

## 터널 내 탄성파탐사(TSP)기법의 주암댐 보조여수로 적용 사례 연구

배종섭<sup>1,2</sup> · 장찬동<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지질환경과학과, <sup>2</sup>한국수자원공사

### Use of the Tunnel Seismic Prediction Method for Construction of Spillways at Juam Dam

Jongsoem Bae<sup>1,2</sup> and Chandong Chang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Chungnam National University, <sup>2</sup>K-water

주암댐 보조여수로 건설공사 터널 구간 중 사전 조사가 미치지 못하는 구간의 정보취득과 파쇄대의 정확한 위치 및 크기를 예측하기 위하여 일부 구간에 대하여 터널 내 탄성파탐사법(TSP)탐사를 실시하였다. 공사 착공 전에 실시한 사전조사 결과(지표 지질조사, 전기비저항 탐사, 시추조사 등), TSP탐사 결과, 그리고 실제 현장 굴진면에 대한 지질매핑 결과를 비교하였다. TSP탐사는 사전조사에서 감지하지 못한 주요 파쇄대를 잘 감지해내었으며 이에 따라 초기에 계획된 보강 계획을 변경하였다. TSP탐사 예측결과와 현장 막장면 비교 결과 파쇄대가 발달한 지점이 대부분 일치하는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해 터널 굴진면 예측에 비용 및 시간을 최소화 할 수 있고, 높은 정확성을 갖고 있는 TSP탐사의 현장 적용이 유용한 것으로 판단하였다. 다만 TSP탐사법이 갖는 몇 가지 단점으로 인하여 현장 적용에 일부 제약이 뒤따르나 이를 보완한다면 터널 굴착시 전방 예측을 위해 비교적 높은 효율성과 신뢰성을 갖고 TSP탐사를 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

**주요어** : 터널 내 탄성파탐사법, 주암댐 보조여수로, 보강패턴, 불연속면, 지질매핑

We conducted a Tunnel Seismic Prediction (TSP) survey in a spillway tunnel at Juam Dam to predict the locations of major discontinuities ahead of the tunnel face. We compared the results of the TSP survey with those from pre-construction inspections (including a surface resistivity survey and borehole investigations) as well as with direct tunnel-face mapping during excavation. The TSP method predicted the locations of major fracture zones that were unnoticed in the pre-construction inspections. The reinforcement patterns planned on the basis of pre-construction inspections were changed on the basis of the TSP results. The results demonstrate that TSP surveys are a cost-effective and reliably accurate method of predicting the locations of fracture zones. Although the TSP method has some limitations, these results suggest that the method is generally useful for predicting geological conditions prior to tunnel face construction.

**Key words** : Tunnel Seismic Prediction, spillway tunnel for Juam Dam, reinforcement pattern, discontinuities, face mapping

\*Corresponding author: cchang@cnu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

터널 굴진시 가장 중요한 사항 중 하나는 터널 막장 전방의 지질 상태 및 불연속면의 존재 유무를 확인하고 이에 부합하는 대처 계획을 수립하여 사고를 미연에 방지하는 것이다. 굴진 전방의 지질 상태를 파악하기 위하여 대부분의 경우 지표 지질조사, 전기비저항 탐사, 시추조사 등의 사전조사가 수행되며 그 결과에 따라 보강 패턴이 계획된다. 사전조사를 통하여 파악하기 어려운 깊은 심도의 구간에 대한 보다 정밀한 지질정보는 터널 시공 중 막장관찰이나 선진수평시추 등의 방법을 통해 획득된다. 그러나 막장관찰에 의한 방법을 통해서도 현 막장위치의 지질 상태를 근거로 불과 수 m 전방의 지질 상태만 유추 가능하며, 선진수평시추를 통해서도 전방 지질 상태를 직접 확인할 수 있지만, 비용이 많이 들고, 시간이 오래 걸린다는 단점이 있으며, 조사범위 또한 시추범위 내로 제한된다.

이러한 기법들의 문제점을 극복하기 위한 방법으로 탄성파반사법탐사를 수행하여 막장 전방을 예측하고자 하는 시도가 이뤄졌으며, 그 중 터널 내 탄성파반사법 탐사(TSP: Tunnel Seismic Prediction)를 통해 신속하고 경제적으로 터널 막장면 전방예측이 가능하게 되었다(Sattel et al., 1992). 국내에서는 특히 도로 터널공사, 지하저장기지 건설 등에 TSP탐사가 사용되고 있으며, 이를 통해 굴진 전방 파쇄대 분포를 비교적 정확하게 파악함으로써 지보 등의 보강이 효율적으로 이루어진 사례가 있다(Cha et al., 1999; Min et al., 2005). 이들 기존 연구들은 당초 설계에서 계획된 보강방법, 굴착 경로 등을 TSP탐사 및 시추탐사 결과에 의해 예측된 지질구조를 반영하여 변경하는 사례들을 제시하였다.

TSP탐사를 실시할 경우 이를 수행하는데 따르는 시간 및 제반 비용이 소모될 뿐 아니라, 터널 굴착 공중중에 탐사가 진행되어야 하므로 이로 인한 굴착작업 지연 등의 기타 비용이 발생할 수 있다. 비록 이러한 시간 및 비용의 소모가 있더라도 TSP탐사를 통해 터널전방에 대한 정확도 높은 정보를 취득하여 효과적이고 안전하게 터널굴착을 진행한다면, 이는 경제적으로 더욱 이득이 될 수 있다. 이를 위해서는 무엇보다 TSP탐사 자료의 정확성이 뒷받침되어야 한다.

본 연구에서는 댐 여수로 터널 공사의 사례에 대하여 TSP탐사 예측 결과와 실제 굴진 후 확인된 막장 전방의 지질 상태를 비교하여 TSP탐사의 현장 적용성과 신뢰

도를 확인하는데 초점을 맞추었다. 또한 조사지점 제한과 같은 자료수집의 한계 등의 문제로 신뢰성이 한정된 사전조사에서 규정한 보강패턴을 TSP탐사 결과에 맞추어 성공적으로 변경한 사례를 소개한다. 본 연구를 통해 TSP탐사의 전방예측 정확성에 대한 신뢰도가 확인되고 경제적 가치가 충분하다는 것이 입증된다면 본 현장과 유사한 공사(터널굴착, 지하저장소 개발 등) 현장에 TSP탐사가 활용되어 굴착 효율을 높이고 안정성을 확보하는데 크게 기여할 것으로 생각된다.

## 연구지역

### 지형 및 지질 특성

연구지역은 지리산 남서부에 위치하며 행정구역상 전라남도 순천시 주암면 광천리 일원에 해당한다. 지형특성은 북쪽으로 밤실산, 아미산, 회야산, 유치산이 위치해 있으며, 남쪽으로 모후산, 조계산 등이 위치하고 있다. 본 조사지역인 주암호 주변에는 보성강을 주수계로 동북천, 죽산천, 한천천, 송광천, 신성천, 후곡천, 삼청천, 대광천 등을 지천으로 가지고 있다.

이 지역은 지체구조상 영남육괴에 해당하며(Fig. 1a) 건설공사 주변은 선캄브리아기 변성암류, 고생대 퇴적암류, 백악기 퇴적암류, 화산암류, 관입암류, 그리고 시대 미상의 화강암류들이 다양하게 분포하고 있고 이들을 제 4기 충적층이 피복하고 있다(Fig. 1b). 건설공사 지역은 선캄브리아기의 화성기원 변성암인 화강암질편마암 지대에 위치한다. 연구지역 북서쪽 약 5 km에 발달된 고생대의 퇴적암은 오음리층, 함탄층, 천운산층으로 구성되어 있고 함탄층으로 인해 호남탄전을 이루었다. 호남탄전에 포함된 일련의 퇴적암들은 유라기에 활동한 우수향 주향이동성 호남전단대에 의하여 심하게 변형되어 있다. 호남전단대는 전체적으로 북동-남서방향으로 발달되어 있으나, 연구지역 주변에서 남북방향으로 지나가고 있으며 연구지역의 서쪽 2-3 km에 위치한다. 연성전단 운동은 과업구간에도 영향을 끼쳐 화강암질편마암내에 국지적으로 압쇄대가 생성되었으며 주변에 엽리상 구조가 발달하게 되었다. 연구지역의 동쪽지역에는 백악기 분지가 발달되었으며 세일, 사암등 쇠설성퇴적암과 화산 분출에 의한 응회암류가 분포하고 있다. 이러한 지질진화과정을 거친 후 제4기에 용기와 침식작용을 받아 저지대에 충적층이 형성되며 현재의 지형구조를 이루게 되었다.

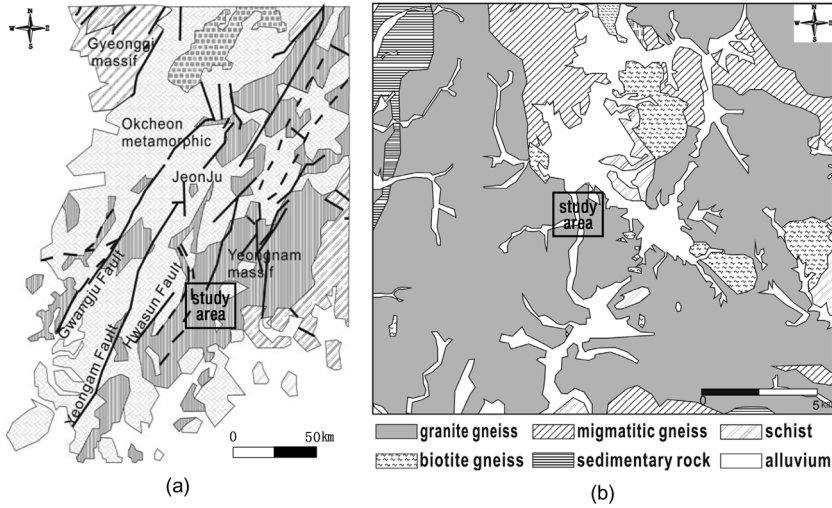


Fig. 1. Geological maps of the study area (K-water, 2010) showing (a) the regional distribution of lineations and (b) lithological units.

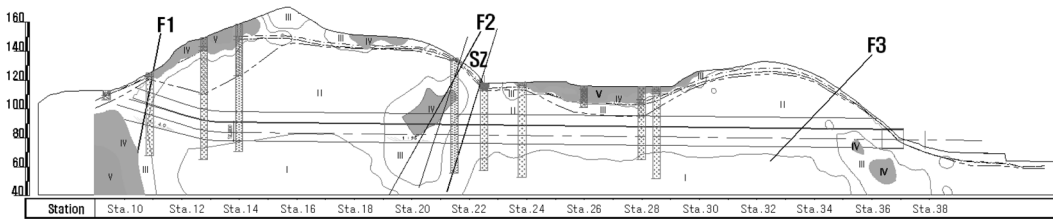


Fig. 2. Cross-sections of Juam Dam spillway tunnels. F1, F2, and F3 indicate major faults. SZ indicates a shear zone.

**터널 특성**

연구대상인 주암댐보조여수로 터널은 기상이변에 의해 두 배 가까이 증가한 최대 가능홍수량에 대비하여 댐의 방류능력을 현격히 향상시키기 위한 필요성에 의해 계획되었다. 방류 허용량, 터널의 길이 및 터널 안정성 등을 고려하여 총 연장 542m의 평행한 2면 터널로 구성되었다. 터널 굴진은 개착구간 17m를 제외한 모든 구간에서 NATM공법으로 진행되었다. 터널 일반부는 내공직경이 12.8m인 원형터널이고 천이부는 직립마체형 + 원형이며 터널 굴착 방향은 유출부에서 유입부 방향으로 이루어진다. 두 터널 간 간격은 터널의 안정성을 고려한 26m (2×터널지름) 이상의 이격거리를 유지하며 교대로 굴착 작업이 진행되고 있다. 본 연구에서는 두 터널 중 한 터널에서 수행된 TSP탐사에 대해 보고한다.

사전조사로서 지표 지질조사, 전기비저항 탐사와 시추조사가 수행되었으며 이들 사전 조사에서 분석된 결과들을 Fig. 2에 나타내었다. 사전 지표 지질조사를 통해 세 개의 주 단층들(F1, F2, F3로 표시)이 터널 계획

구간을 관통하고 있는 것으로 파악되었다. 터널 유입부로부터 약 20m 지점을 통과하는 단층 F1은 단층각력(크기 5cm 내외)을 포함하는 폭 20cm 내외의 파쇄대 형태로 발달해 있으며, 방향은 N58W/80SW이다. 터널 중간부분의 단층 F2는 폭 1m 내외의 파쇄대가 발달하였고 그 중심에 10cm 내외의 단층점토를 포함하는 단층코어가 존재하는 것으로 조사되었으며, 방향은 N21W/57SW으로 세 단층 중 규모가 가장 크고 연성전단대(SZ)와 인접하여 가장 주의를 요하는 단층이다. 터널 유출부 부근의 단층 F3는 단층점토의 발달이 미약하며 폭 20cm 내외의 파쇄대의 형태를 보이며 방향은 N76W/46SW이다. 단층 F2와 인접하여 관찰되는 연성전단대(SZ)는 폭 1m 내외의 파쇄대가 발달하였고, 화강편암이 압쇄작용을 받아 형성된 압쇄암이 분포하는 것으로 관측되었으며, 방향은 N58W/73SW이다.

터널 구간에 대한 전기비저항탐사 결과 저비저항 이상대가 세 곳(터널 유입부, 중간부, 터널 유출부)에서 관측되었으며 이들은 위에 기술한 단층대(F1, F2)와 연성

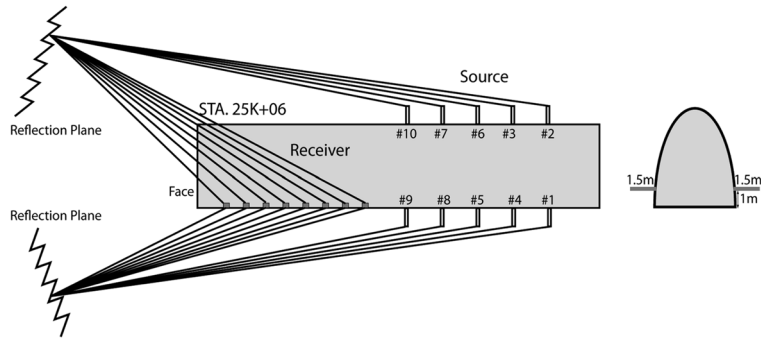


Fig. 3. TSP source and receiver array used in spillway tunnels of Juam Dam.

전단대(SZ)의 위치와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 다만, 유출부 구간에서 저비저항 이상대가 관측되는데 이는 계곡부의 물에 의한 영향과 발전소로 이어지는 고전압전선에 의한 복합적인 영향으로 조사되었다. 사전 시추는 터널 유입부와 중간부의 총 10곳에서 계획된 터널을 관통하는 심도까지 대부분 굴착되었다. 시추조사를 통해 RQD, 암상 및 암질 등의 기본 정보를 수집하였다. 사전조사 시 시행한 전기비저항 탐사의 전기비저항 값과 시추조사 코어를 이용한 RMR 분류를 종합하여, Fig. 2와 같이 지반상태에 대한 등급 분류(I-V)를 하였다.

터널 통과구간은 단층대 주변 일부 구간과 터널 유입부의 계곡부에 의해 물이 나오는 구간을 제외한 대부분의 구간에서 II 등급으로 나타나고 있어 암반상태에 의한 터널 시공에는 큰 문제가 없는 것으로 파악되었으며, 따라서 터널 안정성은 구조지질학적 요인들(단층대, 연약대, 파쇄대 등)에 의해 주로 좌우되는 것으로 예측되었다.

### TSP 탐사

#### 탐사개요

터널 굴착 과정에서 막장 전방의 지질구조를 효율적으로 파악하기 위하여 터널 내 탄성파반사법탐사(TSP; Tunnel Seismic Prediction) 기법을 이용하였다. 터널 내 탄성파반사법 탐사의 원리는 기본적으로 지표에서 수행하는 탄성파반사법 탐사의 기본원리와 같으나 송신기와 수신기가 터널의 벽면에 위치한다는 점이 다르다. 터널 내의 벽면에 천공한 공에서 소량의 화약을 이용하여 탄성파 에너지를 발생시키면 모든 방향으로 전파되는 탄성파가 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 전파경로 상에 파쇄대, 지질경계, 암상의 변화에 기인한 임피던스 차이에 의해 반사되며, 이러한 반사파는 터널 벽면에 설치된 일

련의 수신기에서 감지되어 기록된다. 단일 송신점과 단일 수신점만으로는 반사면의 방향과 위치를 파악할 수 없기 때문에 여러 개의 상호 위치가 다른 송신점과 수신점이 필요하며, 이러한 다양한 위치 조합의 개수가 많을수록 막장전방의 영상화의 정확도는 증가한다. 실제 탐사에서 일반적으로 다-송신점 소-수신원 혹은 소-송신원 다-수신점의 탐사배열을 이용하여 자료를 획득하게 되는데, 본질적으로는 동일한 탐사방법으로 수신방법에 만 약간의 차이가 있다.

본 연구에서는 소-송신원, 다-수신점 배열법을 사용하였으며, 터널의 한 벽면에 8개의 수신기 배열을 설치하고 양벽면에 각 5개, 총 10개의 송신점 배열을 설치하여 TSP 탐사를 수행하였다(Fig. 3). 이 배열법은 다-송신원, 소-수신점 배열법과 비교하여 자료의 수는 거의 비슷하나, 송신점의 개수가 적어 설치시간이 짧아진다는 장점이 있다. 각 송신점 간의 거리는 8m, 각 수신점 간의 거리는 8m로 배열하였으며 가장 근접한 송신수신점 간의 거리는 8m이다. 탄성과 송신원으로는 30-80g의 화약을 사용하였다. 수신기로는 100-1000 Hz 주파수 대역의 3성분 지오폰을 사용하였다.

#### 터널 탐사결과

본 논문에서 터널 내 위치는 Station (이하 Sta.)을 기준으로 나타내었다. Sta. 01의 간격은 20m (Sta. 01+00 - Sta. 01+19.9)이며, 연구 대상 터널의 경우 유입부 Sta. 09+00에서 시작하며 유출부 Sta. 38+00까지 연장된다(Fig. 2). 터널에 대한 TSP탐사는 Sta. 25+06구간에서 수행하였으며, 예측구간은 약 200m 전방인 Sta. 15+00까지이다.

현장에서 취득한 원자료(raw data)는 일반적인 반사파 탐사 자료처리의 경우와 같은 방식으로 일련의 처리과

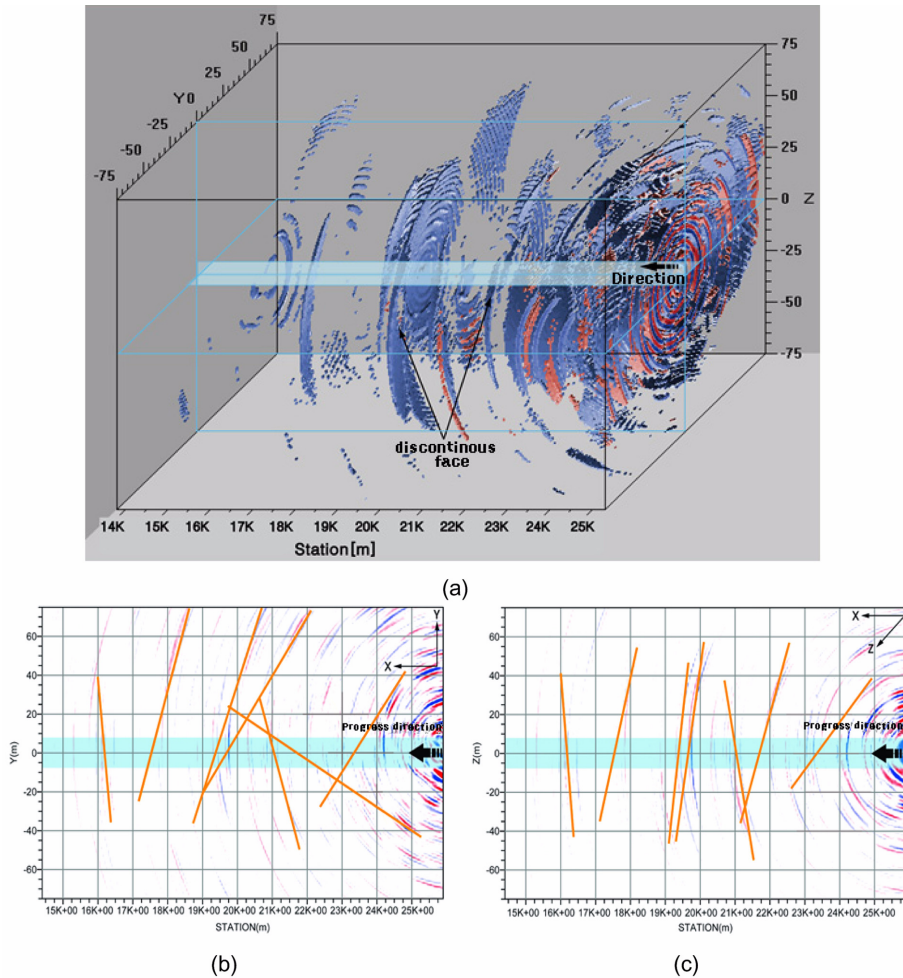


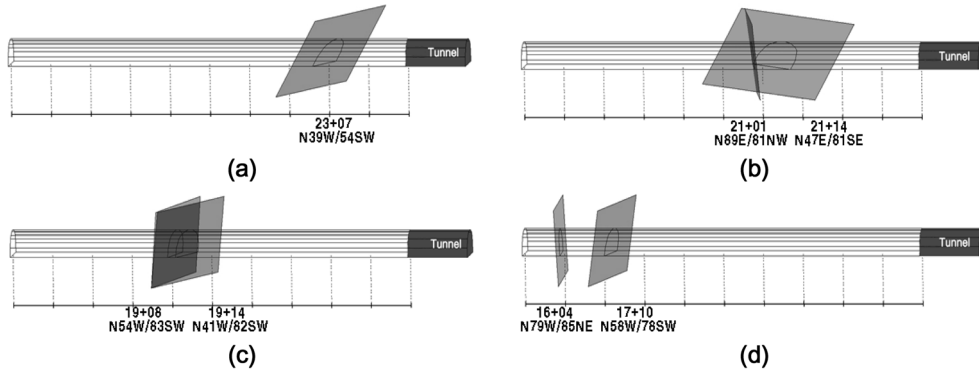
Fig. 4. Results of TSP survey: (a) 3-dimensional image of reflectors, (b) plan view, and (c) profile view.

정을 거쳐 최종 반사 이벤트를 규명하였다. 자료처리과정은 불필요한 신호의 제거, 반사신호에 대한 증폭, 표면과 등 잡음에 대한 필터링, 속도분석, 3차원 구조보정 등으로 구성되어 있으며(Cohen and Stockwell, 2002) 보통의 탄성과 신호 자료처리의 과정과 동일하므로 본 논문에서는 이에 대한 상세한 설명은 생략한다.

Fig. 4a는 막장전방 3차원 반사면 영상에서 진폭의 절대값이 큰 영역만을 도시한 것으로, 반사이벤트는 탄성과 속도의 세기가 급격히 변하는 지점(급격히 낮아지거나 증가하는 지점에서 나타난다. 결과 영상도는 전방향에서 들어오는 반사이벤트로 인해 원호 모양을 나타내고 있으며, 이를 통해 터널 굴착 단면 뿐 아니라 주변부에 대한 정보도 획득할 수 있다. 파쇄대의 발달 상태는 Fig. 4에 나타난 반사이벤트의 진폭을 통해 유추할

수 있는데, 진폭이 큰(색이 진한) 곳이 파쇄대가 발달한 지점으로 해석되며, 컴퓨터를 이용한 3차원 영상으로 관찰하면 더욱 확연하게 구별할 수 있다.

3차원 반사영상에 근거하여 해석된 지질구조면들을 터널을 기준으로 한 평면도(Fig. 4b)와 단면도(Fig. 4c)에 투영하여 도시하였다. 평면도에 나타나는 X방향은 터널 굴착 진행방향과 평행한 방향이며, Y방향은 터널 진행방향과 수평적으로 수직인 방향을 나타낸다. Y방향의 (+)방향은 Station이 감소하는 방향(유출부에서 유입부 쪽으로 향하는 방향)에 대하여 오른쪽을 가리키며, Y방향의 (-)방향은 Station이 감소하는 방향에 대하여 왼쪽을 가리킨다. 단면도에 나타나는 Z방향은 터널을 기준으로 상/하 방향을 가리키며, 0점은 터널바닥, (+)방향은 터널의 상부, (-)방향은 터널의 하부를 가리킨다.



**Fig. 5.** Locations and orientations of discontinuities interpreted based on the 3-dimensional TSP reflector image: (a) Sta. 23 + 07, (b) Sta. 21 + 01 and 21 + 14, (c) Sta. 19 + 08 and 19 + 14, and (d) Sta. 16 + 04 and 17 + 10. ‘Sta.’ stands for ‘Station’. See text for details.

Fig. 4의 결과에서 보면 TSP탐사 시작 지점으로부터 전방 약 200 m 지점까지 전 구간에 걸쳐 반사이벤트가 감지되는 가운데 특히 TSP탐사 시작 지점 근처에 반사이벤트가 집중되어 있음을 볼 수 있다. 이는 탐사 시작 지점이 터널 막장면 근처이기 때문에 막장면 전, 후방 모두에서 오는 신호들이 뒤섞여 복잡하게 나타난 것으로 해석된다. 일반적으로 TSP탐사 수행지점의 특수성을 감안할 때 탐사지점으로부터 전방 약 50 m 지점에 대해서는 이러한 원치 않는 잡음이 많이 섞여 자료해석에 어려움이 있으며, 이로 인하여 이 구간은 자료의 정확성이 높지 않다. 하지만 본 연구에 사용된 자료는 가능한 많은 자료를 활용하여야 하는 현장상황을 고려한 조사 자료로 최대한 노이즈를 제거하여 가능한 구간에 대하여 분석을 하였고, 그 결과 Sta. 23 + 10 지점부터 탐사 결과를 활용하였다. Fig. 4에서 Sta. 23 + 00부터 Sta. 19 + 15 까지 구간의 반사이벤트는 Fig. 2에 나타난 단층대(F2) 및 연성전단대(SZ)에 의한 영향으로 보이며, 이들 외의 구간 중 사전조사에서 확인되지 않은 반사면들이 감지되는 구간은 터널 굴착시 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Fig. 4의 반사이벤트를 통해 예측된 불연속면의 위치와 터널 노선과의 교차 양상을 나타낸 것이다. 여기에 제시된 불연속면의 방향은 조사된 반사이벤트 중 가장 강도가 강한 지점을 기준으로 터널 단면을 지나도록 나타내었다. 탐사의 특성상 터널 진행방향과 평행한 방향을 갖는 불연속면이나, 저각의 경사를 갖는 불연속면은 반사파가 발생하기 어려워 탐사가 정확하지 않을 수 있으며, 가장 강한 1개의 방향만을 표시하였기 때문에 실제 막장면에서 나타날 수 있는 다양한 단층이나

절리들을 모두 표현할 수는 없었다.

이들 반사이벤트에 대한 분석을 통해 터널에서 7개의 주요 불연속면을 해석할 수 있었고 터널을 기준으로 각 불연속면의 위치와 방향을 Fig. 5에 도시하였으며, TSP 탐사로 예상되는 주요 위치별 불연속면 특성은 다음과 같다.

#### 가) Sta. 23 + 07 지점

이 지점에서 감지된 반사이벤트의 범위는 Sta. 23 + 10 - Sta. 23 + 03 구간으로, 탐사를 통해 예측된 불연속면의 주된 방향은 N39W/54SW 이다. 탐사시작 구간에 인접한 구간으로 Fig. 4에는 반사이벤트가 크게 나타나고 있지만, 최대한 노이즈를 제외하면 반사이벤트는 두께가 얇게 나타나는 구간으로 부분적인 파쇄가 나타날 것으로 예측되는 구간이다.

#### 나) Sta. 21 + 14, 21 + 01 지점

이 지점에서 감지된 반사이벤트를 통해 예측된 불연속면의 주된 방향은 N47E/81SE, N89E/81NW 이다. Sta. 21 + 14에서 관측된 반사이벤트는 터널 굴착방향을 따라 터널 진행방향의 좌측에서 우측방향으로 터널을 관통하여 넓게 분포하고 있으며 Sta. 21 + 01에서 관측된 반사이벤트는 굴착중인 터널을 거의 수직으로 관통하고 있어, 이를 따라 불연속면이 존재할 것으로 예측된다. 특히 이 지점은 사전조사에서 연성전단대(SZ)가 지나가는 구간이며, 단층대(F2)의 영향을 받은 구간으로, Fig. 4에서 보듯이 반사이벤트가 크고 두껍게 나타나고 있어 터널 굴착면을 따라 압력이 불균한 파쇄대가 막장면 전반에 발달되어 있을 것으로 예측된다.

다) Sta. 19+14, 19+08 지점

이 지점에서 예측된 불연속면의 주된 방향은 N41W/82SW, N54W/83SW 이다. 관측된 반사이벤트는 터널 굴착방향을 기준으로 우측방향(평면도 Y축의 (+)방향)으로 발달한 것으로 보인다. 이 지점은 사전조사에서 단층대(F2)가 지나가는 구간이며, 연성전단대(SZ)의 영향을 받은 구간으로, Fig. 4에서 보듯이 반사이벤트가 크고 두께가 두껍게 나타나고 있어 터널 굴착면을 따라 암질이 불량한 파쇄대가 막장면 전반에 발달되어 있을 것으로 예측된다.

라) Sta. 17+10, 16+04 지점

이 지점에서 감지된 불연속면의 주된 방향은 N58W/78SW, N79W/85NE 이다. Sta. 17+10에서 관측된 반사이벤트는 터널 굴착방향을 기준으로 우측방향(평면도 Y축의(+))방향)으로 반사이벤트가 발달하였고, Sta. 16+04에서 관측된 반사이벤트는 터널 굴착방향을 기준으로 좌우측이 거의 동일하게 반사이벤트가 발달하였다. 이 구간은 탐사지점과 비교적 이격 거리가 먼 구간으로 반사이벤트가 작고 두께가 얇게 나타나 부분적인 파쇄가 나타날 것으로 예측되는 구간이다.

**TSP 탐사자료와 실측자료 비교**

지금까지 기술된 TSP탐사 결과를 사전 조사(지표 지질조사, 전기비저항탐사 및 시추조사) 및 실제 지질매핑 결과(face mapping)와 비교하였다. TSP탐사 이후 본 연

구기간 까지 터널의 실제 굴진은 Sta. 19+15 지점까지 굴착되었고, 이 지점은 TSP 탐사 지점으로부터 약 100 m 떨어진 지점이다. 터널 굴착은 암반등급에 따라 진행되었고, 굴착된 막장면에 대한 지질매핑을 통해 암반등급(RMR) 평가를 실시하였다. TSP탐사가 시작된 시점부터 터널 굴착이 진행된 Sta. 25+06 - Sta. 19+15 구간에 대하여 사전조사자료, TSP탐사자료, 그리고 터널 막장면 관찰 결과를 통해 RMR 평가를 실시한 3가지 자료 중 주요 특성이 있는 여섯 지점을 선별하여 비교하였다. Fig. 6에 막장 스케치 모식도를 도시하였으며 Table 1에 각 지점에서 조사한 RMR분석 결과를 정리하였다. 각 구간에 대한 사전 조사결과 암반등급은 Fig. 4에서 보듯이 II, III, IV 타입으로 분류되었고, 사전조사에서 제시한 보강 패턴이 위 3가지를 분석하여 나온 결과와 상이한 경우 보강 패턴을 새롭게 제시하였다. 각각의 막장면 관찰 결과는 다음과 같이 정리된다.

가) Sta. 25+00 지점(Fig. 6a)

이 지점은 사전조사 결과 보강패턴이 II 타입으로 조사된 지점이다. Fig. 4의 TSP탐사 결과 이 구간에 강한 진폭과 강한 잡음이 나타나긴 하지만 앞에서 기술한대로 이는 대부분 노이즈에 의한 결과로 실제 관측된 반사이벤트는 거의 없는 것으로 분석되었다. 실제 막장에서 눈에 띄는 파쇄구간은 없는 것으로 조사되었으며, 이 구간의 전반적인 암질은 신선한 것으로 관측되었고, 지하수의 유입은 없는 것으로 조사되었다. 크게 2 방향

**Table 1.** RMR classifications at individual locations, and initial and applied (revised) reinforcement plans.

Location	Sta. 25+00	Sta. 23+07	Sta. 22+13	Sta. 21+11.5	Sta. 21+01	Sta. 19+17
Uniaxial compressive strength (MPa)	100-250	50-100	100-250	50-100	50-100	50-100
RQD (%)	50-75	25-50	25-50	25-50	25-50	25-50
Joint spacing (m)	0.2-0.6	0.06-0.2	0.06-0.2	0.06-0.2	0.06-0.2	0.06-0.2
Joint roughness	Rough	Slightly rough	Slightly rough	Smooth	Smooth	Slightly rough
Joint persistence (m)	1-3	3-10	3-10	10-20	10-20	3-10
Joint aperture (mm)	<0.1	0.1-1.0	0.1-1.0	1.0-5.0	1.0-5.0	0.1-1.0
Joint wall weathering	Slightly weathered	Moderately weathered	Slightly weathered	Highly weathered	Moderately weathered	Moderately weathered
Groundwater condition	Dry	Wet	Damp	Damp	Damp	Damp
Joint orientation	Normal	Very favorable	Very favorable	Very favorable	Normal	Unfavorable
RMR	68	44	56	39	31	37
Initial reinforcement plan	II	II	II	IV	IV	IV
Applied reinforcement plan	II	III	III	IV	IV	IV

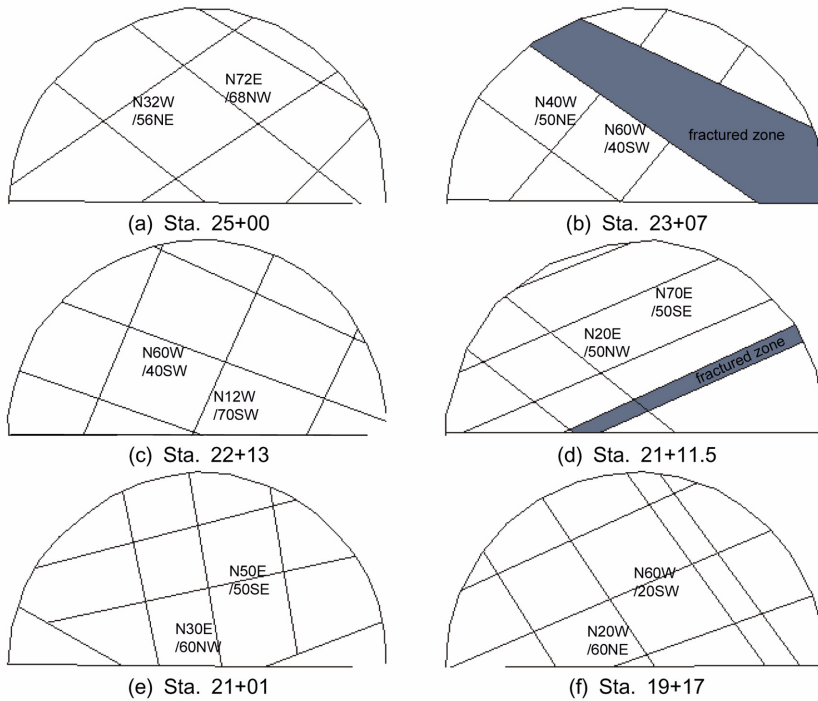


Fig. 6. Sketches of tunnel faces at various locations showing major joint sets and fracture zones.

의 절리군이 분포하며 절리의 간극은 0.1 mm 이하로 작고 약한 풍화를 받은 상태로 조사되어 RMR = 68의 II 등급으로 분석되었다. 사전조사, TSP탐사, 막장면 관찰 결과가 모두 일치하는 구간으로 보강 패턴의 변경이 불필요한 구간이다.

#### 나) Sta. 23 + 07 지점(Fig. 6b)

이 지점은 사전조사 결과 보강패턴 II타입으로 조사된 지점이다. Fig. 4의 TSP탐사 결과 이 지점에서의 반사이벤트는 두껍게 나타나고 있으나 TSP탐사 시작점과 인접하고 있어 노이즈가 일부 섞여 있는 것으로 분석된다. 노이즈를 제외할 경우 얇은 반사이벤트가 관측되며 분석 결과 부분적인 파쇄가 나타날 것으로 예측되는 구간이다. 막장면 관찰 결과 N60W/40SW 방향으로 파쇄대가 나타나며, 파쇄대는 1.0-1.5 m로 비교적 크게 발달하여 있으나 심한 풍화를 받은 암이 아닌 중간 정도의 풍화를 받은 암으로 관측되었고, 압축강도는 50-100 MPa 범위로 나타났다. 파쇄대 구간을 제외한 나머지 구간의 암질은 신선한 상태이며, 파쇄대 구간을 따라 지하수가 일부 유입되는 것을 관찰할 수 있었다. 막장면 관찰을 통한 RMR 평가 점수는 44점으로 III 타입으로

나타났는데 이는 사전조사에서 유추된 II 타입보다 더 열악한 경우이다. RMR 평가점수와 현장상태를 고려할 때 III 타입으로 보강계획의 변경이 필요한 구간이다. TSP탐사에서 조사된 반사이벤트의 방향은 N39W/54SW로, 지질매핑에서 조사된 N60W/40SW와 유사한 방향성을 보이고 있으며, 사전 지표 지질조사에서 나타난 연성전단대(SZ)와도 유사한 방향성을 보이고 있다.

#### 다) Sta. 22 + 13 지점(Fig. 6c)

이 지점은 사전조사 결과 보강패턴이 II 등급으로 조사된 지점이다. Fig. 4의 TSP탐사 결과 이 지점에서의 반사이벤트는 얇게 나타나 부분적인 파쇄가 나타날 것으로 예측되는 구간이다. 막장면 관찰 결과 특별한 파쇄대는 없었으며, N60W/40SW 방향의 절리와 N12W/70SW 방향의 절리가 주된 방향으로, 절리를 따라 5 mm 이하의 견고한 충전물이 관측되었으며, 압축강도는 100-250 MPa로 조사되었다. 주요 절리를 따라 약한 풍화상태를 보이며, 지하수 상태는 약간 습한 상태를 보였으나, 나머지 구간에서 암질의 상태는 신선한 것으로 관찰되었다. RMR 평가점수는 44점이며, 현장상태를 고려할 때 III 타입으로 변경이 필요한 지점이다. Sta.



23+07 지점에서 관찰된 F1 방향의 주요절리와 같은 방향을 보이는 N60W/40SW 절리가 이 지점에서도 관찰되었으며, 사전 지표 지질조사에서 나타난 연성전단대(SZ)와도 유사한 방향성을 보이고 있다.

라) Sta. 21 + 11.5 지점(Fig. 6d)

사전조사 결과 보강패턴이 IV타입으로 계획된 이 지점은 TSP탐사 결과 반사이벤트는 두껍게 나타나 파쇄대가 터널 막장에 전반적으로 발달할 것으로 예측되는 구간이다. 막장면 관찰 결과 TSP탐사에서 예측한 대로 터널 막장 전반에 걸쳐 절리가 발달하였고 절리를 따라 파쇄에 의한 심한 풍화상태를 보였다. 절리를 따라 5 mm 이하의 연약한 충전물이 관측되었으며 막장면은 전체적으로 습윤한 상태이다. 특히 주요절리인 N70E/50SE 방향으로 fractured zone이 10-20 cm 크기로 발달해 있으며, 이 부분은 더욱 심한 풍화를 받은 것으로 관찰되었다. 사전조사에서 IV 타입구간으로 막장면 관찰 결과 RMR 평가점수는 39점이고 현장상태를 고려할 때 IV 타입으로 분류되어 패턴변경이 필요 없는 지점이다. 이 지점과 근접한 Sta. 21 + 14지점 TSP 탐사에서 조사된 강한 반사이벤트의 방향은 N47E/81SE로 지질매핑에서 관찰된 주요절리(F1) 방향과 유사한 방향을 보였다. 사전 지표 지질조사에서 이 지점에 방향 N58W/73SW의 연성전단대(SZ)가 지나가는 구간으로 되어있으나, 지질매핑과 TSP 탐사에서 예측된 방향과는 다소 차이가 있는 것으로 보인다.

마) Sta. 21 + 1.0 지점(Fig. 6e)

이 지점은 사전조사 결과 보강패턴이 IV 타입으로 조사된 지점이다. TSP탐사 결과 이 지점에서 반사이벤트가 두껍게 나타나, 파쇄대가 터널 막장에 전반적으로 발달할 것으로 예측되는 구간이다. 막장면 관찰 결과 TSP탐사에서 예측한 대로 터널 막장 전반에 걸쳐 절리가 발달하였고, 절리를 따라 부분별 파쇄에 의한 심한 풍화상태를 보였다. 절리를 따라 5 mm 이하의 연약한 충전물이 관측되었고, 전반적인 암의 강도는 50-100 MPa이며, 막장면은 전체적으로 약간 습윤한 상태이다. 이 지점에서는 fractured zone이 발달하지는 않았으나 막장면 전반에 걸쳐 촘촘하게 절리가 발달한 것을 관측할 수 있었다. 사전조사에서 IV 타입 구간으로 막장면 관찰을 통한 RMR 평가 점수는 38점이고 현장상태를 고려할 때 IV 타입으로 분류되어 패턴 변경이 필요 없는 지점이다.

이 지점에서의 TSP탐사 결과 N89E/81NW 방향의

강한 반사이벤트가 조사되었으며, 지질매핑에서 관찰된 주요절리(j1)와 유사한 방향을 보였다. 앞의 그림(Sta. 21 + 11.5)에서부터 이 지점까지 터널 굴착면을 따라 유사한 방향을 갖고 있는 2방향의 절리가 연속해서 발달해 있는 것을 관찰할 수 있었다.

사전 지표 지질조사에서 이 지점에 방향 N58W/73SW의 연성전단대(SZ)가 지나가는 구간으로 되어있으나, 지질매핑과 TSP 탐사에서 예측된 방향과는 다소 차이가 있는 것으로 보인다.

바) Sta. 19 + 17 지점(Fig. 6f)

이 지점은 사전조사 결과 보강패턴이 IV 타입으로 조사된 지점이다. TSP탐사 결과 이 지점에서 반사이벤트가 두껍게 나타나, 파쇄대가 터널 막장에 전반적으로 발달할 것으로 예측되는 구간이다. 막장면 관찰 결과 TSP탐사에서 예측한 대로 터널 막장 전반에 걸쳐 절리가 발달하였고, 절리를 따라 부분별 파쇄에 의한 심한 풍화상태를 보였다. 절리를 따라 5 mm 이하의 연약한 충전물이 관측되었고, 전반적인 암의 강도는 50-100 MPa이며, 전체적으로 약간 습윤한 상태이다. 이 지점에서 파쇄대가 발달하지는 않았으나 막장면 전반에 걸쳐 수많은 절리가 발달한 것을 볼 수 있었다. 그 중 주된 절리는 N60W/20SW (절리군 1)와 N20W/60NE (절리군 2)의 두 방향을 보이며 이중에서 전자의 절리군은 더욱 심한 풍화를 받은 것으로 관찰되었다. 사전조사에서 IV 타입구간으로 분류되었고 막장면 관찰을 통한 RMR 평가 점수는 37점이고 현장상태를 고려할 때 IV 타입으로 분류되어 패턴 변경이 필요 없는 지점이다. 절리군 1은 사전조사에서 관측된 방향 N21W/57SW의 단층(F2)와 유사한 방향을 보이는 것으로 나타났고, TSP탐사에서도 이 지점과 인접한 지점 Sta. 19 + 14에서 N41W/82SW 방향으로 강한 반사이벤트를 보였다. 이 절리는 단층(F2)에 의한 영향을 받은 것으로 예상되며, 터널굴착이 진행될 구간에도 단층에 의한 절리가 발달할 것으로 예상된다.

종합적으로 볼 때 사전조사를 통해 유추된 암반등급이 TSP탐사 과정을 통해 일부 구간에서 재평가될 수 있음을 알 수 있으며 실제 터널 암반 상태도 TSP탐사 결과와 부합됨을 확인할 수 있었다. 이는 TSP탐사가 터널 굴착 안정성 평가에 기여할 수 있다는 점을 시사하며, 터널 굴착 과정에서 비교적 저비용의 TSP탐사를 활용하는 것은 굴착 효율을 향상시키고 안정성을 확보하는데 상당히 현명한 선택으로 생각된다.

## 결 론

본 연구에서는 터널굴착 시 안정성과 경제성을 확보하기 위해 사전 지질조건을 파악하는 방법 중의 하나인 TSP탐사의 현장적용성에 대해 살펴보았다. TSP탐사와 현장 굴진면에 대한 막장면 관찰 결과의 비교를 통해 자료의 정확성을 확인하였고, 사전조사 결과를 바탕으로 수립된 터널 보강 패턴을 TSP탐사와 막장면 관찰 결과를 통해 현장상황에 맞게 변경 제시하였다.

TSP탐사를 통해 감지된 반사이벤트로 굴진 전방의 파쇄정도를 예측하였는데 실제 굴진 후 막장 관찰 결과와 대부분의 곳에서 유사한 결과를 보였다. 사전조사에서 Sta. 23 + 07, Sta. 22 + 13 지점은 전체적으로 암질이 강하고 신선한 II 타입 구간으로 예측되었는데, TSP탐사와 막장면 관찰 결과 부분적인 파쇄가 있는 III 타입으로 파악되었다. 또한, TSP탐사에서 예측된 반사이벤트와 막장면에서 나타난 주요절리의 방향이 유사한 것으로 관측되어, TSP탐사가 원거리 전방에 대해서도 상당히 정확한 정보를 제공해 주는 것을 확인할 수 있었다.

Sta. 21 + 11.5와 Sta. 21 + 1.0 지점은 사전조사, TSP탐사 및 막장면 관찰 결과 모두에서 전반적인 파쇄대가 발달하여, 암질이 좋지 않은 IV 타입 구간으로 조사되었다. 사전조사에서 이 구간은 연성전단대(SZ)가 터널에 직접적인 영향을 미치는 구간으로 조사되었고, TSP탐사에서 굵은 반사이벤트가 나타났다. 막장면 관찰 결과에서도 수많은 절리가 발달하였으며, 그 절리를 따라 심한 파쇄가 발달하여 연성전단대 혹은 단층에 의한 영향을 받은 것으로 판단되었다. 사전조사에서 이 지점에서 발달된 연성전단대는 NW 주향방향을 보이는 것으로 조사되었으나, TSP탐사 및 막장면 관찰 결과 NE 주향방향이 발달한 것으로 관측되었다. 사전 지표 지질조사에서 관측된 연성전단대(SZ)는 다소 거리가 떨어져 있는 Sta. 22 + 13지점에서 절리방향이 유사하지만, 암의 파쇄가 일부분에서만 발달되어 있는 것으로 조사되었고, 터널에 직접적인 영향을 미치는 구간(Sta. 21 + 11)에서는 절리 방향이 다른 것으로 보아 사전 지표 지질조사의 제한성으로 인하여 주요 절리 방향에 오차가 있었던 것으로 판단된다.

Sta. 19 + 17 지점은 사전조사, TSP탐사 및 지질매핑 모두에서 전반적으로 파쇄대가 발달하여, 암질이 좋지 않은 IV타입 구간으로 조사되었다. 사전조사에서 이 구간은 단층(F2)가 터널에 직접적인 영향을 미치는 구간

으로 조사되었고, TSP탐사에서 굵은 반사이벤트가 나타났다. 막장면 관찰 결과에서도 수많은 절리가 발달하였으며, 그 절리를 따라 심한 파쇄가 발달한 구간이다. 사전조사에서 관측된 단층(F2)은 NW방향을 보였고, TSP탐사, 막장면 관측결과에서도 이와 유사한 절리방향을 보여, 단층(F2)의 영향에 의해 심한 파쇄가 발달한 것으로 판단된다.

터널굴착 시 소요되는 비용대비 효율성을 따져 본다면 다른 사전 예측 조사 보다 TSP탐사의 효율성이 높다. 본 논문에 보이지는 않았지만 사전예측방법 중의 하나인 선진수평시추의 경우 TSP탐사에 비해 고비용에 비해 그 효율성은 다소 떨어지는 것으로 파악되었다. 이는 굴착면(본 터널의 경우 지름 약 13 m) 전방의 파쇄대 시추공이 관통한 위치 외에 발달해 있을 수 있기 때문이며 실제 본 현장에서도 그러한 경우가 여러 번에 걸쳐 발생하였다.

단, TSP탐사의 한계사항으로 터널 입출구부에 대한 사전예측이 어렵다는 점을 들 수 있다. 탐사를 위하여 송신기 및 수신기 설치가 필요하지만 탐사 특성상 터널벽면에 이를 수행하여야 하므로, 터널굴착이 일정구간 진행되고서야 이에 대한 탐사가 가능하다. 본 연구에서도 언급했듯이 탐사시작점으로부터 일정거리(약 50 m)까지는 많은 원치 않는 노이즈에 의하여 실제 필요한 반사이벤트를 구별하기가 어렵다는 단점도 있다. 또한, 탐사의 특성상 터널 진행방향과 평행한 방향을 갖는 불연속면이나 저각의 경사를 갖는 불연속면은 탐지가 정확하지 않을 수 있다는 제약이 있다. 이러한 제약사항으로 일부 구간에 대해 전방예측이 부정확할 수 있지만, 본 연구를 통해서 확인되었듯이 전반적으로 TSP탐사는 터널 굴착 시 높은 효율성과 비교적 신뢰할 수 있는 정확성을 겸비한 터널 전방 예측방법임을 알 수 있다.

이상의 분석결과 본 연구에서 실시한 TSP탐사는 막장전방의 불연속면의 위치, 파쇄정도 및 주 절리의 방향을 상당히 정확하게 예측한 것으로 확인되었다. 본 현장에서는 TSP탐사에 의해 소모되는 시간, 제반 비용 등을 고려하더라도, 탐사결과 정확한 전방예측이 가능하여 굴착의 효율성이 향상되고, 안전성이 확보되어 경제적으로는 더욱 이득이 있는 것으로 판단된다. 본 현장과 유사한 공사(터널굴착, 지하저장소 개발 등)에 TSP탐사가 폭넓게 활용된다면 굴착효율을 높이고 안전성을 확보하는데 크게 기여할 것이다.

## References

- Cha, S. -S., Kim, S. -H., Yoon, S. -P., Bae, J. -S., and Lee, J. -M., 1999, Case histories on design alternatives during excavation of underground LPG storage cavern and traffic tunnel using TSP survey, paper presented in 2nd Conference of Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 117-136.
- Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W., 2002, Seismic Unix Release: A free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- K-water, 2010, Construction of Spillways in Juam Dam, Working Design Report, pp. 1058.
- Min, K. -N., Lim, K. -S., Chang, C. -S., and Lim, D. -H., 2005, Case study about the ground characteristics analysis of tunnel face fault fractured zone, Tunnel and Underground Space, 15, 111-118.
- Sattel, G., Frey, P., and Amberg, R., 1992, Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel Locarno Switzerland, First Break, 10(1), 19-25.

## 배종섭

한국수자원공사 주암댐관리단  
전남 순천시 상사호길 501  
Tel: 061-749-7311  
E-mail: jsoem@kwater.or.kr

## 장찬동

충남대학교 지질환경과학과  
대전시 유성구 대학로 99  
Tel: 042-821-6430  
E-mail: cchang@cnu.ac.kr

---

원고접수일 : 2013년 3월 5일

수정본채택 : 2013년 3월 21일

게재확정일 : 2013년 3월 22일