

# 대심도 탄성과 토모그래피 탐사를 이용한 암반분류

## Rock Quality using Seismic Tomography in Deep Tunnel Depths

구자갑\* · 김영덕\*\* · 권소진\*\*\*

Koo, Ja-Kab · Kim, Young-Duck · Kwon, So-Jin

### Abstract

In tunnel design, geotechnical survey of over 200m tunnel depth is required because of its characteristic topography. For this reason, there are difficulties in collecting information of basic data in tunnel design because of large-scale costs in borehole tests, of limits to a geotechnical analysis by the existing refraction seismic survey and of analytical errors in steep mountainous area. Seismic tomography has many advantages as follows; 1) seismic velocity as absolute value is more reliable than electrical resistivity, 2) geotechnical analysis in deep tunnel depth is available by seismic velocity, 3) analytical errors is reduced in steep mountainous area. In this paper, it was found out a correlation of seismic velocity and Q in tunnel design in the neighborhood of the National Capital region and the reduction effect of tunnel construction cost using reliable rock quality by seismic tomography compared with by borehole data and electricity resistivity data.

**Keywords** : Seismic Tomography, RMR, Rock Quality, Seismic Velocity

### 요 지

본 연구에서는 수도권 근처의 터널설계시 대심도 탄성과 토모그래피 탐사에 의한 탄성과 속도와 Q 값과의 상관관계를 도출하고 이를 통한 정확한 암반분류로 공사비 절감효과에 대하여 고찰하였다. 터널전구간 지표면에서 탐사를 수행하여 대심도 구간의 자료를 얻어 암반분류를 수행하였으며, 이상대 구간에서는 VSP를 통한 자료를 추가하여 보다 상세한 자료를 얻어 신뢰성 향상을 얻을 수 있었다.

**주요어** : 대심도 탄성과 토모그래피 탐사, 암반등급, 암반분류, 탄성과 속도

\* 한경대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 현대산업개발(주) 토목설계팀 대리

\*\*\* 정희원 · 현대산업개발(주) 토목설계팀 부장

## 1. 서론

도로 및 철도터널 등의 설계에서 터널구간에 대한 암반 등급은 지보형식의 결정에 큰 영향을 미친다. 이런 터널의 암반등급을 위한 방법은 터널 입출구부의 시추조사를 통해 얻어진 육안관찰 및 계측, 점하중강도 시험 등의 암석시험, 시추공 영상촬영 등의 원위치시험 등을 통해 얻은 정보를 바탕으로 RQD, RMR 및 Q값을 산정하여 결정된다. 여기서 얻어진 자료로부터 터널전구간에 대해서 암반등급을 추정하였다. 이에 보다 정확한 암반분류를 위해 터널 여러 구간에서 시추조사를 하여 자료의 수를 늘려 구간별 암반 등급을 결정하였으나 여전히 미시추구간에서는 암반분류의 신뢰성이 결여되어 있었다. 미시추구간에서의 암반등급의 신뢰성을 높이기 위해 전기비저항과 탄성과 속도를 이용한 암반분류하는 방법이 사용되었다. 그러나, 우리나라 대부분의 대형 터널설계를 위해서는 그 지형 특성상 주로 지표면 하부 200여m 이상의 대심도 지반탐사가 필요하다.

이를 해결하기 위해서는 시추조사에 막대한 비용이 소요되며, 기존 굴절법 탄성과탐사로는 대심도 지반해석에 한계가 있으며, 경사가 급한 산악 지형에는 해석상의 오차도 발생하여 터널설계시 기초자료 확보에 어려움이 있었다. 그러나, "대심도 탄성과 토모그래피 탐사"를 이용하면, 절대값인 탄성과 속도를 이용하므로 전기비저항치를 이용하는 경우보다 신뢰성 높고, 탄성과에 의한 대심도 지반해석이 가능하고, 아울러 경사가 심한 지형에 의한 해석 오차도 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 수도권 근처의 터널설계시 조사방법에 따른 암반분류결과를 고찰하였고 대심도 탄성과 토모그래피 탐사에 의한 탄성과 속도와 Q 값과의 상관관계를 도출하였다. 또한 각 조사방법별 암반분류결과를 이용하여 공사비를 비교하여 본 연구에서 사용한 탐사방법에 의한 공사비 절감효과에 대하여 고찰하였다.

## 2. 시험 및 탐사방법

### 2.1 탐사장비

시험에 사용된 탐사장비로는 발전, 수신장치, 자료수집 장비로 구성되어 있으며 그림 1과 같으며 그림 2는 탐사전경을 보여주고 있다. 실험에 사용된 발전장치로는 전기식

뇌관과 Dynamite를 사용하였으며, 데이터를 수신하는 장치로는 지표수진을 위하여 OYO사에서 제작한 Geophones을, 시추공내 수신을 위해서는 GeoSpace사에서 제작한 Hydrophones을 이용하였으며 OYO사에서 제작한 McSeis SX로 제어하였다. 자료의 수집을 위한 장비로 Trigger System (OYO사), SeisImager, SeisREFA (OYO사)를 사용하였다.



그림 1. 탐사장비



그림 2. 탐사전경

### 2.2 대심도 탄성과 토모그래피 탐사

아래 그림 3과 같이 ○○ 현장 터널 심도 하부에서 고성능 발전·수진으로 요구되는 터널 계획심도를 직접 통과하

는 자료를 획득하여, 굴절과 이외에도 암반 내로 직접 전달되는 직접파를 토모그래피적 해석에 적용하여 대심도 혹은 요철이 심한 지형에서 터널 하부까지 지반정수를 계산하는 방법을 사용하였다. 터널탐사를 위한 축선전개로 지표면에는 탐사구간 전구간에 대하여 지오폰을 10m 간격으로 종단을 따라 설치하고, 시추공에는 하이드로폰을 심도에 따라 5m 간격으로 삽입 설치하였다. 지표면 수진을 위해 대심도 수진시에는 지오폰을 10m 간격으로, VSP(Vertical Seismic Profiling) 수진시에는 지오폰을 6m 간격으로 설치하고, 시추공에서 수진시에는 하이드로폰을 심도에 따라 5m 간격으로 삽입 설치하였다. 사용된 탄성과 진원으로는 다이내마이트 및 전기식 뇌관을 사용하였고, 지표 및 시추공내에서 발진을 시행하였다. 지표 발진은 대심도 구간을 위해 종단을 따라 50m 간격으로 하였으며, 시추공 발진은 시추공내에서 10m~50m 간격으로 하였고 VSP를 위해 시추공내에서 2m 간격으로 발진을 시행하였다. 이러한 탐사 모식도를 그린 것이 그림 3이다.

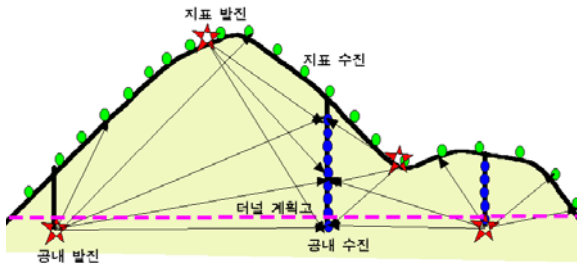


그림 3. 대심도 토모그래피 탐사 모식도

이러한 탐사의 해석방법으로는 고밀도 토모그래피법을 사용하였다. 대심도 탄성과 토모그래피와 기존 굴절법과의 차이점은 표 1과 같이 진원이 지표 및 시추공내의 2차원 배치로 요철이 심한 지형에서도 보정이 가능하며 결과 단면은 2차원 등속도선 단면도로 연속적 속도분포로 도사가 가능하며 가탐심도는 500m 이상으로 터널 지반고에서 획득한 자료를 이용하여 토모그래피 역해석을 수행하는 장점이 있다.

표 1. 기존굴절법과 비교

비교항목	기존 굴절법	대심도 토모그래피
진원 및 수신점 배치	지표면 (1차원 배치)	지표 및 시추공내 (2차원 배치)
해석 기법	굴절법	토모그래피 역해석
지형의 보정	요철이 심하면 오차 커짐	요철이 심한 지형도 보정 가능
결과 단면	지층별 평균속도 및 층경계선 (3~5개로 구분)	2차원 등속도선 단면도 (연속적 속도분포 이용 가능)
가탐 심도	100 m 내외	500 m 이상
터널 지반고의 지반 해석	터널상부 지표면의 자료로 간접 해석	터널 지반고에서 획득한 자료로 직접 해석

## 2.3 탄성과 토모그래피 해석

### 2.3.1 원리 및 탐사방법

탄성과 토모그래피 탐사는 그림 4와 같이 탄성과의 투과 현상을 이용하여 지질특성을 파악하는 것으로 발진장치에서 탄성파를 발생시킨 후, 매질을 통해 전파되어 온 탄성파를 수신장치에서 측정하여 파의 전파시간 및 파형특성 고찰을 통해 매질내의 탄성과 속도 분포 단면을 획득한다. 이 획득된 초동주시 역산으로부터 토모그램을 작성하고, 각 파형의 진폭 및 주파수 특성 고찰을 통해 최종적인 해석단면을 작성한다.

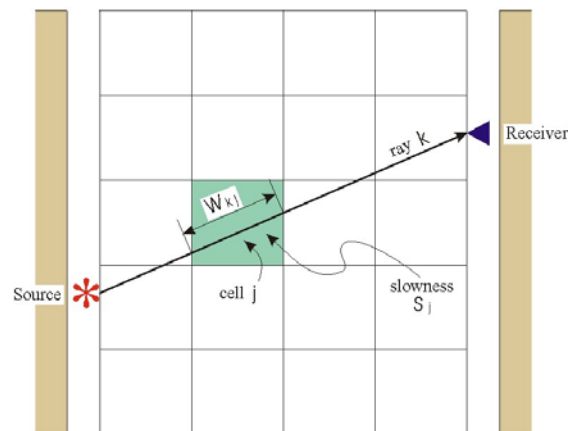


그림 4. 역산원리

### 2.3.2 해석방법

탄성과 토모그래피 중 속도 inversion의 해석은 먼저 개정, 진원, 수신점의 위치배열도를 작성한 후 조사 지역을 격자상에 구획한다. 이 때 격자 크기는 조사 지역의 크기와 파선수에 따라 적절히 조절한다. 각 진원과 수신점에 대해서 초동 주시를 읽어 계산기에 초동의 값, 진원 및 수신점 위치등의 데이터를 입력한다. 추기의 속도 모델을 결정한 후 이론주시를 계산한다. 이론주시를 직선 파선 또는 15~20% 이상의 속도 contrast가 있을 때에는 곡선 파선에 의해 모든 진원과 수신점의 짝에 대해서 계산하여야 한다. 이론주시와 관측주시를 비교하여 이론주시와 관측주시의 차이가 허용 범위에 들어가면 계산을 종료하고 범위를 벗어나면 속도모델을 수정한다. 얻어진 속도치를 표시할 때 각 격자의 속도치를 color 표시, 농담(濃淡) 표시 또는 contour 표시에 의해 나타낸다. 얻어진 계산 결과에 파선의 밀도 등을 대조해서 계산 결과를 평가한다. 이런 속도처리 흐름도는 그림5와 같다.

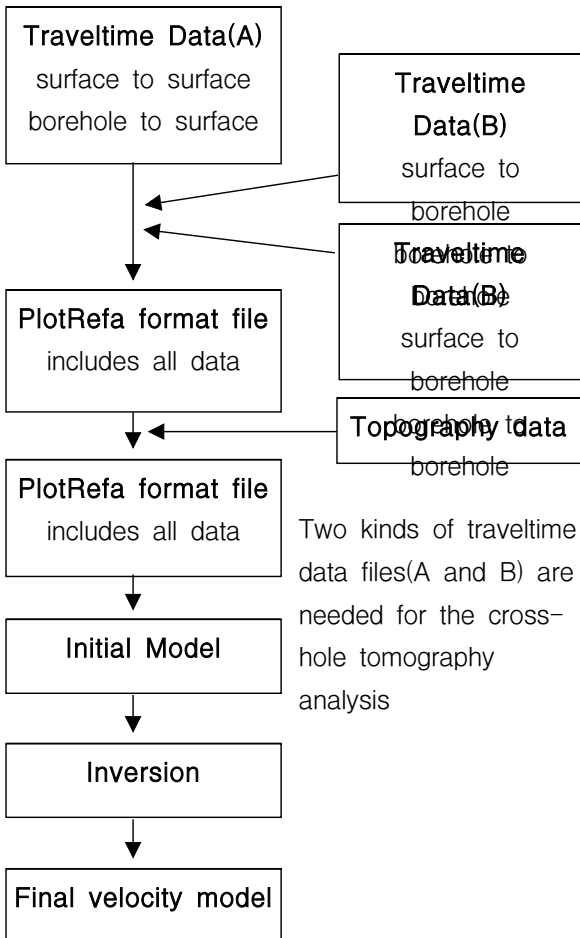


그림 5. 처리 흐름도

### 2.3.3 전기비저항 탐사와 비교

전기비저항탐사의 경우 전위차를 측정하여 지하의 전기비저항 분포를 파악하는 방법으로서 전기비저항값은 상대적인 값으로서 터널설계시 암반분류를 목적으로 하는 경우 전기비저항에 미치는 영향요소를 고려하여야 하며 이로 인한 상대적인 값을 나타낸다. 전기비저항에 미치는 영향요소는 암석의 종류, 즉 광물구성, 조직등에 의하여 비저항치의 차이가 발생하며, 암반의 물성에 의한 영향 요소로는 공극률, 함수비, 비중, 포화도, 투수계수, 온도 등이 있다. 이에 비해 탄성과탐사는 Sjuren(1979)에 의해 100km 이상의 굴절법탄성과탐사와 약 3km의 시추코어를 분석한 결과 RQD나 절리밀도와와의 상관관계보다 Q값과의 상관관계가 양호함을 입증하였다. 또한, Barton(1995)은 노르웨이, 홍콩, 중국 등의 다양한 지반조건을 대상으로 연구한 결과 탄성과속도에 영향을 미치는 인자를 터널심도(초기응력), 공극률, 포화도, 압축강도 등으로 설정하여 그 관계를 규명하였다. 탄성과속도에 영향을 미치는 다각적인 검토가 있었으나 궁극적으로는 암질을 대표적으로 표현하는 Q값과의 관계로 귀결되었다. 본 연구에서는 대심도 탄성과 토모그래피의 탄성과 속도( $V_p$ )를 사용하여 전기비저항에 비하여 탐사결과에 영향을 미치는 요소가 작아 암반분류의 신뢰성을 높일 수 있다.

## 3. 시험 및 탐사결과

### 3.1 지형조건

본 연구는 수도권 근처 ○○ 현장 터널설계를 위해 대심도 탄성과 토모그래피 탐사를 수행하였다. 그림 6과 같이 지질조건으로는 선캠브리아기의 경기편마암 복합체가 넓게 분포하며 시대미상의 산성암맥이 단층선을 따라 관입 발달하고 있다. 편마암 복합체는 호상흑운모 편마암, 화강암질 편마암, 석영장석질 편마암등이 표 2와 같은 점유율로 분포하고 있다. 3개의 대단층과 9개의 소단층이 발달하고 있으며 터널구간에는 5개의 소단층이 표 3과 같이 발달하여 있다.

표 2. 노선 암종점유율

암종	점유율(%)
제4기층	35.9
호상흑운모편마암	23.4
화강암질편마암	24.8
석영장석질편마암	15.9

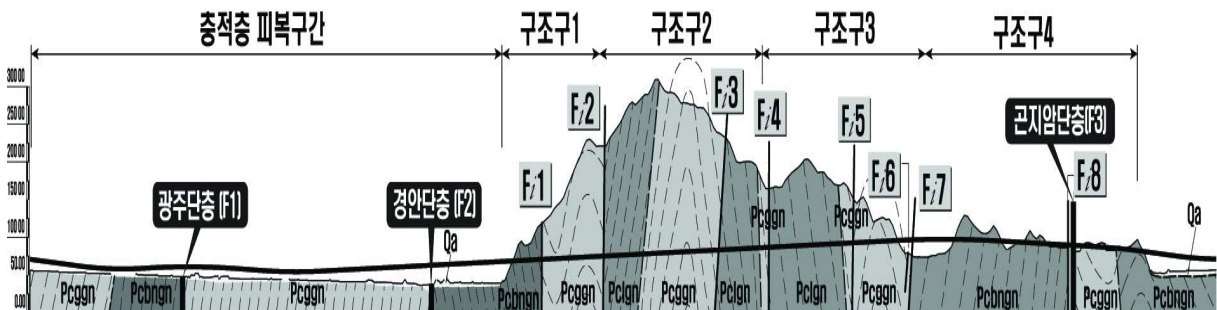
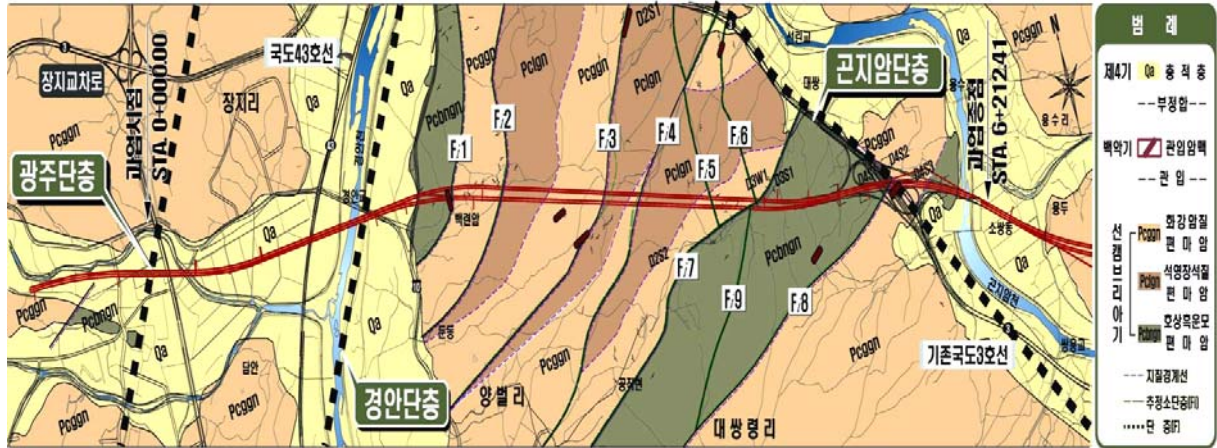


그림 6. 지질현황

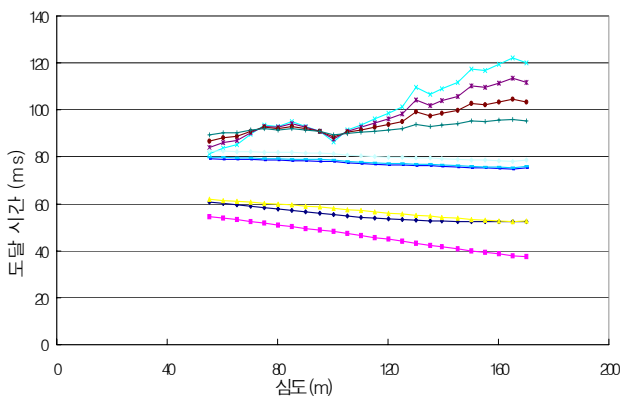
표 3. 터널구간내 단층 현황

단층	주향/경사	조사지점	기재사항	비고
Fi1	N30E /89NW	백련암 뒤편 임간도로	· 단층파쇄대의 폭 2~4m · 단층파쇄대에 따라 남북방향 관입암맥 발달 · 호상흑운모편마암과 석영장석질편마암	터널 입구부
Fi2	N40E /87NW	계곡발달	· 화강암질편마암과 석영장석질편마암	터널 중간부
Fi3	N55E /80NW	289ML고지, 북부연장부 경안고개	· 단층파쇄대의 폭 1~3m, 단층각력노두 · 단층파쇄대 따라 폭 약 3m로 암맥관입 · 화강암질편마암과 석영장석질편마암	터널 중간부
Fi4	N50E /89NW	246ML고지, 노두 미확인, 시추공 TB-9 일부확인	· 단층파쇄대의 폭 1~2m · 능선부에 단층각력 · 화강암질편마암과 석영장석질편마암	터널 중간부
Fi5	N5E /89NW	3번 국도변 공장부지 절개면	· 단층파쇄대의 폭 2~4m, 석영맥 관입 · 단층은 폭 0.1~0.3m로 3개조가 발달	터널 출구부

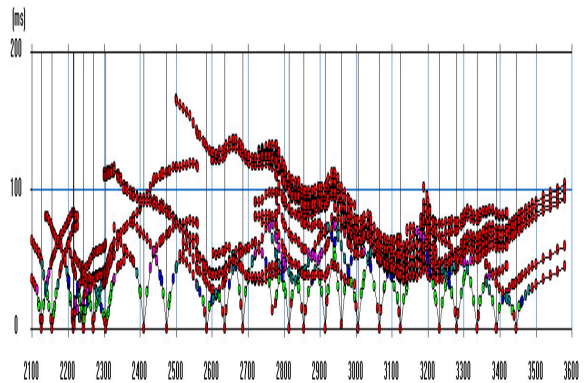
### 3.2 대심도 탄성과 토모그래피 탐사결과

본 연구에서 사용한 토모그래피법은 해석 대상을 유한요소로 세분하여 계산한다. 따라서 기존 굴절법 해석과 달리 완전한 2차원적 해석이므로 급격한 지형 및 층변화에 대한 해석이 가능하다. 또한 그림 7과 같이 공내에서 발진·수진되는 암반내의 직접 전달파, 요철이 심한 지형에서 굴절파보다 빨리 도달되는 직접 전달파 등을 해석에 적용하므로 정확도, 해상도 면에서 한차원 높은 결과를 도출한다.

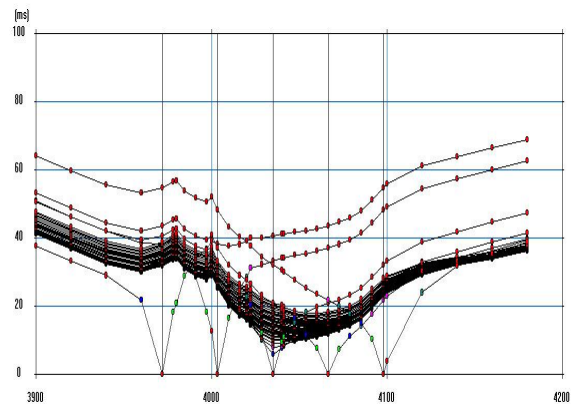
기진점으로부터 수신점까지 탄성파가 통과하는 최소 경로를 반복 연산에 의해 구하면서 각 요소의 탄성과 속도를 결정한다. 이러한 과정을 통해서 얻은 결과는 각 요소에 대한 탄성과 속도이므로, 이들을 이용하여 2차원 단면에 대한 속도 분포도를 칼리로 작성할 수 있다. 기존 굴절법은 층별 평균속도만 계산되므로 원하는 구간의 설계정수를 세분하여 나눌 수 없으나, 본 대심도 탄성과 토모그래피 방법은 구간별 설계정수를 연속적으로 얻을 수 있어 지보패턴 결정 등에 매우 유리하다. 그림 8과 표 4와 같이 탐사결과에 의하면 터널구간내의 6개의 이상대를 분석할 수 있었다. 2+800~3+300 구간은 중심부의 탄성과 속도가 빠르고 좌우 탄성과 속도가 상대적으로 낮은 배사 습곡 형태의 구조를 보이고 있다. 또한 2+300~2+750, 3+200~3+800 구간은 지표면과 터널계획고 사이에 연암에 가까운 탄성과속도를 보이는 지층이 협재되어 있는 양상이나, 이는 대부분 터널 계획 심도 상부에 분포하며, 터널 계획심도에서는 대부분 보통암 이상의 암질을 보이고 있다.



(a) 공내 발파 공내 수신 데이터



(b) 지표 수신 XT 데이터(대심도)



(c) 지표 수신 XT 데이터(VSP)

그림 7. 공내 수신 XT 데이터

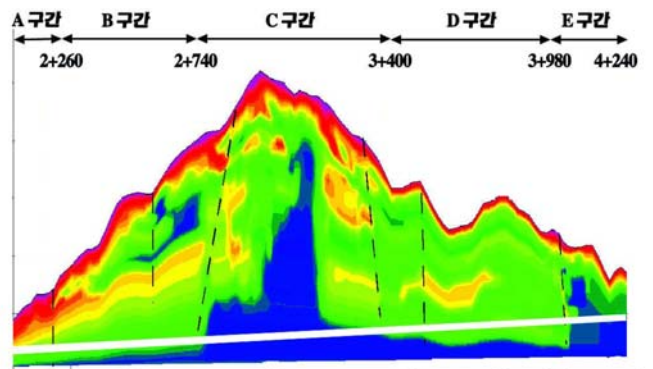
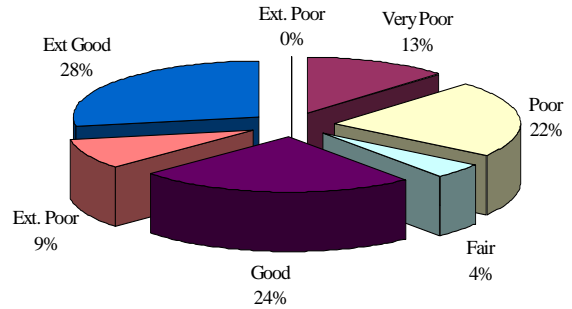


그림 8. 탄성과 토모그래피 탐사 결과 단면도

표 4. 탐사결과에 의한 이상대 분석(지표면 기준)

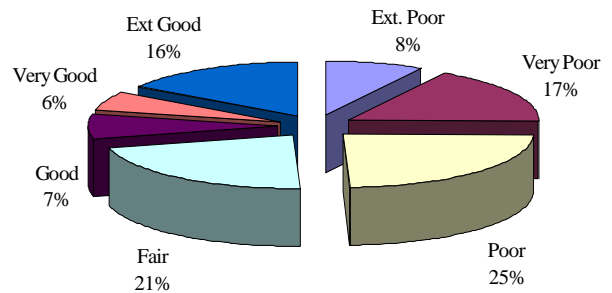
이상대 위치 (STA.)	이상대 분석
2+230	상부 풍화대 층후 변화
2+590	상부층에 탄성과 속도 변화
2+870	지층구조 변화
3+320	지층구조 변화
3+620	보통암층 경암층내에 협재 변화
4+010	저속도층 분포 및 탄성과속도변화(VSP)



터널계획심도

### 3.3 상관관계 분석

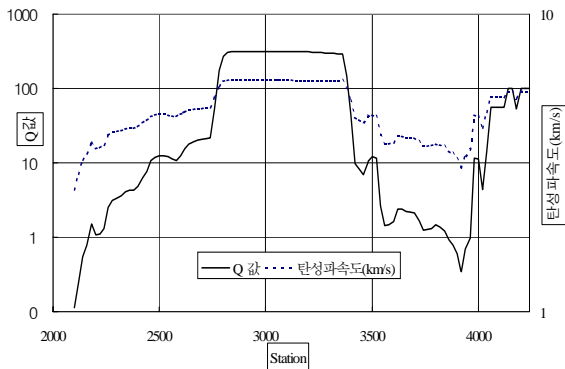
대심도 탄성과 토모그래피 탐사에 의하여 얻어진 결과로부터 터널 계획심도와 1.5D에 있는 격자의 탄성과 속도와 Barton에 의해 제안된 상관식으로부터 얻어진 Q값의 분포와 암반등급 분류 분포결과를 그림 9에 제시하였다. 터널계획심도에서의 암반분류결과 poor 이하가 전체중의 35%의 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.



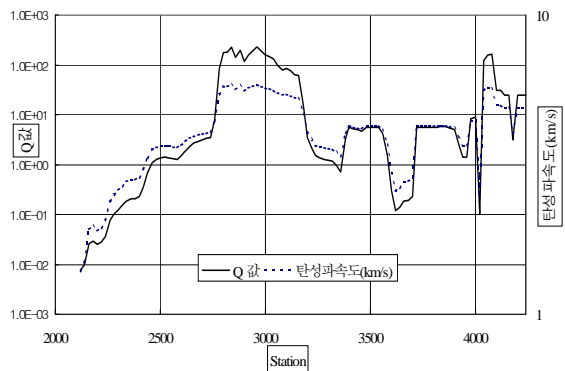
터널계획심도 1.5D

(b) 암반 등급 분류

그림 9. 터널계획심도 부근의 탄성과 속도 및 Barton식에 의한 Q값



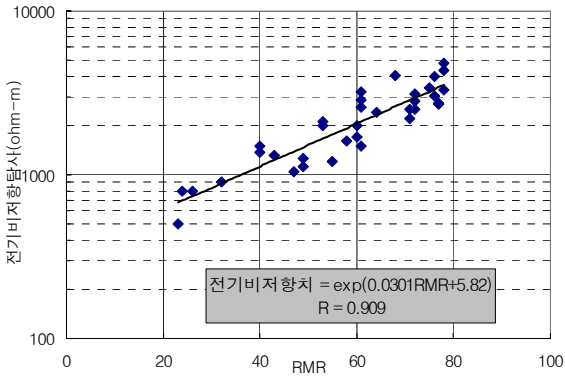
터널계획심도



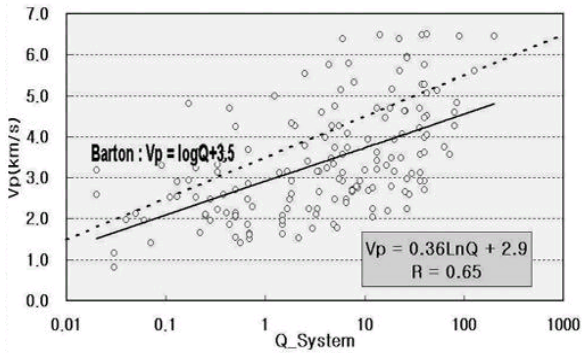
터널계획심도 1.5D

(a) 탄성과 속도 및 Q값

하나의 시추공에서 추정된 RMR과 전기비저항탐사에서 얻어진 결과에 대한 상관관계와 그림 8에서 얻어진 터널계획심도의 탄성과 속도와 같은 심도에 있는 시추코어를 대상으로 산정한 Q값의 상관관계는 그림 10과 표 5와 같이 나타났다. 전기비저항 상관관계에서 심도에 따른 영향을 고려하여 50m를 기준으로 하여 50m이상의 심도에 대하여 시추공 하나에서 얻어진 RMR과 전기비저항치의 상관관계를 산출하여 상관도 0.909의 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 대심도 탄성과 토모그래피 상관관계에서는 터널 전구간에서 시추조사한 자료의 Q값과 탄성과속도를 사용하여 상관관계가 비교적 넓게 분포하나 상관도 0.65로 비교적 좋은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다. 얻어진 상관관계를 이용하여 전기비저항치와 탄성과 속도에 대한 암반등급을 정하고 전기비저항치와 탄성과 속도로부터 미시추구간의 터널 암반분류를 수행하였다.



(a) 전기비저항 탐사 결과(50m 이상 심도)



(b) 대심도 탄성과 토모그래피 탐사 결과  
그림 10. 상관관계 비교

표 5. 암반등급

암반등급	I 등급	II 등급	III 등급	IV 등급	V 등급
전기비저항값 (ohm-m) 50m미만	2,600 이상	1,600~ 2,600	1,000~ 1,600	600~ 1,000	600 이하
전기비저항값 (ohm-m) 50m이상	3,000 이상	1,900~ 3,000	1,200~ 1,900	750~ 1,200	750 이하
상관식	$R = \exp(0.022RMR + 6.08) : 50m \text{ 미만}$ $R = \exp(0.0301RMR + 5.82) : 50m \text{ 이상}$				

암반등급	I 등급	II 등급	III 등급	IV 등급	V 등급
탄성과속도 (km/s)	4.6 이상	3.7~4.6	2.9~3.7	2.1~2.9	2.1 이하
상관식	$V_p = 0.36 \ln Q + 2.9$				

또한, 본 연구에서 그림 11과 같이 대심도 탄성과 토모그래피 탐사법에 의한 탄성과 속도와 Q값과의 상관관계로부터 암반분류를 수행한 결과와 터널 시추공에 의한 RMR 암반분류와 RMR-전기비저항 상관관계를 이용한 암반분류 방법에 의한 결과를 비교하였다. 공사비 비교를 위해 각 암반분류방법에 의한 지보패턴을 터널구간에 적용하여 전체 공사비를 터널연장대비하여 공사비단가를 기준으로 하였다. 시추공에 의한 암반분류의 경우 자료의 부족으로 지보패턴을 안전측으로 선정하여 터널공사비를 산출하였고, 전기비저항에 의한 암반분류의 경우 미시추구간의 자료를 전기비저항과 시추자료의 상관관계로 지보패턴을 평가하여 터널공사비를 산출하였다. 본 연구대상지역에서는 대심도 탄성과 토모그래피 방법이 절대값인 탄성과속도를 이용하므로 전기비저항치를 이용하는 경우보다 신뢰성 높은 암반분류 결과를 주어 표 6과 같은 공사비의 절감효과를 산출하였다.

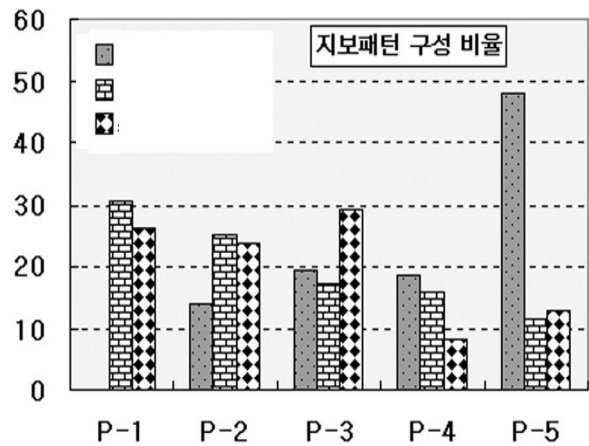


그림 11. 암반분류방법에 따른 지보패턴

표 6. 암반분류법에 따른 터널공사비 비교

암반분류법	단가 (만원/m)	비고
시추공	3,557	
전기비저항	2,256	
대심도 탄성과 토모그래피	2,112	



#### 4. 결 론

기존의 터널 설계에서는 터널 입·출구부의 시추공으로부터 얻은 자료로부터 터널 전체의 미시추구간에 대하여 유추하였다. 이를 보강하기 위해 터널구간에 여러 곳에 시추를 수행하여 보다 많은 자료를 획득하였다. 또한, 미시추구간에 대하여 전기비저항 탐사를 수행하여 시추공의 RMR값과 전기비저항치의 상관관계를 이용하여 미시추구간의 암반등급을 추정하였다. 본 연구에서는 암석의 종류(광물구성, 조직 등)와 암반의 물성에 의한 영향 요소(공극률, 함수비, 비중, 포화도, 투수계수, 온도 등)에 영향을 받는 전기비저항치 대신에 절대값인 탄성과 속도( $V_p$ )를

사용하여 대심도 탄성과 토모그래피 탐사를 시행하여 신뢰성이 높은 암반분류 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 대심도 탄성과 토모그래피 탐사는 탄성과에 의한 대심도 지반해석이 가능하고, 경사가 심한 지형에 의한 해석 오차도 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구대상지역에서는 신뢰성 높은 암반분류 결과를 통해 터널공사비에서 시추공, 전기비저항 탐사와 비교하여 공사비의 절감효과를 산출할 수 있었다. 추후 터널시공시 터널 막장면에서 Face mapping을 수행하여 본 탄성과 토모그래피 탐사에 의한 암반분류와 비교 검토하여 보다 정확한 탐사기법에 대한 보완 및 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2002. 1. 22)

#### 참 고 문 헌

1. 김형수(1999), 전기비저항탐사, 대한지구물리학회 단기 강좌 교육 교재, 대한지구물리학회.
2. Barton, N.(1995), Permanent Support for Tunnels using NMT, Korean Rock Mechanics Society, Seoul in March, pp. 1~26.
3. Kwon, H. S., Synn, J. H., Hwang, S. H., Bae, H. J., Kim, K. S. and Kim, J. S.(2001), A Study on the Correlation of Resistivity and Rock Quality, Spring Conference of Korean Geotechnical Society, pp. 81~88.
4. Gokhale, C. S. & Kate, 1997, J. M., Tunneling Asia, 1997 Proceeding, pp. 11~22.