

영동선 동백산-도계간 터널내 반사법 탄성파탐사 적용사례

Application of Seismic Reflection Method in the tunnel of Youngdong Railroad(Mt. Dongbaek~Dokye)

김용일*, 윤영훈**, 조상국***, 양종화****, 김장수*****, 이내용*****

Yong-Il Kim, Young-Hoon Yoon, Sang-Kook Cho, Jong-hwa Yang, Jang-Soo Kim, Nai-Yong Lee

Abstract

Seismic Reflection Methods(TSP, HSP) have been applied in the junction between 2nd Adit and Main Tunnel (Solan Tunnel) of Youngdong Railroad(Mt. Dongbaek~Dokye). In this paper, methods and case study will be introduced to predict discontinuities in the tunnel before excavation by the Seismic Reflection Methods(TSP, HSP)and secure construction stability of the tunnel in blasting and excavation.

1. 서언

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

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

본 현장은 불연속면의 존재유무를 확인하기 위하여 제 2사갱과 본선접속부 굴진구간 전방에서 터널내 반사법 탄성파 탐사를 실시하였다.

터널내 반사법 탐사 중 영주 방향으로는 HSP(Horizontal Seismic Profiling)탐사를, 강릉 방향으로는 TSP(Tunnel Seismic Prediction)탐사를 적용하였다. 본 고에서는 현장에 적용된 반사법 탐사의 이론·자료처리 및 해석·결과분석 과정을 소개하고자 한다.

2. 현장개요

2.1 공사명

영동선 동백산-도계간 철도이설 건설공사

-
- * (주)대우건설 토목기술1팀 차장, 공학박사, 정회원
 - ** (주)대우건설 토목기술1팀 차장, 정회원
 - *** (주)대우건설 상무이사, 정회원
 - **** (주)대우건설 영동선 철도현장 현장소장, 정회원
 - ***** 철도청 서울건설사업소 토목과 공사팀장, 정회원
 - ***** (주)대우건설 토목기술1팀 대리, 정회원

2.2 공사기간

1999. 12. 20 - 2007. 09. 08 (94개월)

2.3 공사구간

강원도 태백시 백산동-삼척시 도계읍(17km 774)

[영기(환) 92km 450.00 ~ 영기(환) 110km 223.89]

2.4 공사내용

- 본선터널 : L=16km 240 (개착터널 320m, NATM터널 15km 920)
- 사갱터널 : L= 2km 100 (사갱 1km 510, 2사갱 590m)
- 궤도부설 : L=23km 483 (본선 17km 774, 특수선 1km 168, 측선 4km 541)

3. 반사법 탄성파탐사의 개요

터널 시공 중의 조사기법으로는 지질 Mapping을 통한 암반분류, 선진 조사공 등이 있으나, 지질 Mapping의 경우는 막장평가를 통하여 암반분류를 실시하는 방법으로 사전지질 예측에는 한계가 있다. 선진 조사공은 비용이 많이 들고, 조사범위가 제한되며 터널작업을 지연시켜 경제적 손실이 크다. 또한, 선진 조사공은 조사공 위치의 기하적인 한계로 전방의 지질구조의 방향성을 충분히 파악하기 어렵다. 터널 완공 후의 유지/관리의 목적에서 수행되는 조사기법으로는 시추공에 의한 방법이 있는데, 이는 지질상태를 국부적으로 확인하는 것에 불과한 것으로 광역적인 지질상태를 정량적으로 파악하는 데는 많은 한계가 있다. 이러한 터널 시공 중 혹은 유지관리 목적에서의 종래 조사 기법의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 탄성과 탐사와 전기비저항 등의 물리탐사 방법이 있고, 최근 들어 그 적용이 전 세계뿐만 아니라 국내에서도 증가하고 있는 실정이다.

탄성과 방법으로는 VSP(Vertical Seismic Profiling)방법을 응용한 HSP(Horizontal Seismic Profiling), RVSP(Reverse Vertical Seismic Profiling)방법을 응용한 TSP(Tunnel Seismic Prediction)가 있다. 국내에서는 수신기를 깊이 위치시켜 터널과의 영향을 최소화할 수 있는 TSP 방법이 많이 이용되어지고 있으며, 일본에서 많은 터널에 적용된 3성분 지오폰을 이용한 HSP도 국내에서 최근 적용되고 있다.

기본적인 터널내 탄성과 반사법 탐사의 원리를 그림1에 나타내었다. 기본적인 개념은 터널 벽면에 천공하고 화약을 장약하여 발파하는 송신원으로부터 발생한 탄성파가 그림1과 같이 막장 전방의 반사면(지질경계, 단층, 파쇄대)에서 반사되어 돌아온 반사파를 터널 벽면에 설치한 수신기가 기록한 자료(반사되어온 시간)를 이용하여 막장 전방의 불연속면의 위치를 알아내는 것이다.

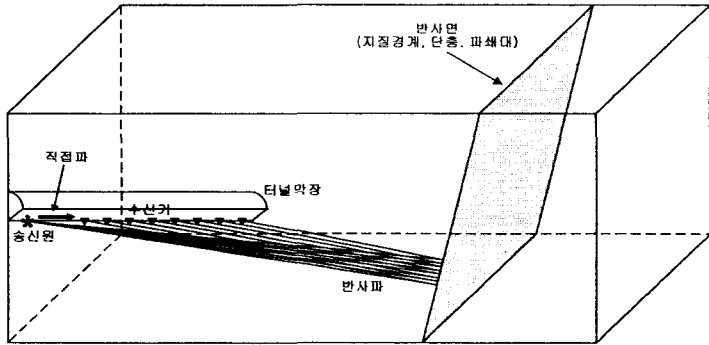


그림 1. 터널내 탄성과 반사법 탐사 모식도

3.1 HSP(Horizontal Seismic Profiling) 탐사

TSP 탐사의 송/수신배열의 한계를 극복하기 위해 일본에서는 HSP 탐사법을 고안하였다. 이는 터널면에 센서를 8개 내지 16개 설치하고 송신점 역시 여러 점을 위치시켜 다송신 다수신에 의한 정보량을 증가시켜 전방예측의 정확도를 증가시키고자 하는 시도이다.

양 터널 벽면에 각각 8개씩의 3성분 지오폰을 이용한 벽체 부착식 수신기를 설치하고 송신점을 16개 위치시키면 얻어지는 정보의 수는 128 x 2 개가 되어 얻어지는 정보의 양은 TSP®의 2.5배가 넘는다. HSP는 표면파의 영향을 다소 받기 때문에 f-k filtering 등 고급 자료처리 과정을 수반하여야 한다. 그림 3은 HSP 탐사의 기본적인 송/수신기 배열을 보여준다. 간단히 생각하면 TSP 탐사의 송/수신기 위치가 바뀐 것이 HSP 탐사의 배열이라고 생각하면되고, 많은 수신기를 사용하기 때문에 송/수신 배열을 현장 상황에 맞게 바꿀 수 있다는 장점이 있다. 또한 송수신 자료가 많아 결과 영상의 품질이 크게 향상될 수 있는 장점이 있으나, 수신부를 벽면에 부착시키므로 표면파를 제거하기 위한 특수 자료처리방법이 필요하다.

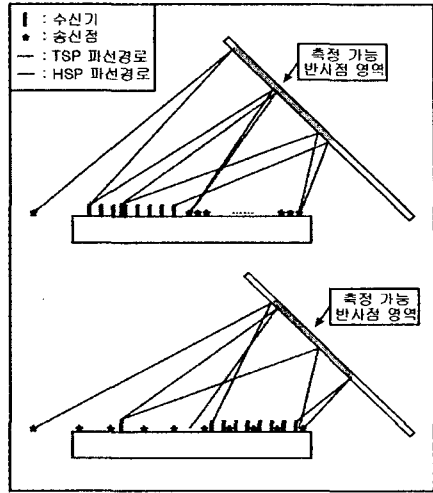


그림 2 .HSP 탐사 송/수신 배열모식도

HSP 탐사의 경우 수신기의 수를 늘리고 송신원을 수를 줄임으로서 탐사시간을 최소화 할 수 있다. 예를 들어 4개 정도의 송신원을 이용할 경우 작업이 완전히 멈추어 있어야 할 시간은 약 10분 ~ 30분 정도로 작업정지 시간이 대단히 짧은 장점이 있다.

3.2 TSP(Tunnel Seismic Prediction) 탐사

TSP 탐사는 스위스 Amberg사에서 개발한 터널내 탄성파 반사법탐사에 의한 막장전방예측 장비명으로, 고정된 위치에 1개 혹은 2개의 센서를 터널 벽면에 약 2m 내외의 깊이로 삽입시키고 20개 이상의 발파점에서 발생된 탄성파가 터널 주변 암반으로 진행하다가 반사되어 오는 신호를 분석하여 터널 막장 주변의 암반상태를 파악하는 방법이다.

센서를 2m 내외의 깊이로 삽입시키는 이유는 음원 송신시 발생되는 터널과등 표면파는 반사신호보다 매우 큰 진폭을 지니므로, 센서를 표면 근처에 설치할 경우 반사신호를 분별해내기가 매우 어려워지기 때문이다. 따라서 이러한 삽입식 센서에 의해 비교적 양호한 품질의 반사신호를 얻을 수 있는 점이 TSP 탐사의 장점이다. 그러나 TSP 법은 한정된 송-수신 배열 구간에서 양 터널 벽면에 각각 24개의 송신원과 1개의

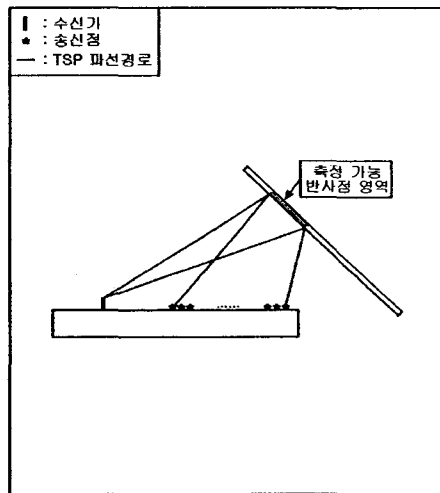


그림 3 .TSP 탐사 송/수신 배열 모식도

수신원으로 자료를 취득하는 것이 일반적이므로 최대 48x2 개 내외의 트레이스 기록을 얻게된다.

그림 3은 TSP 탐사의 기본적인 송수신기 배열을 보여준다. 그림과 같이 터널 한쪽 혹은 양쪽 벽면에 수신기를 설치하고, 송신원을 20개 이상을 사용하여 자료를 획득하는 방식이다. 수신기를 2m이상을 천공하여 삽입하는 방식의 센서이므로 수신신호의 품질이 좋으나, 수신갯수가 적어 자료 부족에 의한 영상화 품질향상에 한계가 있다.

4. 제2사개-본선 접속부 탐사

4.1 지질개요

터널내 반사법 탐사가 수행된 구간의 지질은 캄브로-오도비스기의 조선누층군, 석탄-페름기의 평안누층군, 백악기 경상누층군과 상기 지층들과 불출 및 관입관계를 가지는 백악기 화산암류 및 제4기 충적층으로 구성된다. 각 지층은 층상단층(thrust)에 의해 수차례 반복되며, 오십천 단층 등 주향이동 단층에 의해 단절되고 있다. 특히 인평상 구조 등 층상단층에 의해 평안누층군의 금천 및 장성층 등 함탄층의 분포가 반복되어 주가행단층의 복잡한 분포를 보인다.

층리 및 단층구조로는 탐사 구간 중 오십천 단층의 서편지역과 신리 단층의 북쪽지역에 해당되며 함백산층을 비롯한 평안누층군의 모든 지층들과 경상누층군의 적각리층 및 백병산 화산암류가 분포하고 있다. 층리구조의 최대집중점 방향은 N15E/30SE이고 북북동 방향의 주향은 오십천 단층의 영향권에 해당되며, 습곡축은 남북(084/30) 방향이 우세하다. 단층은 북북동 방향이 우세하며 일부 북서 방향도 관찰된다. 북북동 방향의 단층은 오십천 단층과 관련된 우수향의 주향이동 단층이며, 북서 방향의 단층은 동일방향의 층상 단층과 관련있다.

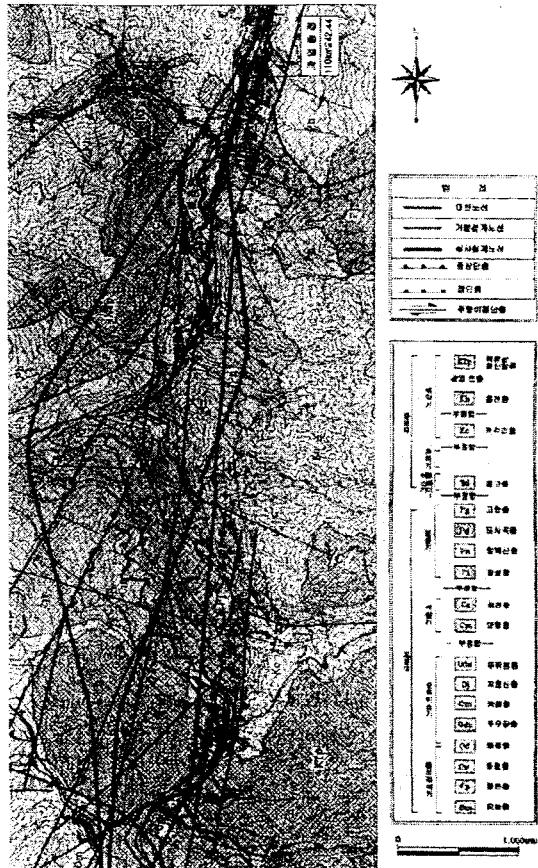


그림 4. 지질도

4.2 탐사장비

탐사 방법	장비명 / 특장점 / 제작사
HSP 탐사	터널 벽면 부착식 3성분(x, y, z)속도계(OYO Geospace, 미국) 기록계 : Tellaloc Mark 6(ABEM, 스웨덴)
TSP 탐사	TSP 202 SYSTEM 삽입봉을 이용한 2성분(x, z) 가속도계 기록계 : Husky(영국)

4.3 탐사구간

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

4.4 탐사위치

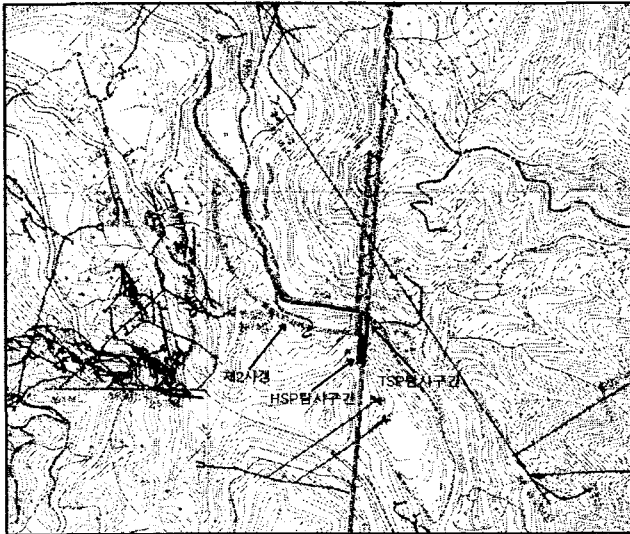


그림 5. 탐사 위치 평면도

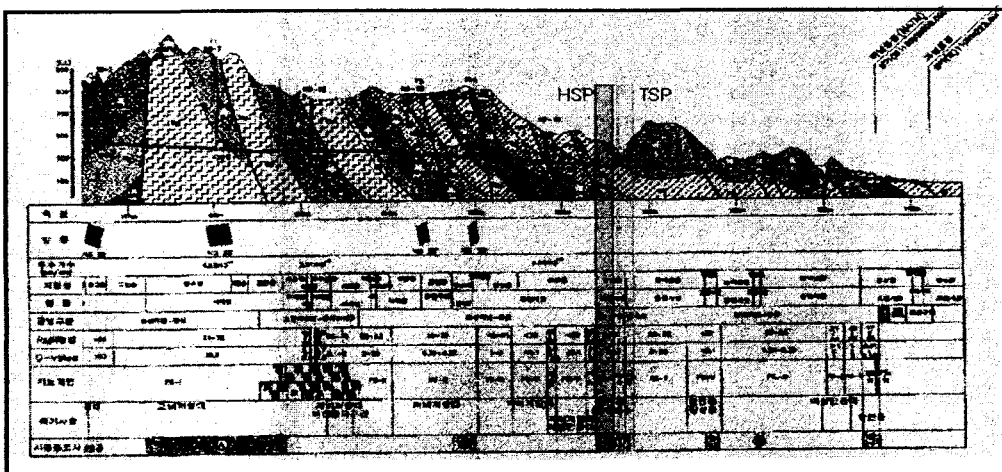


그림 6. 탐사위치 단면도 및 지보패턴

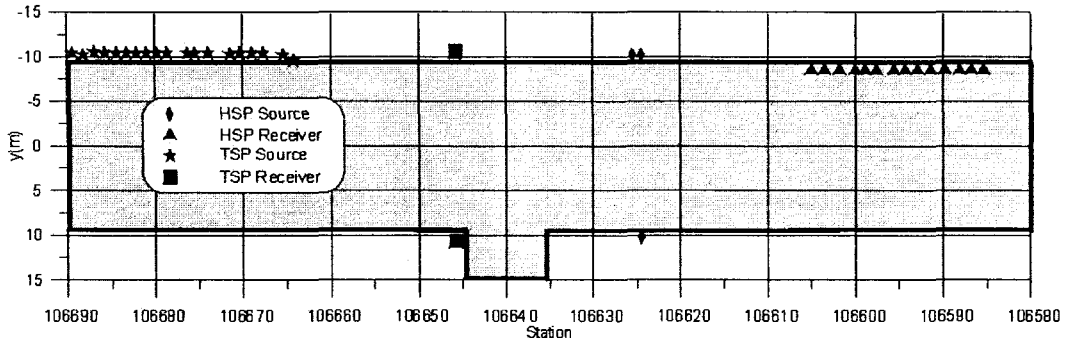
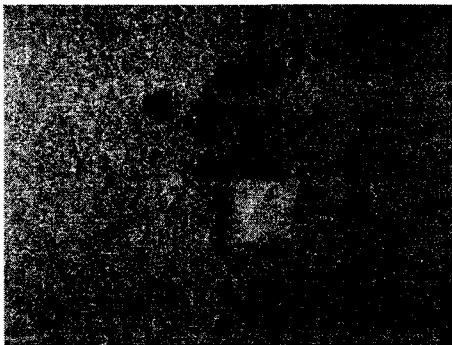


그림 7 . HSP 및 TSP 탐사 송/수신기 layout

4.5 HSP 탐사과정

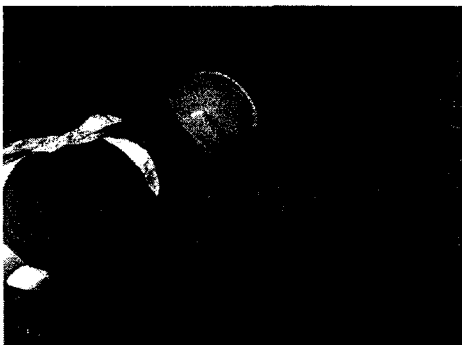
제 2사갱과 본선이 만나는 지점(STA. 106K640)을 기준으로 하여 시점방향으로 HSP 탐사를 수행하였다. 송신원은 제 2사갱과 본선 대단면 터널이 시점방향에서 교차하는 지점에서 약 10m 정도 거리를 둔 지점의 양쪽 터널 벽면에 2개씩 총 4개를 설치하였고, 수신기는 터널진행방향 좌측 벽면에 총 14개를 설치하였다



① 수신기 부착용 판 설치



② 송신용 발파공 천공



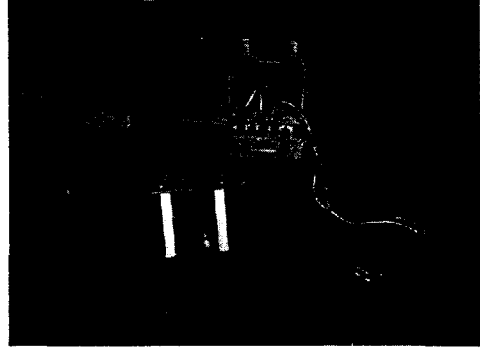
③ 3성분 수신기 터널벽면에 설치



④ 수신기와 Cable 연결



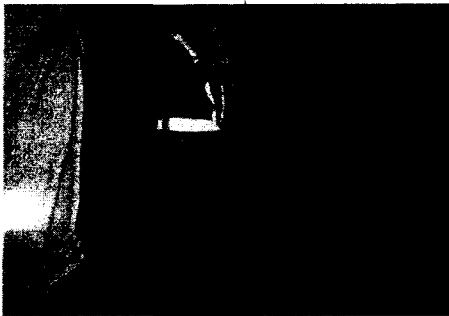
⑤ 송신공에 화약 장약 및 전색



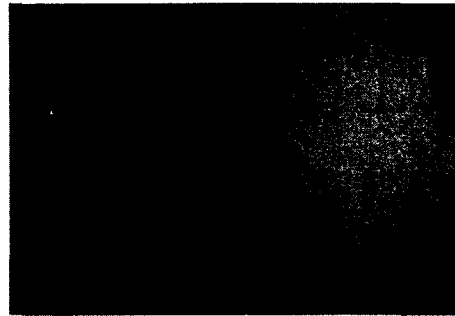
⑥ 자료 측정

4.6 TSP 탐사과정

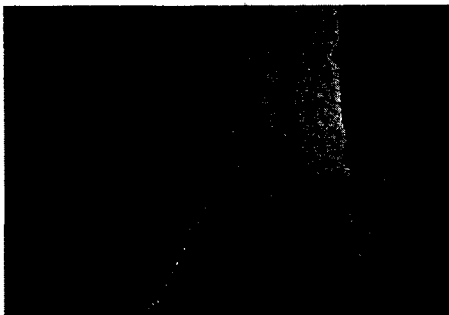
제 2사갱과 본선이 만나는 지점(STA. 106K640)을 기준으로 하여 종점방향으로 TSP 탐사를 수행하였다. 삼입식 센서봉을 이용한 수신기는 제 2사갱과 본선 대단면 터널이 시점방향에서 교차하는 지점에서 약 1m 정도 거리를 둔 지점의 양쪽 터널 벽면에 1개씩 총 2개를 설치하였고, 송신원은 터널 진행방향 우측 벽면에 총 19개를 설치하였다.



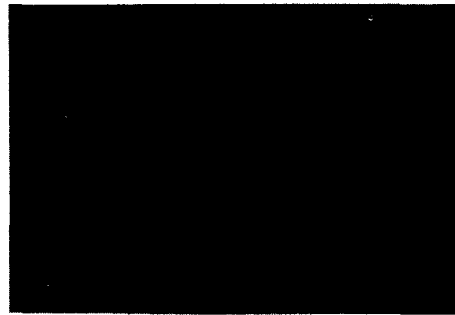
① 삼입식 센서봉 및 수신공



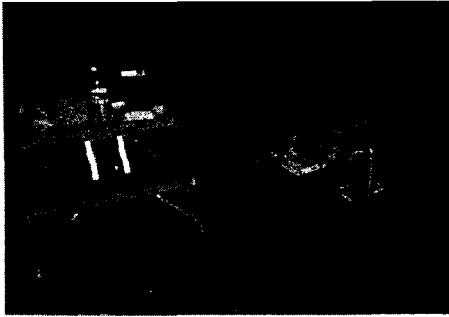
② 송신용 발파공



③ 터널 벽면에 설치한 TSP 센서



④ 장약 및 전색한 발파공



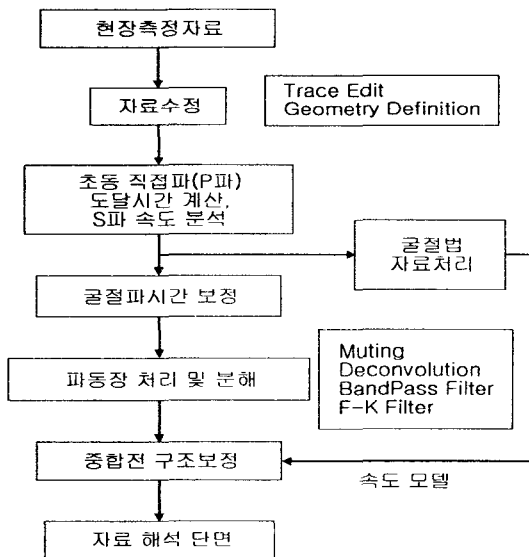
⑤ TSP 측정 장비



⑥ 발파 및 기록

5. 제2사갱-본선 접속부 탐사결과

5.1 자료처리 및 해석순서도



5.2 HSP 탐사결과분석(STA.106K640 기준 영주 방향)

5.2.1 P파 및 S파 속도분석

송신공에서 발생하여 수신기에 이르는 직접파로부터 수신공과 송신공 사이의 암반에 대한 탄성파 속도를 구할 수 있다. 그림 8의 측정된 HSP 자료로부터 초동 발파 시간에 대한 수신기의 위치를 직선 회귀한 결과이다. HSP 탐사가 수행된 구간에서 터널 좌측 벽면의 경우 P파 속도가 약 4325m/s이다.

설계시 실시된 지질조사에서 탐사가 실시된 구간은 주로 금천층의 사암으로 이루어져 있다. 보통 탄성파 P파 속도는 자연상태에서 사암은 2,100~4,500m/s 이다. 탐사구간은 이미 굴진이 진행

된 상태이므로 발파후 보여지는 암질의 상태를 볼 때 P파 속도가 4300m/s 정도의 값은 타당한 값으로 사료되며, 실시설계시 수행된 지반조사 중 탄성과 토모그래피(NB-13~NB-14) 결과(지반조사 보고서 p.105 ~p.108)에 비슷한 암종인 사질 세일의 경우 4000m/s~4200m/s의 범위와 사암의 경우 4200 m/s 이상의 속도를 가지는 것으로 나타난다. 따라서 HSP 탐사를 통하여 획득한 P파 속도는 일반적으로 나타나는 P파 속도값과 실시설계시 조사된 P파 속도 값과 비슷한 범위를 가지는 것으로 볼 때 추정된 P파 속도는 타당하다고 사료된다

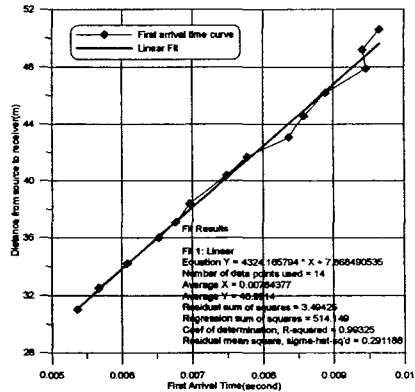


그림 8. HSP 초동발췌시간

5.2.2 자료처리 및 영상화

HSP 자료를 이용한 불연속면 자료 처리를 STA. 106K400~106K580까지 수행하였다. 자료처리 과정을 통하여 최종적으로 획득한 불연속면 영상화 단면을 그림 9에 제시하였다. 그림 9는 그림 7의 HSP를 위한 터널 양쪽 벽면의 4개의 송신원을 이용한 터널 벽면에 부착하는 방식의 14개의 3 성분 속도계(지오폰)를 이용하여 획득한 자료를 방향성을 고려한 Kirchhoff 심도구조보정을 실시하여 얻은 영상단면이다. 여기서 x 방향은 터널 굴착 진행 방향과 평행한 방향이며, y 방향은 터널 진행방향과 수평적으로 수직인 방향을 나타낸다. y 방향의 (-)방향은 Station이 증가하는 방향에 대하여 왼쪽을 가리키며, y 방향의 (+)방향은 Station이 증가하는 방향에 대하여 오른쪽을 가리킨다. z 방향은 상/하 방향을 가리키며, 0점은 터널 바닥이며, (+) 방향은 터널의 상부를 (-) 방향은 터널의 하부를 나타낸다.

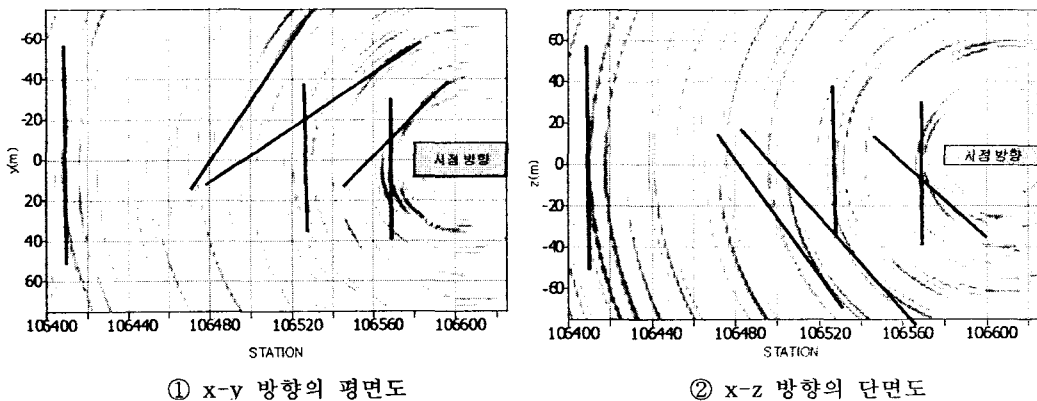


그림 9. HSP 자료를 이용한 Kirchhoff 구조 보정결과

그림 9의 영상화 단면에서 막장 전방에 불연속면에 존재로 인하여 불연속면과 터널이 만나는 지점은 아래와 같다.

현 막장(STA. 106K579.4) 전방에 존재하는 불연속면으로 예상된 반사 이벤트는 STA.106K410, STA.106K480, STA.106K495, STA.106K525, STA.106K560, STA.106K570 부근 일 것으로 예상된다.

그림 9에 나타난 막장전방의 취약대에 의한 반사영상의 양상을 좀더 명확히 살펴보기 위하여 반사면 영상에서 진폭의 절대값이 큰 영역만을 3차원적으로 그림10에 도시하였다.

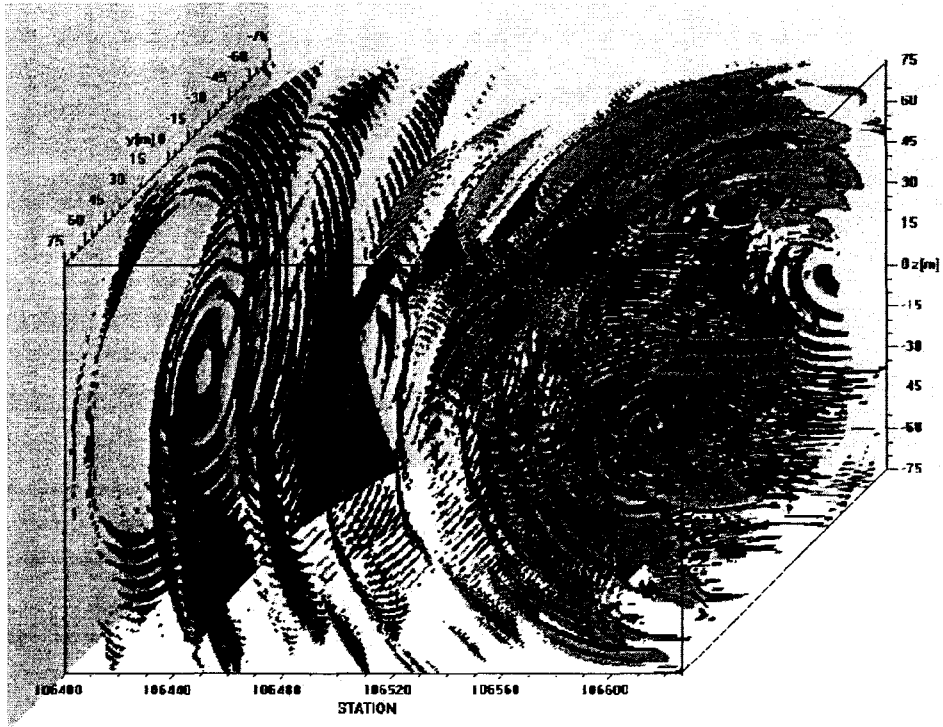


그림 10. 3차원 불연속면 해석 단면

5.3 TSP 탐사결과분석(STA. 106K640 기준 강릉 방향)

5.3.1 P파 및 S파 속도분석

TSP 탐사가 수행된 구간에서 터널 좌측 벽면의 경우 P파 속도가 약 4288m/s이다. 앞서 5.2.1절의 HSP 탐사를 통하여 얻어진 P파의 속도와 비슷한 값을 나타냄을 볼 수 있다.

5.3.2 자료처리 및 영상화

TSP 자료를 이용한 불연속면 자료 처리를 STA. 106K645 ~ 106K870까지 수행하였다. 자료처리과정을 통하여 최종적으로 획득한 불연속면 영상화 단면을 그림 11에 제시하였다. 그림 11은 그림 7의 TSP를 위한 터널 한쪽 벽면의 19개의 송신원을 이용한 터널 양쪽 벽면에 삽입한 2개의 2 성분 수신기를 이용하여 획득한 자료를 방향성을 고려한 Kirchhoff 심도구조보정을 실시하여 얻은 영상단면이다.

현 막장(STA. 106K690.4) 전방에 존재하는 불연속면으로 예상된 반사 이벤트는 STA.106K725, STA.106K730, STA.106K745, STA.106K776, STA.106K822, STA.106K850 부근 일 것으로 예상된다.

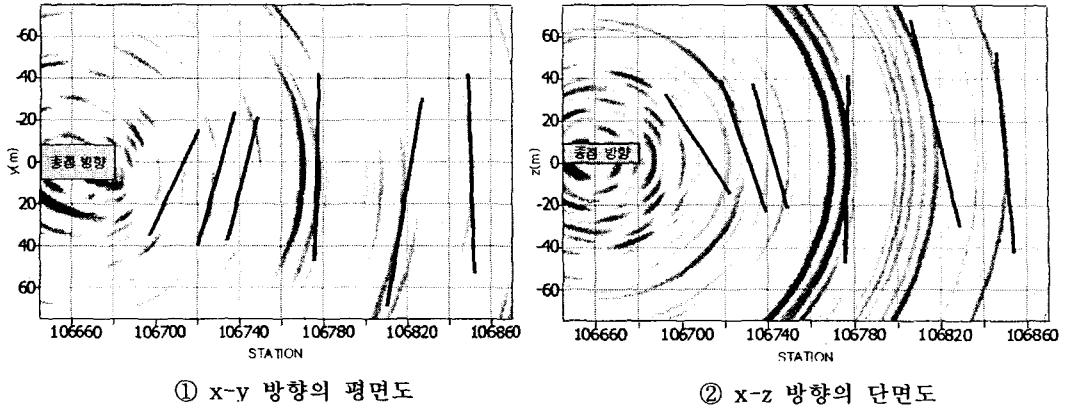


그림 11. TSP 자료를 이용한 Krichhoff 구조 보정결과

그림 11에 나타난 막장전방의 취약대에 의한 반사영상의 양상을 좀더 명확히 살펴보기 위하여 반사면 영상에서 진폭의 절대값이 큰 영역만을 3차원적으로 그림12에 도시하였다.

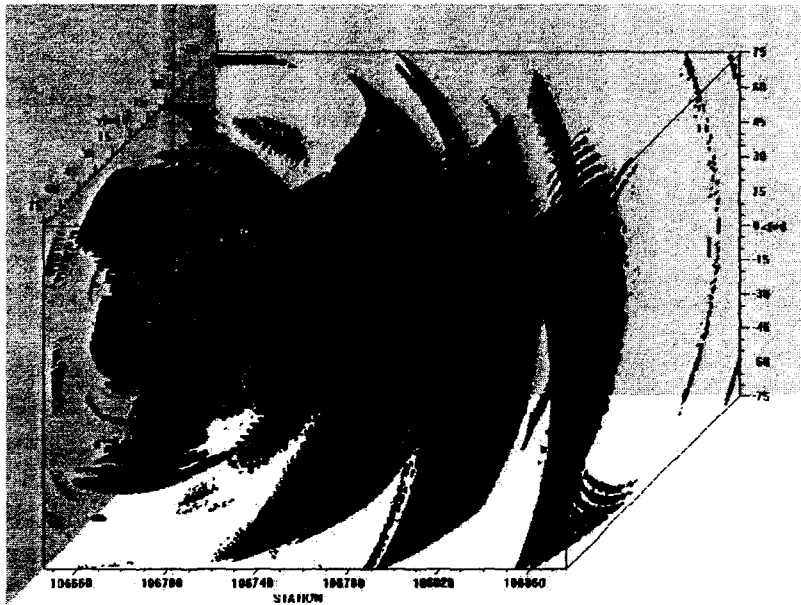


그림 12. 3차원 불연속면 해석 단면

5.4 종합분석

5.4.1 HSP 및 TSP 탐사를 통하여 얻어진 탐사 구간에서의 P파 속도는 약 4300m/s 이다. P파 속도만을 볼 때 암반이 취약하지 않음을 나타내고 있으나 그림 13의 HSP 탐사가 수행된 막장의 사진에서 나타난 바와 같이 암층에 탄층이 협재되어 나타나고 있다.

5.4.2 그림 9와 그림 11의 예측된 불연속면의 방향이 거의 비슷한 방향을 나타내고 있음을 볼 수

있다. 이는 탐사구간에서의 실시 설계시 수행된 지질조사 및 물리탐사의 결과에 부합하는 결과이다.

5.4.3 STA.106K720~STA.106K820구간에 많은 불연속면이 존재할 것으로 예상되는데 이는 STA. 106K700 부근이 지표에서 다른 부분에 비하여 경사가 급한 계곡부이고 지표고가 다른 지점에 비하여 상당히 낮기 때문으로 사료된다. 따라서 지표고가 낮아지기 시작하는 현재 강릉방향의 막장부터 주의를 기울여 굴진하여야 할 것이다.

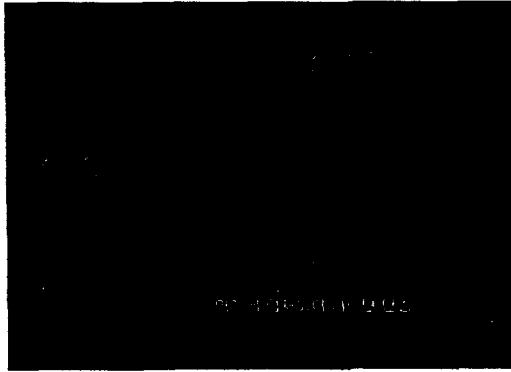


그림 13. 탄층이 협재되어 나타난 막장 사진

5.4.4 그림 14, 15에 탐사해석을 종합하여 나타내었으며, 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 절리발달이나 탄층의 다수 존재가 막장에서 확인되었기 때문에 시공시 주의가 필요하다.

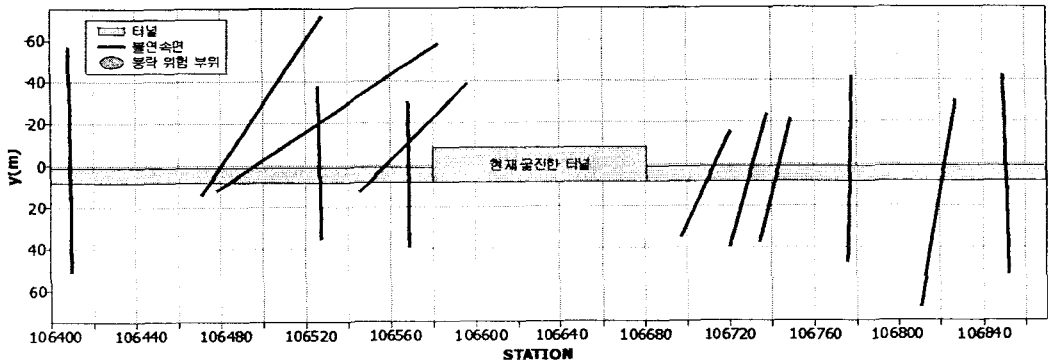


그림 14. HSP/TSP 탐사자료종합해석 평면도

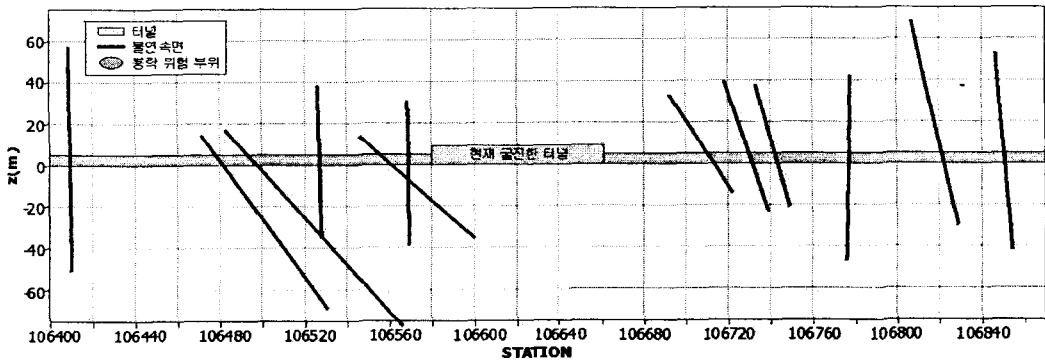


그림 15. HSP/TSP 탐사자료종합해석 단면도

5.4.5 2회의 터널내 반사법 탐사(시점방향 : HSP 탐사, 종점방향 : TSP 탐사)를 통하여 탐사 예측 구간(106K400~106K850)에서의 불연속면의 존재가 예상되는 취약대는 다음과 같다.

- ① STA. 106K400 ~ 106K410
- ② STA. 106K470 ~ 106K490
- ③ STA. 106K550 ~ 106K570
- ④ STA. 106K710 ~ 106K750
- ⑤ STA. 106K770 ~ 106K780

6. 결론

영동선 철도이설 건설공사 제2사갱-본선 접속부에서 실시한 반사법 탄성과 탐사를 통하여 이상 구간에 대하여는 암반의 취약성이 의심되므로 막장관찰을 통해서 각별한 보강 대책을 마련 하고자 한다. 아울러 발파진동 저감 및 굴진속도 준수 등 시공에 만전을 기할 것이다.

또한 탐사시 막장에서 협재된 탄층이 발견되었고, 실시설계시 수행한 지표지질조사 및 물리탐사에서 탐사구간의 지층이 석탄을 가질 수 있는 층으로 나타나 있으므로, 위에서 언급한 취약구간 외에도 관심을 갖고 시공시 굴착 및 지보패턴의 신속한 대응으로 안전한 터널시공의 모범이 되고자 한다

참고문헌

1. (주)대우건설(2002년 7월), “영동선 동백산-도계간 철도이설공사 터널내 탄성과 반사법 탐사 보고서”
2. (주)대우건설(1999년 10월), “영동선 동백산-도계간 철도이설공사 지반조사보고서”