

폐광의 점진적 파괴 및 뒷채움 효과에 대한 해석적 연구

A Numerical Analysis on the Collapse and Backfill Mechanism of the Abandoned Mine Cavity



이준석*¹
Lee, Jun-Suk



방준석*²
Bang, C. S.

Abstract

The abandoned mines causing settlement of the surface above and collapse of the cavities are the major influencing factor on the stability of the nearby underground structures. To prevent the harmful effect, the backfill methods are commonly applied to the cavities although the design criteria and the analysis method are not properly addressed in some cases. An approximate analytical method together with the numerical technique is considered in this study to simulate the gradual deterioration of the rock masses around the cavities and, therefore, the influential zone to the underground structures passing through the cavities. Also considered in this study is the backfill effect on the stability of the rock masses around the cavities. Specifically, the incomplete backfill effect is compared with that of the idealized backfill method by adopting elasto-plastic analysis involving a strain softening material law.

Keywords : Abandoned mine cavity, Sinkhole, Backfill

요지

지하채굴작업에 의한 공동 및 폐갱 등은 지반침하 및 지표함몰현상의 주요 원인이 되며, 근접시공 지하구조물 또는 인근 구조물의 안정성 저해요소로 대두되고 있다. 이에 대한 대책방안으로 폐갱을 충전재로 채우는 보강시공을 수행하는 경우가 있으나 설

*¹ 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

*² 한국철도기술연구원, 주임연구원

계방법 및 안정성 해석방법이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 폐갱 등 지하공동에 의한 주변지반의 영향권을 수치적으로 분석하고 실제 수치해석 과정에서 주변 암반의 장기거동을 고려할 수 있는 방안을 제시하였다. 아울러 폐갱 인근의 구조적 안정성을 향상시키기 위하여 지하공동을 뒷채움재로 충전한 경우, 안정성 평가 및 암반의 거동을 수치적으로 분석할 수 있는 기법을 제시하였으며 불안정한 뒷채움재의 영향을 함께 고려하였다.

주요어 : 지하공동, 함몰, 뒷채움

1. 서론

현재 국내 광산지역에는 채굴중인 갱도 및 작업이 종료된 폐갱과 채굴적들이 산재하고 있으며 이들 광산지역을 인접하여 통과하는 신규 터널의 안정성 확보문제가 새롭게 대두되고 있다. 그러나 채굴적 도면이 실제 상황과 상이하거나 누락된 경우가 종종 있으며 따라서 인접지역의 지하구조물 건설시 각별한 주의가 요망된다. 폐갱 등 지하공동에 의하여 발생하는 지표면의 침하나 폐갱 붕락 등의 현상은 이미 잘 알려진 사실이며, 광산개발 지역에서 지하채굴 작업으로 인한 지표의 함몰은 외국 등지에서는 오래전부터 국가적인 문제로 대두되어 이에 대한 원인 규명 및 침하 mechanism에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 우리나라의 경우에도 강원도 태백시 일대에서 함몰 및 인장균열로 인한 피해사례가 보고된 바 있으며, 최근 강원도 태백시 영동선 철암역 일대 및 지하광물 채굴에 의한 지반침하 우려지역에서 철도·도로의 안정성 확보를 위한 지반 안정성 평가조사, 보강공법 실시설계 및 보강공사가 시행된 바 있다.

본 연구에서는 폐갱 등 지하공동에 의한 주변지반의 영향권을 분석할 수 있는 기존의 방법들에 대하여 고찰하였으며 폐갱 주변 암반의 장기거동을 모사할 수 있는 방법에 대하여 수치적으로 검토하였다. 이 방법들에 따라 영향권내를 통과하는 지하구조물의 시공시 보조공법의 채택여부를 결정할 수 있으며 특히 지반의 장기거동을 고려한 보강방안에 대하여도 적용할 수 있다. 또한 지하공동의 구조적 안정성을 향상시키기 위하여 뒷채움재로 충전한 경우에 대하여 지반의 거동을 분석하여 시공시 고려할

사항에 대하여 논의하였으며 특히 불안정한 뒷채움재의 영향에 대하여 중점적으로 고찰하였다.

2. 지하공동의 붕락형상

폐광 등의 지하공동에 의한 지반침하 사례연구는 19세기 말부터 시작되어 주로 유럽 (영국, 프랑스, 네덜란드 등) 과 미국 등지에서 수행되었으며 침하이론을 바탕으로 한 이론 연구와 이를 응용한 수치해석적 연구, 그리고 지반침하 징후를 측정하여 지상 구조물에 대한 영향 및 침하한계를 규정하는 사례별 연구 등이 있다. 이중 영국에서는 NCB (National Coal Board)를 중심으로, 미국에서는 1977년에 발표된 "Surface Mining Control and Reclamation"에 의해 침하연구가 활발히 진행된 바 있으며 특히 1982년 지반침하 워크샵에서는 침하예측 부분, 침하계측 부분, 침하특성을 고려한 예측 및 계측부분, 지상구조물에 미치는 영향평가 및 대책수립 부분 등으로 나누어 다각적인 연구가 발표된 바 있다.

침하이론은 일반적으로 탄폭이 일정하고 채굴이 규칙적으로 이루어진 영국, 미국의 수평탄전 지대에서 볼 수 있는 trough형 침하에 대하여 주로 규정되어 있기 때문에 탄층의 구조가 복잡하고 변화가 심하여 불규칙한 채굴이 이루어진 우리나라 탄전지대에서의 침하현상에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 장에서는 현실적으로 적용가능한 기법을 중심으로 지하공동에 의한 영향권 설정방안에 대하여 고찰하였다.

2.1 지하공동 및 주변의 병락유형

함몰(subsidence)이란 채굴 등에 의해 생성된 지하공동위로 응력의 재분배과정에 따르는 지표면의 시간의존적 변형을 말한다. 함몰에는 trough형 및 sinkhole형 등 두 가지 발생형태가 있으며 일반적으로 sinkhole형 함몰은 원지반, 상재토의 두께 및 특성, 굴착깊이, 천정부에 걸리는 응력상태 등에 의해서 지배된다. 대부분의 표면형태는 원형 또는 타원형이고 최대 반경 및 깊이는 각각 10m 내지 15m이내가 일반적이다.

Singh 등 (1997)에 의하면 sinkhole형 함몰은 얇은 깊이의 작업구, 연약한 상재토 및 지형적인 불연속성 등에 기인하며 수압, 우수기와 지진 등이 함몰의 발생을 악화시킨다. 또한 지표면에서 채굴 깊이가 50m내에서 가장 많이 발생하고 상재토의 흙/암반의 두께비가 0.1에서 1.0 사이에 발생하는 것으로 알려져 있다. 함몰의 첫 단계는 전단 및 인장 roof파괴나 대수층에서의 파쇄대 (fault) 를 따라 모래나 흙이 유입되나 적절한 강성의 지지대나 벽체의 설치로 그 영향을 최소화할 수 있고 그라우팅이나 뒷채움재를 이용하여 폐광위의 상재토를 안정화시킬 수도 있다.

2.2 지하공동에 의한 영향권 설정 이론

기존 폐갱 및 기타 공동의 인근을 관통하는 새로운 지하 구조물을 건설하기 위하여는 폐갱의 영향권을 산정하여야 한다. 영향권의 산정은 경험적인 판단이나 기타 이론적인 접근법을 적용할 수 있으며 본 연구에서는 여러 이론적인 방법 중 파괴역학을 이용한 고전적인 방법과 탄성론 및 수치해석적 방법을 이용하여 응력의 변화추이를 고려하는 방법을 적용하였으며 다음에서 간략히 설명하였다.

영향권 설정을 위한 첫 번째 방법으로 암반의 파괴역학 이론을 적용하는 경우, 그림 1과 같이 공동 (cavity)과 주

변 절리 (joint 혹은 crack) 사이의 상호작용에 대한 중첩법 (superposition)을 사용하여 다음과 같은 식으로 응력의 변화량을 계산할 수 있다.

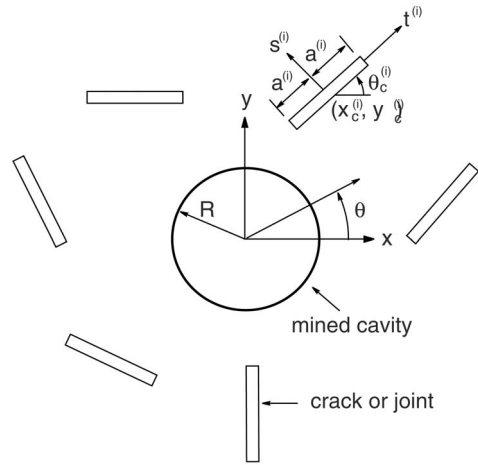


그림 1. 공동과 절리간 상호작용 모식도

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^b &= \frac{\pi(x_1+1)}{G_1} [I_{yy}(x, y; c) b_x + I_{xy}(x, y; c) b_y] \\ \sigma_{yy}^b &= \frac{\pi(x_1+1)}{G_1} [I_{xx}(x, y; c) b_x + I_{yx}(x, y; c) b_y] \\ \sigma_{xy}^b &= \frac{\pi(x_1+1)}{G_1} [I_{yx}(x, y; c) b_x + I_{xy}(x, y; c) b_y] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x_1 = 3 - 4\nu_1$ 이고 G_1 은 암반의 전단변형계수이며 I_{xx}, \dots, I_{yy} 는 fundamental 함수로서 Hu & Kemeny (1994)를 참조할 수 있다. 한편 b_x 및 b_y 는 상대 변위 요소 (dislocation component)로서 Dundurs & Mura (1964) 에 나타나 있다. 식 (1)과 각 절리간의 상대 변위 분포를 계산하면 수치적분을 통하여 임의의 점에 대한 응력과 변위를 구할 수 있다. 이 방법은 폐갱주변 구조물을 절리로 단순화한 가정을 도입하였으므로 실제 지하 구조물의 규모가 큰 경우, 비현실적인 결과를 나타낼 수 있으나 폐갱 및 주변 구조물의 상호작용에 대한 응력변화량을 정량적으로 표현할 수 있는 장점도 있다. 한편, 이

방법은 폐광의 인장파괴에 대한 제한적인 접근만이 가능하며 단순화한 초기 지압조건만을 고려할 수 있으므로 정밀한 해석에 사용하기에는 무리가 있다.

한편 공동과 주변 지하구조물간의 상호작용 및 영향권을 설정하기 위한 다른 지표로서 공동 주위의 응력집중계수 (Stress Intensity Factor)를 고려할 수 있다. 이 경우, 원형 터널 주변의 정확한 응력 및 변위는 탄성론의 평형 방정식 및 적합방정식으로부터 적절한 경계조건을 대입하여 다음과 같은 이론 식들을 유도할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}P_z \left\{ (1-k)(1-2\frac{a^2}{\gamma^2}) + (1-k)(1-4\frac{a^2}{\gamma^2} + 3\frac{a^4}{\gamma^4} \cos 2\theta) \right\} \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}P_z \left\{ (1-k)(1-2\frac{a^2}{\gamma^2}) - (1-k)(1+3\frac{a^4}{\gamma^4} \cos 2\theta) \right\} \\ \tau_{\theta r} &= \frac{1}{2}P_z \left\{ -(1-k)(1+2\frac{a^2}{\gamma^2} - 3\frac{a^4}{\gamma^4}) \sin 2\theta \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, σ_r , σ_θ 및 $\tau_{\theta r}$ 는 각각 임의의 지점의 반경방향, 원주방향 및 전단 응력을 의미하고 k 는 초기 수직 지압에 대한 초기 수평방향 지압의 비, 즉 토압계수를 나타낸다. 이는 터널의 형상이 원형이고 외부 하중이 일정한 경우에만 적용이 가능하고 그 이외의 경우에는 복잡한 이론식이나 수치해석 과정을 도입하여야 하며 박상찬 등 (1998)에 잘 요약되어 있다.

2.3 Karfakis에 의한 토랑환산계수의 적용

Sinkhole형 침하의 영향권을 분석하기 위한 다른 지표로서 그림 2와 같이 sinkhole형 침하의 최대 붕락 높이를 고려할 수 있다. 이는 토랑환산계수 (B , bulking factor)를 이용한 경험적 방법으로서 토랑환산계수는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다 (Piggott & Eynon, 1977).

$$B = \frac{V_c - V_o}{V_o} \quad (3)$$

여기서, V_o 는 교란되지 않은 (unbroken strata) 암반 혹은 원지반의 체적, V_c 는 교란되거나 느슨해진 상태의 암반 체적을 나타낸다. 실례로 지하공동의 원추형 붕락에 대하여 원지반의 체적은 다음과 같고

$$V_o = \frac{\pi P^2}{4} \frac{H}{3} \quad (4)$$

교란된 암반의 체적은 다음과 같다.

$$V_c = V_o + \frac{\pi P^2}{4} t \quad (5)$$

여기서, H , t 및 P 는 각각 붕락고 및 채굴고와 채굴폭을 나타낸다. 따라서 토랑환산계수 B 를 알고 있다면 붕락이 일어날 수 있는 최대 높이는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$H = \frac{3t}{B} \quad (6)$$

마찬가지로 직사각형 붕괴형태에 대한 붕락고는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$H = \frac{t}{B} \quad (7)$$

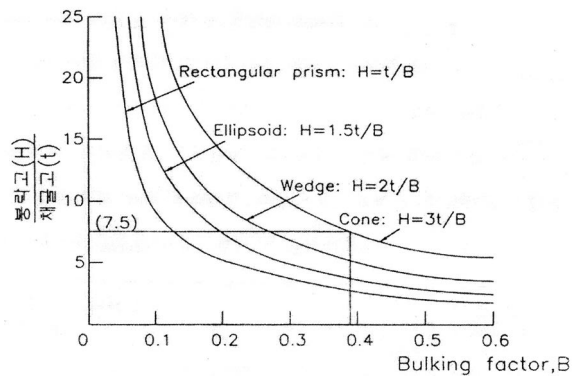


그림 2. Sinkhole형 침하의 붕락높이 결정 (Piggott & Eynon, 1977)

한편 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 주어진 토량환산계수에서는 원추형 붕락형태가 주변 구조물에 미치는 영향이 가장 크며 식 (6)과 같이 토량환산계수가 작을수록 붕락고는 급격히 증가하게 된다. 실제 지하구조물 설계에 있어서는 표준폼셈 등에 표기된 토량의 변화율로부터 1을 감하여 계수를 계산하며, 일반적인 경우 연암의 토량환산계수는 0.3 ~ 0.5 범위에 있는 것으로 간주한다.

그림 2의 최대 붕락고를 토량환산계수가 0.2인 경우에도 시하면 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 채굴고가 6m인 경우, 원추형 붕락고는 80m를 상회하고 직사각형 붕락인 경우는 약 30m정도가 위험영역이라 할 수 있다. 그러나 실제 설계에 있어서는 붕락고뿐만 아니라 현지 암반의 마찰각을 고려한 영향권 설정이 이루어져야 하며 파쇄대 혹은 인접 지하구조물의 상대적인 위치 등도 함께 고려되어야 한다.

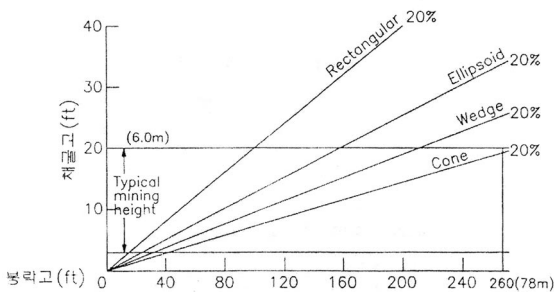


그림 3. 토량환산계수가 0.2인 경우, 채굴고와 붕락고의 관계 (Karfakis, 1993)

다음 장에서는 토량환산계수를 응용한 지하공동의 영향권 설정에 대하여 수치해석적인 방법을 적용하였으며 특히 변형률 연화법칙의 적용가능성에 대하여 고찰하였다.

3. 변형률 연화법칙을 이용한 영향권의 선정

본 장에서는 수치해석을 통하여 앞서 기술한 지하공동에 대한 영향권을 분석하였다. 이를 위하여 터널구조물 해석에 흔히 사용되는 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램 및 변형률 연화법칙을 채택하여 공동에 의한 파괴형상 및 영향권을 모사하였다.

3.1 채굴적 인근에 대한 소성연화법칙의 적용 예

본 연구에서는 지하 채굴적 인근의 붕락현상 및 영향권을 모사하기 위하여 암반 및 토질역학에 흔히 적용되는 변형률 연화법칙을 도입하였다. 실제 채굴적 인근의 안정성을 평가하기 위하여는 현지 암반에 대해 크리이프나 점소성 모형 등과 같은 시간 의존적인 모형을 적용하는 것이 바람직하나 이들 모형에 적용되는 각종 변수들의 값이 비현실적이거나 복잡한 실험을 거쳐야 하는 등 실질적인 설계에 적용하기에는 무리가 따른다. 따라서 비교적 간단히 응용할 수 있는 소성 연화법칙을 일반 상용프로그램에 적용하여 앞서 논의한 Karfakis의 영향권 설정에 대한 이론의 적용성을 검토하였다.

현지 암반에 대하여 소성 연화법칙을 적용하기 위하여는 그림 4와 같이 암반의 점착력 혹은 내부마찰각에 대한 초기값 및 잔류값 (residual value)을 결정하고 소성 연화 추세에 대한 추세선을 수학적으로 가정하여야 한다. 본 연구에서는 계산의 간편함을 위하여 초기 점착력 C_0 와 소성변형률의 함수인 잔류 점착력 C_r 및 직선형 연화법칙을 가정하였으며 좀 더 현실적인 소성 연화함수는 Lee & Pande (1999) 등의 지수형태 함수나 Marino & Choi (1999) 등에 의한 과압밀비(OCR)의 함수로 표현할 수 있다.

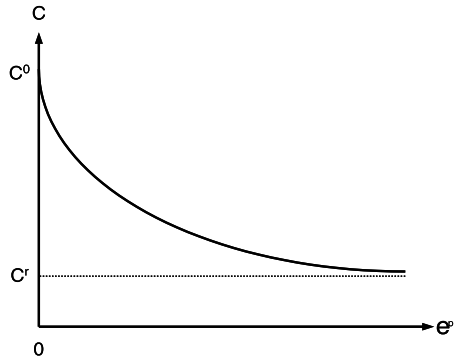


그림 4. 점착력에 대한 소성연화법칙의 적용

지하공동에 의한 지반의 거동 및 함몰영향권을 분석하기 위하여 2차원 평면변형률 모델을 이용하였으며 지하공동의 크기는 일반 광산을 근거로 2m폭×3m높이 제원을 갖는 직사각형 형태를 채택하였고 Karfakis의 채굴량에 따른 함몰높이를 기초로 하여 공동상부의 지반고는 18.5m로 가정하였다. 그림 5는 지하공동의 형상 및 지반 특성을 나타내고 있다.

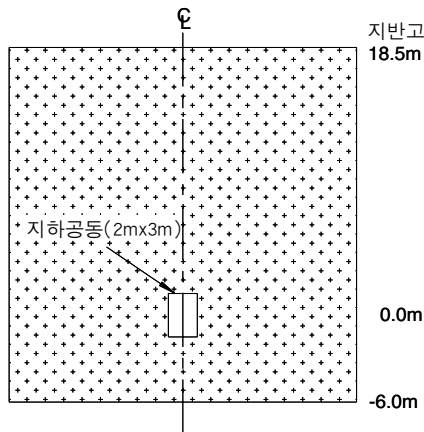


그림 5. 지하공동의 형상 및 지형

표 1. 수치해석에 이용된 지반의 물성값

구분	단위중량 (t/m^3)	탄성계수 (t/m^2)	포이송비	점착력 C^0 (t/m^2)	내부마찰각 φ ($^\circ$)
풍화암	1.9	5,000	0.35	6.0	30

지하공동의 주변지반은 풍화암 지층이 분포된 것으로 가정하였으며, 사용된 풍화암에 대한 지반물성값은 표 1에 나타내었다.

해석모델은 지하공동의 붕락 및 응력변화량을 현실적으로 분석하기 위하여 두가지의 경우를 이용하였으며, 구체적으로 전형적인 완전 탄소성거동의 Mohr-Coulomb 항복함수와, 장기거동의 효과를 고려하기 위한 소성연화 모델을 적용하였다. 앞서 논의한 바와 같이 소성연화모델은 소성 변형률이 발생하였을 경우, 점착력이 선형적으로 감소하여 잔류 점착력으로 상존한다고 가정하였다. 해석시 모형은 4,331개의 절점과 4,200개의 평면변형률 요소로 분할하여 거동을 예측하였으며, 초기거동은 자중에 의한 초기응력이 작용하는 것으로 간주하고 축압계수는 1.0으로 가정하였다.

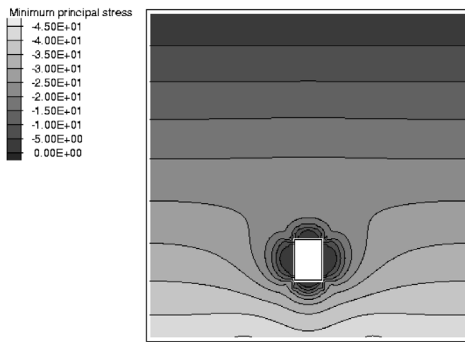
전형적인 Mohr-Coulomb 모델 및 완전소성 모형을 이용한 경우에 대한 해석결과는 그림 6(a)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 소성발생 영역은 응력집중이 되는 공동의 모서리에 분포하는 경향을 보여주고 있으나 시간 경과에 따른 소성영역의 전파나 영향권 설정을 위한 기초 자료로 사용하기에는 한계가 있다. 한편 시간경과에 따른 암반강도의 소실효과를 분석하기 위하여 공동 주변 반경 3m에 걸쳐 점착력이 1.2 t/m^2 로 감소한 경우, 해석결과는 그림 6(b)에 도시하였다.

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 잔류 점착력을 적용한 경우, 지하공동 상단으로 상당부분 최소 주응력이 이완되고 있음을 알 수 있으나 잔류 점착력의 적용 범위 및 크기에 따라 응력이 변화하며 초기 점착력을 적용한 영역에 있어서는 소성영역이 발생하지 않는다. 따라서 좀 더 현실적인 해석을 위하여는 소성연화 모형을 적용할 필요가 있다.

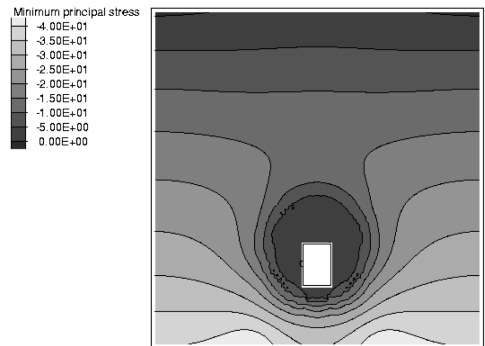
그림 7은 소성연화 모형을 적용한 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. 이 경우에도 앞서와 마찬가지로 잔류 점착력은 1.2 t/m^2 로서 초기 점착력으로부터 선형적으로 감소한다고 가정하였다. 우선 최소 주응력의 변화 양상

은 그림 7(a)에 나타나 있으며 공동 높이의 약 5배 이상 응력이 이완되고 있음을 알 수 있다. 이 때 점착력의 변화 패턴은 그림 7(b)에 도시되어 있으며 이에 상응하는 공동 주변의 소성 전단변형률은 그림 7(c)에 표기하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전단변형률의 발달은 공동의 상부로 $45^\circ + \phi/2$ 인 60° 방향으로 진행되었고 장시간이 경과한 후에도 더 이상의 진전은 없는 것으로 판단된다. 한편 공동주변의 소성 영역은 그림 7(d)에 나타나었으며 주로 전단에 의한 소성 변형률이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 7(a)의 응력 이완 패턴은 그림 2의 붕락고와 연관하여 고려할 수 있다. 즉, 그림 2의 붕락 양상중 그림 7의 응력이완 패턴과 유사한 타원형 붕락형태를 취하고 풍화암의 토량환산계수가 0.3 정도인 점을 감안하여 볼 때 붕락이 가능한 높이는 채굴고의 약 5배 정도가 되고 이는 본 수치해석에서 유추한 결과와 유사한 결과를 나타낸다. 그러나 잔류 점착력이 본 연구에서 가정된 값보다 큰 경우에는 응력 이완이 덜 일어나게 되고 작은 경우에는 sinkhole형 침하형태를 나타내게 된다. 따라서 추후 이에 대한 매개 변수 해석이나 이론적인 접근이 필요할 것으로 판단된다.

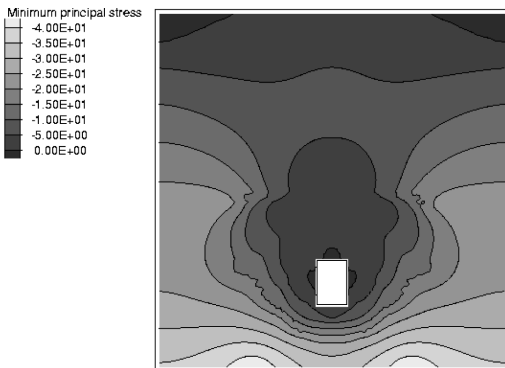


(a) 완전소성 모형

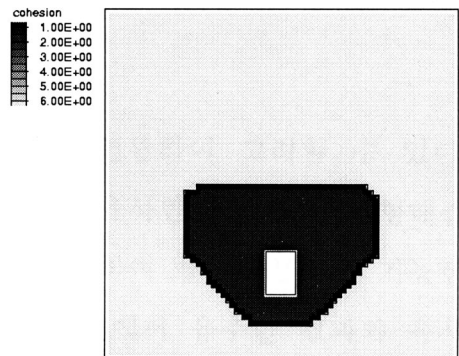


(b) 잔류 점착력 및 완전소성 모형

그림 6. 완전소성 Mohr-Coulomb 항복함수를 이용한 공동주변 응력해석 결과



(a) 최소 주응력의 변화



(b) 점착력의 변화

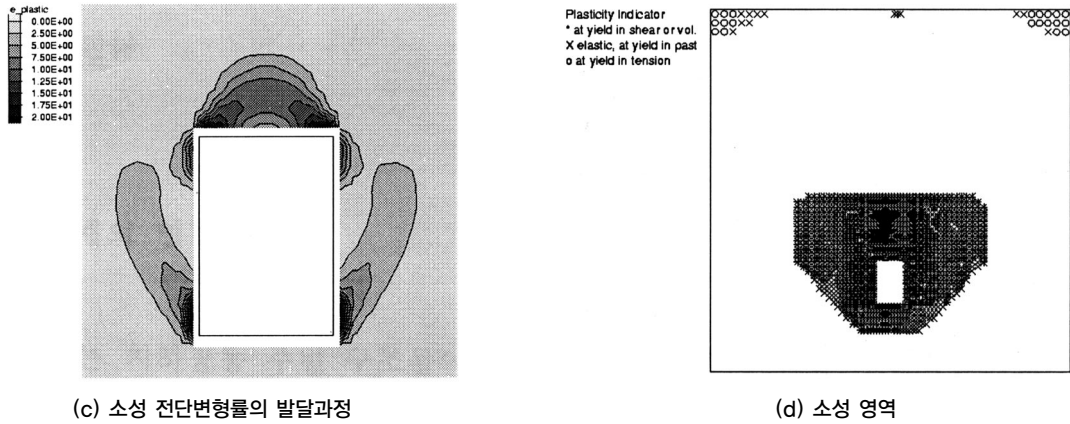


그림 7. 소성연화 모형을 이용한 공동주변 응력해석 결과

3.2 뒷채움재의 영향 분석

본 절에서는 지하공동 주변 구조물의 안정성을 확보하기 위한 대책방안으로 주로 이용되는 충전재(backfill)에 대한 영향을 분석하였으며 특히 지하공동을 충전재로 완전히 되메움한 경우와 공동의 천단부가 압밀 등에 의하여 완전 밀폐되지 않는 경우도 함께 고려하여 해석에 반영하였다.

공동 내부에 적용하는 채움재의 물성치를 선정하기는

매우 어려우며 국내 자료도 부족한 실정이므로 외국의 자료를 기초로 Scoble 등 (1987) 이 pencil Pressuremeter 를 이용하여 채움재의 탄성계수 및 전단계수를 추정할 결과를 인용하였다. 여기에서는 광미(tailing)를 이용하여 뒷채움하고 시멘트를 첨부하여 밀실시키는 방법을 가정하였으며 탄성계수 $3,000\text{t/m}^2$, 전단계수 $1,100\text{t/m}^2$ 을 가정하여 적용하였다. 해석모델은 앞 절에서와 동일하게 소성연화 모형을 이용하였으며 뒷채움재의 거동은 탄성거동에 국한하였다.

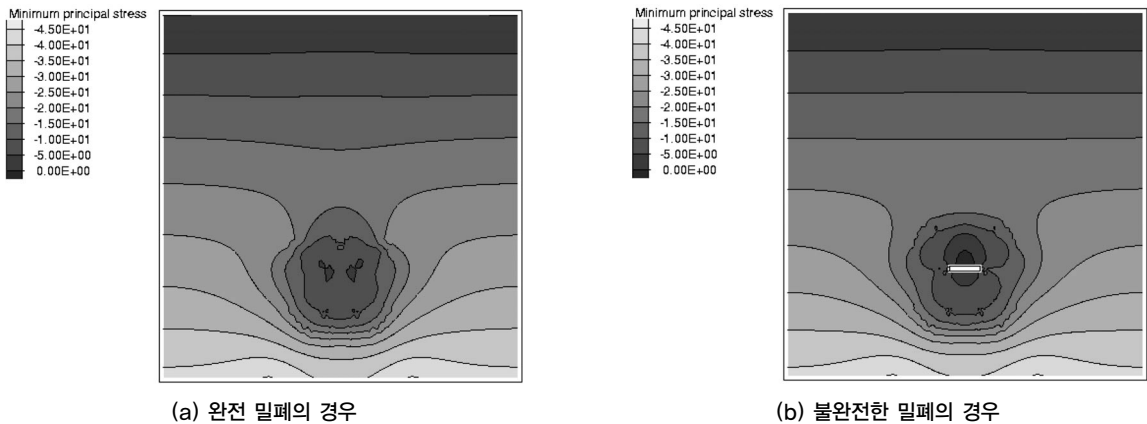


그림 8. 뒷채움재의 영향 분석

먼저 완전 충전된 경우 최소 주응력의 분포를 그림 8(a)에 나타내었다. 공동을 충전시키지 않았을 경우에 대한 그림 7(a)의 응력 분포에 비해 현저한 차이를 보이며 공동 주변의 일부 이완 영역을 제외하고는 전체적으로 안정된 양상을 보인다. 한편 공동 천단부 약 30cm에 걸쳐 밀폐되지 않은 경우를 비교해 보면 그림 8(b)와 같이 공동 상단에서 응력이 이완되어 붕락의 위험이 있음을 알 수 있으며 이를 다시 비연속체 역학에 기초한 수치해석을 실시하는 경우 상당 부분 붕락이 일어날 수 있는 개연성을 내포하고 있다. 결국 지하공동의 뒷채움에 있어서 완전히 밀폐시킬 수 있는 공법의 선정이 주변 구조물의 장기적 안정성 확보를 위해 중요함을 수치해석을 통하여 입증할 수 있다.

한편 본 연구에서는 지하공동의 굴착 후 초기 단계에서 뒷채움을 하는 경우에 국한하여 수치해석을 실시하였다. 그러나 오래된 폐갱과 같이 상당한 시간이 경과하여 주변 암반의 물성이 현저히 변화한 후 뒷채움을 하였다면 그림 8의 응력분포와는 상이한 결과를 보일 수 있으나, 이 경우에도 수치해석 결과는 뒷채움의 밀폐여부가 주변 암반의 안정성에 주요한 관건이 됨을 알 수 있으며 자세한 수치해석 결과는 다른 곳에서 토의하기로 한다.

4. 결론

본 연구에서는 지하공동에 의한 주변지반의 점진적 손상에 대하여 수치해석적으로 분석하였다. 또한 지하공동에 근접하는 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 뒷채움재로 보강한 경우에 대한 지반거동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 유추하였다.

- 상용 프로그램의 소성연화 모형중 잔류 점착력을 이용한 경우, Karfakis의 공동 영향권을 비교적 정확히 모사할 수 있다. 따라서 세밀한 수치해석 등이

요구되지 않는 경우에 있어서는 그림 2의 도표를 이용하여 지하공동의 영향권을 분석할 수 있으며, 이는 장기적인 안정성 문제에도 적용할 수 있다고 판단된다.

- 주변 지반 및 근접구조물의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 뒷채움재로 밀폐시킨 경우, 암반이완 영역이 현저히 감소하나, 시공시 압밀 등에 의하여 크라운부에 공극이 발생하는 경우에는 상부 영역에 응력의 이완이 발생하며 시간경과에 따라 점진적인 함몰을 야기시킬 가능성이 크다는 것을 알 수 있으며 이를 수치해석적으로 규명하였다.

한편 Karfakis의 영향권 이론을 역으로 이용하면 본 연구에서 고려한 소성연화 모형의 잔류 점착력을 계산할 수 있으며, 따라서 근접 지하구조물 등에 대한 장기적인 안정성 확보를 위한 정밀한 구조해석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 실제 sinkhole형 붕락이나 지하 채굴적의 붕락현상 등을 고려하면 수치해석에 필요한 뒷채움재의 적용시기 등을 예측할 수 있으며 향후 이에 대한 추가적인 연구가 이어질 예정이다.

참고문헌

1. 박상찬, 문현구, "지하공동의 형상과 규모가 공동의 안정성에 미치는 영향 연구", 한국지반공학회논문집, 1998, Vol. 14, pp.93-107.
2. J. Dundurs, & T. Mura, "Interaction between an edge dislocation and a circular inclusion", J. Mech. Phys. Solids, 1964, Vol. 12, pp.177-189.
3. K. X. Hu & J. Kemeny, "A fracture mechanics analysis of the effect of backfill on the stability of cut and fill mine workings", I. J. Rock Mech. & Min. Sci., 1994, Vol. 31, pp.231-241.
4. M. G. Karfakis, "Residual subsidence over abandoned coal mines", in Comprehensive rock

- engineering, 1993, Vol. 5, Pergamon press, pp.451-476.
5. J. S. Lee & G. N. Pande, "A new joint element for the analysis of media having discrete discontinuities", *Mech. Cohes.-Frict. Mater.*, 1999, Vol. 4, pp.487-504.
 6. G. G. Marino & S. Choi, "Softening effects on bearing capacity of mine floors", *J. Geotech. & Geoenv. Eng.*, 1999, Vol. 125, pp.1078-1089.
 7. J. Piggott & P. Eynon, "Ground movements arising from the presence of shallow abandoned mine workings", *Proc. large ground movements & Str.*, 1977, Ed. J. D. Geddes, U.K., pp.749-780.
 8. M. Scoble, L. Piciacchia & J-M. Robert, "In situ testing in underground backfilled stopes", *CIM Bull.*, Vol. 80, 1987, pp.33-38.
 9. B. Singh & B. Dhart, "Sinkhole subsidence due to mining", *Geotech. & Geolog. Eng.*, 1997, Vol. 15, pp.327-341.