

# 전기비저항 탐사 기반 TBM 터널 굴진면 전방 위험 지반 예측을 위한 실내 토조실험 연구

이준호<sup>1</sup> · 강민규<sup>2</sup> · 이효범<sup>3</sup> · 최항석<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

<sup>2</sup>학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 고려대학교 미래건설환경융합연구소 연구교수

<sup>4</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

## Laboratory chamber test for prediction of hazardous ground conditions ahead of a TBM tunnel face using electrical resistivity survey

JunHo Lee<sup>1</sup> · Minkyu Kang<sup>2</sup> · Hyobum Lee<sup>3</sup> · Hangseok Choi<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Master Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>2</sup>Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>3</sup>Research Professor, Future and Fusion Lab of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

<sup>4</sup>Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

\*Corresponding Author : Hangseok Choi, hchoi2@korea.ac.kr

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
23(6)451-468(2021)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.6.451>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

**Received** October 19, 2021  
**Revised** November 3, 2021  
**Accepted** November 3, 2021



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 © 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

### Abstract

Predicting hazardous ground conditions ahead of a TBM (Tunnel Boring Machine) tunnel face is essential for efficient and stable TBM advance. Although there have been several studies on the electrical resistivity survey method for TBM tunnelling, sufficient experimental data considering TBM advance were not established yet. Therefore, in this study, the laboratory-scale model experiments for simulating TBM excavation were carried out to analyze the applicability of an electrical resistivity survey for predicting hazardous ground conditions ahead of a TBM tunnel face. The trend of electrical resistivity during TBM advance was experimentally evaluated under various hazardous ground conditions (fault zone, seawater intruded zone, soil to rock transition zone, and rock to soil transition zone) ahead of a tunnel face. In the course of the experiments, a scale-down rock ground was provided using granite blocks to simulate the rock TBM tunnelling. Based on the experimental data, the electrical resistivity tends to decrease as the tunnel approaches the fault zone. While the seawater

intruded zone follows a similar trend with the fault zone, the resistivity value of the seawater intrude zone decreased significantly compared to that of the fault zone. In case of the soil-to-rock transition zone, the electrical resistivity increases as the TBM approaches the rock with relatively high electrical resistivity. Conversely, in case of the rock-to-soil transition zone, the opposite trend was observed. That is, electrical resistivity decreases as the tunnel face approaches the rock with relatively low electrical resistivity. The experiment results represent that hazardous ground conditions (fault zone, seawater intruded zone, soil-to-rock transition zone, rock-to-soil transition zone) can be efficiently predicted by utilizing an electrical resistivity survey during TBM tunnelling.

**Keywords:** Electrical resistivity survey, Fault zone, Rock-to-soil transition zone, Seawater intruded zone, Soil-to-rock transition zone

## 초 록

터널 굴진면 전방 위험 지반 예측은 TBM (Tunnel Boring Machine) 굴진 성능 및 안정성 확보에 필수적이다. 국내·외에서 굴진면 전방 예측을 위한 전기비저항 탐사법에 대한 연구가 다수 이루어졌으나, TBM 터널 굴진을 고려한 전기비저항 탐사의 실내 실험 모사가 어렵기에 이와 관련된 실험 연구가 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전기비저항 탐사법의 터널 전방 위험 지반 예측 적용성을 분석하기 위한 TBM 굴진을 모사한 실내 축소 모형 실험을 수행하였다. 터널 굴진면 전방의 단층 파쇄대, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간, 암반-토사 변화구간을 축소 모사하여, 굴진 중 전기비저항의 변화를 측정하였다. 본 연구에서는 실제 시공 조건을 재현하기 위해 화강암 블록을 사용하여 모형 지반을 모사하였다. 실험 결과, 터널이 굴진하면서 단층 파쇄대에 근접할수록 전기비저항이 감소하였으며, 해수 침수대도 동일한 경향을 보였으나, 단층 파쇄대와 비교하여 측정된 전기비저항이 크게 감소하였다. 토사-암반 변화구간의 경우, 전기비저항이 상대적으로 높은 암반에 터널 굴진면이 다가갈수록 전기비저항이 증가하는 양상을 보였다. 이와 반대로 암반-토사 변화구간의 경우, 전기비저항이 낮은 토사 지반에 굴진면이 근접할수록 전기비저항이 감소하였다. 실험 결과를 통해 전기비저항 탐사 굴진면 전방 위험 지반(단층 파쇄대, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간, 암반-토사 변화구간)의 예측이 가능하다고 판단된다.

**주요어:** 전기비저항 탐사, 단층 파쇄대, 암반-토사 변화구간, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간

## 1. 서론

지속적인 도시 인구집중현상으로 인한 지상공간 부족 문제를 해결하기 위해 교통 터널이나 공동구 터널과 같은 지하공간 개발의 중요성이 증대되고 있다(Broere, 2016). 쉴드 TBM 공법은 적은 소음과 진동으로 터널 굴진이 가능하고, 지상구조물의 안정성을 확보할 수 있기에, 도심지 터널 시공에 광범위하게 활용되고 있다(Jeong et al., 2018). TBM 공법 특성상 터널 굴진 중 굴진면 전방 지반을 육안으로 관찰하기 어려울 뿐만 아니라 터널 설계 단계에서 이루어지는 지반 조사는 대부분 상대적으로 넓은 지역의 개략적인 지반 상태를 추정하는 데 중점을 두고 있어, TBM 시공 중에는 예측하지 못한 위험 지반이 출현하는 경우가 다수 발생한다(Lee et al., 2018). 특히 TBM 굴진 중 단층 파쇄대, 암반-토사 변화구간, 토사-암반 변화구간 조우 시, 굴진면 및 천정부의 이완으로 인한

터널 붕괴사고가 발생하여 상당한 공기 지연을 초래할 수 있으며 굴진 불능 및 굴진을 저하, 커터 헤드 및 본체의 손상 등의 시간적, 경제적인 손실을 발생시킬 수 있다(Yoon et al., 2018).

이러한 배경에서 TBM 공법에 적용 가능한 다양한 굴진면 전방 예측 기법에 대한 연구개발이 수행되어 왔으며 (Li et al., 2010; Chen et al., 2011; Delisio et al., 2013), 특히 TBM 굴진에 거의 영향을 주지 않는 비파괴 탐사법을 기반으로 한 굴진면 전방 예측 기법들이 주로 개발되어왔다(Dickmann and Sander, 1996; Grodner, 2001; McDowell et al., 2002; Kaus and Boening, 2008). 비파괴 탐사법에는 대표적으로 탄성파 탐사, 전기비저항 탐사, 유도분극 탐사, 레이더 탐사가 있으며, 그 중 전기비저항 탐사는 비교적 측정데이터의 전처리가 용이하고 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 지금까지 전기비저항 탐사의 TBM 전방 예측 적용을 위한 실험적 연구들이 다수 수행되었으나, 터널 굴진을 실내에서 모사하기엔 어려움이 있어 대부분 지표면 탐사 실내 실험으로 수행되어왔다(Cho et al., 2005; Park et al., 2018; Ryu et al., 2018; Kang et al., 2019). 본 연구에서는 터널 굴진면 전방을 예측하는 기법 개발을 위해 전기비저항 탐사를 활용하였으며, 폴리카보네이트(polycarbonate) 재질의 토조, 모형 터널과 암석 블록(block)을 활용하여 단층 파쇄대, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간, 암반-토사 변화구간 등 다양한 위험 지반 조건에서 TBM 굴진을 모사하는 축소 모형 실험을 수행하였다. 일련의 실험을 통해 TBM 굴진 중 위험 지반을 조우할 때 측정되는 전기비저항의 변화 경향을 분석하였으며, TBM 굴진 중 전기비저항 탐사의 전방 예측 적용 가능성을 연구하였다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 전기비저항 탐사

전기비저항은 물질이 전류 흐름에 저항하는 정도를 나타내는 물성으로 물체의 모양, 크기와 무관하게 물체마다 고유한 전기적 물성을 가지므로 전기비저항은 동일한 물질에서는 같은 전기비저항 값을 갖게 된다(Kang et al., 2019). 지반의 전기비저항은 지반의 종류, 포화도, 공극률, 간극수의 전기전도도 등에 따라 전기비저항이 다르게 측정된다(Archie, 1942; Santamarina et al., 2001; Park, 2004). 전기비저항 탐사는 지반에 전류를 흘려주어 지하 매질에 발생한 전위를 측정 및 분석하고 지반의 전기비저항 분포를 파악하게 된다. 전기비저항 탐사는 전극의 개수에 따라 크게 2전극 탐사 기법과 4전극 탐사 기법으로 구분되며, 본 연구에서는 전위 전극, 전류 전극을 나누어 접지 저항이 낮아 비교적 측정 정확도가 높은 4전극 탐사 기법을 적용하였다.

4전극 탐사 기법은 Fig. 1과 같이 한 쌍의 전류 전극(A, B)과 한 쌍의 전위 전극(M, N)을 사용하여 전기비저항을 측정한다. 하나의 전류 전극에 전류(I)를 지반으로 흘려주고 이를 다른 전류 전극이 받을 때, 지반 안에서 반구 형태의 전위 분포가 형성된다. 이때, 두 개의 전위 전극 사이의 전위차(V)를 측정하여 지반의 겉보기 전기비저항( $\rho_a$ )을 산정할 수 있다(식 (1)).

$$\rho_a = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} \frac{V}{I} \quad (1)$$

위 식 (1)에서 AM은 A와M전극 사이의 거리를 의미하며, MB, AN, NB도 마찬가지로 각 전극 사이의 거리를 의미한다. 균질한 지반에서, 식 (1)을 통해 구한 전기비저항 값은 참(true) 전기비저항( $\rho$ ) 값이 되나, 일반적으로 현장의 지반은 균질하지 않기 때문에 식 (1)을 통해 구한 전기비저항 값은 지반의 평균적인 전기비저항을 의미하는 겉보기(apparent) 비저항( $\rho_a$ ) 값이 된다(Reynolds, 2011). 지반의 참 전기비저항( $\rho$ )을 산정하기 위해서는, 다양한 해석 기법을 통해 여러 지점에서 측정된 겉보기 비저항( $\rho_a$ )을 지반 내의 참 전기비저항( $\rho$ ) 분포로 산출해야 한다. 하지만 TBM 공법 특성 상, 터널굴진 지연이 큰 경제적 손실을 야기하기 때문에, 터널굴진 중 측정된 겉보기 비저항( $\rho_a$ ) 데이터 해석시간을 최소화해야 한다. 따라서 굴진 중 겉보기 비저항( $\rho_a$ ) 데이터의 증감 추이를 분석하여 TBM 굴진면 전방 예측을 수행한 연구들이 주로 수행되었다(Park et al., 2018; Ryu et al., 2018; Kang et al., 2019).

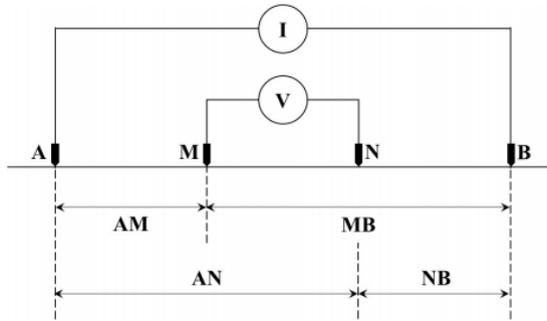


Fig. 1. Electrode array in four-electrode method

## 2.2 전극 배열법

전기비저항 탐사에는 다양한 전극 배열이 활용되고 있으며, 전극 배열에 따라 신호 크기, 가탐 심도, 분해능 등이 상이하다. 또한, 겉보기 비저항( $\rho_a$ )은 전극 배열 종류에 따라 거리 계수(K)가 다르기 때문에, 전극 배열에 적합한 거리 계수를 산정해야 한다(식 (2)).

$$\rho_a = RK, \quad K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right)^{-1}, \quad R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

전기비저항 탐사의 대표적인 전극 배열에는 쌍극자 배열(dipole-dipole array), 슬럼버저 배열(Schlumberger array), 웨너 배열(Wenner array)이 있다. 대표적인 전극 배열의 모식도를 Fig. 2에 나타냈다. 웨너 배열은 전극 4개

를 동일 간격으로 배열하며, 슬림버저 배열은 전위 전극(M, N)의 간격이 전류 전극(A, B)의 간격보다 좁다. 그리고 쌍극자 배열의 경우 한 쌍의 전위·전류 전극(M, A)과 한 쌍의 전위·전류 전극(N, B)의 간격이 동일하다(Kim et al., 2009). 쌍극자 배열의 경우 수평 분해능은 우수하지만 수직 분해능이 낮고 민감도 분포가 날개형으로 분산되어 종방향의 터널 전방 탐사에 적합하지 않다(Bhattacharya and Patra, 1968). 반면에 웨너 배열은 수직 분해능이 뛰어나고 측정 전위가 높아 양질의 데이터를 수집할 수 있다. 또한, 슬림버저 배열보다 깊은 곳을 탐사할 때 효과적이므로 본 연구에서는 웨너 배열을 적용하여 터널 굴진면 전방 탐사 실험을 수행하였다.

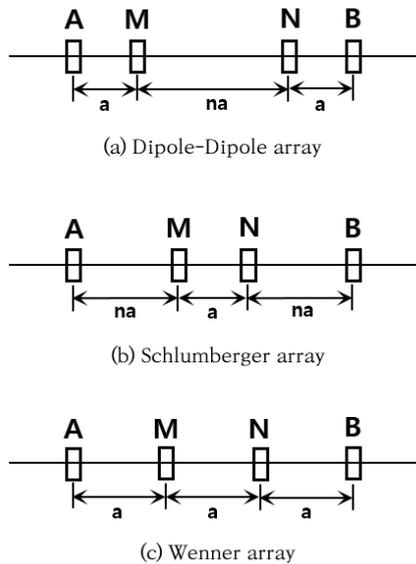


Fig. 2. Four-electrode array methods

### 3. 축소 모형 실험

본 연구에서는 TBM 굴진 시, TBM의 시공 효율을 저해하는 위험 지반 조건인 단층 파쇄대, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간, 암반-토사 변화구간으로의 TBM 굴진을 실내에서 모사하고자 하였다. 각 위험 지반 조건을 토사와 암반을 사용하여 토조에 조성하고, 일정 간격의 TBM 굴진면 진행을 모사하며 전기비저항 탐사 실험을 수행하였다. 일련의 실험을 통해 터널 굴진에 따라 측정되는 전기비저항의 추이를 분석하고 전기비저항 탐사를 통해 각 위험 지반 조건의 예측 가능성을 판단하였다.

#### 3.1 실내 실험 구성

TBM 굴진 중 위험 지반 조우에 따라 측정되는 전기비저항의 변화양상을 파악하기 위해 위험 지반에 근접하는 TBM 굴진 모사가 가능한 토조와 터널 모형을 제작하였다. 지반을 조성하기 위한 토조의 크기는 500 mm × 200

mm × 500 mm (가로 × 세로 × 높이)이며, 터널 굴진 모사를 위해 제작한 터널 모형은 200 mm × 200 mm × 250 mm (가로 × 세로 × 높이)의 크기의 박스형이다. 토조 및 터널 모형은 모두 비전도체인 폴리카보네이트를 사용하여 제작하였다. 전체적인 실험 구성은 Fig. 3와 같다.

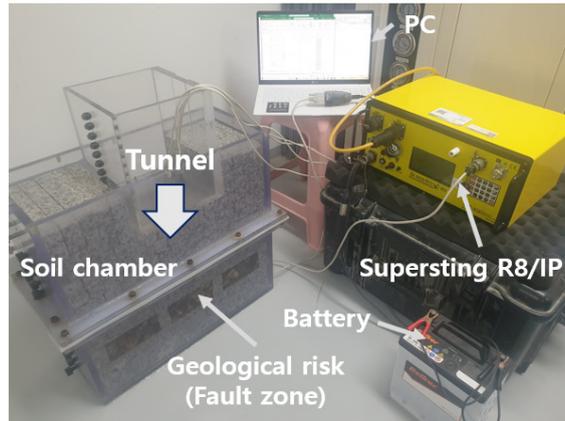


Fig. 3. Experiment setup of electrical resistivity survey for TBM ahead prediction

지반의 전기비저항을 측정하기 위해 Advanced Geosciences, Inc. 社의 Supersting R8을 사용하였다. Supersting R8 시스템 내의 Resistivity mode를 이용하여 전기비저항을 측정하였으며, 모든 실험은 10회 반복수행하여 측정된 데이터들의 평균값을 도출하여 실험결과를 분석하였다. 전극은 직경 3.5 mm 원기둥형 구리 재질을 사용하였고, 전극 배열은 웨너 배열로 전극 간격은 2 cm 간격으로 설정하여 터널 모형 전방에 4개의 전극을 설치하였다.

본 전기비저항 탐사 실험에서 예측을 모사할 위험 지반 조건은 단층 파쇄대, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간, 암반-토사 변화구간이다. 토사 지반은 규사 1호사와 자갈을, 암반 지반은 화강암을 사용하여 조성하였다. 지반은 토조에 목표 단위중량으로 조성 후 담수 또는 염수에 침수시켜 포화시켰으며, 침수 후 24시간이 경과한 후 전기비저항 탐사를 수행하였다. 각 위험 지반 조성의 상세는 다음과 같다.

#### 1. 단층 파쇄대

Fig. 4(a)와 같이 터널 굴진면 전방 지반과 파쇄대 이후 지반은 신선한 암반(화강암)으로 모사하고, 그 사이 파쇄대 충전 물질로 규사 1호사, 자갈을 사용하여 조성하였다. 지반 조성 후 온도 8~11°C에서 0.4%의 염도를 갖는 담수를 사용하여 24시간 포화시켰다.

#### 2. 해수 침수대

Fig. 4(b)와 같이 지반 조성 조건은 단층 파쇄대와 동일하게 충전 물질로 규사 1호사, 자갈을 사용하여 모사하였다. 지반 조성 후 온도 8~11°C에서 35%의 염도를 갖는 염수를 사용하여 24시간 포화시켰다.

3. 토사-암반 변화구간

Fig. 4(c)와 같이 굴진면 전방 지반은 토사(규사 1호사)와 자갈로 모사하고, 하부 암반은 신선한 암반(화강암)을 사용하였다. 지반 조성 후 온도 8~11°C에서 0.4%의 염도를 갖는 담수를 사용하여 24시간 포화시켰다.

4. 암반-토사 변화구간

Fig. 4(d)와 같이 굴진면 전방 지반은 신선한 암반(화강암)으로 모사하고, 하부 토사 지반은 토사(규사 1호사), 자갈로 모사하였다. 지반 조성 후 온도 8~11°C에서 35%의 염도를 갖는 염수를 사용하여 24시간 포화시켰다.

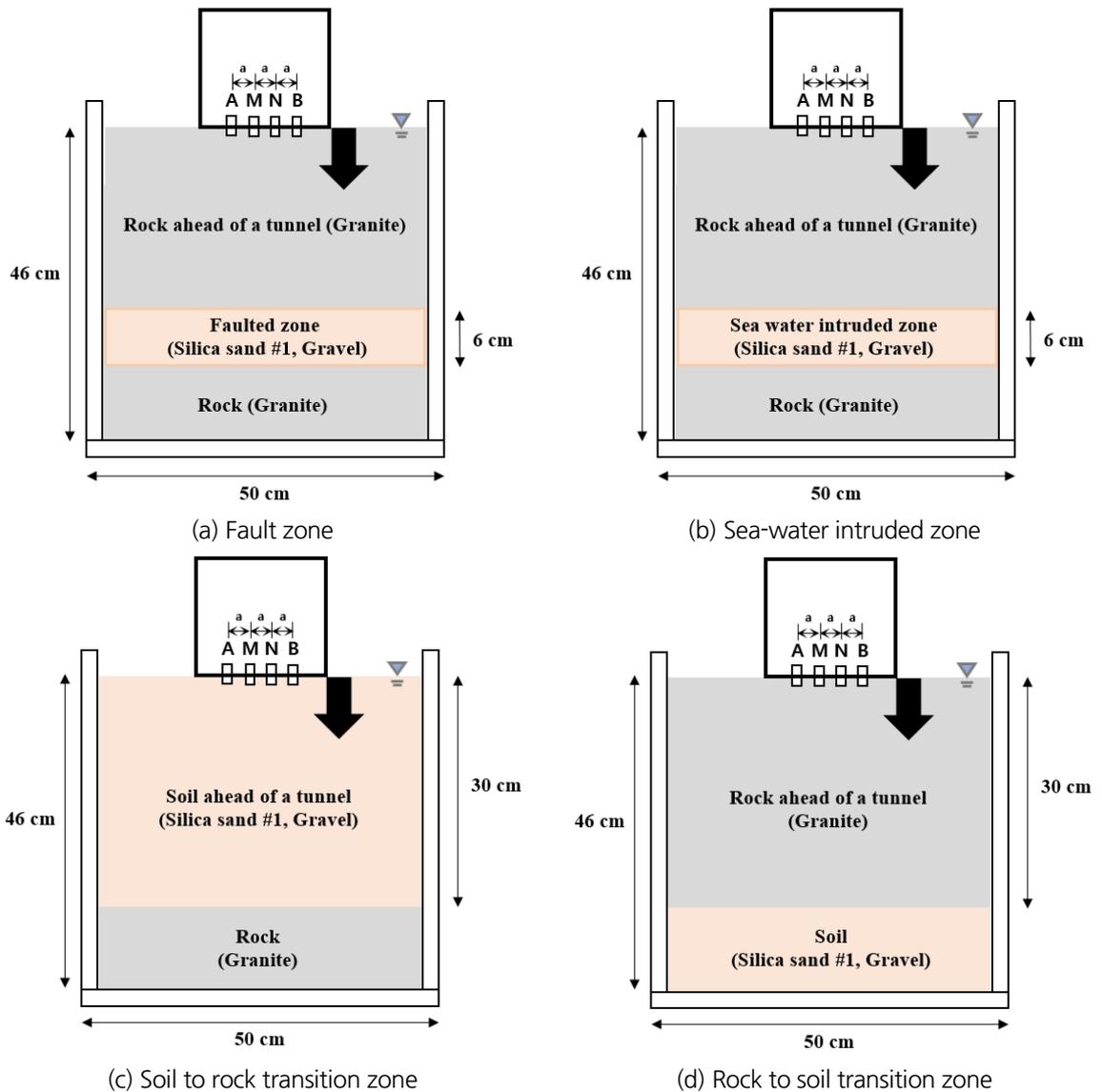


Fig. 4. Schematic diagram of experimental cases

### 3.2 실험 대상 시료 물성

실험 대상 시료의 역학적·전기적 물성을 Table 1과 Table 2에 나타냈다. 규사 1호사는 체분석시험을 통해 유효 입경( $D_{10}$ ), 균등 계수( $C_u$ ), 곡률 계수( $C_c$ )를 산정하였고, 통일분류법에 의해 규사 1호사는 SP로 분류되었다. 통일분류법으로 분류할 수 없는 자갈은 15개의 대표 입경에 대하여 평균 입경을 측정하였다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 본 실험에서 사용된 자갈은 3.35~14.01 mm의 입경 분포를 가진 세력(granule)에서 소력(pebble) 크기 입경을 가지는 것으로 나타났다.

**Table 1.** Characteristics of specimen

| Silica sand #1                       |                                  |                                     |                                    | Gravel                               |                        |
|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Specific weight (kg/m <sup>3</sup> ) | Effective size ( $D_{10}$ ) (mm) | Coefficient of uniformity ( $C_u$ ) | Coefficient of curvature ( $C_c$ ) | Specific weight (kg/m <sup>3</sup> ) | Size distribution (mm) |
| 1,847.32                             | 2.34                             | 1.79                                | 0.97                               | 1,887.06                             | 3.35~14.01             |

**Table 2.** Electrical Resistivity of saturated soil

|           | Electrical resistivity ( $\Omega \cdot m$ ) |                |               |
|-----------|---------------------------------------------|----------------|---------------|
|           | Granite                                     | Silica sand #1 | Gravel        |
| Tap water | 326.41~365.01                               | 75.04~77.54    | 111.51~127.82 |
| Sea water | 1.49~3.38                                   | 0.43~0.47      | 0.55~0.84     |



**Fig. 5.** Size distribution of gravel (from granule to pebble)

전술한 바와 같이 각 시료의 전기비저항 측정에 앞서, 각 시료를 담수 혹은 염수로 24시간 포화시킨 후 실험을 수행하였다. 전기비저항 측정 결과, 화강암, 자갈, 규사 1호사 순으로 전기비저항이 높게 측정되었다. 염분(NaCl)의 영향에 의해 해수의 전기비저항은 담수에 비해 평균적으로 99% 정도 낮은 전기비저항 값을 보였다.

### 3.3 실험 방법

#### Cases 1 and 2. 단층 파쇄대 및 해수 침수대

TBM의 암반 굴진을 모사하기 위해 30 mm × 200 mm × 30 mm (가로 × 세로 × 높이) 화강암 블록(block)을 제작하여 화강암 지반을 조성하고 블록을 단계적으로 제거함으로써 TBM 굴진을 모사하였다. 암반 지반에서 단층 파쇄대와 해수 침수대로 TBM 굴진을 모사하는 과정을 Fig. 6에 나타냈다. 단층 파쇄대와 해수 침수대는 바닥에서부터 10 cm 높이의 화강암 판(plate)을 토조 하부에 설치한 후, 파쇄대 층에 2개의 블록 높이(6 cm)만큼 규사와 자갈로 구성된 충전 물질로 파쇄대를 모사하였다. 파쇄대 층 위에 화강암 블록 10층(30 cm)을 쌓아 올려 총 46 cm 높이의 지반을 모사하였다. TBM 굴진 중 전기비저항 탐사 수행을 모사하기 위해 상부 두 층의 중앙 화강암 블록을 제거하고, 모형 터널을 관입하여 전기비저항을 측정하였다. 이후 3번째 층 중앙의 화강암 블록을 제거하고 터널을 4번째 층에 맞닿게 설치하여 측정하였다. 이 과정을 총 9회 반복하며 3번째 층부터 11번째 층까지 실험을 진행하였다. 충전 물질로는 규사 1호사, 자갈을 사용하였다. 단층 파쇄대의 경우 담수로 포화시켜 실험하였고, 해수 침수대의 경우 염도 35‰의 염수로 포화시켜 실험을 수행하였다.

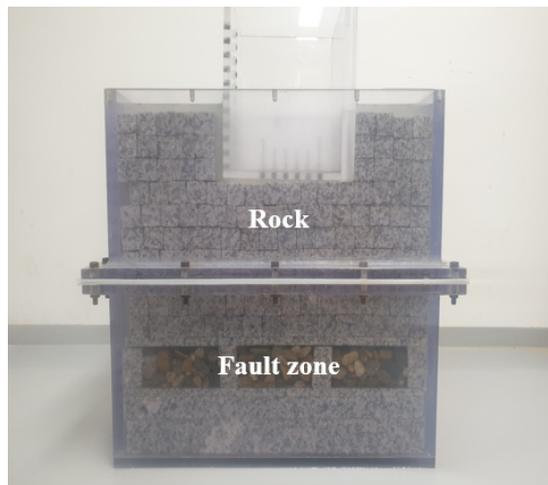


Fig. 6. Experiment setup of fault zone and sea water intruded zone

#### Cases 3 and 4. 토사-암반 변화구간 및 암반-토사 변화구간

토사 지반은 토조 상부에 규사 1호사, 자갈을 10층(30 cm) 높이로 조성하였고, 암반 지반은 토조 하부에 화강암 판과 블록을 이용하여 총 16 cm 높이로 조성하였다. Case 1에서와 마찬가지로, 두 층의 중앙 화강암 블록을 제거하고, 모형 터널을 관입하여 터널 모형 전방의 전기비저항을 측정하였다. 실험은 Case 1과 동일하게 3번째 층부터 11번째 층까지 9회 반복하였다. 암반-토사 변화구간은 토사-암반 변화구간 실험과 동일한 방법으로 진행하되, 상부와 하부의 지반 구성만 반대로 조성하여 실험을 수행하였다(Fig. 7).



Fig. 7. Experimental setup of rock and soft ground

## 4. 실험 결과

### 4.1 실험 방법 검증

본 연구의 실내 실험 결과를 검증하기 위하여, 고려된 위험 지반 중 하나인 단층 파쇄대의 기하학적 조건과 유사한 Takahashi and Kawase (1990)가 제시한 지표면 탐사 3층 모델을 동일한 토조와 화강암 블록을 사용하여 실내 실험을 수행하고 모사하고자 하였다(Fig. 8). Takahashi and Kawase (1990)가 제시한 방법은 터널 굴진을 고려한 이론식이 아니므로, 본 4.1 절에서 수행한 실험은 터널 굴진을 모사하지 않고 한 층의 화강암 블록을 모두 제거하며 전기비저항을 측정하는 방식으로 수행하였다.

$$\rho_a = \rho_1 [1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] \quad (3)$$

$$F_N = F_{3(x)} = 2x \int_0^{\infty} \frac{K_{31} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{31} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (4)$$

$\rho_a$ 는 전체 모델의 전기비저항 값을 의미하며,  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ 는 각각 1, 2, 3번째 지반의 고유한 전기비저항 값이다.  $h_1, h_2$ 는 1, 2번째 지반의 높이이며,  $J_0$ 는 Bessel's Function이다.  $k_1, k_2$ 는 Reflection factor로 식 (5)와 같다.

$$K_{31} = \frac{k_1 + k_2 e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 \cdot k_2 e^{-2\lambda h_2}}, \quad k_2 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}, \quad k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (5)$$

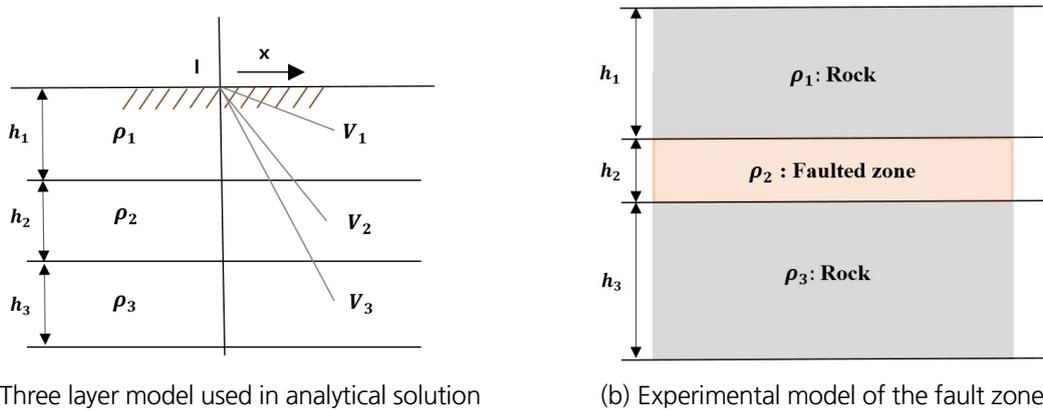


Fig. 8. Analytical and experimental setting (Takahashi and Kawase, 1990)

전극 간 거리(a)는 2 cm로 두고 산정된 이론해와 실험 결과의 비교를 Fig. 9에 나타내었다.

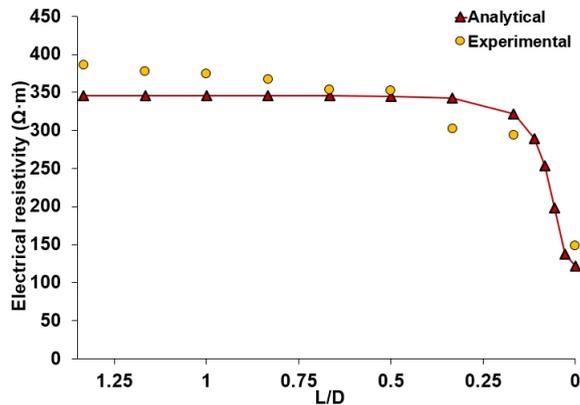


Fig. 9. Comparison of analytical solution and experimental result

이론식 조건과 다르게 토조 실험은 한 층을 형성하는 블록들이 3 cm 두께를 가지는 한계로 인해 급격한 전기비저항 감소를 보이는  $L/D = 0 \sim 0.17$  구간에서 정밀한 측정이 불가능 하였다. 하지만, Takahashi and Kawase (1990) 가 제시한 이론식에서는 파쇄대로부터 0.5 cm, 1.0 cm, 1.5 cm, 2.0 cm, 2.5 cm 떨어진 구간을 추가하여 더 명확한 경향을 제시할 수 있다. Fig. 9를 통해, 전극 간 거리(a)가 2 cm인 경우에 이론 값과 실험 값 모두 전기비저항 값이  $L/D = 0 \sim 0.5$  떨어진 곳에서부터 감소하는 유사한 경향을 보였다. 이를 통해, 본 연구의 축소 모형 실험은 대상 위험 지반 조건에 대해 전기비저항이 적절하게 산정됨을 알 수 있다.

제작한 토조의 크기가 전류의 흐름에 영향을 미치지 않는지 확인하기 위하여 균질한 지반에서 토조 경계조건 의 영향을 검토하였다. 토조에 포함된 규사 1호사를 가득 채운 후 웨너 배열로 배치된 전극을 Fig. 10과 같이 수평,

수직방향으로 이동시켜가며 전기비저항 값을 측정하였다. Fig. 11을 통해 토조 중심으로부터 횡방향 12 cm, 종방향 6 cm까지 전기비저항이 일정한 값을 보임을 확인하였다. 횡방향 토조 근처에서 측정한 전기비저항 값은 토조 가운데에서 측정한 전기비저항 보다 12%정도 증가한 것을 보여주었고, 종방향 토조 근처에서 측정한 전기비저항 값은 토조 가운데에서 측정한 전기비저항 보다 20%정도 증가한 것을 보여주었다. 이는 전극이 토조에 가까워 질수록 비전도체인 폴리카보네이트 토조의 영향으로 인해 전기비저항이 크게 측정된 것으로 사료된다. 이를 통해, 본 연구에서 적용한 토조 중앙부 연직방향으로 TBM 굴진을 모사하며 측정되는 전기비저항은 토조의 경계조건 영향을 배제할 수 있다.

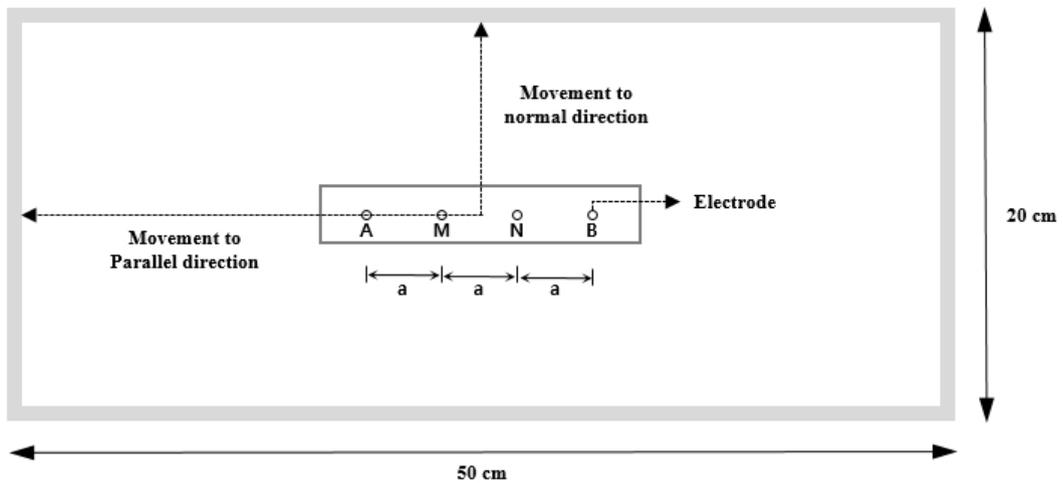


Fig. 10. Measurement of electrical resistivity to check boundary effect of soil chamber

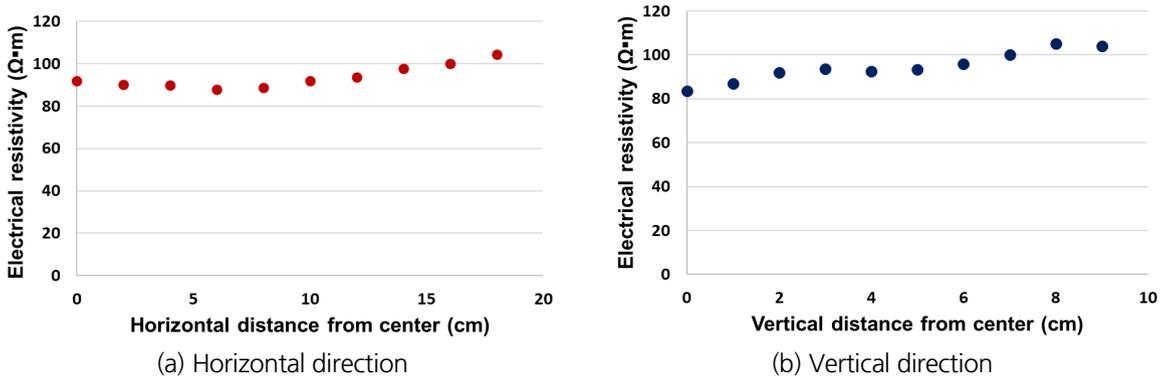
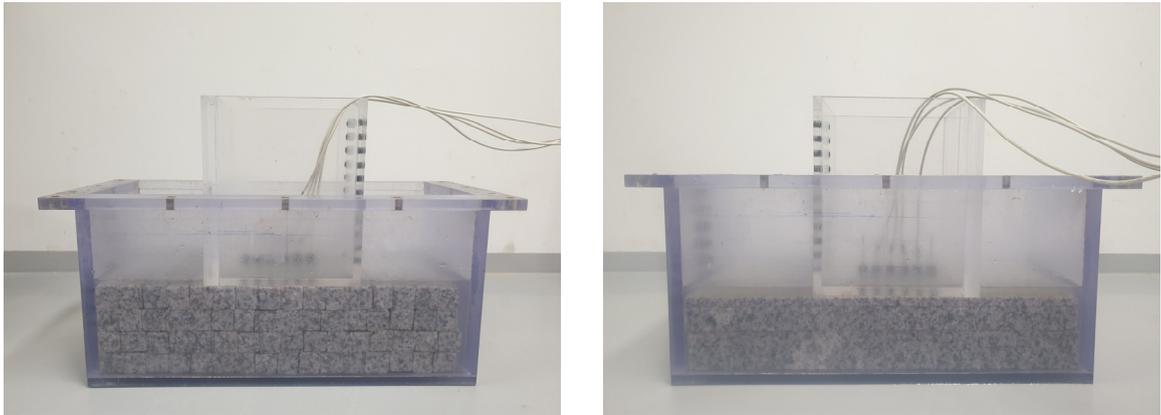


Fig. 11. Electrical resistivity distribution measured along soil chamber

암반 지반 모사를 위해 설치되는 화강암 블록 간 틈(gap)이 전기비저항에 미치는 영향을 파악하기 위해 화강암 판과 화강암 블록의 전기비저항 비교 실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 12에 나타난 것과 같이 동일한 높이의 화강암 블록 및 화강암 판을 조성하여 실험을 진행하고 측정되는 전기비저항 값을 비교하였다. 이때, 화강암 블록 사이에 틈이 발생하지 않도록 블록 사이를 최대한 밀착시켜 실험을 수행하였다.



(a) Measurement of electrical resistivity of rock blocks (b) Measurement of electrical resistivity of rock plates

Fig. 12. Electrical resistivity measurement in rock plates and blocks

화강암 블록과 판에서 측정된 전기비저항을 비교하여 Fig. 13에 나타냈다. 비교 결과 화강암 블록과 판의 전기비저항은 유의미한 차이를 보이지 않았으며, 따라서 블록 간 틈은 전기비저항 측정에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 판단할 수 있다.



Fig. 13. Comparison of electrical resistivity measured in granite blocks and plates

## 4.2 축소 모형 실험 결과

### Case 1. 단층 파쇄대

단층 파쇄대는 굴진 초기에 상대적으로 높은 전기비저항 값을 가지고 있는 화강암과 조우하여 높은 전기비저항 값이 측정되었다. Fig. 14(a)에 나타난 것과 같이 터널이 굴진하면서 충진 물질에 가까워질수록, 파쇄대 충진 물질의 전기비저항 영향에 의해 전기비저항 값이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 규사의 경우 초기의 전기비저항 값에 비해 파쇄대에서 측정된 전기비저항은 63% 감소하였고, 자갈의 경우 58% 감소하였다. 이는, 규사의 고유한 전기비저항이 자갈보다 상대적으로 작기 때문으로 사료된다.

### Case 2. 해수 침수대

해수 침수대는 단층 파쇄대와 마찬가지로 초기에 상대적으로 높은 전기비저항 값을 갖는 화강암으로 인한 높은 전기비저항 값을 보여주었다. Fig. 14(b)에서와 같이, 터널이 굴진하면서 충진 물질에 가까워질수록, 파쇄대 충진 물질의 전기비저항 영향에 의해 전기비저항이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 규사의 경우 초기의 전기비저항 값에 비해 파쇄대에서 측정된 전기비저항은 82% 감소하였고, 자갈의 경우 59% 감소하였다. 해수 침수대도 단층 파쇄대와 마찬가지로 전기비저항의 감소하는 경향성은 매우 유사하게 나왔지만, 해수 침수대는 염수의 영향으로 인해 전체적으로 매우 작은 전기비저항이 측정되었다.

### Case 3. 토사-암반 변화구간

토사-암반 변화구간은 초기에 상부의 토사 영향으로 인한 낮은 전기비저항 값을 보였다. Fig. 14(c)에서 볼 수 있듯이, 하부 암반으로 굴진 할수록 전기비저항이 커지는 것을 알 수 있다. 규사에서 화강암의 경우, 초기의 전기비저항 값에 비해 하부 암반의 전기비저항은 78% 증가하였고, 자갈에서 화강암의 경우는 66% 증가하였다. 규사는 상대적으로 자갈보다 고유한 전기비저항이 작기 때문에, 암반으로 굴진 하는 과정에서 초기의 전기비저항과 하부 암반의 전기비저항 차이가 더 크게 나타났다.

### Case 4. 암반-토사 변화구간

암반-토사 변화구간은 초기에 상부의 암반 영향으로 인한 높은 전기비저항 값을 보였다. Fig. 14(d)에서 볼 수 있듯이, 하부 토사로 굴진 할수록 전기비저항이 감소하였다. 화강암에서 규사의 경우, 초기의 전기비저항 값에 비해 하부 암반의 전기비저항은 79% 감소하였고, 자갈에서 화강암의 경우는 67% 감소하였다. 토사-암반 변화구간과 경향성은 반대이지만, 증감의 차이는 유사한 수치를 보여주었다.

각 위험 지반 조건마다 충진 물질, 하부 지반에 형성되어 있는 물질의 고유한 전기비저항에 의해 전기비저항 값의 증감 추이를 보여주었다. 이를 통해, 터널 굴진 중 측정되는 전기비저항 값의 증감 경향성을 바탕으로 전방 지반의 위험 지반 조건 유무를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

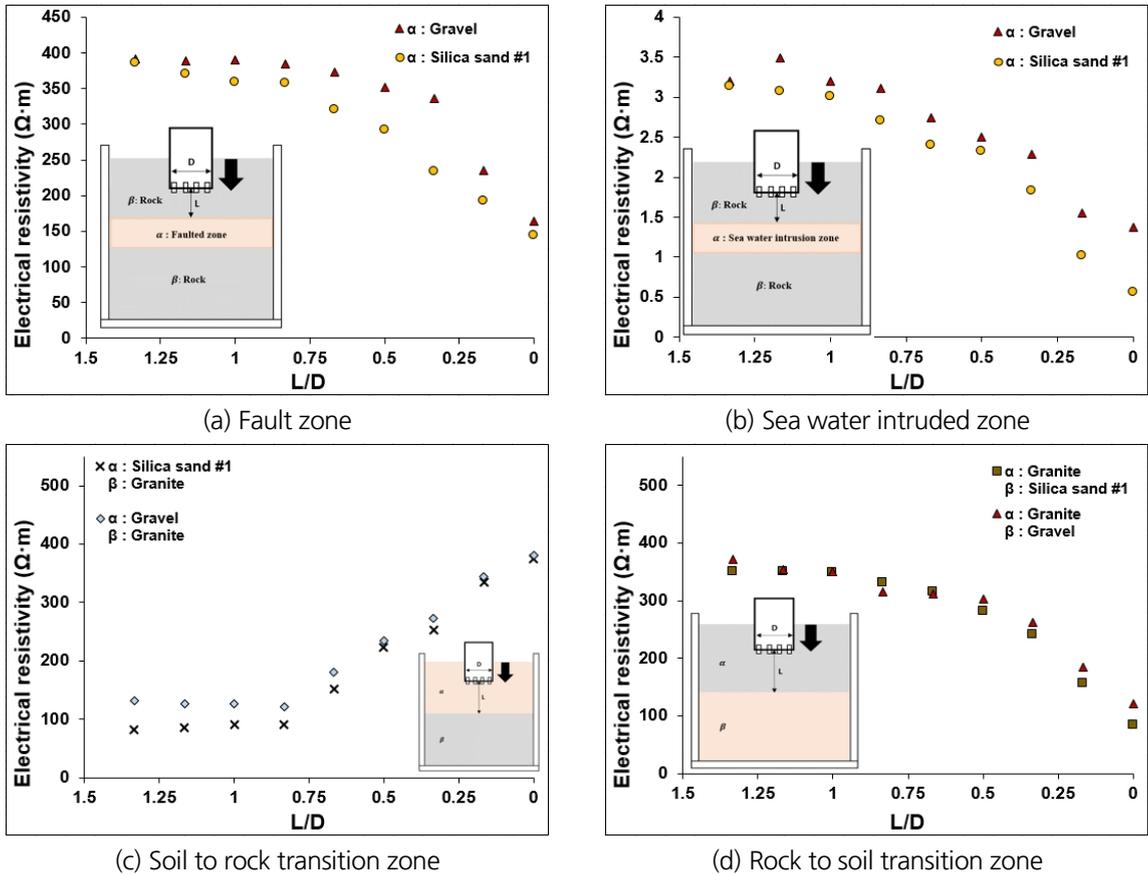


Fig. 14. Electrical resistivity survey result in different risk ground

## 5. 결론

본 연구에서는 TBM 굴진 중 조우 가능한 위험 지반조건인 단층 파쇄대, 해수 침수대, 토사-암반 변화구간, 암반-토사 변화구간을 모사하여 각 조건에서의 TBM 굴진에 따른 전기비저항 탐사 실내 실험을 수행하였다. 일련의 사전 실험을 통해 토조 경계 및 암반 간극의 영향을 검토하였으며, 중앙에서 모형 터널 굴진과 화강암 블록을 이용하는데 있어 문제가 없음을 판단하였다. 실험 결과, 단층 파쇄대 및 해수 침수대는 유사한 전기비저항 변화 경향을 보여주었고, 토사-암반 변화구간 및 암반-토사 변화구간은 반대의 경향을 나타냈다. 각 케이스마다 터널 굴진 중 측정된 전기비저항의 증감을 분석해 굴진면 전방 예측방법을 제시하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구의 실내 전기비저항 탐사 결과는 Takahashi and Kawase (1990)의 지표면 탐사 3층 모델 이론해와 비교하여 검증되었다. 또한 토조 경계 실험 및 화강암블록과 판 사이 전기비저항 측정 실험을 통해, 토조 경계

영향과 블록 간 틈 영향을 배제할 수 있다.

2. TBM이 단층 파쇄대 및 해수 침수대에서 파쇄대로 굴진해 나감에 따라 측정되는 전기비저항은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 충전 물질이 규사인 경우 초기의 전기비저항에 비하여 파쇄대에서 측정된 전기비저항은 63~82% 감소하였고, 자갈인 경우 58~59% 감소하였다. 또한, 해수 침수대는 단층 파쇄대와 측정되는 전기비저항 변화 경향은 상당히 유사했으나 염수의 영향으로 인한 매우 낮은 전기비저항 값이 측정되었다.
3. TBM이 토사-암반 변화구간 및 암반-토사 변화구간에서 하부 지반으로 굴착해 나감에 따라 전기비저항은 하부 지반의 고유한 전기비저항의 영향을 받았다. 토사-암반 변화구간은 토사 지반에서 암반 지반으로 굴착해 나감에 따라 규사는 78%, 자갈은 66% 전기비저항이 증가하는 경향을 보여주었고, 암반-토사 변화구간은 암반 지반에서 토사 지반으로 굴착해 나감에 따라 규사는 79%, 자갈은 67% 전기비저항이 감소하는 경향을 보여주었다.
4. 본 실험적 연구는 화강암 블록과 모형 터널을 이용하여 TBM 굴진 중 전기비저항 탐사를 실내에서 모사할 수 있으며, 굴진 중 위험 지반을 조우할 때 측정되는 전기비저항의 경향을 파악할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 시험법과 결과는 TBM 굴진 사전 또는 굴진 중 가능한 위험을 예측하고, 이를 대응함으로써 TBM 시공 인력 개입 비율 최소화 및 시공 안전성을 향상 시키는 데 기여할 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호21SMIP-A158708-02)”의 지원으로 수행하였습니다.

## 저자 기여도

이준호는 실험 수행, 데이터 수집, 원고 작성을 하였고, 강민규는 실험 설계 및 수행, 데이터 분석을 하였고, 이효범은 데이터 해석과 원고 검토를 하였고, 최항석은 연구 개념 및 설계와 원고 검토를 하였다.

## References

1. 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.
2. Bhattacharya, P.K., Patra, H.P. (1968), Direct Current Geoelectric Sounding: Principles and Interpretation, Elsevier, Amsterdam, pp. 135.
3. Broere, W. (2016), “Urban underground space: solving the problems of today’s cities”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 55, pp. 245-248.
4. Chen, G., Wu, Z.Z., Wang, F.J., Ma, Y.L. (2011), “Study on the application of a comprehensive technique

- for geological prediction in tunneling”, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 62, No. 8, pp. 1667-1671.
5. Cho, G.C., Choi, J.S., Lee, G.H., Lee, J.K. (2005), “Prediction of ground-condition ahead of tunnel face using electric resistivity - analytical study”, *Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress*, Istanbul, Turkey, pp. 1187-1194.
  6. Delisio, A., Zhao, J., Einstein, H.H. (2013), “Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötshberg Base Tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 33, pp. 131-142.
  7. Dickmann, T., Sander, B.K. (1996), “Drivage-concurrent tunnel seismic prediction (TSP)”, *Felsbau*, Vol. 14, No. 6, pp. 406-411.
  8. Grodner, M. (2001), “Delineation of rockburst fractures with ground penetrating radar in the Witwatersrand basin, South Africa”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 38, No. 6, pp. 885-891.
  9. Jeong, H., Zhang, N., Jeon, S. (2018), “Review of technical issues for shield TBM tunneling in difficult grounds”, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-24.
  10. Kang, D., Lee, I.M., Jung, J.H., Kim, D. (2019), “Forward probing utilizing electrical resistivity and induced polarization for predicting soil and core-stoned ground ahead of TBM tunnel face”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 3, pp. 323-345.
  11. Kaus, A., Boening, W. (2008), “BEAM - Geoelectrical Ahead Monitoring for TBM-Drives”, *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 1, No. 5, pp. 442-449.
  12. Kim, J.H., Yoon, H.K., Jung, S.H., Lee, J.S. (2009), “Development and verification of 4-electrode resistivity probe”, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 29, No. 3C, pp. 127-136.
  13. Lee, K.H., Park, J.H., Park, J., Lee, I.M. (2018), “A study on applicability of electrical resistivity survey in mechanized tunnelling job-sites”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 35-45.
  14. Li, S., Li, S., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, B., Su, M., Wang, Z., Wang, S. (2010), Predicting geological hazards during tunnel construction”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 232-242.
  15. McDowell, P.W., Barker, R.D., Butcher, A.P., Culshaw, M.G., Jackson, P.D., McCann, D.M., Skipp, B.O., Matthews, S.L., Arthur, J.C.R. (2002), *Geophysics in engineering investigations*, London: CIRIA, Vol. 19, pp. 254.
  16. Park, J., Ryu, J., Choi, H., Lee, I.M. (2018), “Risky ground prediction ahead of mechanized tunnel face using electrical methods: laboratory tests”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 3663-3675.
  17. Park, S.G. (2004), “Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface”, *Geophysics and Geophysical Exploration*, Vol. 7, No. 2, pp. 130-135.
  18. Reynolds, J.M. (2011), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John & Sons, New York, pp. 289-402.
  19. Ryu, J., Park, J., Lee, S.W., Lee, I.M., Kim, B.K. (2018), “Forward probing utilizing electrical resistivity and induced polarization for predicting mixed-ground ahead of TBM tunnel face”, *Journal of Korean*

Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 1, pp. 55-72.

20. Santamarina, J.C., Klein, K.A., Fam, M.A. (2001), *Soils and Waves*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 329-428.
21. Takahashi, T., Kawase, T. (1990), "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, pp. 604-612.
22. Yoon, Y., Jeong, H., Jeon, S. (2018), "Review of pre-grouting methods for shield TBM tunneling in difficult grounds", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 28, No. 6, pp. 528-546.