

도로터널공사구간의 폐갱도 정밀조사 및 터널의 안정성 평가

Site Investigation of Abandoned Coal Mine and Stability of Road Tunnel

신희순¹⁾, Hee-Soon Shin, 김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 이병주¹⁾, Byung-Joo Lee, 한공창¹⁾, Kong-Chang Han, 선우춘¹⁾, Choon Sunwoo, 송원경²⁾, Won-Kyung Song, 신중호¹⁾, Joong-Ho Synn, 김유성¹⁾, Yoo-Sung Kim, 박 찬²⁾, Chan Park

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources(KIGAM)

²⁾ 한국지질자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources(KIGAM)

SYNOPSIS : Several underground cavities were found during construction of a road tunnel in 600m length . The area belong to Whasoon coalfield where extensive ground subsidences have occurred. It is necessary to find other underground cavities which might be located just near the road tunnel for safety. The field surveys and laboratory tests were conducted such as surface geological survey(672m), surface reflection seismic exploration(399m), drilling test(3 NX holes), 9 laboratory tests for rocks, 3 boreholes televiewer tests, reflection seismic exploration in tunnel(2,342m). To estimate the effects of underground cavities on the road tunnel, 3 geological section were analysed with FLAC-2D modeling. The effects of the ground reinforcement were also analysed .

Keywords: underground cavities, road tunnel , coalfield, subsidence, reflection seismic exploration,

1. 서 론

A터널이 지나가는 화순지역은 호남전단대에 속하고 있어 심한 습곡, 단층이 발달하고 있으며 화순의 대단위 탄층이 천부에 지나고 있는 구간이다. 이구간은 합탄층 내의 무연탄을 개발하기 위해 채탄작업이 이루어졌던 곳으로 여러 개의 탐탄 및 운반갱도와 채탄을 위한 연층갱도의 굴착으로 채굴적이 발달하고 있으며 일부 구간은 덕대에 의한 개발이 이루어져 많은 폐갱도와 채굴적이 불규칙하게 존재하고 있으며 A터널 상부 지표 여러곳에서 넓은 범위에 걸쳐 소규모 내지 대규모의 지표침하현상이 관찰되었다. 터널 굴착공사중 상행선 B지점 천단부에서 폐갱도가 발견된 이후 하행선 C지점에서 폐갱도가 발견되었다. 그 결과 터널 주변에는 수많은 채굴공동이 존재할 수 있기 때문에 이들을 그대로 방치할 경우 터널완공 후에도 직간접적으로 터널의 안정성 및 유지관리에 악 영향을 끼칠 것으로 우려되었다. 터널의 안정성 확보를 위해서는 이들 폐갱도들이 터널의 안정성에 미치는 영향을 파악할 필요가 있으며, 만일 위험하다고 판단될 경우 적절한 보강 대책을 수립하여야 한다. 조사대상지역은 탄층이 천부에 부존하고 있으며 터널구간 인근 지표상에 대규모 저탄장이 있는 등 전기전도도가 높은 異狀매질이 곳곳에 위치하고 있어서, GPR을 비롯한 일반적인 탐사방법으로는 만족할 만한 탐사결과를 기대할 수 없기 때문에 고도의 정밀탐사와 해석기법이 요구된다. 동 지역을 지나는 터널구간을 대상으로 정밀지표지질조사와 정밀탐사를 통하여 폐갱도의 위치를 확인을 하고 폐갱도가 터널의 안정성에 미치는 영향을 평가하며 안전한 터널공사 및 유지관리를 할 수 있도록 하고자 본 조사사업을 수행하게 되었다.

2. 정밀지표지질조사

폐갱도가 존재할 탄층 및 단층과쇄대의 발달방향 확인과 지표침하 발생현황조사를 위하여 상·하행 선 터널노선 전구간(670여m)에 대한 정밀 지표지질조사를 실시하였다. A터널이 지나가는 곳의 지질은 고생대의 석탄기부터 페름기에 퇴적된 소위 평안층군(화순지역에서는 구암층군으로 명명하기도함)에 해당하는 함탄층과 천운산층이 분포한다.

가. 함탄층

함탄층은 A터널의 동쪽 즉 터널종점부의 상부에 분포하며(그림 1), 이 함탄층이 분포하는 곳에서 채탄작업이 이루어졌기 때문에 주로 이 층에서 폐갱도가 발달하고 있을 것으로 추정된다. 본 층은 담회색, 회색 혹은 암회색의 조립 및 극조립 사암과 담회색 내지 회색의 규암 및 석영편암, 암회색 내지 흑색의 세립사암과 흑색의 실트암과 셰일 그리고 무연탄층으로 구성된다. 지질구조적으로 함탄층은 층서적 상위 층인 천운산층 상부에 분포하며, 천운산층에 저각의 역단층인 트러스트 단층(Thrust fault)을 경계로 하여 접하고 있다(그림 1). 함탄층내 층리의 경사는 20도 내외로 매우 완경사를 이루고 있으므로 실제적으로 무연탄층은 지표에서 깊지 않은 곳에 분포하고 있다.

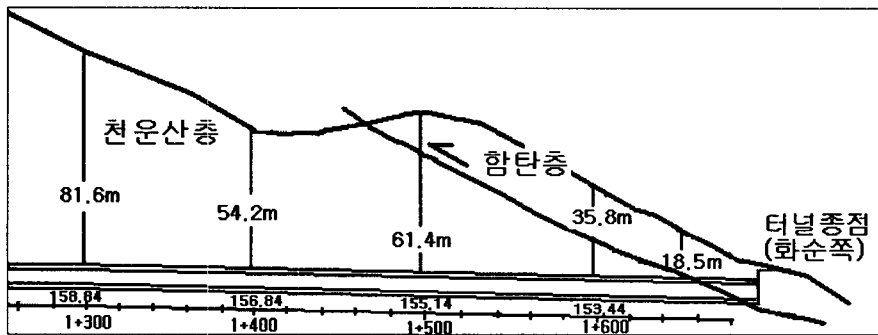


그림 1. 터널종점부 함탄층이 트러스트 단층에 의해 천운산층 상부에 위치

나. 천운산층

천운산층은 터널종점부의 터널 상부지역을 제외하고는 전 터널구간에 분포한다. 천운산층은 녹색 내지 녹회색 및 적자색의 사암류와 셰일로 구성되어있다. 천운산층이 하부에 사암의 함량이 많은 부분과 상부의 실트암 내지 셰일의 함량이 많은 부분으로 나눌 수 있는데, 본 지역에서는 천운산층의 상부에 해당하는 암상이 분포하고 있다.

3. 시추조사

조사지역의 암반상황 및 불연속면의 확인, 연약대 및 기존의 공동을 확인하기 위한 탐사를 위해 예전에 채탄작업이 이루어 졌던 지역을 중심으로 터널종점상부에서 3개 공의 시추가 이루어 졌다. 시험공으로 직경 NX의 공이 시추되어 코아를 채취하였고, 각 시추공의 위치와 공의 심도는 B1, B2, B3 시추공의 시추심도(표고)는 각각 66.0m(203.71, m), 59.0m(196.34m), 55.0m(192.40m) 였다. 암상의 logging 결과 B1 시추공에서는 지표에서 19.1m(표고 184.6m)까지 무연탄 내지 흑색 셰일을 협재하는 함탄층을 보이며 다시 23.6m(표고 180.1m)까지는 천운산층이 발달하며, 그 하부 27.8m(표고 175.9m)까지는 함탄층이 산출되고, 그 이하는 천운산층으로 구성되어 있다(그림 2). B2 시추공에서도 심도 19.4m(표고 176.9)까지 함탄층이 분포하며 그 이하는 천운산층분포하고 있다.

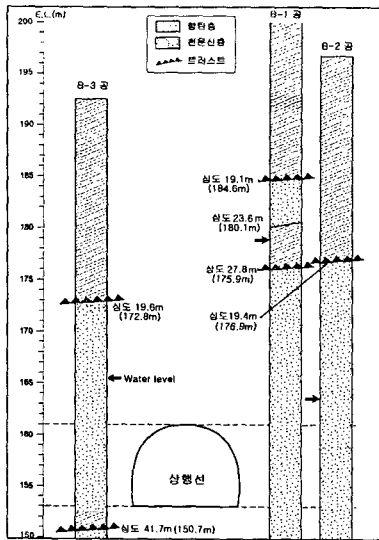


그림 2. 시추결과에 따른 함탄층 및 천운산층을 표시한 시추 주상도

B3 시추공도 마찬가지로 19.6m(172.8m)까지 함탄층으로 층위상으로 하부층인 함탄층이 천운산층 상부에 분포함을 볼 수 있다. 함탄층과 천운산층의 경계인 트러스트 단층이 지나는 곳인 B1공의 19.1m에서 23.6m 구간은 RQD값이 매우 낮고, B2 및 B3공 역시 19.4m와 19.6m 부근에서 같은 현상을 보이고 있다.

4. 실내암석물성시험

폐갱도로 인한 터널안정성평가에 필요한 지반설계정수 확보를 위하여 실내 암석물성시험을 실시하였다. 4종 암석(사암 3종, 셰일 1종)에 대해서는 비중, 흡수율, 탄성과 속도(P, S파), 일축압축강도, 인장강도, 탄성계수, 포아송비, 삼축압축시험(점착력, 내부마찰각)을 실시하였고, 2종 암석(사암)의 절리면전단시험을 실시하여 점착력, 절리면의 내부마찰각, 강성률(K_N , K_S)를 구하였다.

5. 정밀물리탐사

5.1 지표 탄성과 반사법(터널 상부 지반 조사)

본 조사목적은 대단히 복잡한 형태로 연장된 폐갱도들에 대한 탄성과 반응을 확인하고 각 축선에 따른 불연속면 발달상태와 개략적인 폐갱도 분포상태를 파악하는 데 있다. 하행선 상부 지표 탄성과 반사법(축선길이 146m), 상행선 상부 지표 탄성과 반사법(축선길이 60m), 상·하행선 상부교차축선 탄성과 반사법(축선길이 93m)을 실시하였다.

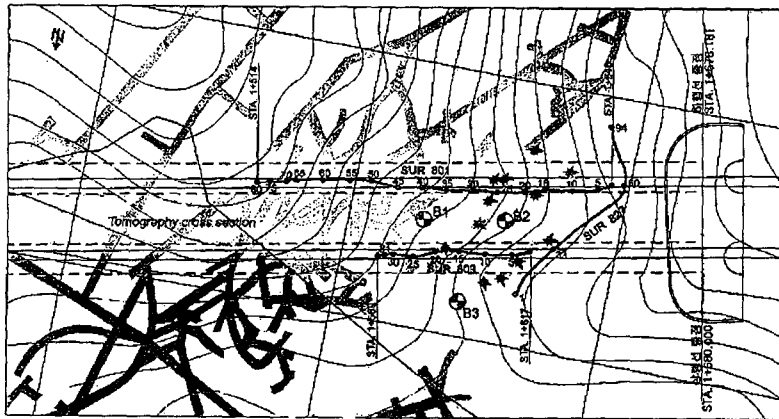


그림 3. 터널상부의 3개 지표탄성과반사법 축선과 폐갱도분포

탄성과 발생원으로는 봄저가, 수신기로는 28Hz geophone이, 데이터 제어 장치로는 "SUMMIT system"(DMT-GeoTec사)이 사용되었다. Roll-along 측정 기법에 의해 취득된 각 발생원 기록에서는 불연속면에 의해 탄성과 도달이 단절되는 양상이 뚜렷하게 관찰되었으며 또한 공동(폐갱도)에 의한 탄성과 반응도 일관성을 띄면서 인식되었다. 축선 SUR 801(하행선 상부 지표 탄성과 반사법)에서의 측정

을 위한 기본 발생원-수진기 배열은 다음 그림 4와 같다. 배열 전체는 하나의 station 마다 이동되면서 측정된다. 그림 5는 45개의 발생원 기록중 발생원 기록 25~27을 나타내고 있다. 여기서 탄성과 도달의 단절상태(불연속면)은 굵은 선으로, 공동반응은 화살표로 예시하고 있다. 전체적으로 절리 및 공동 반응이 중첩되어 나타나고 있다.

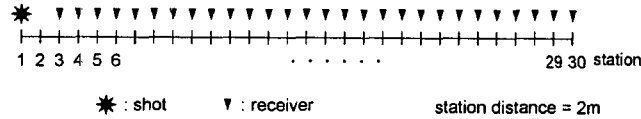


그림 4. SUR 801에 대한 기본 발생원-수진기 배열

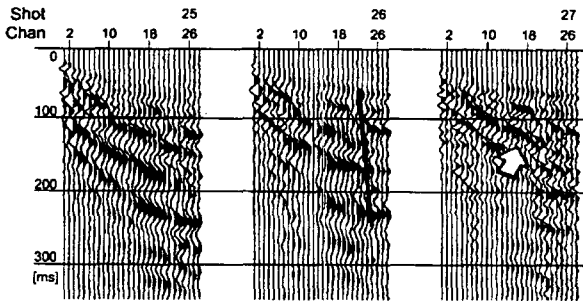


그림 5. SUR 801에 대한 총 45개 발생원기록중 25~27

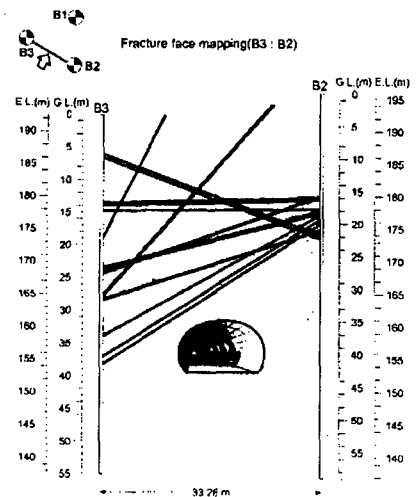


그림 6. Fracture face mapping(B3-B2)

5.2 시추공 텔레뷰어 탐사

시추공내에서 폐갱도로 인한 지층 분리상태, 단층, 절리 등 각종 불연속면에 대한 크기, 경사각, 경사 방향 확인(3개 시추공, 180m)하기 위하여 실시하였다. 그림 6에서는 시추공 B3와 B2사이 단면에 각불연속면이 교차할 경우 각각의 교차 직선을 나타내고 있다. 짙은 선은 소단층, 파쇄대, 절리밀집대 등 불연속면을 나타낸다. 대체로 불연속면이 터널을 벗어나고 있다. 시추공 B3와 B1사이, 시추공 B1와 B2 사이에서도 큰 규모의 불연속면들이 터널을 벗어나는 것으로 분석되었다.

5.3 터널사이 단면 탄성과 토모그래피

터널 사이 단면(길이 약 200m × 폭 20m, 4,000m²)을 대상으로 수행한 탄성과 토모그래피의 주된 목적은 우선 터널 사이의 불균질성(파쇄대, 공동)을 파악하고 그 결과가 상부 침하지역 지반과는 어떠한 연계성을 갖고있는 가를 살펴보는 데 있었다(그림 7). 약 200m×20m 단면을 5개 소단면(Tomo 1 단면 ~ Tomo 5 단면)으로 분리하였고 토모그래피 단면 측정은 각 소단면별로 수행하였으며 발생원(3kg 햄머)은 상행선 내벽에서 구사되고, 수신기(28Hz geophone)는 하행선 내벽에 부착되었다. 데이터 취득장치는 "SUMMIT system"(DMT-GeoTec사)이며 데이터 샘플링 간격은 Tomo 1~Tomo 3에서 1/32ms, Tomo 4와 Tomo 5에서 1/16ms이다. 다음은 우선 Tomo 1 단면 측정 분석 및 토모그램(탄성파속도 분포)을 예시하고 있다. 그림 8은 Tomo 1에 대한 측정 과정을 나타내고 있으며 그로 인해 도합 55개의 발생원기록(49채널)이 취득되었다.

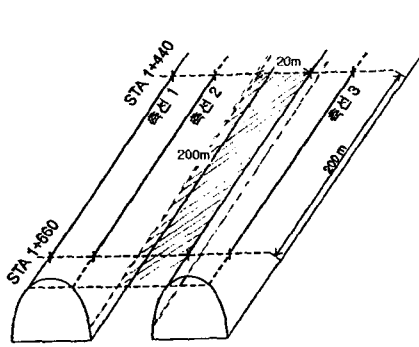


그림 7. 탄성과 탐사축선

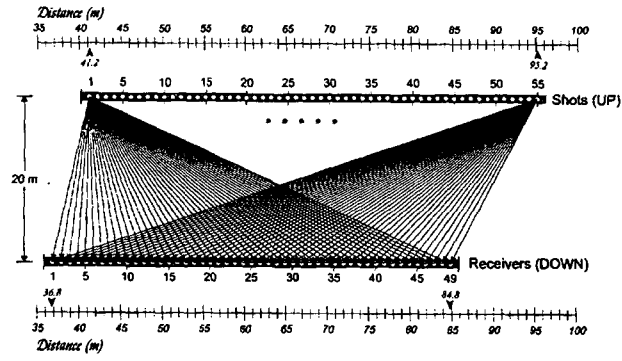


그림 8. Tomograph 측정과정(Tomo 1 단면-SUR 811)

그림 9는 발생원기록 13~20(터널입구 40~140m 구간)으로 수평파선에 대한 기록 및 그로부터 산출된 평균 탄성파속도를 나타내고 있다. 터널 사이에서 대단히 양호한 암반의 탄성파속도는 약 5,000m/s에 달하고 있으며 상대적으로 가장 연약한 암반은 약 3,500m/s의 속도를 보여주고 있다. 전체적으로 속도 차별화는 전구간에서 여러 개로 뚜렷이 구분되는 양상을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그림 10은 상기 토모그램 이외에도 상부 폐갱도 망, 주변 지형 및 침하지점을 동시에 표현하여 나타내고 있다.

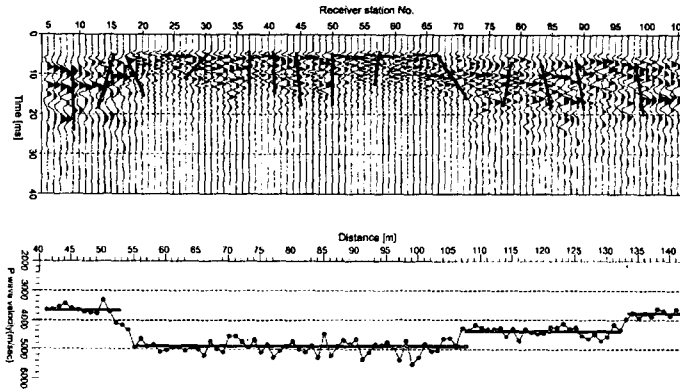


그림 9. 수평파선 기록 및 평균탄성파속도(터널입구 40~140m 구간)

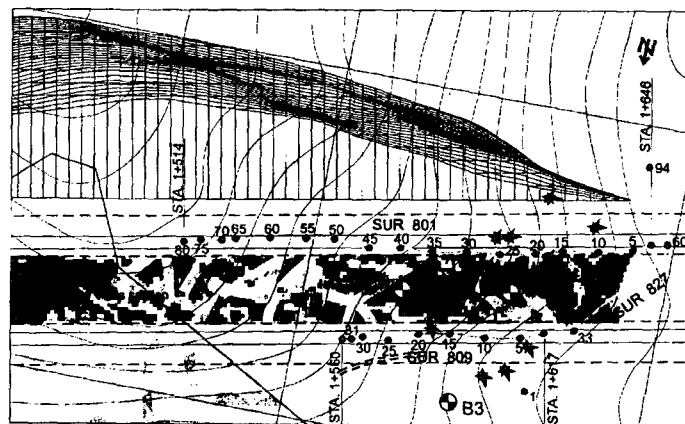


그림 10. 탄성과 토모그램 결과,상부 폐갱도 분포 및 주변 지형

시추공 B1 위치 이후 약 70m 구간의 토모그램에서는 여러 갈래의 저속도 암반대가 사선방향(대체로

서쪽 방향)으로 뚜렷이 발달되고 있었다. 상행선 천공과정에서 터널 상단부와 수 m 떨어진 곳에 공동이 대체로 터널방향으로 길게 존재하고 있음이 확인된 바 있으며 이에 대한 안정성 여부도 역시 상기 저속도 암반대 및 폐갱도 망과 연관될 것이 기대된다.

5.4 터널내 탄성과 반사법(TSP) 탐사

터널내 탄성과 반사법(TSP : Tunnel Seismic Profiling)에 의해 터널 주위 폐갱도 존재 및 불연속면 파악을 하였다. 조사길이는 상·하행선 2,343m로 터널 상단(상행선- 266m, 총샘플수 1,024개; 하행선 - 266m, 총샘플수 266개), 터널 벽면(상행선- 252m, 총샘플수 1,024개; 하행선- 230m, 총샘플수 266개), 터널 바닥(상행선- 687m, 총샘플수 1,024개; 하행선- 642m, 총샘플수 266개)에 대한 측정을 실시하였다(그림 11). 여기서 봄저는 바닥 탐사를 위해, 소형 햄머(3kg)는 측면 탐사를 위해 사용되었으며 탄성과 수진은 geophone(28Hz)에 의해 이루어졌다.

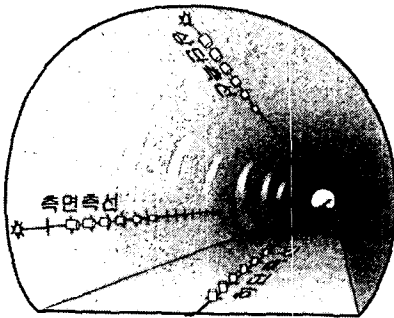


그림 11. 탄성과 반사법 측선



그림 12. 터널상단 측선에 대한 탄성과반사법 측정

가. 터널 상단 측선

그림 12는 터널 상단 측선에 대해 roll-along 측정기법이 응용되는 전경을 나타내고 있다. 측정결과, 특이한 점은 일정 수진기 구간에 도달된 표면파의 진폭이 상대적으로 낮게 나타나며 동시에 표면파가 반전하는 양상을 나타내고 있다는 데 있다. 이러한 표면파의 전달 현상은 그 수진기 구간 내에 큰 폭의 열린 절리가 존재할 경우 기대될 수 있으며 이 때 절리의 연장은 약 4m로 추정된다. 이러한 특이한 현상은 하행선 터널 상단 측선 기록(SUR 822)에서도 관찰되고 있다

나. 터널 벽면 측선

상행선 터널 벽면 측선(SUR 817)에 대한 기록(140 발생원 기록)중 공동(예 : 폐갱도) 반응내지 열린 절리가 관찰되었다. 여기서 공동에 의한 반사파 도달이 비교적 지속적으로 관찰되고 있음에 비추어 그의 연장이 대체로 벽면과 완만한 경사를 이루고 있을 것이 예상된다. 반면, 하행선 벽면 측선 기록(SUR 818)에는 팔목할만한 공동 내지 열린 절리에 의한 탄성과 반응이 관찰되지 않고 있다.

다. 터널 바닥 측선

바닥 탐사는 상·하행선 터널 전 구간에 걸쳐 수행되었는데 전체적으로 터널바닥하부 약 15m 미만에는 이렇다할 폐갱도의 존재를 나타내는 반응이 관찰되지 않았다.

6. 폐갱도가 터널에 미치는 안정성분석

전산해석을 통하여 터널 굴착중 확인되었거나 존재할 것으로 추정되는 채굴공동을 설정하고 이들의 터널의 안전에 대한 유해여부를 검토하였다. 또한 터널 종점부 사면에 광범위하게 선형적으로 발생한

지표의 변위가 폐갱도에 의한 지반침하 현상인지 여부와 사면 굴착으로 인한 미끄러짐 현상인지를 분석하였다. 전산해석은 터널내에서 폐갱도가 발견된 STA.1+422 지점과 STA.1+654 지점에서 각 한 단면씩 두 단면, 그리고 상하행선 터널의 중앙을 지나면서 터널과 나란한 방향으로 한 단면 등 세 단면에서 이루어졌다. 본 해석에는 지반구조 해석용 범용 프로그램인 FLAC을 이용하였다. 해석에 사용된 지반 층서별 물성자료는 표 1과 같다.

표 1. 해석에 사용된 지반 층서별 물성자료

물 성 \ 층서구분	토사층	석탄층	연암	경암
단위중량(kg/m ³)	1,900	1,500	2,670	2,670
Poisson 비	0.3	0.3	0.2	0.1
변형계수(GPa)	0.018	0.0068	3.55	21.1
점착력(MPa)	0.005	0	1.24	5.83
내부마찰각(도)	28.4	25	21	36.5
인장강도(MPa)	0	0	0.07	0.34

가. A-A' 단면(STA.1+580)

A-A' 단면의 모델구조는 그림 13과 같다. 시추조사 결과를 기초로 토사층의 두께는 B-1에서 B-3까지의 시추공 조사에서 붕적층의 두께가 3.0~6.1m 사이인 것으로 나타났으므로 평균 4m인 것으로 간주하였다. 연암층은 함탄층으로 분류된 층에 해당한다. 이 구간에서는 사암들 사이에 흑색 및 탄진 세일이나 실트암들이 협재되어 교대로 나오는 층으로서 절리도 발달되어 있는 지층이다. 함탄층이 19.1m에서 19.6m까지 분포하므로 이를 기준으로하여 연암층은 지표로부터 20m까지 연장되는 것으로 간주하였다. 전산해석에는 A1(2×2m), A2(2×2m), A3(2×3m)까지 3개의 폐갱도가 고려되었다. 갱도 A1은 록볼트 시공중에 발견된 갱도이며, A2와 A3는 갱내도를 근거로 채굴상황을 추정했을 때 존재할 가능성이 높다고 판단되는 갱도들이다.

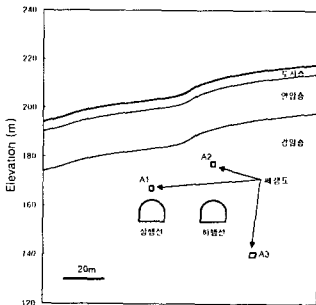


그림 13. 단면 해석모델의 구조(A-A' 단면)

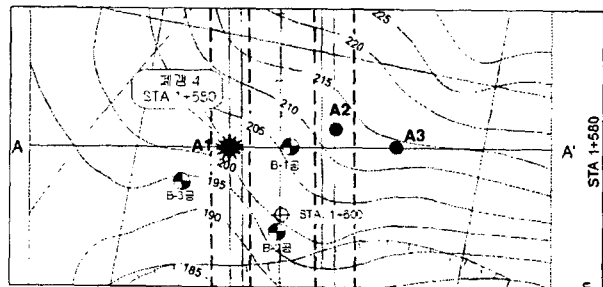


그림 14. 전산해석에서 고려한 폐갱도 위치

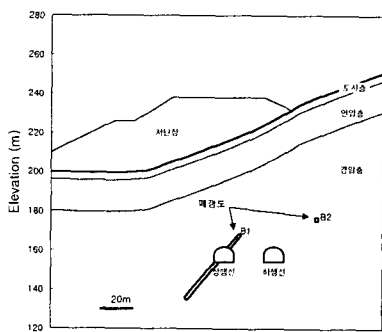


그림 15. 단면 해석모델의 구조(B-B' 단면)

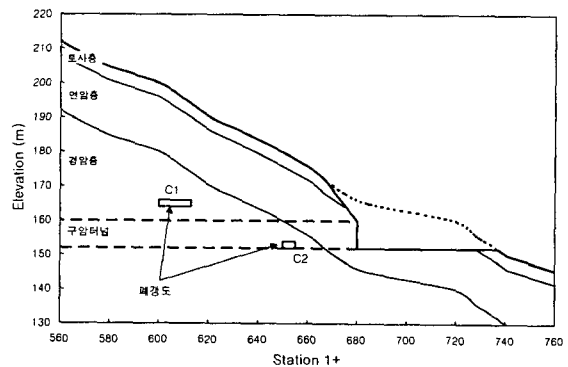


그림 16. 단면 해석모델의 구조(C-C' 단면)

나. B-B' 단면(STA.1+460)

B-B' 단면의 해석모델 구조는 그림 15와 같다. 여기서는 지표에 쌓아둔 석탄이 터널에 미치는 영향을 해석하기 위하여 저탄장을 포함시켰다. B1은 암석층이라는 갱도로서 터널 굴진중 관통되어 그 규모가 확인된 갱도다. 실측에 따르면 B1 갱도는 136ML에서 168ML까지 연장되어 있으며 경사는 45도를 이루고 있다. B2 갱도는 갱내도를 분석해볼 때 운반갱도로서 B1 갱도의 상부에 위치하며 A3 갱도와 동일한 수준인 139ML에 존재하는 것으로 추정되었다.

다. C-C' 단면(터널 종점부)

C-C' 단면은 상하행선 터널축과 평행한 선을 따라 선정된 단면으로서 점선이 원지형을 표시하며 굵은 실선은 절토 후의 지형을 나타낸다(그림 16). C1과 C2 두 개의 폐갱도가 고려되었으며 갱도 C1은 두 개의 갱도와 관련되나 불리한 조건을 부여하기 위하여 이들 갱도가 완전 채굴되어 연결되었다고 간주하였다. 이 갱도는 채탄을 위한 승갱도와 연결된 수평갱도라는 점을 고려하여 164ML에 위치할 것으로 판단되었으며 그 높이는 2m, 길이는 13m이다. C2는 상행선 굴착중 발견된 갱도로서 불리한 조건을 부여하고 연장성을 고려하기 위하여 길이가 5m인 것으로 간주하였다.

7. 결론

1. 터널 종점부 가까이에 지나는 트러스트 단층을 경계로 상부에만 함탄층이 발달하므로 채탄작업도 이 부분에만 집중되어 채탄 채굴적도 단층 상부에만 집중되어 있을 것이며 지질구조적으로 터널하부에는 탄층이 발달하지 않으므로 채탄에 의한 채굴적은 존재하지 않으리라고 판단된다.
2. 텔레뷰어 탐사에서 대부분의 절리들이 터널 상부에 밀집되어 있으며 많은 절리들이 단절(절리 정현 곡선의 단절)된 상태를 보여주고 있으며 터널하부에는 대체로 양호한 암반상태를 나타내고 있다.
3. 상·하행선터널 사이(STA.1+639~STA.1+434)에서 실시된 탄성과 토모그래피탐사 결과는 침하가 다발적으로 발생한 지역 하부의 토모그램은 양호한 암반상태(높은 탄성과속도)를 보여주고 있는 반면 시추공 B1위치(STA.1+537)에서 터널시점방향으로 약 70m 구간의 토모그램에서는 여러 갈래의 저속도 암반대가 사선 방향(대체로 서쪽 방향)으로 발달되고 있음이 관찰되었다.
4. 천장으로부터 약 10m 이상 거리에서 폐갱도에 의한 공동반응이 여러 발생원 기록에서 관찰되었다. 터널 천장에 근접된 공동은 상행선 STA.1+467 주위에서 출구방향으로 약 10m 연장되고 있음이 인식되었고 STA.1+585~1+553의 약 32m 구간에서도 폐갱도가 인식되었다. 터널 내 바닥탐사는 전체적으로 터널 바닥 하부 약 15m 미만에는 폐갱도의 존재를 나타내는 반응이 관찰되지 않았다.
5. 안정성해석결과는 터널 상반의 암질이 좋지 않은 경우에는 강우 등으로 인한 지하수위 상승 영향을 복합적으로 받아서 터널에 불안정성이 나타날 수가 있다. 기존 갱도의 충전 보강은 지하수의 갱도내 유입등 잠재적인 터널의 불안정성을 제거할 수 있으므로, 장기적인 측면에서 터널의 유지를 위한 안전율을 높이기 위해서는 기존 경사 갱도의 그라우팅 충전 보강이 효과적일 것으로 판단된다.
6. 터널 종점부 부근 일대에 발생한 지표의 이동현상은 지하 채굴적과 관련된 지반침하 현상이 아니라 갱구부 절토가 지반의 지지력을 감소시킴에 따라 발생한 표토층의 이동 현상인 것으로 판단된다. 강우 등 추가적으로 외적인 변화가 발생할 경우에는 충분한 안정성을 보장하기 어려울 정도로 불안정한 상태이므로 정밀 조사를 실시하여 항구적인 안전대책을 수립하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 김중열, 구자학, 김상엽, 현혜자, 김기석(1988~90), 탄층연속성 조사를 위한 채널과의 연구 (I)(II)(III), 한국동력자원연구소, 과학기술처.
2. Hoek, E. and Brown, E.T.(1980), *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, pp.527.