

# 전기비저항 및 탄성파속도를 이용한 터널암반의 정량적 평가수법과 적용성

## A tunnel rock mass classification technique and its applicability using electrical resistivity and seismic wave velocity

박삼규\*<sup>1</sup>, 김정호<sup>2</sup>, 조성준<sup>1</sup>, 이명종<sup>1</sup>, 손정술<sup>1</sup>

Park, Sam-Gyu · Kim, Jung-Ho · Cho, Seong-Jun · Yi, Myeong-Jong · Son, Jeong-Sul

### Abstract

Electrical resistivity prospecting has been recently increased in the application to tunnel, landslide and other investigations in the civil engineering field. Therefore, it is essential to establish the rock mass classification technique using electrical resistivity data. In this paper, the authors, try to propose a technique which can classify tunnel rock mass using seismic wave velocities derived from electrical resistivity data. In addition, the applicability of the proposed tunnel rock mass classification technique is discussed, by comparing estimated support patterns with actually performed ones.

**Keywords:** Electrical resistivity, seismic wave velocity, tunnel, rock mass classification

### 요 지

최근 산악터널의 지반조사에 전기 및 전자탐사를 실시하는 사례가 증가하고 있으며 지반의 전기비저항을 이용한 터널지반의 정량적 평가수법의 필요성이 요구되고 있다. 따라서 본 논문은 암석의 전기비저항과 탄성파속도가 각각 암석의 공극율과 밀접한 관계가 있는 것을 이용하여 지반의 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산하는 수법을 제안한다. 또 이 수법을 이용하여 실제터널에 있어서 지반의 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산하여 암반분류를 행하여 지보패턴을 설정하고 이를 실제 터널시공에 있어서 설정한 지보패턴과 비교함으로써 그 적용성을 검토한다.

**주요어:** 전기비저항, 탄성파속도, 터널, 암반분류

## 1. 서론

산악터널의 사전지반조사로서는 지표지질조사, 지구물리탐사 및 시추조사 등이 일반적으로 실시되고 있다.

이 중에서 지구물리탐사는 주로 탄성파탐사 굴절법과 전기 전자탐사가 실시되고 있는데 최근 물리탐사법이 컴퓨터 및 전자기기의 발달에 힘입어 짧은 시간에 다량의 데이터를 취득할 수 있을 뿐만 아니라 신뢰성 높은 해

\*1 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (samgyu@kigam.re.kr)

2 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

석결과를 얻을 수 있게 되었다. 또 지반가시화 기술이 도입되면서 탐사결과를 2차원 혹은 3차원으로 도시할 수 있어 지질구조 및 지하수의 분포상태 등을 보다 정확하게 파악할 수 있게 되어 토목·건축분야의 지반조사에 널리 이용되고 있다.

터널의 경우 설계단계에 있어서 암반등급은 암질조건, 지하수상태, 절리 등을 고려하여 결정하는 경우가 많고, 대부분 시추코어의 암질상태에 의존하여 정량적으로 평가하고 있는 실정이다. 따라서 복잡한 지질구조가 분포하는 터널의 경우 갱도의 전 구간에 걸쳐 암질의 상태 및 지질연약대가 암반등급에 반영되기 어렵고, 실제 터널 시공시 암질의 상태가 착공전의 예상과는 달라 시공 단계에 있어서 지보패턴 및 시공법을 변경해야 하는 경우가 있다.

따라서 본 논문은 이러한 문제점을 해결하는 방법의 하나로 사전지반조사로서 실시하고 있는 전기비저항탐사 및 탄성파탐사 결과를 이용하여 터널 암반의 정량적 평가수법을 제안한다. 정량적 평가수법은 암석의 전기비저항과 탄성파속도가 공극율과 밀접한 관계가 있는 것을 이용하여 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산할 수 있는 경험식을 유도하고, 이 경험식을 바탕으로 실제 터널지반에서 실시한 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산하고, 환산탄성파속도로부터 터널 암반분류를 시도하여 실제 지보패턴과 비교함으로써 그 적용성을 검토한다.

## 2. 암석의 전기비저항

암석의 전기비저항은 공극률, 포화도, 공극수의 전기비저항 (전기전도도의 역수), 점토함유량 등에 의해서 좌우된다. 일반적으로 불포화 암석에서는 전기비저항이 포화도에 의해서 크게 좌우되며, 포화암석에서는 공극율과 공극수의 전기비저항에 의해서 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다.

Table 1은 암석의 전기비저항에 영향을 미치는 요인과 그 정도를 표시한 것이다. 신선한 암반은 공극율과 점토함유량이 적기 때문에 대체적으로 전기비저항이 높게 나타난다. 반면 단층 파쇄대 및 절리 등이 발달한 암반과 풍화작용이 진행될수록 공극율과 점토함유량이 많아지기 때문에 포화암반에서는 전기비저항을 저하시키는 역할을 한다. 한편, 공극수의 전기비저항은 지하수의 전기비저항과 거의 대등하며 암종 및 생성환경, 풍화정도에 따라 다르지만 일반적으로 지하수의 전기비저항은 10~200 $\Omega$ m의 범위에 속한다. 해저 퇴적환경에서 생성된 퇴적암 및 해수침투지역과 같이 공극수의 전기비저항이 해수정도로 낮은 경우에는 암석의 전기비저항은 공극수의 전기비저항에 큰 영향을 받는다.

Fig. 1은 토목 및 건축분야의 지반조사로 실시된 전기비저항탐사 결과로부터 얻은 암석 및 토양의 전기비저항 분포범위를 나타낸 것이다. 동일한 암석 및 토양이라도 전기비저항은 넓은 분포 범위를 나타내고 있는데 이러한 이유는 Table 1에 표시한 여러 가지 물성요인들이 복합적으로 작용하기 때문으로 생각된다. 예를 들면 산사태

Table 1. Influencing factors and degree of the resistivity of rock

Influencing factors		Influencing degree		Geological conditions of rock mass
		Low resistivity -----	High resistivity	
Porosity	Saturated condition	Large -----	Small	Weathered and fault fractured zones
	Unsaturated condition	Small -----	Large	
Pore fluid resistivity (Resistivity of groundwater)		Low -----	High	Components of groundwater
Water saturation		Large -----	Small	Groundwater table
Water content by volume (Porosity and water saturation)		Large -----	Small	Weathered and fault fractured zone
Clay content		Much -----	Little	Weathered and altered zones

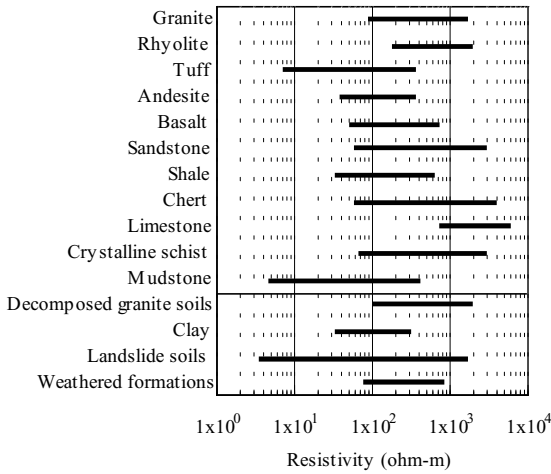


Fig. 1 Distribution of resistivity for rock and soil formations

지에서 측정된 토양의 전기비저항은 4~1,500Ωm의 범위로 분포하고 있다. 저비저항을 나타내고 있는 산사태지의 토양은 점토분이 많고 포화상태일 것으로 추측되며, 반면 고비저항을 나타내고 있는 경우는 지표부근의 불포화 상태일 것으로 추측된다. 암석의 경우는 거의 100~1,000Ωm 사이에 분포하고 있으며 석회암, 처트 및 사암은 비교적 높은 전기비저항을 나타내고 있는 반면 이암, 응회암 및 셰일 등은 낮은 전기비저항을 나타내고 있다. 토양의 경우는 화강암의 풍화도와 같은 석영을 많이 포함하고 있는 경우와 지표부근의 불포화 토양에서는 비교적 전기비저항이 높고, 점토 분을 많이 포함하고 있는 포화토양 일수록 전기비저항은 낮게 나타나고 있다.

## 2.1 전기비저항 측정시스템

암석의 전기비저항에 미치는 물성요인과 이들의 상호 관계를 밝히기 위하여 화강암공시체를 이용하여 전기비저항을 측정하였다. Table 2는 전기비저항 측정에 사용한 공시체의 형상, 크기, 밀도 및 공극률을 표시한 것이다. 공시체의 공극률 ( $n$ )과 밀도 ( $\gamma$ )는 아래 식 (1)과 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{W_a}{W_a - W_w} \quad (1)$$

$$n = \frac{W_a - W_d}{W_a - W_w} \quad (2)$$

여기서,  $W_a$ 와  $W_w$ 는 강제 흡윤 상태에서의 공기 중 무게와 수중 무게이고,  $W_d$ 는 강제 건조상태에서의 무게를 나타내고 있다. 강제 흡윤 상태는 진공 데시케이터 내의 물에 공시체를 넣어 72시간 이상 진공펌프로 흡입하여 강제로 공극을 포화시킨 상태이고, 강제 건조상태는 110℃의 건조로 내에서 48시간 이상 가열 건조시킨 상태를 말한다.

암석 공시체의 전기비저항을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 전기비저항 측정 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 크게 송신부 (function generator), 신호조정부 (signal conditioner), 자료처리부 (data processor), 측정용기 (specimen holder)로 구성되어 있다. 측정용기는 Fig. 3과 같이 절연체의 아크릴을 사용하여 6면체로 만들었으며 공시체는 양쪽의 스프링들을 이용하여 고정

Table 2. Descriptions of granite specimen

Specimens	Shape	Diameter (cm)	Length (cm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
A	Cylindrical	4.77	9.76	2.63	2.59
B	"	4.69	9.76	2.62	0.99
C	"	4.72	9.34	2.66	5.24
D	"	4.76	9.51	2.62	2.20
E	"	4.76	9.63	2.63	1.23
F	"	4.75	9.75	2.68	3.81
G	"	4.76	9.62	2.63	2.03
H	"	4.75	9.10	2.61	2.58

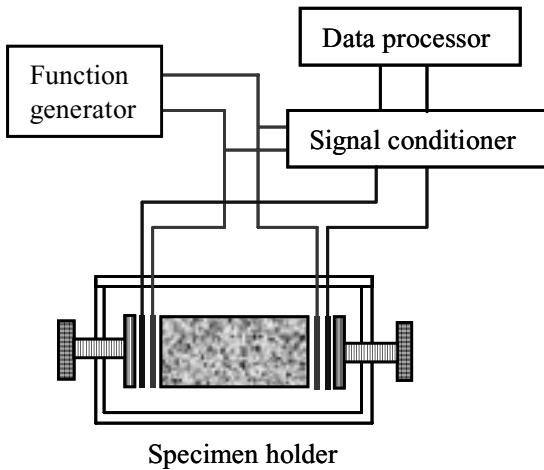


Fig. 2 Resistivity measurement system

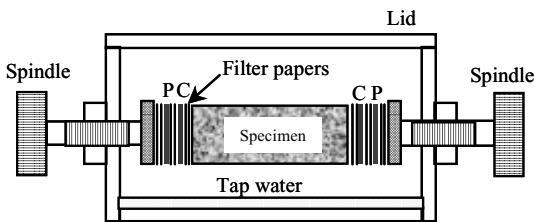


Fig. 3 Schematic view of specimen holder. C and P are current and potential electrodes, respectively (Park and Matsui, 1998)

시킬 수 있게 하였다. 전기비저항을 측정할 때 공시체 양단의 전류 및 전위전극은 80mesh의 구리 망을 사용했으며, 전극과 공시체 사이에는 0.1N의 NaCl용액에 포화시킨 여과지를 삽입하였다. 또한 공시체의 전기비저항 측정 중 공시체 표면의 수분이 증발되지 않도록 하기 위하여 측정용기 바닥에 소량의 물을 부고 뚜껑을 닫아 공기 중에 수분이 포화상태를 유지하도록 하였다.

공시체의 전기비저항은 전류전극으로부터 공시체의 축 방향으로 평행하게 전류가 흘렀을 때 전위전극으로부터 전위차를 측정하여 아래 식 (3)으로부터 전기비저항을 산출하였다.

$$R = \frac{S}{L} \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 공시체의 전기비저항 ( $\Omega m$ ),  $S$ 는 공시체의 단면적 ( $cm^2$ ),  $L$ 은 공시체의 길이 ( $cm$ ),  $I$ 는 전류 ( $A$ )이고  $\Delta V$ 는 전위차 ( $V$ )를 나타낸다.

## 2.2 전기비저항 측정결과

Archie (1942)는 저류암의 물성을 평가하기 위하여 암석의 전기비저항  $R$ , 공극수의 전기비저항  $R_w$  및 공극률  $n$ 사이의 관계를 아래 식 (4)와 식 (5)로 나타내고 있다.

$$R = FRw \quad (4)$$

$$F = \frac{R}{Rw} = a n^{-m} \quad (5)$$

여기서,  $a$ 는 실험정수로서 경험적으로 0.6~3.5사이의 값을 가지며,  $m$ 은 고결계수 (cementation factor)로 공극의 기하학적 형태 및 고결의 정도에 따라서 다르지만, 일반적으로 1.4~2.2의 값을 가진다.  $F$ 는 지층비저항계수 (Formation factor)라고 불린다. Archie의 경험식은 석유를 배태하고 있는 다공질 사암 등을 대상으로 한 경험식으로 암석의 전기전도가 공극수에만 의존할 경우에 적용할 수 있다. 따라서 점토를 함유하고 있는 암석이나 지층에 대해서는 공극수 자체의 이온전도 외에 암석이나 지층에 함유되어 있는 미립의 점토분이 전기전도성 물질의 역할을 하기 때문에 Archie의 경험식을 적용하기에는 적합하지 않다 (Klein and Sill, 1982; Patnode and Wyllie, 1950).

한편 Bussian (1983)에 의하면 암석의 구성물질이 전기전도성을 가지고 있을 경우, 즉 세립분이나 점토를 함유하고 있을 때 아래와 같은 병렬회로 모델 (parallel resistances model)의 경험식을 제안하고 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{Rw} n^m + m \frac{1}{Rr} (1 - n^m) \quad (6)$$

여기서,  $R_r$ 은 암석구성물질의 전기비저항을 나타내고 있다. 이 경험식은 점토질 모래와 같은 토질에서 적용되어 왔지만, 최근 연구결과에 따르면 화강암과 같은 결정질 암석에도 적용할 수 있다는 사실이 검증되었다 (Park and Matsui, 1998).

Fig. 4는 실내에서 화강암 공시체를 이용하여 전기비

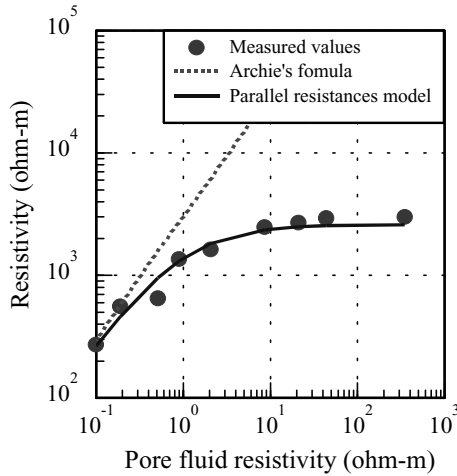


Fig. 4 Comparison between measured resistivity and calculated resistivity for granite

저항을 측정된 실측치와 Bussian의 경험식으로 구한 계산치를 비교한 것이다. 화강암 공시체는 농도가 다른 9종류의 NaCl용액을 이용하여 낮은 농도에서 높은 농도 순으로 공극을 완전히 포화시켜 전기비저항을 측정하였다. 측정결과에 의하면 공극수의 전기비저항이 증가함에 따라 화강암 공시체의 전기비저항 실측치는 증가하고 있지만, 공극수의 전기비저항이 100Ωm 이상의 범위에서는 실측치가 거의 일정하게 된다. 이것은 암석의 전기비저항은 공극수의 전기비저항이 낮은 영역에서는 공극수의 전기비저항에 큰 영향을 받고 있지만, 일반지하수의 전기비저항 영역 (10~200Ωm)에서는 암석구성물질의 영향을 크게 받고 있다는 것을 시사하고 있다. 전체적으로는 화강암 공시체의 실측치는 Bussian의 경험식으로 구한 계산치와 거의 일치하고 있으며, 이 결과로부터 Bussian의 경험식은 점토질 모래뿐만 아니라 결정질 암석에서도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 암석의 탄성파속도

Wyllie 등 (1956)에 의하면 포화된 암석의 탄성파속도  $V_p$ 는 다음 식 (7)로 표시된다.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-n)}{V_m} + \frac{n}{V_f} \tag{7}$$

여기서,  $V_m$ 은 암석구성물질의 탄성파속도,  $V_f$ 는 암석 내에 포함되어 있는 물의 탄성파속도,  $n$ 은 공극률을 나타낸다. Wyllie에 의한 경험식을 탄성파가 암석의 단위거리를 통과하는 시간  $t$ 로 변환하면 아래 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$t = n t_f + (1-n) t_m \tag{8}$$

여기서,  $t_f$ 는 탄성파가 암석 내에 포함되어 있는 물을 통과하는 시간,  $t_m$ 은 암석구성물질을 통과하는 시간을 나타낸다.

### 4. 환산 탄성파속도 산출방법

포화된 암석의 전기비저항과 탄성파속도는 각각 공극률에 밀접한 관계를 나타내고 있다. 이러한 사실을 이용하여 암석의 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산할 수 있는 식을 유도할 수 있다. 우선 식 (6)을 공극률에 대해서 정리하면 아래 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$n = \alpha (R)^{-1/m} - \beta (R)^{(m-1)/m} \tag{9}$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 관계식을 간략하게 하기 위하여 정리한 것으로 공극수의 전기비저항 ( $R_w$ ), 고결계수 ( $m$ ) 및 암석구성물질의 전기비저항 ( $R_r$ )으로 표시되고,  $\alpha = (R_w)^{1/m} R_r / (R_r - R_w)$ 이고,  $\beta = (R_w)^{1/m} (R_r - R_w)$ 이다.

공극률에 대해서 정리한 Bussian의 경험식 (9)를 Wyllie의 경험식 (8)에 대입하면 아래 식 (10)으로 표시할 수 있다.

$$t = A (R)^{-1/m} + B (R)^{m-1/m} + C \tag{10}$$

여기서,  $A = \alpha(t_f - t_m)$ ,  $B = \beta(t_m - t_f)$ ,  $C = t_m$ 이다. 이 식 (10)을 이용하여 암석의 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산할 수 있다.

## 5. 물리검층 자료에 의한 검증

심층 기초지질조사를 위하여 실시되었던 시추조사 및 물리검층 자료를 이용하여 제안한 수법을 검증하였다. 물리검층 중에 전기비저항검층은 2극법으로 2종류의 전극간격 (25-100cm, 50-100cm)을 이용하여 측정하였으며, 속도검층은 공내에 소형의 발전기와 두 개의 수신기가 설치된 존대를 삽입하고, 두 개의 수신기 사이에서

Table 3. Parameter conditions (Geophysical logging)

Parameters	Used values	
	Granite	Sedimentary rock
Intrinsic matrix velocity $V_m$ (km/s)	4.92	5.51
Water velocity $V_f$ (km/s)	1.5	1.5
Intrinsic matrix resistivity $R_r$ ( $\Omega m$ )	10,561	3,000
Water resistivity $R_w$ ( $\Omega m$ )	62	20
Cementation factor (m)	2.1	1.9

음파의 전파시간을 측정하여 속도를 구하는 방법을 이용했다.

대상구간은 지하수위 아래에 분포하는 화강암 지층과 퇴적암 지층을 선정하여 제안한 식 (10)을 이용하여 전기비저항검층 자료로부터 속도를 환산하였다. Table 3은 화강암지층과 퇴적암지층에서 전기비저항검층 자료로부터 속도를 환산하기 위하여 사용된 지반정수를 나타내고 있다. 이 중에서 암석구성물질의 탄성파속도  $V_m$ 은 코어의 초음파 전파속도 측정으로부터 구한 값이고, 지층수의 탄성파 속도  $V_f$ 는 일반치를 이용했다. 또 암석구성물질의 전기비저항  $R_r$ 과 고결계수  $m$ 은 화강암과 퇴적암 코어의 전기비저항측정 결과로부터 산출한 값이고, 지층수의 전기비저항  $R_w$ 는 공내수의 전기비저항을 측정하였다.

Fig. 5는 화강암지층과 퇴적암지층에서 전기비저항검층 자료로부터 속도를 환산하여 속도검층 결과와 비교한 것이다. 그림 중에 굵은 선은 전기비저항검층 자료로부터 환산한 속도이고, 가는 선은 속도검층의 결과를 나타내고 있다. 화강암과 사암, 이암 및 역암의 호층으로 이루어진 퇴적암 지층에서도 전기비저항검층 자료로부터 환산한 속도가 속도검층 결과와 거의 일치하고 있으며, 각각의 상관계수가 0.84와 0.72로 높은 상관관계를 보이고 있다.

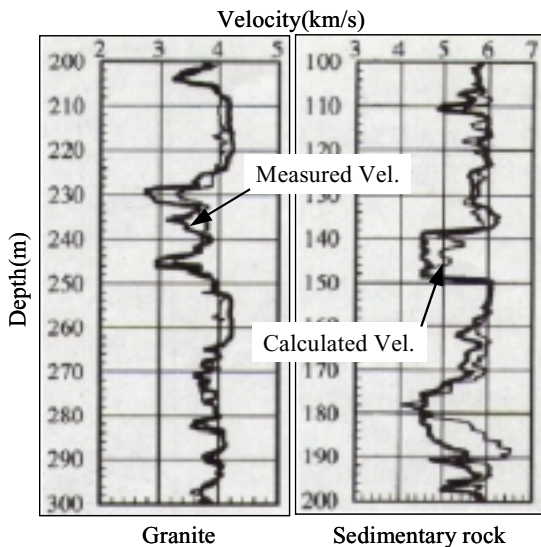


Fig. 5 Comparison between calculated velocity and measured velocity for granite and sedimentary rock formation

## 6. 터널 암반분류의 적용성

실제의 터널에서 실시한 전기비저항으로부터 제안한 식 (10)을 이용하여 탄성파속도를 환산하고, 환산 탄성파속도를 바탕으로 암반을 분류하여 지보패턴을 설정하고 이를 실제 터널시공에 있어서 설정한 지보패턴과 비교함으로써 그 적용성을 검토한다. 대상터널은 길이 715m의 일본 철도터널로 터널주변의 지질은 신제3기에 퇴적된 역암, 이암 및 사암의 퇴적암층과 이를 흑운모석영 안산암이 피복하고 있다. 퇴적암은 전체적으로 풍화가 진행되어 연약한 암질로 되어 있고, 퇴적 후 용기하여 남동방향으로 경사져 있다. 또 터널을 가로지르는 방향으로 파쇄대 및 풍화대가 존재하고 있어 터널 시공시 다량의 용출수가 예상되어 상세한 지질조사 필요성이 요구

되었다.

사전지반조사로서는 지표지질조사와 터널 종단면으로 전기비저항탐사 및 탄성파탐사를 선행하여 실시하였다. 이들 조사결과를 종합적으로 해석하여 지질 연약대에 시추 위치를 결정하여 시추조사를 실시하고, 탐사자료의 해석결과를 확인하였다. 탐사결과로부터 암반분류를 위해서 터널의 양쪽 갱도부분을 제외하고 지하수에 의해서 포화된 구간을 대상으로 지반의 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산하였다.

Table 4는 환산 탄성파속도를 구하기 위해 이용된 지반정수를 표시한 것이다. 이 중에서 코어의 탄성파속도  $V_m$ 은 지반의 탄성파속도 분포 구간별로 시추코어를 이용하여 초음파 전파속도 측정으로부터 구한 값이고, 지층수의 전기비저항은 터널갱내 용수의 전기비저항을 측

정한 값이다. 암석구성물질의 전기비저항  $R_r$ 과 고결계수  $m$ 은 시추코어의 전기비저항 측정결과로부터 결정된 값이다.

Table 5는 Table 4에 표시한 지반정수를 이용하여 터널 갱도부의 전기비저항과 탄성파속도로부터 환산 탄성파속도를 구하고, 이를 바탕으로 일본 철도터널의 암반 분류 기준(암종 및 탄성파속도가 주 평가지표임)에 따라 암반등급을 분류한 결과이다. 이 결과에 따르면, 환산 탄성파속도가 2.5km/s이하는 I등급, 2.5~3.0km/s는 II등급, 3.0km/s이상은 III등급으로 분류되고 있으며, 터널 갱도부에 같은 지반의 탄성파속도 구간이라 하더라도 전기비저항에 따라 암반등급이 다르게 분류되고 있다.

이것은 탄성파탐사의 결과인 탄성파속도에 의해서 암반을 분류할 때 나타나는 문제점을 해결할 수 있는 방법의 하나로 생각된다. 예를 들면, 퇴적암의 상부에 화산암이 피복 되어 있어 고속도층 아래에 저속도층이 분포하는 경우와 편마암이 풍화되어 절리가 발달되어 있지만 탄성파속도가 빠르게 나타나는 경우 등은 탄성파탐사에서 구한 속도보다 환산 탄성파속도가 현저하게 낮게 나타날 것으로 생각된다. 그 이유는 상기와 같은 지층에서는 전기비저항이 낮게 나타나고, 이를 바탕으로 탄성파속도를 환산하기 때문이다.

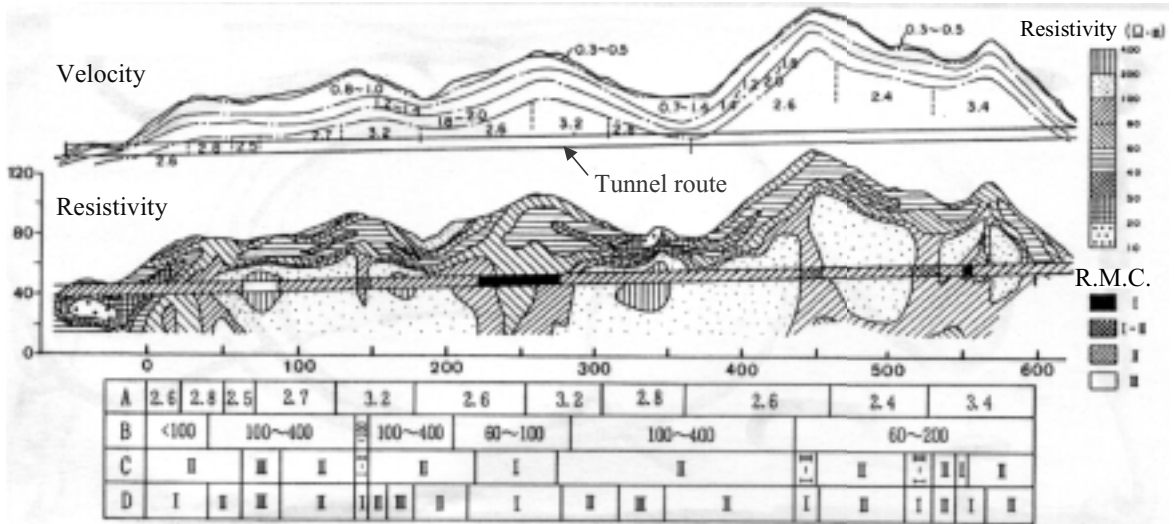
Fig. 6은 제안된 정량적 평가수법에 의해서 분류한 암반등급에 의해서 결정한 지보패턴과 일본 철도터널에서의 시공시 설정한 지보패턴을 비교한 것이다. 터널 갱도부의 탄성파속도는 2.4~3.4km/s의 범위로 분포하고 있으며, 전기비저항은 60~400 $\Omega$ m의 범위로 분포하고 있다. 실제 지보패턴은 터널시공단계에 설정한 지보패턴으로 설계단계에서의 지보패턴을 일부 수정한 것이다. 전 구간에서 실제 지보패턴과 제안한 수법에 의한 지보패턴은 I~III등급으로 분류되고 있으며, 일부 구간을 제외하고는 양자가 거의 일치하고 있다. 단 전기비저항이 200 $\Omega$ m이상 분포하는 일부 구간에서는 제안된 수법에 의한 지보패턴이 실제 지보패턴보다 1등급 높게 평가되고 있다. 이것은 터널 시공시 안전성을 고려하여 실제 지보패턴을 1등급 낮게 설정했기 때문으로 생각된다.

Table 4. Parameter conditions (Tunnel)

Parameters	Velocities of the tunnel route				
Ground velocity $V_p$ (km/s)	2.4-2.5	2.6-2.7	2.8	3.2	3.4
Core velocity $V_m$ (km/s)	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0
Water velocity $V_f$ (km/s)	1.5	Water resistivity $R_w$ ( $\Omega$ m)			20
Intrinsic matrix resistivity $R_r$ ( $\Omega$ m)	520	Cementation factor (m)			1.9

Table 5. Rock mass classification by derived seismic wave velocity on resistivity distribution

Resistivity ( $\Omega$ m)	Velocities of the tunnel route (km/s)				
	2.4-2.5	2.6-2.7	2.8	3.2	3.4
Over 230	III	III	III	III	III
220					
210					
200					
190					
180	II	II	II	II	II
170					
↓					
110					
100	I	I	I	I	I
90					
Below 80					



A : Seismic Velocity, B : Resistivity,  
C : Actual support patterns, D : Estimated support patterns

Fig. 6 Comparison of estimated support patterns with actual support patterns obtained from the railway tunnel in Japan

## 7. 토의 및 결론

본 연구는 사전지반조사로서 실시하고 있는 물리탐사의 전기비저항과 탄성파속도를 이용하여 터널의 암반분류법을 제안한 것이다. 설계단계에 있어서 암반분류는 암질, 지하수의 상태 및 절리 등에 의해서 평가되고 있으며 주로 시추코어의 암질에 의존하고 있다. 그래서 터널 전 구간의 암질을 파악하기 위하여 탄성파탐사 및 전기비저항탐사 결과를 이용하는 경우가 많다. 이 때 탄성파탐사 결과의 탄성파속도는 지반의 역학적 정수로서 암질을 평가하는데 유용하게 이용된다. 그러나 탄성파탐사 굴절법의 원리상 지표에서 심부로 갈수록 탄성파속도가 빠르지 않은 지층이 존재할 경우 지반의 탄성파속도 차이로 암질을 평가하기에 어려운 점이 있다. 한편, 지반의 전기비저항은 그 자체로서 암질의 평가는 어렵지만, 단층파쇄대 및 풍화대와 같은 지질구조나 지하수의 분포상태를 파악하는데 유용하게 이용된다. 따라서 탄성파탐사와 전기비저항탐사의 장점들을 이용하여 암질평가에 용이한 탄성파속도로 환산하여 터널의 암반분류를 시도한 것이다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 암석 공시체의 전기비저항 측정결과로부터 암석의 전기비저항은 공극률, 포화도, 간극수의 전기비저항 및 점토함유량에 의해서 크게 좌우되며, 이들의 관계식은 병렬회로 모델의 경험식이 잘 일치됨을 알 수 있었다.
2. 지반의 탄성파속도와 전기비저항은 공극율과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이를 이용하여 전기비저항으로부터 탄성파속도를 환산할 수 있는 식을 유도할 수 있다.
3. 제안된 식을 검증하기 위하여 전기비저항 검증자료를 이용하여 속도로 환산하고, 이를 속도검층 자료와 비교한 결과 화강암 및 퇴적암지층에서 양자가 거의 일치하였다.
4. 일본 철도터널을 대상으로 실제 지보패턴과 제안한 암반의 정량적 평가수법에 의한 지보패턴을 비교한 결과 일부구간을 제외하고는 양자가 거의 일치하였으며, 이 결과로부터 그 적용성이 확인되었다.



## 참고문헌

1. Archie, G. E. (1942), The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic. Trans, A.I.H.E., Vol. 146, pp. 54-67.
2. Bussian, A. E. (1983), Electrical conductance in a porous medium. Geophysics, Vol. 48, No. 9, pp.1258-1268.
3. Klein, D. J. and Sill, W. R. (1982), Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones. Geophysics, Vol. 47, pp. 1593-1601.
4. Patnode, G. E. and Wyllie, M. R. J. (1950), The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation. Trans, A.I.M.E., Vol. 189, pp. 47-52.
5. Park, S.G. and Matsui, T. (1998), Basic study on resistivity of rocks. Butsuri-Tansa, Vol. 51, No. 3, pp.201-209. (in Japanese)
6. Wyllie, M. R., Gregory, A. R. and Gardner, L.W. (1956), Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics, Vol. 21, pp. 41-70.
7. 土木學會 (1986), トンネル標準示方書(山岳編)・同解説.
8. 土木學會編 (1987), トンネルにおける調査・計測の評価と利用.



**박삼규**

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원  
samgyu@kigam.re.kr



**조성준**

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원  
mac@kigam.re.kr



**손정술**

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원  
jsson@kigam.re.kr



**김정호**

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
책임연구원  
jungho@kigam.re.kr



**이명종**

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원  
muse@kigam.re.kr