

# 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인

박삼규<sup>1)</sup>

## Physical Property Factors Controlling the Electrical Resistivity of Subsurface

Sam-Gyu Park<sup>1)</sup>

**요약** : 본 논문은 지반의 물성과 전기비저항의 관계를 밝히기 위하여 실내에서 여러 종류의 흙과 암석 시료를 대상으로 농도가 다른 9종류의 NaCl 용액으로 공극을 포화시킨 후 전기비저항을 측정하고, 그 결과로부터 흙과 암석의 전기비저항을 좌우하는 물성요인과 이들 요인이 전기비저항에 미치는 영향에 대해서 기존의 경험식을 토대로 비교 검토하였다. 그 결과에 의하면 흙과 암석 시료의 종류에 관계없이 공극수의 전기비저항이 높아짐에 따라 시료의 전기비저항은 높아지고 있으나, 그 증가 폭은 작아지는 경향을 보였다. 이러한 이유는 공극수의 전기비저항이 10 ohm-m 이하의 영역에서는 시료의 전기비저항이 공극수의 전기비저항에 의해서 좌우되지만, 그 이상의 영역에서는 공극수의 전기비저항과 구성물질의 전도성에 영향을 받고 있기 때문으로 생각된다. 또한 glass beads와 세립분의 함량이 5% 이하인 흙 시료의 전기비저항 실측치는 Archie의 경험식으로부터 구한 계산치와 잘 일치하고 있으나, 그 외 세립분을 20% 이상 함유하고 있는 흙과 암석 시료의 전기비저항 실측치는 Patnode and Wyllie의 경험식으로 구한 계산치와 거의 일치하고 있었다. 이러한 결과로부터 일반적인 지하수의 전기비저항 영역(20~200 ohm-m)에서 지반의 전기비저항은 간극수의 전기비저항과 구성물질의 전기전도성을 고려한 병렬 저항 회로 모델을 적용하는 것이 타당한 것으로 밝혀졌다.

**주요어** : 전기비저항, 지반물성, 병렬저항회로

**Abstract** : This paper describes the physical properties of the factors controlling the electrical resistivity of the subsurface. Resistivities of various types of soil and rock samples saturated with sodium chloride solutions having nine different concentrations were measured, and the measured resistivities of these samples were compared with calculated resistivities obtained using the conventional empirical formulas. From the results obtained, we observed that the resistivity of the soil and rock samples increases with increasing in pore-fluids resistivity regardless of the media type. However, between 20 and 200 ohm-m, which is the normal range of resistivity of groundwater, the resistivity of the pore-fluids have little or no effect on the resistivities of the samples used. Below 10 ohm-m, the resistivities of the samples are mainly controlled by the pore-fluids, whereas, in the normal range of resistivity of groundwater, the sample resistivities are controlled by their intrinsic matrix resistivity more than by the pore-fluids resistivity. Also, the measured resistivity of rock and soil samples having more than 20% clay contents showed a good agreement with the calculated resistivity using the parallel resistance model whereas, the calculated resistivities of glass beads correlate with that obtained using Archie's formula. When the pore-fluid resistivity is high, the computation of the resistivity values of the samples using the Archie's formula could not be carried out. Through this study, we were able to confirm that the tests are only applicable to the parallel resistance model considering the intrinsic matrix resistivity within the normal resistivity range of groundwater in the subsurface.

**Keywords** : electrical resistivity, physical properties, parallel resistances model

### 서론

최근 들어 물리탐사 기술은 전자기기 및 컴퓨터의 발달에 따라 짧은 시간에 많은 양의 데이터를 획득할 수 있을 뿐만 아니라 해석 결과의 신뢰성이 높아지면서 지반조사에 널리 보급되고 있다. 특히 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 전기비저항탐사는 산악터널, 교량기초 및 댐 사이트 등의 토목 지반조사에 적용되어 탐사결과로부터 단층파쇄대 및 변질대 등의 지

질구조, 지하수 분포상태, 암반등급 구분 등 토목 구조물의 설계 시 유용한 지반정보를 제공하고 있다(김정호 등, 2000; 박삼규, 김희준, 1999; 정승환 등, 1999).

또한 환경오염문제가 사회적으로 대두되면서 쓰레기 매립장, 폐광산, 지하 유류저장 시설 등 환경오염부지 조사에도 전기비저항탐사를 이용한 오염물질의 분포범위와 유동경로 등을 추정하는데 유용한 지반정보를 제공한 사례가 증가하고 있으며, 저수지 및 방조제의 정밀안전진단 시 누수구간을 탐지하는데

\*2004년 4월 30일 접수

1) 한국지질자원연구원(Geotechnical Engineering Division, KIGAM)

도 유용한 조사법으로 알려져 있다(이철효, 박삼규, 2001; 송윤호 등 2001; 박삼규 등, 2002; 박삼규 등, 2003). 전기비저항 탐사 결과로부터 얻어지는 지반의 전기비저항은 지반의 전기적 성질에 관련된 물리량으로 지반을 구성하고 있는 흙과 암석의 물성에 따라 현저한 차이를 나타내고 있으며, 주로 포화도, 공극률, 간극수의 전기전도도, 세립분 및 점토함유량 등에 의해서 결정된다. 그러나 탐사결과와 전기비저항은 지반의 여러 가지 물성의 복합체로 나타나기 때문에 어떠한 요인이 얼마만큼 전기비저항에 영향을 미치고 있는지 파악하기 어려우므로 탐사결과로부터 정확한 지반정보를 추출하기 위해서는 지반의 전기비저항과 물성의 관계를 정확하게 밝히는 것이 무엇보다도 중요하다.

따라서 본 논문에서는 실내에서 여러 가지 종류의 흙과 암석 시료의 전기비저항을 측정 후 그 결과로부터 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인을 밝히고 이들 요인이 지반의 전기비저항에 미치는 영향에 대해서 기존의 경험식을 토대로 비교 검토코자 하였다.

### 전기비저항 측정 시스템

시료의 전기비저항을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 전기비저항측정 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 전류를 흘려 보내는 송신부(function generator), 전위차를 측정하는 신호조정부(signal conditioner), 전류 및 전위차로부터 전기비저항을 산출하는 자료처리부(data processor) 및 측정용기로 구성되어 있다. 시료의 전기비저항 측정에 있어서는 흙과 암석 시료의 측정용기를 Fig. 2와 같이 만들어 측 방향으로 평행하게 전류가 흘렀

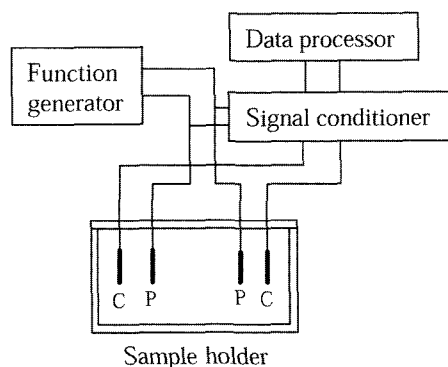


Fig. 1. Resistivity measurement system.

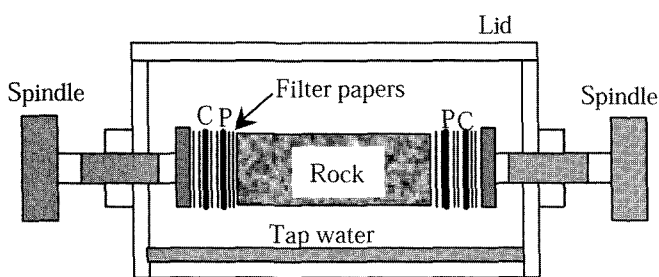
을 때 전위전극으로부터 전위차를 측정하여 아래 (1)식으로부터 전기비저항을 산출하였다.

$$R = \frac{S \Delta V}{L I} \tag{1}$$

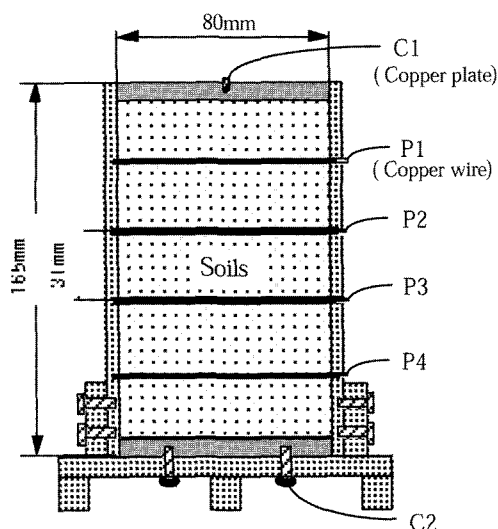
여기서  $R$ 은 시료의 전기비저항(ohm-m),  $S$ 는 시료의 단면적( $m^2$ ),  $L$ 은 시료의 길이(m),  $I$ 는 전류(A)이고,  $\Delta V$ 는 전위차(V)를 나타낸다.

### 전기비저항의 이론적 배경

전기비저항과 지반 물성의 관계에 대해서는 주로 저류암에서 석유 매장량을 산정하기 위하여 많은 연구가 이루어졌다. Archie(1942)는 저류암의 물성을 평가하기 위하여 지층의 전기비저항  $R$ , 공극수의 전기비저항  $R_w$  및 포화도  $S_w$  사이의 관



(a) Sample holder of the rock.  
C and P are current and potential electrodes, respectively.



(b) Sample holder of the soil.  
C and P are current and potential electrodes, respectively.

Fig. 2. Schematic view of sample holders.

계를 아래 (2)식으로 나타내었다.

$$R = F R_w S_w^{-2} \quad (2)$$

여기서  $F$ 는 지층비저항계수(formation factor)라고 불리며 아래 (3)식과 같이 나타낸다.

$$F = \frac{R}{R_w} = a n^{-m} \quad (3)$$

여기서  $a$ 는 실험정수로서 경험적으로 0.6~3.5사이의 값을 가지며,  $n$ 은 지층의 공극률이다.  $m$ 은 고결계수(cementation factor)로 공극의 기하학적 형태 및 고결의 정도에 따라서 다르지만, 일반적으로 1.4~2.2의 값을 가진다. Archie의 경험식은 간극수의 전기비저항을 알면 지층의 공극률을 평가할 수 있기 때문에 석유 저류량 산출에 많이 사용되어 왔다. 따라서 이 식은 석유를 배태하고 있는 다공질 사암층 등을 대상으로 한 경험식으로 지층의 전기전도도가 공극수에만 의존할 경우에 적용할 수 있다. 그러나 점토를 함유하고 있는 지층에 대해서는 공극수 자체의 이온전도 외에 지층에 함유되어 있는 미립의 점토분이 전기전도성 물질의 역할을 하기 때문에 Archie의 경험식을 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 제시된 바 있다 (Klein and Sill, 1982; Patnode and Wyllie, 1950).

한편, 포화된 지층의 구성물질이 전기전도성을 가지고 있을 경우, 즉 세립분이나 점토를 함유하고 있을 경우 Patnode and Wyllie (1950)는 아래 (4)과 같은 병렬 저항 모델(parallel resistances model)을 제안하였다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{FR_w} + \frac{1}{R_s} \quad (4)$$

여기서,  $R_s$ 는 지층 구성물질의 전기비저항을 나타내고 있으며, 지층 중에 함유되어 있는 세립분이 전기이중층 효과에 의해서 전기전도도 역할을 하고 있음을 의미한다. 이 경험식은 점토질 모래와 같은 토질에서 적용되어 왔지만, 최근 연구결과에 따르면 화강암과 같은 결정질 암석에도 적용될 수 있다는 사실이 검증되었다(Park and Matsui, 1998). 따라서 Patnode and Wyllie의 경험식에 의하면 지층의 전기비저항은 간극수의 전

기전도도, 공극률, 세립분의 함유량(구성물질의 전기비저항), 포화도에 의해서 크게 좌우됨을 알 수 있다.

### 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인

전기비저항탐사로 얻어지는 지반의 전기비저항은 주로 포화도, 공극률, 간극수의 전기전도도, 점토함유량, 온도 등에 따라 좌우되며, 실제 지반의 전기비저항은 이들 물성의 복합체로 표현되고 기존의 연구결과에 의하면 Table 1과 같다. 탐사결과로부터 이들 물성요인 중에서 어떠한 요인이 전기비저항에 어느 정도 영향을 미치고 있는지를 평가하는 것이 지반해석의 주안점이 되고 있다. 따라서 지반물성과 전기비저항의 관계를 밝히는 것이 탐사결과로부터 지반을 해석하는데 있어서 중요하다.

### 흙 시료의 전기비저항

전기비저항 측정에 사용된 흙 시료는 입자의 크기가 다른 glass beads 3종류, 모래 2종류, 실트질 모래 2종류, 실트 1종류이며, 시료에 대한 입도분포 및 비중 등은 Table 2에 제시하였다.

실험과정은 동일한 흙 시료를 이용하여 전기비저항이 높은 수용액부터 낮은 수용액 순으로 간극을 포화시켜 전기비저항을 측정하였으며, 이때 간극수의 전기비저항 변화와 관계없이 공극률이 일정하게 되도록 하기 위하여 동일한 방법으로 몰드 내의 흙다짐을 하였다. 시료 제작 방법은 증류수 및 NaCl 농도가 다른 수용액에 시료를 포화시킨 후 5등분으로 나누어 시료를 몰드에 집어넣고, 전술한 방법과 같이 각 층마다 플라스틱 해머로 몰드의 외벽을 두드리는 회수에 의해서 시료의 공극률이 일정하게 되도록 조정하였다. 그러나 동일한 방법으로 만든 시료라 하더라도 공극률이 일정하지 않은 경우가 많아 각 실험대상 별로 10~20개의 시료를 준비하여 전기비저항을 측정하였다. 측정결과로부터 전체 시료를 대상으로 공극률의 평균치를 구하고, 그 평균치에서 ±2% 이내의 자료만 채용하였다. 전기비저항 측정 시료의 공극률은 아래 (5)식으로부터 산출하였다.

**Table 1.** Influencing factors and degree of the resistivity of ground.

Influencing factors	Influencing degree		Geological conditions of ground
	Low resistivity -----	High resistivity	
Porosity	Saturated condition	Large ----- Small	Weathered and fault fractured zone
	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 zone

**Table 2.** Description of soil samples.

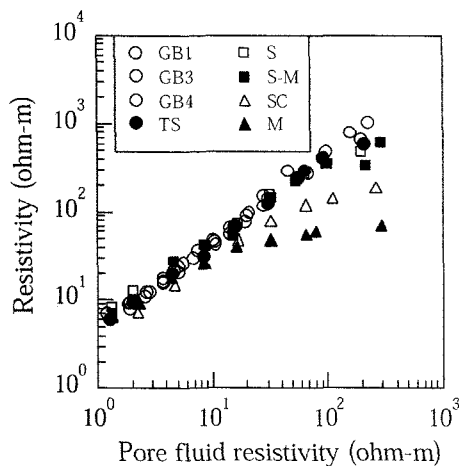
Sample No.	Classification	Grain size range (mm)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Specific gravity of soil particles (g/cm <sup>3</sup> )
GB1	Glass beads 1 mm	0.99~1.40					2.50
GB3	Glass beads 3 mm	2.79~3.96					2.50
GB4	Glass beads 4 mm	3.96~4.70					2.50
TS	Toyoura standard sands	0.10~0.42	0	100	0	0	2.64
S	Sands	0.10~4.75	9	91	0	0	2.64
SM	Silt mixture sands	0.034~4.75	20	75	5	0	2.65
SM	Silty sands	0.0016~4.75	10	70	14	6	2.67
SC	Clayey sands	0.0017~4.75	11	62	13	14	2.75
M	Silts	0.0014~4.75	7	38	32	23	2.64

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \times 100 \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 공극률(%),  $\rho_d$ 는 흙의 건조밀도(g/cm<sup>3</sup>)이며,  $\rho_s$ 는 흙 입자의 밀도(g/cm<sup>3</sup>)이다.

Fig. 3은 흙 시료의 전기비저항과 간극수 전기비저항의 관계를 나타낸 것으로, glass beads(GB)와 세립분이 5%이하의 표준사(TS), 모래(S)와 실트질 모래(SM)의 경우는 시료의 전기비저항과 간극수 전기비저항의 관계가 거의 선형적이며, 이들 시료의 전기비저항은 간극수 전기비저항에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한 시료의 종류나 입자의 크기에 따라 공극률이 다소 달라도 이들의 전기비저항에 대한 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 세립분이 20% 이상 포함되어 있는 점토질 모래(SC)와 실트(M)의 경우는 간극수의 전기비저항이 높아짐에 따라 비선형적인 변화를 보이고 있으며 전기비저항의 증가 폭도 점점 작아지는 경향이 나타났다.

흙의 물성과 전기비저항과의 관계를 분석하기 위하여 시료의 전기비저항 측정치를 Archie의 경험식과 병렬 저항 모델인 Patnode and Wyllie의 경험식으로 구한 계산치와 상호 비교하



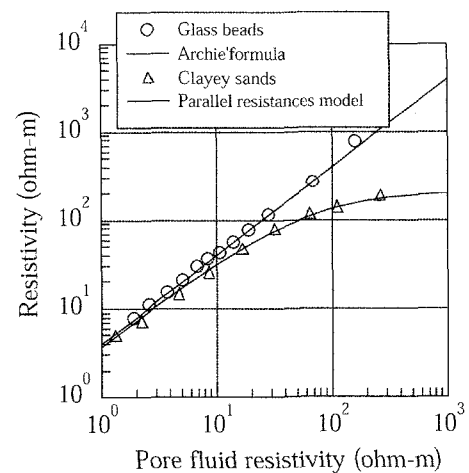
**Fig. 3.** Relationship between resistivity and pore fluid resistivity of soils.

였다. 이때 두 경험식으로부터 계산치를 산출하기 위해서는 미지수  $a$ ,  $m$ 과  $R_s$ 를 구해야 하는데, 본 연구에서는 상수  $a$ 를 0.6~3.5의 범위에 속하는 2로 하였으며,  $m$ 과  $R_s$ 는 시료의 전기비저항과 간극수의 전기비저항을 아래 (6)식과 같이 시료의 전기전도도에 대한 1차식으로 바꾸어 기울기( $n^m$ )와 절편( $\sigma_s$ )을 이용하여 구했다.

$$\sigma = \sigma_w n^m + \sigma_s \quad (6)$$

여기서  $\sigma$ 는 시료의 전기전도도(전기비저항의 역수, ohm<sup>-1</sup>·m),  $\sigma_w$ 는 간극수의 전기전도도,  $\sigma_s$ 는 지층 구성물질의 전기전도도를 나타낸다. 이 식을 이용하면 시료의 전기전도도를 세로축으로, 간극수의 전기전도도를 가로축으로 하여 측정치를 그려 최소자승법으로 회귀직선을 구하면, 직선의 기울기로부터  $m$ 을, 절편으로부터  $\sigma_s$ 를 구할 수 있다.

Fig. 4는 glass beads와 점토질 모래에 대한 전기비저항 측정치를 Archie의 경험식과 Patnode and Wyllie의 경험식으로부터 구한 계산치를 비교한 것이다. 계산치를 구하기 위해 경험식에 적용한  $m$ 과  $\sigma_s$ 는 glass beads에 있어서는 1.86과 97,917 ohm·m이었고, 점토질 모래에 있어서는 1.92와 1,368



**Fig. 4.** Comparison between measured and calculated resistivity for glass beads and clayey sands.

ohm-m이었다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 glass beads의 경우에는 Archie의 경험식으로부터 구한 계산치가 측정치와 잘 일치하고 있으며, 점토질 모래에 대해서는 병렬 저항 모델에 의한 Patnode and Wyllie의 경험식으로부터 구한 계산치가 측정치와 잘 일치하고 있다. 이러한 결과로부터 glass beads와 세립분의 함량이 5% 이하인 시료의 전기비저항은 Archie의 경험식으로 설명할 수 있다. 즉 glass beads와 같은 시료는 구성 물질이 절연체이기 때문에 전기비저항은 간극수의 전기비저항과 공극률에 의해서 지배됨을 알 수 있지만, 점토 등의 세립분이 포함되어 있는 시료의 전기전도는 간극수 자체의 이온전도 외에 미립의 점토입자와 간극수의 경계면에서 생기는 전기화학적 표면전도에 의한 영향 때문에 병렬 저항 모델로 설명할 수 있다.

### 암석 시료의 전기비저항

암석의 공극률, 점토함유량 등의 물성이 전기비저항에 미치는 영향을 밝히기 위해서 화강암 및 여러 가지 퇴적암을 이용하여 원통형의 시료를 제작하고, 동일 시료를 이용하여 농도가 다른 9종류의 NaCl용액(0.19~54.5 ohm-m)을 낮은 농도에서 높은 농도 순으로 공극을 완전히 포화시켜 전기비저항을 측정하였다. 측정 시료에 대한 크기 및 공극률은 Table 3에 나타난 것과 같다.

실험과정은 시료의 공극에 수용액을 포화시키기 위하여 진공 펌프를 사용했으며, 진공 데시케이터 내에 NaCl용액을 넣고 그 속에 건조시킨 시료를 침전시켜 72시간 이상 진공펌프로 흡입했다. 이 때 데시케이터를 손으로 흔들어 시료 표면에서 기포가 발생하지 않을 때까지 계속 진공펌프를 가동하여 시료 중의 공극이 수용액으로 완전히 포화될 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 여러 종류의 암석 시료에 대한 전기비저항과 간극수 전기비저항의 관계를 나타낸 것으로, 전체적으로는 암석 종류에 관계없이 간극수 전기비저항이 증가함에 따라 암석 시료의 전기비저항도 증가하고 있다. 간극수의 전기비저항 변화에 따른 시료의 전기비저항 변화 양상은 Fig. 3의 세립분이 20% 이상 포함되어 있는 점토질 모래(SC)와 실트(M)의 경우와 거의 같다. 즉 간극수의 전기비저항이 높아짐에 따라 시료의 전기비저항은 비선형적인 변화를 보이고 있으며 전기비저항의 증가 폭도 작아지고 있다.

Table 3. Description of rock samples.

Rock type	Diameter (cm)	Length (cm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
Conglomerate	4.72	1.86	2.70	2.00
Sandstone	4.71	1.91	2.75	0.60
Granite	4.75	9.10	2.61	2.58
Shale	4.72	1.86	2.74	2.31
Tuff	4.74	1.86	2.66	1.23

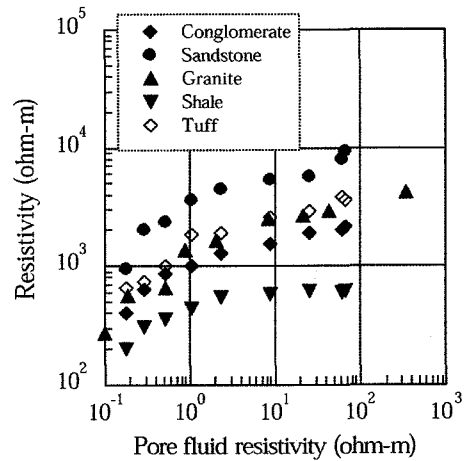


Fig. 5. Relationship between resistivity and pore fluid resistivity of rocks.

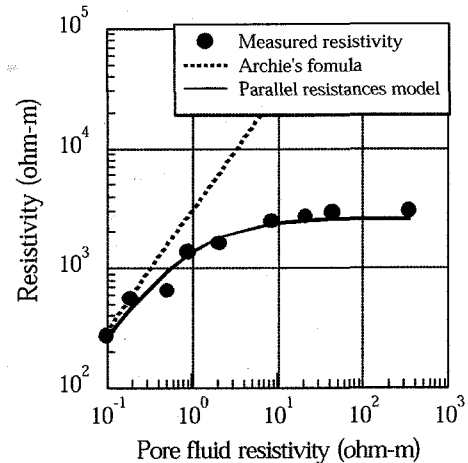


Fig. 6. Comparison between measured and calculated resistivity for a granite.

Fig. 6은 암석시료 중에서 상대적으로 신선한 화강암에 대한 전기비저항 측정치와 Archie 및 Patnode and Wyllie에 의한 경험식으로부터 구한 계산치를 비교한 것으로, 두 경험식으로부터 계산치를 구하기 위하여  $m$ 과  $R_p$ 는 각각 2.16과 2,634 ohm-m을 적용했다. 측정결과에 의하면 공극수의 전기비저항이 증가함에 따라 화강암 시료의 전기비저항 실측치는 증가하고 있지만, 공극수의 전기비저항이 10 ohm-m 이상의 범위에서는 실측치가 거의 일정하게 된다. 이것은 암석의 전기비저항은 공극수의 전기비저항이 낮은 영역에서는 공극수의 전기비저항에 큰 영향을 받고 있지만, 일반지하수의 전기비저항 영역(약 20~200 ohm-m 범위로 가정)에서는 암석구성물질의 영향을 크게 받고 있다는 것을 시사하고 있다. 전체적으로는 화강암 시료의 실측치는 Patnode and Wyllie의 경험식으로 구한 계산치와 거의 일치하고 있으며, 이 결과로부터 Patnode and Wyllie의 경험식은 점토질 모래뿐만 아니라 결정질 암석에서도 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 토의 및 결론

지반의 전기비저항에 영향을 미치는 주요인은 공극률, 포화도, 간극수의 전기비저항(전기전도도의 역수), 점토함유량 등이 있으며 그 외에도 입도조성, 성분 및 온도에 의하여 영향을 받고 있다. 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 지반의 전기비저항을 나타내기 때문에 어떤 요인이 어느 정도 영향을 미치고 있는지를 정량적으로 평가하기는 어려운 점이 있다. 그러나 어떤 일정한 조건하에서는 기존의 경험식(Archie, 1942; Patnode and Wyllie, 1950)을 이용하면 어느 정도 정량적 평가의 가능성도 있다. 예를 들어 포화된 지반의 전기비저항에 영향을 미치는 주요인으로는 공극률, 간극수의 전기비저항 및 점토함유량을 들 수 있다. 이들 요인 중에서 동일 지층의 경우 간극수의 전기비저항이 거의 일정하기 때문에 지반의 전기비저항은 공극률과 점토함유량에 의해서 크게 좌우된다. 지반의 공극률이 크면 체적함수율(공극률×포화도)이 높아져서 지반의 전기비저항을 저하시키는 역할을 하고, 또한 전도성을 가진 점토함유량이 많을수록 더욱더 지반의 전기비저항을 저하시키는 역할을 한다.

본 논문은 여러 가지 종류의 흙과 암석 시료를 NaCl용액에 포화시켜 전기비저항을 측정하고, 그 결과로부터 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인을 밝히고 이들 요인이 지반의 전기비저항에 미치는 영향에 대해서 기존의 경험식을 토대로 비교 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 흙과 암석 시료의 종류에 관계없이 공극수의 전기비저항이 높아짐에 따라 시료의 전기비저항은 높아지고 있으나, 그 증가 폭은 작아지는 경향이 있다.
2. 공극수의 전기비저항이 10 ohm-m 이하의 영역에서는 시료의 전기비저항은 공극수의 전기비저항에 의해서 좌우되지만, 그 이상의 영역에서는 공극수의 전기비저항과 구성물질의 전도성에 영향을 받고 있다.
3. glass beads와 세립분의 함량이 5% 이하인 흙 시료의 전기비저항 실측치는 Archie의 경험식으로부터 구한 계산치와 잘 일치하고 있으나, 그 외 세립분을 20% 이상 함유하고 있는

흙과 암석 시료의 전기비저항 실측치는 Patnode and Wyllie의 경험식으로 구한 계산치와 거의 일치하고 있다.

4. 이 결과로부터 일반적인 지하수의 전기비저항을 20~200 ohm-m로 가정하면 지반의 전기비저항은 간극수의 전기비저항과 구성물질의 전기전도성을 고려한 병렬 저항 회로 모델을 적용하는 것이 타당하다.

## 참고문헌

- 김정호, 송운호, 정승환, 2000, 전기·전자탐사 기술을 이용한 지반구조의 영상화, 2000년도 한국물리탐사학회·한국지반공학회 지반조사위원회 공동특별강연논문집, 121-154.
- 박삼규, 김희준, 1999, 일본에서의 토목·건설 지반조사를 위한 물리탐사의 활용 현황, 한국물리탐사학회, 제2회 학술발표회, 1-20.
- 박삼규, 송성호, 최종학, 최보규, 이병호, 2002, 수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성, 한국물리탐사학회, 제4회 특별 심포지엄, 179-195.
- 박삼규, 박용기, 김을영, 최보규, 이병호, 2003, 비위생 매립장의 침출수 유동경로 탐지를 위한 물리탐사의 적용성, 한국지하수토양환경학회, 2003년 춘계학술발표회, 180-183.
- 송운호, 박삼규, 설순지, 조성준, 정승환, 2001, 물리탐사를 이용한 국내 유류오염지역의 조사 사례, 한국물리탐사학회, 제3회 특별 심포지엄, 122-140.
- 이철효, 박삼규, 2001, 매립지 오염 평가를 위한 물리탐사의 적용 사례, 한국물리탐사학회, 제3회 특별 심포지엄, 104-121.
- 정승환, 이명중, 김정호, 조성준, 송운호, 1999, 지반조사를 위한 3차원 전기비저항탐사, 한국물리탐사학회, 제2회 학술발표회, 21-36.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic, *Trans, A. I. H. E.*, **146**, 54-67.
- Klein, D. J., and Sill, W. R., 1982, Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones, *Geophysics*, **47**, 1593-1601.
- Park, S. G., and Matsui, T., 1998, Basic study on resistivity of rocks, *Butsuri-Tansa*, **51**, 201-209. (in Japanese)
- 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.*, **189**, 47-52.