

다층 주방식 채광 광산에서 낙반이 채광장 천반과 광주에 미치는 영향

김종관¹⁾, 양형식^{2)*}

Influence of Rock Fall on the Roofs and Rib Pillars at Multi-layered Room and Pillar Mine

Jong-Gwan Kim, Hyung-Sik Yang

Abstract Influence of rock fall from upper-level roofs to lower-level roofs and pillars at a multi layered room and pillar mine was numerically simulated by using AUTODYN. The analysis results showed that the maximum displacement and stress in the roof of the lower-level stope are respectively 0.001 mm and 36 MPa, and those in the pillars of the lower-level stope are 0.0003 mm and 3 MPa. The maximum damage levels in the roof and pillar of the lower-level stope were evaluated to be about 0.03 when a half of the roof rock of the upper-level stope was assumed to be fallen to the floor.

Key words Multi layered room and pillar mining method, Rock fall, AUTODYN, Pillar

초 록 다층 주방식 광체의 개발에서 상부 채광장 천반의 붕락이 하부 편 광주에 미치는 영향을 보기 위하여 AUTODYN으로 수치해석 하였다. 그 결과 하부 채광장 천반에서의 최대 변위와 응력은 각각 0.001 mm 및 36 MPa 정도였고, 광주에서의 최대 변위와 응력은 각각 0.0003 mm 및 3 MPa 정도였다. 상부 채광장의 천반암석의 절반이 붕락하는 상황을 가정했을 때 하부 채광장 천반과 광주의 손상도는 0.03 정도로 나타났다.

핵심어 다층 주방식 채광법, 낙반, AUTODYN, 광주

1. 서 론

우리나라의 석회석 광산은 광체가 거의 수직으로 서 있는 경우가 많아서 다층 주방식으로 생산하는 경우가 많다(김종관, 2014). 이 경우 편과 편 사이에는 불가피하게 천반을 남겨두게 되는데 그 두께가 채광장의 광주(pillar) 높이보다 두꺼운 경우가 많아 실제 채수율은 50%에 미치지 못하는 경우가 많다. 국내 석회암 광체의 경우 강도가 높고 치밀하여 갱내 파쇄장 등의 설치로 인하여 천반 폭이 100 m 이상이 되어도 이완되거나 안전에 문제가 없는 경우도 많다(김

종관 외, 2010, 김원범 외, 2012). 그러므로 채수율 50%에 미치지 못할 만큼 두껍게 천반을 남겨두는 것은 과도한 설계 일 수 있고 자원의 낭비일 수 있다. 그러므로 채수율을 높이기 위해서는 천반을 회수하거나 처음부터 두께를 얇게 설계할 필요가 있다. 천반이 두꺼운 경우에는 발파하여 전부를 회수하거나 상향발파(breast blasting)에 의하여 일부를 회수하기도 한다. 이러한 회수 과정에서 예상치 못하게 천반의 전부 또는 일부가 분리되어 낙하하게 되는데, 한국광물자원공사(2015) 자료에 의하면 낙반붕락에 의한 재해건수는 최근 3년 평균 20여건으로 다른 재해원인에 비해 발생빈도가 적지 않은 편이다.

본 연구에서는 천반 회수 과정에서 발생할 수 있는 낙반을 AUTODYN으로 시뮬레이션하여 하부 편 천반과 광주에 미치는 영향을 검토하였다.

¹⁾ 한국광물공사 신사업기획팀

²⁾ 전남대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2016년 12월 23일

심사 완료일 : 2016년 12월 27일

게재 승인일 : 2016년 12월 28일

2. 연구 대상 광산

일반적인 주방식 채광장은 그림 1과 같으며, 1개의 편(레벨 또는 층)은 천반(roof)과 하반(floor), 광주(pillar)로 구성된다. 연구 대상인 OO광산은 연산 100만톤 규모의 석회석 광산으로 노천에서 갱내개발로 전환된 광산이며 현재 11편까지 개발되고 있다(그림 2). 매년 10여 미터 정도 심부화 되어 채산성이 악화되고, 기존 채광 완료 지역의 재개발을 통해 부족한 생산량을 보충하고 있다. 특히 천반을 회수하는 과정에서 대·소규모의 붕락이 일어나고 있는데 소할의 어려움도 있거나 접근의 위험성도 있다. 또한 이러한 붕락으로 하부 편 천반이나 광주의 안정성에도 적지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

석회암 광체에서 광주는 품위가 낮은 규질성 석회암에 주로 위치하는데, 천반은 품위와 무관하게 일정한 두께로 잔존하고 있다. 광체와 광주들의 강도는 큰 차이가 나지 않아 사실상 균질 연속성 암체로 가정할 수 있다.

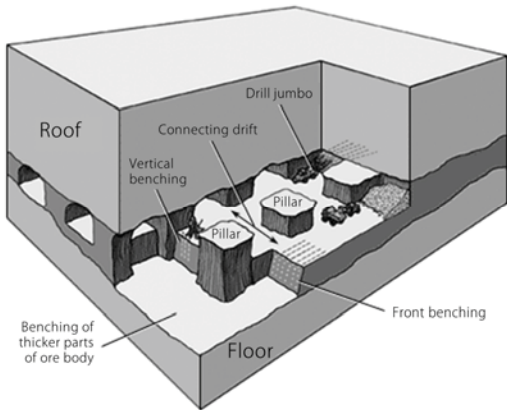


그림 1. 주방식 채광장(Hamrin, 1980).

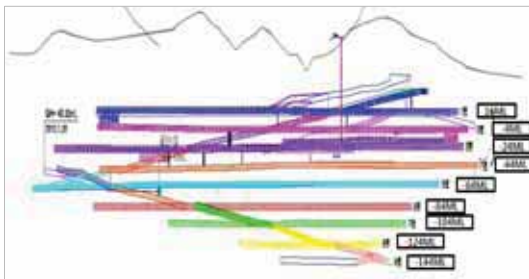


그림 2. OO광산 갱내 단면도.

3. 수치해석

3.1 AUTODYN

AUTODYN은 폭발이나 충격해석 전용의 유한요소 해석법으로 극도의 하중을 받는 구조물의 거동을 예측할 수 있다. 순간적인 큰 변형, 재료의 비선형성, 구조체와 유동체 간의 상호작용 등을 모사할 수 있다. 해석에 사용한 기법은 고속충돌 현상의 수치모사에 매우 유리하다고 알려져 있는 SPH(smoothed particle hydrodynamics) 기법과 입자의 이동을 통해 재료거동을 기술하는 Lagrangian 기법을 사용하였다(노명현 외, 2007). 낙반과 암반의 모델은 달리 적용하였으며, SPH와 Lagrangian 기법을 각각 적용하였다.

3.2 모델 및 물성

연구 대상 광산의 광상 형태와 물성, 문제의 특성을 감안하여 2차원 모델을 구성하였다. 대부분의 광주 축이 일치하며 비교적 고른 분포를 하고 있어서 그림 3과 같이 광산 골격을 단순화하였다. 낙반의 크기는 12.5 m × 14 m이고, 채광장 천반의 두께는 14 m, 채광장의 폭과 높이는 각각 25 m, 6 m, 광주의 폭은 20 m로 하였다. 실제에 있어서는 운반경도와 이어진 부분은 광주의 형태를 취하고 있으며 채광장 사이에는 비교적 긴 형태의 광주가 형성되어 있다. 따라서 평면변형 문제로 간주할 수 있다. 광주가 짧아서 평면변형 문제로 적용하기 어려운 경우에는 광주에 적용할 물성을 등가로 치환하여 2차원으로 해석할 수도 있다.

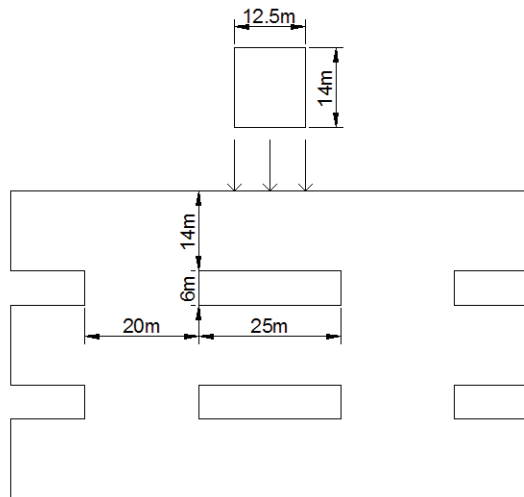


그림 3. 해석모델 모식도.

주방식으로 개발할 때 광주의 구속 때문에 천반 전부가 동시에 붕락하는 것은 어려우므로 낙반의 크기를 천반의 절반 정도로 가정하였다. 즉 채광 폭의 절반 정도로 제한하였다. 낙반의 낙하 지점은 손상이 가장 클 것으로 예상되는 광주와 광주의 중간 지점으로 정하였으며 등분포 락하중(strip ratio)으로 간주하였다.

AUTODYN 수치해석 모델은 그림 4와 같으며 천반 절반 크기의 낙반이 발생했을 때 공동 천반과 광주 중앙, 외곽에 발생하는 변위 및 응력을 확인하기 위해 게이지를 부착하였다.

물질의 거동을 표현하기 위해 프로그램에서 제공되는 다양한 종류의 물성 모델 중 적절한 모델을 선택하여 사용할 필요가 있다. AUTODYN 프로그램에서는 상태방정식, 강도 모델, 파괴 모델 등 다양한 형식의 물성 모델들이 제공된다(유광호 외, 2013). 본 연구에서 고려한 재료모델은 RHT (Riedel-Hiermaier-Thomas) 콘크리트 모델이다. RHT

콘크리트(RHTC) 모델은 취성재료에 적합한 고급 소성모델로 동적하중을 받는 콘크리트의 모델링에 특히 유용하며, 암석이나 세라믹 등 콘크리트 이외의 취성재료를 모델링하는데도 사용된다(Riedel et al., 1999, 2009). 또한 RHTC에서 사용되는 재료의 매개변수는 압축강도와 이와의 비로 요구되는 인장강도 및 전단강도, 콘크리트의 거동특성을 묘사하는 다양한 계수들을 정의하기 위한 상수 및 지수로 이루어져 있다(류연선 외, 2015). 유광호 외(2013)는 터널 주변 폭발로 인해 발생된 버력의 처리시간 예측을 위해 AUTODYN 프로그램을 사용하였고, 강도 모델과 파괴 모델로 압력 강화, 변형 강화, 변형률 강화, 변형률 연화, 균열 완화 등의 특징을 가진 RHT 콘크리트 모델을 적용한 바 있다.

해석에 사용한 입력물성은 ○○광산의 기존의 문헌과 갱내 지반조사 결과, 현장 채취 시료에 대한 실험실 및 현장시험을 통해 산정한 석회석의 탄성상수 및 정적물성을 RHT 콘크리트 물성에 적용하였다(표 1). 다양한 매개변수를 결

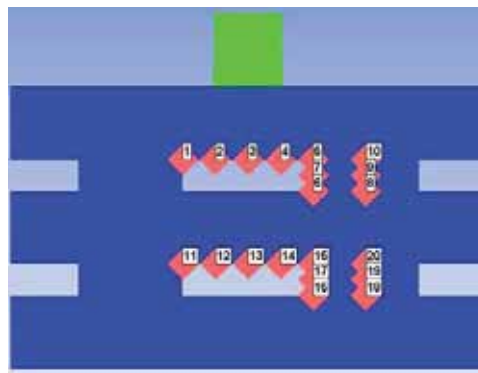


그림 4. 수치해석 모델.

표 1. 수치해석 입력변수

변수	입력값	변수	입력값
Reference Density (g/cm^3)	2.66	Elastic strength (f_t)	0.40
Bulk modulus (GPa)	43.9	Elastic strength (f_c)	0.85
Shear modulus (GPa)	17.0	Fracture strength constant (B)	2.50
Compressive strength (MPa)	150.0	Fracture strength exponent (m)	0.85
Tensile strength (f_t/f_c)	0.05	Compressive strain rate exponent (α)	0.025
Shear strength (f_s/f_c)	0.07	Tensile strain rate exponent (δ)	0.045
Intact failure surface constant (A)	2.50	Damage Constant (D1)	0.025
Intact failure surface exponent (n)	0.85	Damage Constant (D2)	1.000
Tension/compression meridian ratio	0.72	Minimum Strain to Failure	0.060
Brittle to ductile transition (BQ)	0.01	Residual Shear Modulus Fraction	0.250

정하기 위해서는 많은 실험(정적재하시험, 관통 및 천공시험, 폭발하중시험 등)이 요구되나(류연선 외, 2015), 본 연구에서는 현실적으로 불가능하여 Tawadrous (2010)가 제안한 RHT 화강암 모델의 강도 변수를 적용하였다.

4. 해석결과

4.1 천반과 광주의 변형과 응력집중

주어진 조건에서 천반과 광주의 변위와 응력집중을 비교하였다. 천반의 변위는 0.001 mm 이하로 천반과 광주가 교차하는 지점과 충격이 가해진 지점의 하부 편 중앙에서 크게 나타났다. 이 변위는 진동 형태로 나타나는 것으로 주변이 소성화 되지 않는 이상 탄성적으로 회복되며 영구 변형이 될 가능성이 크지 않은 것으로 보인다. 그렇다 하더라도 그 크기가 일반 터널의 압계변위(장원일, 2008)에서 Sakurai (1997)가 제안한 터널의 안정성 평가를 위한 경고레벨(warning level) I 수준에도 미치지 못하여 대상 광산의 압반이 견고하고 변위 발생이 크지 않은 점을 감안할 때 충격으로 인한 하부 편 천

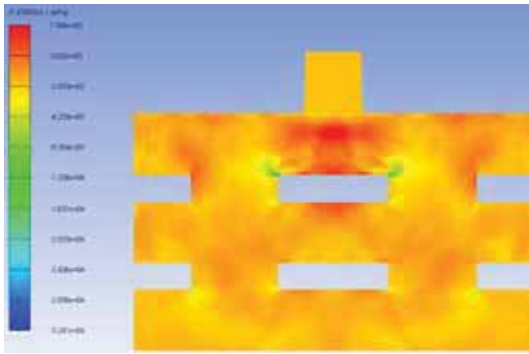


그림 5. 응력집중.

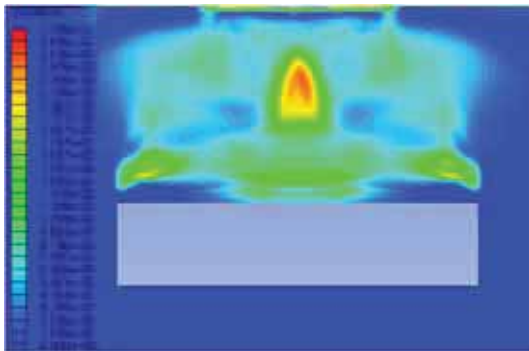


그림 6. 전체 모델의 손상도.

반의 파괴 위험성은 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

광주의 수평변위는 미미하였으며 수직변위도 0.0003 mm 정도로 그림 4의 9지점인 광주의 중심부에서 가장 큰 변형이 발생했다. 이는 천반에서의 변위보다 낮은 값이어서 광주가 파괴될 가능성은 천반보다 더 낮다고 판단된다. 문희숙(2003)은 광주 위치에 따른 천반의 변위 및 응력을 수치해석을 통해 검토하였는데 변위값이 0.220~0.227 mm 임을 감안하면 본 연구의 변위 값은 매우 적은 값을 알 수 있다.

그림 5에서 천반에 가해지는 응력은 그림 4의 계측 지점인 1, 5에서 36 MPa이고, 천반의 가운데 지점인 3에서는 4.5 MPa이 발생하였다. 광주에서의 응력집중은 3 MPa로 천반에 비하여 적은 값이다.

4.2 천반과 광주의 안전율

그림 6은 해석 대상 구조물 전체의 손상도를 나타낸 것이다. 동적 하중에 대한 물체의 단축 압축 강도는 정적 하중에 비해 4배에 이른다는 연구 결과도 있지만(양정훈 외, 2011), 동적 하중을 받는 부분이 구조물의 일부에 국한되고 또한 그 크기도 크지 않으므로 파괴는 정적인 영역에서 일어나는 것으로 가정하여 AUTODYN에서 제공하는 식을 채택하여 해석하였다. Riedel et al. (1999, 2009)은 RHTC 모델에서의 손상 D 를 식 (1)과 같이 제안하였다. 이러한 손상은 소성변형률의 축적에 의해 발생하며, 여기서 D_1 , D_2 는 재료상수로 압력의 함수로 표현되는 재료 고유의 파괴 변형률을 정의하기 위해 사용되고, 손상은 재료에 변형을 연화 및 전단 강도의 감소를 유발한다. P^* 와 P_{spall}^* 은 각각 압축강도에 의해 정규화된 압력과 동적파괴강도(spall strength)이다(류연선 외, 2015).

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^{failure}} \quad (1)$$

$$\epsilon_p^{failure} = D_1 (P^* - P_{spall}^*)^{D_2} \quad (2)$$

AUTODYN에서 제공하는 안전율은 최대 손상(Maximum damage) D_{max} 로써 0.0에서 1.0 사이의 값을 가지며(ANSYS, 2013), 일반적인 안전율과 달리 1 이하일 경우 안전한 것으로 본다. 그 결과 가장 안전율이 낮은 부분은 충격 직하부 천반 중앙이었으며 손상도는 0.03이고, 전체 영역의 손상도도 1 이

하였다. 그러므로 현재의 광주 규격으로 채광할 때 상부의 천반 절반이 낙하하는 경우라고 하더라도 하부 편의 광주들의 안전에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

다층 주방식 광체에서 추가 채광 과정 중에 발생할 수 있는 붕락이 하부 편의 천반과 광주에 미치는 영향을 AUTODYN으로 수치해석 하였다. 낙반은 채광장 천반의 절반 가량이 붕락하는 경우로 가정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 낙반 충격으로 인한 천반의 최대변위와 응력집중은 광주와의 교차 지점에 나타났으며 그 크기는 각각 0.001 mm, 36 MPa 정도였다.
2. 광주의 변위와 응력집중은 각각 0.0003 mm, 3 MPa 정도로서 천반에 비하여 낮았다.
3. 현재 규격의 천반과 광주의 안전율을 AUTODYN에서 제공하는 식으로 평가한 결과는 0.03 정도로 비교적 안전한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 김원범, 양형식, 김정규, 김승준, 문희숙, 장명환, 김종관, 김동조, 2012, 대규모 생산갱도 굴착에 의한 갱도 안정성 평가 연구, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 75-78.
2. 김종관, 2014, 주방식 채광 석회석 광산의 응력상태와 지보에 관한 연구, 전남대학교 대학원 박사학위논문.
3. 김종관, 양형식, 김원범, 장명환, 하태욱, 2010, 갱내 파쇄 시설 구축을 위한 갱도 안정성 평가, 터널과 지하공간, Vol. 20, No. 3, pp. 145-152.

4. 노명현, 박대효, 2007, 콘크리트 구조물의 고속 충돌 수치 모의실험, 한국콘크리트학회 2007년 가을 학술발표회 논문집, pp. 425-428
5. 류연선, 조현만, 김서현, 2015, 재료모델에 따른 유연 콘크리트 매트릭스의 충돌 거동 평가, 한국해양공학회지, 제29권, 제1호, pp. 70-77.
6. 문희숙, 2013, 수치해석을 이용한 지하 공동 내 단일 필라안 정성 예측, 전남대학교 석사학위논문.
7. 양정훈, 안중량, 김승근, 송영수, 성낙훈, 이연규, 조상호, 2011, 스플릿 록킨슨 압력봉 실험장비를 이용한 암석의 동적 압열인장강도 평가에 관한 연구, 터널과 지하공간, pp. 109-116.
8. 유광호, 손명균, 2013, 터널 주변 폭발로 인해 발생된 버력의 처리시간 예측, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 15(1), pp. 33-47.
9. 장원일, 2008, 임계변형률에 의한 터널의 최적 지보법에 관한 연구, 전남대학교 대학원 박사학위논문.
10. 한국광물자원공사, 2015, 광산재해예방매뉴얼, 22p.
11. ANSYS, 2013, Autodyn User's Subroutines Tutorial, 50p.
12. Hamrin, H., 1980, Guide to Underground Mining Methods and Applications, Atlas Copco.
13. Riedel, W., Thomas, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E., 1999, Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes, 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, Germany, pp. 315-322.
14. Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K., 2009. Numerical Assessment for Impact Strength Measurements in Concrete Materials, International Journal of Impact Engineering, 36, pp. 283-293.
15. Sakurai, S., 1997, Tunnels and deep space lessons learned from field measurements in tunnelling, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.
16. Tawadrous, A., 2010, Hard Rocks Under High Strain-rate Loading, Queen's University



김종관
한국광물자원공사 신사업기획팀 과장

Tel: 033-736-5514
E-mail: jkkim@kores.or.kr



양형식
전남대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr