Research Paper

터널 굴착면에서의 전기비저항 탐사 적용성에 관한 수치해석 연구

이명종[1] · 김낙영[2] · 이상래[3] · 황범식[4] · 하명진[5] · 김기석[6] · 조인기[7] · 이강현[8*]

[1]비회원, 한국지질자원연구원 책임연구원
[2]정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구위원
[3]정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원
[4]정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원
[5]비회원, (주)희송지오텍 차장
[6]정회원, (주)희송지오텍 대표이사
[7]비회원, 강원대학교 지구물리학과 정교수
[8]정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

Numerical simulation study on applicability of electrical resistivity survey at tunnel face

Myeong-Jong Yi[1] · Nag-Young Kim[2] · Sangrae Lee[3] · Bumsik Hwang[4] · Myung Jin Ha[5] · Ki-Seog Kim[6] · In-Ky Cho[7] · Kang-Hyun Lee[8*]

[1]Senior Researcher, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources
[2]Senior Research Fellow, Korea Expressway Corporation Research Institute
[3]Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute
[4]Senior Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute
[5]Deputy General Manager, Heesong Geotek Co., Ltd.
[6]CEO, Heesong Geotek Co., Ltd.
[7]Professor, Dept. of Geophysics, Kangwon National University
[8]Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute

***Corresponding Author :** Kang-Hyun Lee, tunnelslope@ex.co.kr

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(3)279-292(2022)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.3.279

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received April 7, 2022
Revised May 19, 2022
Accepted May 20, 2022

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 ⓒ2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Abstract

Unexpected anomalies in the geotechnical investigation at design stage may cause problems during tunnel excavation. Therefore, it is important to predict the ground condition ahead of a tunnel face during tunnel excavation in order to prevent tunnel collapse. Despite the fulfillment of an electrical resistivity survey at the tunnel face, the existing electrical resistivity survey program can produce distorted results by the limitation of tunnel modelling. In this background, this study develops a modelling program for an electrical resistivity survey considering the tunnel shape. Numerical simulation and inverse calculation were performed for the electrical resistivity survey in the tunnel using the developed program. As a result, it was proved that the developed program could predict accurately the anomalous object's location and condition ahead of the tunnel face.

Keywords: Electrical resistivity survey, Tunnel

초 록

설계 단계의 지반조사에서 예측되지 않은 이상대는 터널 시공 중 많은 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 터널의 붕괴 예방을 위해 터널 시공 중 굴착면 전방의 지질상태를 예측하는 것은 매우 중요하다. 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사를 하더라도, 기존의 전기비저항 탐사 프로그램들은 터널을 모델링하지 못하기 때문에 왜곡된 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 터널의 형태를 고려할 수 있는 전기비저항 모델링 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 터널에서 전기비저항 탐사에 대한 수치모델링 및 역산을 수행하였다. 그 결과, 굴착면 전방의 이상체의 위치 및 상태를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

주요어: 전기비저항 탐사, 터널

1. 서 론

터널 설계를 하기 전에 시추조사, 물리탐사, 지표지질조사 등의 지반조사를 수행함으로써 터널 주변 지반의 암반상태와 지반구조를 파악한다. 시추조사를 통해 얻어진 시추코어에 대한 육안관찰 및 시추공 영상촬영, 암석물성시험과 현장에서의 지형측량, 지표지질조사 등의 결과를 종합적으로 분석하여 지반의 상태를 평가하고 터널 표준지보패턴 등을 결정하는 등의 설계를 수행하게 된다(Lee, 2014; KECRI, 2020). 그러나 설계단계에서 수행되는 지반조사는 수 km 이상의 광범위한 지역의 지반상태를 대상으로 하기 때문에 개략적인 지하구조를 예측할 수 있으나, 터널 시공 중에 설계단계의 지반조사에서 예측하지 못했던 단층, 파쇄대 등의 이상대가 나타나는 경우가 다수 발생한다(Fig. 1).

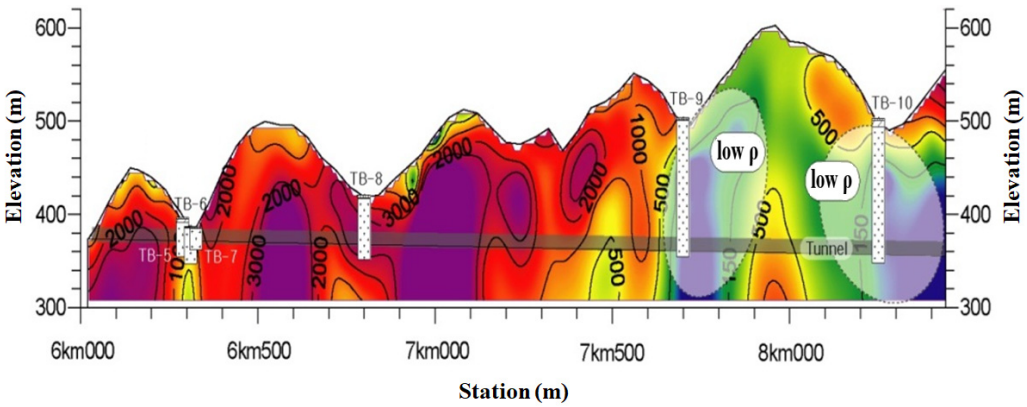


Fig. 1. The result of geotechnical investigation at design stage (KECRI, 2020)

터널 시공 중 단층, 파쇄대 등의 이상대가 나타났을 때 적절한 지보 및 대처를 하지 못하는 경우에는 터널 붕괴, 지반 침하 및 함몰 등의 사고가 발생할 수 있다. 사고가 발생하는 경우 인명피해 및 주변 지장물에 악영향을 미치

는 등의 시간적, 경제적 손실이 발생하게 된다(Hasegawa et al., 1993; Kim et al., 2000). 따라서 터널 붕괴, 지반 침하 및 함몰 등의 사고가 발생하지 않도록 터널 시공 중에 막장면 관찰(Face mapping)이나 수평시추, 물리탐사 등을 통해 굴착면 전방의 지반 상태를 예측하고 적절하게 대처할 필요가 있다.

터널 시공 중에 굴착면 전방의 지반상태를 예측할 수 있는 기법은 다수 개발되어 왔다(Lee et al., 2002; 2016; Kim et al., 2015). 물리탐사 방법으로는 탄성파를 이용한 TSP탐사(Tunnel Seismic Profiling), 전자기파를 이용한 TEP탐사(Tunnel Electromagnetic Prospecting) 등이 있다. 또한 수평시추를 할 때 사용되는 천공장비에 데이터로거를 장착하여 천공 시에 얻어지는 회전력(torque) 등을 통해 암반 지질의 구조적인 상태를 파악하기도 한다.

그러나 위에 기술한 막장전방 예측기법은 탐사에 필요한 센서 및 장비 설치, 분석시간이 장시간 소요되는데 비해, 얻어지는 결과가 국부적이거나 해상도가 낮은 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 시공 전 전반적인 지반구조 파악이 가능하고, 경제성 등의 이유로 터널 현장에서 많이 활용되고 있는 전기비저항 탐사의 터널 굴착면에서의 적용성을 검토하기 위한 수치해석을 수행하였다.

2. 배경이론

2.1 전기비저항의 특성

전기저항은 전류의 흐름에 저항하는 정도를 이야기하나 물질의 특성보다는 물체의 기하학적인 요소에 의해 지배를 받는다. 이와 달리 전기비저항은 전류의 흐름에 저항하는 물질의 특성으로 물체의 모양이나 크기에 상관없이 물체의 전기적 특성을 나타내는 값이다. 다시 말하면 전기비저항은 단위체적의 물질이 갖는 전기저항을 의미하는데, 임의의 물체에서 전기비저항(ρ)과 전기저항(R)과의 관계는 식 (1)과 같다.

$$R = \rho F_s \tag{1}$$

여기서, F_s는 전류가 흐르는 곳의 형상에 따라 변하는 형상계수(Shape factor)이며, 원통형 물체에서 F_s는 물체의 길이를 물체의 단면적으로 나눈 값이다.

암석에서 전기비저항은 공극률, 포화도, 지하수의 전기전도도, 점토의 함유량 등에 의해 변화한다. 신선함 암반일수록 공극률이 작고, 점토함유량이 작기 때문에 전기비저항이 크게 나타난다. 반면에 절리 등이 발달한 단층대, 파쇄대 등의 암반은 풍화가 많이 진행되었기 때문에 공극률이 크고, 공극에 점토 등의 충전물질이 많은 경향이 있기 때문에 전기비저항이 작게 나타난다. Fig. 2는 토사와 암석의 종류별 전기비저항 분포도를 보여준다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 토사와 암석의 특성에 따라 서로 다른 전기비저항 분포를 가지고 있음을 알 수 있으며, 토사는 암석에 비해 전기비저항이 상대적으로 작다. 또한 암석 중에서 강도가 큰 것으로 알려져 있는 화강암의 경우 전기비저항이 매우 크게 나타나나는 경향을 볼 수 있다.

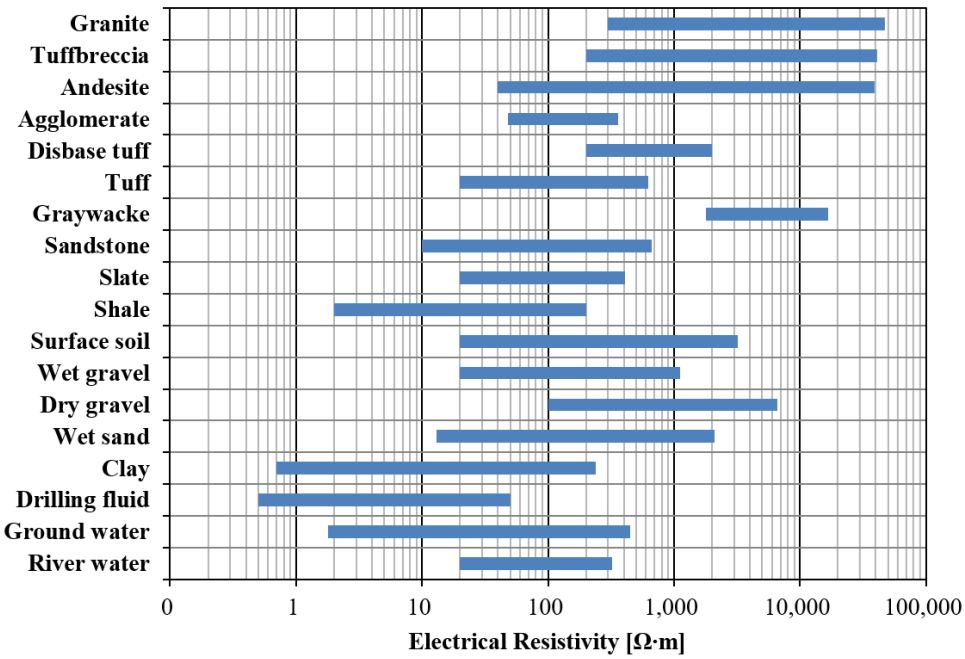


Fig. 2. Electrical resistivity distribution according to ground type (Lee, 2014)

2.2 전기비저항 탐사

전기비저항의 특성을 이용하여 지반상태를 평가하기 위한 다양한 방법이 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되고 광범위한 지역의 지반상태를 평가하기 위한 전기비저항 탐사, 시추조사 후 시추공 인근의 지반상태를 평가하기 위한 전기비저항 검층, 여러 시추공 사이의 지반상태를 높은 해상도로 평가하는 전기비저항 단면영상법 등이 있다. 각각의 방법에 따라 탐사범위, 해상도가 차이가 있기 때문에, 현장에서는 탐사목적에 따라 각각의 방법을 단독 또는 조합하여 사용한다.

여러가지 방법 중에서 전기비저항 탐사는 지반의 전기적 성질인 전기비저항 분포에 의해 지반 상태를 파악하는 탐사 방법으로 토목 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 전기비저항 탐사는 탐사하고자 하는 대상에 따라 여러 가지 배열에 맞추어 지표에 다수의 전극을 설치하고 인공적으로 지하에 전류를 흘려 이 때 발생하는 지반의 전위 분포로부터 전기비저항을 구하여 지하의 지반구조를 파악하는 방법이다(Lee, 2014)(Fig. 3). Fig. 3에서 C는 전류전극, P는 전위전극, a는 전극간의 거리를 의미한다.

전기비저항 탐사 방법은 수평 탐사, 수직 탐사, 2차원 탐사, 3차원 탐사 등이 있지만 현재는 2차원 탐사가 주로 사용되고 있으며, 정밀한 조사가 필요한 경우 종종 3차원 탐사가 사용된다. 전기비저항 탐사는 넓은 범위의 지질 분포나 단층파쇄대의 유무 등의 지질 구조, 지층의 풍화· 변질 정도, 지하수 상황 등을 파악할 수 있어, 경제적이고 효율적인 탐사방법이다.

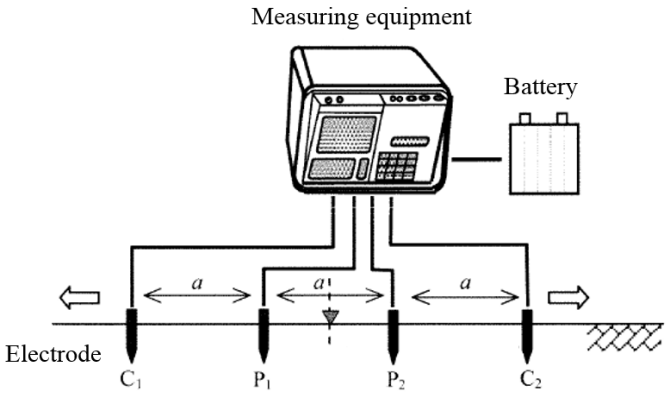


Fig. 3. Schematic diagram of electrical resistivity survey (Lee, 2014)

3. 수치모델링

현재의 전기비저항 탐사 수치모델링 및 역해석 프로그램은 지표에서 수행된 전기비저항 탐사를 해석하는데 중점을 두고 있다. 따라서 기존의 프로그램을 사용하는 경우 터널과 같은 빈 공간은 매우 높은 전기비저항으로 설정하는 방식으로 해석을 수행하였으나, 본 연구에서는 암반 내의 터널을 빈 공간으로 고려할 수 있도록 기존 프로그램의 전기비저항 모델링 및 역해석 알고리즘을 개선하였다. 즉, 근사적 계산이 아닌 터널 영역을 프로그램 상에 실제로 구현하여 해석이 가능하다. 본 프로그램을 사용하여 터널 내부 및 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사 수치모델링을 수행하였다.

3.1 수치모델링 및 역산 프로그램 개발

전기비저항 탐사의 기본 지배방정식은 식 (2)와 같은 Poisson 방정식으로 표현된다(Dey and Morrison, 1979).

$$-\nabla \cdot [\sigma(x,y,z)\nabla\phi(x,y,z)] = I\delta(x-x_s, y-y_s, z-z_s) \tag{2}$$

여기서, $\sigma(x,y,z)$는 전기전도도, $\phi(x,y,z)$는 계산하고자 하는 지하매질 내 임의의 위치에서의 전위, I는 송신전류의 크기, (x_s,y_s,z_s)는 송신전류원의 위치를 각각 나타낸다. 이 지배방정식에 대하여 유한요소법의 일반적인 정식화 과정을 수행하면 식 (3)과 같이 유한요소 방정식을 유도할 수 있다.

$$[K][\phi] = [s] \tag{3}$$

여기서, $[\phi]$는 유한요소의 각 절점에서의 전위를 나타내는 벡터이고, $[K]$는 시스템 행렬이며, $[s]$는 송신원 벡터를 각각 나타낸다.

유한요소 격자망의 구성에는 6면체 요소를 이용하고, 인위적 경계면에 대해서는 혼합 경계조건(Mixed boundary condition; Dey and Morrison, 1979)을 적용한다. 유한요소법을 이용함에 따라 요소의 형태를 변경함으로써 지형변화를 구현할 수 있으며, 이 연구에서는 지하매질 내에 터널이 존재하는 경우에 대한 이론 모델링을 위하여 유한요소격자에 터널을 포함할 수 있도록 하였다. 이는 터널이 차지하는 유한요소를 별도로 처리하여 유한요소 방정식의 계산에서 배제함으로써 손쉽게 구현할 수 있게 된다. 식 (3)의 행렬방정식의 계산에는 직접행렬계산법을 이용하여 모델링의 안정성과 계산의 정확성을 확보하였다.

이와 같은 이론 모델링 알고리즘을 이용하여 전기비저항 3차원 역산 알고리즘을 구성할 수 있으며, 이 연구에서는 Yi et al. (2001)이 개발한 3차원 전기비저항 영상화 알고리즘을 이용하였다. 3차원 전기비저항 역산을 수행하기 위해서는 지하매질을 여러 개의 유한요소 격자를 포함하는 역산 모형 블록으로 분할하는 과정이 필요하며, 본 연구에서는 터널의 영향을 고려하기 위하여 통상적인 방법인 육면체 요소를 등간격으로 구획하는 역산 모형 설정과정에서 터널이 존재하는 유한요소를 제외함으로써 터널 영역을 제외하고 역산모형 블록을 설정할 수 있도록 하였다. 설정한 모형 블록에 대한 전기비저항값들로 구성되는 모델변수벡터를 p라고 하면 3차원 전기비저항 역산은 식 (4)와 같은 목적함수를 최소화하는 비선형역산 문제로 귀결된다.

$$S = (e - J\triangle p)^T (e - J\triangle p) + (C\triangle p)^T \wedge (C\triangle p) \tag{4}$$

여기서, e는 모델변수 p에 대하여 계산한 이론 모델링 반응과 현장측정자료와의 차이를 나타내는 오차벡터, $\triangle p$는 초기모델변수에 대한 증분벡터, J는 이론모델반응의 모델변수벡터에 대한 편미분을 나타내는 자코비안 행렬이다. 또한 우측의 두 번째 항은 역산의 안정화를 위하여 도입한 모델변수의 평활화제한조건의 부여를 의미하며, ACB (Active Constraint Balancing; Yi et al., 2003)을 이용하여 라그랑지 곱수 행렬 $\wedge$ 를 통하여 역산변수의 분해능에 따라 자동적으로 설정하게 된다. 또한 C는 공간 미분 연산자 행렬로서 이 연구에서는 2차 공간 미분연산자를 이용함으로써 가능한 부드러운 지하구조 모형을 획득하도록 하였다.

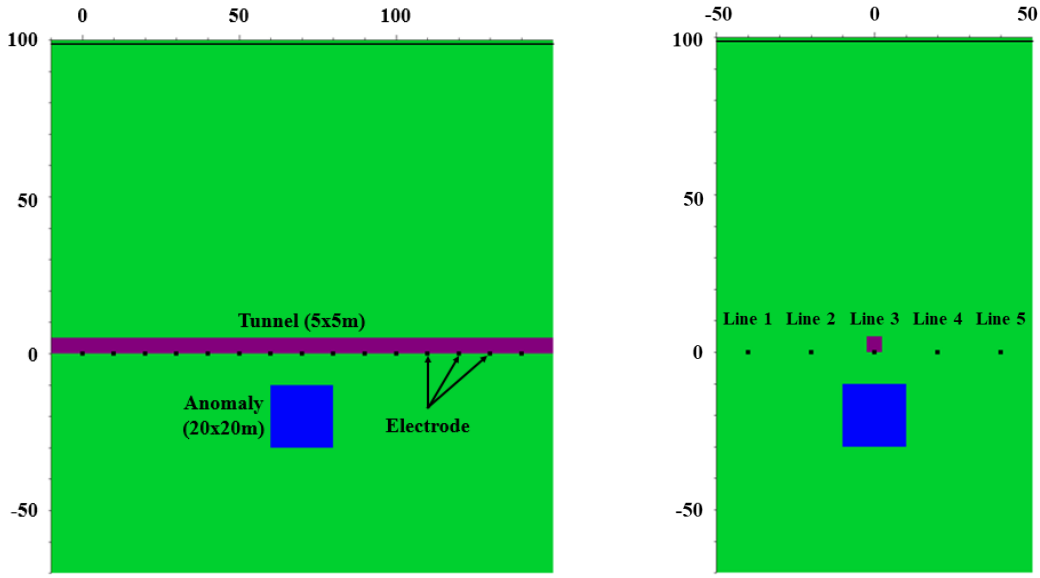
식 (4)로부터 각 반복역산 단계에서의 모델변수 증분벡터는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\triangle p = [J^T J + C^T \wedge C]^{-1} J^T e \tag{5}$$

위에서와 같이 3차원 역산의 수행을 위해서는 이론모델반응의 계산이 필요하며, 이에 부가하여 자코비안 행렬의 계산이 필수적이다. 본 연구에서 이용한 3차원 역산 알고리즘에는 자코비안 행렬의 계산에 상반성 원리(Tripp et al., 1984)를 이용함으로써 이론모델링 단계에서 경제적으로 계산할 수 있도록 하였다. 위와 같은 사항을 고려하여 암반 내의 터널을 빈 공간으로 고려할 수 있는 모델링 및 역해석 알고리즘을 기반으로 프로그램을 개발하였다.

3.2 터널을 고려한 전기비저항 탐사

터널 내 이상체의 위치에 따른 수치모델링을 수행하였다. 지표에서부터 95~100 m의 심도에서 5 × 5 m의 정사각형 단면으로 터널을 굴착하는 것으로 가정하였다. 터널 시공 중 안정성에 불리한 영향을 미치는 단층, 파쇄대, 단층파쇄대 등의 이상대는 전기비저항이 낮은 경향을 보이므로 터널 하부에 저비저항 이상체를 모델링하였다. 전극은 터널 내 하부에 설치하는 것으로 가정하였으며, 전극간의 간격은 10 m이다. 탐사자료의 비교를 위하여 터널을 굴착하는 측선 이외에도 터널에서 벗어난 측선에 전극들이 지중에 매설되어 있는 것으로 가정하였다(Fig. 4).

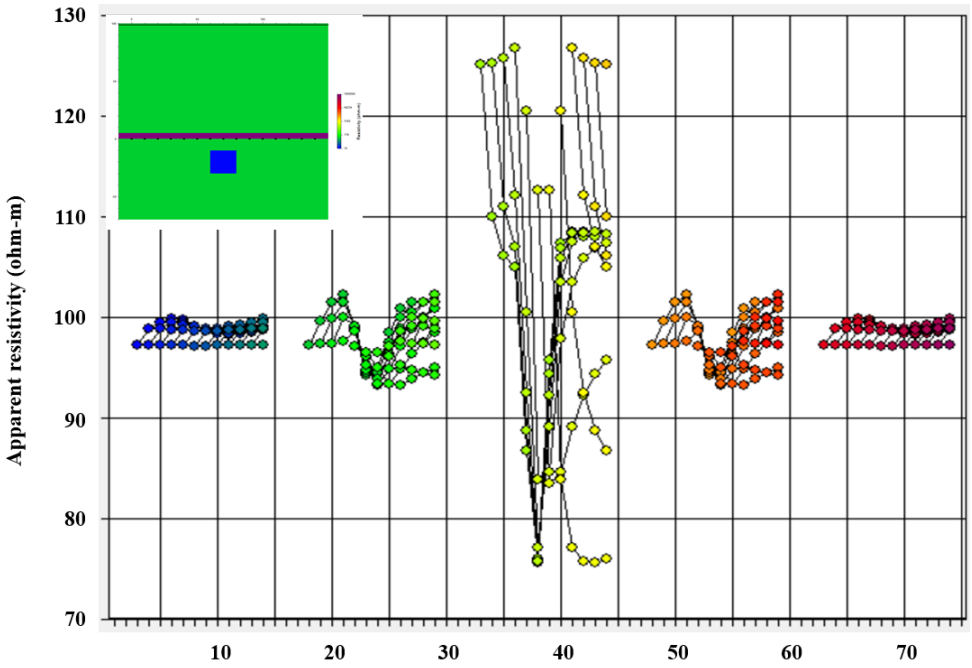


(a) Longitudinal section (b) Cross section

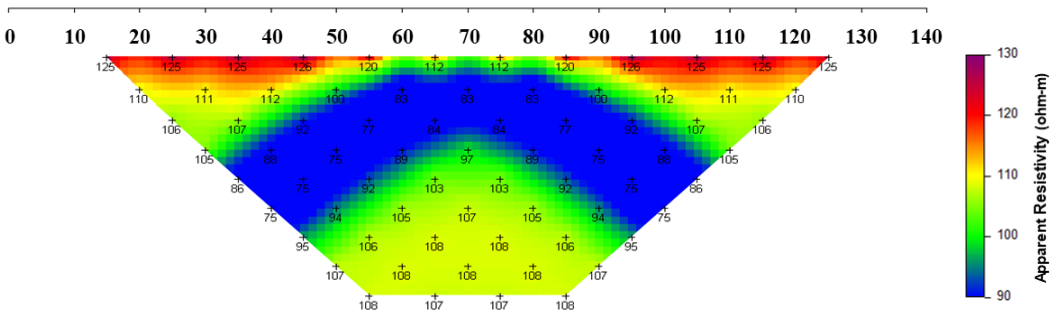
Fig. 4. Numerical model

Fig. 4(b)에 가장 왼쪽에 위치한 1번 측선부터 가장 오른쪽에 위치한 5번 측선까지 총 5개의 측선에서 얻어진 겉보기 전기비저항 탐사자료를 정리하면 Fig. 5와 같다. 1, 5번 측선의 탐사자료에서는 터널이나 이상체의 영향이 거의 나타나지 않았으며, 2, 4번 측선의 탐사자료에서는 이상체의 영향이 일부 나타났다. 이상대에 가장 근접하게 위치한 3번 측선의 탐사자료에서는 이상체에 의한 낮은 겉보기 비저항 및 터널의 영향으로 높은 겉보기 전기비저항도 함께 나타나는 경향을 보인다.

3번 측선의 탐사자료를 기반으로 정리된 겉보기 전기비저항 가단면도가 Fig. 5(b)에 정리되어 있다. 터널의 하부에 이상체가 있는 경우에는 터널의 영향으로 천부 영역에 고비저항대가 나타났으며, 이상체의 영향으로 일반적인 지표탐사에서와 같이 부채꼴 형태의 저비저항대가 나타났다.



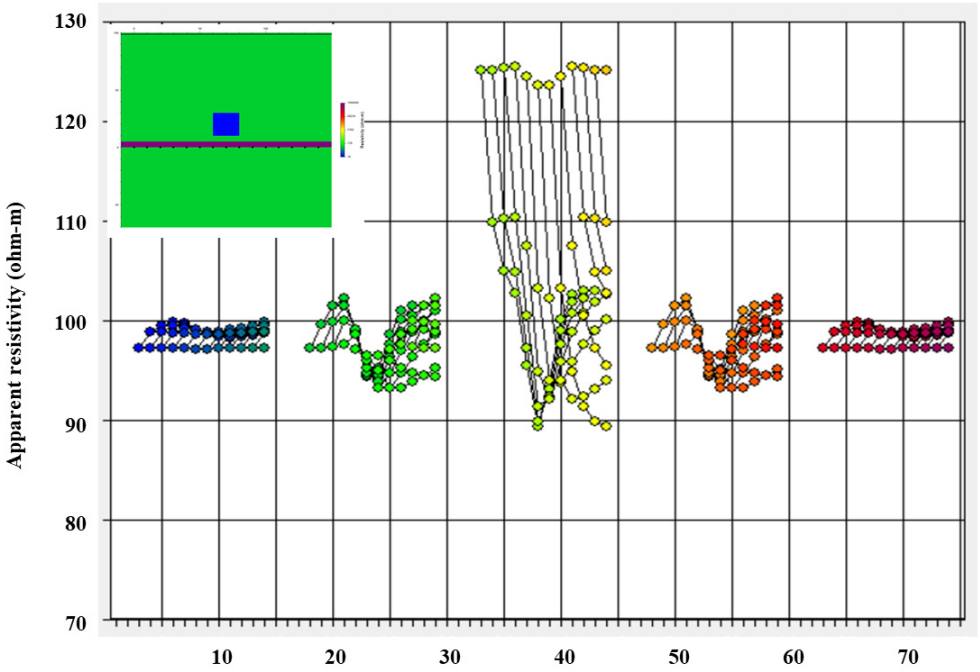
(a) Appraent resistivity by line



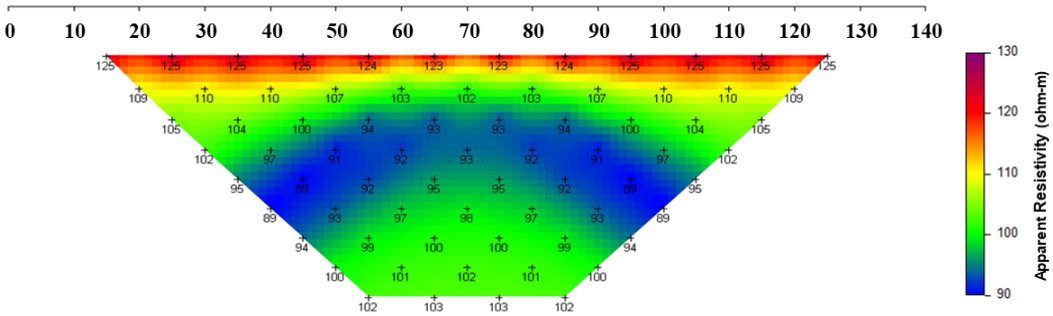
(b) Pseudo section at line 3

Fig. 5. Apparent electrical resistivity when there is an anomaly under the tunnel

터널 상부에 이상체가 있을 경우를 고려하여 수치모델링을 수행하였다. 총 5개의 측선에서 얻어진 겉보기 전기비저항 탐사자료를 정리하면 Fig. 6과 같다. 터널 하부에 이상체가 있을 경우와 마찬가지로, 1, 5번 측선의 탐사자료에서는 터널이나 이상체의 영향이 거의 나타나지 않았으며, 2, 4번 측선의 탐사자료에서는 이상체의 영향이 일부 나타났다. 이상대에 가장 근접하게 위치한 3번 측선의 탐사자료에서는 터널의 영향으로 인하여 저비저항 이상체의 영향이 미약해지는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 따라서 터널에서 전기비저항 탐사를 통해 얻은 자료 해석 시 터널의 위치를 고려함으로써 더욱 신뢰도 높은 탐사결과를 획득할 수 있음을 보여주고 있다.



(a) Appraent resistivity by line

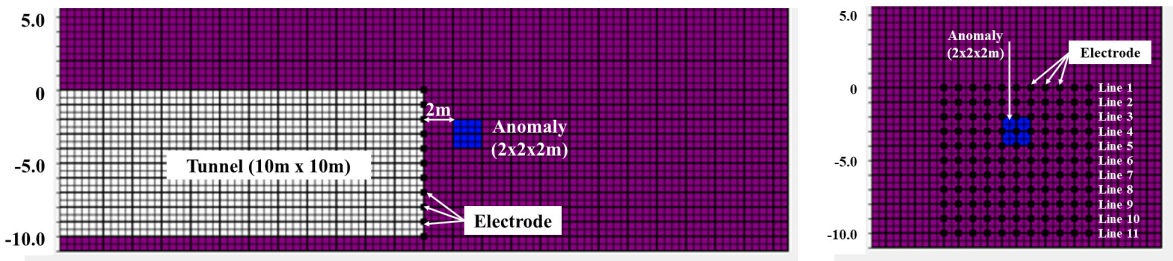


(b) Pseudo section at line 3

Fig. 6. Apparent electrical resistivity when there is an anomaly on the tunnel

3.3 터널 굴착면에서의 전기비저항 탐사

터널 굴착면에서 전방의 지질조건을 예측하기 위한 전기비저항 탐사의 개발을 위해서 수치모델링을 수행하였다. 터널의 굴착면을 10 m × 10 m의 정사각형으로 모델링하였으며, 굴착면에 1 m 간격의 격자망으로 전극을 설치하였다. 막장 전방에 위치한 이상체는 막장면으로부터 2, 4, 10 m 이격되어 있으며(이상체의 중심부 기준으로는 3, 5, 11 m), 터널 천단부를 기준으로 2 m 심도에 모델링하였다. 이상체의 형태는 2 m × 2 m × 2 m이다(Fig. 7). 기반암의 전기비저항은 1,000 ohm-m이고 이상대의 전기비저항은 10 ohm-m으로 가정하였다.



(a) Longitudinal section (b) Cross section

Fig. 7. Numerical model

탐사자료의 획득은 터널 굴착면에서 완전한 3차원의 자료를 얻는 것으로 가정하지 않고, 1~11번 측선 각각의 11개의 전극에서 자료를 획득하는 것으로 가정하였다. 여러 가지 전극 배열 중에서 가능한 가탐심도를 증대시키고, 신호대잡음비(S/N비)가 뛰어난 단극배열을 이용하였다.

막장 전방에 위치한 이상체의 위치가 2 m, 10 m 인 경우의 각각의 수치모델링으로 얻은 탐사자료를 송신전극과 수신전극의 교차플롯 형태로 정리하였다(Figs. 8, 9). 교차플롯에서 삼각형 형태가 굴착면 상부로부터 수평방향의 11개 측선에 탐사결과를 나타낸다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 저비저항 이상체로부터 거리가 멀어질수록 이상체의 반응이 미약하게 나타는 것을 볼 수 있다. 반면에 저비저항 이상체에 가장 가까운 4번 측선에서는 지표탐

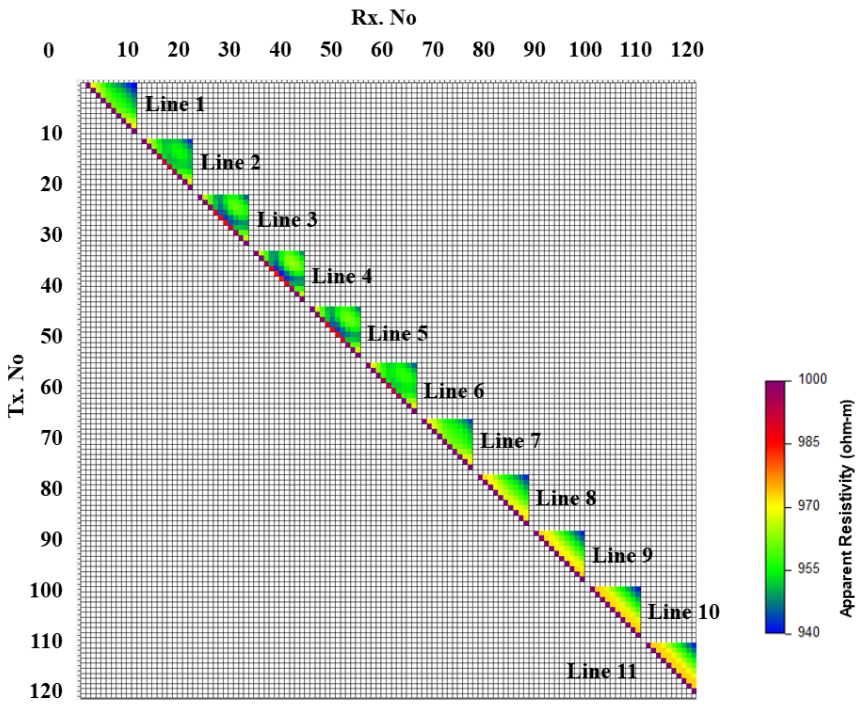


Fig. 8. Cross plot of apparent electrical resistivity (The distance from face to anomaly is 2 m)

사에서 전도성 이상체의 반응과 유사한 부채꼴의 뚜렷한 형태로 낮은 겉보기 전기비저항이 나타났다. 이와 같은 겉보기 전기비저항의 변화양상은 수신점 모음 곡선에서도 확인할 수 있었으며, 이상체의 반응이 명확하게 구분되어 나타나는 경향을 보였다. 수치모델링 결과에서 전극의 위치에 따라 이상체에 대한 겉보기 전기비저항의 반응이 뚜렷하게 나타나기 때문에, 실제 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사를 수행하는 경우 이상체의 탐지가 성공적으로 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

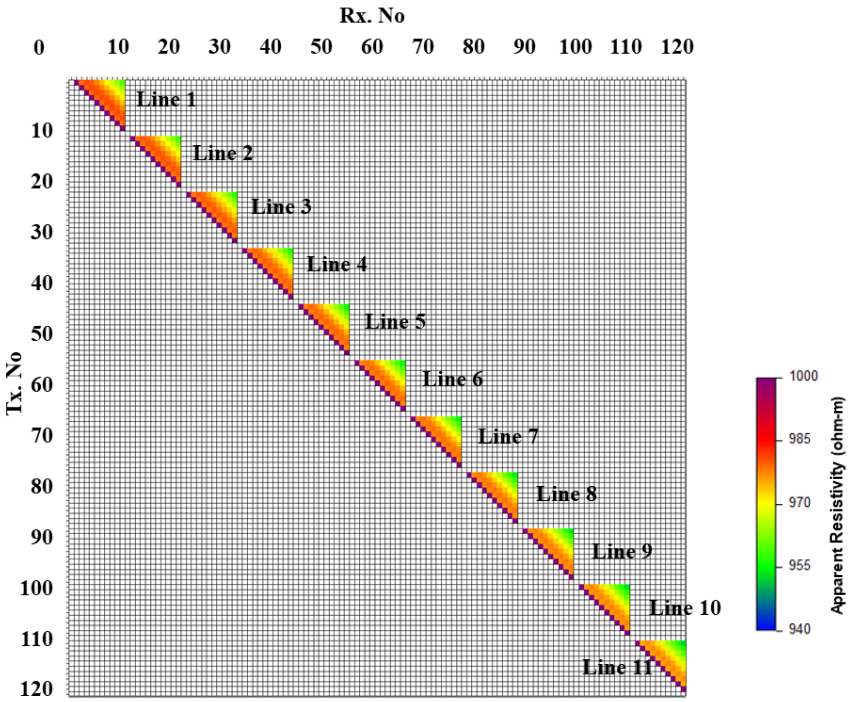


Fig. 9. Cross plot of apparent electrical resistivity (The distance from face to anomaly is 10 m)

Fig. 9의 결과를 살펴보면 굴착면상의 여러 측선에 걸쳐 겉보기 전기비저항의 분포가 거의 유사하게 나타났다. 이상체의 크기가 작고 가탐심도(이론적인 가탐심도는 약 5.5 m, 최대전극간격 11 m의 1/2)를 벗어나는 위치에 이상체가 위치하고 있기 때문에 나타난 결과이다.

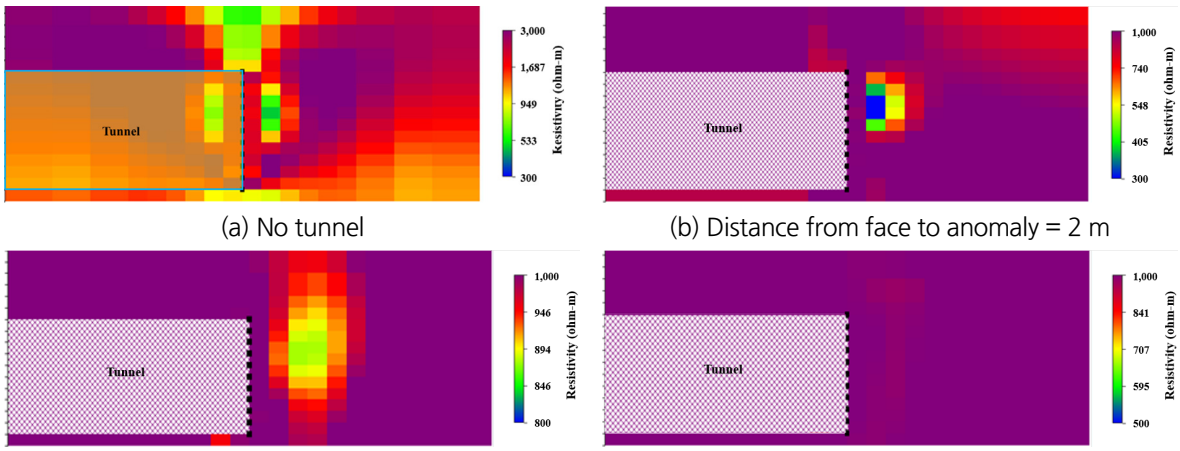
수치모델링 탐사자료를 기반으로 3차원 전기비저항 역산을 실시한 결과를 Fig. 10에 정리하였다. 또한 비교를 위해 터널을 고려하지 않은 경우의 전기비저항 역산을 추가로 도시하였다. 터널의 존재를 고려하지 않은 경우, 3차원으로 퍼져나가는 전기장의 특성으로 이상체의 위치를 정확히 파악하지 못하는 것으로 나타났다. 터널 상 하, 좌, 우에 저비저항대가 나타나며, 매우 심각한 영상왜곡이 발생하였다(Fig. 10(a)).

이상체의 정확한 위치는 파악하기 어려우나, 이상체의 존재 유무 감지는 가능할 것으로 판단된다. 다만 기반암의 전기비저항은 1,000 ohm-m보다 훨씬 높은 1,500~3,000 ohm-m 정도로 나타났으며, 이상체의 전기비저항은

700 ohm-m 정도로 나타나 실제 매질의 전기비저항과는 상당한 차이를 보인다.

터널의 존재를 고려하여 역산을 수행한 결과, 굴착면과 이상체의 거리가 2 m 일때 기반암의 전기비저항은 1,000 ohm-m 정도로 나타났으며, 모델링된 이상대의 위치에 저비저항대가 뚜렷하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 10(b)). 또한 이상체의 전기비저항은 300 ohm-m 이하로 나타나, 기반암과 뚜렷한 차이를 보이고 있으며 이상대의 특성 또한 정확하게 해석되는 것으로 나타났다.

굴착면과 이상체의 거리가 4 m 인 경우에는 굴착면으로부터 이상체의 거리가 멀어짐에 따라 다소 분해능이 떨어지는 것으로 나타났다(Fig. 10(c)). 이상체가 넓게 분포하는 것으로 나타났으며, 이상체의 전기비저항도 약 850 ohm-m로 나타났다. 또한 굴착면과 이상체의 거리가 10 m 인 경우에는 이상체의 탐지가 거의 이루어지지 않았다(Fig. 10(d)). 이는 10 m × 10 m의 탐사면으로는 10 m 이상 떨어진 곳에 존재하는 2 m × 2 m × 2 m 이상대와 같은 소규모 이상대의 탐지는 불가능한 것을 보여준다.



(a) No tunnel (b) Distance from face to anomaly = 2 m

(c) Distance from face to anomaly = 4 m (d) Distance from face to anomaly = 10 m

Fig. 10. Inversion result of electrical resistivity survey

4. 결 론

본 연구에서는 암반의 전반적인 상태를 높은 해상도로 얻을 수 있어 주로 지표에서 수행되던 전기비저항 탐사의 터널 현장에서 적용성을 검토하기 위한 수치해석을 수행하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 암반 내의 터널을 빈 공간으로 고려할 수 있도록 기존 프로그램의 전기비저항 모델링 및 역해석 알고리즘을 개선하였다. 따라서 근사적 계산이 아닌 터널 영역을 프로그램 상에 실제로 구현하여 해석할 수 있도록 하였다.
2. 터널 내부, 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사 수치모델링을 수행하였다. 또한 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사를 수행한 경우에 대해서 3차원 역산을 수행하였다. 해석 결과, 전기비저항 탐사 이론 및 지표에서 주로 수

행하던 전기비저항 탐사 결과와 유사한 경향이 나타났다. 터널에서 전기비저항 탐사를 수행하는 경우, 터널을 고려하여 해석해야 함이 필수적이며 굴착면 전방에 위치한 이상체의 위치 및 상태를 예측하는데 전기비저항 탐사는 효용성이 높을 것으로 판단된다.

3. 다만 터널 굴착면으로부터 터널 단면 폭의 1/2 이상 떨어진 곳에 위치한 이상체의 경우에는 탐지가 어려울 것으로 판단되며, 굴착면에서 이상체의 거리가 멀어질수록 기하급수적으로 분해능이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 터널 굴착면에서 전기비저항 탐사는 근거리의 높은 해상도가 필요로 할 때 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 한국도로공사 도로교통연구원에서 수행된 '붕괴 예방을 위한 터널 막장 전방 예측기술 연구' 과제 연구보고서의 일부를 정리 및 가공하여 작성되었습니다.

저자 기여도

이명종은 연구개념 및 설계, 프로그램 개발, 원고작성을 하였고, 김낙영, 이상래, 황범식은 데이터 해석 및 분석을 하였고, 하명진, 김기석, 조인기는 문헌조사 및 연구배경 정리를 하였고, 이강현은 데이터 해석 및 분석, 원고작성 및 검토를 하였다.

References

1. Dey, A., Morrison, H.F. (1979), "Resistivity modeling for arbitrarily shaped three dimensional structures", Geophysics, Vol. 44, No. 4, pp. 753-780.
2. Hasegawa, M., Usui, M., Gotoh, K. (1993), "Geological prognosis ahead of a tunnel face", Engineering Geology, Vol. 35, No. 3-4, pp. 229-235.
3. KECRI (2020), Predictions of ground condition ahead of tunnel face for preventing collapse, KECRI-2020-56.534.9607, Korea Expressway Corporation Research Institute.
4. 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.
5. Kim, N.Y., Kim, S.H., Chung, H.S. (2000), "Analysis of collapse shape and cause in the highway tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 2, No. 3, pp. 13-23.
6. Lee, I.M., Choi, S.S., Kim, S.T., Kim, C.K., Jun, J.S. (2002), "3D analysis of fracture zones ahead of tunnel face using seismic reflection", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 4, No. 4, pp. 301-318.

7. Lee, K.H. (2014), Predictions of ground conditions ahead of tunnel face applicable to TBM, Ph.D. Dissertation, Korea University, pp. 1-62.
8. Lee, K.H., Seo, H.J., Park, J., Park, J., Lee, I.M. (2016), "A probabilistic assessment of ground condition prediction ahead of TBM tunnels combining each geophysical prediction method", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 3, pp. 257-272.
9. Tripp, A.C., Hohmann, G.W., Swift Jr, C.M. (1984), "Two-dimensional resistivity inversion", Geophysics, Vol. 49, No. 10, pp. 1708-1717.
10. Yi, M.J., Kim, J.H., Chung, S.H. (2003), "Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing", Geophysics, Vol. 68, No. 3, pp. 931-941.
11. Yi, M.J., Kim, J.H., Song, Y., Cho, S.J., Chung, S.H., Suh, J.H. (2001), "Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data", Geophysical Prospecting, Vol. 49, No. 4, pp. 483-497.