

터널 굴착시 암반예측시스템 개발 (솔안터널)

Development of Rockmass Prediction System during tunnel excavation (Sol-An Tunnel)

김용일* 조상국** 양중화*** 김장수**** 이내용*****
Yong-Il Kim Sang-Kook Cho Jong-hwa Yang Jang-Soo Kim Nai-Yong Lee

ABSTRACT

In this paper, a new systematic method will be introduced, in which a Rock-mass Prediction System(RPS) predicts the geological conditions and rock mass movements before tunnel excavation and the appropriate counter-measures are taken in the expected weak zones during tunnel construction. The Rock-mass Prediction System(RPS) consists of the LIM, a horizontal core drilling and a seismic exploration method (TSP/HSP). In the Rock-mass Prediction System(RPS), the seismic exploration method (TSP/HSP) gives information on the locations of the weak zones such as major faults and voids in wide-range, and the horizontal core drillings are utilized to find exact location and widths of the faults or voids near the weak zones which was predicted by the seismic exploration method (TSP/HSP). The LIM is used to find the hardness of the rock mass and small weak zones near the excavation face. The Rock-mass Prediction System(RPS) was successfully applied to the Sol-An Tunnel and the effectiveness of the system was verified.

1. 서론

터널공사에 있어서 정확한 지질조건의 파악은 안전한 시공을 위한 중요 요소이다. 지질조사는 설계단계에서 부터 필수적으로 행해지는데, 지표지질조사, 시추공 조사, 지구물리탐사 등이 주로 이루어진다. 특히, 물리탐사는 시추조사가 지니는 지엽적 한계를 극복하고, 시공부지의 전체적인 지질파악이나 특징적인 지질구조에 대한 많은 정보를 제공한다는 점에서 효과적이다.

본 영동선 동백산-도계간 철도이설공사는 총 연장 16.2km인 장대 터널공사로서 함탄층, 공동 및 단층 등 복잡한 지질구조를 가진 부지 위에 시공되고 있다. 따라서 터널 굴착 및 지보공 시공시 막장 및 불연속면의 예측과 처리대책이 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

본 고에서는 시공중 암반예측시스템을 바탕으로 터널안전시공에 적용되는 과정을 소개하고자 한다

* (주)대우건설 차장, 공학박사, 정회원
** (주)대우건설 전무이사, 정회원
*** (주)대우건설 상무이사, 정회원
**** (주)대우건설 철도청 공사팀장, 정회원
***** (주)대우건설 대리, 정회원

2. 공사개요

- 공 사 명 : 영동선 동백산-도계간 철도이설 건설공사
- 공 사 비 : 337,112 백만원(VAT 별도)
- 계약기간 : 1999. 12~2007. 9 (94개월)
- 시 공 사 : (주)대우건설, 현대건설, SK건설, 요진산업
- 설 계 사 : (주)유신엔지니어링, (주)청석엔지니어링
- 감 리 자 : (재)한국철도기술공사, (주)평화엔지니어링
- 공사내용 : 총 18.3KM (본선터널 16.2km, 사갱터널 2.1km)
- 공사현황 단위: m

구 분	시 점 부			제1사갱부			제2사갱부			총 계	비 고
	개 착	본 선	계	사 갱	본 선	계	사 갱	본 선	계		
터 널	60	280	340	1,510	130	1,640	600	1,150	1,750	3,730	1, 2사갱 굴착완료

3. 터널조사 및 암반분류

당 현장에 적용된 암반예측조사와 암반분류에 관한 내용은 다음과 같다.

3.1. 터널암반예측을 위한 조사

구 분	조 사 내 용		비 고
시공전	○자료조사 ○지형·지질조사 ○탄성파탐사	○지표답사 ○수문조사 ○보링조사	○정확한 자료획득 곤란 ○대표성 결여로 시공 중 막장과의 많은 차이
시공중	○막장관찰조사 ○선진보링조사 ○시공계측	○수평시추조사 ○탄성파탐사 ○우회갱 조사	○설계 및 시공법 변경 ○보조공법의 선정 ○터널주변의 영향 검토
시공후	○영구계측		○팽창지반 등 연약구간의 장기간 지반거동

3.2 터널의 대표적 암반분류(당 현장 기준)

구 분	분류항목 및 점수	점수별 등급분류					비 고
		점 수	등 급	락볼트	강지보	굴진장	
RMR	○암석일축압축강도 15점 ○R Q D 20점 ○불연속면의 상태 30점 ○불연속면의 간격 20점 ○지하수상태 15점	66이상 65~54 53~47 46~32 31이하	PS-1 PS-2 PS-3 PS-4 PS-5	Random System " " "	삭체 설치 " " "	4.0m 3.5m 2.5m 1.5m 1.2m	○굴착 및 지보패턴의 설계변경 지침 ○발주처별 분류 기준 통일성 부족 ○경험적 판단 필요(주관적 판단 오류)
	○불연속면 방향보정 0~-12점	점 수	등 급	* Q 값 산출식			
Q-system	○R Q D 계수 RQD ○절리군의 수 Jn ○절리면의 거칠기 계수 Jr ○절리면의 변질 계수 Ja ○절리면의 간격수 계수 Jw ○응력저감계수 SRF	20이상 3~20 1~3 0.1~1 0.1이하	PS-1 PS-2 PS-3 PS-4 PS-5	Q = $\frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$			○사전조사를 통한 암반 예측으로 보완 및 계측 Feed-Back

3.3 주요 암반조사 방법

적용 단계	주요탐사법	용도	적용 방식	주요내용	비고
설계시	- 탄성파탐사법 - 비저항영상법 - 자기탐사법	설계	-	- 터널 전구간 조사 대상 (RANDOM) - 굴착 변형이나 용수 예측	지표탐사 및 부분조사
시공중	- 선진천공	단거리	LIM T-CAD	- 굴착 전방 수 M 탐사 - 며칠 후의 지반 연경도 검지 - 천단이나 지질경계면의 안정판단과 보조공 선정 등 일상 시공관리에 유효정보 제공	- 천공장비 장착 - 과거에는 천공기사의 감(感)에 의한 지반판정
	- 선진수평시추	중거리	NX BX BQ	- 굴착 전방 50M~100M 정도의 중거리탐사 - 코아상태 확인으로 지반의 연경도 파악 - 단층파쇄대, 연약층, Water Pocket 등 지질경계면의 위치나 규모파악	작업중단 불가피 (속도 1.5M/HR)
	- 탄성파탐사	장거리	TSP HSP	- 굴착 전방 100M~200M 정도의 장거리 탐사 - 단층파쇄대, 연약층, Water Pocket 등 지질경계면의 위치나 규모파악	

3.4 터널 시공 중 조사

구분	주요내용	기대효과	비고
선진천공 (LIM)	○ 천공장비인 점보드릴에 선진천공기록장치 (LIM Recorder) 장착 ○ 천공시 저장 기록된 정압(Tool Pressure), 토크(Torque), 굴착속도(Instantaneous Advance Speed) 등 자료 판단으로 암반 파악	막장 전방지반 파악 가능	- 코아관찰 불가
선진수평시추 (NX, BX 또는 BQ)	○ 회전타격식이나 타격식으로 선진 시추 ○ 코아로부터 단층파쇄대, 연약층의 경계 위치 및 규모 등 막장전방의 지반상태 파악 ○ 유입수나 유입가스 조사	공동탐사 단층위치 및 상태 고압수 해소	- 지보계획 및안전 시공에 유효 - 본공사 일시중단 해야 하는 문제점

구 분	주 요 내 용	기 대 효 과	비 고
물리탐사 (TSP, HSP)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 터널내 탄성과 발생시켜 단층이나 불연속면에서 반사된 신호 분석 ○ 본래 TBM을 위해 개발되었으나 NATM에서도 동일 적용 ○ 적용한계 <ul style="list-style-type: none"> - 신뢰성 있는 탐사대상 : 터널전방 45° 이내에 위치하는 평면/준평면 형상의 단층, 석회층, 채굴적 - 탐지가능대상 : 큰 직경의 연직원추형 수직구, 싱크홀(Sinkhole), 상대적으로 큰 직경의 수평터널, 갱도, 용해동 - 거의 탐지 불가 : 상대적으로 작은 규모의 터널이나 수직구, 터널전방 45° ~90° 에 위치한 평면형 단층 	<p>단층위치 예상</p> <p>암반의 역학적 특성 예측</p> <p>석회동/폐갱 등의 공동조사 보완자료</p>	<p>- 정확한 DATA 획득 및 분석의 어려움</p>

4. 터널 시공 중 취약구간 대응방안

당 현장은 함탄층, 단층 및 파쇄대, 폐갱 및 공동부분 등의 지질구조를 가지고 있어 지반조사의 결과를 토대로 굴착을 수행해야 하는 어려움이 있다. 사갱의 전반부는 단층으로 접촉하는 부분이거나 또는 이에 인접하는 부분이며, 갱구부에는 단층이 형성되어 있어 심한 파쇄 및 풍화 상태를 보인다. 이에 따라 시공중, 지질조건별로 취약구간에 대한 효과적인 대응방안을 마련했다.

4.1 시공 중 유형별 대응방안

항 목	적 용 개 소	기 대 효 과
프리그라우팅	대규모 단층파쇄대	<ul style="list-style-type: none"> - 단층대 차수 - 파쇄대 고결
강판단그라우팅	대규모 단층파쇄대	<ul style="list-style-type: none"> - 점도 협재 단층대 보강 - 대규모 단층대 - 천단부 대규모 봉락 방지
휘 폴 링	소규모 단층파쇄대	<ul style="list-style-type: none"> - 용수 없는 소규모 단층대 - 천단부 소규모 봉락 방지
Swellex 볼트	함 탄 층 용 수 부	<ul style="list-style-type: none"> - 느슨한 지반에서 공벽 자립도가 저하된 구간 - 지반 압밀효과
경량기포시멘트 충전	공 동 부	<ul style="list-style-type: none"> - 공동의 추가적인 봉락 방지 - 채움재의 단위중량 감소로 토압
배기용 FAN 설치	사 갱 부	<ul style="list-style-type: none"> - 송기용 환기설비 보완 - 간이집진설비 부착하여 등로터널의 집진효율 증대

4.2 지질조건별 대응방안

지질조건	탐사방안	기대효과
석회암층 (막골층 및 풍춘층)	선진수평시추 + 탄성파탐사 + 선진보링	- 공동발생시 공동충진 - 경량기포시멘트 그라우팅의 적용
함탄층 (장성층)	선진수평시추 + 선진보링	- 국부적 석탄층은 Swellex 볼트로 신속 보강 - 막장 천단부 용수 발생시 용수가 없는 경우에는 휘폴링, 다량 용수가 있는 경우 강관다단그라우팅 검토
단층대 통과구간	선진수평시추 + 탄성파탐사 + 선진보링	- 용수량 많은 대규모 단층대에는 Swellex볼트, 프리그라우 팅, 강관다단그라우팅 검토 - 용수량이 다소 있는 중소규모 단층대에는 Swellex 볼트, 강관다단 그라우팅 검토 - 용수가 없는 단층대에는 휘폴링 검토

4.3 부분적 석탄층 조우시 대책

천단부나 측벽에서 석탄층 낙하가 우려될 경우에는 슛크리트 부착이 어려우므로 와이어메쉬 설치 후 슛크리트 격자지보 시공을 실시했고, 격자지보 하부에 석탄층이 부족하여 지지력 부족이 우려되는 경우 기초저면을 일부 굴착하여 콘크리트로 치환했다.

5. 터널굴착 암반예측 시스템

5.1 터널조사의 특수성

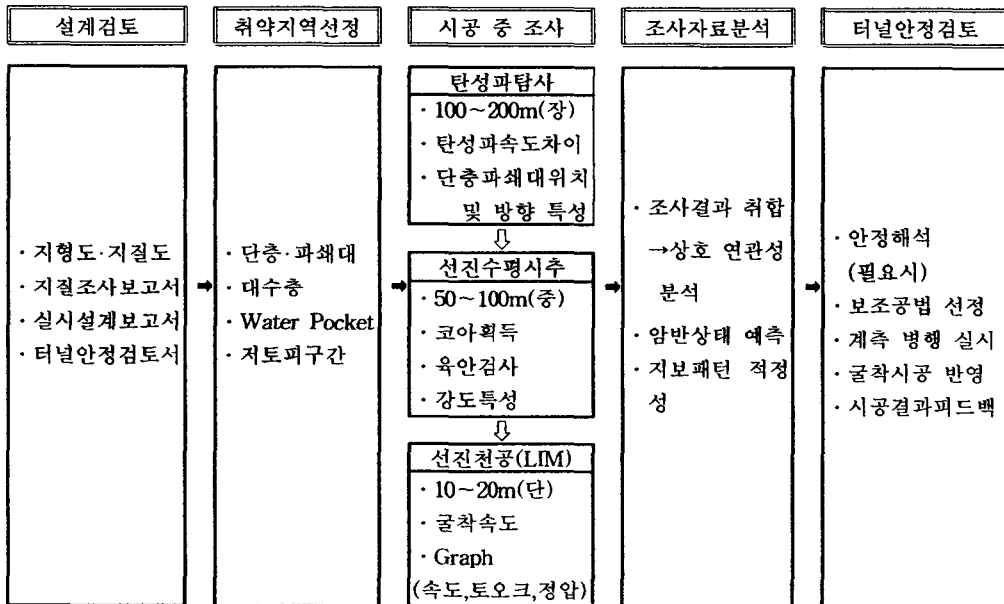
터널조사는 경제적, 기술적 제약으로 대심도 구간에 대한 정확한 데이터를 얻기가 어렵다. 또한, 저토피의 근접구조물 구간은 제한적인 사전조사로 인해 대표성이 낮고, 굴착 전 대상지반을 직접 확인이 곤란한 특징이 있다. 그러한 결과 시공 중 막장관찰에 의한 암반평가와 설계와의 차이가 나타날 수 있다.

당 현장에서는 지질조건에 따른 위험요인을 파악 후, 조사시기 및 조사항목을 설정하여 암반예측시스템을 활용하였고, 그 시공결과를 feed-back하였다.

5.2 당현장 터널(솔안터널)의 위험요인

지질조건	위험요인	터널공사 영향	발생가능 및 시공중 조사 필요성
석회암층 (막골층/ 풍촌층)	공 동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공동이 터널 근접시 안정 저해 ○ 공동을 통한 대량 유입수 발생 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 100M 이상 심도의 터널계획고 주변탐사는 현실적으로 어려워 시공중 조사 필요
함탄층 (장성층)	갱 도 (폐갱)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 터널안정성 저해 ○ 침수된 폐갱의 경우 지하수 유입 ○ 폐갱 채굴적의 지속적 붕괴 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광산개발 보고자료에 의하면 터널영향권의 갱도 없음 ○ 지반조사 및 안정성 확인 차원에서 시공중 조사 필요
	굴착중 개스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 갱내 폭발사고 ○ 작업원 질식 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공사 중 환기가 지속되므로 가능성 희박 ○ 공사중 터널내 개스농도 측정 필요
	석탄층 조우	<ul style="list-style-type: none"> ○ 막장붕락 ○ 터널 자립성 저하 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 탄층 두께가 1~2M이므로 소규모의 붕락 가능성 ○ 석탄층 조우시 국부적 보강대책 필요
단 층	미끌거림면 피 압 수	<ul style="list-style-type: none"> ○ 막장붕락 ○ 과다 유입수에 의한 시공성 저하 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주요 단층 확인은 이루어졌으나 터널공사중 정확한 위치 및 용수여부에 대해 시공 중 조사 시행 필요

5.3 터널굴착 암반예측 시스템



6. 적용 사례

6.1 선진보링에 의한 터널탐사

□ 선진보링에 의한 암반예측(LIM RECORDER, T-CAD)

- 장비명 : FORALIM- I
- 제작사 : 프랑스 LIM SA company
- 제 원 : 중량 5kg, 높이 220mm, 폭 370mm, 두께 : 155mm
- 운 용

<ul style="list-style-type: none"> • 원위치 천공 및 데이터 자동기록 - 심도 · 시간 · 굴착속도(I.A.S) - 압력(T.P) · 토오크(Torque) · 회전수 	
<ul style="list-style-type: none"> • 천공데이터의 PC 접속 	
<ul style="list-style-type: none"> • 천공데이터의 프린터 출력 - PC 프린터를 이용한 출력 - 심도분포도 작성 	
<ul style="list-style-type: none"> • 암반 평가의 예측 - 암반 등급과의 상관성 파악 - 지질분포상황 파악(지질통계 수법) 	

· 자료판독

- 정압(Tool Pressure) : 일정하게 유지, Rod연장시 정압(TP)이 순간적으로 떨어짐
→ Torque, 속도에 직접 영향을 주므로 판독 유의
- Torque / 굴착속도 : 유사 경향의 그래프, 정압의 변화에 따른 굴착속도 변화를 고려하여 판독
- 용수 : 대수층 또는 Water Pocket 등

· 적용한계

- 현재 막장과의 상대적인 평가이며, Torque/굴착속도의 변화에 따른 판독기준 설정
 곤란함 → 굴착속도 범위와 시공패턴과의 절대평가 곤란함
- 판독자의 막장판단 능력에 따라 암질예측정도에 차이가 있어 객관성 유지가 다소곤란
- 점(POINT) 예측이므로 대표성 결여

출력결과

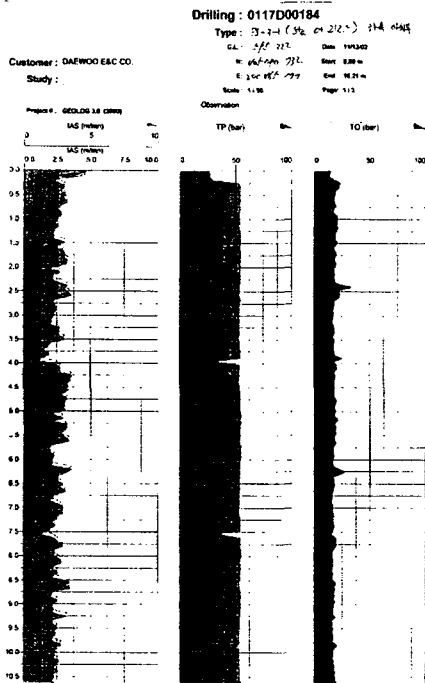


그림 1 . LIM Recorder 출력결과

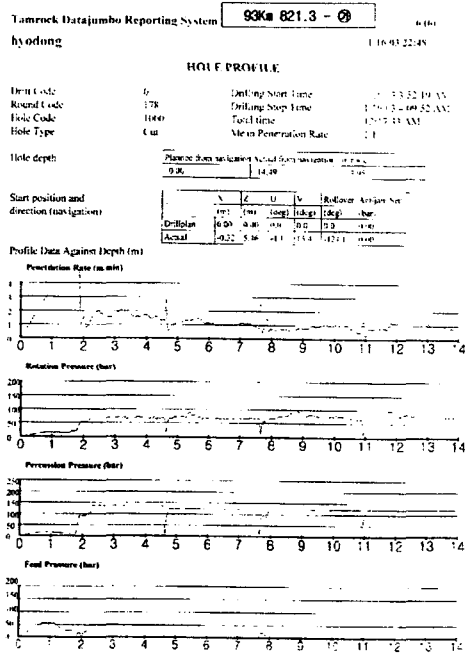


그림 2 . T-CAD 출력결과

6.2 선진수평시추에 의한 터널탐사

- 목 적 : 코아 획득으로 막장 전방 예측 및 유입수, 유입가스 조사
- 규 격 : NX, BX 또는 BQ
- 용 도 : 굴착전방 50M~100M 정도의 중거리 탐사
- 특 징
 - 코아 육안확인 및 일축압축강도 시험으로 암반의 불연속성, 암강도, 충전물 등의 암상태 판별가능
 - 터널안정성에 직접 영향인자인 유입수 확인 및 고압수 해소
 - 유입 가스의 조사
 - 탐사 중 터널 굴착 중단 불가피(100M 탐사 기준 3~4일 굴착 중단)
 - 점(Point) 탐사로 대표성 문제
 - 암반상태에 따라 작업난이도 및 작업속도 편차가 큼

구 분	시 점 부	제 1 사 갱	제 2 사 갱
주구성암	석 회 암	사암 및 석회암	세일 및 사암
일축압축강도	우 수	우 수	양호 내지 불량
선진수평시추	작업조건 양호 (50M시추 /24HR)	작업조건 양호예상	탄질세일(Coal Shale)층으로 암질변화가 심하여 작업속도 저하가 현저할 것으로 예상

6.3 단성파탐사에 의한 터널탐사

- 목적 : 전방의 지질상태 파악 및 불연속면 예측
- 방법 : TSP(Tunnel Seismic Prediction), HSP(Horizontal Seismic Profiling)
- 장비 : 3성분 지오폰 및 단성파 탐사 기록계

탐사 방법	투 입 장 비
TSP 탐사	· TSP 202 SYSTEM 삽입봉을 이용한 2성분(x, z) 가속도계 · 기록계 : Husky(영국)
HSP 탐사	· 터널 벽면 부착식 3성분(x, y, z)속도계(OYO Geospace, 미국) · 기록계 : Tellaloc Mark 6(ABEM, 스웨덴)

□ TSP와 HSP의 장단점 비교

탐사법	장 점	단 점	비 고
TSP	多송신/少数신(삽입식센서로 수신신호의 품질양호)	수신 개수가 적어 자료 부족에 의한 영상화 품질향상에 한계	수신신호는 양호하나 자료의 수가 절대 부족하여 전방예측을 위한 영상화에 어려움(장시간 소요)
HSP	少송신/多数신(송수신자료가 많아 결과 영상의 품질이 크게 향상)	수신부를 벽면에 부착시키므로 표면파를 제거하기 위한 특수 자료처리방법이 필요	수신신호에 대해 f-k 필터에 의한 표면파제거기법 적용 등 적절한 자료처리를 수행하면 영상단면의 해상도가 크게 향상(단시간 소요)

□ 탐사구간 및 위치

구분	HSP	TSP
탐사구간	STA.106K585~STA.106K625	STA.106K645~STA.106K690
송신원 위치	STA.106K625	STA.106K664~STA.106K690
막장위치	STA.106K579	STA.106K691
예측구간	STA.106K580~STA.106K430	STA.106K690~ STA.106K840

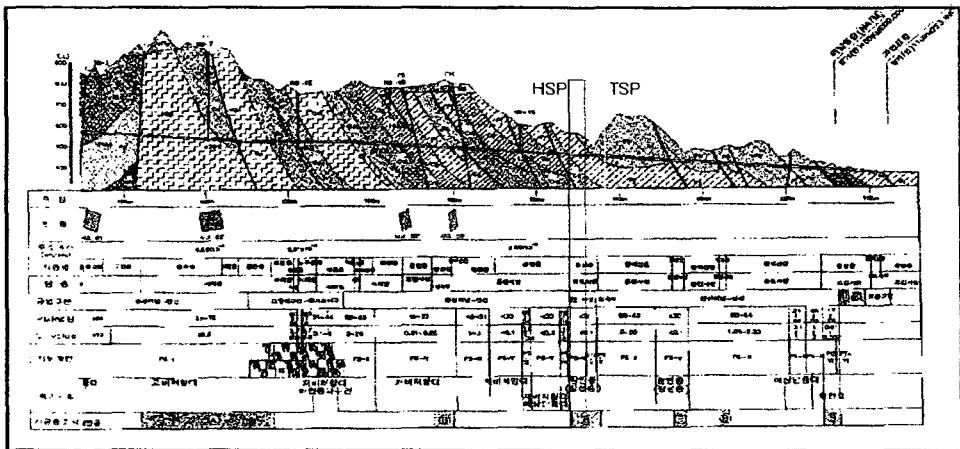


그림 3. 탐사위치 단면도 및 지보패턴 (제2사갱-본선접속부)

□ TSP와 HSP의 송수신 배열도

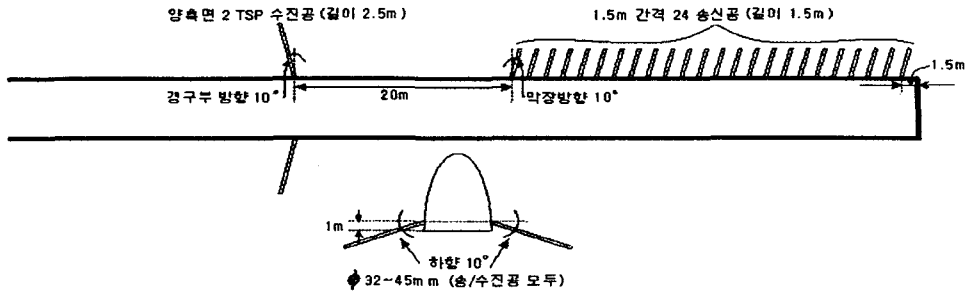


그림 4. TSP 송수신 배열도

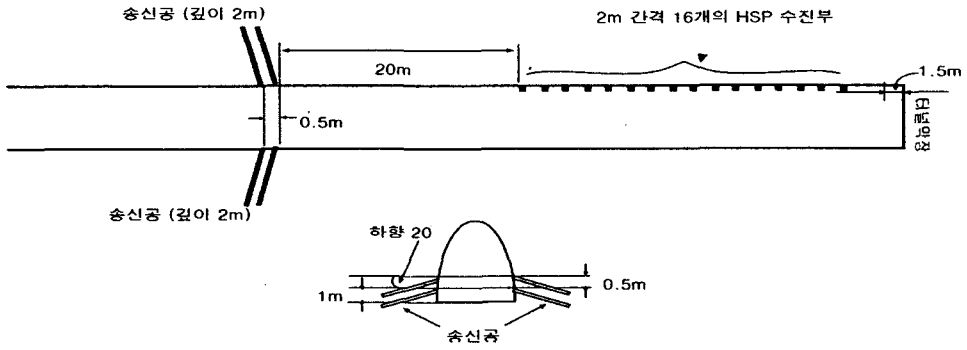


그림 5. HSP 송수신 배열도

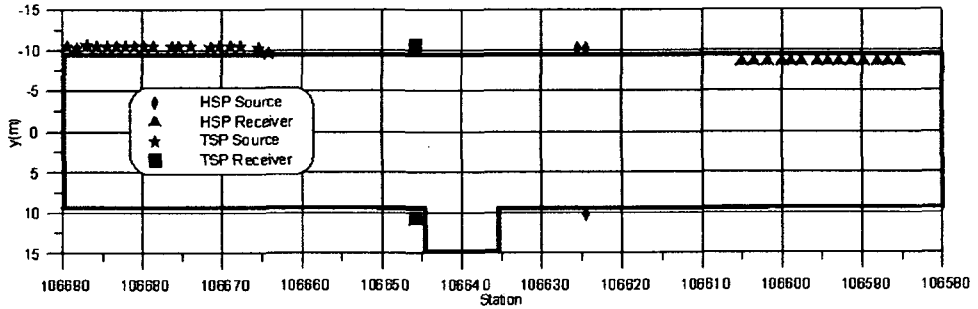
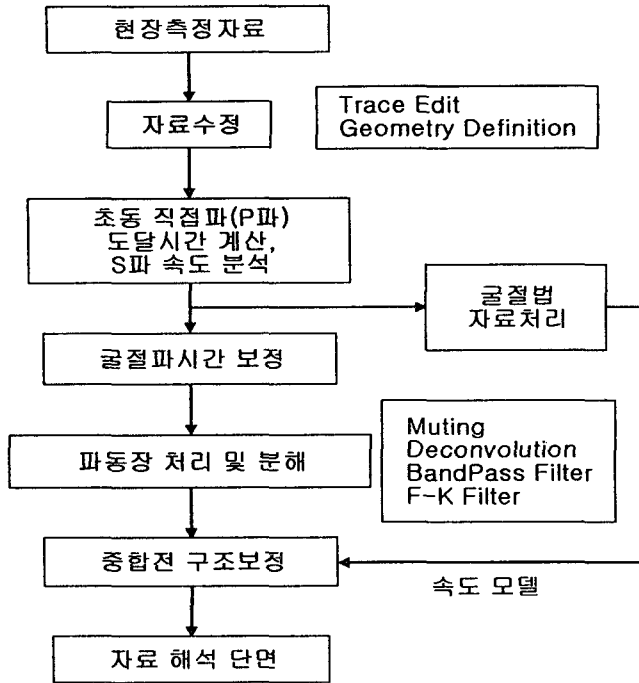


그림 6 . TSP 및 HSP 탐사 송/수신기 layout

□ TSP 및 HSP 자료처리 및 해석 순서도



□ TSP 탐사과정

제 2사갱과 본선이 만나는 지점(STA. 106K640)을 기준으로 하여 종점방향으로 TSP 탐사를 수행하였다. 삼입식 센서봉을 이용한 수신기는 제 2사갱과 본선 대단면 터널이 시점방향에서 교차하는 지점에서 약 1m 정도 거리를 둔 지점의 양쪽 터널 벽면에 1개씩 총 2개를 설치하였고, 송신원은 터널 진행방향 우측 벽면에 총 19개를 설치하였다. (사진 1~6)



사진 1. 삼입식 센서봉 및 수신공

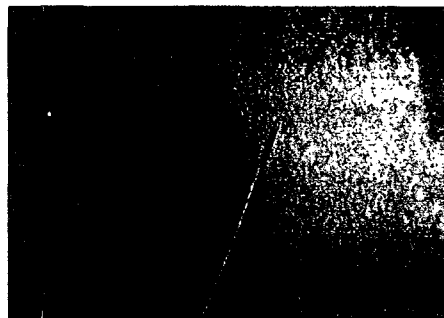


사진 2. 송신용 발파공

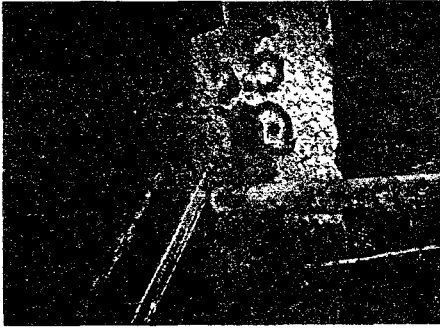


사진 3. 터널 벽면에 설치한 TSP 센서

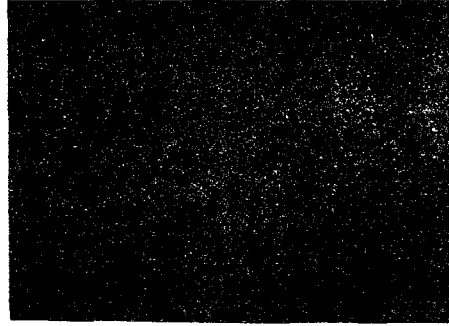


사진 4. 장약 및 전색한 발파공

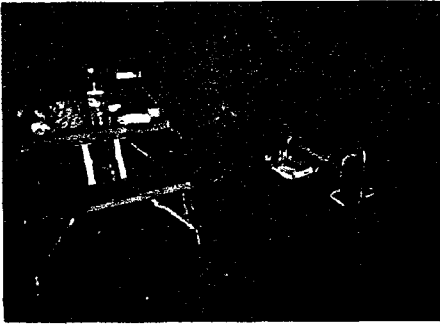


사진 5. TSP 측정 장비

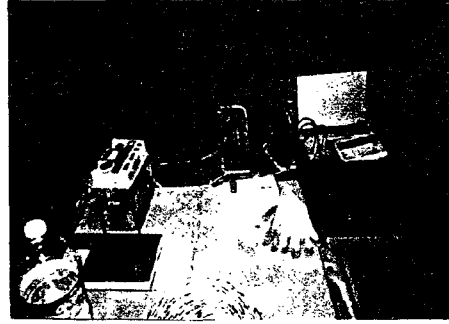


사진 6. 발파 및 기록

□ HSP 탐사과정

제 2사갱과 본선이 만나는 지점(STA.106K640)을 기준으로 하여 시점방향으로 HSP 탐사를 수행하였다. 송신원은 제 2사갱과 본선 대단면 터널이 시점방향에서 교차하는 지점에서 약 10m 정도 거리를 둔 지점의 양쪽 터널 벽면에 2개씩 총 4개를 설치하였고, 수신기는 터널진행방향 좌측 벽면에 총 14개를 설치하였다 (사진 7~12)

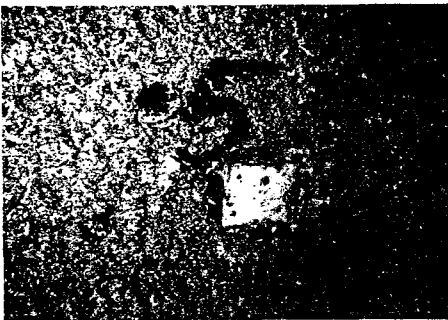


사진 7. 수신기 부착용 판 설치



사진 8. 송신용 발파공 천공



사진 9. 3성분 수신기 터널벽면에 설치

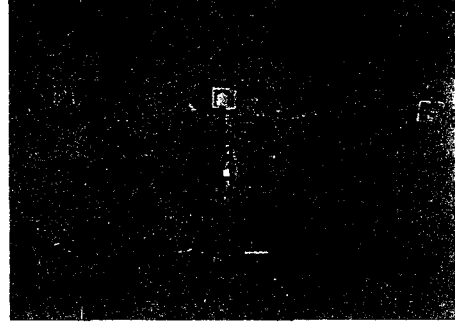


사진 10. 수신기와 Cable 연결



사진 11. 송신공에 화약 장약 및 전색

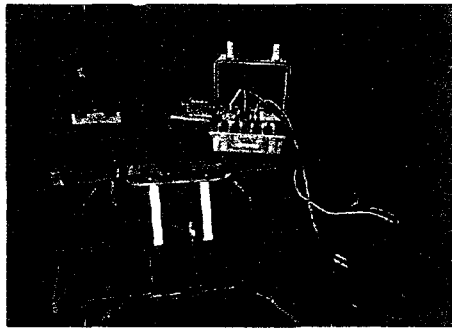


사진 12. 자료 측정

□ 자료처리 및 해석

- TSP (STA. 106K640 기준 강릉 방향)

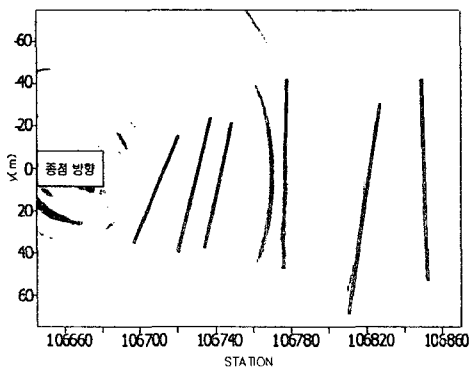


그림 7. TSP 자료를 이용한 Krichhoff 구조 보정결과 ① x-y 방향의 평면도

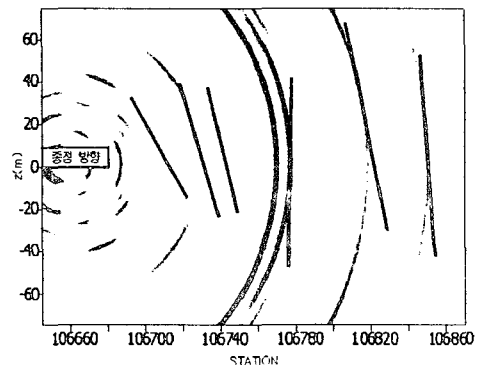


그림 8. TSP 자료를 이용한 Krichhoff 구조 보정결과 ② x-z 방향의 단면도

- HSP(STA.106K640 기준 영주 방향)

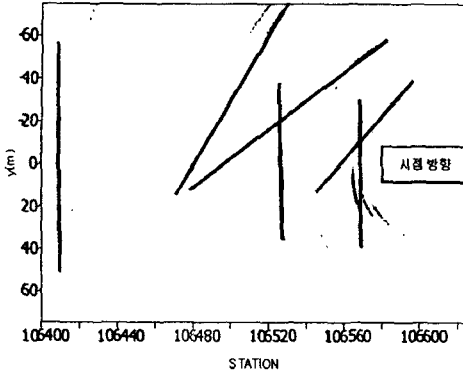


그림 9. HSP 자료를 이용한 Krichhoff 구조 보정결과 ① x-y 방향의 평면도

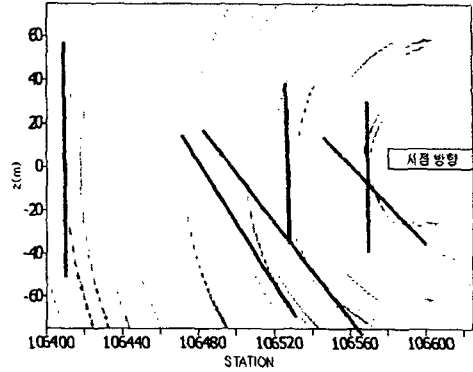


그림 10. HSP 자료를 이용한 Krichhoff 구조 보정결과 ② x-z 방향의 단면도

□ 터널 막장 전방예측 3차원 영상화 결과

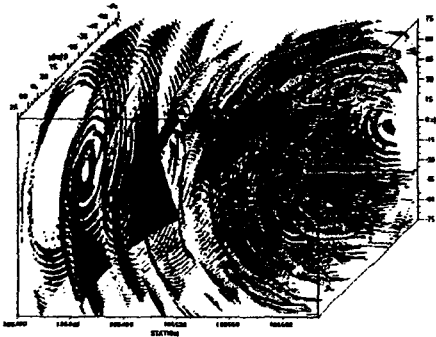


그림 11. 3차원 불연속면 해석 단면(TSP)

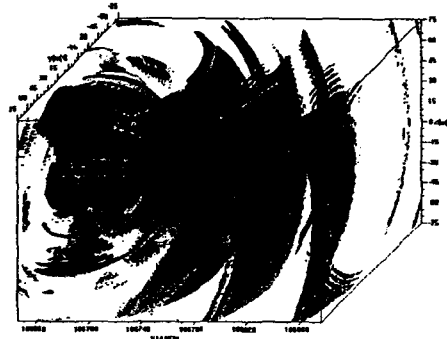


그림 12. 3차원 불연속면 해석 단면(HSP)

□ 결과분석

TSP 및 HSP 탐사를 통하여 얻어진 탐사 구간에서의 P파 속도(약 4300m/s)로 볼 때 암반이 취약하지 않음을 나타내고 있고, 불연속면의 방향이 실시 설계시 수행된 지질조사 및 물리탐사의 결과에 유사한 것을 알수 있다. 그러나 부분적으로 단층의 존재 및 소규모 단층대 등의 존재가 확인되었으므로 터널 굴진시 세밀한 관찰 및 조사를 통해서 시공해야 한다.

또한 암질의 물성과 좀더 긴밀히 관련된 3성분 자료취득에도 S파 판별은 명확할 수 없으므로 다소의 불확실성이 있을 수 있다. 속도에 의한 암반분류는 암반 상태를 실제보다 양호하게 판단하게 되므로 시공시 주의가 필요하다.

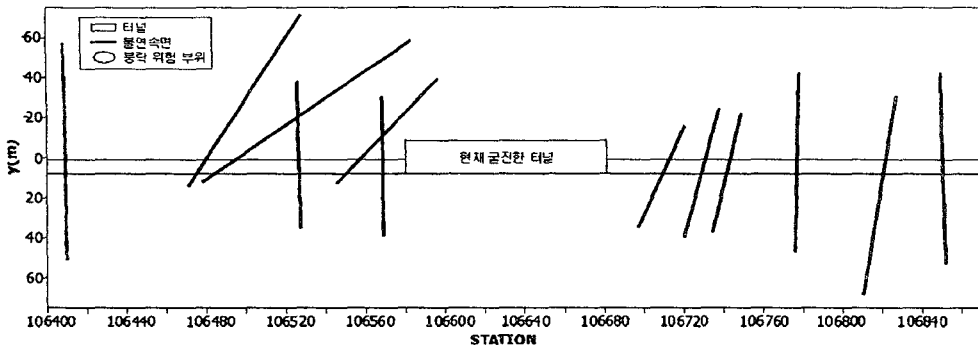


그림 13. TSP/HSP 탐사자료종합해석 평면도

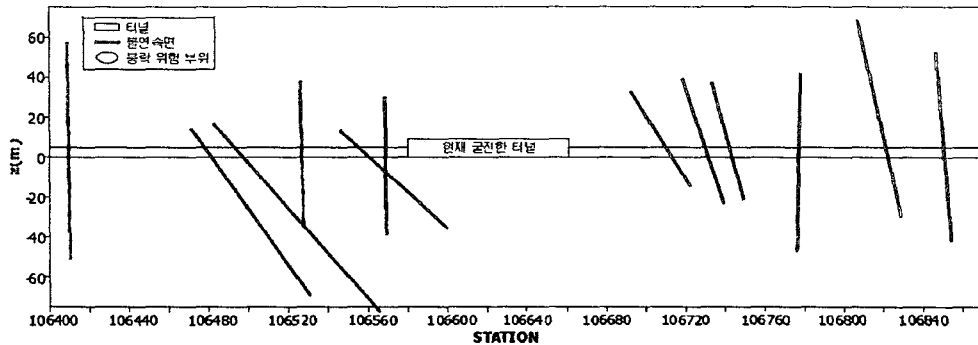


그림 14. TSP/HSP 탐사자료종합해석 단면도

7. 결론

영동선 철도이설 건설공사 현장은 국내 최장터널로서 단층, 공동 및 합단층 등 복잡한 지질구조를 가지고 있다. 따라서 정확한 지질상태 파악 및 분석을 통하여 굴착 및 지보공 시공시 많은 주의를 요한다.

암반예측시스템(RPS)은 이러한 요구사항을 만족할 만한 시스템으로서 선진보링(LIM), 선진수평시추, 탄성파탐사(TSP/HSP)로 구성되어 있다.

선진보링은 굴착 전 드릴로 사전 천공하여 회전속도 및 굴착시간의 변화로 암반의 연경도 등 사전분석을 통한 신속한 시공이 가능하게 했고, 선진수평시추는 암반코어를 판별하여 막장전방예측 및 유입수 확인을 하여 작업조건의 원활한 관리를 가능하게 했다.

제2사갱-본선 접속부에서 실시한 반사법 탄성파 탐사는 암반 취약구간을 예측하고 막장 굴진시 적절한 보강대책 수립에 효과를 가져왔다.

향후 암반예측시스템(RPS)을 적극적으로 활용하여 터널안전시공이 이루어 질 수 있도록 만전을 기하고자 한다.

참고문헌

- 1.(주)대우건설(2002), "영동선 동백산-도계 간 철도이설공사 터널내 탄성파 반사법 탐사보고서"
- 2.(주)대우건설(1999), "영동선 동백산-도계간 철도이설공사 지반조사보고서"