

## 터널막장 전방 파악을 위한 TSP(Tunnel Seismic Prediction) 탐사 사례 연구

조성원<sup>1)</sup>, 이 효<sup>1)</sup>, 유재원<sup>1)</sup>, 김도훈<sup>1)</sup>, 남승혁<sup>1)</sup>\*

### Application of TSP Suvey to Predict the Ground Conditions Ahead of Tunnel Face

Sung-Won Cho, Jae-Won Yoo, Dave Kim and Seung-Hyeok Nam

**Abstract** To predict ground conditions ahead of the tunnel face, seismic refraction survey has been widely used. But due to the development in seismic equipment and techniques, tomography using borehole and others are actively applied in recent years. This study has a purpose to prevent stability problems during excavation and construction of tunnels by predicting unfavorable ground conditions such as fault, fractured zone and rock quality variation zone ahead of the tunnel face using TSP survey equipment. In this study, the validity of predicting ground conditions ahead of tunnel face by TSP survey has been evaluated through the case study in the road construction site.

**Key words** Seismic refraction survey, TSP(Tunnel Seismic Prediction), Fracture zone, Geological anomalies

**초 록** 터널 막장전방의 지반조건을 예측하는데 굴절법 탄성파탐사가 주를 이루어 왔으나, 최근에는 탄성파탐사 기기 및 기법의 발전에 힘입어 시추공을 이용한 토모그래피 등이 활발히 적용되고 있다. 본 논문은 TSP (Tunnel Seismic Prediction) 탐사장비를 이용하여 막장전방의 지반조건을 예측함으로써 암질 변화구간이나 단층, 파쇄대 등 지질이상대를 파악하여 터널 굴착 시 시공 및 안정상의 문제점을 예방하는데 목적이 있다. 본 연구에서는 OO-OO 도로개설현장에서 적용된 TSP탐사에 의한 터널전방의 지질이상대를 파악한 사례로 막장탐사 방법의 타당성을 살펴보고자 하였다.

**핵심어** 탄성파탐사, TSP, 단층, 파쇄대, 지질이상대

#### 1. 서 론

NATM 및 TBM 터널설계를 위한 사전조사에서는 굴절법 탄성파탐사가 주를 이루어 왔고, 최근에는 탄성파탐사 기기 및 기법의 발전으로 시추공을 이용한 토모그래피 등이 활발히 적용되고 있으며, 석유탐사에서 많은 발전을 이룬 반사법 또한 엔지니어링 목적

으로 이용되고 있다(유진오 외, 2004).

이러한 탐사방법들은 조사대상 부지에 대한 포괄적인 정보를 제공하여 주지만 지표에서 실시되거나 제한된 위치의 시추공에서 시행되므로 탐사가 어려운 위치의 하부에서 굴착하게 되는 터널이나 지하유류 저장동굴과 같은 경우는 터널의 안정성에 영향을 미치는 지질구조대에 대한 파악에 한계가 있는 단점이 있다. 시공 중에 터널 막장에서 선진 시추조사공으로 이러한 정보를 얻는 것도 가능하기는 하지만 조사공을 이용한 탐사는 비용이 많이 들고 조사 범위가 제한되며 터널작업을 지연시켜서 경제적 손실이 크다(배종섭 외, 2013).

<sup>1)</sup> SK건설(주) / Infra기술본부/ 기술2팀

\* 교신저자 : steve.nam@sk.com

접수일 : 2013년 12월 7일

심사 완료일 : 2013년 12월 22일

게재 승인일 : 2013년 12월 26일

TSP(Tunnel Seismic Prediction)탐사는 장비를 이용하여 막장전방의 지반조건을 예측함으로써 암질 변화구간이나 단층, 파쇄대 등 지질이상대를 파악하여 터널 안정성에 측면에서 시공 중 발생 할 수 있는 문제점을 예방하는데에 그 목적이 있다.

본 연구는 국내에서 터널내의 암반 상태를 예측할 때 쓰는 여러 가지 방법 중 OO-OO 도로개설현장에서 적용된 TSP탐사를 이용하여 측정된 탄성파 속도와 RMR에 따른 암반분류를 비교함으로써 막장탐사 방법의 타당성을 살펴보고자 한다.

## 2. TSP 탐사 원리 및 탐사 방법

### 2.1 TSP 탐사 원리

TSP 탐사는 석유 등의 지하자원 개발을 위해 일찍부터 사용되던 탄성파 수직탐사법(VSP: Vertical Seismic Profiling)을 터널 전방예측에 응용한 것이다. 아래 그림 1 좌측에서와 같이 VSP 탐사는 지표의 시추공 부근 한 지점에서 탄성파를 송신하고 이를 시추공 내 여러 심도에서 수신하여 지층 구조를 밝히는 방법이며, 역으로 그림 1의 우측에서와 같이 시추공 내 여러 심도에서 탄성파를 발생시키고 이를 지표의 한 지점에서 수신할 경우 이를 역수직 탐사법(RVSP: Resersed VSP)이라 한다. TSP 탐사는 이러한 역수직 탐사법을 터널 내에서 적용한 것으로 볼 수 있다. 즉, 터널 내 한 지점에 수신기를 설치하고 터널 진행방향으로 여러 위치에서 탄성파를 발생시켜 터널 전방 혹은 주위의 지층 경계면에서 반사되어 오는 반사파를

기록하고 분석함으로써 터널전방의 단층파쇄대나 지질이상대를 예측하는 방법이다(차성수 외, 1999).

종파(P)와 두 종류의 전단파(SH, SV)를 분리해냄으로써 정확한 전방 예측이 가능할 뿐만 아니라 3차원적 탐사가 가능하다는 장점이 있는 Amberg Measuring Technique사(스위스)의 3성분 TSP 탐사 시스템 TSP-203는(X, Y, Z)의 3성분 자료로부터(P, SH, SV)의 3가지 모드의 파형을 분리해 내고, 이에 따른 적절한 자료처리 방법을 적용하여 예측을 하게 된다. 그림 2는 TSP 탐사의 개요도를 나타내고 있다.

탐사 방식은 크게 두 종류가 있으며 그 자료는 원리적으로 동등하다. 다수진점-소발파점 방식은 갱내에 다수(20~50)의 발파점을 설치하고, 3~5점의 발파점을 설정하여 측정하며, 다발파점-소수진점 방식은 갱내에 다수의 발파점을 설치하고, 소수의 수신점을 설정하여 측정한다.

### 2.2 탐사 방법

본 탐사를 수행하기 전, 양질의 탐사 Data를 획득하기 위하여 사전에 준비할 사항은 다음과 같다.

#### 1) 천공

터널 측벽에 수신공(receiver hole)과 발파공(shot hole) 위치를 표시(marking)하고 드릴을 이용하여 24공(다발파점-소수진점 방식)을 천공하며, 천공이 끝나면 발파공의 함몰방지를 위해 PVC 파이프를 삽입해 놓는다.

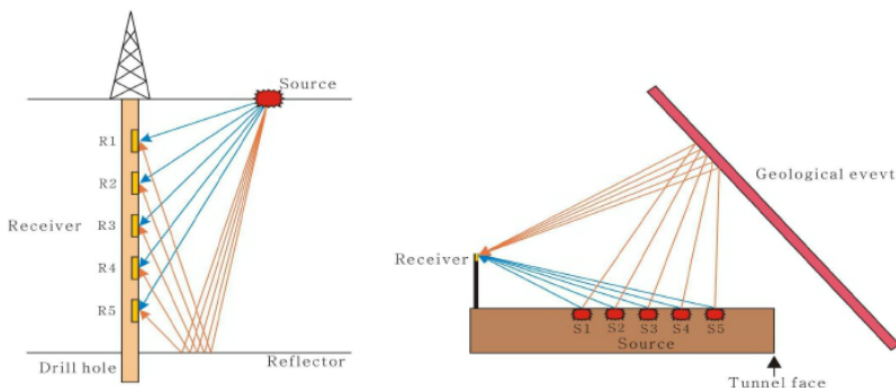


그림 1. VSP탐사와 TSP탐사 모식도(Amberg, 2003(a)).

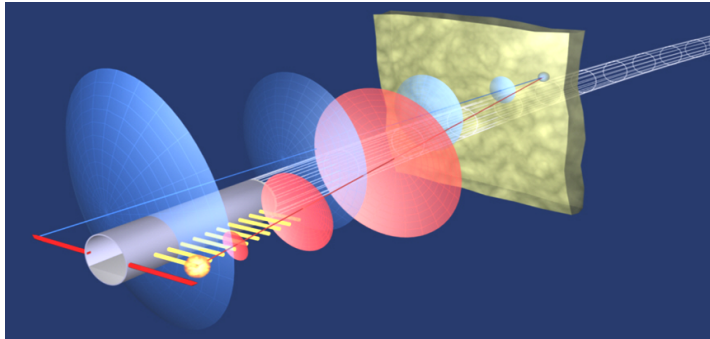


그림 2. TSP 탐사 개요도(Amberg, 2003(b)).

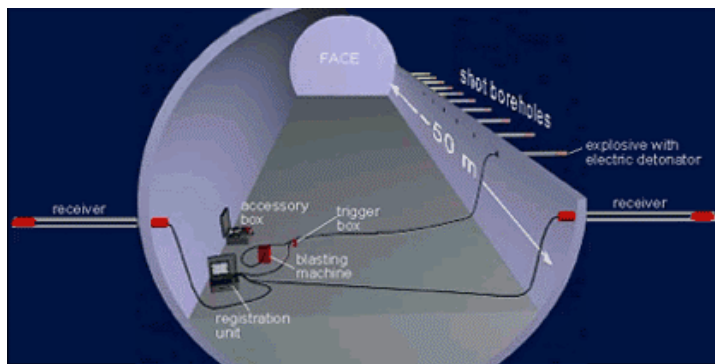


그림 3. 장비 연결도(Amberg, 2003(b)).

## 2) 수신기 케이싱(Receiver steel casing) 설치

- ① 수신공에 케이싱을 삽입하기 전에 PVC파이프 등을 이용하여 천공이 직선으로 잘되었는지와 천공홀 붕괴로 인한 막힘 등이 없는지 점검한다.
- ② 수신공에 시멘트 모르타르를 타설한 후 케이싱을 삽입한다.  
(시멘트 모르타르 타설 대신 레진 2~3개 삽입으로 대체할 수 있다.)
- ③ 드릴과 케이싱의 연결을 위한 커넥터(27mm 육각너트 및 아답터)를 체결한다.
- ④ 회전하며 케이싱을 압입한다.
- ⑤ 핸들바를 이용하여 케이싱을 수평으로 조정한다.

## 3) 발파용 화약제작 및 뇌관 연결

실험에 필요한 화약량은 수신기와의 거리에 따라 공당 50~100g씩 발파공 수에 맞게 준비하며, 화약은 폭속이 큰 폭약을 사용하고 뇌관은 순발전기뇌관을 사용한다.

## 4) 수신기 설치 및 케이블 연결

터널 측벽에 설치되어 있는 강관의 덮개를 떼고 수신기를 삽입하는데, 이때 수신기 끝에 표시된 화살표가 터널 진행방향을 향하도록 한다. 수신기의 설치가 끝나면 각 개체별로 지정된 케이블에 의해 연결시킨다. 즉, 수신기와 Recording unit, Recording unit와 Trigger box, Trigger box와 Blasting machine, Trigger box와 발파모션을 연결한다.

TSP 측정을 시작하기 전에 반드시 주위에 noise를 체크하여 수신기의 연결을 확인하며, 실험에 영향을 줄 수 있는 요인(차량운행, 환기팬 등의 소음)을 제거하고, 장약은 천공 후 발파공의 함몰을 방지하기 위하여 설치한 파이프를 통하여 장약봉으로 공저(down hole)까지 밀어 넣고 파이프는 제거한다(김재현, 2010; Amberg, 2003(b)). 그림 3은 TSP 탐사 장비가 연결된 상태의 장비 연결도를 나타낸 그림이다.

### 3. OO-OO 도로개설공사 현장 탐사개요 및 현황

#### 3.1 터널 현황

OO터널(시점방향 L=6,100m, 종점방향 L=6,085m)은 장대 병렬터널로써, 2011년 12월 14일 당시 시점방향은 NATM 종점으로부터 961m (STA. 6+054), 종점방향은 NATM 종점으로부터 412m (STA. 6+598)까지 굴착되어 있었다. 그림 4는 OO-OO 도로개설공사의 평면도이고, 표 1에서는 공사 현황을 나타내고 있다.

#### 3.2 지질 현황

OO터널은 아래 그림 5에서와 같이 중생대 백악기에 관입 및 분출한 안산암을 흑운모 화강암과 화강섬록암이 관입된 형태로 기반암이 구성되어 있으며, 이

변 탐사구간은 주로 화강섬록암이 분포하고 있었다.

본 탐사는 실시설계 당시 단층대(F9) 출현이 예상되는 구간(STA. 6km+985~975)에 대한 암질과 주요 지질이상대에 대한 확인을 주목적으로 하였다. 그림 6은 탐사구간의 상세지질도를 보여주고 있다.

#### 3.3 탐사 위치 및 구간

TSP 탐사는 2011년 12월 14일 실시하였으며, 탐사구간과 수진공, 발파공의 위치 및 배치는 아래 표 2와 그림 7과 같다. 발파공은 터널 좌측벽에 총 24hole을 천공하여, 수진기에서 가까운 발파공부터(1번 발파공 → 24번 발파공) 발파를 실시하였다.

#### 3.4 Data 획득

장약량은 50g을 기준으로 시행하였으며, 발파공과

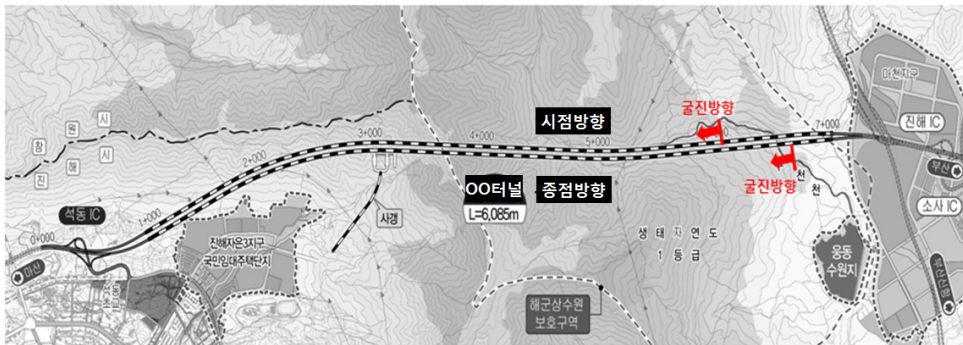


그림 4. OO-OO 도로개설공사 평면도(OO-OO 도로개설공사 설계보고서).

표 1. OO터널 공사 현황(OO-OO 도로개설공사 설계보고서)

OO터널 현재 공사 현황 (2011년 12월 14일)		시점방향 : 961m 굴착 (STA. 6+054) 종점방향 : 412m 굴착 (STA. 6+598)	
터널	구분	시점방향	종점방향
	연 장	6,100m	6,085m
	시 점	STA. 0+935	STA. 0+945
NATM 터널	구분	시점방향	종점방향
	연 장	6,060m	6,035m
	시 점	STA. 0+955	STA. 0+975
경문형식	구분	시점방향	종점방향
	시 점	STA. 7+035	STA. 7+030
부대시설	구분	벨마우스 변형	
	시 점	STA. 7+015	
부대시설		벨마우스 변형	
부대시설		차량용 피난연결통로 10개소, 대인용 피난연결통로 21개소	

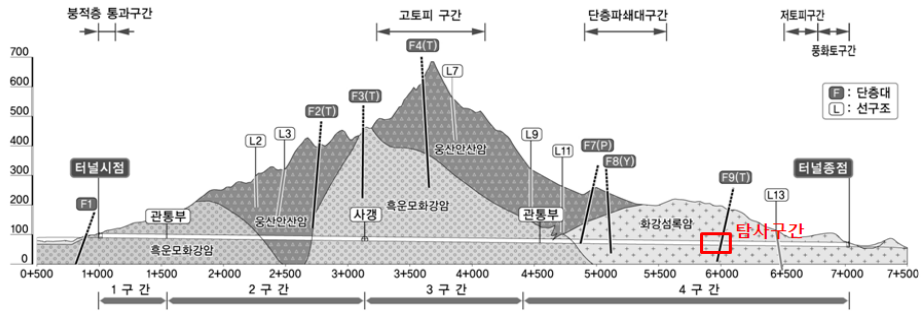


그림 5. OO터널 지질도 및 탐사위치(OO-OO 도로개설공사 설계보고서).

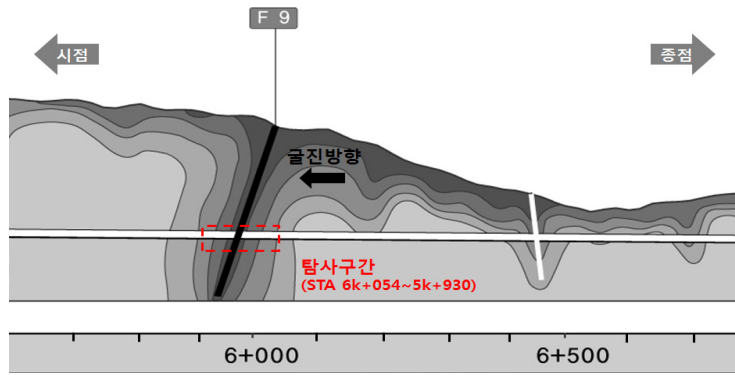


그림 6. 탐사위치 상세도.

표 2. TSP 탐사범위

탐사구간	수진공		발파공		탐사범위
	위치	공수	위치	공수	
시점방향	STA. 6+110 (좌,우측)	2	STA. 6+090 ~ STA. 6+055.2 (좌측)	24	STA.6+054(막장면)~STA.5+930 (막장면으로부터 약 124m)

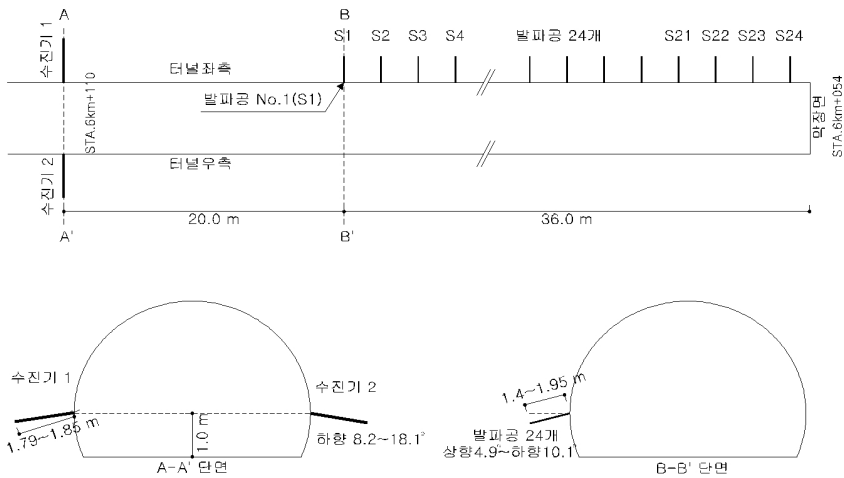


그림 7. 수진공 및 발파공의 위치.

수진기 사이의 거리가 증가함에 따라 수진된 파의 진폭이 점차 감소되므로, 발파공 1~4번은 장약량을 50g, 발파공 5번~14번은 80g, 발파공 15~24번은 100g으로

장약량을 점차 증가시켜 발파하였다. TSP 탐사를 통해 계측된 다음 표 3과 같이 data를 결과분석에 활용하였다.

표 3. TSP 탐사 측정 Sheet

TSP 203 Field Recording Sheet																	
Project		OO~OO 도로개설공사															
Reference Station TM			STA. 6km+110														
Face Station TM			STA. 6km+054														
			RCV1	RCV2	Tunnel Profile:												
Tilt			8.2	18.1	Height							7.249 m					
Azimuth			0	0	Radius							7.264 m					
Height from REF			1.00	1.05	Tunnel Reference:												
Distance to REF			0	0	Right							- m					
Depth			-1.85	1.79	Down							0 m					
Shot No.	Shot-hole No.	Charge Size (g)	Distance to Prev. shot(m)	Distance to REF (m)	Depth (m)							Height (m)	Tilt(°)	Azimuth (°)	Rec. Time (h:m)	max. Amplit. (mV)	Comment
1	1	50	-	20.00	-1.00							1.0	0.5	0.0	16:12	3666	
2	2	50	-	21.45	-1.43	1.0	0.6	0.0	16:14	3051							
3	3	50	-	22.90	-1.40	1.0	1.9	0.0	16:16	2671							
4	4	50	-	24.50	-1.55	1.0	0.8	0.0	16:18	2665							
5	5	80	-	26.10	-1.40	1.0	-4.9	0.0	16:20	1896							
6	6	80	-	27.50	-1.43	1.0	-2.0	0.0	16:22	1852							
7	7	80	-	28.90	-1.45	1.1	-0.4	0.0	16:24	2546							
8	8	80	-	30.30	-1.45	1.1	1.0	0.0	16:26	3421							
9	9	80	-	31.90	-1.53	1.2	-1.0	0.0	16:28	2503							
10	10	80	-	33.40	-1.50	1.2	1.2	0.0	16:30	1360							
11	11	80	-	34.90	-1.55	1.0	9.4	0.0	16:32	1751							
12	12	80	-	36.35	-1.50	1.0	6.0	0.0	16:34	1412							
13	13	80	-	37.85	-1.53	1.0	7.3	0.0	16:36	1256							
14	14	80	-	39.40	-1.95	1.0	10.0	0.0	16:38	1086							
15	15	100	-	41.00	-1.50	1.0	10.1	0.0	16:39	1715							
16	16	100	-	42.40	-1.55	1.2	6.6	0.0	16:41	1648							
17	17	100	-	44.00	-1.45	1.2	5.1	0.0	16:43	1129							
18	18	100	-	45.60	-1.50	1.0	7.6	0.0	16:45	636							
19	19	100	-	47.05	-1.50	1.2	5.5	0.0	16:47	727							
20	20	100	-	48.40	-1.50	1.2	6.1	0.0	16:50	502							
21	21	100	-	50.00	-1.50	1.2	7.9	0.0	16:53	502							
22	22	100	-	51.65	-1.50	1.2	8.8	0.0	16:55	455							
23	23	100	-	53.30	-1.60	1.2	8.4	0.0	16:57	330							
24	24	100	-	54.70	-1.60	1.2	7.9	0.0	17:00	387							
Date	2011. 12. 14			Operator	SK E&C GEOTASK												

4. 탐사결과 및 막장관찰 결과 비교분석

OO~OO 도로개설공사 OO터널 시점방향에서 TSP 탐사를 실시하여 굴진면(STA. 6km+054)으로부터 약 124m를 탐사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

4.1 막장전방 암반 특성

1, 2번 수신기에서 측정된 반사파의 파동 분석을 통해 산정된 구간별 P파와 S파의 속도 및 동탄성 계수의 분포는 아래 그림 8과 같다.

본 탐사구간은 화강섬록암이 분포하는 지역으로, 탐사결과 측정 및 추정된 암반특성은 다음 표 4와 같다. 암반 물성 중 탄성파속도와 동탄성계수는 TSP 탐사 결과에 의해 측정된 값이다.

4.2 불연속면 분포 및 암질 변이

불연속면의 위치와 동탄성계수 값에 근거한 막장 전방부의 암반상태는 아래 그림 9와 같다. 불연속면은 탐사 결과 나타난 것들 중 길이가 10m 이상의 두

렷한 것을 대상으로 분포시켰다. 푸른색 영역은 현재의 막장면과 비교할 때, 상대적으로 양호한 암질 구간을 나타내며, 붉은색 영역은 상대적으로 불량한 암질 구간을 의미한다.

불연속면의 위치(Station)는 중심선(Reference line)과 만나는 지점으로 표기하였으며, 아래 그림 9에서 R은 polarity를 나타낸다. 이 polarity는 탄성파가 전파되는 매질이 밀도가 작은 매질에서 큰 매질로 변할 때 양의 값을 가지며, 매질의 밀도가 큰 매질에서 작은 매질로 변할 경우에는 음의 값을 갖는다. Polarity가 양의 값이면 암맥이거나 암상의 변화가 있는 지점이며, 음의 값이면 절리면, 파쇄대 및 연약대로 추정할 수 있다. Chainage는 STA.(위치)를 나타낸다.

TSP 탐사 결과, 가탐범위는 굴진면(STA. 6km+054)에서부터 약 124m 구간(STA. 5km+930)으로 확인되었다. 탐사구간 중 단층대 예상 구간에 불연속면이 밀집한 파쇄대 등이 뚜렷하게 확인되지는 않았으나, 암질은 현 막장(STA. 6km+054) 및 인접구간에 비해 다소 불량한 것으로 나타났다. 구간별 탐사결과를 요약하면 다음의 표 5와 같다.

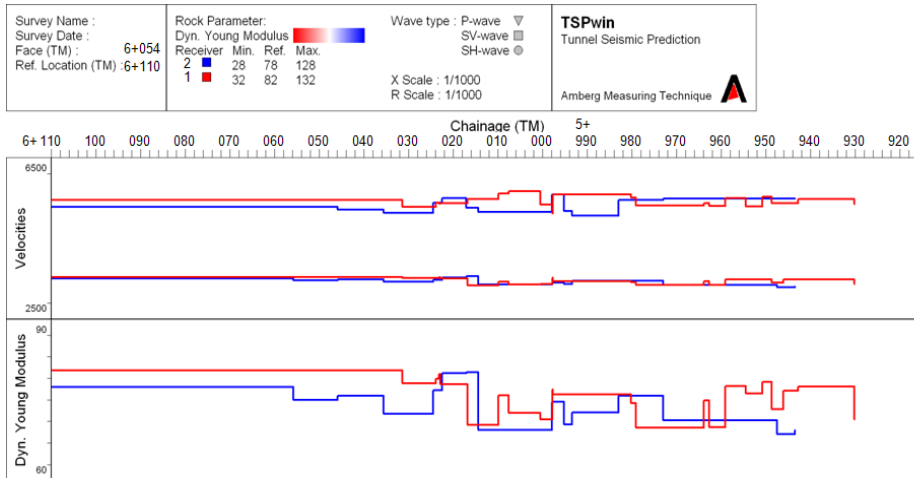


그림 8. TSP 탐사 파동 분석.

표 4. TSP 탐사 결과

구 분	탄성파 속도 (m/s)		동탄성계수 (GPa)
	P파	S파	
최 대	5,949	3,314	82
최 소	5,157	2,966	67

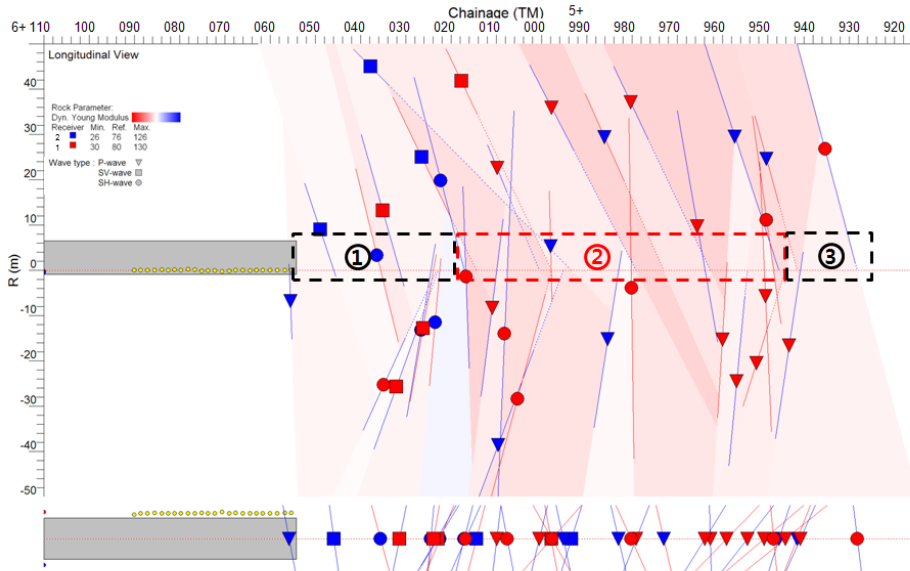


그림 9. 구간별 탐사결과.

표 5. 구간별 탐사결과

구분	구 간 (STA.)	연장	탐사결과
1	STA. 6km+054~STA. 6km+018	36m	현 막장 암질과 유사한 구간
2	STA. 6km+018~STA. 5km+945	73m	현 막장 대비 암질이 다소 불량한 구간
3	STA. 5km+945~STA. 5km+930	15m	현 막장 암질과 유사한 구간

4.3 TSP 탐사와 현장에서의 막장관찰결과 비교분석

TSP 탐사에 의하여 막장전방 파쇄대의 존재유무를 예측한 결과와 굴착 후 Face Mapping 자료를 비교해 본 결과 #1 구간과 #3 구간은 RMR 70~80으로 현 막장의 암질과 유사하게 양호한 암반이 분포하는 것으로 나타났으며, #2 구간에서는 RMR 60~70으로 현 막장보다 다소 불량한 암반이 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 현장에서의 막장관찰결과 탐사결과와 동일하게 단층대나 불연속면이 밀집한 파쇄대구간은 발견되지 않았다. 다음의 그림 10은 실제 현장에서 조사된 Face Mapping 자료이다.

5. 결론

OO~OO 도로개설공사 OO터널 시점방향(STA. 6km+054) 전방의 단층대 예상구간(STA. 6km+985~975) 주변 암질과 파쇄대 등 주요 지질이상대를 파악하기

위하여 TSP 탐사를 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

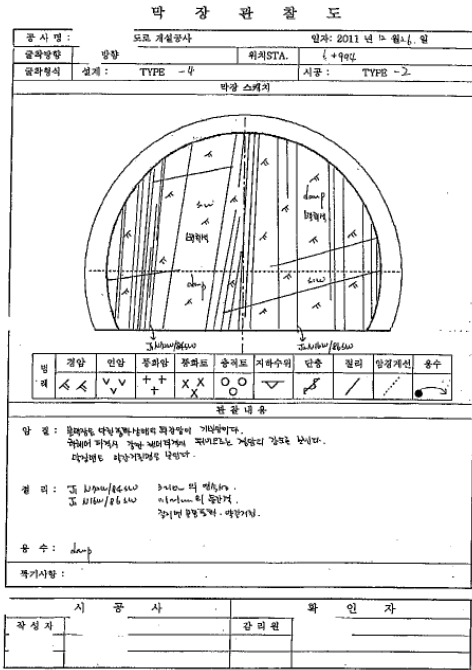
TSP 탐사결과 가탐범위는 굴진면(STA. 6km+054) 으로부터 전방 124m구간(STA. 5km+930)까지로 탐사구간 중 실시설계 당시 단층대(F9)의 예상 구간에 불연속면이 밀집한 파쇄대 등이 뚜렷하게 확인되지는 않았으나, 암질은 현 막장(STA. 6km+054) 및 인접구간에 비하여 다소 불량한 것으로 나타났다.

Face Mapping 자료를 분석해 본 결과 #1 구간과 #3 구간은 RMR 70~80으로 현 막장의 암질과 유사하게 양호한 암반이 분포하는 것으로 나타났으며, #2 구간에서는 RMR 60~70으로 현 막장보다 다소 불량한 암반이 분포하는 것으로 나타났다.

본 TSP 탐사에 의한 지반예측 결과와 굴착 후 Face Mapping 자료를 비교·분석해 본 결과 탐사 결과와 굴착 후 막장의 관찰 결과가 대부분 일치하는 것을 확인하였다.

향후에도 터널공사현장에서 이와 같이 TSP 탐사를





**RMR SYSTEM 평가**

TUNNEL NAME: 시 국 사 확 인 자  
 SITE: 방항 STA. No 4 945  
 DATE: 2011년 10월 31일

구분	평가 기준					
	1	2	3	4	5	
1. 암석	암석의 종류	암석의 종류	암석의 종류	암석의 종류	암석의 종류	
	암석의 등급	2,500 이상	1,000 - 2,500	500 - 1,000	250 - 500	100 - 250
2. R.O.D	충격도	80 - 100%	75 - 80%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%
	불연속면의 거리	> 2m	0.5 - 2m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm
3. 단면속	길이	연속성 < 1m	연속성 1 - 2m	연속성 3 - 10m	연속성 10 - 20m	연속성 > 20m
	경도	6	5	4	2	0
4. 단면속 상태	충격도	충격도 < 0.1m/s	충격도 0.1 - 1m/s	충격도 1 - 5m/s	충격도 > 5m/s	< 25%
	충격도	6	5	4	2	0
5. 지질	지질	암반	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
	지질 상태	단조상태	층간지공도 < 10 L/min	층간지공도 10 - 25 L/min	층간지공도 25 - 125 L/min	층간지공도 > 125 L/min
6. 방향	주방이 타원형면과 수직					
	방향	경사방향	곡률	곡률	곡률	곡률
7. RMR 점수	RMR 점수	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
	RMR 점수	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
종류		6	3	결정 TYPE		

그림 10. Face Mapping 자료.

통한 막장 전방에 존재하는 지질이상대 파악이 적극 활용된다면 보다 안전하고 효율적인 공사가 진행될 것으로 기대된다.

**References**

1. Amberg(a), 2003, TSP Evaluation Manual.
2. Amberg(b), 2003, TSP Operation Manual.
3. OO-OO 도로개설공사 설계보고서.
4. 차성수, 김세훈, 윤상필, 배정식, 이진무, 1999, TSP 탐

사를 이용한 지하유류 저장 공동 및 도로터널의 시공 중 설계변경 사례 고찰, 한국지구물리탐사학회 학술발표회, pp. 117-136.

5. 유진오, 백성권, 2004, NATM 터널 시공 중 TSP 탐사 적용사례, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 4833-4838.
6. 김재현, 2010, TSP 탐사에 의한 암반물성과 RMR의 상관성 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 부경대학교.
7. 배종섭, 장찬동, 2013, 터널 내 탄성파탐사(TSP)기법의 주입담 보조여수로 적용 사례 연구, 대한지질공학회(지질공학회지), Vol. 23, No. 1, pp. 67-77.



**조 성 원**  
SK 건설

Tel: 02-3700-7322  
E-mail: swcho-a@sk.com



**이 효**  
SK 건설

Tel: 02-3700-9348  
E-mail: hyolee@sk.com



**유 재 원**  
SK 건설

Tel: 02-3700-7293  
E-mail: jw.yoo@sk.com



**김 도 훈**  
SK 건설

Tel: 02-3499-1685  
E-mail: hy0795@sk.com



**남 승 혁**  
SK 건설

Tel: 02-3499-1075  
E-mail: steve.nam@sk.com