

폐광산 상부 도로 안정성 검토 사례

문상호^{1)*}, 나승훈¹⁾, 이상필¹⁾

A Case Study on the Stability Analysis for the Road Construction above Abandoned Mine

Sang-Ho Moon, Seung-Hoon Ra and Sang-Pil Lee

Abstract Due to the steep and narrow characteristic of domestic coal beds, the slant chute caving or sub-level caving method have been mainly adopted in Korea, whereas the long-wall mining has been widely used all around world. However, the slant chute caving or sub-level caving method have disadvantage of not giving much information on the scale and characteristic of abandoned mines. Hence, those information on the abandoned mines in Korea are not easily available. In this study, based on the characteristic investigation of the domestic mining methods, the geological survey and safety analysis were carried out for Donghae highway section 2. Finally, the optimum ground reinforcement methods for that site were selected.

KeyWords Abandoned mine, Mining method, Ground subsidence, Ground reinforcement method

초 록 세계적으로 장벽식 채탄법이 많이 적용된 반면, 국내에서는 좁고 경사진 탄층의 특성에 의하여 위경사승 봉락식 또는 중단 봉락식 채탄법이 주로 사용되었다. 이러한 이유로 국내에 산재하는 폐광산은 그 규모와 특성을 파악하기가 어려운 특징이 있다. 따라서, 본 고에서는 국내 채탄법의 특징을 파악한 후 이를 바탕으로 동해고속도로 2공구 현장의 폐광산에 대한 조사 및 안정성 평가를 실시하였으며 추후 당 현장에 적용 가능한 최적의 지반보강공법을 선정하였다.

핵심어 폐광산, 채탄법, 지반침하, 지반보강공법

1. 서 론

석탄산업은 1980년대 중반 국내 에너지 공급에 중추적인 역할을 담당하였다. 그러나, 1980년대에 이르러 수요감소와 가격 경쟁력 약화의 이중고를 겪으며, 가행 탄광수는 1988년의 347개에서 현재 10여 개 이하로 감소하였다. 폐광으로 인한 문제점으로는 탄광지역의 경기침체, 산성 광산수로 인한 환경파괴, 그리고 폐갱도 및 굴적의 붕괴로 인한 지반침하를 들 수 있다. 이 중, 폐갱도 및 채굴적의 붕괴로 인한 지반침하는 기존의 구조물 뿐만 아니라 향후 폐광산 지역을 통과하게 되는 도로 및 철도 노선의 지반 및 구조물의 안정성에 큰 위협을 주고 있다. 본 고에서는 당사가 건설하고 있는 동해고속도로 2공구 현장에서 수행한 폐광산에 대한 조사

및 안정성 평가, 그리고 지반보강공법 선정 결과를 기술하였다.

2. 국내 폐갱도 및 채굴적의 특징

국내에 산재하는 탄층은 극심한 지각변동으로 많은 습곡작용을 받아 향사나 배사 구조에 의해 좁고 경사진 형태를 보인다. 이 같은 현상은 채탄작업의 기계화와 개발단위의 대형화를 크게 제약하는 요인이었고, 이로 인하여 국내의 채탄법은 외국의 탄층에 적용되는 장벽식 채탄법 등과 같은 안전하고 능률적인 채탄방법이 적용되지 못하고 위경사승 봉락식 또는 중단 봉락식 채탄법등이 적용되었다. 따라서 채굴이 끝난 채굴적과 채굴을 위하여 사용되었던 폐갱도는 경사가 급하고 형상이 불규칙하며, 대심도 채굴로 인하여 탄층이 대부분 지하수면 하부에 존재하는 특징을 보인다(석탄합리화 사업단, 1997).

국내 지반침하의 발생형태는 넓게 발생하는 Trough형

1) LG건설㈜ 기술본부 지하공간팀

*교신저자(Corresponding Author): shmoon1@lgenc.co.kr

접수일: 2004년 10월 15일

심사 완료일: 2004년 10월 28일

Table 1. Subsidence characteristic of mining methods

채탄법		침하 요인	침하 형태
붕락식	위경사승	· 보안탄주나 천반 등이 장기간에 걸쳐 풍화 또는 크립현상 (creep) 등에 의해 강도가 저하	Sink hole형
	중단	· 상반의 강도가 클 경우에도 지표에 계단식의 함몰 발생	Trough형
		· 보안탄주를 남기더라도 침하가 발생	Sink hole형
블록 케이빙	· 광체와 상반의 강도, 단층과 같은 중요한 지질구조 · 채광심도와 붕락지역의 채광 후 뒷채움 및 지표의 지형	Sink hole형	
장벽식	· 채굴적 상반의 휨 작용에 의한 인장균열이 발생	Trough형	
주방식	· 광주가 붕괴되지 않고 방과 방 사이의 십자형 · 교차점에서 붕괴가 발생하여 지표에까지 진전	Sink hole형	
	· 광주가 약화되어 전부 또는 일부분 파괴가 발생 · 광주와 접하고 있는 천정부나 바닥부에서 파괴가 발생	Trough형	
그 외	Top Slicing	· 상반 쪽의 지표에 인장 균열이 발생되어 지표에서부터 · 상반이 점진적으로 함몰	Trough형
	용해법	· 인위적인 물의 주입으로 암반의 역학적 성질을 저하	Sink hole형 Trough형

주) 국내에서 주로 사용되어온 채탄법 : 위경사승 붕락식, 중단 붕락식

침하가 많은 외국과는 달리 좁고 깊게 발생하는 Sink-hole형 침하가 많다. 이러한 국내 지반침하 발생경향에 대한 연구가 미비하여 앞으로 지반침하 등의 폐광산 광해에 대한 대응책 정립이 시급하다. 채탄법과 그에 따른 침하요인 및 형태를 요약하면 Table 1과 같다.

3. 현장 현황

3.1 지형 및 지질 개요

동해고속도로 2공구 현장은 폐광산 지역에 도로를 개설하는 공사로서 특히 문제가 되는 영향구간은 Fig. 1에서 보듯이 현장 종점부 약 400 m 구간이다. 산계 중 1차 능선은 완경사로 남에서 북으로 발달하고 방사상의

2차 능선들이 발달하며, 수계는 서남에서 동북으로 흘러 동해로 유입된다.

본 지역일대에는 평안 누층군의 만항층, 금천층, 장성층, 함백산층 등이 분포하며, 본 구역에는 주로 장성층과 함백산층이 분포한다. 노두상으로 확인되는 지질구조는 완만한 향사구조이며, 부분적으로 소습곡 구조가 관찰된다. 1개의 단층이 종점부 절개지(STA 8+905)에서 관찰되며, 북동-남서방향으로 발달한다. 지층들은 약 변성작용을 받아 부분적으로 편암화되어 변성 광물을 다량 함유하는 구간도 관찰되며 층리를 따라 쉽게 깨지고 변형되는 특징을 보인다. 폐광산 안정성 검토대상 지역의 전경은 Fig. 1과 같다.

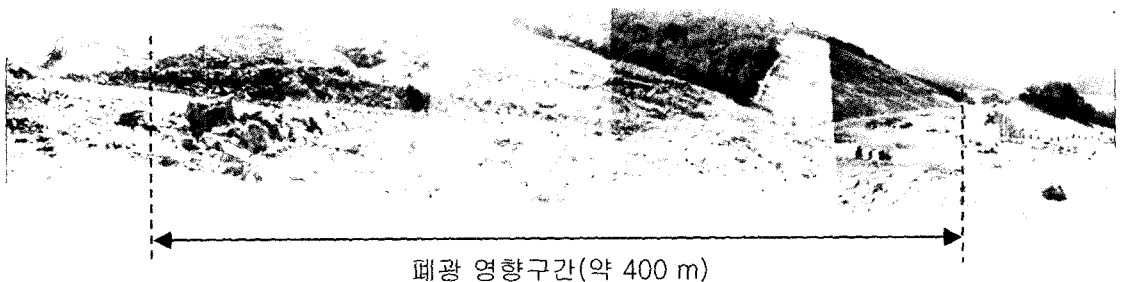


Fig. 1. Site overview

3.2 폐광산 현황

본 지역일대는 금산탄광에서 주로 개발하였으며 1989년에 석탄산업합리화법에 의해 폐광되었다. 폐광산은 Fig. 2와 같이 과업구역의 동북측인 STA 8+700부근에는 도로변에서 본갱(30 ML)을 개발하여 서남측인 230° 방향으로 분포하고 있다. 지역 서측의 계곡에서 1갱(35 ML), 2갱(50 ML), 3갱(70 ML) 등의 갱구로 개발된 탄광이 관찰되며, 이중 1갱에서 갱내 사갱으로 1편(-10 ML), 2편(-30 ML), 3편(-50 ML) 등을 개발한 것이 자료검토 결과 확인되었다(대한광업진흥공사, 1990).

본 지역에서는 상층탄, 중층탄, 그리고 하층탄의 3개 탄층을 채굴하였으며, 각 탄층의 평균탄폭은 각 1 m 내외이다. 부광대의 연장은 40~80 m 정도를 개발하였으며 탄질은 양호한 것으로 보고되어 있다. 금산광산의 가행기간 동안 생산실적은 Table 2와 같다.

본 지역은 1960년대 이전부터 10여개 이상의 갱도가 개발되었던 곳으로, 본 도로의 STA 8+700~8+800 지점의 절토사면 작업 중에 3개의 갱도흔적이 확인되었으며, STA 8+600 남측 계곡부에서 1개 갱도가 잔존된 것이 확인되었다. 현장 지표 조사결과, 본 계획 노선상과 산 능선에서 Fig. 3과 같은 Sink-Hole형 지표 침하현상이 관찰되었고 지표침하에 의한 것으로 추정되는 Fig. 4와 같은 탄층 상반의 파쇄균열이 발견되었으며 사면절취 중에 Fig. 5와 같은 폐갱도 갱구가 관찰되었다.

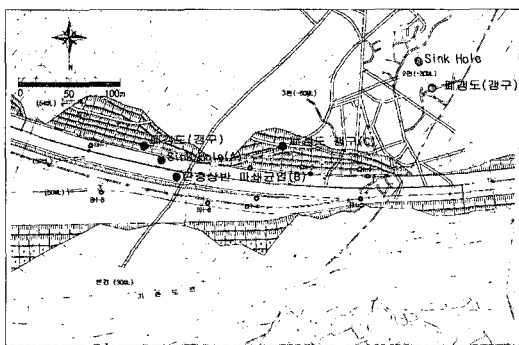


Fig. 2. Abandoned mine distribution in site

4. 지반조사

4.1 폐광산 지반조사

폐광산 파악을 위하여 채굴적 상반, 광주에 대한 상세한 정보를 수집하여야 하고 다양한 침하방지 공법들의

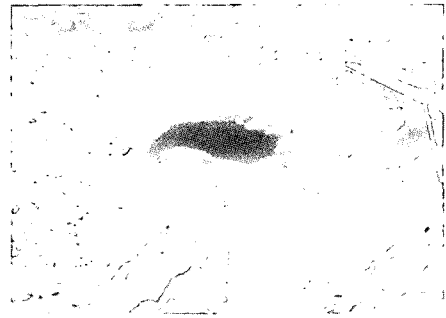


Fig. 3. Sink-hole subsidence in site (Point A in Fig. 3)

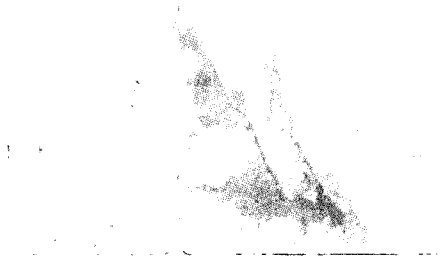


Fig. 4. Ground fissures above coal seams (Point B in Fig. 3)



Fig. 5. Open pit of abandoned mine (Point C in Fig. 3)

Table 2. Production rate of gumsan coal mine

년도	1985	1986	1987	1988	1989
생산량 (Ton)	16,581	19,149	23,493	13,494	1,190
탄질 (Calorie)	4,610	4,313	4,019	3,815	3,625

주) 석탄광 폐광지원내역서, 1995, 석탄합리화 사업단

Table 3. Abandoned mine survey details

조사방법	조사내용
갱구 분포도, 지표지질조사	채굴지역 광역적 위치 확인, 탐사측선 설정
물리탐사	전기비저항 또는 탄성파 반사법, 채굴적 분포 양상확인, 시추위치 결정
시추조사	채굴적 깊이, 두께 등 1차원 정보 취득
Crosshole Tomography	탄성파, 전기비저항 Tomography, 채굴적 형상에 대한 2, 3차원적 정보
시추공 시험, 원위치시험	공내재하시험, 수압시험, 실내시험, 상부 암반의 물성 파악

적합성을 평가하기 위해 폐광도 및 채굴적의 크기, 모양 그리고 연속성을 확인해야 한다. 지반조사를 위하여 먼저 문헌과 관계자의 진술에 따라 채굴지역의 위치를 광역적으로 확인하여야 하고 이를 바탕으로 탐사측선을 선정하여야 한다. 그 후, 전기비저항 탐사 또는 탄성파 탐사 등의 물리탐사를 통하여 채굴적의 분포와 시추위치를 결정한다. 시추 위치가 결정되면 시추조사를 통하여 채굴적에 대한 1차원 정보를 획득할 수 있고, 탄성파 Tomography 또는 전기비저항 Tomography를 통하여 채굴적에 대한 2, 3차원적 정보를 얻을 수 있다. 마지막으로 시추공 원위치 시험과 실내시험을 통하여 지반의 물성을 파악할 수 있다. 폐광도 및 채굴적 파악을 위한 조사방법 및 내용은 Table 3과 같다.

4.2 현장 폐광산 지반조사

당 현장에서 폐광산에 의한 지반침하 우려지역에 대하여 지반조사를 실시하였다. 지반조사는 폐광산의 분포와 특성을 파악하기 위하여 시행되었는데 물리탐사를 실시하여 침하 가능구역을 구분하였고 시추시험을 통하여 지반내 탄층의 위치를 확인한 후 현장시험을 통하여 탄층의 연속성을 파악하였다(한국도로공사, 2002). 당 현장에서 실시된 지반조사를 요약하면 Table 4와 같고

Table 4. Geological survey summary

구분	내용
지표지질조사	지표지질조사 1식
물리탐사	· 2차원 전기비저항 탐사 · GPR 탐사 4측선 3890 m 80 m
현장시험	· 시추조사 8공 279 m · 공내재하시험 10회 · 탄성파 Tomography 5회 · 공내영상촬영 (BIPS) 8공 · 수압시험 10회
실내시험	· 암석물성시험 4개 · X-Ray 회절분석 1식 · 전자 현미경 관찰 1식

전기비저항 측선 및 결과, 탄성파 Tomography 실시 위치, 시추공 위치는 Fig. 6과 같다.

가. 물리탐사

전기비저항 탐사는 슬럼버저 2차원 전기비저항탐사 배열법을 이용하였다. 총 4개의 측선을 탐사하였는데, 측선 1과 측선 2는 단위 전극간격을 30 m로 하여 가탐 심도를 3편 경도(-50 ML)수준까지 탐사하였다. 또한 전극간격이 넓어지면 탐사의 해상도가 낮아지는 단점을 보완하기 위하여 30 m 간격으로 측정 후 단위전극간격을 유지한 채 동일 측선 상에서 10 m씩 수평이동하여 매 측선마다 총 3회씩 중복 측정이 되도록 Roll a long 기법을 사용하여 수평방향으로는 전극간격을 10 m로 탐사한 결과를 얻었고 수직방향으로는 전극간격을 30 m로 탐사한 심도에 해당하는 결과를 얻을 수 있었다. 측선 3은 PC-BEAM 제작장을 통과하므로 지반 천부의 이상대를 정밀하게 감지할 수 있도록 전극간격을 5 m로 설정하여 170 m에 대한 탐사를 실시하였고 송전탑을 지나는 측선 4는 전극간격을 10 m로 설정하여 탐사깊이 210 m 구간을 탐사하였다. 전기비저항 탐사는 지반 하부의 개략적 상황을 광역적으로 탐사하기 위하여 수행되었기 때문에 송전탑에 의해 발생 가능한

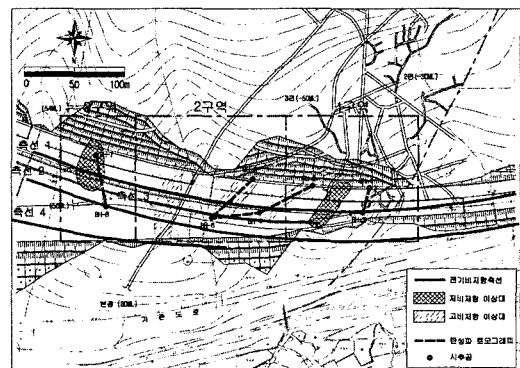


Fig. 6. Geological survey in site

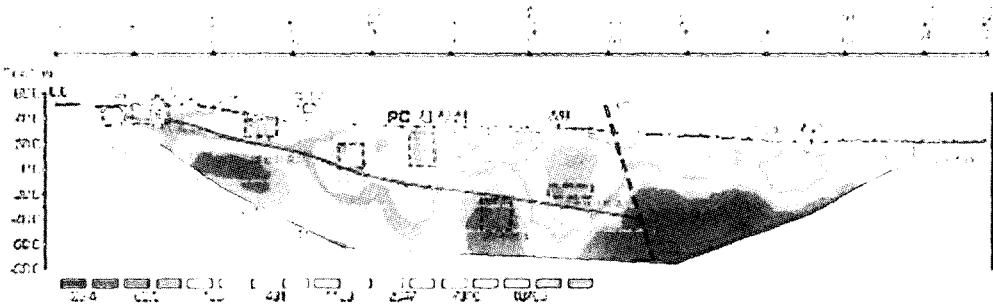


Fig. 7. Resistivity survey of line 2

Table 5. Resistivity survey results of line 1 to 4

측선	이상대 위치(Station)						단층	측점간격
	저비저항대①	고비저항대②	고비저항대③	고비저항대④	저비저항대⑤	고비저항대⑥		
측선 1	8k+590~ 8k+610	8K+680~ 8K+690	8K+740~ 8K+760	8K+805~ 8K+820	8k+840~ 8k+860	8K+870~ 8K+880	8k+910	-
측선 2	8k+590~ 8k+620	8K+670~ 8K+690	8K+730~ 8K+745	8K+775~ 8K+790	8k+820~ 8k+840	8K+875~ 8K+890	8k+905	10 m
측선 3	-	8K+680~ 8K+687	8K+703~ 8K+710	8K+790~ 8K+800	-	-	-	5 m
측선 4	-	8K+670~ 8K+690	-	-	-	-	-	10 m
관련 갱도	합몰 침하지점	본갱 1편 및 1,3편 채굴적	본갱 1편 및 1,3편 채굴적	3편 (-50 M) 채탄승갱	3편 수평운반갱	2편 (-30 ML) 채탄승갱	-	-

noise는 미소한 영향으로 간주하여 무시하였다.

탐사결과, 본 지역은 탄층이 완경사의 습곡구조가 발달하는 것으로 조사되었고 탐사결과에서 고 비저항대와 저 비저항대가 뚜렷이 구분되고 있다. 이는 탄층을 경계로 저항대가 구분되는 결과에 의한 것으로 전기비저항 탐사를 통하여 당 현장 공사구간에 존재하는 폐광산의 분포를 파악할 수 있었다. 결과적으로 전기비저항 이상대를 표시하면 Fig. 6의 빗금 친 부분으로 나타난다. 측선2의 전기비저항 결과는 Fig. 7과 같고 측선 1~4의 결과를 요약하면 Table 5와 같다.

나. 시추조사

전기 비저항 탐사 결과로 파악된 폐광산 분포지역의 8공에 대하여 시추조사를 실시하였다. 시추조사의 목적은 과업구역의 지반침하 조사대상지점의 지질분포 확인, 침하 우려지역 하부 지반의 이완상태 파악, 시추공을 이용한 수압시험, 공내재하시험, Borehole Image Processing System(BIPS), 시추코아의 실내시험을 통해 획득한 암석물성을 전산해석에 이용하는데 있다.

시추조사의 선정기준은 1) 상부에 노반, 구조물이 위

치하며, 하부에 갱도 채굴적의 존재가 복합도면에서 확인된 구간과 물리탐사결과 이상대로 해석되어 침하의 우려가 있는 곳, 2) 하부 채굴적 자료는 없으나 현재 침하흔적이 있거나, 발생될 징후가 있는 곳, 3) 구조물과 하부 채굴적의 심도차가 30 m 이내로 지표침하의 발생 가능성이 있다고 판단되는 지역으로 정하였다.

시추조사 결과, 탄층상반은 전반적으로 파쇄대가 발달하여 있으며, 시추작업 시 심한 누수상태를 보였다. 시추조사를 통하여 탄층의 지표 하 심도와 탄폭에 대한 정확한 정보를 파악할 수 있었고 이를 요약하면 Table 6과 같다.

다. 현장 시험

시추작업을 완료한 후, 시추공을 이용하여 현장시험으로 수압시험(Packer Test or Lugeon Test), 공내재하시험 (Pressuremeter), 시추공 영상촬영 (BIPS), 그리고 탄성과 Tomography를 실시하였다. 이중, Fig. 6과 같이 총 5단면의 탄성과 Tomography 결과를 이용하여 탄층의 3차원적 분포를 확인할 수 있었다. BH-5 ~ BH-6에서 수행된 탄성과 Tomography의 현장 측정 자

Table 6. Boring results of BH 1 to 8

구분	시추 선정 사유	직하부 갱도사항	지표하 심도 (탄폭) m	지층사항	
1구역	BH-1	<ul style="list-style-type: none"> 노선 탄층상반에 위치 소단층 통과 지표천부 채굴적 분포 탐사 이상대 PC 제작장 위치 	1~3편 (-50 ML)	-	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 14.3 m TCR : 35~100 RQD : 0~55%
	BH-2		3편	-	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 13.8 m TCR : 0~100% RQD : 0~80%
	BH-3		3편(-50 ml)	4.8~5.5 m (0.7 m) 24.2~24.5 m (0.5 m) 30.2~31.0 m (0.8 m) 38.5~39.5 m (1.0 m)	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 15.3 m TCR : 50~100 양호 RQD : 15~90%
2구역	BH-4	<ul style="list-style-type: none"> 노선 탄층상반에 위치 채굴적 분포 탐사 이상대 	본갱, 1~3편	19.0~19.5 m (0.5 m) 24.9~26.0 m (1.1 m)	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 15.6 m TCR : 20~100% 이상 RQD: 15~80%
	BH-5		본갱, 1~3편	12.3~14.1 m (1.8 m) 18.0~19.0 m (1.0 m) 22.3~22.5 m (0.2 m)	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 13.8 m TCR : 35~95 RQD : 10~80%
	BH-6		본갱, 1~3편	13.8~14.6 m (0.8 m) 23.2~23.9 m (0.7 m) 25.5~27.5 m (1.5 m)	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 18.9 m TCR : 25~100 RQD : 30~50%
3구역	BH-7	<ul style="list-style-type: none"> 노선 탄층상반에 위치 탐사 이상대 함몰 침하발생 암반 균열발생 	본갱, 1~3편	18.5~19.0 m (0.5 m)	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 26.5 m TCR : 35~100 RQD : 0~95%
	BH-8		본갱, 1~3편	6.1~8.5 m (2.4 m) 13.2~15.2 m (2.0 m) 17.2~19.5 m (2.3 m)	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위:지표하 25.3 m TCR : 20~100 RQD : 20~90%

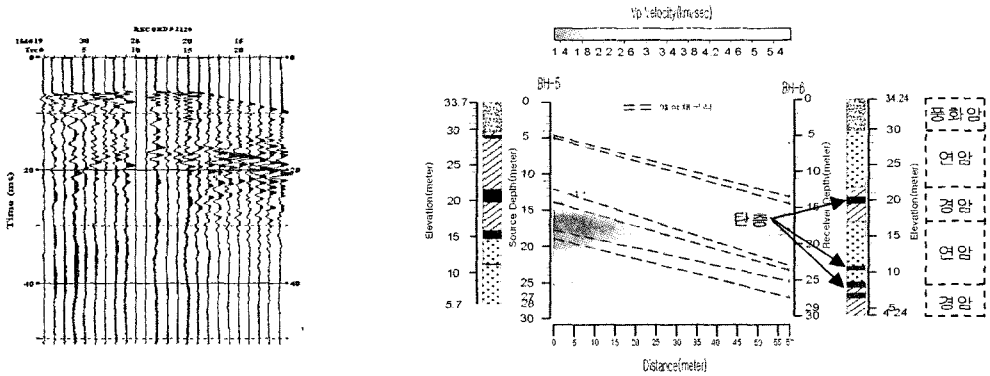


Fig. 8. Seismic tomography between BH 5 and BH 6

로 및 이를 분석한 결과는 Fig. 8과 같다.

라. 지반조사 종합

지반조사 결과를 종합해 볼 때, 전구역에서 전기비저항 탐사결과 이상대 구간이 나타나 하부에 채굴적이 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 시추자료를 통해 탄층의 심도를 알 수 있었고 탄성과 Tomography를 통하여 탄층의 주향 및 경사 등 탄층의 3차원적 분포양

상을 파악할 수 있었다. 탐사결과를 종합해 볼 때, 도로 종단 방향 탄층 분포 현황은 Fig. 9와 같다.

5. 폐광산에 의한 상부지반 안정성 평가

5.1 안정성 평가 일반 사항

폐광산에서의 지표침하하는 채탄법, 채굴적 주변 암반의 역학적 성질, 함수율, 지질구조, 지하수 유동, 체적

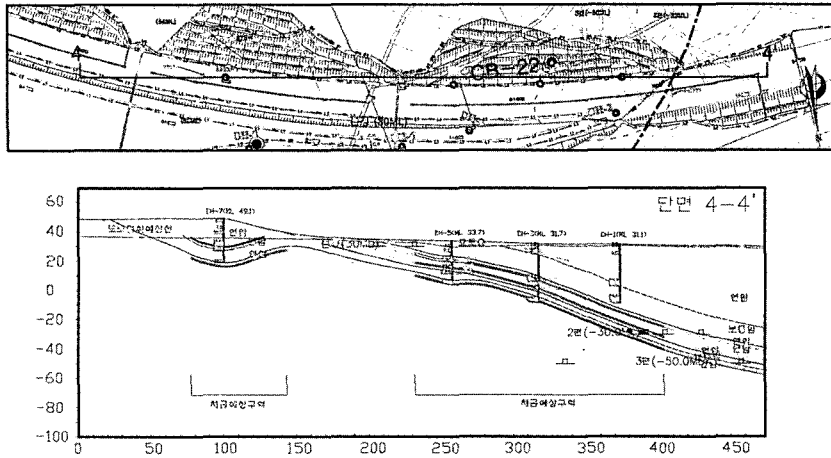


Fig. 9. Longitudinal profile of abandoned mine

Table 7. Subsidence types and safety analysis

구분	발생형태	안정성 평가
Sink Hole 형 침하	<ul style="list-style-type: none"> · 급경사 층에서 발생 · 작은 영역의 큰 침하량 · 비교적 얇은 심도에서 발생 	<ul style="list-style-type: none"> · 침하 메커니즘에 의한 평가 -파쇄암의 체적 팽창, Arch 이론, 한계평형법 · 경험적 방법에 의한 평가 -침하 발생 현장자료를 통한 침하 가능성 역해석 · 전산해석 -불연속체 모델 해석
Trough 형 침하	<ul style="list-style-type: none"> · 수평층 또는 원만한 경사층에서 발생 · 큰 영역의 작은 침하량 · 심도에 크게 영향을 받지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> · 침하 메커니즘에 의한 평가 -파쇄암의 체적 팽창 및 Arch 이론 · 전산해석 -연속체 모델 해석 · 지반계측 -연직 / 수평 변위 측정

팽창을, 채광 심도, 채굴적 높이, 채광을, 뒷채움과 지표의 지형적 요인 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이러한 지표침하의 원인으로는 지하 공동의 존재, 광주 혹은 탄주의 파괴, 천반의 파괴, 지질 구조(절리, 단층, 다이크) 등을 들 수 있다. 일반적으로 폐광산의 파괴 및 붕괴는 채굴공동 주위의 응력상태가 공동의 천정, 바닥, 광주나 파쇄대의 강도를 초과함으로써 발생한다. 즉 상부에서 작용하는 응력이 천반 또는 광주(Pillar)의 지반강도보다 크지 않을 경우 파괴가 일어나지 않으나 굴착 후 시간의 경과에 따라 지반강도 감소, 지반의 Creep 변형, 침투수압에 의한 Migration, 지하수에 의한 지반강도 감소 등 여러 가지 요인에 의하여 파괴에 이르게 된다.

지표침하를 유발하는 폐광산의 안정성은 침하이론, 전산해석, 그리고 계측을 통하여 안정성 평가가 가능하

며 각각의 침하 형태에 따라 Table 7과 같이 평가법이 달라진다. 먼저 Sink-hole형 침하의 경우 침하 메커니즘, 경험적 방법, 그리고 전산해석을 통하여 안정성을 평가할 수 있다. 침하 메커니즘은 Karfakis(1993)에 의해 제안된 체적 팽창이론, 합몰침하의 메커니즘에 착안하여 경사진 지층에 적용되는 한계평형법(Brady & Brown, 1985) 등이 있다. 경험적 방법으로는 침하발생 지역 현장자료를 통한 유사지역 침하가능성을 역 해석하여 안정성을 평가할 수 있고, Sink-hole형 침하를 가장 잘 대변할 수 있는 불연속체 모델 전산해석을 통하여 안정성을 평가할 수 있다.

Trough형 침하는 침하 메커니즘, 전산해석, 그리고 지반계측을 통하여 안정성을 평가할 수 있다. 침하 메커니즘은 파쇄암의 체적팽창이론과 Arch이론 등을 이용할 수 있고, Sink-hole형 침하의 경우와는 반대로 연속체

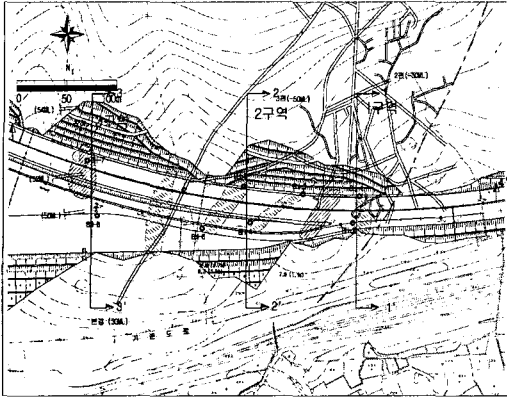


Fig. 10. 3 zones for stability analysis

모델을 이용한 전산해석이 효과적이다. 또한 일반적으로 직경 1~2 m의 지반이 좁고 깊게 침하하는 Sink-hole형 침하와는 달리 넓은 지역이 얇게 침하하므로 지반계측(연직변위, 수평 변위)을 통한 안정성 평가가 적합하다.

5.2 침하이론 및 전산해석에 의한 안정성 평가

본 현장은 탄층의 변화가 심하고 탄층과 지표의 지층이 불규칙하여 위경사승 채탄법이 적용되었고 Fig. 4와 같이 Sink-Hole형 지표 침하현상이 곳곳에서 발견되었다. 하지만 Fig. 3과 같이 1갱, 2갱, 3갱 등의 갱수로 개발된 탄광이 관찰되고, 이중 1갱에서 갱내 사갱으로 1편(-10 ML), 2편(-30 ML), 3편(-50 ML) 등을 개발하

여 본 지역에 대한 광역적인 Trough 형 침하의 가능성도 배제할 수 없는 실정이었다. 따라서 본 현장의 지표 침하에 대한 안정성 평가를 하기 위하여 Sink-hole형 침하 분석을 위한 이론(체적 팽창이론 및 한계평형법)과 Trough형 침하 분석을 위한 연속체 전산해석을 종합하여 안정성을 분석하였다. 해석적 평가를 위한 구역은 당 현장에서 실시된 지반조사 결과를 바탕으로 Fig. 10과 같이 구분하였다.

Karfakis(1993)에 의해 제안된 체적 팽창을 이룬 폐광산의 채굴고와 붕락고와의 관계를 분석하여 지반의 안정성을 분석하는 이론이고, Brady & Brown(1985)에 의하여 제안된 한계평형법은 풍화암이나 연약암에서 발생된 함몰침하의 메카니즘에 착안하여 경사진 지층에 공동이 굴착 되었을 때 적용할 수 있는 침하이론이다. 침하이론에 의한 안정성 검토결과, 체적 팽창율에 의하여는 구역 1은 안정, 구역 2와 구역 3은 불안정한 것으로 판정되었고 한계평형식에 의하여는 구역 1은 관찰, 구역 2와 구역 3은 보강으로 판정되었다. 따라서 구역 1은 관찰이 요구되고 구역 2 및 3은 보강이 필요함을 알 수 있었다. 체적 팽창율을 이용한 안정성 분석결과는 Table 8과 같고 한계평형식을 이용한 지반안정성 검토결과는 Table 9와 같다.

또한 과업구간내의 지반상태 및 지하갱도로 인한 상부 구조물의 영향을 고려하기 위하여 각 구역의 3개의 횡단면(구역 1, 구역 2, 구역 3) 및 1개의 종단면(구역 4)에 대하여 전산해석을 수행하였다. 전산해석을 위하여 유한차분 전산해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 사용하였고 해석에 필요한 암반 물성치

Table 8. Volume expansion analysis results

구역 (횡단면)	산출 제한				지표면까지 심도 (D)m	붕락고 (H)m	(D-H) m	안정여부	채굴적 최상부 채굴적 최하부
	채굴고 (t)	채굴공동 경사 (°)	채굴적 사거리 (w)	체적 팽창율 (B)					
구역 1 (1-1')	2.0 m	20	117	40%	41	(1) 15.3 (2) 18.0 (3) 20.6 (4) 26.0	(1) 25.7 (2) 23.0 (3) 20.4 (4) 15.0	안정	(1편 -10 ML) (3편 -50 ML)
구역 2 (2-2')	2.0 m	20	88	40%	13	(1) 20.3 (2) 23.0 (3) 25.6 (4) 31.0	(1) -7.3 (2) -10.0 (3) -12.6 (4) -18.0	불안정	(본갱 30 ML) (1편 -10 ML)
구역 3 (3-3')	3.0 m	20	30	40%	8	(1) 13.0 (2) 17.0 (3) 21.6 (4) 28.9	(1) -5.0 (2) -9.0 (3) -13.0 (4) -20.9	불안정	(본갱 30 ML) (1편 -20 ML)

주) 붕락형태 : (1)직사각형 (2)원추형 (3)뿔기형 (4) 원뿔형

Table 9. Limit equilibrium analysis results

구역 (횡단면)	지반물성치				동해고속도로 2공구 산출제원					지하수위에 따른 안전율 (Fs)	안전성	채굴적 최상부 채굴적 최하부
	γ (t/m ³)	ϕ (°)	c (t/m ²)	k	경사 (α)°	지하 수위 (d)m	주향 연장 (a)m	경사 연장 (b)m	심도 (h)m			
구역 1 (1-1')	2.5	30	0	1.5	20	16	60	58	41	a) 1.3 b) 1.4 c) 1.6	관찰	(1편 -10 ML) (3편 -50 ML)
구역 2 (2-2')	2.5	30	0	1.5	20	20	60	88	13	a) 0.7 b) 0.8 c) 0.8	보강	(본갱 30 ML) (1편 -10 ML)
구역 3 (3-3')	2.50	30	0	1.5	20	13.5	20	30	8	a) 0.6 b) 0.7 c) 0.7	보강	(본갱 30 ML) (1편 -20 ML)

주) a) 지하수위가 공동상부에 있을 때 b) 지하수위가 공동중간에 있을 때 c) 지하수위가 공동하부에 있을 때

Table 10. Mechanical properties for Finite differential analysis

구분	단위중량 (tf/m ³)	변형계수 (kg/cm ²)	포아송 비	점착력 (tf/m ²)	내부마찰각 (°)
탄층	1.8	0.04×10^4	0.3	10	25
연암	2.5	2.56×10^4	0.15	30	35
보통암	2.6	2.70×10^4	0.13	60	40

Table 11. Finite differential analysis results

수직변위 (cm) \	측압계수 (K ₀)			평가
	0.5	1.0	1.5	
1-1' (횡단면)	12.5	11.0	11.0	보강
2-2' (횡단면)	8.4	7.9	7.6	관찰 (보강)
3-3' (횡단면)	100	100	100	보강
4-4' (중단면)	15.3	16.2	17.6	보강

Table 12. Safety analysis results summary

구역 (횡단면)	침하이론				전산해석		종합평가	채굴적 최상부 채굴적 최하부
	지표면과 심도차 (D)m	응력 야치- 체적팽창 이론	한계평형 이론	결과	침하량 (cm) (K ₀ =1.0)	결과		
구역 1 (1-1')	41	안정	관찰	관찰	11.0	보강	보강	(1편 -10 ML) (3편 -50 ML)
구역 2 (2-2')	13	불안정	보강	보강	7.9	관찰	보강	(본갱 30 ML) (1편 -10 ML)
구역 3 (3-3')	8	불안정	보강	보강	100	보강	보강	(본갱 30 ML) (1편 -20 ML)

는 공내재하시험, 암석시험 등을 통하여 산정된 암반 물성치를 Table 10과 같이 각 단면에 적용시켰다. 전산해석 결과, 각각의 측압계수(0.5, 1.0, 1.5)에 대하여 수직 변위는 최소 76 mm 이상으로 크게 나타나 전구간에 보

강이 필요함을 알 수 있었다. 전산해석 결과는 Table 11과 같고 침하이론과 전산해석의 안정성 분석 결과를 종합하면 Table 12와 같다.

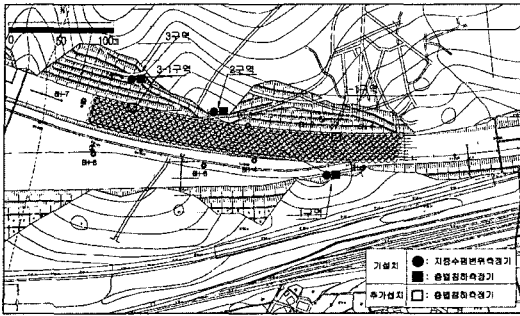


Fig. 11. 3 points for displacement measurement

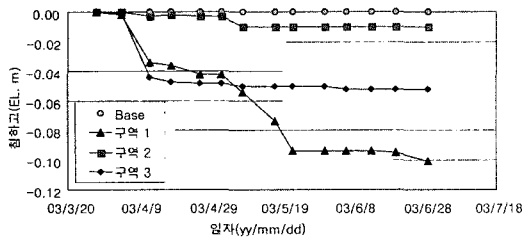


Fig. 12. Surface subsidence in 3 points

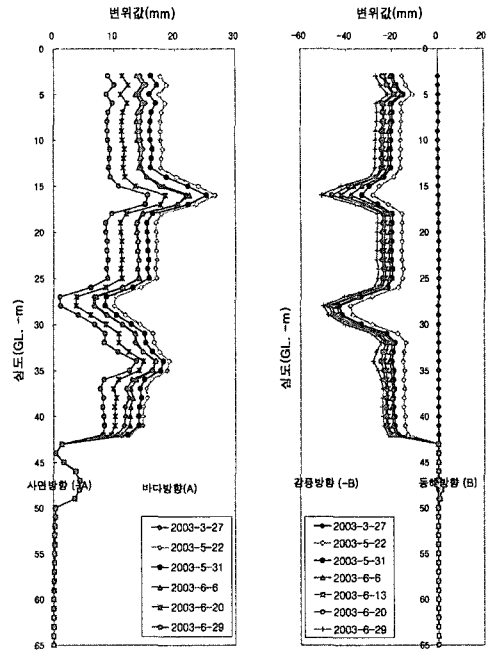


Fig. 13. Horizontal displacement in area 1

5.3 지반변위 계측에 의한 안정성 평가

지반변위의 측정은 크게 지반침하와 지반의 수평이동을 들 수 있다. 이 중 지반침하를 측정하기 위하여 원하는 위치에 강봉 또는 셀 등을 매설하여 측정한 결과를 부동점을 기준으로 절대 침하량으로 환산하거나 고정점과 상대대비하여 변위를 측정하게 된다. 일반적으로 전자는 시추공 익스텐소미터(Borehole Extensometer)를 사용하며 후자는 층별침하계(Multiple Point Settlement Gage)를 사용하는데 본 과업에는 층별침하계를 적용하였다. 또한, 지반의 수평변위는 부동 압반층까지 Casing을 설치하고 가속 감지식 수동 측정기를 사용하였다(한국도로공사, 2004).

당 현장에 설치된 층별침하계와 경사계(지중수평변위 측정기)의 설치위치는 Fig. 11과 같은데 계측기의 설치위치 및 천공 굴착심도는 채굴적 잔존 예상심도로 하였다. 계측은 2003년 3월부터 시작되었고 계측에 의한 지표침하 결과는 Fig. 12와 같고 구역 1의 수평변위 결과는 Fig. 13과 같다.

계측결과, 지표침하는 최대 100 mm가 발생하였고 수평 변위는 모든 구역(구역 1, 구역 2, 구역 3)의 폐광산이 존재하는 심도 이상에서 강릉방향과 바다 방향으로 발생하였다. 이를 나타내면 Fig. 14의 화살표 방향으로서 당 지역 층리의 주향 및 경사와 일치한다. 계측결과

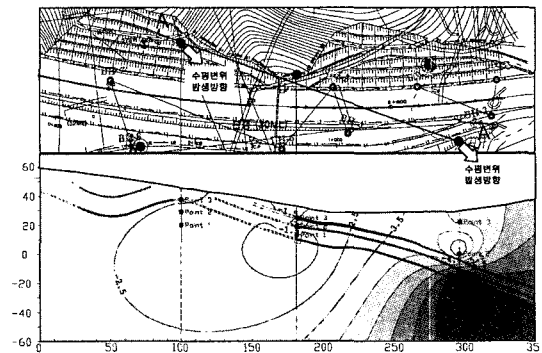


Fig. 14. Distribution of subsidence and direction of horizontal displacement

와 지질조사 결과를 비교하면 Fig. 14와 같은데 최대 지반침하 발생 지점이 탄층의 심도와 대체로 일치하므로 당 현장에서 폐광산에 의하여 지표침하와 지반의 수평이동이 발생하였음을 보여주고 있다. 그러나 장기 계측 결과 지표 침하값과 수평변위가 수렴하는 경향을 보여 지반의 거동에 따른 보강은 추후 장기 계측의 결과에 의하는 것으로 하였다.

Table 13. Abandoned mine support methods

구분	보강법	충전법
종류	<ul style="list-style-type: none"> · 상부보강 · 깊은기초 (Deep Foundation) · 공동내 피어건설 · 그라우트 기둥 (Grout Column) 및 케이스 · 상부 Slab 보강법 	<ul style="list-style-type: none"> · 수압식 충전법 (Hydraulic backfilling) · 공압식 충전법 (Pneumatic backfilling) · 충전 그라우팅 · 완전굴착과 재 충전 · 발파 함몰법

6. 폐광산의 지반 보강

6.1 보강 일반 사항

지표 안정화를 위한 보강공법은 크게 채굴적 상부 지반을 보강하는 공법과 공동 내 구조물을 시공하여 채굴적을 선택적으로 보강하는 방법 등의 보강법과 채굴공동을 강제로 함몰시키거나 충전재를 이용하여 채우는 충전법이 있다. 각각의 방법은 시공 대상지역의 특성에 맞게 적용시켜야 하는데 현재의 지보로써 지표를 지지하는 것이 불충분하다고 판단될 경우, 지보재의 강도가 현저히 낮아 충전법을 사용하여야 하는 경우도 있지만 현재 남아있는 지보재가 일정강도까지는 지지할 수 있는 경우에는 공동을 채우는 충전법보다는 현재의 지보를 보강하는 보강법이 경제적이다. 또는 지역의 특성에 따라 하나 또는 몇 개 공법을 복합적으로 적용할 수 있다. 대표적인 폐광산 지반 보강공법의 종류는 Table 13과 같다.

6.2 적용가능 공법 분석

당 현장은 폐광산의 안정성 분석을 위하여 해석적 평가를 실시하였고, 평가결과에 의하여 보강이 필요한 것으로 분석되었으나 지반체측 시 변위는 일정기간(약 3개월) 후 수렴하여 현재 폐광산 보강공법이 적용되지는 않고 있다. 하지만 장기 계측 시, 추후 변위가 발생할 시에는 폐광도 보강이 필요하고 이를 대비하기 위하여 본 절에서는 당 현장에 적합한 폐광산 보강공법을 선정하고자 하였다.

침하 방지공법에는 여러가지 공법이 있으나 특정지역에 대한 침하 방지공법을 선택하는 데에는 다양한 조사가 선행된 후 하나 또는 몇 개 공법을 복합적으로 적용한다. 특정 지역에 대한 침하 방지공법의 적용에 대하여는 국내외적으로 연구가 많이 이루어진 분야가 아니며 현재까지 제시된 침하 방지법의 대표적인 선택방법으로 1983년에 Richard E Gray와 Robert J McLaren이 제시한 적합성 도표와 적용성 도표가 있다.

적합성도표는 침하방지의 목적과 침하지역의 상태에 따른 침하 방지방법을 선택하는 것이고, 적용성 도표는

Table 14. Modified suitability chart

침하 방지공법	지상구조물 존재			구조물 존재가능			구조물 존재가능성 없음			
	침하방지	침하억제	침하복구	침하방지	침하억제	침하복구	침하방지	침하억제	침하복구	
충전법	수압식충전법	●	●	X	⊙	○	X	●	○	X
	공압식충전법	●	●	X	⊙	○	X	●	○	X
	그라우트 충전	●	●	X	⊙	⊙	X	●	●	X
	복개, 재충전	X	X	X	⊙	⊙	⊙	●	●	●
	동적압밀법	X	X	X	○	○	○	○	○	○
	함몰침하	X	X	X	○	○	○	●	○	X
국부보강법	상부보강법	○	○	X	○	○	X	●	○	X
	그라우트 기둥	○	X	X	⊙	○	X	●	○	X
	광산 내 피어	●	X	X	⊙	X	X	●	X	X
	깊은기초	○	X	X	○	X	X	X	X	X
	상부Slab 보강	X	X	X	○	○	○	●	○	X

주) ●: 적합, ○: 보통, X: 부적합

Table 15. Modified application chart

침하 방지공법	광산											지층상태			지하수 침수 상태	대상 지역 접근 난이		
	공동 접근 난이	공동 형상 불규칙	탄층 갯수 2개 이상	공동깊이 (m)			공동높이 (m)			경사 (%)			습윤 저항 적음	암반 강도 낮음			붕괴 암석 많음	
				<15	15~30	>30	<1	1~2	>2	<10	10~50	>50						
충진법	수압식충진법	○	X	○	●	●	○	○	●	●	●	○	○	X	●	X	○	○
	공압식충진법	○	X	○	●	●	○	○	●	●	●	○	○	●	●	X	○	○
	그라우트 충전	○	X	○	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	●	○	○	X
	복개, 재충전	●	○	○	●	○	X	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	X
	동적압밀법	●	○	X	●	X	X	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	X
함몰침하	●	○	○	●	○	X	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	
국부 보강법	상부보강법	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	X	○	X
	그라우트 기둥	●	●	○	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	○	X	○	X
	광산 내 피어	X	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	X	X	●
	깊은기초	●	○	X	●	○	X	○	●	●	●	●	●	●	○	●	○	X
상부Slab보강	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	X	○	○	X	

주) ●: 적합, ○: 보통, X: 부적합

적합한 침하 방지방법의 시행과 관련하여 기술적인 면에서 점수를 부여하고 최고 점수를 받은 방법을 시행의 측면에서 가장 적합한 방법으로 고려하는 것이다.

본 고에서는 적합성 지표와 적용성 도표를 사용 목적에 맞게 수정하여 동해 2공구 현장에 적용 가능한 적절한 보강공법을 선정하고자 하였다. 본 노선 상부에는 구조물 존재 가능성이 없고 침하 방지를 목적으로 하므로 동적압밀과 깊은기초공법을 제외한 수정적합성 도표를 Table 14와 같이 제안하였다. 적용성 분석결과, 최적의 공법은 Table 15의 수정 적용성 지표 중 상부보강법, 부분 그라우팅법, 상부 Slab보강법으로 선정되었다. 따라서 당 현장에 적용 가능한 최적의 보강공법은 부분적인 충전 후 상부지층 보강법, 또는 상부 Slab에 의한 폐광산 지역 통과공법이 가장 적합한 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 고에서는 국내 채탄법의 특징을 파악한 후 동해고속도로 2공구 현장의 폐광산에 대한 지반조사와 안정성 평가를 통하여 보강 여부를 판단하였고, 추후 당 현장에 적용 가능한 보강공법을 정립한 바, 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 우리나라 탄층은 지각변동으로 습곡작용을 받아 연속성이 부족하여 채탄작업의 기계화와 개발단위의 대형화를 제약하는 요인이었다. 따라서 장벽식 채탄

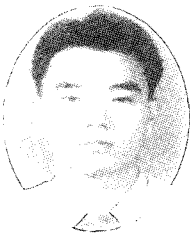
으로 인하여 Trough 형 침하가 발생하는 외국의 경우와 달리, 국내 지반침하의 경향은 위경사승 봉락식 또는 중단 봉락식 채탄법에 의하여 Sink Hole 형 침하와 Trough 형 침하가 복합적으로 발생하고 있다.

- 2) 동해고속도로 2공구 현장의 금산탄광은 1989년 석탄합리화법에 의해 폐광되었고 현장의 폐광산 분포를 파악하기 위하여 지반조사를 실시하였다. 그 결과, 전기비저항 탐사를 통하여 이상대 구간을 구분하였고 시추조사를 통하여 탄층의 지표 하 심도와 탄폭에 대한 정확한 정보를 파악할 수 있었으며 탄성과 Tomography 등 현장시험을 통하여 탄층에 대한 3차원적인 분포양상을 파악할 수 있었다.
- 3) 폐광산에 의한 안정성을 평가하기 위하여 침하이론을 적용하였고 전산해석과 지반변위 계측을 실시하였다. 먼저 침하이론에 의하여 구역 1, 구역 2, 구역 3은 관찰, 보강, 보강으로 평가되었고 전산해석에 의하여 구역 1, 구역 2, 구역 3은 보강, 관찰, 보강으로 평가되어 결론적으로 탄층 상반 모든 구간에 보강이 필요하였다. 그러나 장기 계측 결과, 지표 침하값과 수평변위가 수렴하는 경향을 보여 지반보강은 추후 장기 계측의 결과에 의하여 결정하는 것으로 하였다.
- 4) 수정 적합성 지표와 수정 적용성 도표를 적용한 결과, 최적의 보강공법은 부분적인 충전 후 상부지층 보강법 또는 상부 Slab에 의한 폐광산 지역 통과공

법이 가장 적합한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 석탄합리화 사업단, 1997, 채광지역 지반침하 메커니즘 및 침하보강 공법에 관한 연구, 1-292.
2. 한국도로공사, 2002, 동해고속도로 2공구 지반침하구역 정밀지질조사, 1-121.
3. 대한광업진흥공사, 1990, 한국의 석탄광(상).
4. Karfakis, M. G., 1993, Residual Subsidence over Abandoned Coal Mines, Comprehensive Rock Engineering, Vol 5-1, p 451-476.
5. Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 1985, rock Mechanics for Underground Mining, George Allen & Unwin., 1-527.
6. 한국도로공사, 2004, 동해고속도로 2공구 사면 계측관리 최종보고서, 1-20.



문상호

1997 한양대학교 자원공학과 공학사
 1999 한양대학교 암석역학 공학석사
 2002 Texas A&M Univ.
 Geotechnical Eng. M.E.

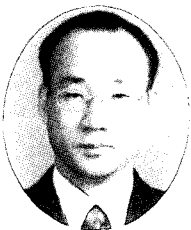
Tel: 02-2005-9226
 E-mail: shmoon1@lgenc.co.kr
 현재 LG건설(주) 기술본부 지하공간팀



나승훈

1993 한양대학교 자원공학과 공학사
 1995 한양대학교 자원공학과 공학석사
 2000 한양대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 02-2005-9221
 E-mail: shra1@lgenc.co.kr
 현재 LG건설(주)기술본부 지하공간팀
 과장



이상필

1988 서울대학교 자원공학과 공학사
 1990 서울대학교 자원공학과 공학석사
 2004 서울대학교 지구시스템공학부
 박사과정

Tel: 02-2005-9220
 E-mail: splee@lgenc.co.kr
 현재 LG건설(주) 기술본부 지하공간팀
 팀장