

3성분 지오폰을 이용한 막장전방 예측 탄성파탐사

Seismic reflection imaging ahead of tunnel face using 3 component geophones

조철현* 차영호** 양종화*** 방기문****
Jo, Churl Hyun Cha, Young Ho Yang, Jong Hwa Bang, Ki Moon

ABSTRACT

To ensure the safety of the tunnelling without the loss of economy, the tunnel seismic profiling(TSP) method for the prediction ahead of tunnel face, begins to be used routinely in these days. TSP method does not interfere the tunnelling works while the horizontal drilling does, and its prediction length is longer than that of the drilling. Yet the most frequently adopted technique of TSP in Korea is the multi-shot and 2 receiver array using in-hole receivers, even though this array requires as many as 26 drill-holes for receiver installation and ballasting, which results in 3~6 hours of suspension in excavation work.

In this paper, multi-receiver and lesser shot array using side-wall attached 3 component geophones is to be described to prove the efficiency in terms of the survey time as well as the reliability of the method by comparison of the predicted weak points and the face mapping results. The predictions mostly agreed with the real fractures or joint developed zones which have been confirmed during the excavation. It also has been found that TSP method can be effectively applied to perform draining ground water ahead of tunnel face by imaging the geologic discontinuities.

Keywords : TSP, prediction ahead of tunnel face, 3 component geophone, imaging, discontinuity

1. 서 론

막장전방예측은 최근 국내에 많이 건설되고 있는 대심도 장대터널건설시 안전성과 경제성을 확보하기 위하여 매우 중요한 과제이다. 최근에는 터널설계에서 지표지질조사, 시추공 조사, 지구 물리탐사 등을 통한 터널 전 구간에 대한 지질조건 파악이 과거에 비해 매우 정확하게 이루어지고 있지만, 장대터널이 보이는 큰 계획고와 지반고의 차이는, 지표 탐사작업의 어려움 및 해상도의 한계 등으로 인하여, 실제 시공이 이루어지는 심도에서 정밀한 지질구조의 파악이 힘들게 하는 경우가 많다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 깊은 심도 시공 구간의 지질정보는 터널 시공 중의 조사를 통한 보완이 필요하다. 기존의 보완 기법으로는 막장 관찰을 통한 암반분류, 선진 수평 시추 등이 있다. 막장 관찰을 통한 암반분류를 실시하는 방법은 현 위치의 지질조건을 파악하는데 사용될 수 있으나 막장 전방 수 십 m 이후의 지질을 예측하는 데에는 한계가 있다. 선진 수평 시추 방법은 직접적으로 확인하는 방법이지만 비용이 많이 들고, 조사범위 역시 시추거리에 제한되며 터널작업을 지연시켜 경제적 손실이 큰 단점이 있다. 이러한 직접적인 기법들의 문제점인 비용, 시간, 정보를 극복하기 위하여 터널내에서 탄성파반사법탐사를 수행하여 막장 전방을 예측하고자하는 시도가 이루어졌다.

* 책임저자 : 지하정보기술(주) 대표이사, 정회원

** 지하정보기술(주) 부설기술연구소 선임연구원

*** (주)대우건설 상무이사

**** (주)대우엔지니어링 상무보

터널내 탄성과 반사법 탐사는 TSP(tunnel seismic profiling)탐사, 혹은 HSP(horizontal seismic profiling)탐사라고도 불리운다. 터널내 탄성과 반사법 탐사- 이하 TSP 탐사 -는 Sattel 등^{1), 2)} 이 개발한 삽입식 센서를 이용한 수신 방식으로 시작되었으나 점차 삽입식 센서와 벽체 부착식 센서를 자유로이 조합하는 배열법(Inazaki 등^{3), 4)} ; Kawamura 등⁵⁾ ; Ashida Y. 등⁶⁾ 으로 발달하였다. TSP 탐사는 국내에서 1990년대 중반부터 Cha 등⁷⁾ 에 의하여 적용되기 시작하여 최근 터널 현장에는 점차 일반적으로 채택되는 경향이다.

그러나 우리나라에서 주로 수행되는 탐사방식은 삽입식 가속도계 센서를 이용한 다송신-소수신 방식이다. 이 방식은 센서의 부착을 위해 2개의 천공이 필요하며 송신원 발생을 위해 통상 최소 20개가 넘는 수의 발파공을 천공하여야 한다. 20개 이상의 발파를 위해서는 3~6시간 정도의 막장 정지가 요구된다. 본 연구에서는 8개의 3성분 지오폰을 벽체에 부착하고 발파공은 4~6 공 정도가 소요되는 TSP 탐사를 구성하고 이를 현장에 적용하였다. 3성분지오폰을 터널벽체에 부착하여 삽입식 센서 사용시 요구되는 천공의 필요성을 배제 하였으며 6공 내외의 발파작업은 탐사시 소요되는 막장 정지 시간을 10~30분 정도로 축소하였다.

벽체부착식 센서를 사용할 경우 벽체를 따라 전파하는 표면파에 대한 처리가 중요한 과제가 된다. 본 연구에서는 기존의 수신-발파-막장의 배열을 발파-수신-막장의 순서로 전환함으로써 표면파의 문제를 극복하고 해석자료의 품질을 향상시킬 수 있었다. 또한 벽체부착식 지오폰을 이용한 TSP 탐사해석에 의한 막장 전방 예측 결과와 탐사후 예측구간에 대한 막장관찰, 암반분류, 암 환경 등 굴착 후 결과를 비교 분석하여 그 적용성을 평가하여 보기로 한다.

2. TSP 탐사 이론

터널내 탄성과 반사법 탐사의 원리는 일반적으로 지표에서 수행하는 탄성과 반사법 탐사의 기본 원리와 같다. 터널내의 벽면에 천공한 발파점에서 화약을 이용하여 탄성과 에너지를 발생시키면 탄성파는 모든 방향으로 전파된다. 그림 1과 같이 탄성파의 전파경로 상에 파쇄대, 지질경계, 암석 조성의 변화가 있다면 음향임피던스(=밀도 x 탄성파속도) 차이에 의해 반사파가 형성되며, 이러한 반사파는 터널 벽면에 설치한 수신기에서 감지되어 기록된다.

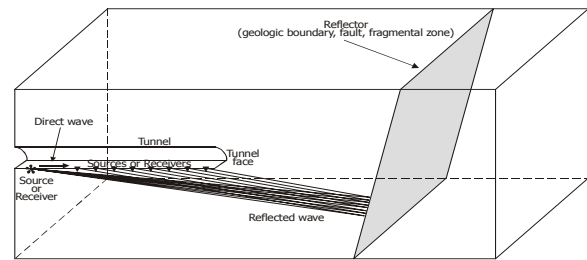


그림 1. 터널내 탄성과 반사법 탐사 모식도

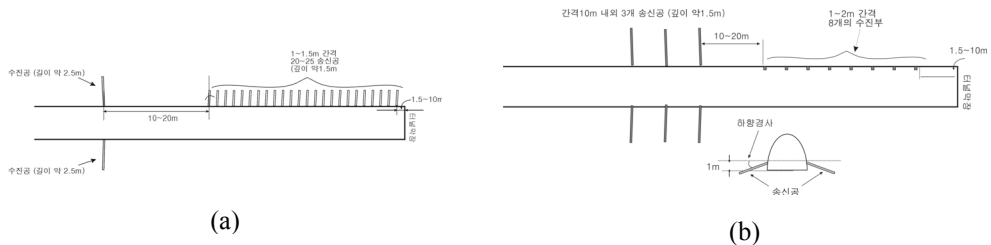


그림 2. (a)다송신-소수신 배열법, (b)소송신-다수신 배열법

막장전방 불연속면을 영상화하기 위해서는 여러 개의 상호 위치가 다른 송신점과 수신점이 필요하다. 이러한 다양한 위치 조합의 개수가 많을수록 막장전방의 영상화의 정확도는 증가한다. 현재 상업용으로 판매되는 탐사장비인 AMBERG사의 TSP202/203 장비는 자료취득시 20점 이상의 송신점과 2개의 삽입식 수신기를 사용하는 배열을 요구한다(그림 2a). 이 경우 천공에 시간이 많

이 소요될 뿐 아니라 터널 굴착 및 버럭 반출작업 등이 중단되어야 하는 발파준비와 발파시간도 무시하지 못할 정도가 된다. 이와는 달리 송신점은 6개 정도로 줄이고 수신점은 8개 이상으로 증가시키는 배열법(그림 2b)도 있다. 서로 다른 송수신 위치를 지닌 배열에서 독립적인 자료의 개수는 송신수 \times 수신수 이므로 송신수가 24개이고 수신수가 2개인 배열법과 송신수 6개와 수신수 8개인 배열법은 정보량의 측면에서 등가이다.

현장에서 획득한 자료는 반사파가 잘 나타나는 형식의 취합형태로 변환한다. 자료중 반사면에 불필요한 직접파와 현장 잡음 등은 제거하고 주대상인 반사파를 증폭하는 자료처리를 수행한다. 터널내 탄성과 반사법 탐사 자료처리 과정은 그림 3에 나타난 흐름도와 같으며 이는 일반 탄성과 반사법 탐사 자료처리 과정과 유사하다.

막장 전방의 불연속면은 반사파 영상화 기법중 가장 고도화된 기법의 하나인 중합전 심도구조보정 (prestack depth migration)을 이용하여 얻게 된다. 이렇게 얻어진 불연속면 영상과 설계시 수행된 지반조사 자료 및 지질자료를 중합해석하여 막장 전방의 지질구조를 예측한다. 반사각을 고려한 3성분 탄성과 자료의 구조보정 이론을 간략하게 정리하면 다음과 같다. 영상화 자료는 막장 전방의 모든 영상화 지점에서 모든 송신점과 수신점의 자료에 대하여 (1)식의 값을 각 영상화 지점에 중첩시키는 방식으로 영상화를 적용한다.

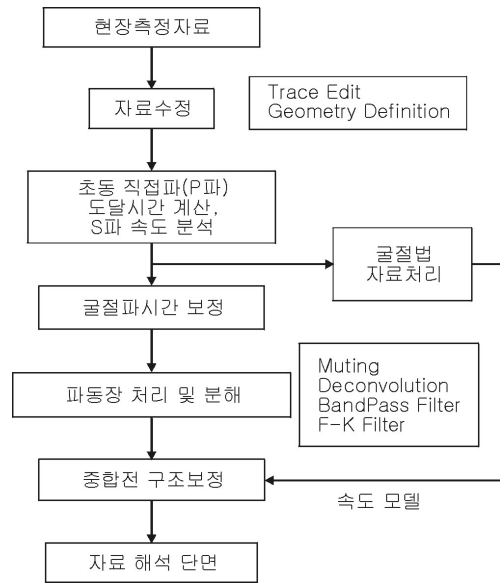


그림 3. 터널내 탄성과 반사법 탐사 자료처리 흐름도.

$$migrated\ section = \int_Q \mathbf{u} \cdot \mathbf{e} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ 는 S지점의 송신원과 R지점의 수신원에 의한 추정된 속도모델에 의한 영상화 지점에서의 3성분 기록 자료이고, $\mathbf{e} = (e_x, e_y, e_z)$ 는 수신점과 영상화점을 잇는 단위 벡터이고, 벡터 \mathbf{e} 와 벡터 \mathbf{u} 사이의 각도 θ 는 식(2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{e} \cdot \mathbf{u}}{|\mathbf{e}| |\mathbf{u}|} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)의 변수들은 그림 4에 표시하였다.

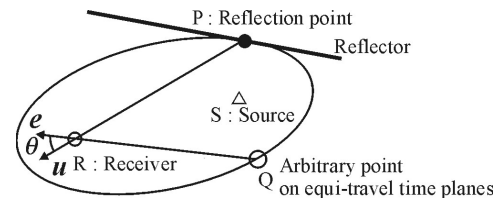


그림 4. 반사각을 고려한 3차원 영상화 기법의 모식도

3. 현장 적용

3.1 현장 지질개요

본 탐사를 적용시킨 현장은 (주)대우건설에서 수행하고 있는 영동선 동백산-도계간 철도이설 건설공사 중 STA. 105+050 ~ STA. 104+900 구간이다. 본 탐사의 목적은 지하수를 함유하는 절리 및 불연속면의 위치를 파악하기 위함이었다. 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 충상단층 (thrust)에 의해 수차례 반복되며, 오십천 단층 등 주향이동 단층에 의해 단절되고 있다. 특히 인평상 구조 등 충상단층에 의해 평안누층군의 금천 및 장성층 등 함탄층의 분포가 반복되어 주 가

행탄층의 복잡한 분포를 보인다. 터널 통과구간의 지층은 두리봉층 혹은 묘봉층이며, 암종은 석회암, RQD는 20~50 정도이다.

3.2 자료취득 및 자료처리

탐사 장비는 송신원, 수신기, 기록계의 3부분으로 나눌 수 있다. 송신원으로 발파기와 정밀순발전기, 뇌관, 화약이 필요하다. 수신센서는 3성분 지오폰으로 구성하였다. 지오폰을 벽체에 부착하기 위해서 벽체부착판을 설치, 고정한다(그림 5). 본 연구에 채택된 TSP 탐사 장비를 표 1에 정리하였다.

수신센서의 개수는 8개이며 벽체 좌우에 각각 3개씩 총 6개의 발파공을 천공하여 송신점으로 사용하였다. 6개의 송신점은 TSP202/203 장비가 요구하는 24 개의 송신수의 1/4에 불과하다. 이는 측정시간이 기본적으로 1/4로 줄어들 수 있음을 의미한다. 실제 현장작업에서는 다송신법의 측정시간은 3~6시간 정도의 작업정지시간이 소요되나, 소송신 법이 요구하는 작업정지시간은 10~30 분에 불과하다.

송신원과 수신기 배열은 그림 2b 에 나타난 바와 같이 발파부-수신부-막장의 순서로 설정하였다. 그림 2a에 표시된 다송신-소수신배열과 그림 2b에 표시된 소송신-다수신배열의 중요한 차이는 다송신-소수신배열은 수신부-발파부-막장의 순서이며, 소송신-소수신배열은 발파부-수신부-막장의 순서임에 있다. 후자 배열은 발파부에서 수신부로 진행되는 직접파와 표면파의 방향과 반사파의 방향이 기본적으로 서로 다르기 때문에(그림 6) 필터링의 효율성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

표 1. 탐사장비 특성

	장비/부품	특징
송신부	발파기	트리거 신호 발생
	뇌관	무지연(0ms) 전기뇌관
	화약	20 ~ 30 g
수신부	벽체부착판	
	센서-3성분지오폰	주파수 대역 : 100~1000 Hz
기록부	채널수	24ch 이상
	dynamic range	A/D 24bit
	max. sample rate	0.1ms 이내

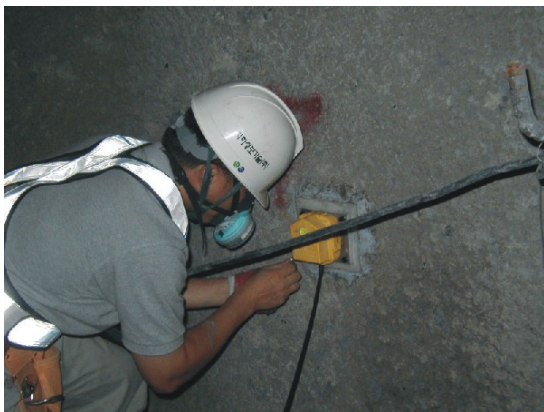


그림 5. 벽체부착판에 고정된 3성분 지오폰

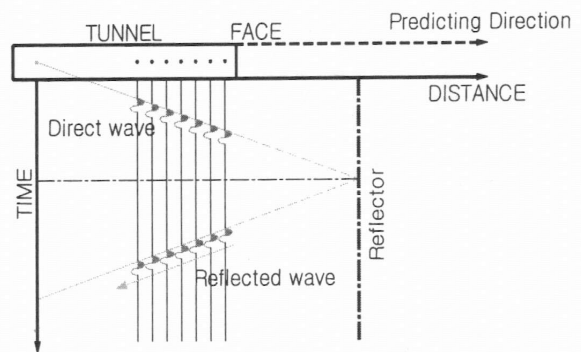


그림 6. 발파부-수신부-막장 배열시 직접파와 반사파의 양상

TSP202/203 장비가 센서를 삽입하는 이유는 발파에 수반된 표면파에 의한 영향을 최소화하고 슛크리트와 원지반의 결합상태가 불량한 경우 반사파를 제대로 측정할 수 없는 경우를 배제하기 위한 것이다. 벽체부착식 센서를 채택하더라도 그림 6과 같은 배열을 사용하고 f-k(주파수-공간파수) 필터링을 수행하면 표면파와 직접파의 영향을 효과적으로 제거하고 반사파를 주된 신호로 만들 수 있다. 그림 7에 현장 측정자료와 f-k 필터를 적용하여 표면파 및 직접파를 제거한 자료를 나타내었다. 이 밖에 여타 탐사자료처리는 SU⁸⁾ 를 이용하여 그림 3에 보이는 기본적인 자

료처리를 수행하였고, 구조보정은 반사점과 송/수신기의 위치를 고려한 영상화기법(Toru Takahashi⁹⁾; Ashida Y. 등⁶⁾)을 이용하였다.

터널내에서 송수신배열의 변화에 따른 막장 전방 반사면의 민감도가 양호하지 못하므로 막장 전방의 속도 정보는 결정하기가 매우 어려우며 그 정확도도 매우 낮다. 따라서 터널내 탄성과 탐사를 통하여 의미있는 속도 정보를 획득할 수 있는 범위는 탐사를 수행한 구간에 국한된다. 그러나 터널내에서 모암의 변화는 제한적이므로, 이 속도를 막장 전방의 속도로 가정하여 구조보정을 위한 속도로 사용하게 된다.

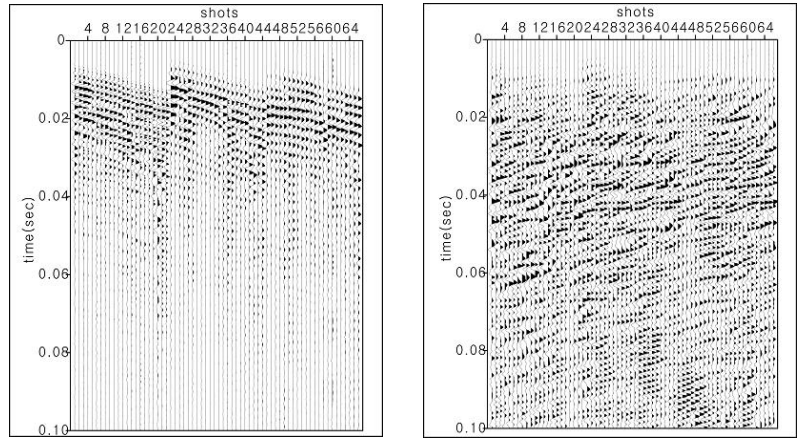


그림 7. (a) raw data, (b) f-k filter 처리 후 자료

이러한 탐사구간의 속도를 얻기 위하여 일반적으로 굴절법에서 사용하는 초동발췌를 통하여 탄성과 P파 속도를 획득하게 되며, 본 현장에서의 P파 속도는 약 2950m/s로 파악되었다. 탐사가 실시된 구간은 주로 중생대 퇴적암인 사암으로 이루어져 있고, 막장에 노출된 암질을 참고하면, 타당한 P파 속도로 생각할 수 있다.

3.3 자료해석

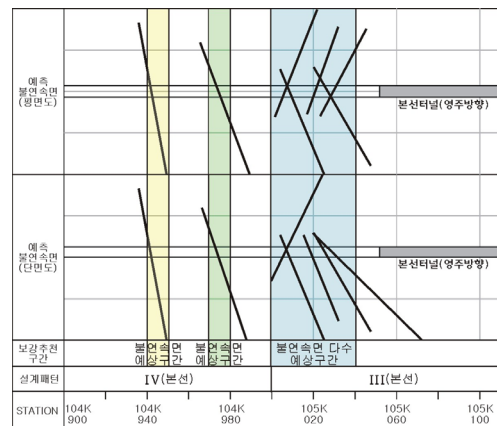
3성분영상화기법에 의하여 막장전방 불연속면에 대한 정보를 얻었을 수 있었으며 그 결과를 그림 8에 제시하였다. 해석결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) STA 105k029~105k031, 105k022, 105k007~105k010에서 불연속면의 존재가 예상되었으며 이는 막장의 출수와 관련된 파쇄대로 해석되었다.
- 2) STA 104k975, 104k942 부근에서도 불연속면이 존재하는 것으로 예측되었다.

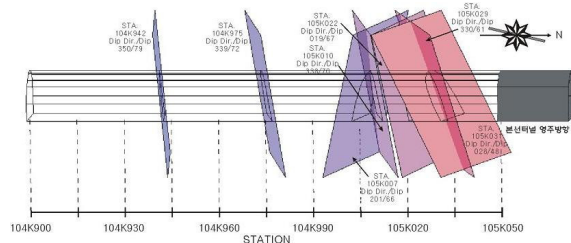
이러한 탐사결과에 기초하여 예상 파쇄대 부근에 막장이 위치하는 시기에 선진수평시추를 실시한 결과 STA 105k029~105k031, 105k022 부근에서 지하수를 함유하는 파쇄대를 확인하였고 추가 수평시추에 의해 지하수를 굴착이전에 유도 배출함으로써 지하수대를 관통하는 시기에 발생할 수 있는 위험과 작업 정지 사태를 미연에 방지할 수 있었다.

4. 결론

경제적이고 안전한 터널 시공을 위하여 매우 중요한 막장 전방의 지질구조에 대한 정확한 정



(a) 예측된 불연속면을 나타낸 단면도와 평면도



(b) 예측된 불연속면의 3차원 도시

그림 8. 철도터널내 탄성과 탐사 결과에 의한 막장 전방의 불연속면 해석도

보를 경제적으로 얻기 위해서 터널내 탄성과 반사법 탐사가 활용되고 있다. 그러나 상업용으로 판매되고 있는 전용탐사기기가 요구하는 다송신-소수신 배열법은 다수의 천공작업과 수 시간의 작업정지시간을 요구하는 한계를 지니고 있었다. 본 연구에서는 소송신-다수신배열법에 대하여 고찰하였다. 이러한 탐사법의 특징점은 다음과 같다.

- 1) 수신센서는 3성분 지오폰을 이용하여 막장전방의 3차원영상화가 가능하도록 하였다.
- 2) 센서를 벽체에 부착하여 수신부 천공시간을 제거 하였다.
- 3) 표면과 영향은 송신부-수신부-막장의 순서로 배열하여 직접파와 반사파의 방향성을 반대로 하였으며 그 결과 f-k 필터링에 의한 직접파 및 표면파를 효과적으로 감쇄시킬 수 있었다.
- 4) 송신원 발생수를 6회로 줄여 작업정지 시간을 수 십분 이내로 극소화 할 수 있었다.

한편 소송신-다수신배열법에 의한 탐사를 철도터널에 적용하였다. 터널내 대량 출수가 예상되는 구간에서 적용하여 불연속면의 위치를 예측하였으며, 선진수평시추에 의해 지하수 대수층을 확인하고 사전 유도 배수를 통하여 시공상 안전과 경제성 확보에 활용될 수 있음을 알 수 있었다. 이로부터 벽체부착형 3성분 지오폰을 이용한 소송신-다수신 배열법으로 TSP 탐사의 목적을 달성할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 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, vol. 10, no. 1, pp.19-25.
2. Sattel G., Sander B. K., Amberg F., and Kashiwa T., 1996, "Tunnel seismic prediction TSP - some case histories", Tunnels and Tunneling, April 1996, pp.1-16.
3. Inazaki, T. and Chida. K., 1993, "Field examination of in-tunnel HSP method", 物理探査學會第 回學術講演論文集 pp140-143.
4. Inazaki, T., Isahai, H., Kawamura, S., Kurahashi, T., and Hayashi, H., 1999, "Stepwise application of horizontal seismic profiling for tunnel prediction ahead of th face", The Leading Edge, vol. 18, no. 12, pp.1429-1431.
5. Kawamura, S., Watanabe, F., and Inazaki, T., 1993, "Detection of reflected signal ahead of the tunnel face in the HSP method", 物理探査學會第 回學術講演論文集 pp.132-141.
6. Ashida Y., Matsuoka, T., Watanabe, T., 2002, "Seismic imaging ahead of tunnel face with three component geophones", Expanded Abstract of the 72nd SEG Annual Meeting.
7. Cha, S. S., Lee, J. M. and Nam, K. C., 1996, "Prediction of discontinuity and determination of rock properties for effective tunnel construction using vertical seismic profiles applied in tunnel", Proceeding of the Korea-Japan joint symposium on Rock Engineering, pp.269-273.
8. SU(Seismic Unix) Release 34, 2001, <http://www.cwp.mines.edu>.
9. Takahashi, T., 1995, "Prestack migration using arrival angle information" Geophysics, vol. 60, no. 1, pp.154-163.