향권내 진입 여부에 대한 예측 및 갱도유지 설계 시기에 대한 하나의 지시가 될 수 있을 것이다. 채굴적에 인접한 0.35 m 지점 (Fig. 6)의 경우, 600 ML 하단 채굴완료시에 수평응력 및 연직응력의 최대집중도는 각각 1.32 및 1.12이고, 550 ML 하단 채굴완료시에는 각각 3.12 및 1.85로 나타났다. 반면에 채굴적에서 14.1 m 거리 지점 (Fig. 7)은 하반갱도 하부에 위치하여 채굴 진행의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

5.2 하반 갱도 거동

채굴 진행에 따른 550 ML 하반 갱도의 변형 및 이동 양상 해석 결과를 보면, 채굴 진행에 따라 하반 갱도는 채굴적 방향으로 이동하는데 갱도 이동량은 550 ML 2 중단 채굴까지는 수 mm 정도로 미미하였으나 550ML 3중단 채굴부터 급증하였고 갱도 변형도 크게 일어났다. 채굴적을 향한 수평방향 및 수직방향의 최대 이동량은 600 ML 채굴완료시에 각각 4 mm 및 11 mm이었

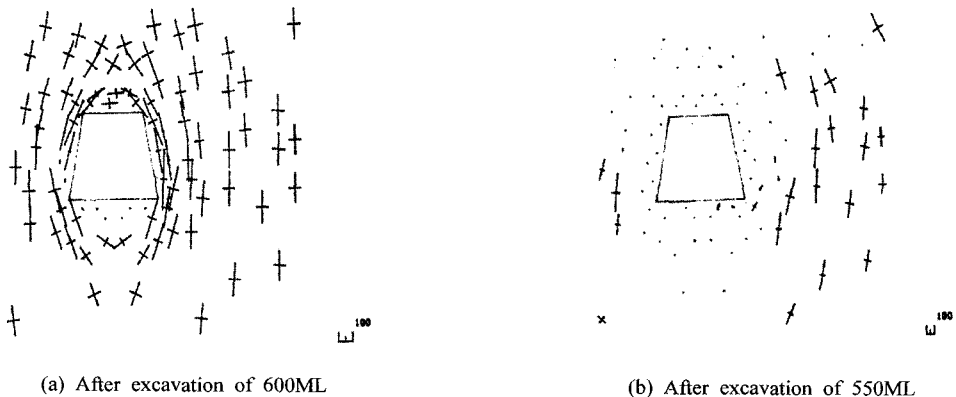


Fig. 8. Principal stresses around roadway located below the seam

고 550 ML 채굴완료시에는 각각 137 mm 및 215 mm로 나타났다. 그리고 갱도 바닥면 증상의 반팽창량은 600 ML 채굴완료시 약 9 mm이었다가 550 ML 채굴완료시 약 71 mm로 증가하였다.

갱도단면축소를 보면, 600 ML 채굴완료시 수평방향 및 수직방향 축소량이 각각 36 mm 및 109 mm이고 550 ML 채굴완료시 각각 45 mm 및 126 mm로 나타났다. 550 ML 채굴완료시의 갱도단면은 초기갱도단면에 비해 5% 정도 축소되었다.

그리고, 단계적 채굴 진행에 따른 550 ML 하반 갱도 주위의 주응력 분포는 Fig. 8과 같다. 600 ML 채굴완료까지는 채굴적이 작고 거리도 멀어서 하반 갱도에 거의 영향을 미치지 않았다. 550 ML 1중단 채굴부터 갱도에 인접한 영역에 인장응력권이 형성되기 시작하여, 550 ML 3중단 채굴 이후부터 채굴경계면이 하반 갱도의 직상부에 접근하면서 갱도 주위에 이완대가 크게 확장하였다. 앞 절에서도 기술한 바와 같이, 효과적인 갱도유지를 위해서는 상부의 채굴진행에 따른 접근 상황을 잘 고려하여야 할 것이다.

## 6. 전산해석과 현장계측 결과의 비교

### 6.1 지압

현장의 유압캡슐을 이용한 지압계측결과와 탄소성해석에서 계측지점에 가장 가까운 요소에 대한 응력을 Fig. 9에 함께 나타내었다. 유압캡슐 설치방향은 탄층에 직각방향이어서 해석결과와 응력도 같은 방향에 대한 값으로 환산하여 비교하였다. Fig. 9에서 응력비( $S/S_0$ )는 단계별 채굴진행에 따른 암반응력( $S$ )의 변화를 600ML 채굴완료시의 암반응력( $S_0$ )에 대한 비로써 나타낸 것이다. 해석 및 계측 결과를 비교할 때, 초기응력

의 절대치에 약간의 차이는 있지만 채굴 진행에 따른 전체적인 변화 양상에 있어서는 유사한 경향을 보였다. 즉, 채굴이 진행됨에 따라 응력비가 증가하다가 550 ML 3중단 채굴 이후에 측정지점이 포함된 암반 영역에 응력이완이 발생하면서 응력비가 감소하는 경향을 보였다.

### 6.2 지중변위

현장의 다점지중변위계 (MPBX) 설치선을 따라, 탄소성 해석을 통해 채굴 진행 단계별 지중변위값을 추출하여 비교하였다. Fig. 10은 갱도 하부의 좌우 모서리 부분에 설치한 지중변위계의 계측결과와 이 지점에 해당하는 해석결과를 비교한 것이다. 여기서는 현장 채굴진행과 계측시기 등을 고려하여 600 ML 채굴완료시를 비교 기준으로 하였고, 계측완료시점까지의 현장 채굴진행이 해석상의 550 ML 2중단과 3중단 사이여서 두 채굴단계의 해석결과를 함께 나타내었다.

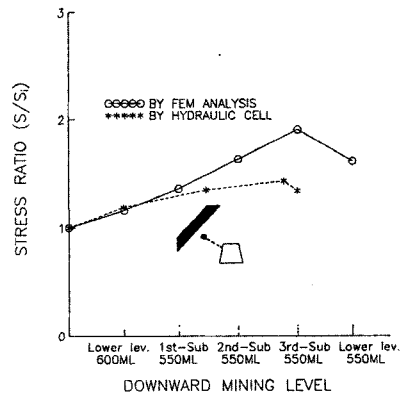
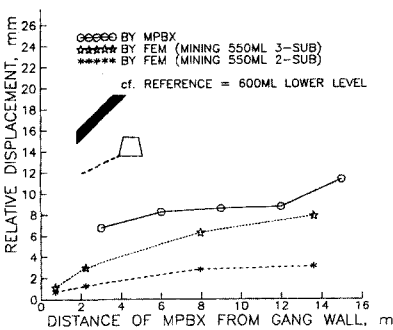
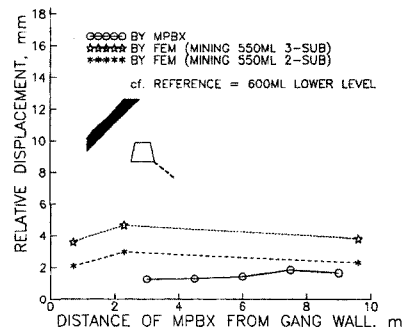


Fig. 9. The comparison of rock stress by FEM analysis and by in-situ measurement



(a) Line 1



(b) Line 4

Fig. 10. The comparison of relative rock displacement by FEM analysis and by in-situ measurement

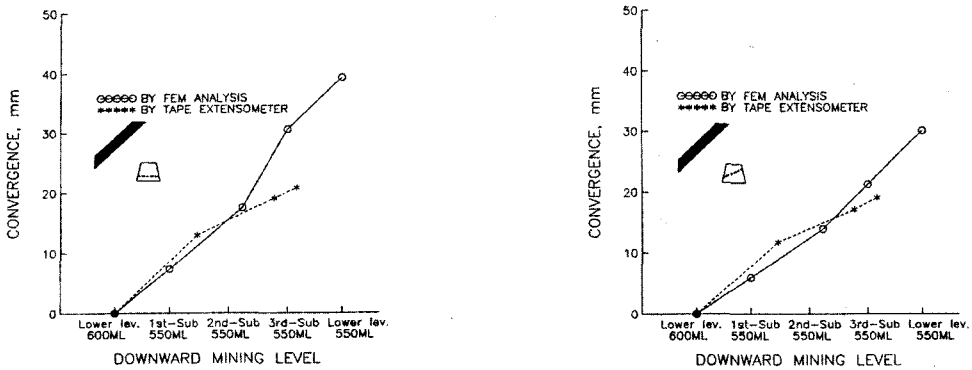


Fig. 11. Comparison of convergence of the roadway by FEM analysis and by in-situ measurement

채굴적 쪽의 갱도 하부 (Fig. 10(a))의 경우는 갱도 벽면에서 측정위치가 깊어질수록 계속적인 증가를 보이고, 반대쪽의 갱도 하부 (Fig. 10(b))에서는 점차 증가가 둔화되는 경향을 보였다. 전체적으로 해석과 계측 결과는 비교 기준 시점에서 절대량의 차이는 있지만 서로 유사한 양상을 보였다. 그리고 이 차이는 실제 현장에서의 채굴작업이 약 1주일의 간격을 두고 2개의 중단이 동시에 채굴이 이루어짐에 따라 비교기준 시점인 600 ML 채굴완료시의 변위량에 차이가 있기 때문으로 보인다. 따라서 현장의 채굴진행상황을 정확히 파악하고 이를 해석에 잘 반영한다면 보다 정확한 지중변위를 예측할 수 있을 것으로 보인다.

### 6.3 갱도축소변형

Tape extensometer를 이용한 계측과 전산해석에 의한 갱도단면 축소변형 비교는 Fig. 11과 같다. 여기서도 600 ML 채굴완료시를 비교 기준으로 하였다. 수평방향 축소변형의 해석 결과를 보면, 550 ML 3중단 채굴부터 크게 증가하였다. 이는 해석에서 암석요소가 파괴되면 영률이 파괴전의 50%로 줄어드는 물성변화를 고려함에 따라, 550 ML 3중단 채굴부터 채굴적 직하부에 해당되는 영역(그림에서 갱도의 우측 부분) 주위에 이완대가 확대되어 갱도내부로의 변위가 커진 때문으로 보인다. 이 차이를 제외하면 해석과 계측 결과는 비교적 일치하였다.

한편, 현장의 최종계측일(164일 경과시)에서 내공변형량은 3개 측선별로 각각 44.74 mm, 41.52 mm, 35.49 mm였다. 이 최종계측일의 채굴진행상황은 해석시의 550 ML 3중단 채굴완료시기와 비슷한데, 이때의 해석 결과는 3개 측선별로 각각 36.34 mm, 26.76 mm, 40.64 mm로서 현장계측치와 비슷하게 나타났다.

이상에서, 현장 지질조건 및 채굴과정의 복잡함에도 불구하고 경험적 파괴조건 및 변형률연화모델을 이용한 탄소성해석은 현장계측결과와 비교적 잘 일치하는 양상을 보여주었으며, 이러한 전산해석 및 현장계측의 비교를 통해 지하 굴착 갱도의 변형 거동 과정을 예측하고, 굴착 및 유지 설계의 지침을 제공할 수 있을 것이다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 탄소성해석 및 현장계측의 비교를 통하여, 심부 급경사 연약층의 단계적 굴착 진행에 따른 채굴적과 인접한 하반 갱도 및 주변 암반의 거동 양상을 분석하였다.

약 45° 경사와 3 m 정도의 폭을 갖는 연약층(탄층)의 단계적 굴착 진행에 대한 탄소성해석을 하였다. 채굴적 상반의 최대응력집중은 채굴경계면 전방 3~4 m 지점에서 나타났으며, 그 크기는 채굴적에 인접한 0.35 m (채굴적 폭의 0.15배) 지점에서는 채굴 진행에 따라 최대 3.5까지 증가하였지만 채굴적에서 멀어질수록 작아져서 14.1 m (채굴적 폭의 약 7배) 지점에서는 거의 약화되었다. 반면에 채굴적 하반에서는 단계적 채굴 진행에 따른 최대응력집중 지점이 뚜렷이 나타나지 않았다.

채굴 진행이 하반 갱도의 직상부로 접근하면서 채굴적과 하반 갱도 사이 암반에서 응력교란이 심하고 응력집중도가 크게 나타났는데, 실제 현장에서 이러한 양상의 모니터링은 곧 채굴 진행에 따른 채굴작업장의 하반 갱도 영향권내 진입 여부에 대한 예측 및 갱도유지설계 시기에 대한 하나의 지시가 될 수 있을 것이다.

유압캡슐을 이용한 지압계측결과와 이에 상응하는 응력해석결과는 모두, 채굴이 진행됨에 따라 응력비가 증가하다가 550 ML 3중단 채굴 이후에 측정지점이 포함



된 암반 영역에 이완이 발생하면서 응력비가 감소하는 경향을 보였다. 갱도단면변형에 있어 164일간의 현장계측은 35~45 mm의 범위를 보였고 이에 상응하는 시기의 해석결과는 27~40 mm로서, 절대치에 약간의 차이는 있지만 채굴 진행에 따른 전체적인 변화 양상에 있어서는 유사한 경향을 보였다.

이상에서 경험적 파괴조건 및 변형률연화모델을 이용한 탄소성해석은, 현장 지질조건 및 채굴과정의 복잡함에도 불구하고 현장계측결과와 유사한 양상을 보여주었으며, 이러한 전산해석 및 현장계측의 비교를 통해 지하 굴착 갱도의 변형 거동 과정을 예측하고 굴착 및 유지 설계의 지침을 제공할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. 김영구, 정소걸, 이희근, 1991, 중단봉락식 채굴진행에 따른 채굴적 주위의 응력분포 및 변형거동에 관한 수치해석적 연구, 한국자원공학회지, 28.2, 122-132.
2. Hoek, E and E.T. Brown, 1988, The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update, Proc. of 15th Canadian Rock Mech. Symp., Rock Engineering for Underground Excavation, 1082, 31-38.
3. Hoek, E and E.T. Brown, 1997, Practical estimate of rock mass strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34.8, 1165-1186.
4. Kim, I.K., S.K. Chung, et al., 1991, Research on the rock pressure and strata control for underground coal mining at depth(III), KIGAM report, KR-91-(T)-19, 141p.
5. Lee, H.K. and Y. Mizuta, 1977, Elasto-plastic analysis of structure considering characteristics of failed rock(I) - Analysis of stress-strain relations considering failure criterion and properties of post-failure of rocks, Korean Institute of Mining Engineering, 14, 300-316.
6. Singh, B. and R.K. Goel, 1999, Rock Mass Classification, Elsevier, 267p.
7. Zienkiewicz, O.C., S. Valliappan and I.P. King, 1969, Elasto-plastic solutions of engineering problems initial stress finite element approach, Int. J. Num. Mech. in Eng., 1, 75-100.



#### 정 소 걸

1975년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학사  
1982년 Ecole des mines de Nancy(in  
France) DEA  
1984년 Orleans 대학(in France)  
공학박사  
Tel: 042-868-3231  
E-mail: skchung@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 책임연구원



#### 신 중 호

1983년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학사  
1985년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학석사  
1990년 서울대학교 공과대학  
자원공학과 공학박사  
Tel: 042-868-3242  
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원  
지반안전연구부 책임연구원