

TBM 주변 지반상태예측을 위한 전기비저항 이론식 유도 및 검증

홍창호¹ · 이민형² · 조계춘^{3*}

¹정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사후연구원

²학생회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

³정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

Derivation and verification of electrical resistivity theory for surrounding ground condition prediction of TBM

Chang-Ho Hong¹ · Minhyeong Lee² · Gye-Chun Cho^{3*}

¹Postdoctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

³Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

*Corresponding Author : Gye-Chun Cho, gyechun@kaist.ac.kr

Abstract

Since the depth of tunneling with tunnel boring machine (TBM) becomes deeper and deeper, the expense for site investigation for coring and geophysical survey increases to obtain the sufficient accuracy. The tunnel ahead prediction methods have been introduced to overcome this limitation in the stage of site investigation. Probe drilling can obtain the core and borehole images from a borehole. However, the space in TBM for the probe drilling equipment is restricted and the core from probe drilling cannot reflect the whole tunnel face. Seismic methods such as tunnel seismic prediction (TSP) can forecast over 100 m ahead from the tunnel face though the signal is usually generated using the explosive which can affect the stability of segments and backfill grout. Electromagnetic methods such as tunnel electrical resistivity prospecting system (TEPS) offer the exact prediction for a conductive zone such as water-bearing zone. However, the number of electrodes installed for exploration is limited in small diameter TBM and finally the reduction of prediction ranges. In this study, the theoretical equations for the electrical resistivity survey whose electrodes are installed in the face and side of TBM to minimize the installed electrodes on face. The experimental tests were conducted to verify the derived equations.

Keywords: TBM, Electrical resistivity survey, Side electrode

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
22(1)135-144(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.1.135>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received January 2, 2020

Revised January 9, 2020

Accepted January 10, 2020



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 © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

국내에서 TBM 공법을 활용한 터널건설 시 점차 건설심도가 깊어지고 있으며, 이로 인해 상부 지반조사 단계에서 충분한 예측 정확도를 획득하기 위해서는 시추조사 및 물리탐사 비용이 증가하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 터널 시공 중 터널 굴착면 전방 예측을 위한 방법들이 제시되었다. 프로브 드릴링을 활용한 굴착면 전방 예측은 코어회수, 시추공 내부 이미지 등을 활용할 수 있는 장점이 있지만 실제 TBM 내에 설치가 어렵고 터널 막장 전체가 아닌 국부적인 지반만을 파악할 수 있다. TSP 등 탄성파를 활용한 방법은 100 m 이상의 긴 탐사거리를 가지지만 신호발생을 위해 발파를 사용하므로 세그먼트 라이닝, 백필 등의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. TEPS를 포함한 전자기파 탐사는 지하수 층 등 전도성 있는 이상대를 파악하는 데 적합하지만 소구경 TBM에 설치할 수 있는 전극의 개수가 한정적이며 이는 탐사 범위의 감소 등을 야기한다. 본 연구에서는 전기비저항 탐사 시 굴착면에 설치되는 전극의 개수를 최소화하기 위해 TBM의 굴착면과 측면에 전극이 설치되었을 때에 대한 탐사 이론식을 제시하고 실내실험을 통해 검증하였다.

주요어: TBM, 전기비저항탐사, 측면전극

1. 서론

국내에서 건설되고 있는 도심지 터널의 대부분은 소음, 진동 등의 이유로 터널굴착장비인 TBM (Tunnel boring machine)을 활용하고 있다. 또한 도심지에서는 다양한 기존 지하구조물들이 존재하고 있어 기존 구조물에 영향을 최소화하고 토지 보상 비용을 절감하기 위해 신규 건설되는 터널은 그 심도가 점차 증가하고 있다(한계심도를 40 m 이상 초과하는 터널의 경우 토지 보상비용이 0.2% 이하) (Ministry of Land Transportation, 2014). 터널 심도가 증가하게 되면서 터널 시공 전 수행되는 상부 지반조사(시추조사, 물리탐사 등) 횟수 및 심도가 증가해야 하며 정확성을 확보하기 위해 더욱 더 많은 지반 조사가 수행되어야 하므로 비용 및 시간이 증가하게 된다.

이러한 이유로 최근 TBM 터널 굴착 도중 터널 굴착면 전방을 예측할 수 있는 기술들이 도입되어 사용되고 있다. TBM 전방 예측기법은 크게 프로브드릴링을 활용하는 방법과 탄성파, 전자기파 등을 활용하는 방법으로 나뉜다. 프로브드릴링은 터널굴착방향으로 드릴링하여 시추코어를 회수하고, 시추공 카메라 등을 이용하여 실제 터널굴착면 전방의 지반상태를 육안으로 확인하게 된다(Kim et al., 2015). 하지만 국내에서 시공되고 있는 TBM의 직경 역시 절반 이상이 5 m 이하인 점을 감안했을 때 대부분의 TBM에서는 설계 시 프로브드릴링 설치공간이 반영되어 있지 않다면 사용이 불가하다(Jung et al., 2011). TSP (Tunnel Seismic Prediction)을 포함한 탄성파 탐사 기법의 경우 탐사 범위가 약 100 m 가량으로 길지만 세그먼트 홀 등에 폭약을 설치하여 신호를 발생시키므로 세그먼트 라이닝이나 백필의 성능에 영향을 미칠 수 있다. TEPS (Tunnel Electrical resistivity Prospecting System)과 같은 전자기파 탐사기법의 경우 전도성이 있는 이상대 탐사에 적합하다(Li et al., 2017). 하지만 전자기파를 이용한 탐사의 경우 탐사거리가 전극사이의 거리에 따라 변화하기 때문에 전술한 바와 같이 도심지 소구경 TBM에서 사용 시 탐사의 범위가 줄어들게 되며 터널 굴착면에 설치할 수 있는 탐사 전극의 개수 역시 감소하

게 된다(Roy and Apparao, 1971). 이러한 한계를 극복하기 위해 Schaeffer and Mooney (2016)는 TBM 터널굴착 면 전방의 이질층을 탐사하기 위해 터널 굴착면과 TBM 후방에 전극을 설치하는 방법을 제시하고 이를 수치해석 적 방법으로 검증하였다. 하지만 이론적인 연구는 아직 수행되지 않아 전극 배열에 따른 정확한 측정 특성은 파악 되지 못한 바 있다.

본 연구에서는 터널 굴착면과 TBM 후방의 측면에 위치한 전극을 활용하여 TBM 장비 주변에 위치한 전도성 이질층을 확인할 수 있는 탐사 이론을 개발하고 이를 검증하기 위한 실내실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 이질층이 없는 경우

두 전극 사이의 저항은 두 전극의 전압 차이로부터 구해지며 각 전극의 전압(V)은 전극의 등전위표면적 (Equipotential surface area)으로부터 계산할 수 있다(Hong et al., 2019b).

$$V = \int \frac{\rho I}{A} dx \quad (1)$$

여기서, ρ 는 매질의 전기비저항, I 는 두 전극 사이에 흐르는 전류, x 는 전극의 중심선으로부터 떨어진 거리, A 는 등전위표면적이며 x 의 함수로 표현된다.

본 연구에서는 터널굴착면 중앙과 터널 후방에 구형의 전극이 설치되었다고 가정하였으며, 터널굴착면 중앙에 설치된 전극에서의 등전위표면적은 Fig. 1과 같으며 이로부터 구해진 정면 전극의 전압(V_1)은 다음과 같다.

$$V_1 = \int_r^{d/2} \frac{\rho I}{A_1(x)} dx + \int_{d/2}^{d+h} \frac{\rho I}{A_1(x) + A_2(x)} dx \quad (2)$$

여기서, h 는 측면 전극이 터널 굴착면으로부터 떨어진 거리를 나타내며 d 는 터널의 직경을 나타낸다.

또한 터널 후방에 위치한 전극에서의 등전위표면적 계산 시 Fig. 2와 같이 터널의 단면을 육각형으로 가정하였는데, 이는 터널 단면을 원형으로 가정하는 경우 측면 전극의 전압(V_2)이 타원적분으로 구해져 정확한 값을 구해 내는 것이 어렵기 때문이다. 측면 전극의 전압(V_2)는 다음과 같다.

$$V_2 = - \left[\int_r^{d/2} \frac{\rho I}{A_3(x)} dx + \int_{d/2}^d \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x)} dx + \int_d^{3d/2} \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x) + A_5(x)} dx + \int_{3d/2}^{d+h} \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x) + A_5(x) + A_6(x)} dx \right] \quad (3)$$

이때, h 가 $d/2$ 보다 크다고 가정하였다.

따라서 터널 굴착면 중앙과 터널 측면에 설치된 전극 사이의 저항(R_1)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_1 = \frac{V_1 - V_2}{I} \tag{4}$$

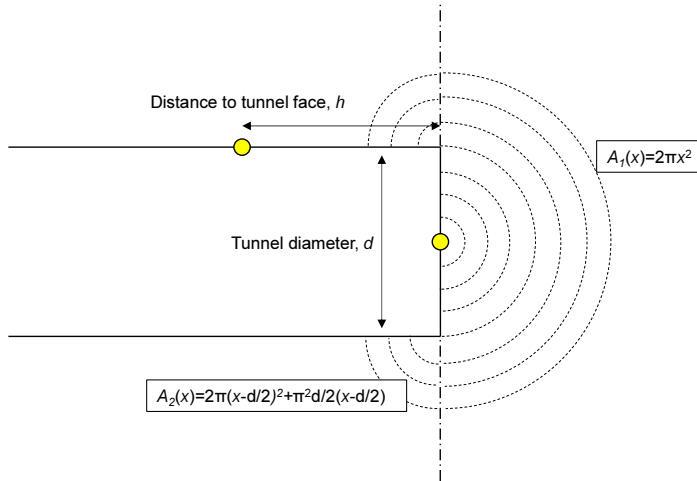


Fig. 1. Side view of tunnel and equipotential surface area of face electrode

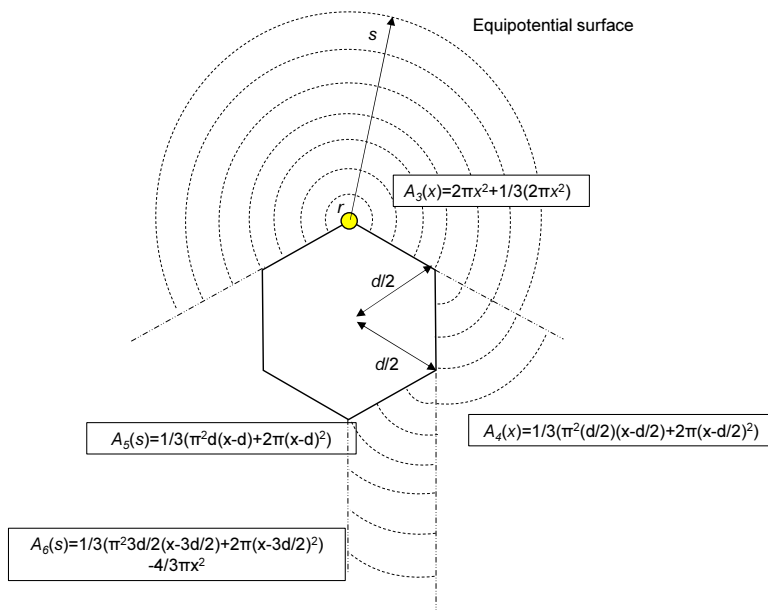


Fig. 2. Sectional view of tunnel and equipotential surface area of side electrode

2.2 이질층이 있는 경우

만약 터널 전방에 터널 굴착면과 수직인 현재 지반보다 매우 전도성 높은 지반이 터널 굴착면으로부터 L 만큼 떨어진 거리에 위치한다고 가정하면(Fig. 3), 영상법(Method of image, Hong et al. 2019a)과 터널 구조물 형태를 고려하여 아래와 같이 굴착면 전극과 측면 전극에서의 전압(V_3, V_4)을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_3 = & \int_r^{d/2} \frac{\rho I}{A_1(x)} dx + \int_{d/2}^{d/2+h} \frac{\rho I}{A_1(x) + A_2(x)} dx \\
 & + \underbrace{\left(- \int_{d/2+h}^L \frac{\rho I}{A_1(x) + A_2(x)} dx \right)}_{\text{effect of M''}} + \underbrace{\int_{d/2+h}^{L+h} \frac{\rho I}{A_1(x) + A_2(x)} dx}_{\text{effect of N''}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 V_4 = & - \left[\int_r^{d/2} \frac{\rho I}{A_3(x)} dx + \int_{d/2}^d \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x)} dx + \int_d^{3d/2} \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x) + A_5(x)} dx \right. \\
 & + \int_{3d/2}^{d+h} \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x) + A_5(x) + A_6(x)} dx \\
 & + \underbrace{\left(- \int_{3d/2}^{\sqrt{(2L+h)^2 + d^2/4}} \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x) + A_5(x) + A_6(x)} dx \right)}_{\text{effect of M''}} \\
 & \left. + \underbrace{\int_{3d/2}^{2L+2h} \frac{\rho I}{A_3(x) + A_4(x) + A_5 + A_6} dx}_{\text{effect of N''}} \right]
 \end{aligned} \tag{6}$$

이때, L 은 $d/2$ 와 h 보다 크다고 가정하였다. 만약 TBM이 굴착을 진행하며 L 이 감소하게 되면 적분의 순서, 등전위표면적 등을 변경하여 수식을 다시 구성해야 한다. 3장의 실내실험과의 비교로 사용된 이론식은 이를 고려하였다.

두 전극사이의 저항(R_2)은 두 전극 사이의 전압 차로 구할 수 있다.

$$R_2 = \frac{V_3 - V_4}{I} \tag{7}$$

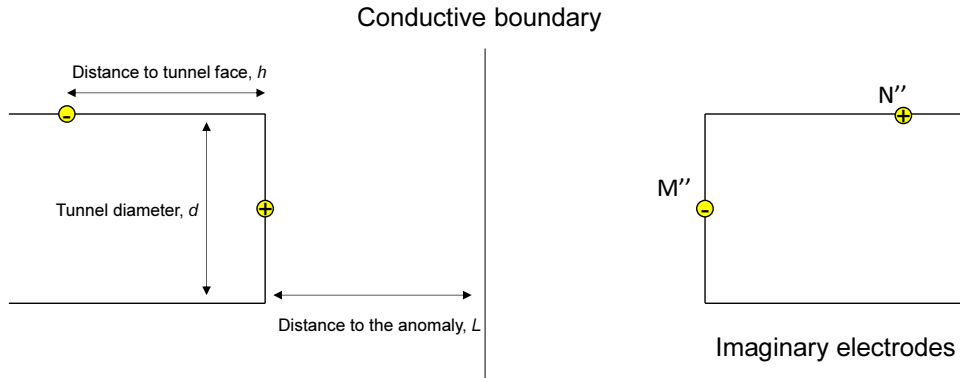


Fig. 3. Configuration of tunnel near the conductive boundary

3. 실내실험

3.1 실험 방법

앞서 도출한 이론식을 검증하기 위해 모형 TBM를 제작하여 실내실험을 수행하였다. 실험의 편의성을 위해 터널 굴착방향은 수평방향이 아닌 수직방향으로 실험을 설계하였다. 모형 TBM의 직경은 70 mm였고, 전극은 터널 굴착면 방향 정면에 1개, 터널 막장면으로부터 65 mm 떨어진 후방 측면에 1개를 설치하였으며 그 직경은 4 mm 인 원기둥 형태였다. 모형 TBM의 재질은 아크릴이었으며 이는 TBM 모형으로 인한 측정오차를 무시하기 위해서였다. 토사로 실험할 경우 지반 전체의 전기비저항 값이 다짐 등에 의해 변화하기 때문에 동일한 전기비저항값

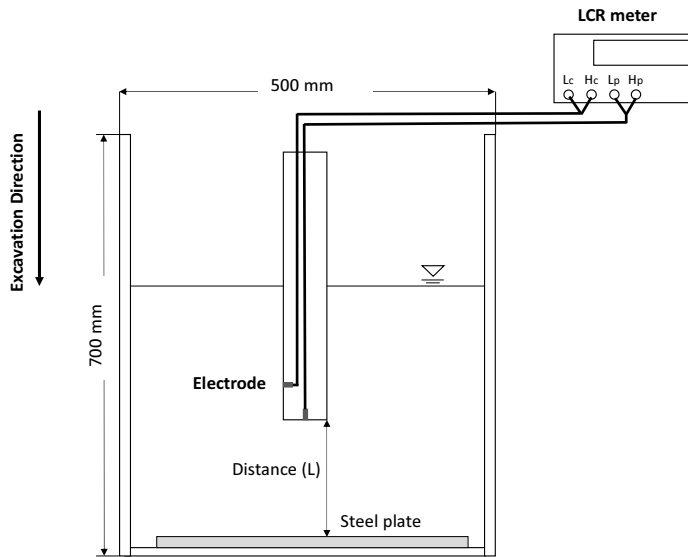


Fig. 4. Test setup

을 가지는 소금물을 사용하여 실험하였다. 이때 소금물의 전기비저항은 $54 \Omega \cdot \text{m}$ 이었으며, 두 전극사이의 저항은 LCR meter (Agilent 4263B)를 활용하여 측정하였다. 측정 시 전압은 1 V, 주파수는 1 kHz였는데 이는 전극의 분극(polarization)을 제거하기 위함이었다(Glover et al., 2000). 토조의 크기는 가로 500 mm, 세로 500 mm, 높이 700 mm로 하였고 이질층은 철판을 사용하여 모사하였다(Fig. 4).

터널 모형의 길이는 이질층에 접근함에 따라 발생하는 수위 증가를 고려하여 산정하였다. 또한 수위로 인해 생기는 경계조건의 효과가 존재하므로(Ryu et al., 2018) 이를 무시할 수 있는 거리(이질층으로부터 150 mm 떨어진 위치)로부터 매 10 mm 간격으로 터널 모형을 이질층에 접근시키며 측정을 수행하였다.

3.2 실험 결과

실내 실험의 결과를 도식화하면 Fig. 5와 같다. 점선으로 표시된 것은 식 (7)을 활용하였고 경계에 다가감에 따라 식 (5) ~ 식 (7)의 적분 구간을 변경하여 최종 저항값을 계산하였다. 터널굴착면이 이질층에 다다랐을 때에는 이질층으로 모사한 전도성 물체 자체가 전극으로 작용하는 것으로 계산하였다. 터널 굴착면과 경계면이 터널 직경의 약 1~3배(0.07~0.21 m) 구간에서, 측정 전기저항값이 변화하는 것을 확인하였다. 즉, TBM이 경계면에 터널 직경의 1~3배 거리 이내로 근접하였을 때 전기비저항 변화를 통해 예측이 가능함을 의미하며 경계면의 방향, 전극의 배치 등이 이에 영향을 미칠 것으로 추정된다. 이는 전기장의 흐름이 전도성이 있는 이질층의 주변에 접근하여 변화하였기 때문으로 판단된다.

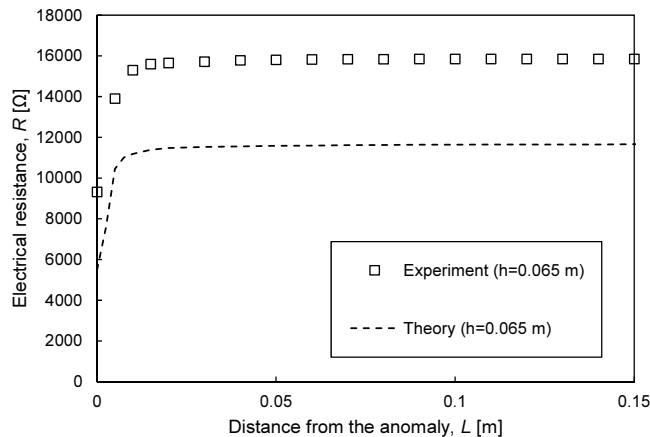


Fig. 5. Experimental test results

측정된 전기저항값은 이론값에 비해 약 4,000 Ω 가량 높은 것을 확인하였다(Fig. 5). 이는 이론식에서 터널의 단면을 육각형의 형태로 가정한 것과 실험 시 사용된 전극이 구형이 아닌 디스크형태이기 때문으로 판단된다. 단면을 육각형의 형태로 가정하면서 초기 등전위면적이 증가하였고, 이로 인해 이론적 저항이 감소하였을 것으로

보인다. 또한 디스크 형태의 전극을 동일한 면적을 가지는 반구형으로 가정하였는데, 이러한 가정은 상황에 따라 3~30% 가량의 계산 차이를 유발하는 것으로 알려져있다(Hong et al., 2019b). 뿐만 아니라 이론식은 무한한 경계를 가정하여 개발되었지만 실제 실험은 무한한 조건이 아닌 수조에서 이루어졌기 때문에 이론값에 비해 측정 저항값이 크게 나오게 되었을 것으로 판단된다.

굴착면과 경계면 사이의 거리가 150 mm일 때의 이론값과 실험값의 차이를 제거한 것을 Fig. 6에 도식화하였고 측정저항값과 이론적 저항값이 같은 경향성을 띠는 것을 확인하였다. 이론값과 실험값이 동일한 경향을 보이는 것은 확인하였으나 정량적 값 자체에서는 전술한 이유 등으로 차이가 발생하므로 추후 전극의 형태를 구형으로 바꾸거나 이론식에서 터널 단면적의 가정을 수정하여 추가적인 실험 및 연구가 필요할 것으로 파악된다.

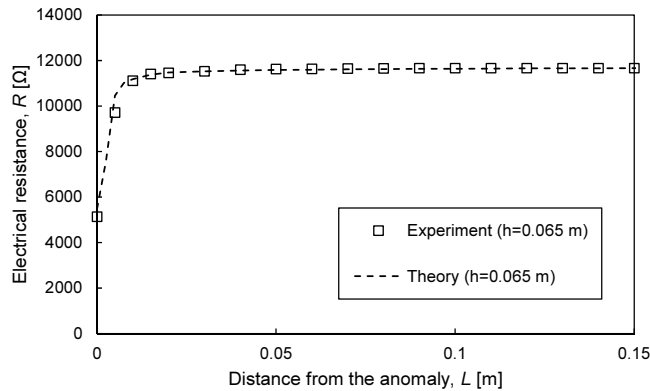


Fig. 6. Experimental resistance after calibration and theoretical resistance

4. 결론

본 연구에서는 TBM 주변 전기비저항 탐사를 위한 굴착면 전극과 측면 전극에 대한 이론식을 개발하고 이에 대한 검증을 하고자 하였다. 개발된 이론식을 검증하기 위해 실내 모형 실험을 수행하였다. 본 연구에서 결론은 다음과 같다.

1. TBM 굴착면 중앙과 후방에 설치된 전극을 활용하여 터널 전방에 위치한 전도성 경계면을 탐사할 수 있는 이론식을 개발하였다. 해당 이론식은 터널 직경, 측면전극의 설치 위치, 탐사 전극의 직경, 터널 굴착면과 경계면과의 거리 등을 고려하여 개발되었다.
2. 개발된 이론식을 검증하기 위해 축소모형을 활용한 실내실험을 수행하였다. 균질한 전기비저항을 가지는 소금물을 매질로 사용하였고 전도성 경계면은 철판을 활용하여 모사하였다. 수평방향의 굴진을 모사하기 어려워 수직방향으로 실험을 수행하였고 전극은 외부로 드러난 부분이 디스크형태가 되도록 원기둥형 전극을 사용하였다. 실내실험에서 얻어진 전기저항값과 이론식으로부터 얻어진 전기저항값은 약 4,000 Ω의 차이가 발

생하였다. 이는 이론식에서 터널의 단면을 육각형의 형태로 가정한 것, 실험 시 사용된 전극이 구형이 아닌 디스크형태이기 때문으로 판단된다.

3. 실내실험에서 얻어진 전기저항값과 이론식으로부터 얻어진 전기저항값의 차이를 보정하면 두 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 이론식과 실내실험의 결과의 정성적 경향이 동일한 것을 의미한다. 또한 터널 굴착면과 전도성 경계면이 터널 직경의 1~3배 내에 위치하는 경우 측정되는 저항값이 변화하는 것을 확인하였다. 이는 본 전극 배열 및 이질층의 위치에 따른 탐사 범위가 터널 직경의 1~3배가량임을 의미하며, 다른 전극 배열 및 이질층의 위치, 방향, 두께 등에 따라 탐사범위가 변화될 수 있다.
4. 본 연구의 결과를 추가적으로 검증하기 위해 이론의 가정사항과 일치하는 추가적인 실내실험, 수치해석을 통한 검증 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 전도성이 있는 경계면 뿐 아니라 TBM 자체의 전도성, 경계면과 현 지반의 전기비저항의 비, 경계면의 각도 등을 고려한 이론식 개발 및 검증이 필요할 것으로 판단되며 이러한 연구는 추후 터널 굴착면 전방, 터널 상부 등의 지반 상태 확인을 위해 반드시 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2018년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R18XA06-09).

저자 기여도

홍창호는 연구 개념 수립 및 원고 작성을 하였고, 이민형은 데이터 수집을 하였고, 조계춘은 연구설계, 데이터 분석 및 원고검토를 하였다.

References

1. Glover, P.W.J., Hole, M.J., Pous, J. (2000), "A modified Archie's law for two conducting phases", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 180, No. 3-4, pp. 369-383.
2. Hong, C.H., Chong, S.H., Cho, G.C. (2019a), "Theoretical study on geometries of electrodes in laboratory electrical resistivity measurement", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 19, 4167.
3. Hong, C.H., Chong, S.H., Hong, E.S., Cho, G.C., Kwon, T.H. (2019b), "Theoretical and experimental studies on influence of electrode variations in electrical resistivity survey for tunnel ahead prediction", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 21, No. 2, pp. 267-278.
4. Jung, H.S., Choi, J.M., Chun, B.S., Park, J.S., Lee, Y.J. (2011), "Causes of reduction in shield TBM performance - A case study in Seoul", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 26, No. 3, pp. 453-461.
5. Kim, K.S., Kim, J.H., Jeong, L.C., Lee, I.M., Cho, G.C. (2015), "Development for prediction system of

- TBM tunnel face ahead using probe drilling equipment and drilled hole imaging equipment”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 393-401.
6. Li, S., Liu, B., Xu, X., Nie, L., Liu, Z., Song, J., Sun, H., Chen, L., Fan, K. (2017), “An overview of ahead geological prospecting in tunneling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 63, Supplement C, pp. 69-94.
 7. Ministry of Land Transportation (2014), *Underground land use compensation criteria for railway construction*, Notice No. 2014-104.
 8. Roy, A., Apparao, A. (1971), “Depth of investigation in direct current methods”, *Geophysics*, Vol. 36, No. 5, pp. 943-959.
 9. 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.
 10. Schaeffer, K., Mooney, M.A. (2016), “Examining the influence of TBM-ground interaction on electrical resistivity imaging ahead of the TBM”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 58, pp. 82-98.