

# 인공 암반절리의 조립토 충전물 혼합비에 따른 전기비저항 특성 분석

도해주<sup>1</sup> · 오태민<sup>2\*</sup> · 이항복<sup>3</sup>

<sup>1</sup>비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수

<sup>3</sup>비회원, 한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부 심층처분환경연구센터 책임연구원

## Analysis of electrical resistivity characteristics according to the mixing ratio of coarse fillings in artificial rock joint

Haeju Do<sup>1</sup> · Tae-Min Oh<sup>2\*</sup> · Hangbok Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

<sup>2</sup>Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

<sup>3</sup>Principal Researcher, Deep subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

\*Corresponding Author : Tae-Min Oh, geotaemin@pusan.ac.kr

### Abstract

Monitoring technology based on electrical resistivity is widely used for non-destructive data collection and health analysis of underground structures and tunnels. Vulnerable sections such as fault zone generates many problems during construction of the tunnel. These problems cause displacement and stress changes of the ground. Therefore, it is necessary to predict the state of the fault zone section to ensure the mechanical stability of the underground structure. Monitoring the size of joints and the porosity of the fillings is essential for rocks. Previous studies have not considered the variety of fillings in rock joints. In this study, electrical resistivity tests were conducted according to the particle mixing state of the sandy fillings. When the size of fillings is decreased at the constant porosity, the electrical resistivity tends to increase. The results of this study are expected to be useful as basic electrical resistivity data for predicting the ground conditions and evaluation of the ground behavior that is containing sandy fillings in the rock joint for tunnels.

**Keywords:** Fault fracture zone, Corse fillings, Mixing of filling particles, Electrical resistivity

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
25(2)141-155(2023)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.2.141>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

Received March 6, 2023  
Revised March 17, 2023  
Accepted March 18, 2023



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

전기비저항을 이용한 모니터링 기술은 비파괴적으로 데이터 수집이 가능하며, 터널 및 지하구조물의 건전도 평가를 목적으로 활발히 활용되고 있다. 터널 시공에서 단층파쇄대와 같은 취약 구간은 지반의 변위 발생 및 응력 변화 등의 문제를 일으킨다. 따라서 터널 구조물의 역학적 안정성 확보를 위해 단층파쇄대 구간의 절리 상태 예측이 필요하다. 절리의 크기 및 충전물의 공극률 모니터링은 암반의 절리 상태 예측을 위해 필수적이다. 하지만 기존 연구에서는 자연상태의 암반절리 내 입자 크기의 다양성을 고려하지 못한 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 암반절리 상태 충전물의 조립도 입자 혼합상태에 따른 전기비저항 실험을 수행하였다. 실험 결과, 동일한 공극률 조건에서 충전물의 크기가 작을수록 전기비저항 값이 증가하는 경향성을 확인하였다. 본 연구결과는 터널 구간 내 암반절리 내 조립도 충전물을 포함하고 있는 지반의 전방 예측 및 거동 평가를 위한 전기비저항 기초자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

**주요어:** 파쇄대, 조립도 충전물, 충전물 입자 혼합, 전기비저항

## 1. 서론

최근 사회기반시설 확충에 따른 지하철, 도로, 철도 등 터널구조물의 건설이 증가되고 있다. 터널구조물은 대개 환경변화가 적은 지하에 건설되어 구조적으로 지상 구조물에 비해 안전한 것으로 알려져 있다. 그러나 터널구조물과 관련된 사고와 안전에 관한 문제는 심각한 재난으로 연결되기 때문에 체계적인 유지관리가 필요하다. 또한 공사 중 계측기기를 활용하여 구조물의 지속적인 장기 모니터링이 수행되는 것이 가장 바람직하나, 계측비용 및 센서의 내구성이 문제점으로 부각되고 있다(Woo and Lee, 2012).

터널 건설 구간 중 단층파쇄대와 같은 취약구간은 단층면의 이완 및 기하학적 변화를 야기시킨다. 이로 인해 터널구조물에 변위발생과 응력 변동 등의 문제가 발생될 수 있으며, 이에 대한 유지관리계측 중요성이 대두되고 있다(Woo, 2003). 특히 단층파쇄대는 오랜 시간에 걸친 파쇄, 마모, 전단 등의 복합적 풍화 과정에 의해 현재까지도 그 거동 및 파괴 메커니즘을 정확하게 예측하기가 어렵다. 터널 굴착 시 단층파쇄대와 같은 불량구간은 시공단계 중 붕괴 사고를 유발할 뿐만 아니라 터널 보강에도 어려움을 발생시킨다(Shin et al., 2013). 따라서 단층파쇄대 구간의 절리 상태 평가 및 모니터링은 터널의 시공안정성 및 시공 후 상부 지반의 안정성 확보에 매우 필수적이다.

전기비저항을 이용한 모니터링 기술은 대상물의 손상 없이 특성 분석이 가능하며, 시간에 따른 데이터를 지속적으로 수집할 수 있어 암반절리 상태의 장기 모니터링에 적합하다(Nakatsuka et al., 2010). 지반이 포화상태일 경우, 지반의 전기적 특성은 공극수의 전기적 특성과 물질의 공극 특성(e.g 공극률, 굴곡도, 연결성)에 의해 결정된다. 공극수를 통한 전기전도(전류 흐름)가 입자를 통한 전기전도보다 우세하면, 전기비저항 값은 공극수의 전기비저항 값에 비례한다. Archie (1942)는 포화된 조건에서 공극률과 전기비저항의 상관관계를 식 (1)과 같이 도출하였다.

$$\rho_{bulk} = \rho_f n^{-m} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{bulk}$  ( $\Omega \cdot m$ )는 물질의 전체 전기비저항,  $\rho_f$  ( $\Omega \cdot m$ )는 공극수의 전기비저항, 그리고  $n$  (-)은 공극률, 그리고  $m$ 은 고결 지수(cementation factor)를 의미한다. 공극의 연결성이 감소하면  $m$  값은 증가하며, 공극률 변화에 따른 전기비저항 변화 민감도가 증가한다.

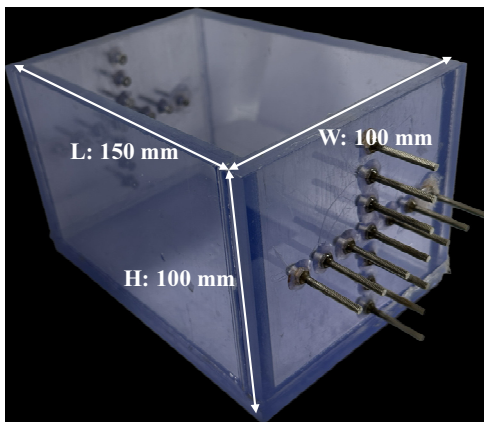
암반절리 표면에서는 암반의 전단파괴로 인한 풍화가 발생한다. 또한 파쇄대 구간의 풍화 및 변질작용에 의하여 절리 충전물 공극률 및 절리 크기가 증가하고, 충전물의 입자 크기가 감소하며 이는 전기비저항 결과에 영향을 미친다(Oh et al., 2015). 따라서 전기비저항 측정 기술을 이용한 단층파쇄대 구간 절리 상태 모니터링 기술 개발을 위해서는 절리 크기, 충전물의 공극률 및 입자 크기 변화에 따른 전기비저항 간의 상관관계를 규명하는 것이 필요하다. 암석은 매우 큰 전기비저항(전기전도도 역수)을 가지기 때문에 포화 암석의 전기비저항은 공극수의 전기비저항 값에 지배된다(Lee and Lee, 2009). 또한 전기비저항 값은 절리 크기 및 공극률과 높은 상관관계를 가진다. 이러한 전기적 특성을 이용하여 단일 절리 특성(절리 크기, 공극률)과 전기비저항 특성간의 상관관계에 관한 많은 연구들이 수행된 바 있다. Charles et al. (2018)은 사암절리 크기에 따른 전기비저항 측정실험을 수행하였으며, 절리 크기가 0.2 mm에서 6 mm로 30배 증가함에 따라 전기비저항 값은 12.5배 감소함을 관찰하였다. Demirel et al. (2018)은 수치해석을 통해 절리 크기에 따른 전기비저항 변화를 분석하였으며, 절리 크기가 1 mm에서 4 mm로 4배 증가함에 따라 전기비저항이 약 2.5배 감소하는 결과를 확인하였다. Lee et al. (2021)은 인공 절리를 제작하여 절리 크기에 따른 전기비저항 측정실험을 수행하였으며, 절리 크기가 1 mm에서 10 mm로 10배 증가함에 따라 전기비저항 값은 4.1배 감소하는 결과를 보고하였다. Oh et al. (2014)은 Ottawa sand의 공극률에 따른 전기비저항을 측정하였으며, 공극률이 0.52에서 0.58로 12% 증가함에 따라 전기비저항 값은 약 19% 감소함을 확인하였다. 그러나 선행연구들은 절리 내 풍화과정 속 조립토 충전물 입자 크기의 다양성을 고려하지 못한 한계를 가진다.

따라서 본 연구에서는 암반절리의 전기비저항 특성을 이용하여 조립토 충전물 혼합 실험을 수행하였다. 절리 내 충전물 시료를 직경 3.0 mm 입자, 0.5 mm 입자 혼합비에 따라 준비하여 시료의 전기비저항 값을 공극률에 따라 분석하였다. 또한, 암반절리 크기에 대한 전기비저항 특성 규명을 위해서 서로 다른 절리 크기에 대한 전기비저항 값을 분석하였다. 본 연구에서 규명된 전기비저항 특성은 터널 및 지하구조물에서 단층파쇄대 구간의 절리 내 조립토 충전물 입자 크기 혼합비 및 절리 크기 예측을 위한 기초 전기비저항 데이터를 제공하고, 향후 전기비저항을 이용한 터널 단층파쇄대 구간의 충전물 입자 특성 평가에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

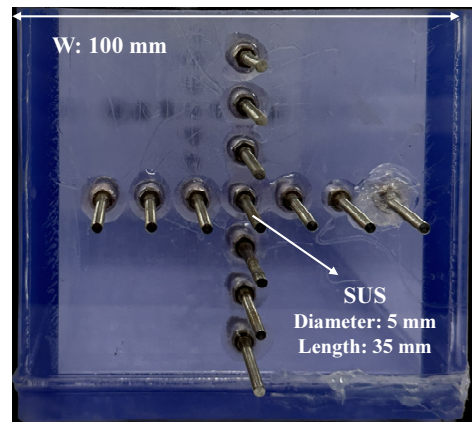
## 2. 실험방법

### 2.1 인공절리 및 충전물 시편 준비

Fig. 1은 본 연구에서 전기비저항 측정 시 사용된 셀을 나타낸다. 실험 셀은 인공 암석절리의 크기 및 충전물 포화상태를 육안으로 관찰하기 위해 투명하게 제작되었다. 전기적 영향을 제거하기 위해 전기비저항  $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 의 PVC (Polyvinyl Chloride)를 사용하였다. 실험 셀의 크기는 각각 길이( $L_{\text{cell}}$ ) 150 mm, 높이( $H_{\text{cell}}$ ) 100 mm, 그리고 폭( $W_{\text{cell}}$ ) 100 mm이다. 전기저항 측정을 위해 셀 양면에 전극을 설치하였다. 길이 35 mm, 직경 5 mm의 스테인레스 전극을 12.5 mm의 간격으로 설치하였다. 전기비저항 측정 시 물질의 경계면 영향을 제거하기 위해 셀 양면의 높이 방향의 전극들 중 중앙에 위치한 총 3쌍의 전극을 사용하였다.



(a) Dimension of cell



(b) Front view of cell and dimension of electrodes

Fig. 1. Test cell

암반절리 모사를 위해 인공 시편(인공 암석, 인공 충전물)과 전도성 유체(공극수)를 사용하였다. Fig. 2는 실험 시 인공 시편 및 인공 충전물을 이용하여 구현된 암반절리 모사체의 각 충전물 조건 별 암반절리 모사체의 윗면 및 옆면을 나타낸다. 인공 암석 및 인공 충전물은 화강암과 모래의 전기비저항이 매우 큰 절연체적 성질 모사를 위해 각각 아세탈(electrical resistivity:  $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ )과 유리구슬(glass bead, electrical resistivity:  $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ )을 사용하였다. 인공 암석 거칠기 및 충전물 형상의 절리 내 유체 및 전류 영향 제거를 위해 3D 프린터로 제작된  $JRC = 0$ 의 인공 암석절리와 완전한 구(sphere) 형태의 인공 조립토 충전물을 준비하였다.

인공 암석의 치수는 전기비저항 측정 셀과의 완전한 접합을 위해 공차를 고려하여 길이 150 mm, 높이 120 mm, 폭 40 mm로 제작되었으며, 인공 충전물의 직경은 조립질 모래의 중간 직경 정도인 3.0 mm, 최소 직경 근사의 0.5 mm로 제작되었다. 아세탈의 비중은 1.41, 유리구슬의 비중은 2.5로 확인되었다. 전기비저항 측정 시 표면 염분 및 유기물 제거를 위해 인공 암석과 충전물 모두 증류수로 세척 후 건조시켰다.

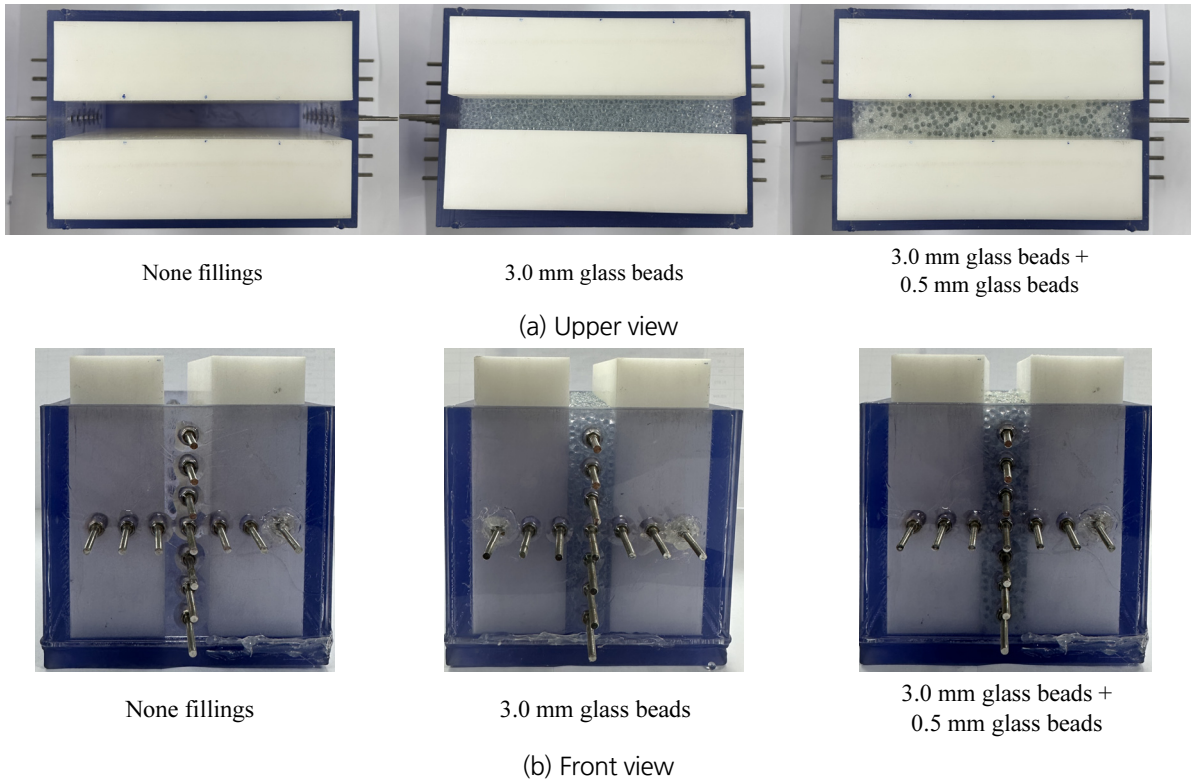


Fig. 2. Upper view and front view of test specimen with different filling conditions

지하 암반 주변 공극수는 미네랄을 다량 함유하고 있어 높은 전도도를 가진다(Abrudan et al., 2016). 따라서 지하 암반절리의 공극수를 모사하기 위해 전도성 유체가 사용되었으며 증류수에 NaCl (99.99%)을 첨가하여 제조되었다. 전도성 유체의 전기비저항 값은 전기전도도 측정장치(Electrical Conductivity meter)를 사용하여 측정하였다.

## 2.2 전기비저항 측정 시스템 및 보정과정

### 2.2.1 전기비저항 실험장치

Fig. 3은 다채널 전기비저항 측정 시스템을 나타낸다. 시스템은 전기저항 값 측정을 위한 LCR meter; 다채널 전기저항 수집을 위한 DAQ (Data acquisition); 데이터 저장을 위한 데이터 저장 장치(Data storage system)로 구성된다. LCR meter (Keysight, 34972A)는 일정 전압을 생성하여 저항 값을 측정한다. LCR meter 사용 시 스위치 (Switch) 기능으로 다채널 측정을 가능케 하는 DAQ (Keysight, E34465A) 내부 슬롯과 단자대(Terminal block)를 연결하여 저항 측정 시 총 3개의 채널에 대한 저항 값을 수집하였다. 온도 조건은  $19.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

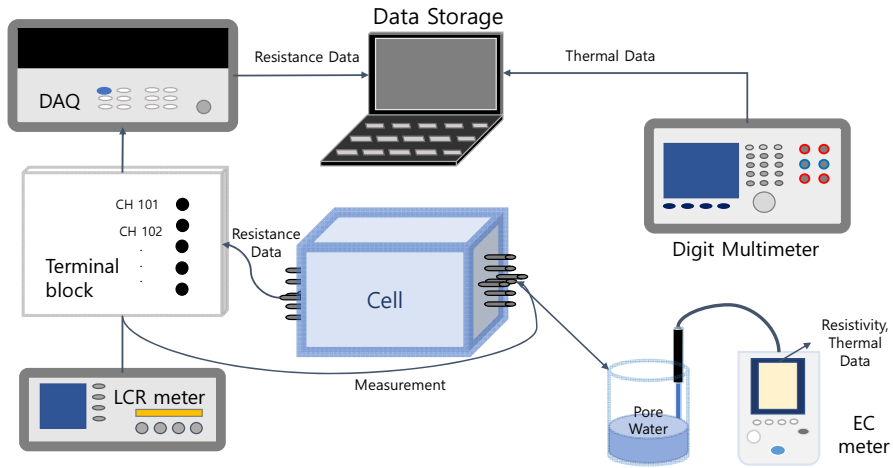


Fig. 3. The system of multichannel electrical resistivity measurement

### 2.2.2 주파수 스위핑

실내 실험에서 전기 저항 측정 시 전하 충전 현상을 통한 전기비저항의 감소를 방지하고자 직류(Direct current) 전압 대신 교류(Alternating current) 전압을 사용하였다(Lofgren and Neretnieks, 2003). 교류 전기장 사용으로 인한 저주파수 대역에서의 분극(polarization) 주파수나 고주파수 대역에서의 공진(resonance) 주파수의 사용으로 측정된 전기저항 값을 전기비저항으로 환산하는 과정에서 오차가 발생한다. 이를 방지하고자 분극 주파수와 공진 주파수를 제외한 주파수 범위에서의 적정 주파수 도출을 위한 주파수 스위핑 실험이 수행되었다.

적정 주파수 결정을 위한 주파수 범위는 본 실험에 사용된 전기비저항 측정장비(LCR meter) 주파수 범위 20 Hz~2,000 kHz로 설정하였으며, 전압은 1 Voltage를 사용하였다. 공극수 전기비저항 값의 영향 고려를 위해 전

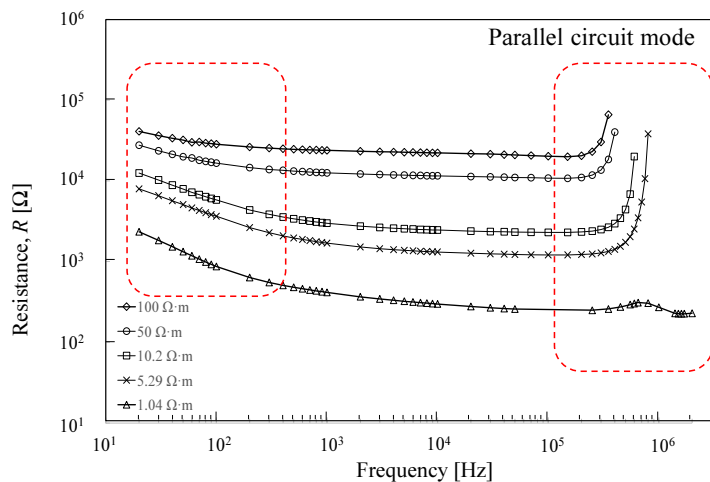


Fig. 4. Frequency sweeping according to the pore fluid resistivity (1 V, 18.4°C)

도성 유체 5종( $\rho_f$ : 1.04, 5.29, 10.2, 50, 100  $\Omega \cdot m$ )을 사용하였으며, 실험 결과 교류 전기장 사용으로 인한 분극 주파수 범위는 20~400 Hz, 공진 주파수 범위는 200~2,000 kHz로 나타났다(Fig. 4). 따라서 적정 주파수 범위는 400 Hz~20 kHz로 도출되었으며, 전기저항 측정 실험 시 1 kHz의 주파수를 사용하였다.

### 2.2.3 실험 셀 보정

전기저항 측정 실험 시 측정 매질의 전기저항 값은 사용 셀(셀 크기, 셀 재질) 및 전극(전극 재질, 전극 형상, 전극 크기) 특성에 영향을 받는다. 신뢰도 높은 데이터 분석을 위해서는 측정 전기저항 값을 사용 셀과 전극 영향을 제거한 물질의 고유 전기저항(전기비저항) 값으로 환산이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전기비저항 측정 실험 전 셀에 증류수를 채운 후 염화나트륨(NaCl)을 투입하면서 전기저항(Resistance)과 전기비저항(Resistivity)을 동시에 측정하여 실험 셀에서의 전도성 유체의 전기저항-전기비저항 상관관계를 확인하였다. 전기저항과 전기비저항은 각각 LCR meter, Electrical conductivity meter를 사용하여 측정하였으며, 실험을 통해 도출된 전기저항-전기비저항 상관관계는 식 (2)와 같이 선형관계로 표현된다. 온도 영향을 최소화하기 위하여 보정실험을 포함한 모든 전기비저항 측정실험은 일정한 온도 조건( $19.0 \pm 1.0^\circ C$ )에서 수행되었다.

$$\rho = \alpha \cdot R \quad (2)$$

여기서,  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ )는 물질의 전기비저항,  $R$  ( $\Omega$ )은 물질의 전기저항,  $\alpha$  (m)는 실험 셀의 전기비저항 환산계수를 의미한다. 실험 결과 전기비저항 환산계수( $\alpha$ )는 0.0043 m으로 확인되었다.

## 2.3 암반절리 모사 전기비저항 측정 실험과정

암반절리 특성과 전기비저항 간의 상관관계 확인을 위해 암반절리 모사시료의 전기비저항 측정 실험이 수행되었다. 지하 대심도 암반층의 절리 환경은 지하수위 아래이므로 포화상태를 유지한다. 따라서 암석절리 모사 시 인공 셀에 전도성 유체(공극수)를 셀 표면까지 채워 포화조건에서 측정실험을 수행하였다. 모든 공극수 전기비저항은 Electrical Conductivity meter를 사용하여 측정된 값이다. Table 1은 수행된 실험의 변수를 보여준다.

절리 크기에 대한 전기비저항 특성 규명 실험은 시료 입자 크기를 고려하여 최소 모사 가능 크기인 5 mm 조건을 기준으로 1배(5 mm), 2배(10 mm)와 3배(15 mm)에 대해 수행되었다. 충전물 공극률 영향 실험에서 충전물의 다짐을 통해 공극률을 변경하였으며 공극률 범위는 0.38~0.52로 설정되었다. 충전물의 0.5 mm 입자함량은 6, 12, 18, 23 (%)로 설정되었다. 원 설정은 6, 12, 18, 24 (%)였으나 0.5 mm 입자 24% 함량 시료 모사에 어려움이 있어 최근소 함량인 23%로 실험되었다. 실험 시 온도 영향의 최소화를 위해 실험실 온도는 항온( $19.0 \pm 1.0^\circ C$ )조건을 유지하였으며 각 실험 케이스별 영향 변수를 제외한 조건은 동일하게 유지되었다.

Table 1. Test variables

Parameter	Values for test
Temperature, $T$ (°C)	$19.0 \pm 1.0$
Pore fluid resistivity, $\rho_f$ ( $\Omega \cdot m$ )	$38.1 \pm 3.9$
Aperture size, $A$ (mm)	5, 10, 15
Filling size, $D$ (mm)	0.5, 3.0
Porosity, $n$ (-)	0.38~0.52
Percentage of glass beads 0.5 mm, $P$ (%)	6, 12, 18, 23

암반절리 크기와 전기비저항 상관관계 분석을 위해 절리 크기에 따라 전기비저항 측정 실험을 수행하였다. 절리 크기 조정을 위해 높은 차수성을 가지고 전기전도성이 매우 작은 고무판을 사용하였다. 절리 크기는 전자식 버니어 캘리퍼스를 통해 측정되었으며, 시편의 길이(100 mm) 방향으로 5개 지점(20 mm 간격)에서 측정하였다. 데이터 분석 시 측정된 5개의 절리 크기 값의 평균값을 사용하였다.

충진물 공극률과 전기비저항 상관관계 분석을 위해 3.0 mm 입자와 0.5 mm 입자를 혼합하여 공극률에 따라 전기비저항 측정실험을 수행하였다. 먼저 인공 암석 시편을 셀 내부에 위치시켜 절리 크기 조건(10 mm)을 형성한 다음 절리 크기를 측정하였다. 공극률 범위를 설정하기 위해 충진물 입자를 다짐(compaction)하여 충진물 공극률을 변화시켰다. 해당 실험 셀에서 설정 가능한 충진물의 공극률 범위는 절리 크기가 10 mm일 때 0.45~0.52, 절리 크기가 15 mm 일 때 0.38~0.48로 확인되었다.

충진물 입자 혼합비에 대한 전기비저항 특성 분석을 위해 3.0 mm와 0.5 mm의 직경을 가지는 유리구슬을 사용하였다. 3.0 mm 입자는 조립질 모래의 중간 직경을, 0.5 mm 입자는 조립질 모래 중 최소 직경을 모사한다. 충진물의 입자 혼합비와 전기비저항의 상관관계 분석을 위해 0.5 mm 입자 함량을 변화시켜 전기비저항 측정 실험을 수행하였다. 충진물의 0.5 mm 입자 함량은 6, 12, 18, 23%로 총 네 가지 조건으로 제작되었다. 충진물의 0.5 mm 입자 혼합비가 달라졌을 때 입자 배열의 변화를 확인하기 위해 사용된 충진물 입자의 직경 3.0 mm와 0.5 mm 합 의 약 3배인 10 mm를 절리 크기 조건의 최소로 하였다. 절리 크기는 10 mm, 15 mm 두 가지 조건에 대한 전기비저항 측정이 수행되었다. 또한 충진물 공극률에 대한 영향을 제거하기 위해 각 절리 크기 조건에 대한 공극률 범위의 표준편차는 0.02 미만으로 조절하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 절리 크기에 대한 전기비저항 특성

Fig. 5는 절리 크기와 전기비저항의 상관관계를 나타낸다. 가로축은 각각 절리 크기 조건 5 mm, 10 mm, 15 mm이며, 세로축은 각 절리 크기 조건에 대한 정규화된 전기비저항 값(Normalized resistivity = Bulk resistivity/Pore fluid resistivity)이다. 실험에 사용된 공극수의 전기비저항은  $38.9 \pm 1.4 \Omega \cdot m$ 이다. 충진물 공극률 영향을 제거



하기 위해 공극률 조건은  $0.48 \pm 0.01$ 로 일정하게 유지하였다. 절리 크기가 증가함에 따라 정규화된 전기비저항 (Normalized resistivity) 값은 감소하였다. 절리 크기가 5 mm에서 10 mm로 2배로 증가할 때 전기비저항은 약 24% 감소하였으며, 5 mm에서 15 mm로 3배로 증가할 때 전기비저항은 약 47% 감소하였다. 이는 선행 연구 결과와 비슷한 경향성을 가진다. Lee et al. (2021)은 충전물이 없는 조건에서 절리 크기에 대한 전기비저항 영향 분석을 수행하였다. 분석 결과, 절리 크기가 4.1 mm에서 9.2 mm로 증가할 때 정규화된 전기비저항 값은 약 43% 감소하였다. 향후 현장 단층파쇄대 구간에서 절리 크기가 증가함에 따라 전기비저항이 감소될 것으로 예상된다.

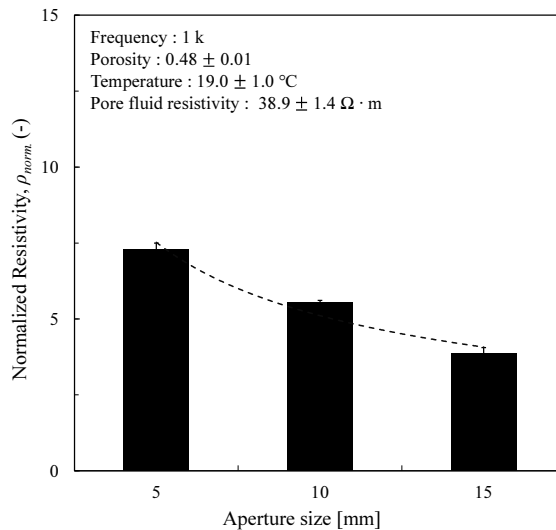


Fig. 5. Normalized resistivity according to the aperture size ( $n = 0.48 \pm 0.01$ )

### 3.2 충전물 공극률에 대한 전기비저항 특성

Fig. 6(a), (b)는 각각 절리 크기 10 mm, 15 mm 조건에서 공극률에 따른 정규화된 전기비저항 값(Normalized resistivity)을 나타낸다. 공극수 전기비저항은 각각  $36.6 \pm 1.5 \Omega \cdot m$ ,  $37.4 \pm 0.5 \Omega \cdot m$ 로 설정되었다. 실험 셀의 모사 가능한 충전물 공극률 범위를 확인하기 위해 충전물 입자를 실험 셀에 가장 느슨한(loose) 상태로 넣고 다짐 (compaction) 하였다. 절리 크기 조건이 10 mm일 때 모사 가능한 공극률 범위는 0.45~0.52로 나타났으며, 절리 크기 조건이 15 mm일 때는 0.38~0.48로 나타났다. 두 조건 모두 공극률이 증가함에 따라 정규화된 전기비저항 (Normalized resistivity) 값은 감소하였다. 절리 크기 10 mm 조건에서, 공극률이 0.45에서 0.52로 약 15% 증가할 때 전기비저항은 약 38% 감소하였다. 절리 크기 15 mm조건에서는 공극률이 0.38에서 0.48로 약 25% 증가할 때 전기비저항은 약 25% 감소하였다. 이는 공극률이 증가함에 따라 이온의 이동량이 증가하기 때문에, 절리 내 공극을 통한 전류량이 증가하여 전기비저항이 감소한 것으로 분석된다.

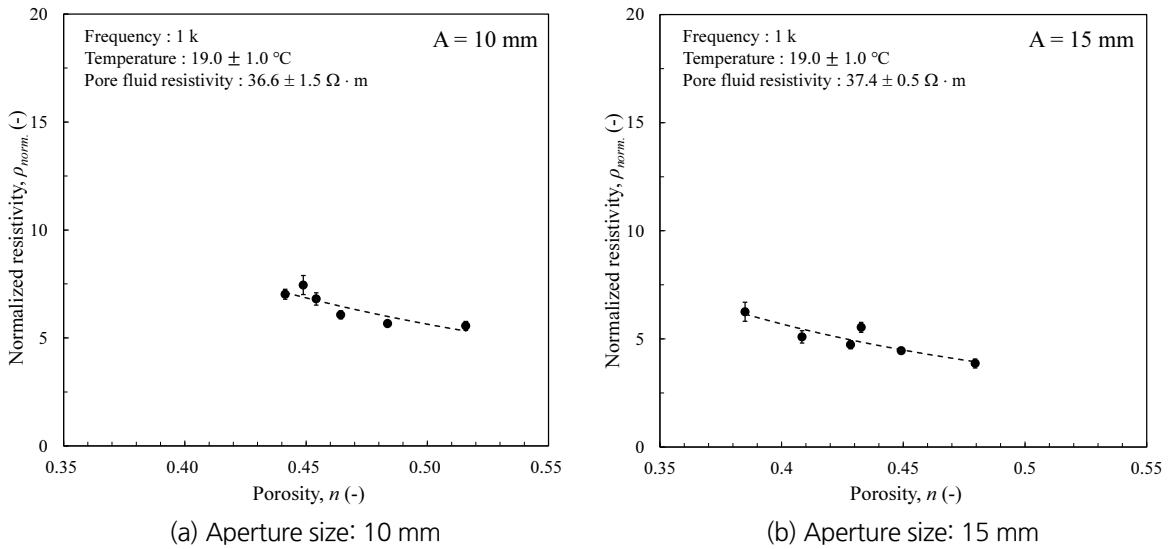


Fig. 6. Normalized resistivity according to the porosity

추가로 충전물 공극률에 대한 전기비저항의 민감도 분석을 수행하였다. 충전물 공극률에 대한 전기비저항 민감도는 공극률 증가율에 대한 전기비저항 감소율 비로 정의되었으며, 전기비저항 감소율을 충전물 공극률 증가율로 나누어 산정되었다(Fig. 7). 민감도는 1% 증가에 따른 전기비저항 증가율(%)로 정의되어 무차원의 단위로 정의된다. 절리 크기 10 mm 조건에서 공극률이 1% 증가할 때 전기비저항은 약 2.48% 감소하였으며, 절리 크기 15 mm 조건에서 공극률이 1% 증가할 때 전기비저항은 약 1.61% 감소하였다. 분석 결과, 절리 크기가 클수록 공극률에 대한 전기비저항 민감도가 낮아지는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 암반의 미세절리 조건에서, 충전물 공극률에 영향을 미치는 입자배열 및 입도분포의 상태가 전기비저항 값에 큰 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

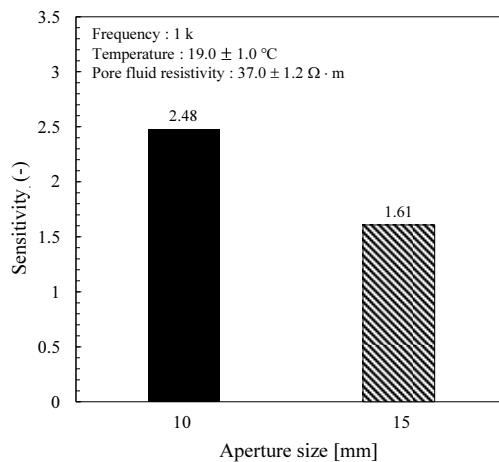


Fig. 7. Sensitivity of resistivity for the filling porosity at 10 mm and 15 mm of aperture size

### 3.3 조립토 충전물의 입자 혼합비에 대한 전기비저항 특성

Fig. 8은 절리 크기 10 mm조건에서 충전물 입자 혼합비에 따른 정규화된 전기비저항 값(Normalized resistivity)을 나타낸다. 공극수 전기비저항은  $37.3 \pm 0.6 \Omega \cdot m$ 로 조절하였다. Fig. 9는 15 mm에서 충전물 입자 혼합비에 따른 정규화된 전기비저항 값을 나타내며, 10 mm 조건에서의 공극수 전기비저항과 최대한 비슷한 조건인  $36.6 \pm 1.5 \Omega \cdot m$ 로 조절하였다.

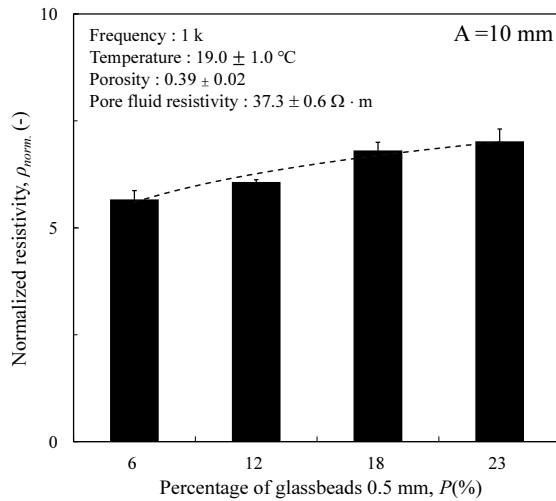


Fig. 8. Normalized resistivity according to the percentage of 0.5 mm glass beads at 10 mm of aperture size ( $n = 0.39 \pm 0.02$ )

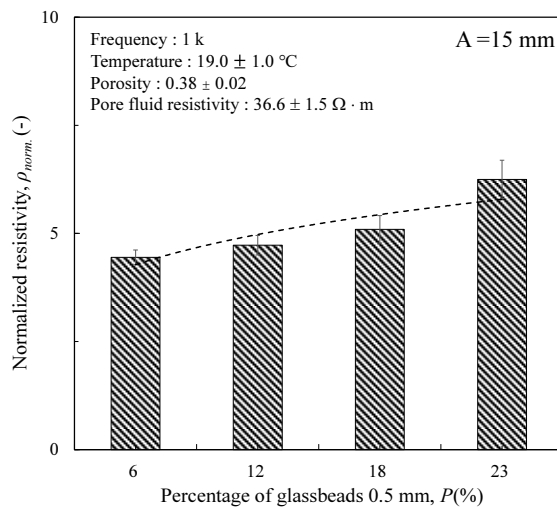


Fig. 9. Normalized resistivity according to the percentage of 0.5 mm glass beads at 15 mm of aperture size ( $n = 0.38 \pm 0.02$ )

충진물 공극률 영향을 제거하기 위해 공극률은 절리 크기 10 mm 조건에서는  $0.39 \pm 0.02$ 로 준비하였다. 절리 크기 15 mm 조건에서는  $0.38 \pm 0.02$ 로 10 mm 조건과 최대한 비슷하게 시료를 준비하였다. 조립토 충진물 입자 혼합비 실험에서 두 절리 크기 조건에서 모두 작은입자(0.5 mm) 함량이 증가할 때, 정규화된 전기비저항 값은 증가하였다.

공극률이 일정할 때, 절리 크기 10 mm 조건에서 충진물 0.5 mm 입자함량이 6%에서 23%로 약 4배 증가하였을 때 전기비저항은 약 24% 증가하였으며, 절리 크기 15 mm일 조건에서 약 41% 증가하였다. 이는 동일한 공극률 조건에서 충진물 입자 크기의 변화로 공극의 연결성이 달라져 지하수 내 이온의 이동성에 영향을 주고 전기비저항 값이 달라질 수 있음을 보여준다.

Fig. 10은 단일 직경의 시료만 있을 때와 서로 다른 직경의 시료가 같이 있을 때의 충진물 배열 및 공극 크기 차이를 보여준다. 공극의 연결에 대한 분석을 위해 각 충진물 조건별 공극의 평균적인 크기를 산정하였다. 3.0 mm 입자로 구성된 공극의 크기는 약  $690.00 \mu\text{m}$ 이며 0.5 mm 입자로 구성된 공극의 크기는 평균 약  $110.30 \pm 7.70 \mu\text{m}$ 으로 나타났다. 두 시료를 혼합할 시 공극의 크기는 평균 약  $155.62 \pm 5.65 \mu\text{m}$ 으로 나타났다. 따라서 이온의 이동 경로(공극)의 부피인 공극률 영향 이외에 충진물 입자의 혼합비에 따라 전기(또는 물)가 흐를 수 있는 통로가 달라져 전기비저항과 유의미한 상관관계를 가지는 것으로 분석된다.

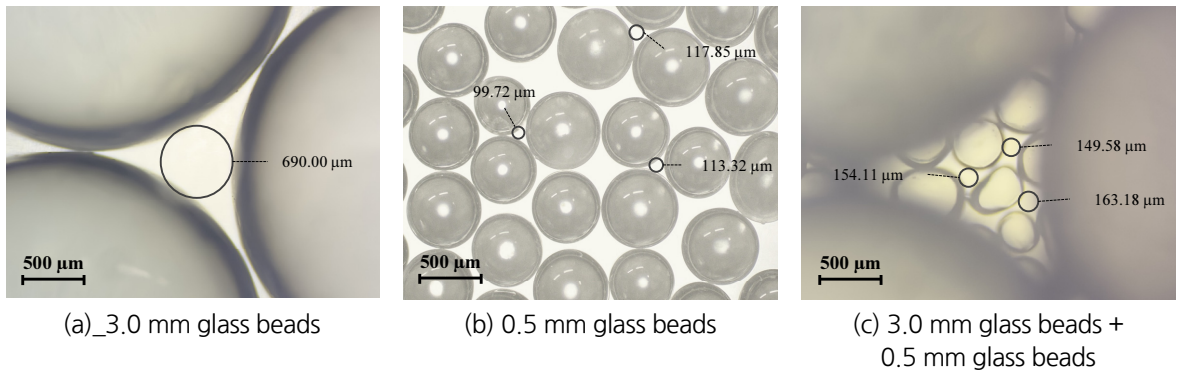


Fig. 10. Particle arrangement and pore size under different filling conditions

Fig. 11은 충진물 혼합비에 대한 정규화된 전기비저항 민감도를 나타낸다. 충진물 혼합비에 대한 전기비저항 민감도는 0.5 mm 입자 함량 증가율에 대한 전기비저항 증가율 비로 정의되었으며, 전기비저항 증가율을 0.5 mm 입자 함량 증가율로 나누어 산정되었다. 절리 크기 10 mm 조건에서 0.5 mm 입자 함량이 1% 증가할 때 전기비저항은 약 1.28% 증가하였으며, 절리 크기 15 mm 조건에서 약 2.29% 증가하였다. 따라서 절리 크기가 클수록 충진물 0.5 mm 입자 함량에 대한 전기비저항 민감도가 커지는 것을 확인할 수 있다.

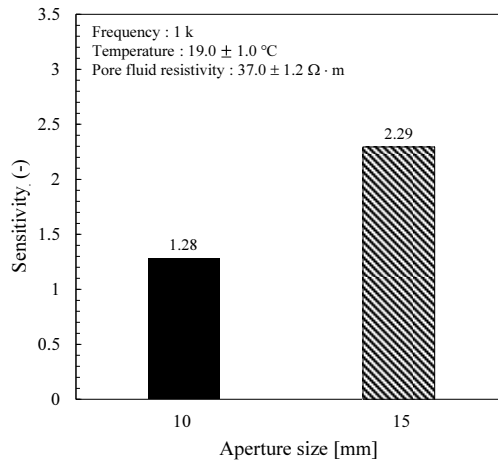


Fig. 11. Sensitivity of resistivity for the filling particle mixing ratio at 10 mm and 15 mm of aperture size

#### 4. 결론

인공 암석 시편과 충전물을 이용한 시편의 전기비저항을 측정하여 암반절리 크기, 충전물 공극률, 그리고 충전물의 입자 혼합비에 대한 전기비저항 상관관계를 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 본 실험에서 사용된 절리 크기에 따른 전기비저항 결과값을 분석하면 절리 크기가 2~3배 증가할 때 전기비저항 값은 약 35% 정도 감소하는 것으로 확인되었다.
2. 충전물의 공극률은 전기비저항과 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 각 절리 크기 조건의 평균값으로 분석하면, 절리 내 조립토 공극률이 약 20% 증가할 때 전기비저항 값은 약 30% 감소하는 것으로 분석되었다.
3. 한편, 절리 크기가 증가할수록 충전물 공극률에 대한 전기비저항 민감도는 다소 감소하였다. 절리 크기 10 mm 조건에서는 충전물 공극률이 1% 증가할 때, 전기비저항은 약 2.5% 감소하였으며, 절리 크기 15 mm 조건에서는 약 1.6% 감소하는 결과를 보였다. 이와 같은 결과는 미세절리와 같이 절리 크기가 매우 작은 상태에서, 조립토 충전물의 공극률은 전기비저항 값에 매우 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.
4. 충전물의 공극률이 일정한 조건에서, 작은 입자가 많이 포함될수록 전기비저항은 증가하는 경향을 보였다. 본 실험에서 0.5 mm 입자 혼합비가 약 4배 증가하면 전기비저항 값은 약 24%~41%로 증가하였다. 이는 동일한 공극률에서 물이 흐를 수 있는 흐름도가 복잡 할수록 전기비저항 값이 커질 수 있음을 보여준다.
5. 한편 절리 크기가 증가할수록 충전물 입자 혼합비에 대한 민감도는 증가하였다. 0.5 mm 입자 함량이 1% 증가할 때 전기비저항은 절리 크기 10 mm 조건에서 약 1.3%, 그리고 절리 크기 15 mm 조건에서 약 2.3% 증가하는 것으로 분석되었다.
6. 본 연구 결과로 조립토 충전물 상태를 평가함으로써 터널구조물 등의 주변 절리 특성을 추측하고 구조물의 안

정성 확보 또는 거동 특성 파악에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서는 다양한 절리 크기와 형상에 따른 전기비저항 값을 규명하지 못한 한계점을 가지고 있다. 이를 보완하여 현장 적용성을 높이기 위해서는 현장의 절리 거칠기 및 현장 절리 내 충전물의 입도 분포를 고려한 추후 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## 저자 기여도

도해주는 실험계획 및 수행, 원고작성, 실험데이터 수집을 하였고, 오태민은 연구개념 계획 및 설계, 원고검토를 하였고, 이항복은 연구개념을 수립하였다.

## References

1. Abrudan, T.E., Kypris, O., Trigoni, N., Markham, A. (2016), "Impact of rocks and minerals on underground magneto-inductive communication and localization", IEEE Access, Vol. 4, pp. 3999-4010.
2. Archie, G.E. (1942), "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", Transactions of the AIME, Vol. 146, No. 1, pp. 54-62.
3. Charles, A.C., Gawu Simon, K.Y., Samuel, A.K. (2018), "Experimental study of electrical resistivity to rock fracture intensity and aperture size", International Journal of Physics, Vol. 6, No. 3, pp. 85-92.
4. Demirel, S., Roubinet, D., Irving, J., Voytek, E. (2018), "Characterizing near-surface fractured-rock aquifers: insights provided by the numerical analysis of electrical resistivity experiments", Water, Vol. 10, No. 9, 1117.
5. Lee, H., Lee, J.W., Oh, T.M. (2021), "Permeability evaluation for artificial single rock fracture according to geometric aperture variation using electrical resistivity", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 787-797.
6. Lee, S.K., Lee, T.J. (2009), "Electrical resistivity of cylindrical cement core with successive substitution by electrolyte of different conductivity", Geophysics and Geophysical Exploration, Vol. 12, No. 4, pp. 328-337.
7. Lofgren, M., Neretnieks, I. (2003), "Formation factor logging by electrical methods: comparison of formation factor logs obtained in situ and in the laboratory", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 61, No. 1-4, pp. 107-115.
8. Nakatsuka, Y., Xue, Z., Garcia, H., Matsuoka, T. (2010), "Experimental study on CO<sub>2</sub> monitoring and quantification of stored CO<sub>2</sub> in saline formations using resistivity measurements", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 4, No. 2, pp. 209-216.
9. Oh, T.M., Cho, G.C., Lee, C. (2014), "Effect of soil mineralogy and pore-water chemistry on the electrical

- resistivity of saturated soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 140, No. 11, 06014012.
10. Oh, T.M., Cho, G.C., Son, T.A., Rye, H.H., Lee, C.H. (2015), “Experimental approach to evaluate weathering condition of granite using electrical resistivity”, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 675-685.
  11. Shin, H.C., Shin, M.H., Cho, K.H. (2013), “Analysis on the relationship of joint directions of fracture zone and collapse type in the railway tunnel”, *Proceedings of the 2013 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Pyeongchang, pp. 999-1004.
  12. Woo, J.T. (2003), “A study on the mechanical characteristics of tunnel structures and ground behavior by synthetic analysis method with tunnel monitoring results used”, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 7, No. 3, pp. 115-124.
  13. Woo, J.T., Lee, K.I. (2012), “A study on establishment of measurement and analysis frequency of maintenance monitoring in tunnel”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 2, pp. 117-129.