

## 유도분극 전하 충전성과 전기비저항을 활용한 암반 상태 파악 가능성 연구

박진호\* · 류진우\*\* · 정지희\*\*\* · 이인모\*\*\*\*

Jinho Park\*, Jinwoo Ryu\*\*, Jeehee Jung\*\*\*, In-Mo Lee\*\*\*\*

### Utilization of Induced Polarization and Electrical Resistivity for Identifying Rock Condition

#### ABSTRACT

This study examines how rock condition affects the variation of the chargeability and electrical resistivity of the rock. In the theoretical study, the relationship correlating chargeability with the variables affecting it is derived. A parametric study utilizing the derived relationship reveals that the size of narrow pores ( $r_f$ ) is the most influential factor on chargeability, and the salinity of pore water ( $C_0$ ) is the second. In the laboratory experiments, small scale rock fracturing zone is modelled using sand stone. Chargeability and resistivity are measured by changing the size of the joint aperture, the location of fractured zone and the existence of clay gouge and/or clay layer which shows lower chargeability than the sand stone layer in the multi-layered ground. Test results show that chargeability is controlled not by the rock fracturing condition but by the size of narrow pore ( $r_f$ ) where each line of current flow passes through. Also, the chargeability decreases with increase of the pore water salinity ( $C_0$ ). In conclusion, the ground condition can be identified more efficiently by measuring the induced polarization along with the electrical resistivity; identifying the existence of sea water, the layered ground and/or the fractured rock becomes more reliable.

**Key words** : Rock fracture, Rock joint, Induced polarization, Chargeability, Electrical resistivity

#### 초 록

이 연구에서는 암반의 상태가 유도분극에 의한 전하 충전성(chargeability)과 전기비저항에 미치는 영향을 살펴보았다. 이론 연구에서 지반의 충전성과 이에 영향을 미치는 변수들 사이에 관계식을 유도하고, 변수 민감도 분석으로부터 충전성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 입자 사이의 좁은 간극의 크기( $r_f$ )이며, 그 다음으로는 간극수의 염도( $C_0$ )임을 밝혔다. 실내 실험에서는 암반 절리대(파쇄대)를 축소 모사하여, 절리 틈새 크기와 간극수 염도 및 절리대 위치에 따라 충전성과 비저항을 측정하였다. 또한, 서로 다른 충전성을 가진 지층이 복합적으로 구성된 경우도 살펴 보았다. 실험 결과, 충전성은 간극수의 염도( $C_0$ )가 증가하면 감소하였다. 또한, 전하가 흐르는 각각의 경로(current flow lines)에서 나타나는 충전성에 의해 전체 충전성이 결정되었으며, 각 경로에서의 충전성은 암반 파쇄상태가 아닌 경로 상의 좁은 간극( $r_f$ )에 의해 결정되었다. 따라서 충전성이 상대적으로 큰 암반이 하부에 존재하는 복합지층의 경우, 충전성을 이용해 복합지층 구성 여부에 대한 파악이 가능하였다. 이러한 결과로부터, 전기비저항 변화만으로는 지반 해수침투 또는 지반 복합구성 여부가 지반 파쇄상태에 따른 비저항 변화와 혼동되어 분간이 어려우나, 충전성을 함께 측정하면 이를 명확히 구분하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**검색어** : 암반 파쇄대, 절리대, 유도분극 탐사, 충전성, 전기비저항

\* 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료 (Korea University · [smpjh7@korea.ac.kr](mailto:smpjh7@korea.ac.kr))

\*\* 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Korea University · [nike@korea.ac.kr](mailto:nike@korea.ac.kr))

\*\*\* 정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Korea University · [jeehee83@korea.ac.kr](mailto:jeehee83@korea.ac.kr))

\*\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Corresponding Author · Korea University · [inmolee@korea.ac.kr](mailto:inmolee@korea.ac.kr))

Received February 22, 2016/ revised April 18, 2016/ accepted May 11, 2016

### 1. 서론

Schlumberger (1920)가 유도분극 현상을 처음으로 발견하고 논문에 기록한 이후, 유도분극은 전기비저항과 함께 지하자원 탐사에 널리 활용되어 왔을 뿐만 아니라, 지하수의 존재 및 지반상태를 파악하는 데에도 사용되었다. 또한, 해안지역에서 해수 침투의 경계를 파악하기 위한 방법으로도 사용되었다(Roy and Elliott, 1980; Seara and Granda, 1987). 이와 같이 탐사대상 물질이 유도분극에 미치는 특성을 이용한 현장 탐사가 이루어진 한편, 이론적으로 유도분극 현상의 원인을 규명하기 위한 연구들이 시도되어 왔다(Marshall and Madden, 1959). Fridrikhsberg and Sidorova (1961)은 양전하의 흐름이 지연되어 잔류 전류가 생성됨에 따라 나타나는 유도 분극 현상(시간영역 유도분극)이, 지반 내에서 전류가 좁고 넓은 간극 사이를 흐르면서 발생하는 양전하의 운반을 차이에 의해 나타낸다고 설명하는 모세관 모델(capillary model)을 제안하였다. 또한, Titov et al. (2004)는 삼상조건(porous system)에서 입자의 배열과 포화상태에 따른 시간영역 유도분극 현상을 설명하기 위한 모델을 제안하였는데, 포화상태에서는 입자가 서로 접촉하고 있는 부분이 좁은 경로(narrow passageway)가 되고, 불포화 상태에서는 입자 표면에 형성되는 물막(water film)이 좁은 경로가 된다고 설명하였다. 최근 연구에서는 입도분포가 균등한 지반에서 충전성과 이에 영향을 미치는 변수들 사이의 관계식을 제시하고, 충전성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 좁은 간극의 크기라고 설명된 바 있다(Park et al., 2015).

이 연구는 이론에 있어서는 Park et al. (2015)에 의한 충전성 이론 연구를 연장하여, 지반 내 넓은 간극의 크기와 흙 입자 직경 사이에 관계식을 제시하여 값의 산정이 모호한 넓은 간극의 크기를 입자 직경의 향으로 나타내었다. 수정 이론식을 이용하여 충전성에 영향을 미치는 매개변수들에 대한 민감도 분석을 재실시하고 충전성에 영향을 미치는 주요 인자를 파악함으로써, 실험에서 나타난 결과를 충전성 영향 인자를 이용하여 설명하고자 하였다. 실내 실험에서는 암반 내부에 존재하는 절리대를 축소 모사하여, 절리 틈새 크기와 절리대 위치 변화에 따라 충전성과 전기비저항을 측정하였다. 해수 침투 경계를 파악하는데 충전성을 활용하는 연구가 이루어졌던 바, 해수의 염도가 충전성에 미치는 영향을 살펴보고자 담수 뿐만 아니라 해수조건에서도 실험을 실시하였다. 또한, 서로 다른 충전성을 나타내는 사암과 점토로 구성된 복합지층에서 점토 두께 변화에 따른 영향을 살펴보았다. 최종적으로, 실험조건에 따라 나타난 충전성의 변화 경향이 유도된 이론식이 설명하는 충전성의 변화 경향과 일치하는지 비교하였으며, 궁극적으로 전기비저항과 함께 충전성을 측정하여 활용하는 경우 그 이점에 대해 고찰하였다.

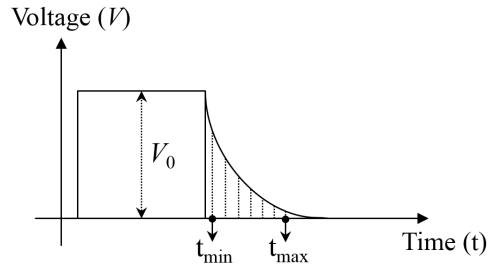


Fig. 1. Voltage Decay Curve in Time Domain IP

### 2. 충전성과 전기비저항 이론

#### 2.1 시간영역 유도분극

시간영역 유도분극(time domain IP) 탐사는 지반에 흐르는 전류를 순간적으로 차단한 이후 감소하는 전위를 시간의 함수로 측정(Fig. 1)하여 겉보기 충전성(apparent chargeability,  $m$ )을 산정(Eq. (1))함으로써, 지반의 분극(polarization) 특성을 나타내는 방법이다. 전위전극 사이의 전위차는 전류가 끊어지는 순간에 완전히 사라지지 않고 서서히 감소하는데, 이는 외부 전류가 없어도 지반 내부에 집적된 양전하(charged cation)에 의해 발생하는 과전압(over-voltage) 때문에 나타나는 현상이다. 유도분극을 이용한 지반탐사는 지반상태에 따라 양전하가 집적되는 정도가 다르기 때문에 나타나는 과전압의 차이를 이용하여 지반상태를 서로 구분하는 것이다(Park et al., 2015).

$$m = \frac{1}{t_{max} - t_{min}} \frac{1}{V_0} \int_{t_{min}}^{t_{max}} V(t) dt \tag{1}$$

#### 2.2 충전성 이론

지반에서 유도분극 효과에 의해 나타나는 충전성을 산정하기 위해 Park et al. (2015)은 아래와 같은 이론식을 제안하였다.

$$m = \frac{\frac{3}{4} \left[ \frac{\delta}{r_1} \left( 1 - \frac{r_2}{r_1} \right) (a^+ - a^-) \right]^2}{\left\{ 1 + \frac{2r_1 + r_2}{2r_2} + \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \frac{2r_2}{2r_1 + r_2} \right) \right\} \left\{ \left[ 1 + \frac{\delta}{r_1} (a^+ + a^-) \right] \left\{ \left( \frac{r_2}{r_1} + \frac{\delta}{r_1} (a^+ + a^-) \right) \right\} \right\}^2} \tag{2}$$

Eq. (2)는 균등한 크기의 원형 흙 입자가 조밀하게 배열된 경우 (Fig. 2), 충전성( $m$ )과 이에 영향을 미치는 변수들 간의 관계를 나타내고 있다.

여기에서,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 입자 사이의 간극에서 좁은 간극과 넓은 간극의 크기(반경)를 나타내며,  $a^+$ 와  $a^-$ 는 각각 양이온과 음이온

의 유효전하를 나타낸다.  $\alpha$ 는 좁은 간극의 효율계수로 간극수의 전기전도도에 대한 입자 표면의 전기전도도의 비율을 나타낸다.  $\delta$ 는 이중층의 두께(debye length)를 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{zF} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon RT}{2C_0}} \quad (3)$$

여기에서  $z$ 는 이온가(ionic valence)를 나타내며,  $F = 9.65 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$ 는 패러데이 상수(faraday constant)이다.  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ 는 유전율상수(dielectric constant),  $\epsilon$ 는 상대유전율(relative permittivity)을 나타낸다.  $R = 8.31 \text{ J mol}^{-1}$ 은 기체상수이며,  $T(\text{K})$ 는 절대온도이다.  $C_0$ 는 몰농도( $\text{mol}/\text{m}^3$ )를 나타낸다.

간극 수 내 양이온과 음이온의 유효전하량 크기가 같은 경우(예를 들어, NaCl 용액에서  $a^+$ 는 +1,  $a^-$ 는 -1을 가진다)를 가정하면, Eq. (2)를 다음과 같이 단순화하여 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{3 \left\{ \frac{\delta}{r_1} \left( 1 - \frac{r_2}{r_1} \right) \right\}^2}{\left\{ 1 + \frac{2r_1 + r_2}{2r_2} + \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \frac{2r_2}{2r_1 + r_2} \right) \right\} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2} \quad (4)$$

또한, Fig. 2에서 흙 입자의 직경을  $d_p$ 라고 정의하면, 넓은 간극의 크기( $r_2$ )는 피타고라스 정리를 이용하여 다음과 같이 좁은 간극의 크기( $r_1$ )와 흙 입자의 직경( $d_p$ )에 관하여 나타낼 수 있다.

$$r_2 = \frac{2\sqrt{3}-3}{3\sqrt{3}} d_p + \frac{4}{3} r_1 \quad (5)$$

Eqs. (3)~(5)로부터, 충전성과 이에 영향을 미치는 변수들의 함수 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$m = f(r_1, d_p, C_0, \alpha, z, T) \quad (6)$$

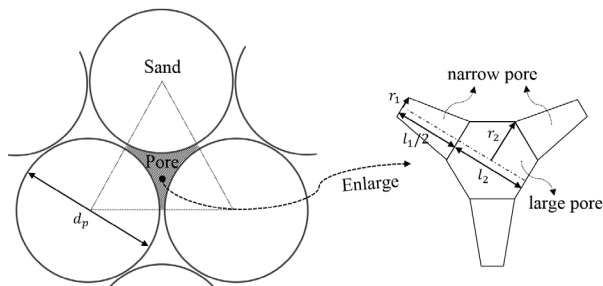


Fig. 2. Conceptual Pore Model Inducing Chargeability in Water Saturated Sands

### 2.3 충전성 매개변수 민감도 분석

충전성에 영향을 미치는 변수들의 값이 변화함에 따라 산정되는 충전성의 변화 크기를 살펴보고, 충전성 주요 영향 인자를 파악하고자 매개변수 민감도 분석을 실시하였다(Fig. 3). 변수들의 초기값 ( $\text{value}_{ref}$ )을 설정하고, 각 변수들의 초기값이 0.1배에서 3배까지 변화할 때의 충전성( $m$ )을 Eqs. (3)~(5)를 이용하여 계산하였다. 계산된 충전성은 변수들이 초기값을 가지는 경우에 계산되는 충전성( $m_{ref}$ )으로 정규화하여 나타내었다.

민감도 분석 결과, 각 변수가 충전성에 영향을 미치는 정도의 상대적인 크기를 나타내면 Eq. (7)과 같다.

$$r_1 > C_0 \gg \alpha > T \ \& \ d_p \quad (7)$$

이로부터, 좁은 간극의 크기( $r_1$ )가 충전성을 결정하는데 가장 큰 영향력을 미치며, 그 다음으로는 간극수의 농도( $C_0$ )라는 것을 알 수 있다. 유도분극 현상은 입자의 음극 표면이 전하의 균형을 유지하기 위해 양이온을 끌어당겨 생성된 이중층이 양이온의 집적을 야기하므로 발생하며, 좁은 간극의 크기( $r_1$ )가 감소하면 상대적으로 이중층에 의한 효과가 증가하므로 충전성이 증가한다(Titov et al., 2002). 또한, 간극수의 염도( $C_0$ )가 증가하면 이중층의 두께가 감소하기 때문에 충전성이 감소하게 된다(Eq. (3) 참고). 이는 Park et al. (2015) 실내실험 연구에서 나타난 농도(salinity)가 증가함에 따라 충전성이 감소하는 결과와 경향성이 잘 일치하고 있다. 한편, 입자 표면 전기전도도에 의한 영향( $\alpha$ )이나 온도( $T$ ) 및 입자의 크기( $d_p$ )는 상대적으로 충전성에 미치는 영향이 매우 작다는 사실을 알 수 있다.

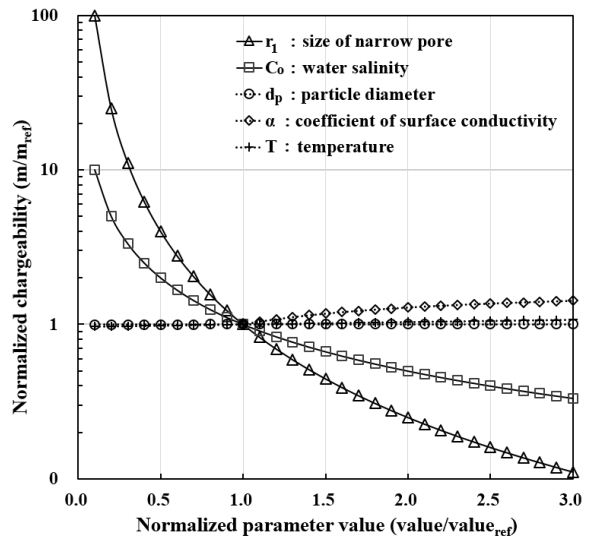


Fig. 3. Parametric Sensitivity Analysis for the Variables Affecting on Chargeability

### 2.4 포화지반에서의 전기비저항 이론

포화된 지반의 간극은 물로 구성되며, 이러한 간극수는 대체적으로 흙 입자에 비해 높은 전기전도도를 가진다. 포화지반의 전기전도도는 지반을 구성하는 흙 입자의 전기전도도, 간극률, 그리고 간극을 채우고 있는 전해질 용액의 전기전도도로 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다(Santamarina et al., 2001).

$$\sigma_{mix} = (1-n)\sigma_p + n\sigma_{el} + (1-n)\frac{\gamma_p}{g}\lambda_{ddl}S_a \quad (8)$$

여기서,  $\sigma_{mix}$ 는 지반 전체의 전기전도도,  $\sigma_p$ 는 흙 입자 자체의 전기전도도,  $\sigma_{el}$ 는 간극수의 전기전도도,  $n$ 은 간극률,  $\gamma_p$ 는 흙 입자의 단위중량,  $g$ 은 중력가속도,  $\lambda_{ddl}$ 은 흙 표면의 전기전도도, 그리고  $S_a$ 는 흙 입자의 비표면적이다. Eq. (8) 우변은 차례대로 흙 입자의 전기전도도, 간극수의 전기전도도, 그리고 점토 입자의 이중층 효과에 관한 항을 나타내고 있다. 일반적으로 흙 입자 자체의 전기전도도는 전해질 용액의 전기전도도에 비해 매우 작아 무시할 수 있다. 또한 이중층 효과가 없는 모래 또는 실트의 경우나, 간극수가 바닷물인 경우 전해질 용액의 농도가 상대적으로 높아 이중층 효과가 작아지므로 포화된 지반의 전기전도도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{mix} = n\sigma_{el} \quad (9)$$

전기전도도는 전기비저항의 역수이므로 Eq. (9)는 다음과 같이 전기비저항에 관하여 나타낼 수 있다.

$$\rho_{mix} = \frac{\rho_{el}}{n} \quad (10)$$

Eq. (10)으로부터, 포화지반의 전기비저항에 영향을 미치는 주요 변수는 간극률과 간극수의 전기비저항이며, 간극률이 증가할수록 지반의 전기비저항은 작아지며, 간극수의 전기비저항이 증가할수록 지반 전체의 전기비저항이 증가한다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실내 실험 준비

#### 3.1 토조와 암석

지반을 모사하여 암반의 상태가 충전성과 전기비저항에 미치는 영향을 살펴보기 위해 토조를 제작하였다(Fig. 4). 1.5 cm 두께의 비전도체인 폴리카보네이트 토조를 제작(500 mm×500 mm×200 mm (내측 크기))하였으며, 중심 높이에서 상하단의 분리가 가능하여 암석 파쇄상태를 쉽게 모사할 수 있도록 하였다. 암반은 사암(sand stone)(비중: 2.37~2.45 t/m<sup>3</sup>, 압축강도: 123~139 MPa)을 사용하였으며, 파쇄대를 모사하기 위해 사암을 동일 크기(30 mm×30 mm×200 mm)로 잘게 절단하여 암반 내 절리를 모사하였다. 절리 내 가우지 모사 및 복합지층 실험에서는 점토를 함께 사용하였다. 하단의 사암은 기반암을 모사하였으며 탐사 심도를 충분히 초과하는 두께로 제작하였다. 사용된 암석은 24시간 이상 물 속에 담그어 포화시킨 후 사용하였다.

#### 3.2 전극 배열과 실험 조건

전극은 직경 5 mm의 원기둥형 금속으로 측정 전위가 높게 형성되어 유도분극 효과가 잘 나타나도록 웨너배열을 사용하였다. 실내 실험은 파쇄암반의 상태에 따른 영향을 살펴보기 위해 절리 틈새 크기를 변화하여 파쇄암반의 간극률에 따른 변화를 살펴봄과 동시에 간극 내 점토 가우지 유무 및 담수와 해수로 포화된 지반의

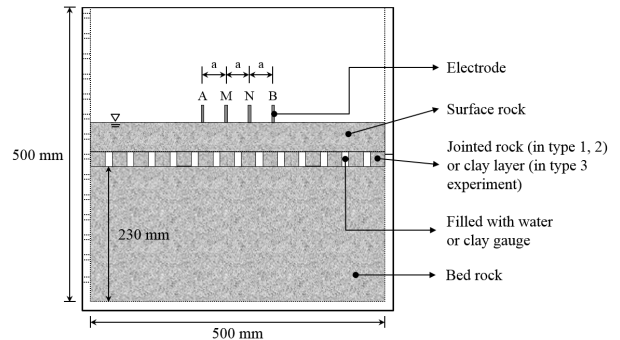


Fig. 4. Model Test Apparatus Modelling Rock Fractured Zone Within Intact Rock

Table 1. Types of Experimental Condition

		Type 1	Type 2	Type 3
Variable	Rock	Joint aperture (with/without clay gouge)	Location of jointed zone, joint aperture	Clay layer thickness (with/without surface rock) (in multi layered rocks)
	Pore water	Tap/sea water		Tap water
Rock (soil) type		Sand stone, clay (gouge or layer)		
Electrode array		Wenner ( $\overline{AM} = \overline{MN} = \overline{NB} = 6 \text{ cm}$ )		
Measured data		Resistivity and chargeability (time domain IP)		

경우를 함께 살펴보기 위한 Type 1 실험과, 표층사암의 두께를 변화하여 파쇄대가 위치하는 깊이에 따른 결과를 살펴보기 위한 Type 2 실험을 실시하였다. 또한, 충전성이 크게 차이가 나는 점토층과 사암이 함께 구성하고 있는 복합지층의 경우 점토층의 두께 변화에 따른 영향을 살펴보았다(Type 3 실험)(Table 1).

Type 1~Type 3 실험 모두 공통적으로 토조 하단에 230 mm 높이의 사암으로 기반암을 모사하였으며, 기반암 위에서 실험 Type 에 따라서 잘게 절단된 사암, 표층사암 및 점토를 이용하여 절리 틈새 크기, 절리대 위치 변화 및 복합지층을 각각 모사하여 실험을 실시하였다.

### 3.3 측정 장비와 설정

유도분극 충전성 및 전기비저항을 측정하기 위해 Advanced Geoscience Inc.사의 Supersting R8/IP를 사용하였다. 측정모드를 RES/IP로 설정하여 전기비저항과 시간영역 충전성을 함께 측정하였다. 모든 실험은 5회 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 축소 실내 실험이므로 최대 유입 전류는 200 mA로 설정하였으며, 감소 전위의 측정 지속시간은 2초로 하였다. Total IP 값을 충전성 수치로 활용하였다.

### 3.4 경계 영향 검토

토조 경계가 전류 흐름에 미치는 영향을 살펴보고 실험에 사용할 전극간격을 선정하기 위해, 토조에 수돗물을 채우고 전극을 정중앙에서부터 각각 평행 및 수직방향으로 1 cm 씩 이동시키며 전극위치에 따른 전기비저항을 측정하였다(Fig. 5). 전극배열은 전극간격( $a$ )이 4, 5, 6 cm인 세 가지 경우로 나누어 웨너배열(wenner array)을 사용하여 측정을 실시하였다. 위치에 따라 측정된 전기비저항은 전극이 정중앙에 위치한 경우에 측정된 전기비저항으로 나누어 정규화하여 나타내었다.

경계 영향을 살펴보기 위한 실험결과, 전극이 토조 벽면 경계에 가까워질수록 경계조건이 전류흐름에 영향을 주어 전기비저항이 증가하였다(Fig. 6). 전극 배열과 나란한 방향(좌측)으로 전극을 이동시키며 전기비저항을 측정하는 경우 약 6 cm 까지 전기비저항

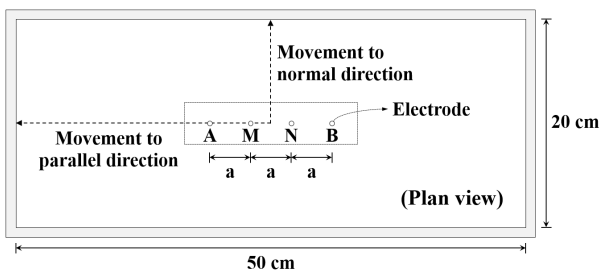


Fig. 5. Measuring Resistivity by Moving the Electrode for Checking Boundary Effect

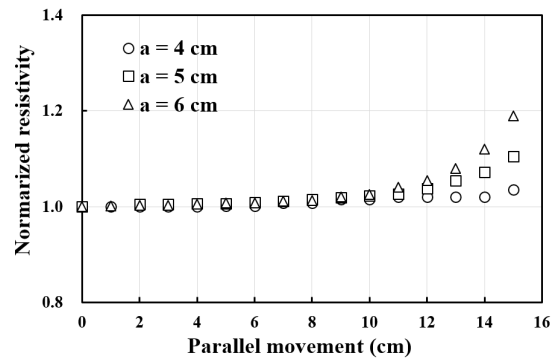
변화가 나타나지 않았으며, 그 이후에는 이동에 따라 서서히 값이 증가하다가 경계조건에 다다르게 되면 급격히 값이 증가하였다. 전극 배열에 수직인 방향으로 전극을 이동시키는 경우 약 2 cm 까지 전기비저항 변화가 없었으며, 좌방향 이동시와 마찬가지로 경계조건에 이를수록 전기비저항이 높아졌다. 그러나 수직 방향으로 이동하는 경우가 경계와 가까워짐에 따른 전기비저항 증가량이 상대적으로 크게 나타났다. 또한 웨너배열 간격( $a$ )이 클수록 경계 영향으로 인한 전기비저항 증가량이 더욱 크다는 사실을 알 수 있다. 그러나 세 가지 간격( $a$ ) 모두 전기비저항의 증가가 나타나기 시작하는 위치는 유사하게 나타났다.

이 실험 결과로부터, 세 가지 전극간격 모두 토조 정중앙에서는 경계 영향이 없는 것으로 나타났으며, 가장 큰 간격을 가지는  $a=6$  cm 웨너배열을 선정하여 실내실험을 수행하였다.

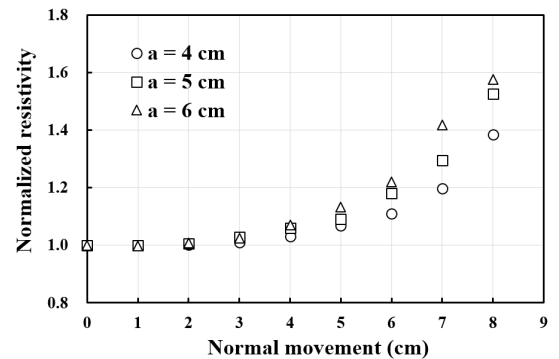
## 4. 실내 실험

### 4.1 암반 구성 물질의 기본적인 특성

실험에서 암반(또는 파쇄암반)을 구성하는데 사용된 물, 점토, 사암(intact) 각각의 물질이 가지고 있는 충전성과 전기비저항을 측정하여 나타내었다(Table 2). 웨너배열( $a=6$  cm)을 사용하여



(a) Movement to Parallel Direction



(b) Movement to Normal Direction

Fig. 6. Results of Boundary Effect Assessment

담수(tap water)와 해수(35% 염도) 포화 조건에서 각각 측정하였다.

Table 2에 나타난 암반 구성 물질들의 충전성을 살펴본 결과, 사암의 충전성이 점토보다 9배 이상(수돗물 포화 시) 크게 나타났다. 이로부터 사암의 좁은 간극의 크기( $r_1$ )가 점토보다 훨씬 작을 것으로 판단된다. 또한, 충전성은 해수로 포화되어 간극수 염분의 농도가 증가하면 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 농도( $C_0$ )가 증가하면 충전성이 감소하는 Fig. 3에 나타난 경향과 잘 일치하고 있다. 한편, 물질의 전기비저항을 살펴보면, 사암의 전기비저항이 점토나 물에 비해 매우 크게 나타나는데 이는 사암의 간극률( $n$ )이

매우 작기 때문으로 보인다. 또한, 모든 물질은 해수로 포화되는 경우 간극수 전기비저항( $\rho_{cl}$ )이 작아지므로 측정되는 전기비저항이 감소한 것으로 판단된다(Eq. (10) 참고).

4.2 절리 틈새 크기와 간극수 염도에 따른 실험(Type 1)

이 실험은 담수 또는 해수로 암반이 포화된 경우에 암반의 파쇄정도가 충전성과 전기비저항에 미치는 영향을 살펴보았다. 암반의 파쇄상태 및 해수 침투 여부를 파악하는데 유도분극 탐사(보통 전기비저항 탐사를 동반함)가 유용하게 활용될 수 있는지 그 가능성

Table 2. Characteristics of the Materials Used in Experiments (Water-Saturated Condition)

Saturated water		Water		Clay		Sand stone	
		Tap water	Sea water	Tap water	Sea water	Tap water	Sea water
Chargeability (mV/V)	Average	1.02	0.45	1.25	0.88	9.71	4.83
	Range	0.75 ~ 1.62	0.41 ~ 0.56	0.97 ~ 2.16	0.80 ~ 1.00	4.90 ~ 13.06	3.63 ~ 5.11
Resistivity ( $\Omega$ m)	Average	61.13	2.23	70.13	10.30	287.02	40.04
	Range	59.02 ~ 63.36	1.78 ~ 2.37	66.93 ~ 74.27	9.88 ~ 10.51	183 ~ 349	37.41 ~ 42.00

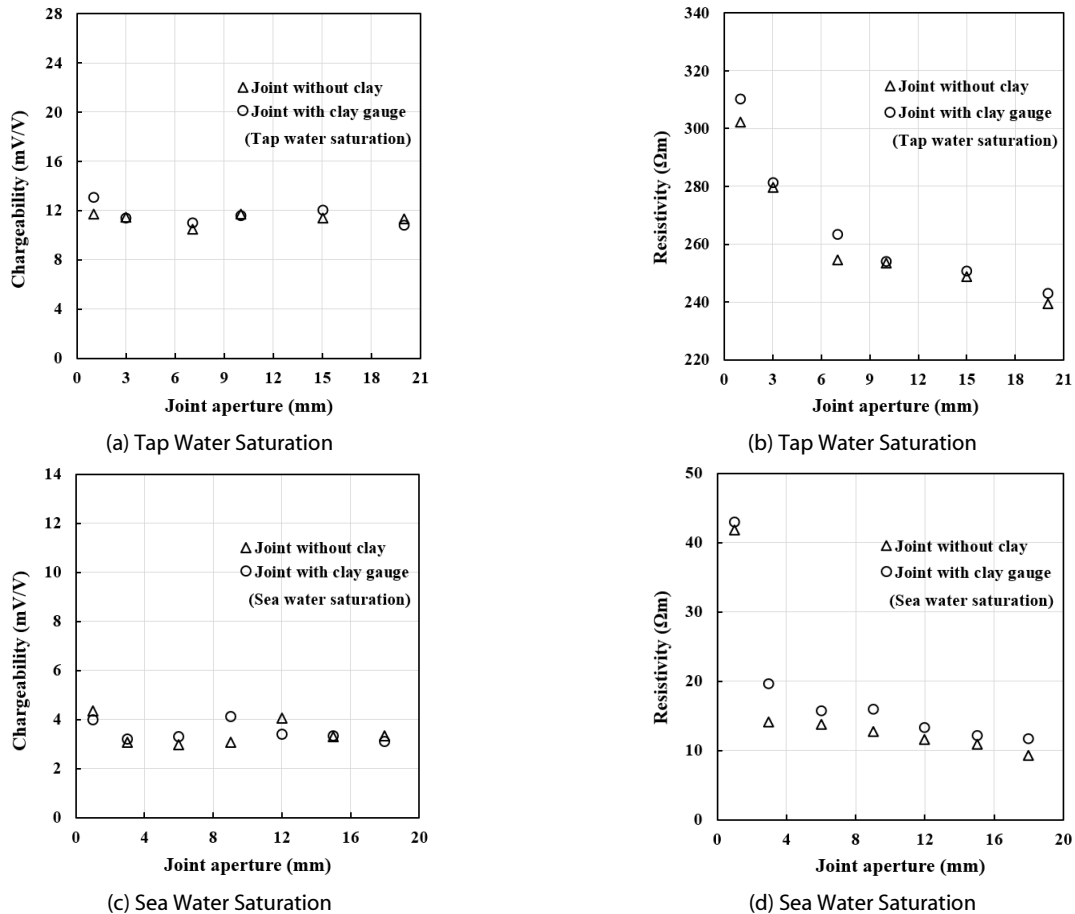


Fig. 7. Measured Chargeability and Resistivity by Changing Joint Aperture Size with/without Clay Gauge

을 파악하기 위함이다. 실험에서는 암반 파쇄정도에 따라 변하는 암반의 간극률을 절리 틈새의 크기를 변화시켜 모사하였다. 또한, 절리 틈새 내 점토 가우지의 충전 유무에 따라 경우를 나누어 실험하였다. 표층 암석(surface rock)은 1 cm 두께를 사용하여 절리 틈새 크기 변화에 따른 영향이 잘 나타나도록 하였다(더 두꺼운 표층 암석은 Type 2 실험에서 절리대 위치 깊이에 따른 변화를 살펴보기 위해 사용되었다). 실험 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

먼저 충전성에 관한 실험 결과(Figs. 7(a) and 7(c)), 담수 조건에서 충전성은 절리 틈새 크기가 증가함에 따라 10.49~13.06 mV/V 범위 내에서 증가 또는 감소하는 경향 없이 비교적 일정한 값을 나타내었으며, 점토 충전에 따른 영향은 크지 않았다. 해수조건에서도 비슷하게 충전성은 2.98~4.35 mV/V 범위 내에서 비교적 일정하게 나타났으며 점토 가우지로 인한 영향은 나타나지 않았다. 충전성이 절리 틈새 크기 변화 및 점토 가우지 유무와 관계없이 일정하게 나타난 것은, 물과 점토에 비해 높은 충전성을 가지는 표층사암의 좁은 간극 크기( $r_1$ )에 의해 충전성이 결정되기 때문이라고 추측된다(정확하게 그 원인을 밝히고자 4.4절에서 복합지층에 대한 Type 3 실험을 실시하였다). 염도에 따른 비교에서는, 충전성은 해수로 포화된 경우 담수 포화 시 충전성의 약 1/3 수준으로 감소하였다. 이는 농도( $C_0$ )가 증가하면 충전성이 감소하는 Fig. 3에 나타난 경향과 잘 일치하고 있다. 한편, 전기비저항의 경우(Figs. 7(b) and 7(d)), 절리 틈새 크기가 클수록 전기비저항이 뚜렷하게 감소하였다. 염도에 따른 비교에서는, 담수 포화의 경우에 비해 해수로 포화된 경우에는 낮은 간극수의 전기비저항( $\rho_{el}$ )으로 인해서 측정되는 전기비저항 값의 범위가 매우 낮게 나타났다. 또한, 담수와 해수 포화의 경우 모두에서 점토 충전 시 전기비저항이 다소 증가하였는데, 이는 담수와 해수조건에서 각각 포화된 점토의 비저항이 담수나 해수의 비저항보다 다소 높기 때문이다(Table 2 참고).

다시 말해 암반 파쇄로 발생한 간극을 채우는 물질의 전기비저항이 상승했기 때문이라고 판단된다.

### 4.3 절리대 위치 깊이에 따른 실험(Type 2)

이 실험에서는 절리대가 위치한 깊이(심도)가 충전성과 전기비저항에 미치는 영향을 살펴보았다. 탐사를 통해 파쇄대의 위치를 파악하는 것 또한 매우 중요하기 때문이다. 절리대 상부에 얽은 표층사암의 두께를 변화시켜 절리대가 위치한 깊이(심도)를 달리하였으며, 수돗물 포화상태에서 충전성과 전기비저항을 측정하였다(Fig. 8). 표층사암은 1, 2, 3, 6 cm 두께를 사용하였다. Fig. 8(a)는 절리대 위치 깊이별 절리 틈새 크기에 따라 측정된 충전성을 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 측정된 전기비저항을 나타내고 있다.

먼저 충전성에 대한 실험 결과, 절리 틈새 크기가 증가함에 따라 절리대 깊이별 충전성은 앞의 4.2절의 실험 결과와 유사하게 일정한 값을 나타내었다. 이러한 결과가 앞의 4.2절에서의 판단과 같이 표층사암의 좁은 간극 크기( $r_1$ )에 의해 충전성이 결정되기 때문이라면, 깊이를 모사하기 위한 서로 다른 표층사암의 특성 차이에 따라 충전성이 다르게 나타난 것으로 보인다(그러나 정확한 원인은 4.4절에서 복합지층에 대한 Type 3 실험을 통해 밝혔다). 전기비저항의 경우, 절리대 위치가 깊어질수록 전기비저항은 높게 나타났다. 다시 말해서, 절리대가 전극으로부터 멀어질수록 간극률이 높은 절리대가 야기하는 전기비저항 감소효과가 줄어들었다. 또한, 4.2절에서와 같이 절리 틈새 크기가 증가함에 따라 전기비저항이 감소하였는데, 절리대 위치가 깊어질수록 그 감소폭이 작게 나타났다. 이러한 결과는, 동일한 간극률 변화에도 전극과 더 가까운 위치에서의 변화는 더욱 민감하게 전기비저항에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

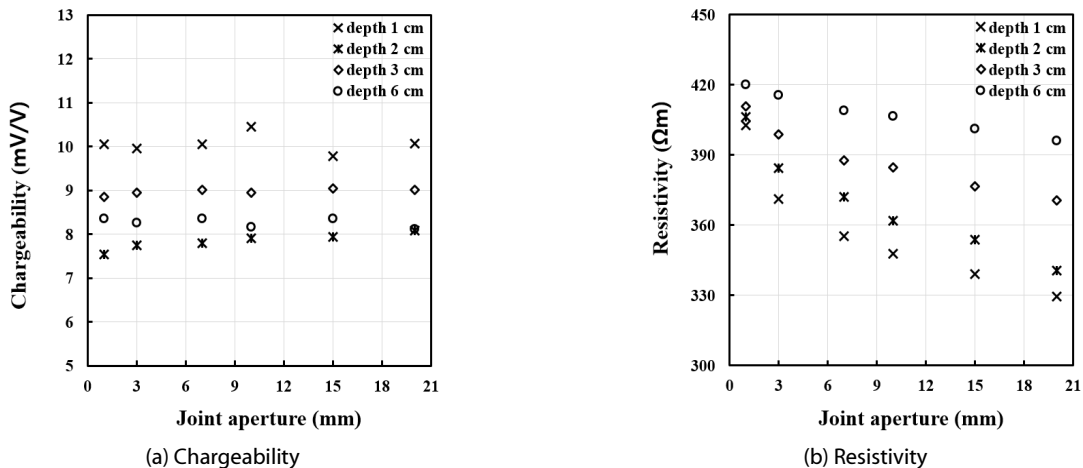


Fig. 8. Measured Value by Varying the Location of Fractured Zone

#### 4.4 충전성이 다른 복합지층에서의 실험(Type 3)

많은 경우 지반의 상부는 암반의 풍화작용으로 인해 토사가 되어 존재하고 하부의 암반과 함께 복합지층을 이루고 있다. 이러한 복합지층의 경계를 파악하는 것은 지반조사의 중요한 과제 중 하나이다. 따라서 본 실험은 복합지층의 경계를 파악하는데 충전성의 활용 가능성을 살펴보기 위해 수행되었다. 한편, 앞의 4.2, 4.3절 실험(Type1, Type2) 결과에서, 충전성은 절리 틈새 크기나 절리대 위치 깊이에 따른 변화 없이 지속적으로 일정한 값을 나타내었다. 본 Type 3 복합지층에서의 실험은 앞선 실험에서 충전성이 일정하게 나타나는 결과의 원인을 정확히 파악하고자 아래와 같이 가설을 세우고 무엇이 옳은지를 알아내기 위한 검증실험이 될 수 있다.

- 가설 1. 충전성은 상대적으로 가장 좁은 크기의 간극( $r_1$ )에 의해 결정되기 때문에(Eq. (7) 참고), 하부 파쇄대의 존재와 무관하게 충전성이 높은 표층사암이 충전성을 결정하므로 표층사암의 충전성이 일정하게 나타났다.
- 가설 2. 측정된 충전성은 표층사암 뿐만 아니라, 하부 파쇄대의 충전성도 반영하여 나타나고 있으나, 모사한 파쇄대의 구성에서 간극을 채우는 점토나 물에 비해 충전성이 높은 잘게 절단된 사암이 파쇄대의 충전성을 결정하여, 결과적으로 파쇄대도 사암의 충전성이 측정되는 것이다. 다시 말해, 파쇄대의 충전성 또한 사암(절단된)이 결정하여 일정한 충전성이 나타나는 것이다.

결국, 하부 지층의 충전성이 함께 측정이 되는지 아닌지에 차이가 있다. 이에 따라, 어느 것이 맞는지 확인하고자 충전성이 서로 다른 복합지층에서의 Type 3 실험을 하였다. 실험은 표층사암 하부에 충전성이 상대적으로 낮은 점토층을 모사하고 점토층 두께

에 따라 충전성과 비저항을 측정하였다(Fig. 9(a)). 이 경우에 만약 실험 결과가 점토층 두께가 증가함에 따라서 여전히 일정한 충전성을 나타낸다면 표층사암 하부 암반의 충전성이 측정된다는 두 번째 가설이 옳지 않다는 사실을 알 수 있을 것이며, 표층사암의 좁은 간극( $r_1$ )이 충전성을 결정한다는 첫 번째 가설이 옳다고 볼 수 있을 것이다. 또한, 첫 번째 가설이 옳은 경우에 추가 실험으로 반대로 충전성이 높은 사암이 하부에 존재하고 표층에 충전성이 낮은 점토층이 존재하는 경우 점토층의 두께에 따라 측정되는 충전성과 비저항을 살펴보았다(Fig. 9(b)). 왜냐하면, 이러한 반대의 경우에는 충전성 탐사의 활용성이 있는지 가능성을 살펴보기 위해서이다.

표층사암 하부에 존재하는 점토층의 두께에 따른 실험 결과(Figs. 10(a) and 10(b)), 점토층 두께가 증가함에 따라 충전성은 일정하게 나타났으며, 전기비저항은 감소하였다. 이로부터 충전성은 표층사암에 의해 결정된다는 첫 번째 가설이 옳다는 것을 알 수 있다(반면, 전기비저항은 하부 지반의 상태를 잘 반영하고 있다). 이로부터 충전성은 Eq. (7)에 나타난 바와 같이 상대적으로 가장 좁은 간극( $r_1$ )이 충전성을 결정하는 변수가 된다는 것을 잘 입증하고 있다고 판단된다. 낮은 충전성을 가진 점토층이 상부에 존재하는 경우에 대한 실험결과(Fig. 10(c) and 10(d)), 충전성과 전기비저항 모두 점토층이 두꺼워짐에 따라 감소하였다. 이 사실로부터, 전하가 흐르는 각각의 경로(current flow line)에서, 경로가 점토층 내부에 형성되는 경우 점토의 충전성이 측정이 되고, 전류흐름 경로가 더 멀리 형성되어 사암에 도달하는 경우 사암의 높은 충전성이 측정되는 것으로 판단된다.

Type 3 실험으로부터, 충전성은 전하가 암반 내부를 흐르는 각각의 경로들에 의해서 결정되며, 각 경로의 충전성은 각 경로 상에 존재하는 좁은 간극( $r_1$ )에 의해 결정된다고 판단된다(Fig.

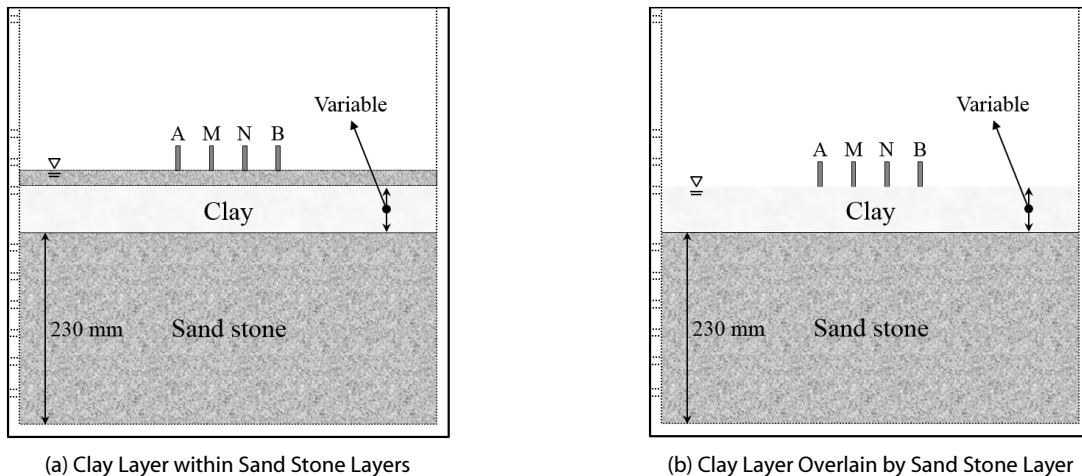


Fig. 9. Measuring Chargeability and Resistivity of Multi Layer Systems



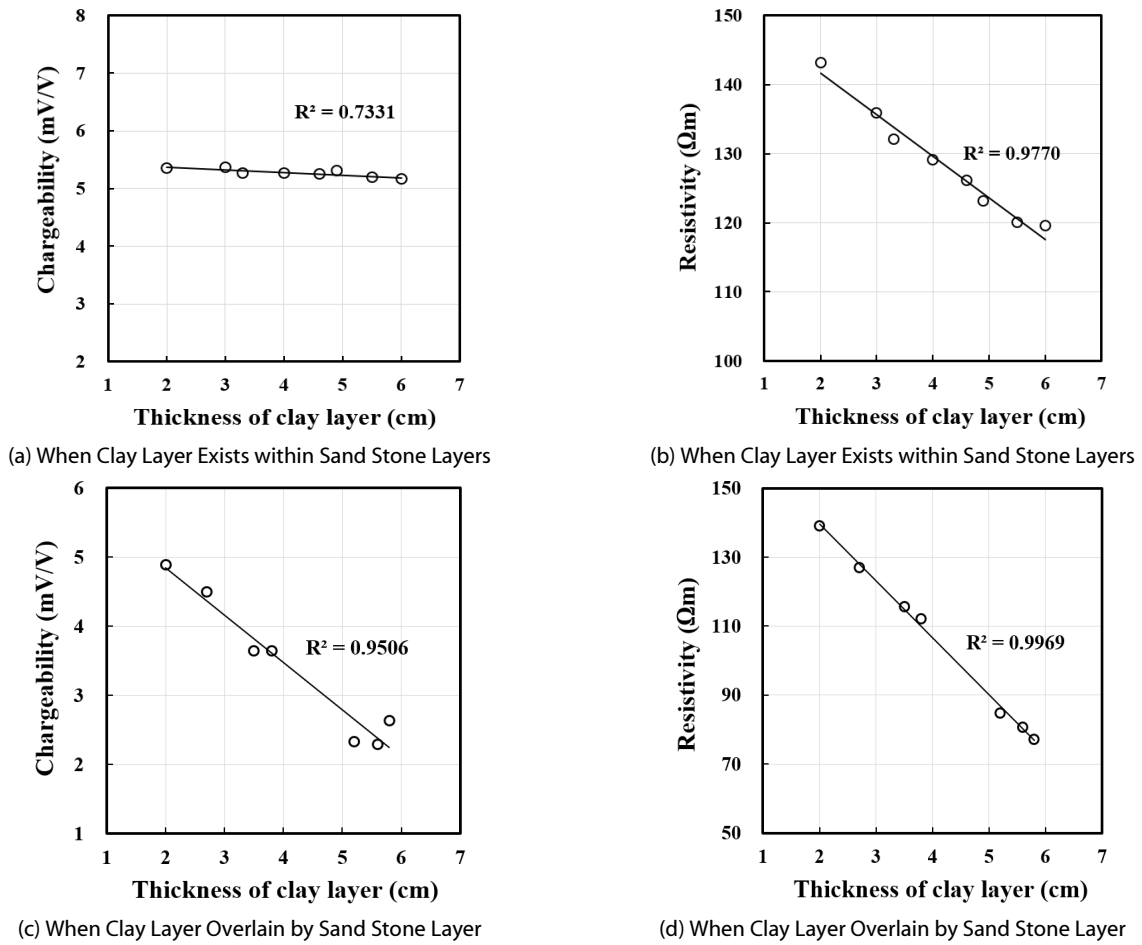


Fig. 10. Measured Resistivity and Chargeability with Increase of the Clay Thickness

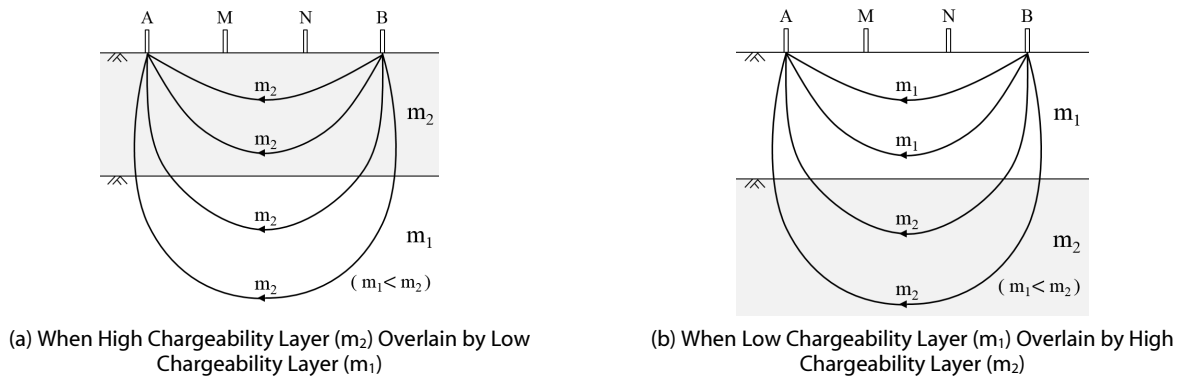


Fig. 11. Measured Chargeability At Each Electrical Current Flow Line

11). 충전성이 높은 사암이 전극에 가까운 상부에 존재하는 경우에는, 모든 경로가 사암을 통과하게 되어 있으므로 사암의 좁은 간극에 의해 충전성이 결정되며(Fig. 11(a)), 반대로 충전성이 낮은 점토가 상부에 존재하는 경우에는 점토 내부를 지나는 경로는 점토의 충전성이, 사암까지 흐름이 도달하는 경로는 사암의 충전성이 반영

이 되기 때문에 점토두께가 증가함에 따라 충전성이 감소하는 결과를 나타낸 것으로 판단된다(Fig. 11(b)). 결국 충전성은 Eq. (7)에 나타난 바와 같이 상대적으로 가장 좁은 간극의 크기( $r_1$ )가 충전성을 결정한다는 사실을 잘 입증하고 있다고 판단된다.

## 5. 결론

이 연구에서는 암반 상태가 유도분극에 의한 전하 충전성과 전기비저항에 미치는 영향을 살펴보았다. 이론 연구에서 충전성과 이에 영향을 미치는 변수들 사이의 관계식을 유도하고, 변수 민감도 분석을 통해 충전성 주요 영향 인자를 파악하였다. 실내 실험에서는 암반 절리대를 축소 모사하여, 절리 틈새 크기와 간극수 염도 및 절리대 위치 변화에 따라 충전성과 전기비저항을 측정하였다. 또한, 충전성에 대한 실험결과의 원인을 정확히 파악하고자 복합지층을 구성하여 점토층 두께 변화에 따른 영향을 살펴보았다. 이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 충전성 매개변수에 대한 민감도 분석에서, 충전성에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자가 좁은 간극의 크기( $r_1$ )라는 결과로부터, 사암의 충전성이 점토의 충전성보다 매우 높게 나타나는 것은 토사보다 암석이 좁은 간극의 크기( $r_1$ )가 훨씬 작기 때문이라고 판단된다.
- (2) 절리 틈새 크기 및 절리대 위치 변화에 따른 실험으로부터, 전기비저항은 탐사영역에 존재하는 물질들의 비저항과 그것이 차지하는 부피에 의해 결정되는 것으로 보인다. 절리 틈새를 상대적으로 낮은 비저항을 가진 물 또는 점토가 채우면 비저항이 감소하며, 틈새 크기가 증가하여 저비저항 물질이 차지하는 부피가 증가하여도 감소하게 된다. 반면, 절리대가 전극으로부터 멀어지면 탐사영역에 상대적으로 비저항이 큰 신선암이 차지하는 부피가 증가하므로 비저항이 증가하였다.
- (3) 간극수 염도에 따른 실험으로부터, 전기비저항 탐사에서 지반이 해수로 포화되는 경우 낮은 비저항을 나타낼 것이나, 이것이 해수로 인한 것인지 지반 간극률 증가로 인한 것인지 판단이 어려운 것이다. 그러나 충전성은 암반 파쇄특성이나 간극률의 문제가 아니라 좁은 간극( $r_1$ )에 의해 결정되며 간극수의 염도가 증가함에 따라 낮아지므로, 지반 해수 침투 여부를 판단하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.
- (4) 복합지층에서의 실험결과로부터, 암반 전체의 충전성은 암반 내 전하가 흐르는 각각의 경로(current flow line)에서 결정되는 충전성이 복합적으로 반영되어 나타나며, 각 경로에서의 충전성은 경로 상의 좁은 간극( $r_1$ )에 의해 결정될 것으로 판단된다.
- (5) 또한, 복합지층에서 전기비저항 탐사 시 탐사심도 증가(전류 전극 간격 증가 시)에 따라 비저항이 증가하는 경우 암반상태가 양호하여 간극률이 작아서 때문인지 아니면 상대적으로 단단한 다른 암종이 존재하기 때문인지 그 원인을 분명하게 알 수

없으나, 충전성 탐사를 동반하면 이를 좀 더 명확히 구분할 수 있을 것이다. 탐사심도가 증가함에 따라서 충전성이 증가한다면 상대적으로 단단한 암종이 하부에 존재한다고 예상할 수 있을 것이다. 충전성은 암반의 파쇄상태(간극률 변화)보다 좁은 간극( $r_1$ )에 의해 변화하기 때문이다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 “고수압 초장대 해저 터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(과제번호: 13건설연구 T01)” 과제 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

## References

- Fridrikhsberg, D. A. and Sidorova, M. P. (1961). “Issledovanie svyazi yav-lenia vyzvannoi polarizatsii s elektrokineticheskimi svoistvami kapi-llarnyh sistem (A study of the relationship between the induced polarization phenomenon and the electrokinetic properties of cap-illary systems).” Vestnik Leningradskogo Universiteta. Seria Chimia 4, pp. 222-226 (in Russian).
- Marshall, D. J. and Madden, T. K. (1959). “Induced polarization, a study of its causes.” *Geophysics*, Vol. 24, No. 1, pp. 790-816.
- Park, J. J., Lee, K. H., Lee, S. W., Ryu, Y. M. and Lee, I. M. (2015). “Utilization of induced polarization for predicting ground condition ahead of tunnel face in subsea tunnelling: laboratory test.” *Journal Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 383-392 (in Korean).
- Roy, K. K. and Elliott, H. M. (1980). “Resistivity and IP survey for delineating saline water and fresh water zones.” *Geoexploration*, Vol. 18, pp. 145-162.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001). Soils and waves-particulate materials behavior, Characterization and Process Monitoring, John Wiley and Sons, New York, pp. 340-341.
- Schlumberger, C. (1920). Etude sur la prospection electrique du sous-sol. Gauthier-Villar et Cie, Chap. VIII, Gauthier-Villars et Cie, Paris, pp. 70-72.
- Seara, J. L. and Granda, A. (1987). “Interpretation of I.P. time domain/resistivity sounding for delineating sea-water intrusions in some coastal areas of the northeast of Spain.” *Geoexploration*, Vol. 24, pp. 153-167.
- Titov, K., Kemna, A., Tarasov, A. and Vereecken, H. (2004). “Induced polarization of unsaturated sands determined through time domain measurements.” *Vadose Zone Journal*, Vol. 3, pp. 1160-1168.
- Titov, K., Kormarov, V., Tarasov, V. and Levitski. (2002). “Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands.” *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 50, pp. 417-433.