

수압에 의한 암반의 물성 저하가 갱도의 안정성에 미치는 영향

윤용균^{1)*}, 백영준²⁾, 조영도³⁾

Effect of Degradation of Rock Mass Properties Caused by Water Pressure on the Stability of Mine Gallery

Yongkyun Yoon, Youngjun Baek, Youngdo Jo

Abstract Mine closure does often accompany the flooding of mine galleries due to ceasing a pumping operation. When a mine gallery is flooded, rocks around the gallery are fully saturated and the gallery is subject to a water pressure. The uniaxial unconfined compressive strength of a rock depends on its water content and decreases as the water content increases. A water pressure may originate the crack growth of a rock or the discontinuity growth of rock mass. Although the water in a gallery will give some support pressure inside the gallery, the degradation of rock mass properties caused by a water pressure will reduce the stability of the gallery. In this study, 2-dimensional discontinuous and 3-dimensional continuous numerical analyses have been conducted to evaluate an effect that a reduction of rock mass properties around the gallery induced by a water pressure has on the stability of mine gallery. The numerical analyses show that a reduction of rock mass properties caused by a water pressure increases displacements of rock mass around mine gallery. 2-dimensional model is found to give larger values of displacement than 3-dimensional model.

Key words Mine closure, Mine galleries, Degradation of rock mass properties, Water pressure

초 록 광산이 폐광을 하는 경우 배수시스템을 정지함으로써 인해 갱도는 물로 포화된다. 갱도가 포화되었을 때 갱도 주변의 암석은 완전히 포화되고 갱도 주변 암반에는 수압이 작용한다. 암석의 일축압축강도는 함수율에 따라 달라지며 함수율이 증가함에 따라 감소한다. 수압은 암석 내 균열이나 암반 내 불연속면의 확장을 유발하게 된다. 갱도 내 포화된 수압이 지보압을 발휘할 수도 있지만 지하수에 의해 발생한 암반 물성의 저하는 갱도의 안정성을 감소시킬 것이다. 본 연구에서는 수압에 의해 발생한 갱도 주변 암반의 물성 저하가 갱도의 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2차원 불연속해석과 3차원 연속해석을 실시하였다. 수치해석 결과 수압에 의해 유발된 갱도 주변 암반의 물성 저하는 갱도 주변 암반의 변위 증가에 영향을 미치고, 2차원 해석 결과는 3차원 해석 결과 보다 큰 변위를 나타냈다.

핵심어 폐광, 광산 갱도, 암반물성의 저하, 수압

1. 서 론

2000년대 들어 신흥공업국의 경제 발전에 따른 광물 수요의 급증에 따라 국제적 광물 가격이 지속적으로 상

승하여 해외 광물 자원의 직접 개발뿐만 아니라 국내의 폐광된 광산을 재개발 하려는 시도가 이루어지고 있다.

폐광된 광산의 경우 배수시스템을 유지하지 않음에 따라 지하수면 하부에 존재하는 갱도는 지하수로 포화되어 있을 것으로 예상된다. 갱도가 포화되는 경우 지하수는 갱도 주변 암석의 강도에 영향을 미치게 된다. 암석의 일축압축강도는 포화도에 따라 감소하며 경암(Well indurated strong rocks), 보통암(Cemented medium strength rocks), 점토질연암(Soft argillaceous rocks)의 포화 일축압축강도는 각기 건조 일축압축강도의 80~90%, 60~70%, 30%가 되는 것으로 알려져 있다(Romana and

¹⁾ 세명대학교 소방방재학과 교수

²⁾ 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과

³⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2011년 4월 15일

심사 완료일 : 2011년 4월 22일

게재 확정일 : 2011년 4월 22일

Vásárhelyi, 2007). 지하수는 유효응력을 감소시켜 암석의 전단저항력을 감소시키기도 하고, 불연속면에 미치는 영향으로는 지하수가 윤향 역할을 하거나 불연속면을 개구시켜 전단마찰력을 감소시킨다. 지반 중에 지하수압이 작용하는 경우 지반에 발생하는 응력장에 영향을 미치기도 한다. 지하수압이 증가하는 경우 유효응력이 감소함으로써 인해 유도응력의 발생에 영향을 미치게 되며 특히 수평방향 유효응력이 감소하는 경우 봉압 효과가 줄어들어 갱도의 안정성이 저하되게 된다. 반대로 갱도 주변 암반이 불투성의 경암인 경우 갱도 내 포화된 지하수가 일종의 지보로 작용하여 지하수압에 의한 3축 압축 효과가 나타나 갱도의 안정성이 증진되게 된다(Bekendam and Pöttgens, 1995, International commission on mine closure, 2008).

갱도 주변 암반의 특성에 따라 지하수가 갱도의 안정성에 미치는 영향이 달라지지만 무결암에서 공극수압이 증가하는 경우 균열 성장이 발생하여 암석의 제반 특성이 열화되는 것과 같이 갱도가 포화되어 지하수압이 갱도 주변 암반에 작용하는 경우 암반에 물리적인 손상을 유발하여 배수 이후에도 갱도 주변 암반의 특성은 열화된 상태로 있게 된다. 따라서 지하수로 포화되었다 배수된 갱도의 안정성을 평가하는 경우 지하수압에 의해 열화된 암반의 특성을 고려하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 2008년부터 신규 탐광 시추 및 기존 갱도 배수작업이 진행되고 있는 가곡광산(구 제2연화광업소)의 선곡400갱 지하 240 m 갱도를 대상으로 지하수압에 의한 암반의 열화가 갱도 주변 암반의 변위 증

가에 미치는 영향을 수치해석적으로 평가하고자 하였다. 2차원 불연속해석과 3차원 연속해석을 실시하였으며 2차원 해석에 사용된 프로그램은 UDEC이고 3차원 해석에 사용한 프로그램은 MIDAS GTS이다. 2차원 해석의 경우 갱도가 포화되기 전과 갱도가 포화된 후 지하수압에 의해 암반이 열화된 경우의 2가지를 고려하여 해석하였다. 3차원 해석의 경우 2차원 해석의 경우보다 갱도가 지하수로 포화되어 지보효과를 발휘하는 경우를 추가하여 해석하였다.

2. 지질조건과 갱도망

본 연구의 대상 광산인 가곡광산의 지질구조를 살펴보면 선캄브리아기의 화강편마암을 기저로 하여 하부로부터 양덕통, 대석회암통, 평안계의 지층들이 누층을 이루며 이들을 화강반암 등의 화강암류가 관입한 형태이다. 광산은 접촉교대광상으로 선곡광화대, 월곡광화대, 금곡광화대의 3개 광화대로 구별된다(대한광업진흥공사, 1986).

본 연구에서는 가곡광산의 선곡400갱을 연구대상으로 하였다. 선곡400갱구 부근에서 시추된 코아 분석결과 기저부에서부터 지표까지 셰일이 변성작용을 받아 변한 지층인 묘봉층, 석회암으로 이루어진 풍춘층, 석회암과 슬레이트가 혼합되어 있는 화절층, 마그마의 관입으로 인해 이루어진 화강반암층의 순으로 지층이 형성되어 있는 것으로 나타났다.

선곡400갱은 해수면을 기준으로 0 m가 주요수평갱

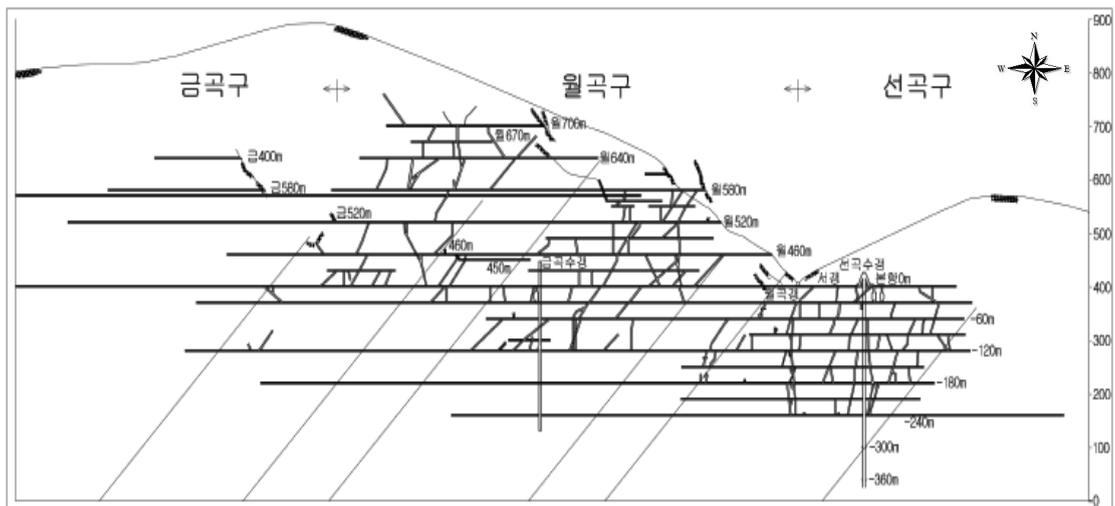


그림 1. 가곡광산 갱도도

도(Adit)이고, 하부로 30 m간격으로 운반갱도가 굴착되어 있으며 지하 240 m까지 작업갱도로 이용되었다. 수갱은 0레벨에서 지하 370 m까지 관통된 상태이고, 현재 지하 240 m 운반갱도에 자동센서방식의 수증펌프 2대를 설치하여 배수를 하고 있다. 그림 1에는 갱내도가 표시되어 있다.

3. 입력정수와 요소망

본 연구에서는 선곡400갱 지하 240 m 운반갱도를 해석 대상으로 하였다. 해석대상 갱도는 석회암 지역에 존재하며 석회암 암석 시험편과 절리시험편에 대한 물성으로는 한국지질자원연구원에서 선곡갱 주변에서 시추한 석회암시험편에 대해 실시한 실험 결과를 사용하였다(한국지질자원연구원, 2009, 정용복 외, 2010). 2차원 불연속해석에 적용된 입력정수가 표 1에 표시되어 있다. 표 1에서 암석의 마찰각과 점착력은 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식에 사용되는 변수들(m_b, s, a)을 사용하여 구한 등가 Mohr-Coulomb변수이다(Hoek et al., 2002). Hoek-Brown 파괴조건식 변수들을 계산할 때 사용된 GSI값은 선곡400갱 주요수평갱도에서 측정된 평균 GSI값인 70을 사용하였다.

갱도가 지하수로 포화되어 갱도 주변 암반에 지하수압이 작용하는 경우 수압으로 인해 암석의 물성 변화가 발생할 것으로 예상할 수 있다. 백영준(2011)의 연구에 따르면 현지암반과 유사한 특성을 갖는 실내 시험편에 1주일간 수압을 가한 후 물성을 측정된 결과 탄성계수의 경우 평균적으로 25.1%의 감소가 발생했으며, 탄성계수와 일축압축강도를 동시에 고려한 경우 약 16.5%

의 감소율이 나타났다. 표 1에 있는 Case I은 갱도가 지하수로 포화되기 전의 상태를 해석하기 위하여 사용된 물성이 지하되기 전의 물성이고, Case II는 갱도가 지하수로 포화된 후, 배수한 수에 수압에 따른 물성 저하를 고려한 값이다. 수압에 의해 암반의 물성이 저하하는 것을 고려하는 경우 암석의 탄성계수는 25.1%를 감소시켰고, 암석의 점착력과 마찰각, 절리의 JCS, 마찰각, 점착력, 수직강성과 전단강성은 16.5% 감소시켰다. 표 2에는 선곡400갱 주요수평갱도에서 측정된 주요 절리군에 대한 자료가 표시되어 있다.

그림 2에는 해석대상인 선곡400갱 지하 240 m 운반갱도에 대한 해석 단면도가 표시되어 있다. 그림 2에 제시된 축압계수는 선곡갱 주변에서 수압파쇄법을 이용하여 측정된 결과를 인용한 것이다(한국지질자원연구원, 2009a). 해석 대상 갱도는 크기가 2.1×2.1 m인 마제형 갱도로서 그림 2에 제시된 해석단면 전 지역을 모델링 하는 경우 갱도의 크기에 비해 해석 영역이 너무 큰 관계로 갱도를 중심으로 폭 60 m, 높이 40 m 부분만을 모델링 하였다. 그림 3에는 모델링 지역에 대한 2차원 불연속해석을 위한 요소망이 표시되어 있다.

표 2. 절리군 특성(한국지질자원연구원, 2009b)

절리의 기하학적 특성	절리군	
	Set 1	Set 2
주향	N66E	N82W
경사	36NW	44SW
간격(m)	0.8	0.8

표 1. 2차원 불연속해석을 위한 입력 정수

물성		Case I	Case II
암석	밀도(kg/m ³)	2,730	2,730
	탄성계수(GPa)	50.6	37.9
	포아송비	0.2	0.2
	마찰각(°)	41.12	34.36
	점착력(MPa)	13.71	11.45
	인장강도(MPa)	1.046	1.046
절리	JRC	7	7
	JCS(MPa)	39	32.58
	마찰각(°)	35.60	29.74
	점착력(MPa)	0.05	0.04
	수직강성(GPa/m)	6.24	5.21
	전단강성(GPa/m)	6.77	5.65

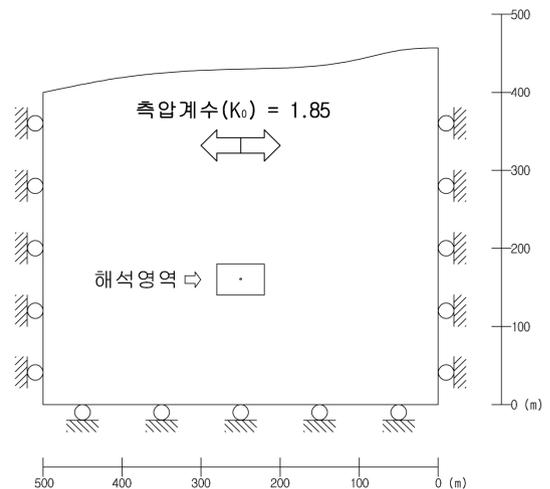


그림 2. 해석대상 지역의 단면도

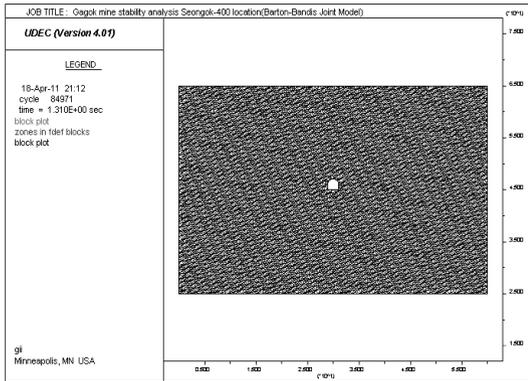


그림 3. 2차원 불연속해석 요소망

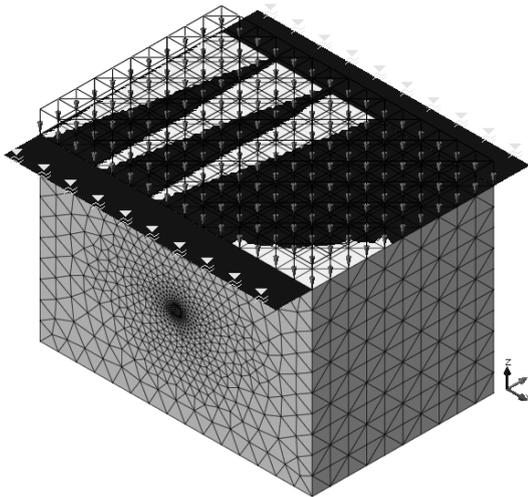


그림 4. 3차원 연속해석 요소망

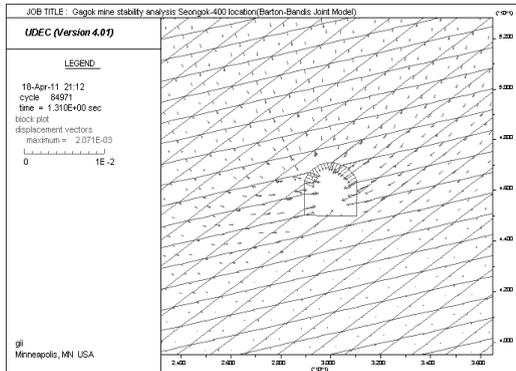
3차원 연속해석에 사용된 입력자료는 2차원 불연속 해석 입력자료 중 암석에 대한 입력자료와 동일하다. 갱도를 중심으로 한 모델링 구역은 2차원 불연속해석에서와 동일하게 폭 60 m, 높이 40 m로 하였으며 갱도 방향으로의 길이는 40 m로 하였다. 그림 4에는 3차원 연속해석을 위한 요소망이 표시되어 있다. 그림 4에서 상부 표면에 표시된 화살표는 지표에서부터 모델링 구역 상부에 이르는 부분의 자중에 의한 수직응력이 모델링 구역에 작용하는 것을 나타낸다.

4. 해석 결과 및 고찰

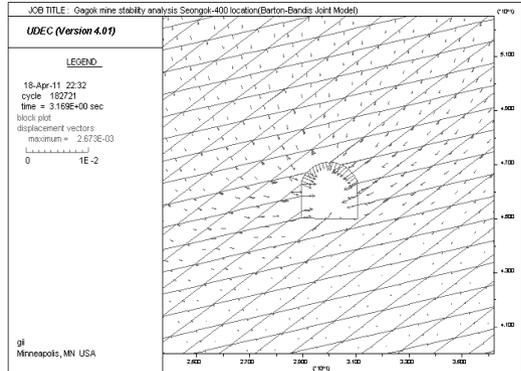
4.1 2차원 불연속해석

절리의 변형 거동 해석에는 Mohr-Coulomb 모델과 Barton-Bandis 모델이 자주 사용되고 있다. Barton-Bandis 모델은 비선형적인 수직 및 전단 변형 거동을 모사할 수 있고 크기효과 및 절리 변형에 따른 팽창각의 변화를 고려할 수 있다는 점에서 Mohr-Coulomb 모델 보다 좀 더 현실적인 해석 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다(최성웅과 정소걸, 1999, 이성규와 김치환, 2001). 따라서 본 연구에서는 절리 변형 거동 해석에 Barton-Bandis 모델을 사용하였다.

그림 5에는 해석 갱도 주변 암반의 변형에 따른 변위 벡터가 표시되어 있다. 그림 5(a)는 갱도가 지하수로 포화되기 전이라 물성 저하가 없는 경우(Case I)를 나타내고, 그림 5(b)는 갱도가 지하수로 포화되어 발생한 지하수압이 갱도 주변 암반에 영향을 미쳐 물성이 저하된 경우(Case II)의 변위 분포를 나타낸다. 그림 5(a)를 보면 Case I에서의 최대 변위는 2.07 mm로 갱도 우측부에 있는 블록에서 발생한 것으로 나타났다. Case II에서

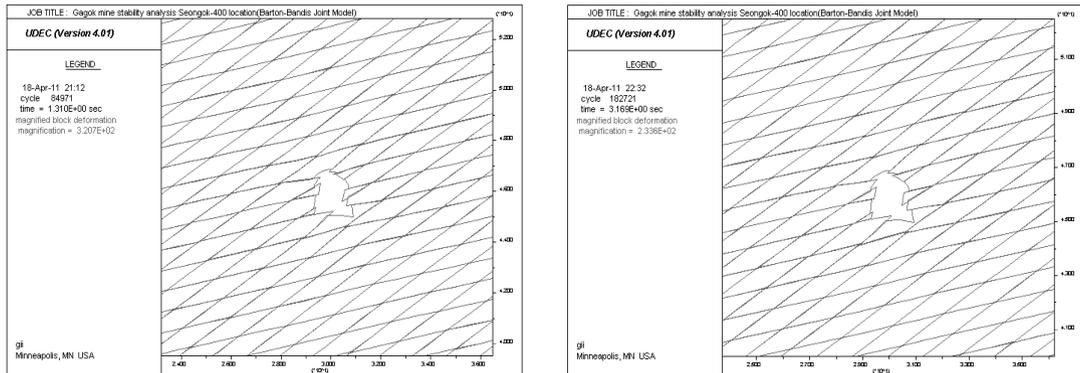


(a) Case I



(b) Case II

그림 5. 2차원 불연속해석에 따른 변위 벡터 분포



(a) Case I(변형 확대 배율 : 3.207×10^2)

(b) Case II(변형 확대 배율 : 2.336×10^2)

그림 6. 2차원 불연속해석에 따른 갱도 변형 양상

표 3. 갱도 주변에서의 2차원 불연속해석 결과

위치	변위 발생량(mm)	
	Case I	Case II
천반	1.03	1.40
바닥	0.958	1.16
좌측벽	1.73	2.08
우측벽	2.07	2.67

의 최대 변위는 2.67 mm로 Case I의 경우 보다 약 29.1% 정도 변형이 증가한 것으로 해석되었다. 그림 6에는 갱도의 변형 양상을 시각적으로 보기 쉽게 하기 위하여 갱도의 변형 상태를 확대하여 표시한 것이다. 그림 6을 보면 갱도 우측 벽과 바닥부의 모서리 부분에서 최대 변형이 발생한 것을 알 수 있다. 표 3에는 Case I과 Case II에 대해 갱도의 천반, 바닥, 우측벽, 좌측벽에 발생한 변위가 표시되어 있다. 천반과 바닥에서 보다는 벽면에서의 변위가 크게 발생한 것으로 나타나는데 이는 측압계수가 1.85라는 사실과 관련이 있다. Case I과 비교하여 Case II에서의 변위 발생 증가량을 살펴보면 천반, 바닥, 좌측벽, 우측벽에서 각각 35.7, 21.4, 20.1, 29.1% 증가한 것으로 나타나고 평균적으로 26.6% 증가한 것으로 평가된다. Case II의 입력자료를 계산하기 위하여 탄성계수의 경우 25.1%, 그 밖의 물성의 경우에는 16.5%를 감소시킨 점과 물성 저하에 따른 변위 증가 정도를 비교하면 물성 감소 비율 보다 물성 저하에 따른 변위 증가율이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

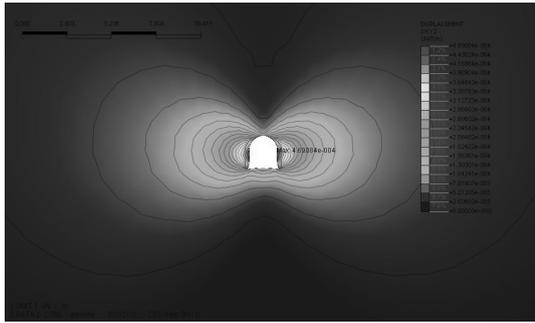
4.2 3차원 연속해석

불연속해석과 연속해석의 차이를 평가하기 위하여 3

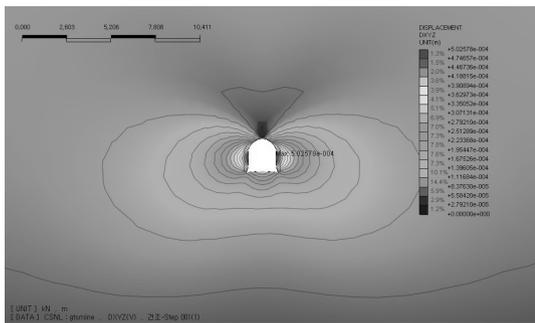
차원 연속해석프로그램인 MIDAS GTS를 사용하였다. 암반의 파괴조건으로는 2차원 불연속해석에서와 같이 Mohr-Coulomb 소성 모델을 적용하였다. 2차원 해석에서와 같이 물성이 저하되기 전(Case I)과 물성이 저하된 후(Case II)를 모델로 구성하여 해석하였으며, 추가적으로 갱도가 지하수로 포화된 후 포화된 지하수가 지보효과를 발휘하는 상황을 모사하는 모델(Case III)을 해석하였다. Case III의 경우 지하수면이 지표와 같다고 가정하여 하여 지반에는 유효응력이 작용하고 갱도 벽면에는 갱도 심도에 해당하는 정수압이 압축응력으로 작용하는 것으로 하여 해석을 실시하였다.

그림 7에는 각 모델에 대한 변위 분포와 갱도 변형 양상이 표시되어 있다. Case I에서 발생한 최대 변위량은 0.469 mm, Case II에서 발생한 최대 변위량은 0.503 mm, Case III에 발생한 최대 변위량은 0.409 mm로 수압에 의해 물성이 저하된 경우 그렇지 않은 경우 보다 변위량이 7.3% 증가하는 것으로 나타났다. Case III의 경우 Case I에서 보다 변위량이 12.7% 감소하여 갱도 주변 암반이 경암인 경우에 갱도가 지하수로 차있다면 지하수에 의한 지보효과로 인해 일시적으로 안정성이 증가할 것으로 예상할 수 있다.

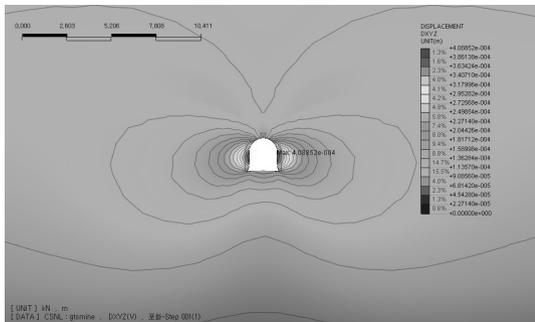
표 4에는 3차원 해석에서 고려한 각 경우에 대해 갱도 주변에 발생한 변위량이 표시되어 있다. 2차원 불연속해석에서는 Case II에서 발생하는 변위량이 Case I에서 발생하는 변위량 보다 모든 지점에서 증가하는 것으로 나타났지만 3차원 연속해석에서는 Case II에서의 천반 변위가 Case I에 비해 오히려 감소하는 것으로 평가되었다. 물성이 저하됨으로 인해 발생하는 변위 증가량을 측벽에 발생한 변위만을 가지고 비교하면 2차원 해석의 경우에는 평균 24.6% 증가하는 것으로 나타났지



(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III

그림 7. 3차원 연속해석에 따른 변위 분포 및 갱도 변형 양상

만 3차원 연속해석의 경우에는 단지 7.1% 증가하는 것으로 나타났다.

표 5에는 Case II의 경우에 대한 2차원 불연속해석 결과와 3차원 연속해석 결과가 표시되어 있다. 천반을 제외한 바닥, 우측벽, 좌측벽에 대한 결과를 비교해 보면 2차원 해석의 경우가 3차원 해석의 경우 보다 변위 발생이 4~5 배 정도 큰 것으로 나타났다. 실제 지하수로 포화되었다가 배수된 갱도에서 붕락이 발생하는 경우 지하수압에 의해 절리의 제반 조건이 변화됨으로 인해 전단마찰력이 감소하여 절리 교차 블록이 낙반할 가

표 4. 갱도 주변에서의 3차원 연속해석 결과

위치	변위 발생량(mm)		
	Case I	Case II	Case III
천반	0.115	0.024	0.065
바닥	0.203	0.334	0.225
좌측벽	0.467	0.500	0.407
우측벽	0.467	0.500	0.407

표 5. Case II의 경우에 대한 2차원 불연속해석과 3차원 연속해석의 비교

위치	변위 발생량(mm)	
	2차원 불연속해석	3차원 불연속해석
천반	1.40	0.024
바닥	1.16	0.334
좌측벽	2.08	0.500
우측벽	2.67	0.500

능성이 높기 때문에 연속해석 보다는 불연속해석을 실시하는 것이 타당하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 갱도가 지하수로 가득 차 수압을 받고 있을 것으로 예상되는 폐광된 갱도를 재개발할 경우 수압에 의해 열화된 암반의 물성이 갱도의 안정성에 미치는 영향을 수치해석을 이용하여 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 2차원 불연속해석 결과 물성 저하에 따른 갱도 주변에서의 변위 증가율은 평균적으로 26.6%로 나타나 입력자료 산정 시 적용한 물성 감소 비율 보다 물성 저하에 따른 변위 증가율이 매우 큰 것으로 나타났다.
- 3차원 연속해석 결과 갱도 주변 내에 발생한 최대 변위 발생량은 물성 저하를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우 보다 7.3% 증가하는 것으로 나타났고, 갱도 내 포화된 지하수의 지보효과를 고려한 모델의 경우 발생한 최대변위가 12.7% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지하수압에 의한 물성 변화가 갱도의 안정성 저하에 영향을 미친다는 것을 나타내고, 반대로 갱도 주변 암반이 불투성의 경암인 경우 갱도 내 가득 찬 지하수가 일종의 지보 효과를 발휘하여 일시적으로 갱도의 안정성을 향상시킬 수도 있음을 보여준다.

3. 천반을 제외한 바닥, 측벽에서 계산된 변위량을 2차원 불연속해석과 3차원 연속해석에 대해서 비교해 보면 2차원 해석의 경우가 4~5 배 정도 큰 것으로 나타났다. 수압에 의한 물성 저하에 따른 변위 발생 증가율도 2차원 불연속해석의 경우가 더 크고 실제 지하수로 포화되었다가 배수된 갱도에서 붕락이 발생하는 경우 절리 교차 블록의 낙반에 따른 붕락이 발생할 가능성이 높기 때문에 연속해석 보다는 불연속해석을 실시하는 것이 타당하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호 : 2008RRD11P0330202009)로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한광업진흥공사, 1986, 제2연화 광산 매장량 조사 보고서, 대한광업진흥공사, pp. 2-3.
2. 백영준, 2011, 지하수가 갱도의 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구, 세명대학교 석사학위논문, 74p.
3. 이성규, 김치환, 2001, 개별요소법을 이용한 터널 안정성

해석에 있어 Barton-Bandis 절리 모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 비교, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 11.2, pp. 167-173.

4. 정용복, 선우춘, 박찬, 이병주, 천대성, 이동길, 조영도, 2010, 폐광산 재개발을 위한 암반공학적 광산 안정성 평가, 2010 한국암반공학회 추계학술발표회발표집, pp. 129-132.
5. 최성웅, 정소걸, 1999, Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 9.2, pp. 141-148.
6. 한국지질자원연구원, 2009a, 스카르/반암형 광상의 최적 설계기법 및 친환경 자원개발 기술 개발, 1차년도 보고서, pp. 4.
7. 한국지질자원연구원, 2009b, 가곡광산 암반조사를 위한 시추공사 및 지반조사, 한국지질자원연구원, pp. 9-10.
8. Bekendam, R.F. and J.J. Pöttgens, 1995, Ground movements over the coal mines of southern Limburg, The Netherlands, and their relation to rising mine waters, Pro. 5th Int. Sympto. on Land Subsidence, pp. 3-12.
9. Hoek, E., C. Carranza-Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, pp. 267-273.
10. International commission on mine closure, 2008, Mine closure and post-mining management-International state-of-the-art, ISRM, pp. 86-87.
11. Romana, M. and B. Vásárhelyi, 2007, A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples, 11th ISRM Congress on Rock Mechanics, pp. 139-142.



윤용균

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 043-649-1318
 E-mail: yoon63@semyung.ac.kr
 현재 세명대학교 소방방재학과 교수



백영준

2009년 세명대학교 자원환경공학과 공학사
 2011년 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과 공학석사
 Tel: 010-4316-2510
 E-mail: junni0@naver.com
 현재 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과



조영도

1977년 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1982년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2007년 광운대학교 화학공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3223
 E-mail: jyd@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구실 책임연구원