

수직 탄성파탐사를 응용한 터널 전방의 불연속면 예측과 암반 물성 파악

남기천¹⁾ · 이진무²⁾ · 차성수³⁾

Prediction of Discontinuity and Determination of Rock Property ahead of Tunnel Face by VSP application

Kee-Chun Nam, Jin-Moo Lee and Sung-Soo Cha

ABSTRACT Geological events which are undetected by the surface geophysical or geological survey phase can cause many problems, especially when the tunnel is excavated by TBM. To detect the geological events ahead of tunnel face, a seismic method applied from VSP method is used. Generally uniaxial geophone has been used in surface seismic survey. But this time, triaxial geophone is used to reduce the noise of tunnel wave. DME (Dip moveout Enhancement) filter and diffraction stack method are used. Applying these techniques to the road tunnel in construction, it is proved that the geological events ahead of tunnel face is fairly well predicted. From the seismic trace, V_p and V_s which are related to the rock property can be also obtained. Rock property and proper support design can be deduced from these parameters.

1. 서 론

지하 암반 굴착 작업의 안정성 확보와 계획적인 시공을 하기 위해서는 터널 전방의 지질학적 불연속면 위치 파악과 암반의 역학적 특성을 필요로 한다. 특히 도심지나 험준한 산악지는 지질 조사가 불충분하여 암반 굴착시 예기치 못한 불연속면으로 인한 붕괴로 시공에 막대한 지장을 가져 올 수 있다.

막장 전방 암반의 평가는 예비 조사시 얻는 지질 정보에 의해 이루어지며, 시공시에는 많은 비용과 시간이 소요되는 전방 확인 시추 작업을 하여야 했다. 시추 작업으로 암질, 파쇄대 존재, 암경계부 등 상세한 정보를 얻을 수 있으나 여러공을 선정하여 암석 코어를 채취하여야 하므로 상당한 시간을 필요로 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 터널내에서 수직 탄성파 탐사(VSP)를 변형한 물리탐사 기법으로 터널 전방의 구조대 파악과 암반 물성 예측이 가능하다.

이 경우, 기존의 탄성파 탐사법으로는 터널내에서 효과적인 자료를 얻기가 어려우며, 특히, 터널의 진행에 따라 막장 전방의 지질 이상대를 파악하기 위해서는 기

존 탄성파 탐사기에서 사용되는 수진기 시스템으로는 부적합하다. 즉 터널내에서 발생하는 터널파는 S/N비를 떨어뜨리는데, 이를 극복하기 위해 특별히 고안된 3축 수진기를 사용하여 S/N비를 높임으로써 터널 전방의 지질 이상대를 효과적으로 파악할 수 있다.

2. 터널내에서 수직 탄성파 탐사의 응용

2.1 수직 탄성파 탐사의 응용

지반 조사를 수행함에 있어 보다 정확한 지질 구조를 파악하기 위해 많은 탄성파 탐사 기법들이 개발되었다. 부지 조사를 위해 주로 굴절법으로 시작된 엔지니어링 분야의 탄성파 탐사는 더욱 정밀한 지질 구조의 파악에 대한 요구로 인하여 시추공을 이용한 탐사 기법이 많은 발전을 이루어 왔다. 최근에는 탄성파 토모그래피나 수직 탄성파 탐사(VSP)를 이용하여 터널 내부의 지질 구조를 파악하고자 하는 시도가 이루어졌다.¹⁾ 선진 조사

* 1995년 9월 27일 접수

- 1) 정회원, 선경건설 지하비축팀 부장
- 2) 정회원, 선경건설 지하비축팀 과장
- 3) 정회원, 선경건설 지하비축팀 근무

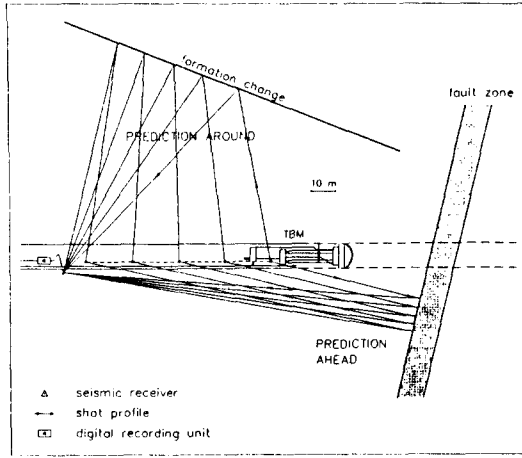


Fig. 1. Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods.

공으로 전방의 지질을 파악하고, 그 공을 이용하여 토모그래피 등의 적용도 가능하나, 이는 비용이 많이 들고 굴착 작업이 중단되는 등 현장 작업에 커다란 지장을 줄 수 있다. 굴착 작업에 지장을 주지 않고 현장에서 빠른 시간내에 암질 및 지질 이상대를 찾아내기 위하여 수직 탄성과 탐사 기법을 응용하게 되었다(Fig. 1).²⁾ 터널 막장이 아니라 터널 측면에서 수행하는 응용된 수직 탄성과 탐사는 준비과정이나 수행 과정에서 굴착 작업에 지장을 주지 않음으로써 많은 비용과 시간을 절약할 수 있으며, 특히 TBM과 같이 막장 조사가 어려운 경우에는 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

기존의 탄성과 탐사기와 터널벽면에 1축 수진기 설치하는 시스템을 이용한 터널내 탐사는 터널과의 잡음으로 인해 많은 문제점이 생긴다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 터널 벽면에 수진기를 넣는 방법이 시도되었다. 터널과는 터널 벽면을 따라 진행하면서 터널면에 대해 수직 성분을 지니므로 터널 벽면에 대한 수직 성분은 제거하고 터널면과 평행한 성분을 수진하는 3축 수진기를 사용하였다. 수진기와 벽면에 대한 결합을 높이기 위해 수진기 케이스를 시멘트로 봉합한 후 수진기를 설치하여 수진기 링잉에 의한 잡음을 최소화하였다. 터널내 탐사에서는 특히 수진기의 설계 및 배치가 중요하다. 이를 위해 특별히 고안된 수진기 시스템을 지닌 TSP 202 장비를 이용하였다.

2.2 자료 취득 시스템

2.2.1 수진기 시스템

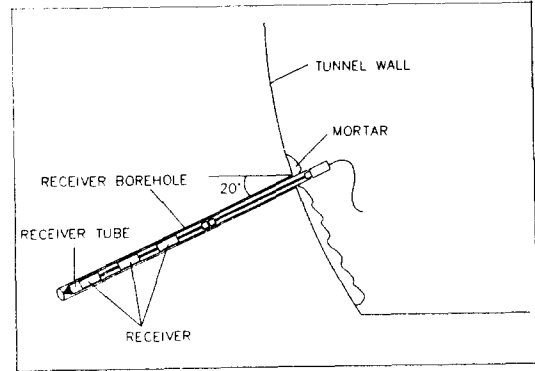


Fig. 2. Schematic of receiver system.

지표 탄성과 탐사와는 달리 시추공을 이용한 탄성과 탐사의 경우 특별히 고안된 수진기 시스템을 필요로 한다. 시추 공간 탄성과 토모그래피나 수직 탄성과 탐사의 경우 시추공과의 밀착도를 높여야 효과적인 해상도를 얻을 수 있다.

터널내 탄성과 탐사의 경우 일반적으로 지표 탄성과 탐사에서 사용하는 1축 수진기를 사용하는 것은 효과적이지 못하다. 종래의 1축 수진기는 터널파에 의한 잡음 문제와 터널 벽면과 수진기의 밀착도 등에서 많은 문제를 안고 있다. 수진기와 터널 벽면의 불량한 결합은 S/N비를 현저히 낮아지게 하고 이는 터널내 탐사에 중요한 영향을 미친다.

암반에 대한 결합력을 높이기 위해 수진기 케이스를 설치한다. 수진기 케이스는 수진기와 암반의 결합력을 높이는 데 매우 효과적이다. 먼저 수진공은 수진기 케이스보다 큰 구경으로 약 2.5 m 정도 천공한다. 대체로 32 mm 이상의 핸드 드릴로 간단하게 천공하면 된다. 천공된 수진공에 수진기 케이스를 X축, Z축 방향을 고려하여 삽입하고, 시멘트를 부어 그라우팅한다. 탐사를 시작하기 전에 시멘트가 충분히 굳어 수진기 케이스가 암반에 견고하게 밀착 되었는지를 확인하는 것이 필요하다. 수진기는 X축(터널 방향축)과 Z축(터널 상하축) 성분을 수진하도록 되어 있다. 수진기는 터널 상단과 하단을 나누어 수진하는데, 상하단의 탄성과 체적 비교는 지질 이상대의 경사를 추정할 수 있게 한다. 지질 이상대의 주향과 경사에 대한 정보를 지표 탐사나 갱내 지질 조사 자료로부터 가지고 있다면, 수진기는 반사량을 최대로 얻을 수 있는 방향으로 설치한다. 지질 정보가 부재하면, 양쪽 터널 벽면에 모두 수진기 시스템을 설치하는 것이 바람직 하다.

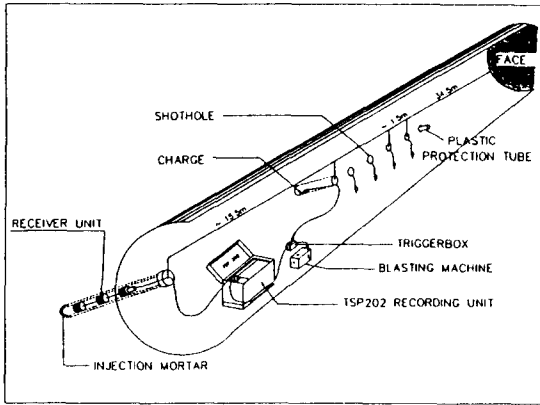


Fig. 3. Schematic of shot holes and receivers.

터널내 탄성과 탐사에서 좋은 결과를 얻기 위한 수신기 시스템은 Fig. 2와 같다.

2.2.2 발파공 배열

최초 발파공(S1)은 수신기로부터 20 m 정도 떨어진 지점부터 설치한다. 깊이는 터널벽면에 대해 1.5 m 정도로 하고, 각 발파공의 간격은 1.5 m 정도가 적당하다. 발파공은 24공 정도가 가장 적당하다. 발파공의 발파는 물을 부어 감쇠 효과를 얻는 것이 용이하며, 이를 위해 발파공은 하향으로 약 10°~ 20° 정도를 기울이는 것이 효과적이다.

이상대에 대한 반사파 수신 효율을 높이기 위해 수신공과 발파공은 터널 벽면에 대해 양쪽으로 벌어지는 방향으로 각각 약 10° 정도 벌리는 것이 효과적이다. 화약은 20~40 g이 적당하며 수신공에서 멀어지는 방향으로 양을 늘린다. 뇌관은 지연시간이 없는 것을 사용하는 것이 좋다. 수신공과 발파공의 기본 배열은 Fig. 3과 같다.

2.3 암반 물성 파악과 지질 이상대 예측 원리

2.3.1 암반 물성 파악

터널 설계 및 시공상에 필요한 제 파라미터들은 V_p , V_s , 및 밀도로부터 구할 수 있다. 암반의 P파와 S파 속도는 탄성과 궤적으로부터 얻는다. P파의 경우는 터널 내의 암반은 수신기와 발파공 사이의 암반과 어느 정도 균질하다는 가정으로 초동파로부터 구할 수 있고, S파의 경우는 3축 수신기를 사용하므로 탄성과 궤적으로부터 직접 얻을 수 있으며, 이때 S파는 Rayleigh파(터널내에서는 터널파)가 S파의 0.92 배정도라는 것과 위

상차를 참조함으로써 보다 용이하게 구할 수 있다. 여기에 밀도를 적용하여 포아송비(Poissons Ratio), 전단 탄성 계수(Shear Modulus), 압축 계수(Bulk Modulus) 및 영률(Young's Modulus)을 구할 수 있다.³⁾ 제 매개변수와 V_p , V_s , 및 밀도와와의 관계식은 다음과 같다.

$$\text{포아송비: } \nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{(2 \times (V_p^2 - V_s^2))}$$

$$\text{전단 탄성계수: } G = \rho \times V_s^2$$

$$\text{압축 계수: } K = \rho \times (V_p^2 - \frac{4}{3} \times V_s^2)$$

$$\text{영률: } E = 3 \times K \times (1 - 2\nu)$$

여기서 ρ 는 밀도

2.3.2 터널면 전방의 지질 이상대 예측

암질의 변화는 반사면에서의 반사계수에 의해 판단할 수 있다.

반사계수는 $R_1 = \frac{(\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2)}{(\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)}$ 이다. 반사계수가 음

수이면 파의 위상이 바뀌어 반사되었다는 것, 즉 강한 매질에서 약한 매질로 반사되었음을 의미한다. 양수이면 약한 매질에서 강한 매질로 반사되었음을 의미한다. 또한 반사계수의 값은 입사된 에너지에 대한 반사된 에너지의 비율을 의미한다. 터널 탄성과 예측 탐사의 해석은 호이겐스 원리에 기초한 회절 종합과정으로 수행된다. 대상으로 하는 지질이상대는 터널면에 대해 대부분 경사져 있으므로 구조 동보정(DMO)에 의한 반사파 증폭 과정이 필수적이다.¹⁾

2.4 자료처리와 회절 종합 과정(Data processing/ Diffraction Stack)

2.4.1 자료처리 과정

터널축 방향을 X축의 양 방향(+), 좌측 터널벽면에 수직인 방향을 Y축의 양 방향(+), 터널 상부를 Z축의 양 방향(+이라고 할 때, 지질 이상대로부터 반사되는 신호의 수신 상태를 증진시키기 위해, 예상되는 불연속면의 방향을 고려하여 X, Y, Z축의 수신 비율을 조절한다. 축적된 경험으로부터 X축은 88%를 부과하고 Z축은 12%를 부과하는 것이 가장 적절하다. Y축방향은 터널파에 의한 잡음을 줄이기 위해 0으로 정하고 특수한 대상체를 파악할 때만 사용한다. 각 방향의 비율은 예상되는 불연속면의 기하학적 형태에 따라 조정한다.

될 것인가를 추정할 수 있다(Fig. 5).

3. 현장 작업 및 결과

창원 터널은 마제형 굴착 터널로 경남 창원시 불모산 동과 김해군 장유면 경계부에 위치하며 N 75° W 방향, 총연장 2,340 m인 2 차선 도로 터널이다. 이미 터널 남

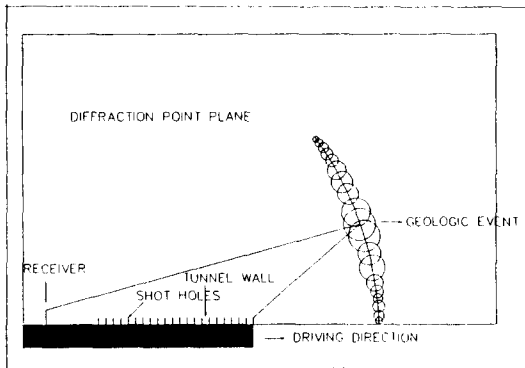


Fig. 5. Determination of the geological discontinuity using the diffraction points.

서쪽으로 30 m 떨어져 상행선이 준공되어 차량이 통행하고 있다. 상행 터널 건설중에 수행된 지질 조사 자료와(1990. 7, 1991. 1, 1992. 5), 갱내 지질도(1991. 6. 8~1992. 7. 14) 분석과 전기비저항 탐사가 수행되었다.

하행 터널은 현재 창원측과 장유측 두 방향에서 굴착 중에 있으며 지질 분포는 세일(또는 쳐어트) 퇴적층을 화강암류(섬록암 또는 마산암)가 관입하고 있다(Fig. 6). 지질조사 자료를 근거로 작성한 지질종단면도는 Fig. 7과 같다.

지표 지질 조사 결과 N 70°~80° E, N-S 방향으로 인장 절리의 발달이 두드러진다. N 40° W 방향으로 전단 절리가 발달하여 큰 폭의 파쇄대(Shear zone)가 형성되어 있다. 인장 절리는 대부분 지하수의 수로(Water bearing joint)를 형성하며 예각으로 교차하는 등 국부적으로 다량의 출수가 예상된다.

Fig. 8와 같이 총 4개 지점에 대하여 현장 적용 시험이 실시되었다.

탄성과 탐사 Profile 1, 2지점은 화강 섬록암과 세일층의 경계부를 통과하여 세일의 경암과 연암 파쇄대가 분포한다. 주절리는 2개 방향이 현저하여 하나는 터널

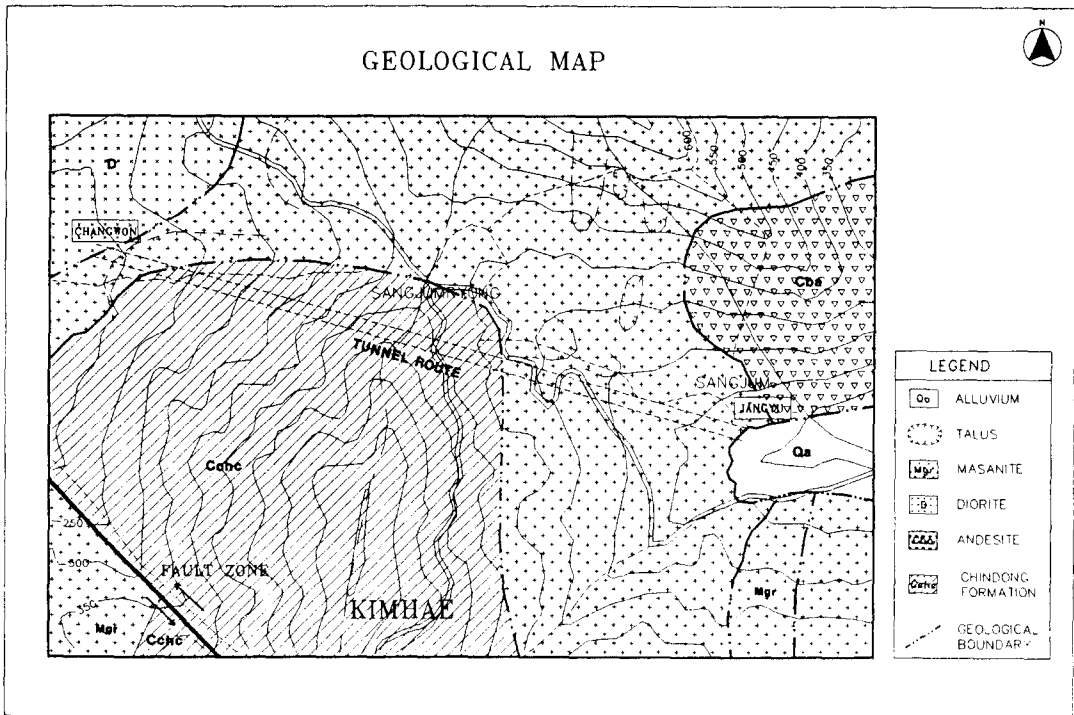


Fig. 6. Geological map of Changwon area.

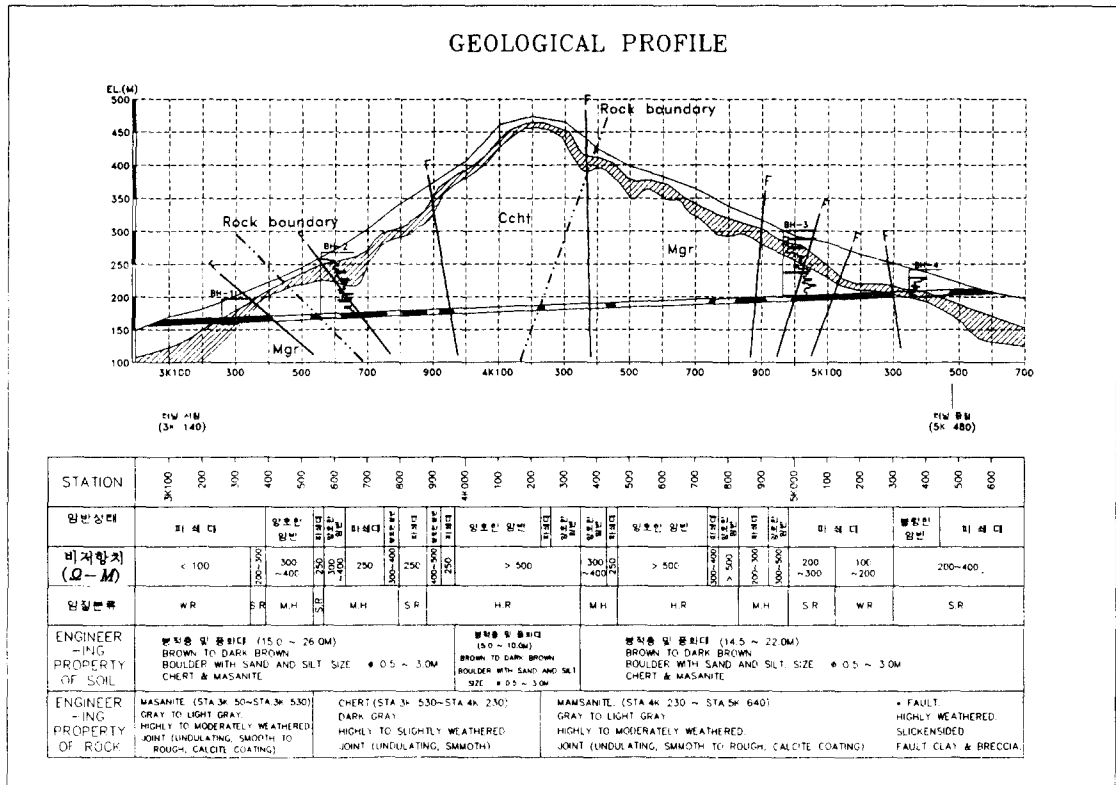


Fig. 7. Predicted geological profile of Changwon tunnel.

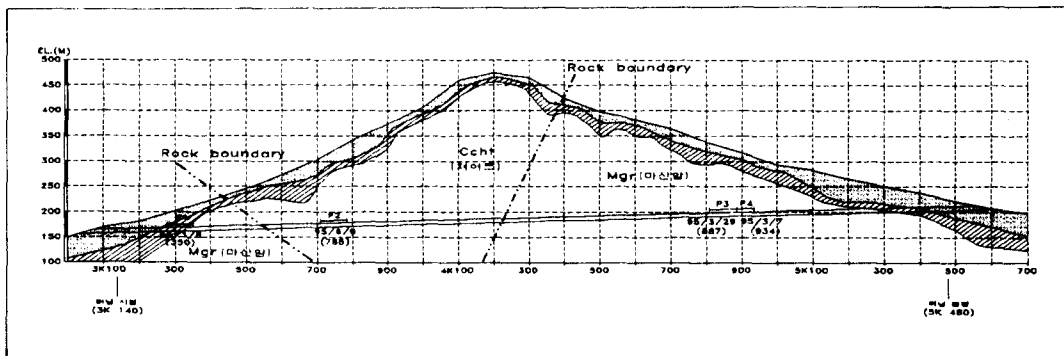
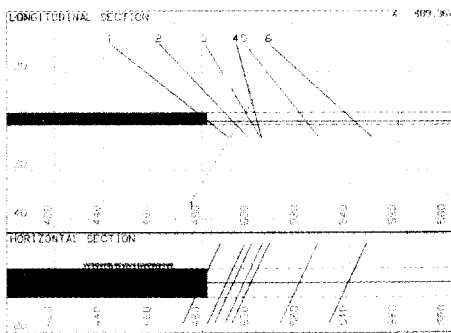
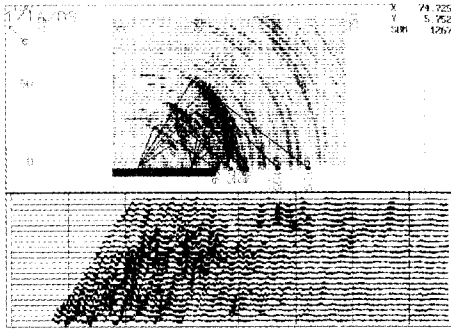


Fig. 8. Situation map showing section of seismic profiles.

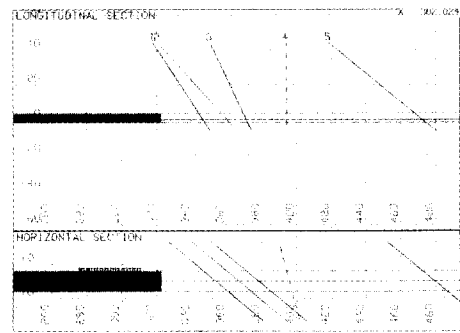
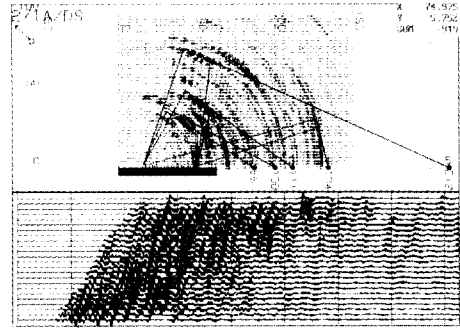
축과 예각으로(N 70° E), 다른 하나는 가로질러(N 30° W) 나타나고 불규칙 절리에 의한 파쇄가 심하다. 절리는 방해석과 점토질이 끼어 있어 RMR 값은 30 정도로 불량하다. 특히 profile 2지점은 지하수가 다량으로 유출되고 있다.

Profile 3, 4지점은 화강 섬록암의 중경암이 분포하

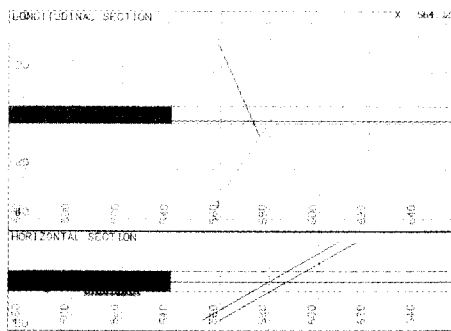
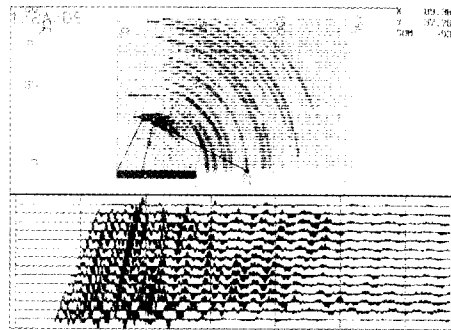
며 주절리는 2개 방향이 우세하여 터널축에 거의 평행으로 나타난다(N 70~80 W, N 80 E). 절리면에는 모래질이나 방해석이 충전되어 불량한 상태이며 RMR 값도 35 정도이다. 지하수 상태는 두 지역 공히 스며드는 정도로 양호하다. Table 1에는 4개 측정에서 측정된 암반 물성치로서 지하 구조물 안정성 검토에 중요하게 쓰



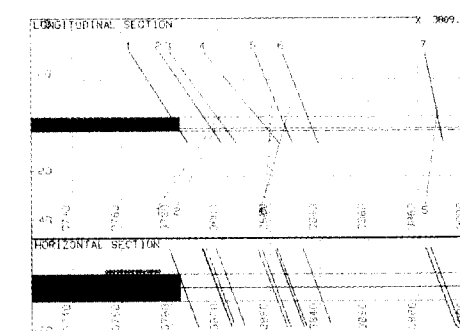
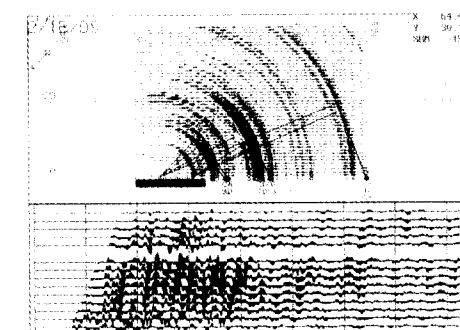
(a) Determination of geological events, P1



(b) Determination of geological events, P2



(c) Determination of geological events, P3



(d) Determination of geological events, P4

Fig. 9. Event editing and event output by diffraction stack method.

Table 1. Rockmass properties

| | Profile 1 | Profile 2 | Profile 3 | Profile 4 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| V_p (m/sec) | 4,370 | 4,430 | 5,530 | 4,770 |
| V_s (m/sec) | 2,320 | 2,530 | 3,100 | 2,600 |
| Poissons Ratio | 0.30 | 0.26 | 0.27 | 0.29 |
| Shear modulus(GPa) | 13.49 | 17.23 | 25.95 | 18.29 |
| Bulk modulus(GPa) | 29.62 | 30.04 | 48.00 | 36.75 |
| Young's modulus(GPa) | 35.72 | 43.39 | 65.96 | 28.22 |

인다.

탄성과 분석은 불연속면에서 강력히 반사되는 에너지를 회절 중첩(Diffraction stack)시키는 기법을 사용하여 분석하였다. Fig. 9는 터널 막장을 중심으로 탄성과 축선상에 회절 중첩 분석의 예와 종평면도상의 지질 이상대(파쇄대, 층리면)를 보여주며 푸른색 선분은 암반의 강도가 점차 증가됨을, 빨강색 선분은 암반이 불량해짐을 의미한다.

암석의 밀도와 속도차가 클 경우 강한 반사 에너지가 생성되고 이 에너지 집합체를 터널 축으로 연결하면 지질구조대가 막장 전방에 나타나는 것을 의미한다. 그러나 터널 축과 예각으로 만나면 터널 축에서 멀리 떨어져 나타나고 해석상 정확도가 떨어지며 터널 축과 직각으로 만날 경우 막장 전방 멀지 않은 지점에 지질 이상대를 예측할 수 있으며 해석상 신뢰도도 커진다.

Profile 1 (P-1)

첫번째 탄성과 축선은 Sta. 3k350 m까지 굴착한 후 Sta. 3k280-3k340 m 구간에서 실시하였다. 축선은 굴진 방향 우측으로 기존 터널이 존재하여 축선은 좌측 벽체를 따라 설치하였다. 암질 상태는 세일의 경암으로 장유층과 마찬가지로 터널축을 따르는 절리가 막장 전방 80 m까지 반복하여 나타나고 50 m, 75 m 부근에 단층과쇄대가 예상된다. 막장 전방 80 m에서 160 m까지는 지질이상대는 존재하지 않는 균질한 암질이다.

Profile 2 (P-2)

두번째 탄성과 축선은 막장면 Sta. 3k785 m까지 굴착한 후 3k710-3k775 m 구간에서 실시하였다. 1번 축선과 마찬가지로 축선은 좌측 벽체를 따라 설치하였다. 또한 암반 점차 불량해지므로 암반의 파쇄 범위와 양호한 암반의 출현 지점이 중요한 관심 사항이었다. Sta. 3k740~3k780 m 구간의 암질 상태는 세일의 보통암이

나 터널축을 30~50°로 가로지르는 2개의 절리가 우세하게 나타난다. 막장(3k783) 전방 15 m 구간은 균질 보통암이나 Sta. 3k800부터는 암질이 불량해지면서 특히 Sta. 3k820~840 m 구간은 단층 파쇄대로 예상되는 매우 불량한 상태이다. Sta. 3k890 m 이후부터 암질이 양호해지는 경향을 보인다. 전기비저항 탐사시 Sta. 805-885 m 구간에 저비저항 이상대가 인지되었으며 실지 시공중에서도 단층 파쇄대와 RMR 30 이하의 불량 암반이 존재하였으며 Sta. 3k895 m부터 양호한 암반으로 바뀌었다. 탄성과 탐사 예측 결과와 상당히 일치함을 보여주었다.

Profile 3 (P-3)

장유층에서 창원층으로 굴진하는 터널로 탄성과 축선은 막장면 Sta. 4k887 m까지 굴착한 후 4k810-4k877 m구간에서 실시하였다. 축선은 굴진 방향 좌측으로 기존 터널이 존재하여 축선은 우측 벽체를 따라 설치하였다. 막장 전방 25~32 m (Sta. 4k853~860) 사이에 이상대가 인지되며 반사에너지가 상반축이 크므로 이상대는 굴진 방향과 동일한 경사를 가지고 있다.

Profile 4 (P-4)

막장면 Sta. 4k934 m에서 Sta. 4k887~4k924에 축선을 설치하였다. 암질 상태는 화강 섬록암의 중경암으로 막장에서 20 m까지는 절리가 많이 발달되어 있고 20 m 부근에 5 m 두께의 파쇄대가 인지된다. 막장으로부터 20 m에서 40 m까지는 균질한 암질 상태를 유지하나 40 m 부근에서 파쇄대가 나타난다. 전체적으로 부분 파쇄가 간헐적으로 나타나는 암질 상태를 보이며 대규모 단층대나 파쇄대는 인지되지 않는다. 전기비저항 탐사시 Sta. 4k 840-920 m 구간에 저비저항 이상대가 인지되었으며 실지 시공중에서도 RMR 30~50의 불량 암반 또는 양호한 암반이 불규칙하게 존재하였으며 특히 Sta 4k845-855 m에서 심하게 파쇄되어 있다. 탄성과 탐사 예측 결과와 상당히 일치함을 보여 주었으며 조사 단계의 전기 비저항 탐사와는 저비저항 이상대 폭이 다소 차이가 있었다.

4. 결 론

지하구조물 시공중에 막장 전방의 지질 상태를 효과적으로 파악하기 위한 방법으로 수직 탄성과 탐사법을

응용한 새로운 탄성과 반사법을 현장 적용 시험하였다. 현재 시공중인 창원터널에서 탄성과 예측 탐사 결과는 터널 전방의 지질 이상대를 효과적으로 예측할 수 있음을 보여 주었다. 가탐 범위는 150~200 m 정도이며, 지속적으로 탐사 결과와 굴착 결과가 비교 분석되었다. 특히 지표 지구물리 탐사 및 지질조사에서 파악되지 않은 지질이상대를 정확히 예측할 수 있었다.

여러 차례 현장 적용 결과로 정확한 지질 이상대 예측이 이루어져 터널내 탄성과 탐사는 매우 높은 예측도를 보여 주었다. 이로 인한 지보 대책과 안전 대책에 많은 성과를 얻을 수 있었다. 본 탐사 방법은 터널 굴착 작업에 지장을 주지 않기 때문에 향후 터널시공을 위한 막장 전방 지질 예측에 적극적으로 활용할 수 있으며 특히 전방의 지질변화에 대한 대응능력이 낮은 TBM 굴착시 매우 유용할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Nord, G., Olsson P. & By T. L., 1992, Probing ahead of TBM by Geophysical Means : Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 7, NO. 3, pp237-242.
2. Sattel, G., Frey, P. & Amberg, R., 1992, Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Swizerland : First Break, Vol. 10, NO. 1, pp19-25.
3. Goodman, R.E., 1989, Introduction to Rock Mechanics : John Wiley & Sons.
4. Deregoeski, S. M., 1986, What is DMO? : First Break, Vol, 4. NO. 7, pp7-24.
5. Hale, Dave, 1991, Dip Moveout Processing : Society of Exploration Geophysicists, Tulsa,
6. Yilmaz, , 1987, Seismic Data Processing : Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.