

## 지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구

김종우<sup>1)\*</sup>, 전석원<sup>2)</sup>, 서영호<sup>3)</sup>

### A Study on the Effect of Underground Openings on the Stability of Surface Structures Using Scaled Model Tests

Jong-Woo Kim, Seokwon Jeon and Young-Ho Suh

**Abstract** In this study, scaled-model tests were performed to investigate the effect of underground openings on the stability of surface structure around the abandoned coal mine areas. Four types of test models which had respectively different depths of openings and different ground reinforcement conditions were introduced, where the modelling materials were the mixture of sand, plaster and water. The model with deep openings were turned out more stable to the structure than the model with shallow ones, because the crack-initiating pressure of the former was 2.5 times as much as that of the latter. The models with ground reinforcement were also turned out more stable than the model without reinforcement, because the crack-initiating pressure of the former was 2.4 times as much as that of the latter. Subsidence profiles were analysed to find the characteristics of slope and curvature, and the model with large reinforcement were turned out the most stable.

**KeyWords** Scaled model test, Underground opening, Stability, Subsidence, Ground reinforcement

**초 록** 본 연구에서는 지하 채굴적이 상부 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 지하 채굴적의 심도와 보강 조건을 달리하는 네 가지의 경우에 대해 축소모형실험을 실시하였다. 이를 위해 실험목적에 부합한 모형 실험장치를 제작하였으며, 모형재료는 석고, 모래, 물의 혼합물을 사용하였다. 채굴적의 심도가 깊은 모형의 균열 개시압력은 얕은 모형에 비해 2.5배 더 크게 나타나 채굴적이 깊을수록 지반의 안정성은 우수하였다. 구조물의 하부 지반을 그라우팅으로 보강한 모형은 무보강 모형에 비해 균열 개시압력이 2.4배 커져, 보강을 실시하면 지반 안정성이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 대규모 보강을 실시한 경우는 소규모 보강에 비하여 최대 침하량이 작을 뿐 아니라 침하곡선이 완만하여 경사와 곡률도 작아지므로 지반 안정성은 보다 더 커질 것으로 판단된다.

**핵심어** 축소모형실험, 채굴적, 안정성, 침하, 지반 보강

### 1. 서 론

최근 폐광산 지역에 대한 건설공사가 활발히 실시됨에 따라, 석탄 채굴에 의한 지하 채굴적 부근에 지하 및 지표 구조물을 시공하는 사례가 늘고 있고 있으며, 이러한 구조물의 안정성을 평가하기 위한 여러 가지 연구가 보고되고 있다(권광수 외, 2001, 송원경 외, 2002).

1) 정희원, 청주대학교 지구환경시스템공학과

2) 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부

3) 정희원, 현대건설(주) 기술개발원

\*교신저자(Corresponding Author): jwkim@chongju.ac.kr

접수일: 2004년 2월 9일

심사 완료일: 2004년 2월 20일

지하 채굴적으로 인해 발생하는 지반 침하는 채굴적의 천반부가 붕락되면서 그 영향이 지표까지 발전하는 것인데, 이 발전과정 및 영향범위는 현장의 지반조건, 지압분포, 공동의 기하학적 조건, 상부 구조물의 하중조건 등에 따라 달라지므로 이를 예측하기는 매우 어렵다. 또한, 지하 채굴적의 상부에 지표 구조물을 시공할 경우에는 채굴적에 의한 점진적인 지반 침하 이외에도, 구조물의 상재하중에 의해 추가적인 지표면 침하가 발생할 가능성이 있다.

한편, 구조물의 안정성을 제고하기 위해서는 지하 채굴적이 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다. 특히, 구조물과 지하 채굴적 사이의 이격거리가 작거나 구조물의 기초 암반이 연약할 경우에는

지반 침하량이 과다하거나 부등침하가 발생할 가능성이 크며, 이 경우에 대해서는 채굴적의 충전보강 또는 구조물 하부 지반의 개량공법 등의 추가 보강 대책을 수립하여야 한다.

지반 및 구조물의 안정성을 검토하기 위한 실내 실험적인 방법으로서, 축소모형실험이 최근에 다시 연구되고 있다(전석원 외, 2003). 이 실험은 현장의 모든 조건들을 차원해석에 의한 축소율로 환산하여 현장 상태를 실험실에서 그대로 재현해 내는 방법으로서, 암반공학 분야에서는 널리 활용되어온 실험법이며 국내외에서 시행되어 좋은 결과를 얻은 바 있다(Hobbs, 1969, 김종우 외, 1988). 한편, 현장암반을 완벽하게 축소하는 모형재료가 혼존하지 않는 문제점으로 인해 이 실험법의 적용상 한계가 제기되고 있지만, 모형재료에 관한 연구가 계속적으로 실시되고 있으며(Coquard and Boistelle, 1994), 특히 이 실험은 수치해석에 비해 실험결과를 가시적으로 관찰할 수 있는 장점이 있어 지반 구조물 설계의 보조자료로서 활용될 수 있는 유용한 실험법으로 판단된다.

본 연구에서는 지하 채굴적이 상부 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 지하 채굴적의 심도와 보강 조건을 달리하는 대표적인 네 가지의 경우에 대해 축소모형실험을 실시하였다. 이를 위해 실험목적에 부합한 모형 실험장치를 제작하였으며, 실험을 통해 채굴적의 심도가 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하였고, 구조물 하부 지반에 그라우팅 보강을 실시할 경우의 안정성 제고 효과를 조사하였다.

## 2. 실험 모형

### 2.1 현장 조건 및 채굴적 분포

국내 석탄광산 주변 암반은 주로 사암, 세일 등으로 구성되어 있으며, 복잡한 지질구조로 인하여 다양한 물성 분포를 보인다. Table 1은 이정인 외(1982)에 의해 제시된 국내 탄전지역에 분포하는 암석의 물리적 성질을 암종에 따라 정리한 것으로, 암석의 단축압축강도는 603~2200 kgf/cm<sup>2</sup>의 분포를 나타내고 있다.

국내 탄광은 대체로 중단봉락식 또는 위경사승 채탄

법을 적용하여 석탄을 채굴하였고, 이로 인해 폐광 지역에는 다수의 채굴적이 존재할 것으로 추정되지만, 그 위치 및 규모에 대해서 정확히 알려진 바는 없다. 따라서, 본 연구에서 채굴적 및 탄주의 폭은 KS E 규정에 의해 탄층의 70%가 채굴되고 나머지 30%는 잔존한 것으로 가정하였다. 또한, 지표 구조물의 안정성을 보다 명확히 관찰하기 위해 채굴적의 두께를 실제 탄층의 두께보다 큰 7 m로 가정하였다.

다음으로, 지하 채굴적이 지표면과 가까운 거리에 존재하는 경우와 비교적 먼 거리에 존재하는 두 가지 경우를 서로 비교하기 위하여, 채굴적이 지표면 아래 30 m 지점에 분포한 경우와 100 m 지점에 분포한 경우를 각각 가정하였으며, 각 경우에 있어서 폭 30 m인 지표 구조물이 건설되는 것으로 하였다. Fig. 1은 채굴적 주변의 현장 상태를 모식적으로 나타낸 것이다.

### 2.2 차원해석

축소모형실험에서 현장성을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 축소모형과 현장경우에 대한 차원해석을 실시해야 한다. 본 연구에서는 현장 조건과 모형재료의 물성치를 비교하여 축소율을 계산한 후 이를 바탕으로 실험모형을 제작하였다.

세 가지 기본 차원을 길이[L], 질량[M], 시간[T]이라

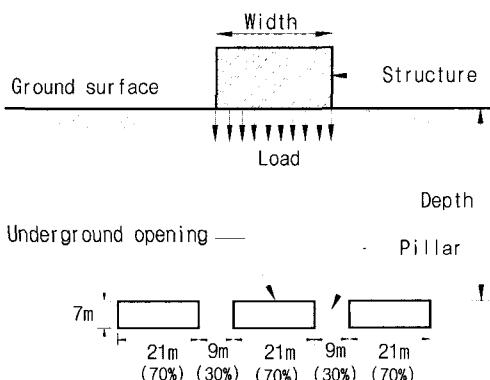


Fig. 1. Schematic view around underground openings

Table 1. Physical properties of sedimentary rocks

Rock	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Uniaxial compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Young's modulus (10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	Number of region (Number of data)
Sandstone	2.64-2.71	828-2200	4.75-11.96	7 (157)
Shale	2.66-2.83	603-1101	2.10-7.01	8 (137)

고 할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정한 후 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 응력, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1969, 전석원 외, 2003).

길이에 대한 축소율을 결정할 때는 실제 현장의 크기와 모형시험체의 크기가 축소율로서 고려되는데, 본 연구에서는 실험장치가 수용할 수 있는 모형시험체의 최대크기( $480\text{ mm} \times 480\text{ mm}$ )를 감안하여 이를 1/292로 결정하였다. 다음으로 중력가속도 [ $\text{LT}^{-2}$ ]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/17.08이 된다.

한편, 본 실험에서 사용된 모형재료의 밀도는 1.6 g/cm<sup>3</sup>이었고 대상지반의 밀도는 Table 1에서 2.7 g/cm<sup>3</sup>로 가정할 수 있으므로 밀도에 대한 축소율은 1/1.69이며, 이로부터 질량, 응력, 강도 등에 대한 축소율을 차례로 산정하였다. Table 2는 본 실험의 축소율을 정리한 것으로, 강도 및 영률의 축소율은 1/492로 나타났다.

### 2.3 모형재료

축소모형실험에 사용되는 모형재료는 대상 암반의 물리적 특성을 충분히 대변할 수 있는 것이라야 한다. 본 연구 대상 암반의 단축압축강도는 Table 1에 제시한 바와 같이 평균 1400 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 여기에 강도의 축소율인 1/492을 적용하게 되면 실제로 2.85 kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 갖는 물질이 모형재료로서 사용되어야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 이러한 단축압축강도를 갖는 물질로서 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하였는데, 이들은 중량 배합비에 따라 다양한 강도를 갖는 재료를 구성할 수 있으며 축소모형실험에서 비교적 널리 사용되어 이전의 연구성과가 많은 장점이 있다(윤용균 외, 1987, 김종우 외, 1988). 한편, 기존의 연구성과에서는 이 재료가 완전히 건조된 이후에 실현을 실시하였지만, 본 연구에서는 이 재료가 건조과정을 거치면서 험수비가 점차 낮아짐에 따라 단위중량이 감소되고 강도가 점차 커지는

점을 감안하여 모형재료를 구성하였다(Coquard and Boistelle, 1994).

실제로 2.85 kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 갖는 물질은 매우 연약한 재료로서, 통상의 방법으로는 모형재료를 구성하기 어려웠으며 많은 시행착오를 거쳤다. 즉, 본 실험에서는 모래, 석고, 물의 중량비가 150:50:100인 혼합물이 응결된 후 서서히 건조되면서 밀도가 1.6 g/cm<sup>3</sup>이 될 때 비로소 위의 강도를 나타내는 것을 확인하였으며, 이를 본 실험의 모형재료로서 사용하였다. 또한, 이 모형재료의 탄성계수는 평균 2343 kgf/cm<sup>2</sup>으로서 Table 1에 근거한 대상 암반의 탄성계수의 범주에 포함되는 것으로 나타났다.

한편, 지하 채굴적으로 인해 지표 구조물의 안정성이 저하될 것으로 예상되면, 채굴적의 충전보강 또는 구조물 하부 지반의 개량공법 등의 추가 보강 대책을 수립하여야 한다. 본 연구에서는 이 중에서 구조물 하부 지반을 일부 그라우팅하여 지반을 강화하면 어느 정도의 보강효과가 있는지 조사하였으며, 여기서 그라우팅된 영역은 원지반에 비해 강도가 약 5배 증가하는 것으로 가정하였다. 마찬가지로 모래, 석고, 물의 중량비가 110:90:100인 혼합물이 일정기간 건조되어 밀도가 1.6 g/cm<sup>3</sup>이 될 때 위의 소요 강도를 가지는 것을 확인하였으며, 이를 그라우팅 영역의 모형재료로서 사용하였다.

### 2.4 실험모형의 종류

지하 채굴적이 상부 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Table 3과 같은 네 가지 실험모형을 제작하고 각각 모형실험을 실시하였다.

1, 2번 모형은 각각 채굴적이 지표면 아래 30 m, 100 m 지점에 위치한 경우로서 채굴적의 심도가 구조물에 미치는 영향을 조사하기 위해 제작하였으며, 3, 4번 모형은 각각 2번 모형에 대해 소구모 및 대구모 그라우팅보강을 실시한 경우를 모델링한 것이다.

한편, Table 3에서 괄호 안의 수치는 길이에 대한 축

Table 2. The scale factors of models

Physical properties	Dimension	Scale factors
Length	[L]	1/292
Time	[T]	1/17.08
Mass	[M]	1/41900000
Density	[ML <sup>-3</sup> ]	1/1.69
Strength	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	1/492
Young's modulus	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	1/492

Table 3. The details of four different models

Model	Depth of openings	Grouting
1	30 m (103 mm)	N/A
2	100 m (343 mm)	N/A
3	100 m (343 mm)	30 m × 36 m (103 mm × 123 mm)
4	100 m (343 mm)	60 m × 36 m (206 mm × 123 mm)

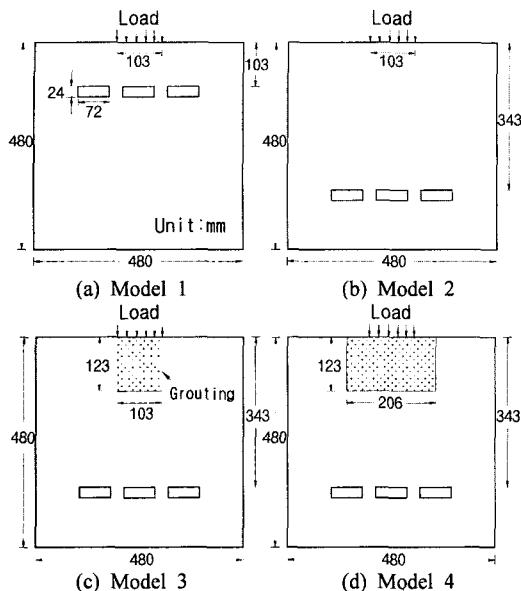


Fig. 2. Four different models

소율 1/292을 적용한 것이며, Fig. 2는 실제로 실험된 모형 시험체의 규격을 나타낸 것이다. 여기서, 시험체의 크기는 480 mm × 480 mm이고, 지표 구조물의 폭 30 m는 103 mm로 축소되었으며, 현장 채굴적의 규격은 Fig. 1과 같이 21 m × 7 m이나 모형 시험체에서는 72 mm × 24 mm의 규격으로 축소되었다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 유압식 이축압축장치로서 서로 직교하는 네 방향에 각각 25톤 용량의 램이 부착되어 있으며, 이들은 2개의 핸드펌프에 의해 작동된다. 실험장치의 크기는 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 두께 20 cm이며, 본 장치가 수용할 수 있는 모형 시험체의 최대크기는 480 mm × 480 mm이다.

본 실험장치는 모형 시험체를 수직 또는 수평으로 설치하여 사용하도록 되어 있는데, 본 실험에서는 수평상태에서 시험체를 설치하고 나서 이를 수직으로 회전시킨 후 실험을 실시함으로써 지구 중력장하에서 실제적인 실험을 실시하였다.

Fig. 3은 본 실험장치의 모습을 나타낸 것이다. 시험체는 가압 보조판, 아크릴 판, 쇠막대 등에 의해 구속된다. 여기서, 가압 보조판은 램으로부터 시험체에 가해지는 하중을 등분포 하중으로 변환하기 위한 것이고, 아

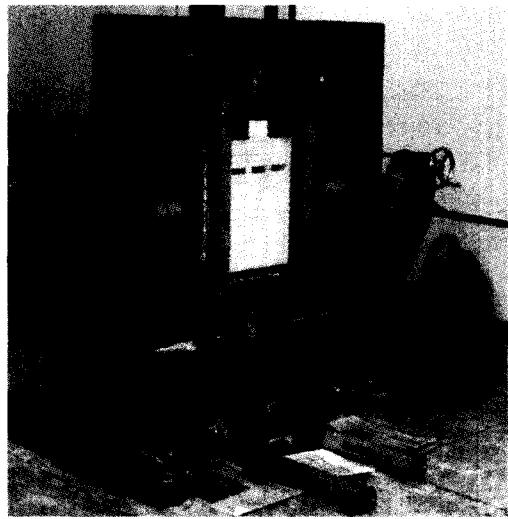


Fig. 3. The biaxial testing machine for scaled model tests

크릴 판과 그 위에 놓인 쇠막대는 지하 공동의 응력-변형률 조건에 부합하는 평면변형률 상태를 유지하기 위한 것이다. 또한, 폭 103 mm의 가압판을 별도로 제작하여, 채굴적 상부 구조물의 하중을 시험체에 전달하도록 하였다.

한편, 시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프에 부착되어 있는 압력계로부터 측정하였으며, 이 압력계는 별도의 로드셀을 이용하여 검정하였다. 또한, 가압 도중의 변위는 6,500,000급 화소의 디지털 카메라를 사용하여 측정하였으며, 이때 변위의 측정오차는 1화소당 0.2 mm로 나타났다.

#### 3.2 모형 시험체의 제작

모래, 석고, 물의 중량비가 150:50:100인 혼합물과 110:90:100인 혼합물을 사용하여 Fig. 2와 같은 네 가지 모형 시험체를 제작하였다.

모래와 석고는 각각 주문진산 표준사와 도자기 형재용 석고를 사용하였으며, 이들과 물을 골고루 혼합시킨 후 합판으로 구성된 성형틀에 기포가 생기지 않게 주입하였다. 다음으로 이 혼합물이 응결된 후에 탈형하여 대기중의 음지에서 일정 기간 건조시켰다. 건조 중에는 전자저울을 사용하여 계속적으로 단위중량을 측정하였으며 건조 후 단위중량이 1.6 g/cm<sup>3</sup>가 될 때 비로소 모형 실험을 실시하였다.

한편, 3, 4번 모형은 그라우팅 보강 영역을 일부 포함하고 있으므로 좀더 까다로운 제작과정을 거쳤다. 즉, 이 모형들을 위해 이중 성형틀을 별도로 제작하였는데,

먼저 지반 영역을 만들고 나서 다음으로 보강 영역을 주입함으로써 그 경계면이 완전히 부착되도록 하였다.

### 3.3 실험 방법

모형시험체를 제작하여 일정기간 건조시킨 후에는 시험체를 실험장치에 설치하여 가압 시험을 실시하였다. 실험방법 및 순서는 다음과 같다.

- ① 실험장치를 수평 상태로 둔 상태에서 시험체를 실험장치에 설치하고 시험체의 모든 면을 정형하였다.
- ② 모형 채굴적을 굴착하고 나서 시험체의 윗면에 소정의 계측점을 표시하였다. 여기서 1번 모형의 계측점은 113개이고 나머지 모형의 계측점은 218개이다.
- ③ 평면변형률을 상태를 유지하기 위하여 아크릴판과 쇠막대를 사용하여 시험체를 실험장치에 완전히 고정시켰다.
- ④ 시험체에 하중을 가하면 미리 찍어 둔 계측점들이 이동하게 되는데, 이때 변위를 측정하기 위한 정(井)자 모양의 기준선을 설치하였다.
- ⑤ 실험장치를  $90^\circ$ 로 회전시키고 카메라 장치를 설치하였다.
- ⑥ 본 실험장치는 두 개의 핸드펌프를 사용하여 시험체의 상하좌우에 위치한 네 개의 램에 개별적으로 하중을 가할 수 있다. 본 실험에서는 시험체의 좌우에서 현지 수평응력에 상응하는 크기의 압력을 축소율로 환산한  $0.04 \text{ kgf/cm}^2$ 을 일정하게 가하였으며, 시험체 상부에 위치한 폭 103 mm의 가압판을 통해 하중을 단계적으로 증가시켰다.
- ⑦ 가압 실험 중에는 수시로 사진을 촬영하고 균열 발달 상황을 기록하였으며, 실험 후에는 촬영된 디지털 사진들을 분석하여 파괴양상 및 측점 변위를 정량적으로 구하였다.

## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1 모형별 변형거동

채굴적의 심도와 보강 조건이 서로 다른 네 가지 모형에 대해 축소모형실험을 수행한 바, 각 모형에 대한 변형거동, 균열발생양상, 변위벡터도 등을 구하였다.

Fig. 4는 네 가지 모형의 실험결과 중 한 가지 예로서, 1번 모형에서 하중에 따라 발생한 채굴적 부근의 변형과정을 파노라마 사진의 형태로 나타낸 것이며, 그림의 우측에는 각 단계별 변위벡터도를 나타내었다.

1번 모형은 다른 모형에 비해 채굴적이 얕은 심도에 위치한 관계로, 상부 구조물의 하중에 의해 채굴적의

파괴가 대규모로 발생하였으며, 대부분의 변위는 중앙 채굴적 부근에 집중된 현상을 변위벡터도에서 관찰할 수 있다. 한편, 최초 균열은 중앙 채굴적의 한가운데에서 지표면 방향으로 발생하였으며 균열 개시압력은  $0.8 \text{ kgf/cm}^2$ 이었다. 또한, 1번 모형의 최대 압력은  $1.2 \text{ kgf/cm}^2$ 로서, 이때부터 모형 시험체는 더 이상의 하중을 유지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었는데, Fig. 4 (b), (c), (d)는 각각 초기, 중간, 최종 단계를 나타낸 것이다.

Table 4는 네 가지 모형의 균열 개시 압력과 실험 최종 압력을 나타낸 것으로, 채굴적의 심도가 가장 작은 1번 모형이 가장 약한 것으로 나타났다. 전반적으로, 약한 모형부터 번호를 나열하면 1, 2, 3, 4번의 순서이며, 채굴적의 심도가 깊어질수록 지표 구조물의 안정성은 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 본 논문에 나타난 압력은 시험체에 가해진 압력으로 실제 대상암반에 대한 하중으로 환산할 경우에는 Table 2에 나타난 바와 같이 압력의 축소율인 492를 곱해주면 된다.

또한, 2번 모형에 비해 3, 4번 모형은 그라우팅 보강을 실시한 경우로서, 이때 균열 개시압력은 보강 전에 비해 약 2.4배 커져, 구조물 하부 지반을 그라우팅으로 보강하면 안정성이 증가하는 것을 확인하였다. 그러나, 3, 4번 모형의 균열 개시압력은 큰 차이를 나타내지 않아 이와 같은 파괴강도 개념만으로는 보강의 규모가 안정성에 미치는 영향을 파악하기는 곤란하였다. 실제로 3, 4번 모형은 지표 침하의 형태가 서로 달랐으며, 이에 대해서는 후술한다.

Fig. 5는 실험이 종료된 후 네 가지 모형의 파괴양상을 나타낸 것으로, 1, 2, 3, 4번 모형에서 각각  $1.2$ ,  $4.0$ ,  $5.6$ ,  $5.6 \text{ kgf/cm}^2$ 의 하중이 가해진 경우이다. Fig. 5(a)에서 1번 모형은 다른 모형에 비하여 상당히 작은 압력임에도 불구하고 지표 침하량과 채굴적 변형량이 가장 크게 나타나 지반이 완전히 파괴되었다.

Fig. 5(b)에서 2번 모형은 채굴적의 심도가 비교적 깊어 지표 구조물이 지하 채굴적에 큰 영향을 받지는 않은 것으로 보인다. 그러나, 2번 모형의 균열 개시 압력은 Table 4와 같이  $2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (축소율을 적용하면 현장에서는  $984 \text{ kgf/cm}^2$ 에 해당함)으로서 3, 4번 모형에 비해 안정성은 떨어진다.

Fig. 5(c), (d)에서 3, 4번 모형은 채굴적 부근에서 파괴균열이 발생하였지만, 균열 개시 압력이  $4.8 \text{ kgf/cm}^2$ 로서 매우 크고 지표침하량도 가장 작은 것으로 나타나, 구조물 하부 지반을 그라우팅으로 보강하면 지반의 안정성을 향상될 것으로 생각된다.

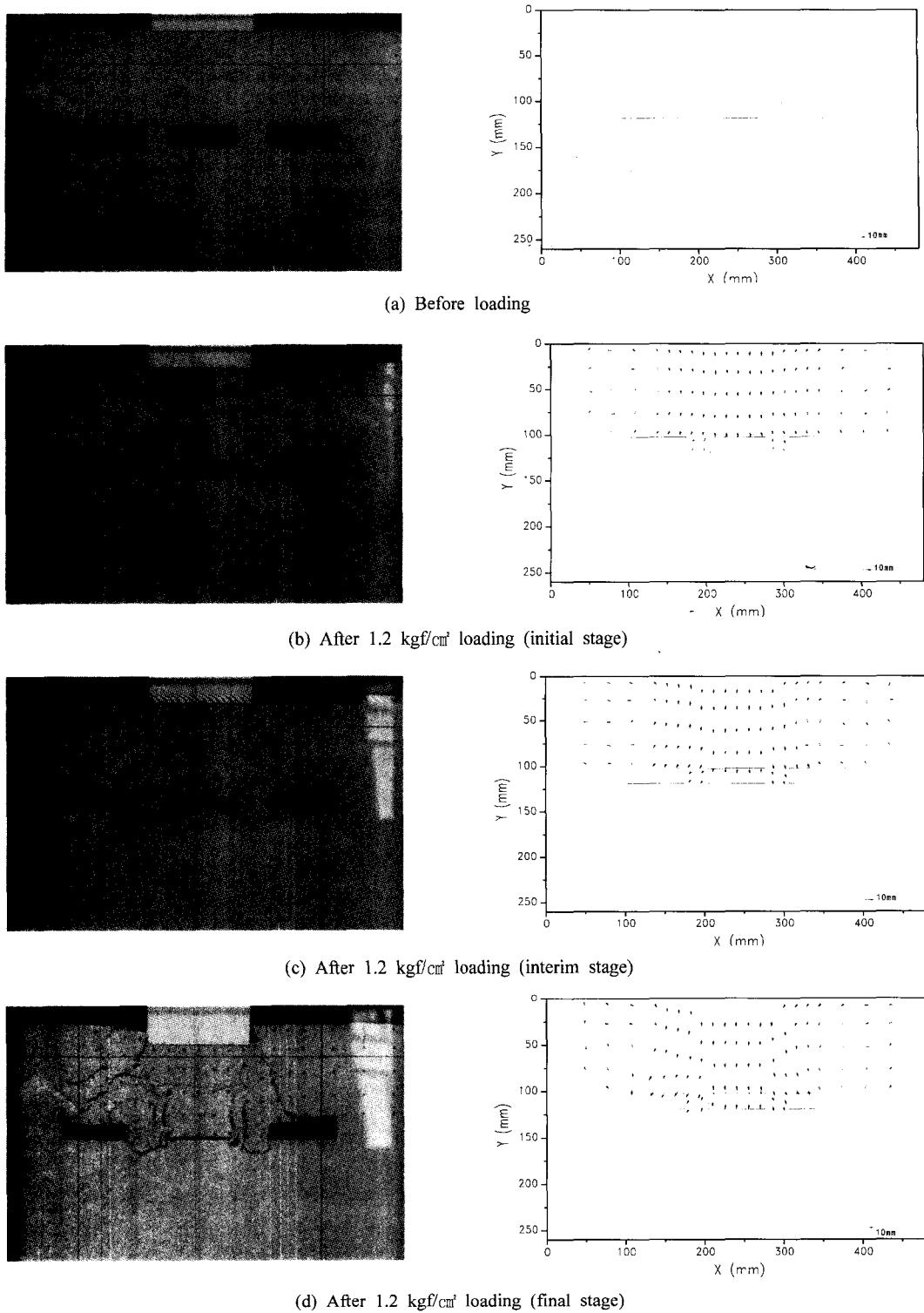


Fig. 4. The photographs and displacement vector plots of Model 1

**Table 4.** Crack initiating pressure and final pressure

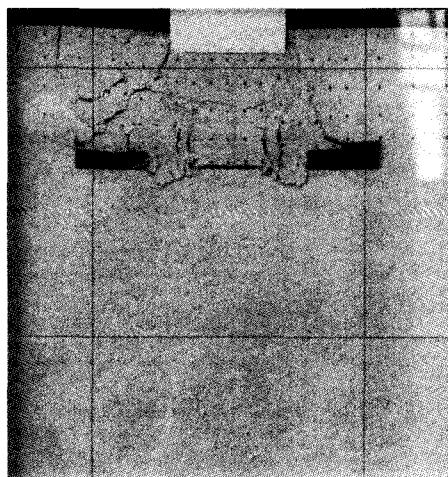
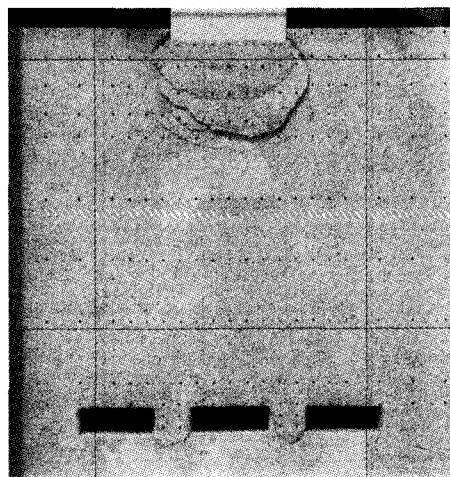
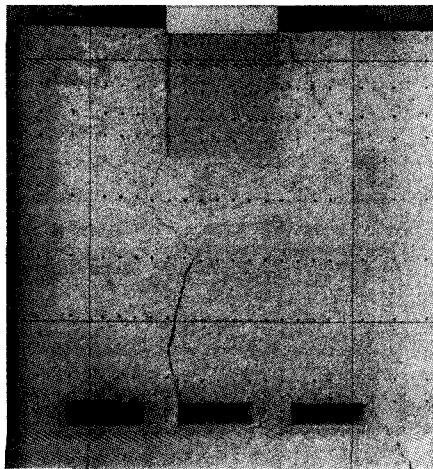
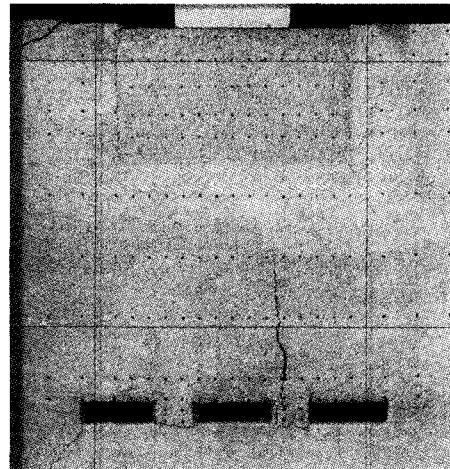
Model	Crack initiating ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Final ( $\text{kgf/cm}^2$ )
1	0.8	1.2
2	2.0	4.0
3	4.8	5.6
4	4.8	5.6

#### 4.2 지표 침하

본 실험에서는 지반의 침하량을 조사하기 위하여 Fig. 5와 같이 각 모형별로 113개 또는 218개의 측점을 미리 찍어두어 하중에 따른 측점의 이동상황을 분석하

여 Fig. 4와 같은 변위벡터도를 작성하였다. 이 절에서 는 이 측점들 중에서 시험체의 최상부면에 표시한 측점 들의 수직변위 즉, 지표 침하량을 분석한 결과에 대해 언급한다.

Fig. 6은 실험 최종 압력이 가해질 때, 네 가지 모형의 지표 침하량을 분석하여 작성한 침하곡선을 나타낸 것으로서, 각 그림의 횡축은 지표 구조물 중심으로부터의 좌우 이격거리이며 종축은 침하량을 표시한 것이다. 예 를 들어 Fig. 6(a)는 1번 모형에서 실험 최종 압력인  $1.2 \text{ kgf/cm}^2$ 가 가해질 때의 초기, 중간, 최종 단계의 침하량 을 나타낸 것으로서, 이들은 각각 Fig. 4(b), (c), (d)에 해당한다.

(a) Model 1 ( $1.2 \text{ kgf/cm}^2$ )(b) Model 2 ( $4.0 \text{ kgf/cm}^2$ )(c) Model 3 ( $5.6 \text{ kgf/cm}^2$ )(d) Model 4 ( $5.6 \text{ kgf/cm}^2$ )**Fig. 5.** Failure modes of four different models

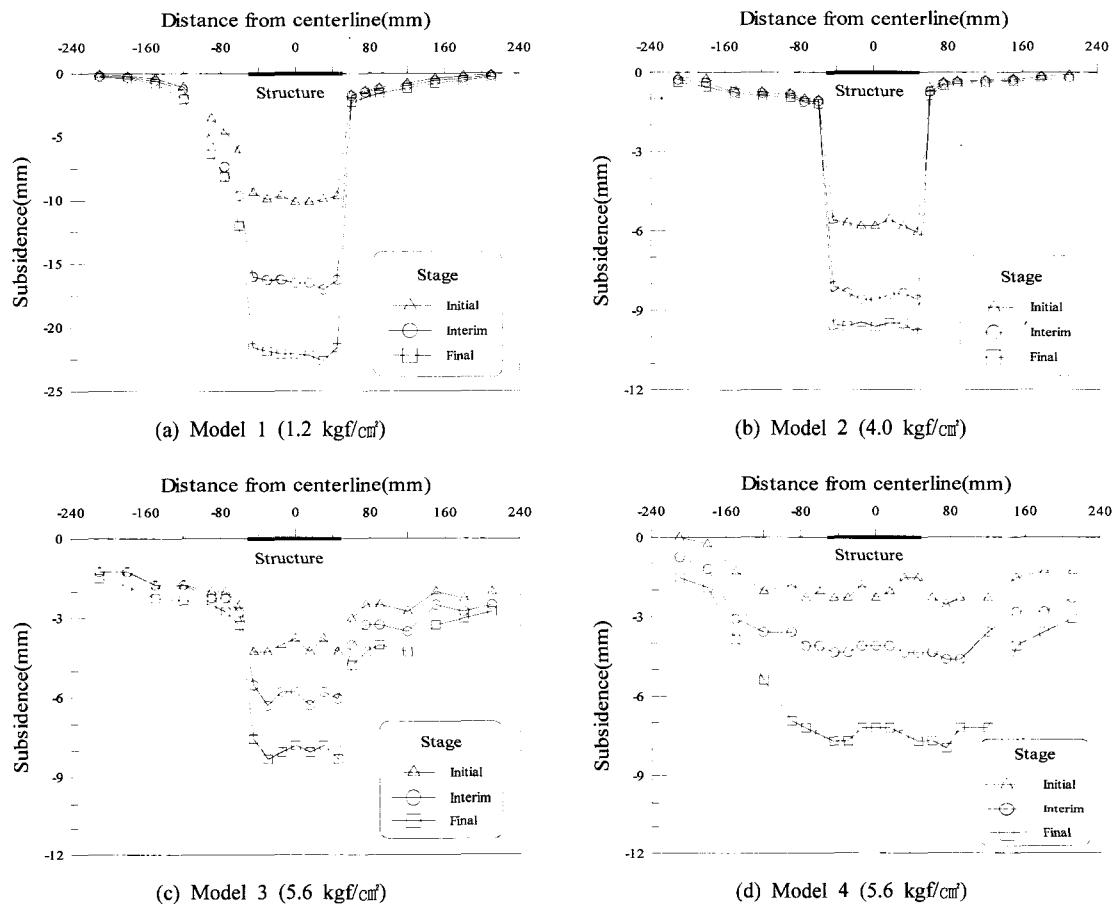


Fig. 6. Subsidence profiles of four different models

Fig. 6(a)와 (b)를 비교하면, 2번 모형이 1번 모형에 비해 큰 압력임에도 불구하고 침하량이 작아 더 안정적인 것을 알 수 있다. 다음으로 Fig. 6(b)를 (c), (d)와 비교하면, 보강영역이 없는 2번 모형은 침하분지 경계의 사이가 협소한 힘락(sinkhole) 침하의 형태를 보이는 반면에, 3, 4번 모형으로 갈수록 골墼(trough) 침하에 가까워지는 현상을 보였다.

특히, Fig. 6(d)의 4번 모형은 폭 103 mm인 구조물의 하부에 폭 206 mm의 대규모 보강영역을 포함한 모형으로서 침하분지의 영역이 가장 넓게 나타났으며, 최대 침하는 8.0 mm로서 3번 모형에 비해 약간 작았다. 또한, 구조물의 중심으로부터 좌우  $\pm 90 \text{ mm}$  구간은 7.0~8.0 mm의 거의 유사한 침하량을 나타내었다. 이와 같이 대규모 보강조치를 한 경우는 최대침하량이 감소될 뿐 아니라 침하곡선이 완만하기 때문에 침하곡선의 경사 및 곡률이 감소되어 지표 구조물에 대한 지반 안정

성은 더욱 증가할 것으로 생각된다.

#### 4.3 채굴적의 심도에 따른 영향

국내 폐광지역에는 다수의 채굴적이 존재할 것으로 예측되는데, 이들의 위치 및 규모에 대해서는 자세히 밝혀져 있지 않아 이 지역에 구조물을 건설할 때 여러 가지 어려움이 생기고 있다. 특히, 구조물의 하부에 채굴적이 존재할 때 채굴적의 심도가 어떠한 영향을 미치는지 조사할 필요가 있으며, 이를 위해 본 연구에서는 채굴적의 심도가 서로 다른 두 가지 모형에 대해 축소 모형실험을 실시하여 그 영향을 조사하였다. 비교 대상 모형은 1번과 2번 모형으로서 채굴적의 심도는 각각 30 m, 100 m이며 축소모형에서의 심도는 각각 103 mm, 343 mm이다.

Table 4에서 1번과 2번 모형의 균열 개시압력은 각각  $0.8, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 으로서 깊은 채굴적 모형이 얕은 채굴적

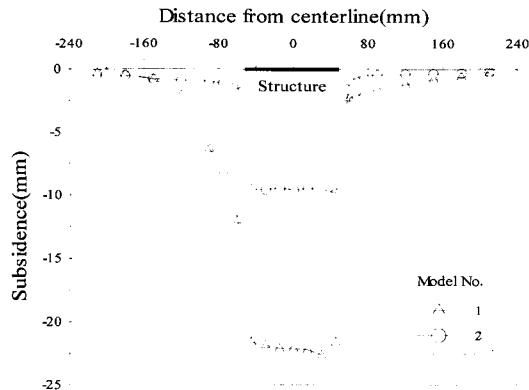


Fig. 7. Subsidence profiles of models with different depths of underground openings

모형에 비해 약 2.5배 더 큰 압력에서 균열이 발생하였다. 한편, Fig. 7은 실험 최종압력 단계에서 얕은 채굴적과 깊은 채굴적에서의 침하곡선을 비교한 것으로서, Fig. 6(a), (b)의 자료를 발췌·편집해서 만든 것이다. 이 그림에서 얕은 채굴적 모형의 지표 침하량은 상대적으로 작은 압력 단계임에도 불구하고, 깊은 채굴적 모형의 침하량보다 크게 나타났다. 따라서, 채굴적의 심도가 깊을수록 지반 안정성은 커지며, 얕은 채굴적의 경우 지반 안정성을 제고하기 위해서는 각별한 보강조치가 필요함을 확인할 수 있었다.

#### 4.4 지반 보강에 따른 영향

본 연구에서는 2번 모형과 같이 채굴적의 심도가 100 m로서 비교적 깊은 채굴적이 존재할 경우, 지표 구조물 하부의 지반을 그라우팅으로 보강할 경우에 어느 정도의 보강 효과가 있는지 조사하였다. 비교 대상 모형은 2, 3, 4번 모형으로서 Table 3과 같이 각각 무보강, 소규모 보강, 대규모 보강을 모델링한 것이다.

먼저, Table 4에서 2, 3, 4번 모형의 균열 개시압력은 각각 2.0, 4.8, 4.8 kgf/cm<sup>2</sup>으로서 보강 후의 지반 안정성은 증가하였으나, 소규모 및 대규모 보강의 영향은 큰 차이를 보이지 않았다.

한편, Fig. 8은 실험 최종압력 단계에서 세 가지 모형의 침하곡선을 비교한 것으로서, Fig. 6(b), (c), (d)의 자료를 발췌·편집해서 만든 것이다. 이 그림에서 무보강의 경우인 2번 모형은 상대적으로 작은 압력임에도 불구하고, 최대 침하량이 9.9 mm로서 가장 크게 나타난 반면에, 3, 4번 모형의 최대 침하량은 동일 압력하에서 각각 8.3 mm, 8.0 mm로서 큰 차이를 나타내지는 않았으나 대규모 보강을 실시한 4번 모형의 침하량이

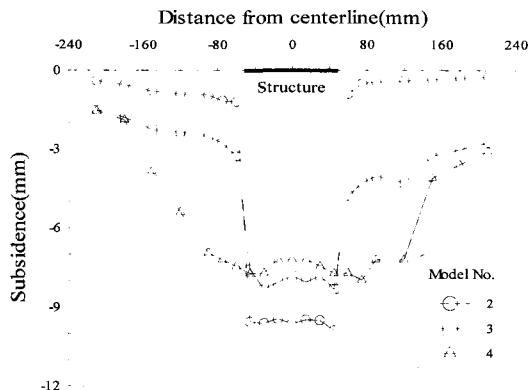


Fig. 8. Subsidence profiles of models with different grouting conditions

가장 작게 나타났다.

#### 4.5 침하곡선의 분석

전술한 바와 같이 3, 4번 모형의 균열개시압력과 최대 침하량은 큰 차이를 나타내지 않아 보강 규모에 따른 영향을 정량적으로 파악하기는 곤란하였다. 따라서, 본 연구에서는 아래와 같은 침하예측이론(Peck, 1969, 지정배 외, 2000)을 이용하여 3, 4번 모형의 침하곡선을 보다 면밀히 분석해 보았다.

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$g(x) = S(x) \cdot \left(-\frac{x}{i^2}\right) \quad (2)$$

$$k(x) = S(x) \cdot \left(\frac{x^2 - i^2}{i^4}\right) \quad (3)$$

여기서,  $S(x)$  : 어느 지표지점에서의 침하량

$g(x)$  : 어느 지표지점에서의 경사

$k(x)$  : 어느 지표지점에서의 곡률

$S_{\max}$  : 최대 침하량

$x$  : 공동 중심선으로부터 수평거리

$i$  : 공동 중심선으로부터 변곡점까지 수평 거리

Fig. 9는 3, 4번 모형의 침하곡선을 분석한 결과로서, 침하 측정치와 계산치, 침하곡선의 경사 및 곡률 등이 나타나 있다. 여기서 3번 모형은 침하의 측정치와 계산치의 오차가 크게 나타난 반면에, 4번 모형은 최대 오차가 1.8 mm 정도로서 비교적 잘 일치하였다. 이는 본 침하 이론이 골형 침하에 근거한 것인데 연유한 것으로서,

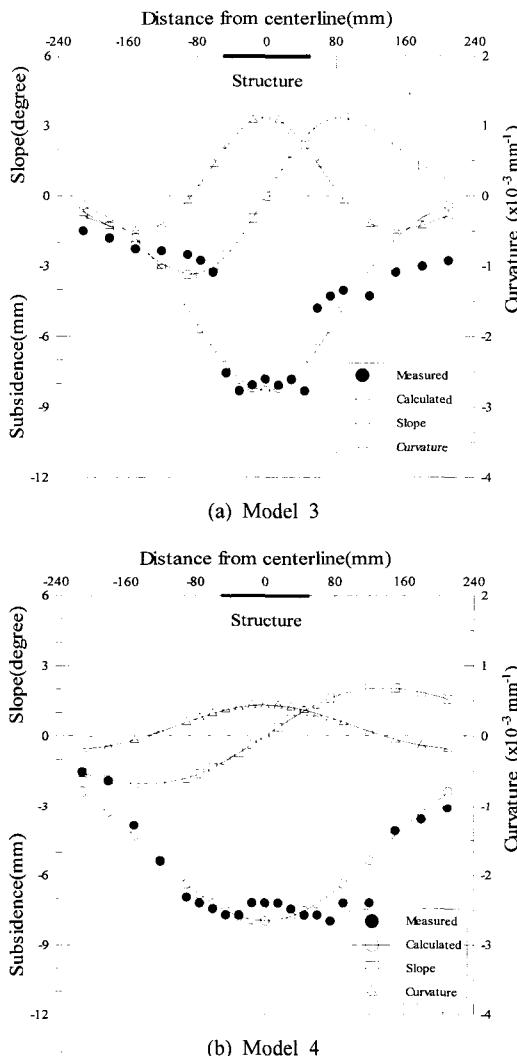


Fig. 9. Slope, curvature and subsidence profiles of Model 3 and 4

3번 모형의 경우는 골형 침하라기 보다는 합물형 침하에 가까운 형태를 나타냈기 때문이다.

한편, 침하로 인해 발생하는 피해 중에서 가장 큰 문제는 지표 및 지중 구조물의 안전성이 저하되는 것이다. 일반적으로 경사는 높고 길쭉한 구조물, 또 곡률은 높고 큰 구조물의 안정성에 영향을 미친다(Peng, 1993). 본 연구의 경우, Fig. 9와 같이 3번 모형의 경사 및 곡률은 4번 모형에 비해 크게 나타나, 대규모 보강을 실시한 4번 모형에서 구조물의 안정성이 더 증가함을 알 수 있었다.

이와 같이, 대규모 보강을 실시한 경우는 소규모 보강을 실시한 경우에 비하여 최대 침하량이 작을 뿐 아니

라 침하곡선이 완만하여 경사와 곡률도 작아지므로 지반 안정성은 보다 더 증가할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 지하 채굴적이 상부 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 지하 채굴적의 심도와 보강 조건을 달리하는 네 가지의 경우에 대해 축소모형실험을 실시하였으며, 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 채굴적의 심도가 30 m인 1번 모형은 균열 개시압력이 0.8 kgf/cm<sup>2</sup>이고 채굴적의 심도가 100 m인 2번 모형은 균열 개시압력이 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>으로서, 깊은 채굴적 모형이 얕은 채굴적 모형에 비해 약 2.5배 더 큰 압력에서 균열이 발생하였다.
- 2) 1번 모형의 지표 침하량은 상대적으로 낮은 압력단계임에도 불구하고 2번 모형의 침하량보다 크게 나타나 채굴적의 심도가 작은 모형이 가장 취약하였다.
- 3) 구조물 하부 지반을 그라우팅으로 보강한 3, 4번 모형은 무보강 모형인 2번 모형에 비해 균열 개시압력이 약 2.4배 커져, 보강을 실시하면 지반 안정성이 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) 대규모 보강을 실시한 경우는 소규모 보강을 실시한 경우에 비하여 최대 침하량이 작을 뿐 아니라 침하곡선이 완만하여 경사와 곡률도 작아지므로 지반 안정성은 보다 더 커질 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 송원경, 정소걸, 한공창, 2002, 석탄 채굴공동 상부 터널의 안정성 분석, 터널기술, 한국터널공학회논문집, 4.2, 135-142.
2. 권광수, 박연준, 2001, 채굴지역에서의 건축물 기초지반 안정성 평가 연구, 터널과 지하공간, 11.2, 174-181.
3. 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근, 2003, 석회암 공동이 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구, 한국지구시스템공학회지, 40.3, 147-158.
4. D.W.Hobbs, 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results; Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 3, 101-127.
5. 김종우, 이희근, 1988, 층상암반내 갱도의 변형거동에 관한 연구, 대한광산학회지, 25.5, 320-331.
6. P. Coquard and R. Boistelle, 1994, Water and solvent effects on the strength of set plaster, Int. J. of Rock Mechanics and Min. Sci., 31.5, 517-524.
7. 이정인, 이희근, 류창하, 양형식, 1982, 우리나라에 분포하는 주요암석류의 역학적 특성 연구(제1보) -주요탄전 지역

- 및 지하발전소 건설지역에 분포하는 퇴적암의 역학적 특성, 대한광산학회지, 19.4, 260-267.
8. 윤용균, 신중호, 양형식, 이희근, 1987, 불연속암반내 공동 주위의 변형거동에 관한 모형실험 및 수치해석, 대한광산 학회지, 24.5, 299-309.
  9. Peck R.B., 1969, Deep excavations and tunnelling in soft ground. Proc. 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the-art Report, 225-290.
  10. 지정배, 김종우, 2000, 원형공동의 점진적인 붕락에 따른 지표침하특성, 한국암반공학회지, 10.1, 33-44.
  11. Peng S.S., 1993, Surface subsidence engineering, SME-AIME.

### 김종우



1986년 서울대학교 자원공학과 공학사  
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학석사  
 1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학박사  
 Tel: 043-229-8471  
 E-mail: jwkim@chongju.ac.kr  
 현재 청주대학교 지구환경시스템공학과  
 부교수

### 전석원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
 공학사  
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학석사  
 1996년 미국 아리조나 주립대학  
 공학박사  
 Tel: 02-880-8807  
 E-mail: sjeon@rockeng.snu.ac.kr  
 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부  
 교수

### 서영호



1986년 서울대학교 자원공학과 공학사  
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학석사  
 1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
 공학박사  
 Tel: 031-280-7253  
 E-mail: seoyh@hdec.co.kr  
 현재 현대건설(주) 기술개발원