

터널내 탄성과 탐사를 이용한 전방 지질 예측 및 평가

Prediction and Evaluation of Rock Mass Condition by Seismic Profiling Method in Tunnel



이종만*
Lee, Jong-Man



곽현준*²
Kwak Hyun-Joon



김영근*³
Kim, Young-Geun



백기현*⁴
Baek, Ki-Hyun



조철현*⁵
Cho, Chul-Hyun

Abstract

It is very important to survey in construction for acquiring informations about geological structure which influence the tunnel construction. Usually, TSP(Tunnel Seismic Prediction) one of the seismic survey method in tunnels in Korea has been used for prediction of geological condition ahead of tunnel face, but in this study HSP(Horizontal Seismic Profiling) was used. As a result of field application, we predicted that there exist rock discontinuity such as fault, joints and bedding planes. In addition, RMR value from rock mass evaluation coincided with that from seismic survey for rock condition.

We compared with rock classifications and evaluation results for proving.

Keywords : Seismic prediction, Reflection survey, VSP, HSP

*1 한국도로공사 대구-포항 건설사업소장

*2 한국도로공사 대구-포항 건설사업소 제9공구 주감독

*3 (주)대우건설 기술연구소 책임연구원

*4 (주)대우건설 기술연구소 주임연구원

*5 (주)지하정보기술 대표이사

요 지

터널 시공에 영향을 주는 지질구조에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 시공 중의 탐사기법이 중요한 역할을 한다. 국내에서 막장 전방 지질조건을 예측하기 위한 터널내 탄성과 반사법 탐사로는 TSP(Tunnel Seismic Prediction)법을 주로 적용했으나, 본고에서는 HSP(Horizontal Seismic Profiling)법을 수행하였다. 현장 적용결과 소규모의 불연속면의 존재가 예측되었으며, 또한 지반 조사에서 추정된 RMR 값과 터널내 반사법 탐사를 통하여 얻은 암반조건과 거의 일치하는 결과를 얻었으며, 시공 중 평가되는 암반 분류 및 평가 결과와 비교 검증하였다.

주요어: 전방예측, 탄성과 반사법탐사, VSP, HSP

1. 서론

터널 및 지하공간 건설에 있어서 정확한 지질조건에 대한 파악은 원활한 시공을 위한 중요 요소이다. 지질조사는 입지타당성 조사단계와 설계단계에서 필수적으로 행해지는데, 지표지질조사, 시추공 조사, 지구물리탐사 등이 주로 이루어진다. 특히, 이 중에서 물리탐사기법은 시추조사가 지니는 지역적 한계를 극복하고, 시공 대상부지의 전체적인 지질파악이나 특징적인 지질구조에 대한 많은 정보를 제공한다는 점에서 효과적이고 다양한 기법들이 연구되고 적용되어왔다. 그러나 탐사작업이 어려운 지역이나 계획고와 지반고의 차이가 큰 지역에서는 해상도의 한계 등으로 인하여 시공 구역 부근 지질구조에 대한 정밀한 파악이 이루어지기 어려운 실정이다.

이러한 한계를 극복하고 시공에 영향을 주는 지질구조에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 시공 중의 탐사기법이 중요하다. 한편, 터널 완공 후의 유지/관리, 혹은 안전진단의 목적으로도 지질조사는 중요시되는데, 이를 위한 조사/탐사 방법은 많은 제약조건으로 인하여 그 적용이 제한되어 있으며, 특히 공사 후에는 터널 라이닝의 존재로 암반상태를 직접 확인하는 것이 불가능하다.

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 경

제적 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 파악하는데는 많은 한계가 있다. 이러한 터널 시공 중 혹은 유지관리 목적에서의 종래조사 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 수진기를 깊이 위치시켜 터널과의 영향을 최소화할 수 있는 TSP 방법이 많이 이용되어지고 있으며, 일본에서 많은 터널에 적용되어온 3성분을 이용한 HSP도 국내에서 최근 적용되고 있다.

HSP 탐사의 장점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 탐사 시간이 1시간 이내이며, 작업정지 시간이 대단히 짧다.
- 정량적인 데이터 취득이 가능하다.
- 터널 전방과 주변지역에 대한 정확한 암질변화와 단층 등의 지질구조대 예측이 가능하며, 파쇄대의 위치, 규모 및 방향 측정이 가능하다.

- 탄성과 속도분석에 의한 터널굴착 지역 암석의 역학적 매개변수 추정 가능성이 가능하다.

한편, HSP 탐사에 의한 전방지질 확인 영역은 보통암 반일 경우 막장면으로부터 100m 정도이며, 최적의 조건에서 약 200m까지 확인 가능하다.

2. 터널내 탄성파 탐사 이론

2.1 탐사 원리

터널내에서 발파를 하게되면 발파점으로부터 탄성파가 발생되며, 이는 그림1과 같이 터널의 여러 방향으로 전파해 간다. 이 때, 전파경로 상에 파쇄대나 암층의 조성변화가 있다면 암석강도(음향 임피던스)의 변화가 발생하며 이에 의한 영향이 반사된 신호에 반영되어 반사 이벤트를 구성하게 될 것이다.

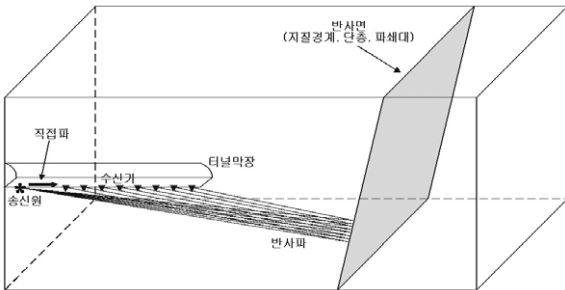


그림 1. HSP 탐사 모식도

이러한 반사이벤트들이 터널면의 전방에 위치할 경우, 반사파는 어느 정도 지연된 주시(走時, travel time)를 보이며 수신기에 도달할 것이다. 반사신호들의 주시를 암층의 속도로 변환하여 거리로 변환하면 해당 반사이벤트가 제시하는 터널면과의 거리뿐 아니라 터널축과의 교차각까지 결정할 수 있게 된다.

측정된 자료는 PC로 옮겨져 전문 소프트웨어에 의해

처리된다. 이 소프트웨어는 자료처리 루틴과 반사파 영상 계산 프로그램을 주로 하여 구성되어 있다. 터널면 전방 및 주변지대에서의 이벤트 영상은 탄성과 예측(Seismic Prediction)의 결과로서, 좀 더 상세한 분석과 해석으로의 기반 정보를 형성한다. 처리된 결과는 예측하고자 하는 영역 내에 존재하는 반사이벤트와 암반상태와의 관계를 제공할 것이다. 결과 영상은 전방에 위치하는 이벤트들의 특성에 관한 것들인데, 예를 들어 경암 → 연암(또는 연암 → 경암)으로의 암질의 변화 혹은 전이대에 대한 것들이다. 아무런 이벤트도 나타나지 않는 구간이 있는데, 이 구간안에서는 암석역학적 매개변수 변화가 전혀 없거나 대수롭지 않다는 것을 의미하며 동일한 터널작업의 진행조건이 지속될 수 있음을 지시한다.

터널에서 측정된 자료를 통하여 획득된 반사파 영상 자료를 이용하여 가능한 반사면을 선택하고, 이렇게 선택된 반사면의 신뢰성을 확보하기 위하여 간단한 Ray tracing 기법을 이용하여 선택된 반사면에 의한 반사파의 도달시간을 계산하여, 실제 자료의 반사파와 어느 정도 일치하는지 판단하여 최종적으로 반사면을 결정한다.

처리된 결과는 그 후 지질학적 예측단면과 직접적으로 비교가 가능하며, 결과자료는 엔지니어의 기록과 같은 타 서류들과 함께, 공사작업의 안전도 추정, 터널링의 작업 향상, 터널공사의 진행에 대한 중요한 기반을 제공한다. 100m 또는 그 이상의 범위를 조사할 수 있는 HSP법을 운용함으로써 터널 공학자는 시추공을 통한 타 기법들과 비교하여 지질학적 예측이나 작업지시를 내리는 데 있어서 유리해진다.

2.2 HSP 탐사 장비 구성

HSP 탐사는 다음과 같은 구성요소들로 이루어진다.

- (1) 발파 장비 (Shooting equipment)
 - 발파기, 발파 모션
- (2) 수신 시스템 (Receiver system)

- 삼성분 지오폰(8개/16개), 터널 벽체 고정용 막대
- (3) 기록 시스템 (Recording system)
 - 24/48 channel seismic 기록계, 24/48 channel cable

2.3 자료 측정

2.3.1 측정준비

(1) 조사구역 설정

HSP법은 특히 터널면 전방에 위치하는 이상대를 파악하기 위한 목적에 사용되는데, 이러한 이상대들은 탄성계수, 밀도 등 암석물성의 변화, 좀 더 정확히는 음향 임피던스(밀도와 속도의 곱)의 변화와 관계된다. 이들을 공간분포를 파악하는 문제는 3차원 기하학적 문제이다. 3차원을 가장 잘 고려할 수 있는 방법은 터널의 상하좌우에 수신기를 설치하고, 각 4분면에 송신원을 두는 것이 가장 좋지만 실제 탐사시 모든 면에 설치하여 측정을 하는 것이 불가능하기 때문에 터널의 좌측벽면과 우측벽면에 수신기와 송신기를 설치하여 측정하는 것을 기본으로 한다. 그림 2의 (가)는 터널 좌측벽면에 설치된 HSP 탐사 모식도이며, 그림 2의 (나)는 터널 우측벽면에 설치된 HSP 탐사 모식도이다.

HSP 탐사의 장점 중의 하나가 다양한 송수신 배열이 가능하다는 점이다. 이는 현장 상황에 맞게 송신원 및 수신원의 위치를 변경하여 탐사를 할 수 있으며, 또한 다양

한 위치에 존재하는 반사면에 대한 정보를 얻기 위하여 수신원의 위치는 고정시킨 상태에서 송신원의 위치를 다양하게 움직이면서 측정이 가능하다. 일반적으로 암층의 구조는 터널축에 대해 우세한 주향과 경사방향을 가지고 있으며, 지질학적 예측, 터널조사, 엔지니어의 기록 등에 의해 그러한 암층의 특징들(암석경계면의 평균주향이 라든지, 암석구조에 대한 평균주향)은 비교적 잘 알려져 있다. 따라서 탐사구획을 선정하는 과정에서 현장에서의 자료를 이용하여 그림 2와 같은 두 가지 방법중 한가지를 택하는 것이 일반적이며, 터널방향의 좌/우측의 반사 이벤트에 대한 정보를 얻기 위하여는 이러한 두 가지 배열법을 사용하는 것이 바람직하다.

(2) 수신기 설치

측정된 자료의 질에 가장 큰 영향을 주는 것은 수신기와 암반사이의 coupling 문제이다. 수신기 고정용 막대를 송신공에 삽입함과 동시에 송신공 내부가 팍차도록 비수축 모르타르를 채워야 한다. 12~16시간동안의 경화를 거치면 암층과 고정용 막대는 완벽한 결합이 이루어질 것이다. 이후 3성분 지오폰을 설치하며, 이때 지오폰에 표시된 방향이 정확히 수직을 이루도록 한다.

(3) 발파공의 천공 및 장약

발파용 화약은 현장 상황에 맞게 30g~50g 정도를 사용한다. 측정된 자료의 질을 높이기 위해서는 발파에너지의 충분한 전달이 필요하다. 이는 발파에너지가 송신공을 따라 터널 내부로 전달하는 에너지의 양을 줄이는 것이며, 이를 위하여 화약의 충분한 전색이 필요하다. 이를 위

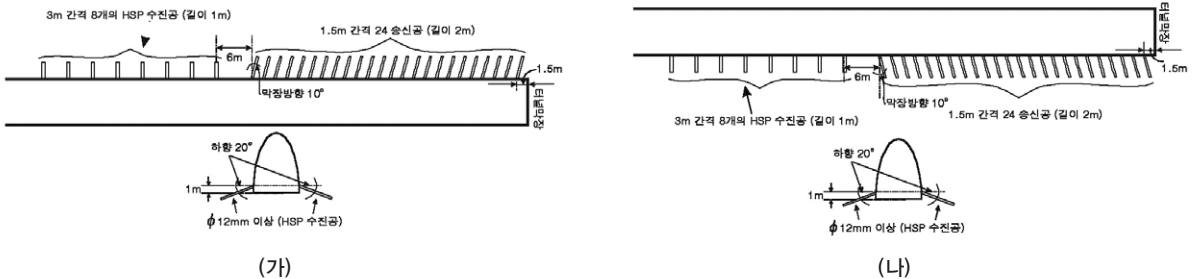


그림 2. HSP 탐사용 송/수신원 배열

하여 모래나 물을 이용하며, 발파공의 수직 방향 기울기를 고려하여 물 또는 모래를 선택한다.

(4) 측정 및 기록

앞의 준비를 마친 후에, 장악된 모든 발파공에 대한 HSP자료의 탄성과 기록을 시작할 수 있다. 장악된 발파공에 대한 기록작업에는 일반적으로 20분 정도가 소요된다. 이 시간동안 잡음을 유발할 수 있는 터널내의 모든 장비들은 모두 정지시켜야 한다.

2.4 HSP 자료 처리 및 해석

2.4.1 탄성파의 전파

HSP법은 탄성파 반사법의 원리에 기초하고 있으며, 터널면 전방의 불연속면에서 반사된 신호들을 조사의 목적으로 이용한다. 이 방법을 도시한 것이 그림 3이다.

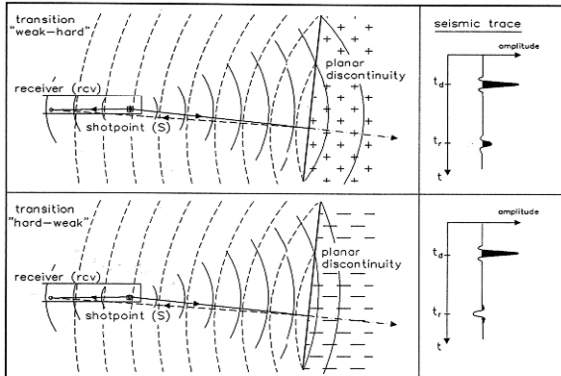


그림 3. HSP 탐사에서 탄성파의 전파

발파공 내에서 소량의 폭약을 발파하여 탄성파 신호가 발생되며, 이로부터 시작된 탄성파동이 구면파의 형태로 암층 내부를 전파해 나가서 수신기에 도달하는 주시 (travel time)는 다음과 같다.

$$T_d = X_{S-Rcv} / V_{P_{rock}} \quad (1)$$

이를 직접파(direct wave)의 주시라 한다. 여기서 X_{S-Rcv} 는 발파원과 수신기 사이의 거리이며 $V_{P_{rock}}$ 는 발파원과 수신기 사이에 존재하는 암석의 P파 속도이다.

탄성파는 또한 반대방향인, 터널면 전방으로도 전파한다. 탄성파가 진행하다가 암반의 음향임피던스 변화가 있는 곳에서 도착한 신호의 일부가 반사될 것이다. 음향임피던스는 암반의 탄성과 속도와 밀도의 곱이므로 암반의 강도와 밀접한 관련이 있다. 반사파의 형상은 음향임피던스의 변화에 따라 강한 곳에서 상대적으로 연약한 층의 경계 (그림 3 아래그림에서 tr)에서 반사될 경우 반사 이벤트의 위상변화가 발생하고, 반대로 연약한 곳에서 강한 곳이 만나는 경계면(그림 3 위 그림에서 tr)에서는 반사 이벤트의 위상변화가 없다. 이러한 의미에서 신호의 위상 (signal phase)은 불연속면에서 암석의 전이가 “연암”에서 “경암”으로 일어나는지 또는 그 역인지를 구별할 수 있도록 한다.

발파기록 그림 4상에서 직접파의 도착시간(초동, first break)들은 탄성파 속도(V_P)의 역수 기울기로 정렬되는 것을 발견할 수 있다.

2.4.2 자료 처리

파동장 처리과정은 기록된 현장자료로부터 미약한 반사신호를 잘 나타나게 하며, 추출된 반사신호를 보강하는 것을 목적으로 한다.

우선 측정된 모든 자료를 확인하여 자료의 번호와 측정이 제대로 안된 탄성파 트레이스 채널을 자료에서 없애며, 실제 영상화에 사용될 자료만을 가지도록 자료를 수정한다.

수정된 자료를 이용하여 각 송신원에 대하여 초동시간을 발취하고, 이를 이용하여 HSP 탐사 구역의 터널주위 암반은 P파 속도를 그림 4와 같이 결정한다. 이는 지표 물리탐사 기법중의 하나인 굴절법에서 속도를 얻어내는 과정과 동일하다. 결정된 P파 속도를 이용하여 발파 지연 등 현장에서 발파시 일어나는 문제들에 대한 보정을 실시

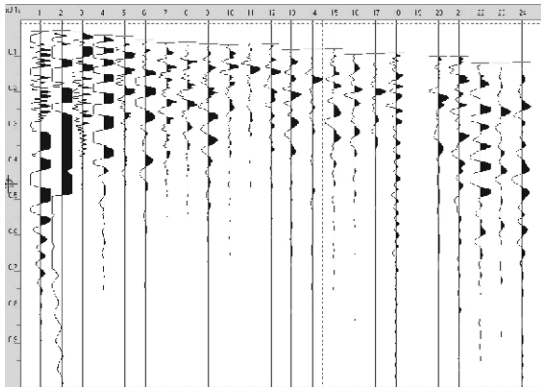


그림 4. HSP 탐사 자료 및 초동 시간 발취

한다.

HSP 탐사의 목적이 터널 막장 전방의 반사이벤트를 얻어내는 것이 목적이므로, 반사이벤트가 존재하는 측정 시간대의 신호를 증폭시켜야 한다. 이를 위하여 탄성과 반사법에 이용되는 Muting, Gain (Spherical divergence, Trace balancing), Deconvolution, Bandpass Filtering, F-k Filtering 등을 이용하여 직접 파 부분은 최대한 감쇄시키고, 원하는 반사파는 최대한 증폭시킨다.

2.4.3 반사파 이벤트 영상화 및 반사면 선택

2.4.2 절의 자료처리를 통하여 얻어진 자료를 이용하여 반사파 이벤트를 영상화한다. 영상화 기법으로 탄성과 반사법 영상화 기법중의 하나인 Prestack depth migration (중합전 구조보정)을 이용한다. 이 기법은 기존의 TSP 영상화 기법인 Diffraction Stack 기법과 Image Point 기법과 이론적으로 일치하는 기법이다.

Prestack depth migration을 간단히 설명하면, 구조보정을 실시하는 영역을 일정한 크기의 격자로 나눈다. 각 격자점은 회절점의 역할을 하며, 하나의 송신원과 하나의 수신원으로부터 탄성과 전달시간을 계산한다. 그러면 송신원에서 하나의 격자점에서 회절되어 다시 수신원으로 진행되는 탄성과의 시간을 알 수 있게 된다. 그 후

그 시간에서의 탄성과 트레이스의 진폭을 뽑아서 회절점인 격자에 기록을 한다. 이러한 과정을 모든 격자에 대하여 실행하고, 모든 송신원과 수신원에 대하여 실행을 하여, 앞서 각 격자에 있는 모든 진폭을 합하는 방법으로 반사파 영상화를 한다.

HSP 탐사에서는 3성분 지오폰을 이용하여 자료를 획득하므로, 구조보정시 진폭을 합할 때 송신원과 수신원과 회절점의 위치를 고려하여 3성분 지오폰에서 기록된 3가지 방향의 진폭을 합하게 되며, 이러한 방법을 이용할 경우 반사이벤트의 방향이 1성분을 사용한 경우보다 훨씬 명확해 진다.

반사이벤트 영상화 과정을 마친후 진폭에 큰 부분을 HSP탐사의 대상체인 반사이벤트로 가정을 한다. 이렇게 선택된 반사이벤트의 신뢰성을 확보하기 위하여 간단한 파선추적법을 이용하여 HSP 송/수신 배열과 반사이벤트 정보를 이용하여 이에 대한 반사파의 도달 시간을 계산하고, 이 반사파의 도달시간이 실제 현장자료의 반사파 이벤트에 부합하는지 파악하여 앞서 선택된 반사이벤트의 신뢰도를 확보한다.

3. 터널현장적용

3.1 개요

○○고속도로 건설공사 구간 중 ○○터널 막장전방 STA. 7+160 ~ STA. 7+310 구간 예측을 위한 터널내 반사법 탐사(HSP, Horizontal Seismic Profiling)를 실시하여 탐사구간 내의 주요 질리 및 불연속면의 위치를 파악하여 시공 중 안정성을 확보하는 데 목적이 있다.

탐사구간은 ○○터널 STA. 7+160 ~ STA. 7+310 이다. 그림 5는 ○○터널 터널내 반사법 탐사 구간을 나타낸 것이며, 탐사 장비는 미국 Geospace사의 3성분 지오폰과 스웨덴 ABEM사의 Teraloc Mark 6를 이용하였다.

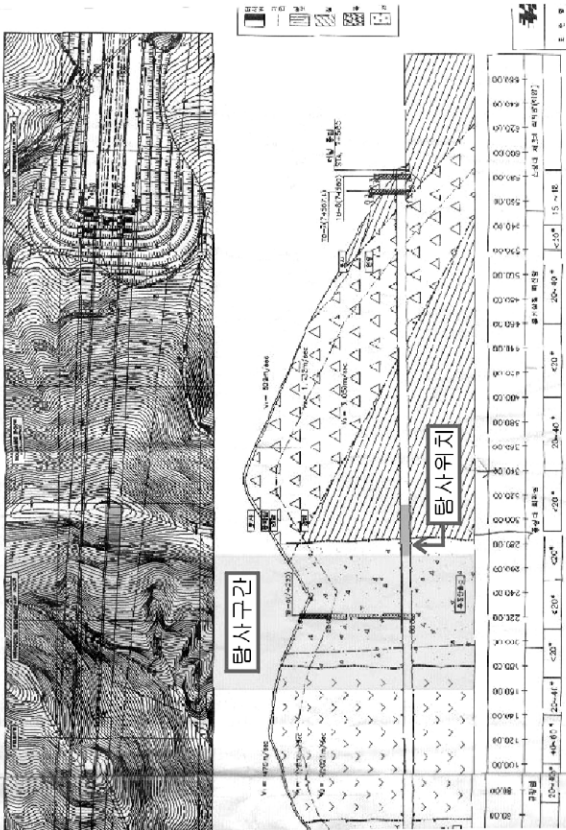


그림 5. 터널내 반사법 탐사위치 및 탐사구간

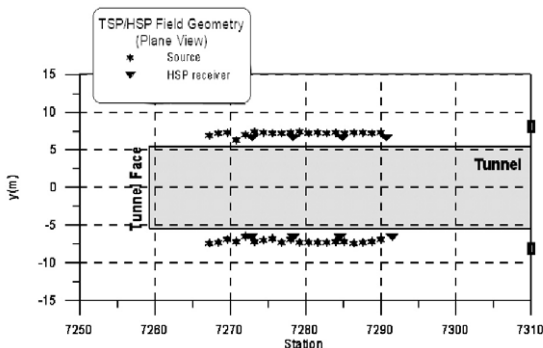


그림 6. HSP 탐사 송·수신기 layout

표 1. HSP 탐사구간

탐사구간	발진기 위치	막장 위치	예측구간
STA. 7+270 ~ 7+310	STA. 7+270~7+290	STA. 7+259	STA. 7+260~7+160

3.2 자료 취득

○○터널에서 막장 위치가 7+259에서 HSP 탐사를 수행하였다. HSP 수신기는 좌/우측 벽면에 각각 4개의 3성분 지오폰 8개를 그림 6과 같이 설치하였다. 송신원은 7+290에서 좌/우측 벽면에 약 1.2m 간격으로 막장 방향으로 20개씩 총 40개를 이용하였다. 직사각형은 HSP 수신기를 발표는 발파점을 나타낸다. 그림 6에 나타난 바와 같이 터널 전방의 불연속면을 탐사하기 위하여 HSP 수신기는 일정한 간격으로 송신원 사이에 배치하였다.

탐사구간과 탐사예측구간은 표 1에 정리하였다.

3.3 자료처리 및 해석

3.3.1 HSP 자료처리

HSP 자료처리 과정은 그림 7과 같다.

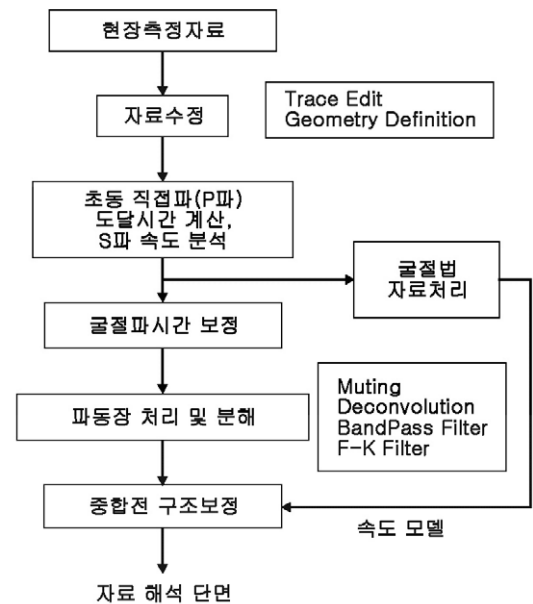


그림 7. HSP 자료처리 및 해석 순서도

그림 5의 탐사 구간에서의 지질조사 및 지층단면도의 RMR 분류에서 나타나는 것과 같이 탐사 구간의 암질이 좋지 않음을 알 수 있으며, 터널내 반사법 탐사시의 막장 역시 암질이 좋지 않음을 관찰할 수 있었다. 먼거리의 막장 예측을 하기 위하여 송신원의 에너지가 최대한 멀리 전파되어야 하는데, 본 탐사 구간의 경우 암질의 상태로 인하여 막장 전방으로 전파되는 에너지가 작음을 예상할 수 있으며, 이는 50msec 이후의 시간대의 신호를 통하여 반사되는 에너지의 양의 작음을 볼 수 있다. 또한 암질의 상태는 획득된 신호의 시간에 따른 주파수 특성에서도 잘 나타나는데 균질한 매질일수록 후기 시간대의 파장이 직접파의 파장과 거의 차이가 작다. HSP 자료에서 시간이 증가하며 할 수록 측정된 신호의 파장이 커짐을 볼 수 있으며, 이는 탐사 구간 및 예측 구간의 암질을 잘 나타내고 있다고 할 수 있다.

3.3.2 HSP 탐사

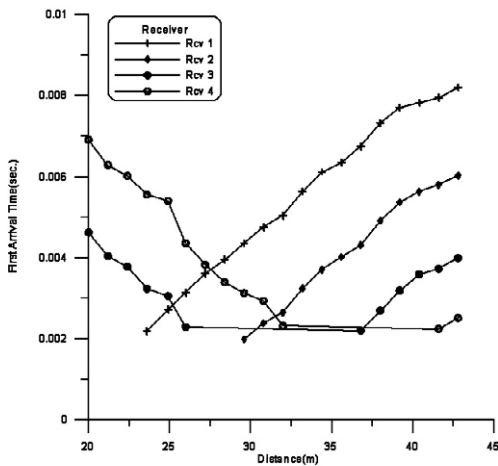
HSP 탐사는 그림 6과 같이 터널 진행방향 좌측벽면에 4개의 3성분 지오폰을 설치하여 20개의 발파공을 송신원으로 하였으며, 터널 진행방향 우측벽면도 좌측벽면과 같

은 방식으로 자료를 획득하였다. HSP 탐사자료는 총 각 성분당 320개의 trace이다. 현장에서 측정된 자료를 common receiver gather로 변환하여 자료처리를 수행하였다.

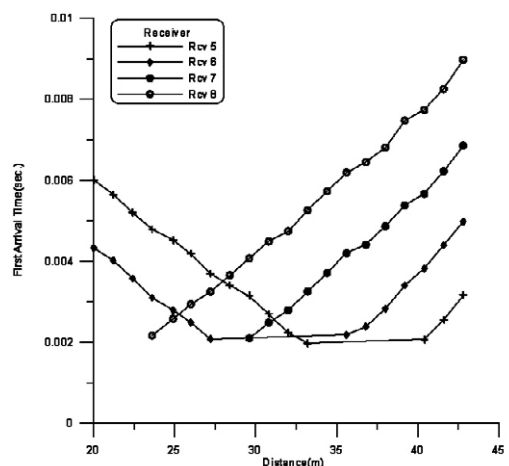
터널 벽면의 20개의 발파공 사이에 수신기를 배열하여서 같은 벽면에 송신원과 수신원이 있는 경우는 가까운 발파로 인하여 후기 시간대에도 발파의 영향이 존재하여 초동 시간은 정확히 구할 수 있었지만, 초동에 비하여 신호가 미약한 막장 전방의 신호는 발파의 영향에 의한 진동에 묻혀서 자료처리를 통하여서도 분리할 수가 없었다. 또한 송신원과 수신원이 서로 다른 벽면에 존재하는 신호의 경우 에너지의 전파가 주로 수신원의 반대방향으로 많이 전파하는 양상을 나타내므로 전방 불연속면의 예측거리가 줄어들었다. 따라서 앞서 설명한 터널 주변의 지질 상황과 발파의 영향으로 인하여 후기 시간대의 자료의 부족으로 HSP 탐사 해석은 예측거리를 줄여서 해석을 수행하였다.

(1) P파 및 S파 속도 분석

수진된 탄성파의 초동을 분석하여 탐사구간 주위의 매질의 P파 속도를 추정하였다. 그림 8은 3성분 지오폰에



(가) 터널 좌측 벽면



(나) 터널 우측 벽면

그림 8. 초동 발체 시간

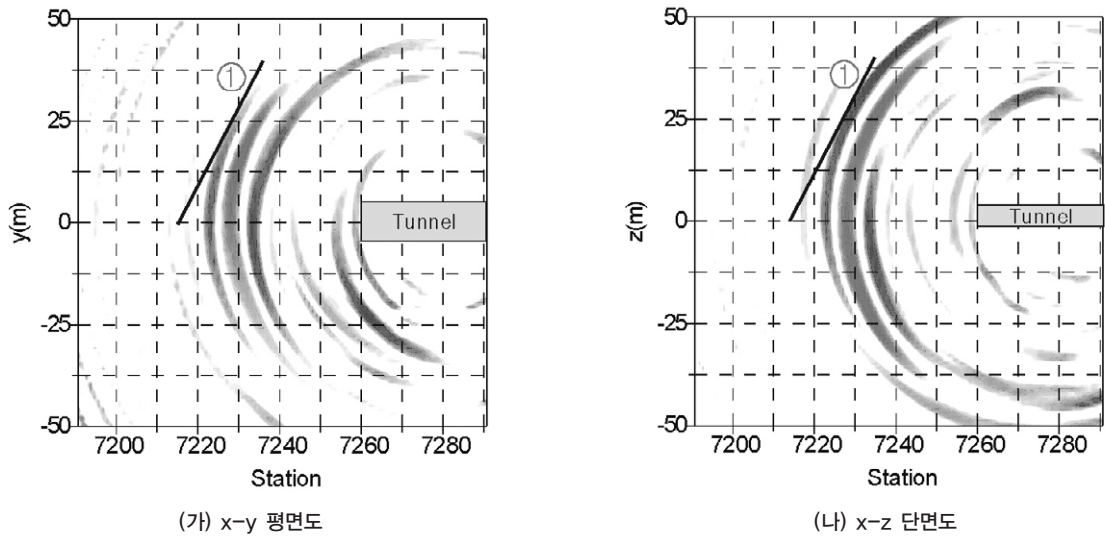


그림 9. HSP 자료 해석 단면

서 수신된 기록을 이용하여 초동을 발췌한 그림이다. (가)는 터널 진행방향 좌측벽면, (나)는 터널 진행방향 우측벽면의 자료에서 초동을 발췌한 것이다. 그림 8의 (가)와 (나)의 주시 곡선은 수신원을 중심으로 하여 좌·우측 방향의 기울기가 거의 비슷함을 볼 수 있고, 4개의 수신기에서의 주시곡선 역시 일관된 양상을 띠음을 볼 수 있다. 이를 통하여 탐사 구간 부근 암반의 표 1과 거의 동일한 P파 속도를 얻을 수 있었다.

(2) 불연속면 해석

HSP 자료를 이용한 불연속면 해석은 7+290 ~ 7+190 까지 수행하였다. 그림 9는 자료처리 과정을 통하여 최종적으로 획득한 불연속면 영상화 단면이다. x 방향은 터널 굴착 진행 방향과 평행한 방향이다. y 방향은 터널 진행 방향과 수직인 방향을 나타내며, (+)방향은 Station이 증가하는 방향에서 왼쪽을 가리키며, (-)방향은 Station이 증가하는 방향에서 오른쪽을 가리킨다. z 방향은 상/하 방향을 가리키며, 0점은 TSP 및 HSP 수신기가 위치하는 터널 바닥에서 1m 상부이며, (+) 방향은 터널의 상부를 (-) 방향은 터널의 하부를 나타낸다. 그림 9의 (가)는 x-y 방향의 평면도이고, (나)는 x-z 방향의 단면도이다. x-y

평면도에서 ①로 표시된 부근에 강한 반사 영상이 나타나고 있으며 이는 x-z 단면에서 같은 위치에 나타나며, ① 이외의 반사 이벤트는 HSP 불연속면 해석 구간에서는 없다고 추정된다. 반사 이벤트①은 터널 구간의 지질과 HSP 탐사 송/수신 배열을 고려하여 주향과 경사를 판단 하였을 때 그림 9의 점선과 같이 연상시킬 수 있다. 이는

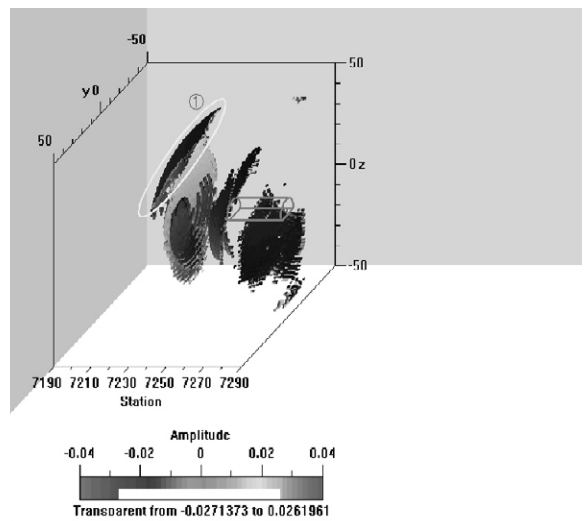


그림 10. 3차원 불연속면 해석 단면

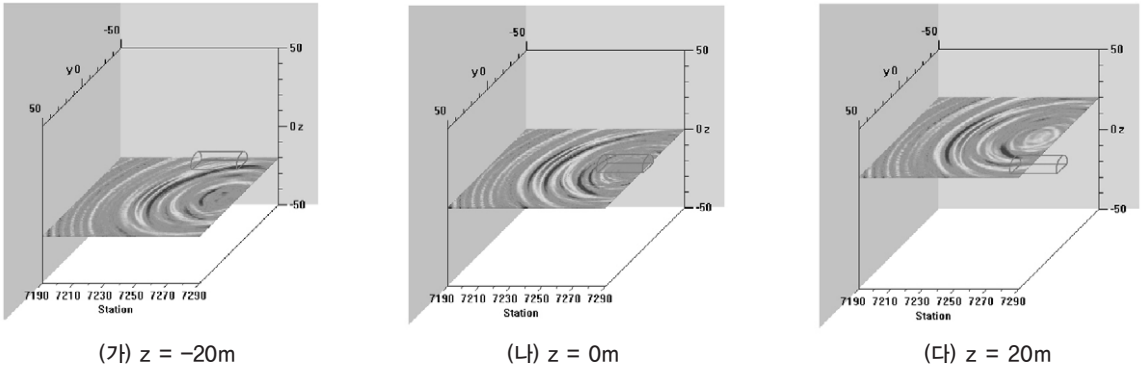


그림 11. 심도에 따른 불연속면 해석단면 ($z = 0m =$ 터널바닥에서 $1m$)

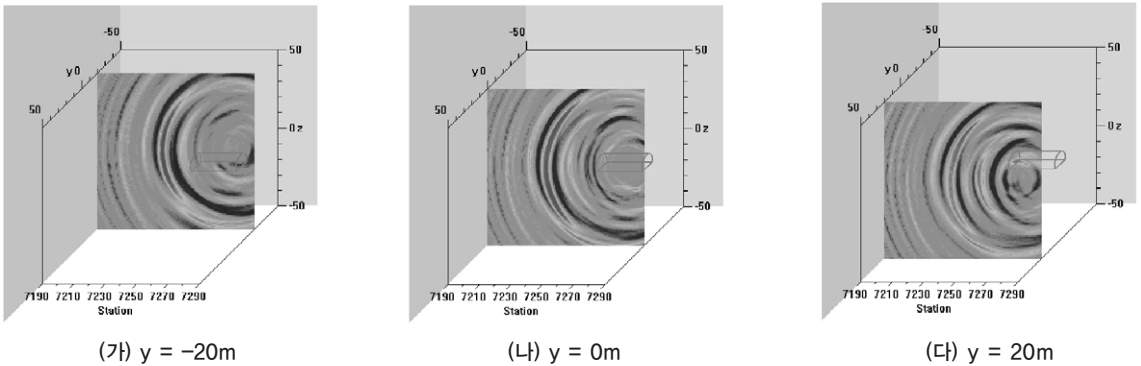


그림 12. 터널 진행 방향에 따른 단면도 ($y = 0m =$ 터널 진행방향 중심)

터널 진행 방향에 대하여 우측 상부에 존재하며, 7+215 지점 부근에서 만난다고 추정할 수 있다. 이러한 결과는 TSP의 불연속면 해석과 일치하는 결과이다.

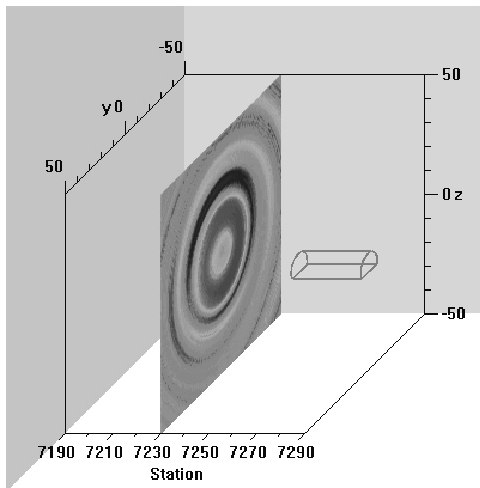
반사 이벤트①의 양상을 좀더 명확히 살펴보기 위하여 그림 10, 그림 11, 그림 12 및 그림 13과 같이 3차원적으로 도시하였다. 그림 10에서 나타나는 3차원적인 불연속면의 양상은 그림 9에서 예상한 부분과 일치함을 볼 수 있으며, 불연속면의 방향이 터널 진행 방향 우측 상부에서 터널 굴착 심도로 기울어져 있음을 볼 수 있다.

그림 11은 심도에 따른 평면도를 도시한 그림이다. (가)~(다)는 각각 터널의 바닥에서 $1m$ 상부를 심도 = 0 으로 하여 z 방향의 심도가 각각 $-20m$, $0m$, $20m$ 의 평면도를 그린 것이다. 그림 9에서와 같이 터널 진행방향 우측에서

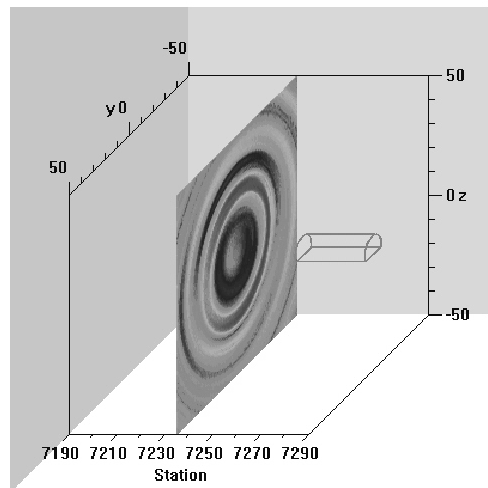
터널 중심 방향으로의 불연속면의 연장선이 존재함을 좀더 명확히 볼 수 있다.

그림 12는 터널의 진행방향과 평행한 방향의 단면도를 도시한 그림이다. (가)~(다)는 각각 터널의 중심을 0 이라고 할 경우 터널의 진행방향으로 터널의 중심으로부터의 거리가 각각 $-20m$, $0m$, $20m$ 의 단면도를 그린 것이다. 반사 이벤트 ①의 연장선이 터널 상부에서 하부로 연장됨을 볼 수 있고, 터널 진행 방향 우측에서 좌측으로 갈수록 반사 이벤트 영상의 진폭이 작아짐을 볼 수 있고, 이를 통하여 반사 이벤트 ①이 터널의 우측에서 좌측으로 형성되어 있음을 좀더 명확히 구별할 수 있다.

그림 13은 터널의 진행방향과 수직인 방향의 단면도를 도시한 그림이다. (가)는 Sta. = 7+230에서의, (나)는 Sta.



(가) Sta. = 7+230



(나) Sta. = 7+235

그림 13. 터널 진행방향과 수직 단면도

= 7+235에서의 단면도를 그린 것이다. 반사 이벤트 ①이 존재하는 부근의 단면도를 그린 것으로, 반사 이벤트의 진폭이 터널진행방향에서 우측 상부에 집중되어 있음을 볼 수 있고, 이는 앞서의 반사 이벤트 ①의 해석과 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다.

3.4 탐사 결과 분석

HSP 자료에 대한 불연속면 해석과 현장 자료를 이용하여 그림 14의 불연속면 해석결과와 표 2의 탐사구간에 대한 P파 및 S파의 속도를 이용한 암반 분류 및 지보패턴을 얻을 수 있었다.

표 2에는 속도분석을 통한 각 해석구간별 속도와 속도에 기반한 예상 지보패턴을 제시하였다. 3성분 자료취득에도 S파 판별은 명확할 수 없으므로 다소의 불확실성이 존재함을 언급하고자 한다. 속도에 의한 암반분류는 암반 상태를 실제보다 매우 양호하게 판단하게 되므로 절리발달이나 공동존재를 예상하여 지보패턴을 1-2 등급 낮게 설정함이 타당하리라 판단된다.

7+160 ~ 7+310에 대한 불연속면 및 속도 분석을 수행한 결과, 예측구간에서의 지반의 P파의 속도의 변화는 없

을 것으로 추정된다. 그림 14에서의 몇 개의 불연속면이 존재할 것으로 예측되며, 그림 9에서 나타난 바와 같이 7+215 ~ 7+225 구간에서 큰 진폭을 가지는 이벤트들이 존재하므로, 이 구간에서 시공시 주의가 필요할 것으로 사료된다.

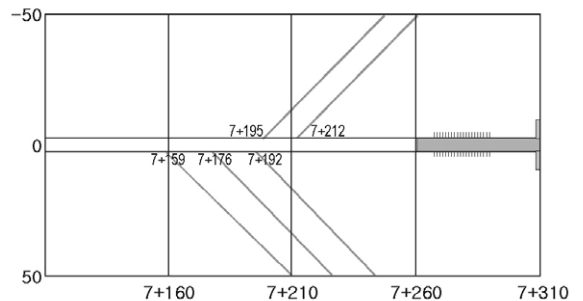


그림 14. 탐사구간에서의 불연속면 분석 결과

표2. HSP 탐사 결과를 통한 구간별 P파 속도 및 탄성계수

위 치	7+160 ~ 7+310
P파 속도 (m/sec)	2965
S파 속도 (m/sec)	1923
포아손비	0.137
예상지보패턴	IV

그리고 표 2에서와 같이 탐사구간에서 얻어진 P파와 S파의 속도를 볼 때, 터널 설계 심도에서의 지반은 암질이 매우 좋지 않음을 볼 수 있으며, 설계시 수행된 조사에서의 RMR값이 터널내 반사법 탐사를 통하여 얻은 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다.

3.5 탐사 결과

현재 터널 굴착이 진행중인 ○○고속도로 ○○터널에서 터널내 반사법 탐사(HSP)를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 시공중인 터널 지반의 암질이 좋지 않았기 때문에 송신에너지 전파의 부족으로 불연속면 예측거리를 막장에서 약 100m 정도로 하였다.

- 1) ○○터널 7+160 ~ 7+310에서의 P파 속도의 평균은 2965m/sec로 현재 굴착이 진행된 7+259~7+310에서의 지반의 상태와 같이 예측구간에서도 대체로 불량한 지반 상태로 추정된다.
- 2) STA. 7+192, 7+176, 7+159, 7+212에서 소규모의 불연속면의 존재가 예측되며, 터널 굴착시 주의가 필요하다고 사료된다. 또한 7+215~7+225 구간에서 역시 소규모의 불연속면의 존재가 예측된다.
- 3) 설계시 이루어진 지반 조사에서 추정된 RMR 값과 터널내 반사법 탐사를 통하여 얻은 지보패턴과 거의 일치하는 결과를 얻었으며, 기존의 원설계의 적용으로 충분히 터널의 안정성이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

터널 시공시 영향을 주는 지질구조에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서 HSP(Horizontal Seismic Profiling)법을

시험적용 하였다. 현장 적용결과 소규모의 불연속면의 존재가 예측되었으며, 또한 지반 조사에서 추정된 RMR 값과 터널내 반사법 탐사를 통하여 얻은 암반조건과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, HPS법이 시공 중 평가되는 암반 분류 및 평가 결과와 비교 검증하는 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 우제윤 (1994), "터널내 수평 탄성파 검측법에 의한 터널 막장 전방 조사기술", 건설기술정보, 통권 131호, 한국건설기술연구원, pp.18~25.
2. 남기천, 이진무, 차성수 (1995), "수직 탄성파 탐사를 응용한 터널 전방의 불연속면 예측과 암반의 물성파악", 한국암반공학회지, vol. 5, pp.214~222.
3. 이광호 (1997), "반사탄성파를 이용한 지층 불연속면 탐지와 이의 공학적 응용에 관한 연구", 석사학위논문, 인하대학교, pp40~46.
4. 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.
5. Inazaki Tomio (1993), "Field Examination of in-tunnel HSP Method" 日本物理探査學會 第88回 學術講演會 論文集, pp.140~143.
6. Inazaki, Tomio, Kurahashi, T. and Research Group on HSP (1996), "Imaging and Characterizing fractures ahead of tunnel face using in-tunnel HSP method", Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp. 597-600.
7. A.J. Berkhout (1982), "Seismic migration (Imagine of Acoustic Energy by Wave field Extrapolation)", Elsevier Science Publishing Company INC. pp.249.