

석탄 채굴공동 상부 터널의 안정성 분석

Stability analysis of a tunnel above mined cavities

송원경*¹, 정소결*², 한공창*³

Song, Won-Kyong · Chung, So-Keul · Han, Kong-Chang

Abstract

This research has been conducted to investigate the influence of mined cavities on a tunnel to be constructed around a coal mine. The location and dimension of cavities were supposed by analysing synthetically geological structures and condition of coal beds as well as gangway map since there does not exist any map describing mined cavities. Detailed geological and geophysical survey have also been carried out for the purpose of understanding the geological structure and rock mass conditions. The two dimensional numerical analysis with FLAC has been performed on the geological sections reconstituted from the obtained information and the affects of mined cavities on the tunnel have been assessed.

Keywords: Mined cavity, geological characterization, numerical analysis

요 지

본 연구는 석탄광 주변에 건설되는 터널이 채굴공동의 붕락으로 인한 지반침하에 의한 영향을 조사할 목적으로 수행되었다. 채굴적이 표시된 도면이 존재하지 않기 때문에 탄광이 보유하고 있는 갱내도와 함께 지층구조, 탄층의 부존상황을 종합적으로 판단하여 그 위치와 규모를 추정하였다. 또한 정밀 지표지질조사와 지표 전기비저항탐사를 통하여 지층구조 및 암반상태를 파악하였다. 이러한 조사 자료를 바탕으로 터널단면에 따른 지반구조를 구성하였으며 이들 단면에 대한 2차원 수치해석을 실시하여 채굴공동이 터널에 미치는 영향을 분석하였다.

주요어: 석탄 채굴공동, 터널, 지반조사, 수치해석

1. 서론

본 연구는 현재 가행중인 한 석탄광산 지역에 건설될 예정인 신리재 터널이 채굴공동의 붕락에 의한 지반침하로부터 어떤 영향을 받을 것인가를 조사할 목적으로 수행되었다. 신리재 터널은 지방도 427호선 (황지-근

덕) 중 태백시 연화동 (통리)에서 삼척시 도계읍 신리를 연결하는 터널로서 연장은 915m이다.

석탄광의 채굴적은 대부분 도면상에 표시된 기록을 찾을 수 없기 때문에 그 위치와 규모를 정확히 파악할 수 없다. 이럴 경우 채굴공동은 탄광이 보유하고 있는 갱내도와 함께 지층구조, 탄층의 부존상황을 종합적으로 판

*1 한국지질자원연구원, 탐사개발연구원 선임연구원

*2 한국지질자원연구원, 탐사개발연구원 책임연구원

*3 한국지질자원연구원, 탐사개발연구원 책임연구원

단하여 추정할 수밖에 없다. 이러한 작업은 터널의 안정성을 검토하는데 결정적 역할을 하게 되므로 석탄광에 대한 풍부한 경험과 통찰력을 필요로 한다.

본 연구에서는 정밀 지표지질조사와 지표 전기비저항 탐사를 통하여 지층구조 및 암반상태를 파악하였으며 각종 갱도 도면을 분석하여 가능한 채굴적의 범위를 추정하였다. 이러한 조사 자료를 바탕으로 터널단면에 따른 지반구조를 구성하였으며 이들 단면에 대한 2차원 수치 해석을 실시하여 채굴공동이 터널에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지질 및 채굴적 현황

2.1 터널 개요

신리재 터널은 강원도 태백시 연화동 (통리)에서 삼척시 도계읍 신리를 연결하는 연장 7.5km 도로 구간 중 일부이다. 터널의 길이는 915m이고 왕복 2차선으로 건설될 예정이다(그림 1). 터널이 지나는 지역은 현재 ○○탄광이 가행중인 곳으로서 과거 수십 년간 석탄을 채굴하면서 생긴 공동이 지하에 광범위하게 분포하기 때문에 지반침하로 인한 터널의 안정성이 문제시된다.

2.2 지질

그림 2는 지표 지질조사와 시추자료, 탄광에서 작성한

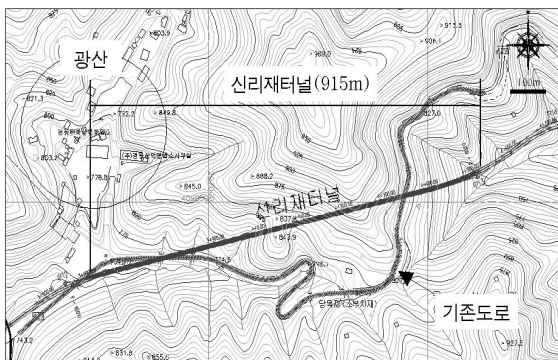


그림 1. 신리재터널 노선도

지질단면도 및 과거 지질자료 (임순복 외, 1993) 등을 종합하여 작성한 지질단면도이다. 지층은 화강편마암, 응회암, 역암류 등으로 구성되어 있으며 그림에서 보는 바와 같이 다수의 단층운동에 의해 복잡한 지질구조를 갖고 있다.

2.3 채굴적 현황

○○탄광은 수직고를 50m로 하는 중단봉락식 채탄법을 적용하고 있다. 탄층경사가 25-30도로서 완만하고 탄폭이 4-5m 이하로 좁은 곳에서는 연층중단 봉락법을 채택하고 있다. 이 구역에서의 봉락고는 25m이다.

신리재 터널 하부에 존재하는 갱도들의 분포는 그림 3과 같다. 도면상에 나타난 갱도들은 운반갱도들이 이것이 바로 채굴적을 의미하지는 않는다. 실제 채굴작업은 이들 갱도 주위에서 이루어지나 대부분 이에 대한 도면이 존재하지 않기 때문에 채굴공동의 정확한 위치와 규모를 파악하기란 사실상 불가능하다. 따라서 탄층부존 상황, 채탄방법 그리고 광산 종사자의 증언을 종합하여 채굴적의 규모를 추정하는 수밖에 없다.

그림 4는 이와 같은 식으로 재구성한 터널 단면상의 지반 구조를 보여주는 한 예로서 그림 3의 BB' 단면을

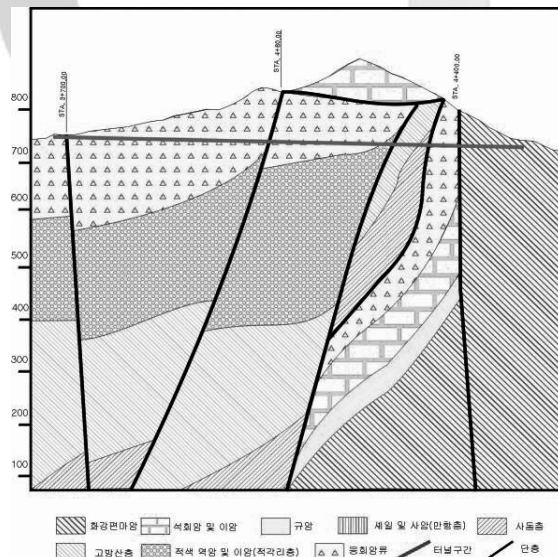


그림 2. 지질 단면도

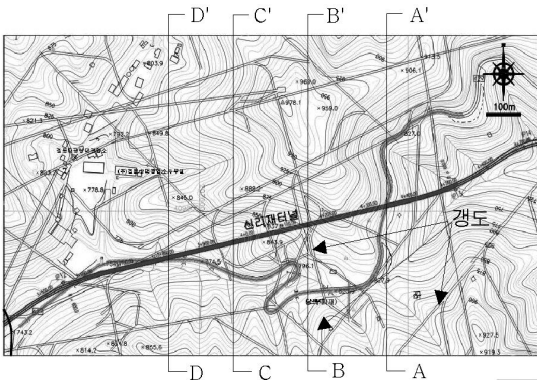


그림 3. 터널 주변 채탄갱도 분포

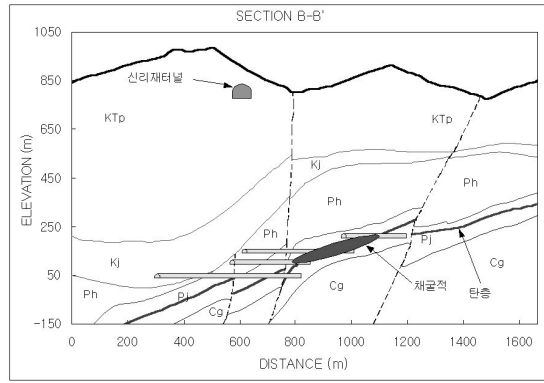


그림 4. 갱도와 채굴적 분포 예(B-B' 단면)

따라 추정된 터널 하부 갱도와 채굴적 분포이다. 그림에서 터널과 채굴적의 크기는 알아보기 쉽도록 하기 위해 과장해서 나타내었다. 채굴적 높이는 평균 5m이며 최대 20m를 넘지 않을 것으로 추정된다.

탄층은 북쪽에서 남쪽으로 경사져서 부존하고 있고 터널 직하부로부터 약간 오른쪽 즉 북쪽으로 치우친 곳에 집중적으로 채굴작업이 이루어졌다. 채굴적은 지하수면을 기준으로 약 50m에서 200m 사이에 분포하고 있다. 터널 바닥의 수준이 약 730m이므로 채굴적은 터널로부터 약 530m-680m 아래에 존재한다. 채굴적은 터널 시점 쪽보다는 종점 쪽이 약간 더 깊은 심도에 위치하고 있다.

이와 같이 채굴적 도면상에서 일차적으로 판단해 볼 때 신리재 터널은 채굴적의 경사진 방향에 위치해 있으므로 침하 영향권에 속해 있으나, 채굴 높이가 5m 내외이고 심도가 매우 깊기 때문에 지반침하의 영향은 희박한 것으로 판단된다.

3.지반 평가

3.1 시추

터널구간의 지반분포 상태와 각 지층의 지반공학적 특성, 기반암의 분포상태, 풍화도등을 파악하기 위하여 터널을 따라 9개소(TB1-TB9)를 선정하여 시추를 실시하

였다. 이중 TB7을 제외한 8개의 시추공들은 두 공을 한 쌍으로 터널 좌우 약 20m의 거리를 두고 시추를 하였다. 시추는 터널 바닥으로부터 1D에서 5D까지 실시하였으며 심도는 지표로부터 최대 156.5m, 최소 14.3m이다.

시추코아로부터 기반암의 풍화정도에 따라 심도별로 분류한 결과 지층분포는 그림 5와 같다. 지층은 복잡한 지질구조와 마찬가지로 규칙성을 보이지 않고 있으나 터널이 지나는 심도에서의 암반은 대체로 보통암으로 분류된다. 터널 종점부에서는 그림 2의 지질 단면도에서 나타나는 단층의 영향을 받아 파쇄대가 발달하여 다른 구간보다 연약한 암반층을 형성하고 있음을 볼 수 있다.

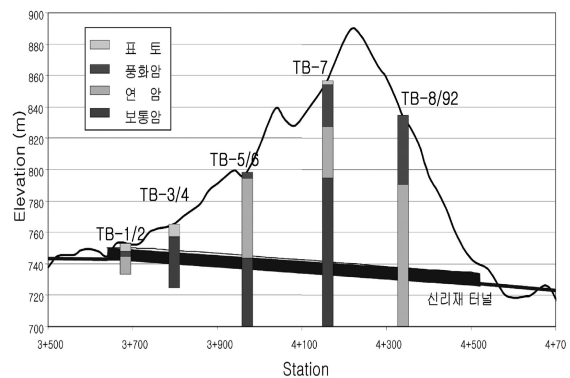


그림 5. 시추조사에 의한 심도별 지층분포

3.2 지표 전기비저항 탐사

지표 전기비저항 탐사는 신리재 터널 노선을 따라 실시하였으며, 신리재 터널 하부 지반의 연약대 발달 상황을 파악하기 위하여 수행되었다. 측선은 터널 노선을 따라 STA 3+520에서 STA 4+720까지 1.2 km 구간이며 40m 간격으로 측점을 설정하였다. 이러한 배열로부터 터널 노선 하부의 심도 약 200m 까지 지반정보 획득이 가능하다.

탐사결과는 그림 6과 같으며 지질조사 결과와 대비하기 위하여 지질단면도를 아래에 표현하였다. 그림에서 비저항값의 크기에 따라 저비저항대와 고비저항대를 보이는 구간을 구분하여 각각 A, C 그리고 B, D로 표시하였다. 고비저항대 B를 중심으로 좌우에 저비저항대가 광범위하게 출현하고 있음을 볼 수 있다(A, C). C로 표시된 저비저항대는 그 폭이 상당히 넓고 심부까지 연장되어 발달하고 있을 것으로 판단된다.

탐사결과를 지질 단면과 비교해 보면 B 구간의 지층은 지각 작용을 크게 받지 않은 단순한 구조를 갖고 있는데 반해 C 구간은 단층이 지나는 구간과 일치한다. 이들 결과로부터 A와 C는 연약대 혹은 파쇄대 구간임을 알 수 있다. 따라서 A와 C 구간 굴착 시에는 천반 붕락과 같은 사고를 방지할 수 있는 적절한 조치가 요구된다.

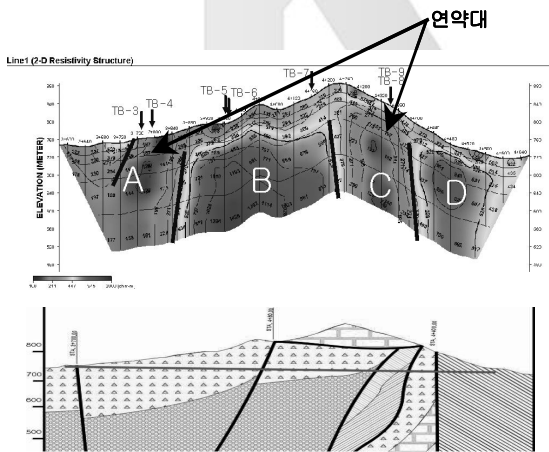


그림 6. 지표 전기비저항 탐사와 지질단면도상에 나타나는 암반 연약대

3.3 RMR 분류

신리재 터널구간내에 9개의 시추공에서 회수된 암석 코어를 중심으로 현지조사를 참조하여 RMR에 의한 암반평가를 실시하였으며 대표적으로 TB-8에 대한 결과를 표 1에 수록하였다. TB-8번공은 그림 6의 연약대 구간에 위치하는 시추공이다.

시추공 TB-8에서의 RMR값은 심도 20-100m의 암반에서는 20-30의 값을 가지므로 불량한 암반인 것으로 나타났다. 100m 이하의 암반 역시 불량한 것으로 나타났는데 이 구간의 RNR은 30-40이다. 터널심도에 서도 30전후의 값을 가지므로 불량한 암반에 속한다. TB-8의 평균 RMR은 30으로서 이 구간에 파쇄대가 발달해 있음을 대변해준다.

표 1. TB-8 시추공의 RMR

심도	압축강도	RQD	간격	지하수	불연속면상태	RMR
1.5-3.0	2	7	8	15	13	41
-5.8	7	62	8	15	18	60
-9.8	7	80	8	15	20	66
-13.8	7	79	8	15	18	64
-17.8	7	79	8	10	20	61
-21.8	7	92	8	7	20	60
-25.8	7	76	8	7	18	55
-28.8	7	60	8	7	15	49
-32.0	7	52	8	7	13	45
-35.8	7	49	8	7	13	45
-39.0	7	73	8	7	17	54
-41.5	7	39	8	7	15	45
-43.9	7	93	8	7	19	60
-47.2	4	21	5	7	10	29
-51.6	4	40	5	7	11	35
-55.3	4	48	8	7	11	40
-59.0	4	46	8	7	11	39
-63.2	4	60	8	7	13	44
-67.6	4	27	5	7	11	31
-71.3	4	33	8	7	13	38
-75.5	7	68	8	7	13	49
-79.5	4	37	8	7	15	41
-83.0	4	10	5	7	10	29
-87.1	4	18	5	7	8	27
-91.9	4	11	5	7	10	29
-96.4	4	8	5	7	8	27
-99.8	4	21	5	7	13	35

주) □ 는 터널 심도

3.4 터널 전구간의 RMR 추산

TB-8번공을 기준으로 표 1에 나타난 RMR값과 그림 7에 해당하는 전기비저항값을 그래프로 나타내면 그림 7과 같다. 이로부터 RMR과 전기비저항값(ρ)과의 상관관계를 구하면 다음과 같다.

$$RMR = 0.0339\rho + 19.25$$

위 식에 터널이 지나는 심도에서의 전기비저항값을 대입하여 터널 전 구간에 대한 RMR을 환산하였으며 그 결과는 그림 8과 같다. RMR은 20-60 사이의 값을 갖는데 전반적으로 20-40 사이의 낮은 수준을 보이고 있다. 전기비저항 분포와 비교해보면 비저항값이 높은 곳

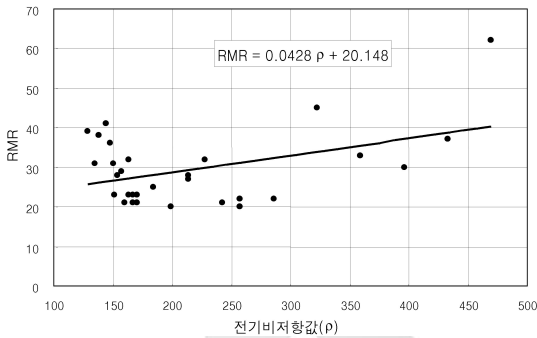


그림 7. 전기비저항값과 시추공 RMR과의 상관관계

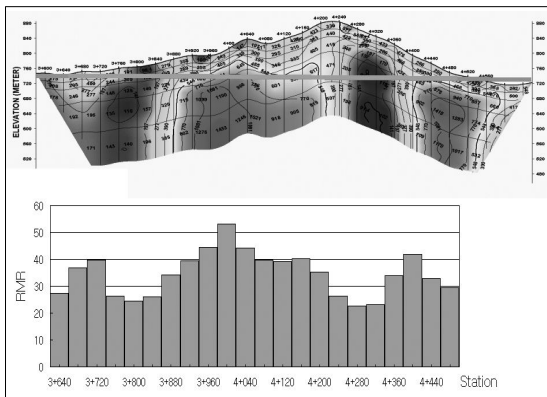


그림 8. 전기비저항값과 시추공 RMR 관계식으로부터 환산한 터널 전구간 RMR

에서는 RMR도 높고, 반대로 비저항값이 낮으면 RMR도 낮게 나타나 서로 비례 관계에 있음을 볼 수 있다. 결국 파쇄대와 RMR값은 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

4. 터널 안전성 수치해석

4.1 모델 설정

신리재 터널 노선의 구간별 암반상태 변화 및 하부 채굴적 존재에 따른 굴착 터널의 역학적 안정성 평가를 위하여 FLAC을 이용한 수치해석을 실시하였다.

해석대상구간은 신리재 터널 전체 노선상에서 RMR 암반평가 및 지표 전기비저항 탐사 자료(그림 8 참조)를 검토하여 암질이 서로 다르고 지형상 터널 심도에 차이가 있는 구간을 선정하였다(표 2). 해석대상구간은 RMR을 기준으로 암질 변화가 있는 3개 구간과 터널심도에 차이가 있는 1개 구간이다. 표에서 단면의 위치는 그림 3에

표 2. 수치해석 구간

단면	Station	RMR등급	터널심도 m
A-A'	STA 4K+340	5	100
B-B'	STA 4K+140	4	110
C-C'	STA 3K+960	3	60
D-D'	STA 3K+800	5	25

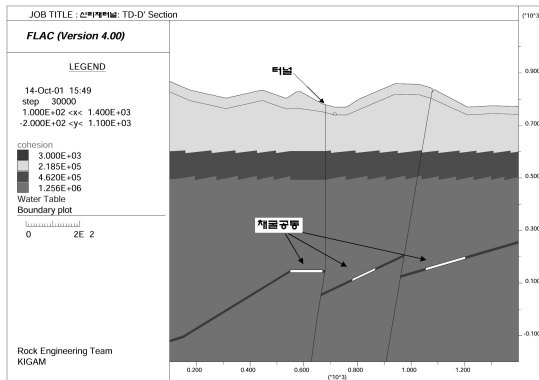


그림 9. 대표적 수치해석 모델의 구조(D-D' 단면)

표 3. 수치해석 입력자료

지층	풍화암	연암	보통암	경암	석탄층
물성					
RMR	25	40	50	60	-
단위중량 (kg/m ³)	2300	2500	2600	2650	1500
영률 (GPa)	2.371	5.623	10	17.783	0.01
포아송비	0.25	0.23	0.23	0.22	0.3
점착력 (MPa)	0.219	0.462	0.762	1.256	0.003
내부마찰각 (도)	20	25	30	35	20
인장강도 (MPa)	0.11	0.231	0.381	0.628	0.0015

표시되어 있다.

선정된 4개 구간에 대해 터널 축방향에 직각인 수직단면을 2차원 FLAC 해석단면으로 모델링하였다. 해석모델의 전체 영역은 폭이 약 1500m, 높이가 약 1300m이다. 그림 9는 D-D' 단면에 대한 해석모델로서 채굴적과 터널이 분포하고 있는 모습을 보여준다.

지반층서는 지표로부터 풍화암층, 연암층, 보통암층, 경암층(기반암층)으로 구분하고, 모델 중앙부의 수직에 가까운 경계선은 단층대, 하부의 완경사 맥은 탄층, 지표 30-60m 하부의 등고선과 나란한 선은 지하수면을 표시한다. 굴착 터널 및 하부 채굴적은 null 요소로 취급하였다.

4.2 입력 물성

RMR값 및 전기비저항 값으로부터 대상구간별 심도에 따른 암질등급을 구분하고 각 암질에 해당하는 입력 물성을 추정하였다. 시추코아에 대한 실험실 암석물성 시험결과를 기본 자료로 하고 RMR에 따른 암반물성 경험식 (Serafim and Pereira, 1983, Trueman, 1988)을 이용하여 각 지층의 물성을 산정하였으며 결정된 입력값을 표 3에 정리하였다. 초기지압 조건은 현장 수압과쇄시험으로부터 얻은 값인 $K=1$ 을 적용하였다. 석탄층 물성은 기존 보고서 (석탄합리화사업단, 2000)를 참조하였다.

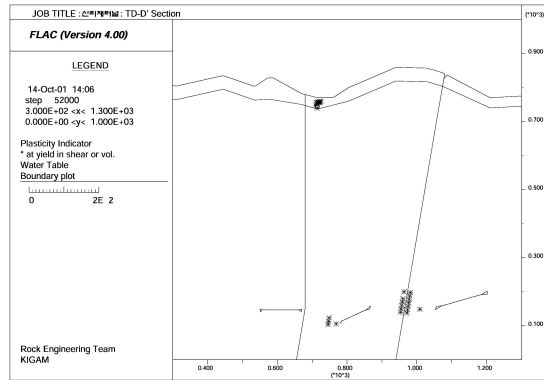


그림 10. 채굴공동과 터널 주변에 발생하는 소성영역 (*로 표시된 곳) 분포(D-D' 단면의 경우)

4.3 해석 결과

그림 10은 4개의 해석 단면중 D-D' 단면에 대한 수치해석 결과로서 채굴적 형성 후에 나타나는 채굴적 및 상부 터널 주변에 발생하는 소성영역을 보여준다. 하부 채굴적 및 인접한 곳에서 국부적인 인장과괴와 전단소성영역이 나타나지만 이것이 상부까지 연속되지는 않는 것으로 나타났다.

한편, 터널 주변에서도 소성영역이 발견되고 있는데 이는 암반상태가 불량한 상태에서 지보보강을 하지 않은 때문이다. 그렇지만 이러한 무지보에 따른 굴착 영향은 터널 상부의 지표 방향으로만 미칠 뿐, 터널 하부로는 영향대가 심부까지 연장되지는 않는다. 이로부터 터널과 하부 채굴적에서 유발되는 지반의 불안정성은 서로 독립적임을 알 수 있다.

모든 단면에 대한 수치해석 결과를 종합해볼 때 신리채 터널 하부에 존재하는 채굴적은 터널의 안정성에 영향을 미치지 않을 것임을 알 수 있었다. 이는 채굴적이 터널 바닥으로부터 500m 이상 하부에 존재하여 공동붕락의 영향권에서 벗어나 있기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

신리채터널이 하부에 존재하는 석탄 채굴공동에 의한 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

이 지역은 여러 번의 단층과 습곡작용을 받아 매우 복잡한 지질구조를 갖고 있다. 지표 전기비저항 탐사 결과 STA 3+760-3+880 구간과 STA 4+200-4+400 구간에 연약대 또는 파쇄대가 발달하고 있는 것으로 나타났다. 이는 지질조사 결과와 잘 일치하였다. 따라서 이 구간 굴착 시 지층변화를 면밀히 관찰하면서 굴진을 해야 하며 동시에 적절한 보강작업이 요구된다.

수치해석 결과 하부 채굴적의 부분적 붕락에 의한 천반의 침하 및 이로 인한 응력 이완대가 상부 터널까지는 미치지 않는 것으로 나타나 터널 굴착시 하부에 존재하는 채굴공동은 터널의 안정성에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 임순복, 이창범, 김동숙, 1993, 삼척탄전 백병산지역의 지질구조 및 탄층구조, 석탄지질 조사연구(XI), 한국자원연구소, 연구보고서 KR-92-6A-1, pp. 101.
2. 석탄합리화사업단, 2000, 문경지역 지반안정성 정밀조사, pp. 319.
3. Serafim, J.L. and Pereira, J.P., 1983, Considerations of the geomecahnics classification of Bieniawski, Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr., Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. II.33-II.42.
4. Trueman, R., 1988, An evaluation of strata support techniques in duel life gateroads, Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff.



송원경

한국지질자원연구원 탐사개발연구부
선임연구원
songwk@kigam.re.kr



정소걸

한국지질자원연구원 탐사개발연구부
부장, 책임연구원
skchung@kigam.re.kr



한공창

한국지질자원연구원 탐사개발연구부
책임연구원
hankc@kigam.re.kr