

# TBM 현장에서 전기비저항 탐사의 적용성에 관한 연구

## A Study on Applicability of Electrical Resistivity Survey in Mechanized Tunnelling Job-sites

이 강 현<sup>†</sup> · 박 진 호<sup>1)</sup> · 박 지 호<sup>2)</sup> · 이 인 모<sup>1)</sup>

Kang-Hyun Lee · Jin-Ho Park · Jiho Park · In-Mo Lee

Received: January 31<sup>st</sup>, 2018; Revised: February 13<sup>th</sup>, 2018; Accepted: February 23<sup>rd</sup>, 2018

**ABSTRACT** : It is essential to predict ground conditions ahead of the tunnel face during tunnel excavation. Various studies on tunnel prediction method of the ground condition ahead of the tunnel face have already been done and applied to in mechanized tunnelling job sites. So, all the methods used in mechanized tunnelling to predict ground conditions ahead of the tunnel face were reviewed. A questionnaire surveying Tunnel Boring Machine (TBM) operators with at least 10 years' experience in TBM operation was used to determine the requirements for prediction methods as well as the distance from the tunnel face that must be assessed. Based on the result of questionnaire survey, the most feasible prediction methods applicable to mechanized tunnelling job-sites are suggested. One of the prediction methods applicable to mechanized tunnelling job-sites might be the electrical resistivity survey by utilizing the disk cutter on the cutterhead as electrode. So, in this study, laboratory tests were performed to evaluate the feasibility of prediction method utilizing electrical resistivity survey at mechanized tunnelling job-sites. It was found that geological condition ahead of 0.3 times of TBM's diameter from tunnel face could be predicted.

**Keywords** : Electrical resistivity survey, TBM, Prediction method, Tunnel

**요 지** : 터널을 굴착할 때 터널 막장 전방의 지반 상태를 예측하는 것은 중요하다. 따라서 국내외에서 TBM 현장에 적용 가능한 터널 막장 전방의 지반조건을 예측할 수 있는 기법에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 TBM 현장에서 적용되는 막장 전방 예측기법에 대한 사례를 조사하였다. TBM 현장에서 필요한 막장전방 예측기법과 탐사심도에 대한 요구사항을 결정하기 위하여 10년 경력 이상의 TBM 오퍼레이터들을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 설문조사 결과를 바탕으로 TBM 현장에 적용 가능한 막장전방 예측기법들을 제안하였다. 그중 TBM 현장에 적용 가능한 막장전방 예측기법 중 한 가지는 커터헤드에 위치한 디스크 커터를 전극으로 이용하여 전기비저항 탐사를 수행하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 TBM 현장에서 전기비저항 탐사를 통한 막장 전방 예측기법의 적용성을 평가하기 위해 실내 시험을 수행하였다. 그 결과, TBM 직경의 0.3배까지 막장 전방의 지반상태를 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

**주요어** : 전기비저항 탐사, TBM, 막장전방 예측기법, 터널

## 1. 서 론

터널 시공에 앞서 일반적으로 시추조사, 지표지질조사, 지구물리탐사 등의 지반조사를 실시하여 지반의 상태를 평가함으로써, 터널이 시공되는 노선의 지반 물성 및 이상대의 위치, 상태를 파악하고 설계를 수행한다. 설계 단계에서 이루어지는 지반조사는 대부분 광범위한 지역의 개략적인 지반 상태나 지하 구조를 추정하는 데 중점을 두고 있어, 터널 노선과 인접한 지반 상태를 정확하게 예측하기 어렵다. 따라서 터널 시공 중에 설계 단계의 지반조사에서 예측하지 못한 이상대가 나타나는 경우가 다수 발생한다. 터널 시공 중 예측하지 못한

이상대는 터널의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 공기지연, 비용증가 등의 시간적, 경제적 손실을 발생시킬 수 있다.

따라서 터널 시공 중에 막장전방의 지반 상태를 예측할 수 있는 다양한 기법들이 연구 및 개발되었다. 현재 여러 가지 막장전방 예측기법들이 터널 현장에서 사용되고 있으며, 다음과 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다. 여러 지반변수들을 토대로 간접적으로 예측하는 방법과 각종 센서 및 장비를 이용하여 직접적으로 예측하는 방법으로 나눌 수 있다.

NATM 공법의 경우 터널의 막장면 근처에서 계속되는 내공변위를 분석하여 막장전방의 공동, 파쇄대 및 연약대를 예측하는 연구가 수행되었다(Lee et al., 1998). TBM 공법의

† Korea Expressway Corporation Research Institute (Corresponding Author : tunnelslope@ex.co.kr)

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Korea Expressway Corporation Research Institute

경우 TBM 운전 시 발생하는 추력, 토크 등의 자료를 통계학적으로 분석함으로써 막장전방을 간접적으로 예측하는 연구가 다수 수행되었다(Yamamoto et al., 2003).

여러 장비들을 이용하여 막장전방을 예측하는 일반적인 방법으로 TSP(Tunnel Seismic Prediction), 막장전방 지반을 천공하는 선진 수평 보링, 전자송수신 안테나를 이용하는 전자기파 탐사, 막장전방의 지반에 전류를 흘려주고 탐사하는 전기비저항탐사(TEP) 등의 기법을 통해 막장전방의 지반 상태를 예측하고 있다(Ryu, 2010). 또한 이러한 기술의 정확성 및 편의성을 향상시키기 위한 연구가 다수 수행되었다(Lee et al., 2002; Jo et al., 2005). 그러나 이러한 막장전방 예측기법들은 대부분 막장으로의 출입이 자유롭고, 공간적 여유가 있는 NATM 공법에만 적용 가능하다.

소음, 진동, 분진 등이 적어 도심지에서 주로 쓰이는 TBM 공법은 굴착 단면을 육안으로 관찰하기 힘들기 때문에 지반의 갑작스러운 변화나 지하수에 대한 대처가 쉽지 않은 단점을 가지고 있어 막장전방 예측기법에 대한 요구가 크다. TBM 공법에 적용 가능한 막장전방 예측기법은 극히 소수이며, 외국에서 일부 연구가 수행되었다(Kneib et al., 2000; Dowden & Robinson, 2001; Kaus & Boening, 2008; Richter, 2011). Kaus & Boening(2008)은 TBM 면판과 본체 측면에 전극을 설치하여 전기저항 측정 및 유도분극 현상으로부터 막장전방의 지반을 예측하는 연구를 수행하였으며, Richter(2011)는 안정성을 매우 저하시키는 카르스트 지형 구조에서 비정기적으로 시추공 레이더 탐사를 통해 막장전방을 예측하는 연구를 수행하였다. 국외에서 TBM 공법에 적용 가능한 막장전방 예측기법에 관한 연구 및 기술개발이 이루어지는 것과 달리 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 TBM 공법으로 시공되는 터널에 적용 가능한 막장전방 예측기법에 관한 연구 및 기술 사례를 조사하고 비교하였다. 또한, TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법 개발을 위해서 설문조사를 수행하고, 국내 TBM 현장에 적용 가능한 막장전방 예측기법의 요구사항에 대한 분석을 수행하였다. 설문조사 결과를 바탕으로 지표탐사에서 주로 수행되는 전기비저항 탐사를 TBM 공법에 적용하였을 경우를 고려하여 실내시험을 수행하고, 실제 활용 가능성을 분석하였다.

## 2. TBM 공법에 적용하고 있는 막장전방 예측기법

TBM 공법은 장비의 특성에 따라 면판 후면에 챔버 및

압력셀, 컨베이어, 실린더 등의 각종 설비가 위치해 있어 막장전방 예측에 필요한 탐사장비를 설치하는데 공간적인 제약이 존재한다. 따라서 TBM 장비 제작사가 위치한 독일, 미국, 캐나다, 프랑스, 일본에서 TBM 공법에 적용 가능한 막장전방 예측기법에 대한 연구가 주로 수행되었다. 현재 탄성파, 전자파, 초음파, 전기 등을 이용하여 막장전방을 예측할 수 있는 다양한 기법들이 개발되었다.

### 2.1 탄성파 탐사

터널 내 탄성파 탐사 방법 중 일종인 TSP 탐사는 기본적으로 반사법을 이용하는 것으로 터널 굴착 및 지보에 큰 영향을 주는 주요 지질구조대나 용수대의 위치 및 규모를 파악하는데 유용한 방법이다. TBM 후면의 여러 장비들로 인하여 TSP 탐사 장비를 설치하기에는 장소가 협소한 문제가 발생하였으나, 스위스 AMT(Amberg Measuring Technique)사에서 지속적인 개선을 거듭하여 TBM에 적용할 수 있는 TSP 탐사 방법으로 TSP203을 개발하였으며, 국내에서도 도입 및 적용이 이루어지고 있다(Fig. 1)(Geotechnical Investigation Technical Committee, 2004).

AMT사는 독일의 Herrenknecht사, Philipp Holzmann사, Zublin사와 함께 반사 탄성파 탐사법 원리를 이용하여 실드 TBM 면판에 탑재 가능한 SSP(Sonic Soft Ground Probing) 시스템을 개발하였다(Fig. 2). SSP 시스템은 면판 주위에 설치되는 1개의 음향소스, 3개의 리시버, 면판의 회전 각도를 감지하는 센서로 구성되며 3차원적 막장전방 예측이 가능하다. 음향소스로부터 수 kHz 대역의 P파를 막장전방에 방사하여 반사계수가 큰 경계부에서 되돌아오는 반사파를 가속도계에 의해 기록하는 방식으로 막장전방의 파쇄대, 거대 전석, 공극 등을 감지할 수 있다. 신호 감쇠 정도에 따라서 탐사심도가 달라지지만 막장전방 약 30m까지 탐사 가

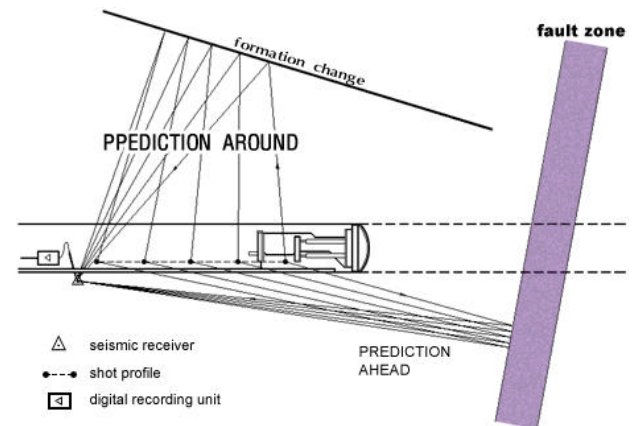


Fig. 1. Conceptual diagram of TSP applied to a TBM (Geotechnical Investigation Technical Committee, 2004)

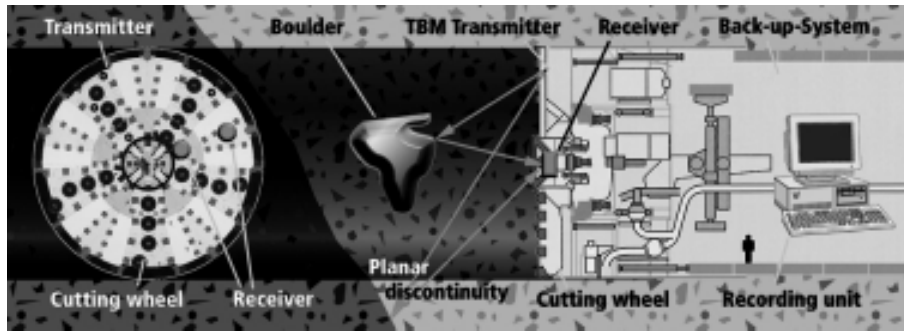


Fig. 2. Outline of SSP system (Dowden & Robinson, 2001)

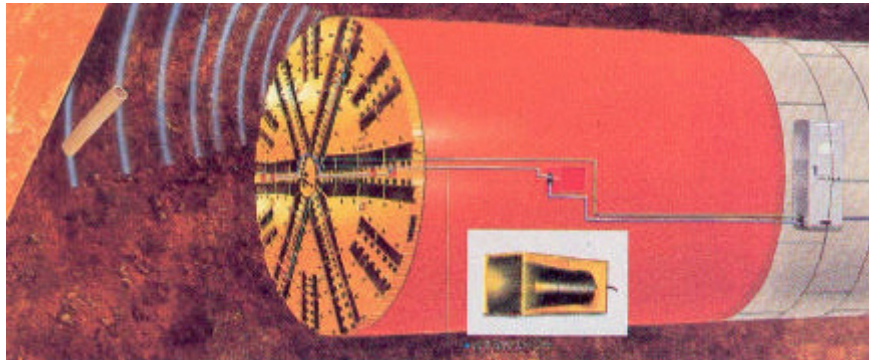


Fig. 3. Schematic diagram of Seismic prospecting using sonar (Geotechnical Investigation Technical Committee, 2004)

능하다(Geotechnical Investigation Technical Committee, 2004; Kneib et al., 2000; Dowden & Robinson, 2001).

히타치 조센(Hitachi Zosen)에서는 잠수함에 주로 사용되는 수중음파탐지장치(Sonar)의 원리를 이용한 막장전방 예측기법을 개발하였다(Fig. 3). 막장전방에 수 kHz 대역의 음파를 방사하여 음향임피던스가 다른 면, 즉 이상대에서 반사되는 음파를 수신기로 획득하여 장애물, 지층경계부의 위치 및 형상을 파악한다. 이 방법은 다양한 지반조건에 적용 가능하다는 장점을 가지나, 탐사구간이 지하수위면 아래에 있을 때만 이용 가능한 단점이 있다.

또한 미쯔비시 중공업에서도 막장전방으로 물을 분사한 후 물기둥 내에 초음파를 방사하여 막장전방을 예측하는 기술을 개발하였다. 이 방법도 지하수위 아래에서만 적용 가능한 단점이 있다.

## 2.2 전기 탐사

독일 Herrenknecht사에서 판매하는 막장전방 예측기술 중 GET(Geo Exploration Technologies)사에서 개발된 BEAM (Bore-tunnelling Electrical Ahead Monitoring) 시스템은 전기 검층과 유도분극 탐사를 조합한 기법이다. TBM 면판 및 본체 옆 부분에 설치된 전극이 설치되어 있어 전기저항과 주파수에 대한 영향을 측정하여 막장 전방의 지반상태를 해

석하는 기법이다(Fig. 4). 일반적으로 지표에서 수행되는 전기비저항 탐사와는 다른 방법으로 굴착 중 연속적인 측정이 가능하며, 예측결과를 실시간으로 보여주는 장점을 가지고 있으나 면판 전면에 전극이 위치하여 전극을 주기적으로 교체해야 하며 가격이 고가라는 단점이 존재한다.

## 2.3 전자 탐사

독일의 Bo-Ra-Tec사는 공동이 많은 카르스트 지형 구조를 가진 Katzenberg TBM 터널 현장에 시추공 탐사 장비를 설치하고 시추공 레이더 탐사를 수행한 바 있다. 천공홀 1~2개를 이용하여 반사파를 측정(Reflection measurements)하고, 천공홀 2개를 이용하여 Crosshole 측정(Crosshole measurements)을 수행하였다(Fig. 5). 해석결과와 막장면 맵핑(Face mapping) 결과를 비교한 결과, 카르스트 지형의 지질구조를 잘 예측한 것으로 나타났다.

가와사키 중공업, IHI, 미쯔비시 중공업, 마츠이 건설에서는 각각의 레이더 탐사 방법을 개발하였는데, 이 방법은 면판에서 전자파를 막장전방 지반에 방사하여 돌아오는 반사파를 분석하는 기법이다. 면판에 안테나가 설치되는데 안테나의 크기가 약 30~60cm 정도 되기 때문에 면판의 디스크 커터 및 커터비트의 배치에 영향을 주는 단점이 존재하며, 탐사심도가 약 5m 이하이다. 저주파수의 안테나를 사용하

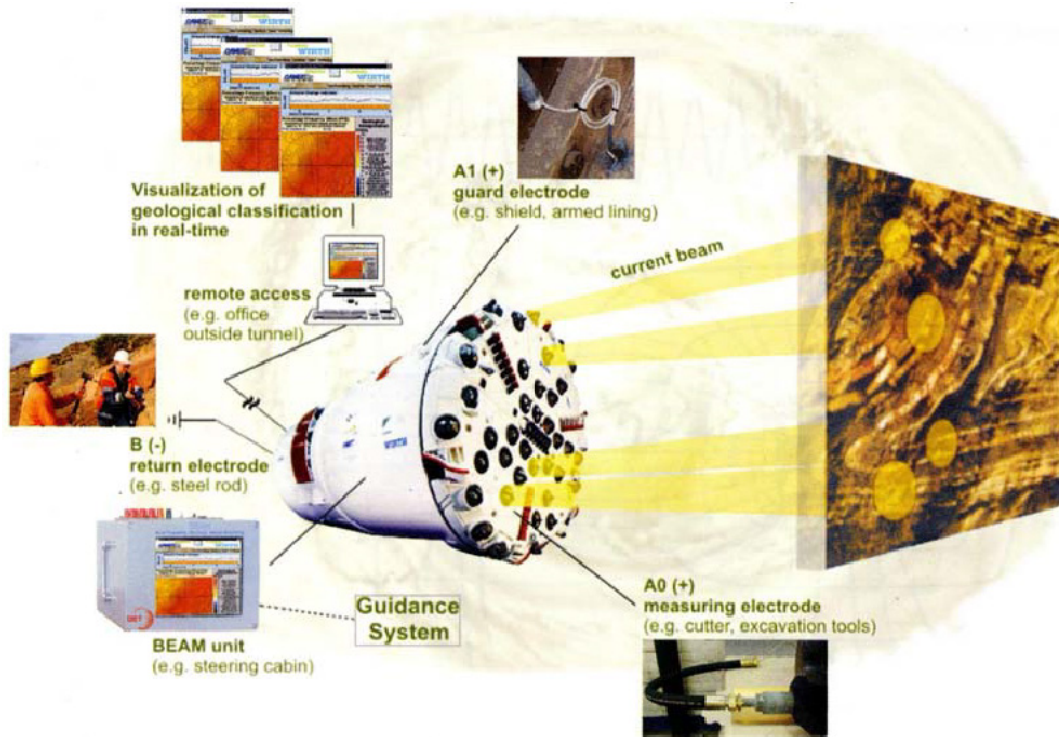
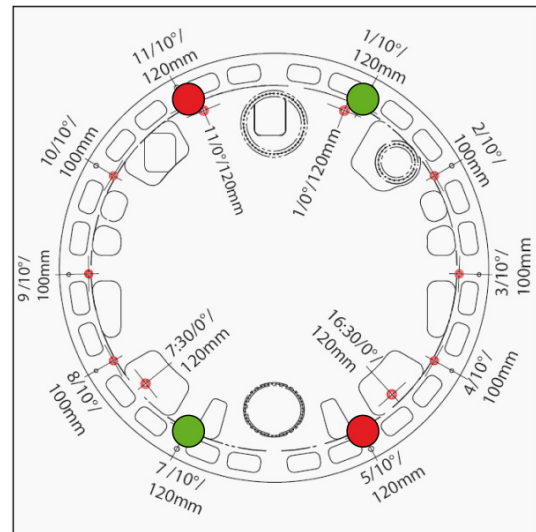


Fig. 4. Components of the BEAM system (Kaus & Boening, 2008)



(a) View of field experiment



(b) Outline of borehole installed in a shield TBM

Fig. 5. Borehole radar exploration developed by Bo-Ra-tec, Germany (Richter, 2011)

면 탐사심도가 깊어지는 효과를 얻을 수는 있으나, 안테나의 크기가 커지고 해상도가 낮아지는 단점이 존재한다. 대부분의 지반 조건에 적용 가능하나, 함수비가 높은 지반에는 적용이 어렵다.

마츠이 건설에서 개발한 레이더 탐사는 일반적인 지중레이더의 주파수 대역인 350~400MHz보다 낮은 중심주파수 150MHz의 대역을 가지는 전자파를 이용하여 막장전방으로 2~5m 정도까지 탐사가 가능하다. 면판의 회전각도 신호와

전자파 제어기로부터 출력되는 파형 신호를 함께 A/D 변환기에 접속시켜 25kHz의 동시 샘플링을 실시하여 데이터가 획득된 위치를 파악할 수 있는 시스템을 갖추고 있다. 또한 동시에 TBM 기계데이터를 기록하도록 되어 있으며, 파형 신호, 동기신호, 회전신호를 연속적으로 모니터링하여 데이터베이스를 구축하였다.

### 3. TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법 비교분석

본 연구에서는 TBM 오퍼레이터를 대상으로 설문조사를 수행하여, TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법의 탐사 심도와 예측대상에 대한 요구사항 분석을 수행하였다. 설문 조사로 얻어진 TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법의 요구사항과 현재 TBM에서 사용되는 막장전방 예측기법과의 비교를 수행하였다.

TBM 공법 선정 이유와 TBM 공법 선정 시의 주요 고려 사항에 대한 조사 결과에 따르면 터널 공사에서 TBM 공법을 적용하는 이유는 공기단축과 경제성 향상 목적이 가장 큰 비중을 가진다. 즉 TBM 공법을 적용하였을 때 시공 중 문제가 발생하지 않도록 하여 지체시간을 줄임으로써 전체적인 공기를 단축하고 원가를 절감하는 것이 가장 중요한 요소이다.

TBM 공법으로 터널 시공 중에 지체시간을 발생시키는 주요 시공 트러블 요인은 크게 지질적 요인과 기계적 요인으로 구분할 수 있다. 일본 TBM 현장근무자들의 경험을 토대로 한 설문조사 결과, TBM 시공 시의 트러블 사례 가운데 약 86% 정도가 지질적인 요인에 근거하여 발생하며 나

머지 14%는 기계적 요인에 의해 발생하는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 즉 기계적인 요인보다 지질적인 요인으로 발생하는 시공트러블이 약 6배 이상 많다. 시공 트러블로 인하여 굴착작업이 불가능해지거나 TBM 장비가 침하하거나 지반에 끼이는(Stoppage) 현상이 발생하면 공기가 크게 증가할 수 있다. 또한 막장면에서 트러블이 주로 발생하며, 여러 가지 지질조건 중에서 매우 불리한 균열성 지반, 파쇄대에서 트러블이 자주 발생하는 것으로 나타났다(Bae & Chang, 2006).

본 연구에서는 국내 TBM 굴착 중 TBM 오퍼레이터들의 요구사항을 파악하기 위하여 국내 TBM 현장에서 활동하는 10년 경력 이상의 오퍼레이터들을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 대부분의 응답자가 TBM 시공 중 막장전방의 지반 상태를 예측할 수 있다면 신속한 시공이 가능하고 상황 대처에 도움이 된다고 답했다. 그리고 적절한 보조공법 및 대처방안을 제시하기 위해서 필요한 막장전방 탐사심도는 5~20m로 나타났으며, 이때 탐사해야 될 주 대상은 이상대(파쇄대)로 나타났다(Fig. 7).

TBM에 적용되는 막장전방 예측기법들을 적용할 수 있는 지반 조건 및 탐사심도를 비교하여 Table 1에 정리하였다. 탐사방법에 따라서 적용 지반조건과 탐사심도가 많은 차이

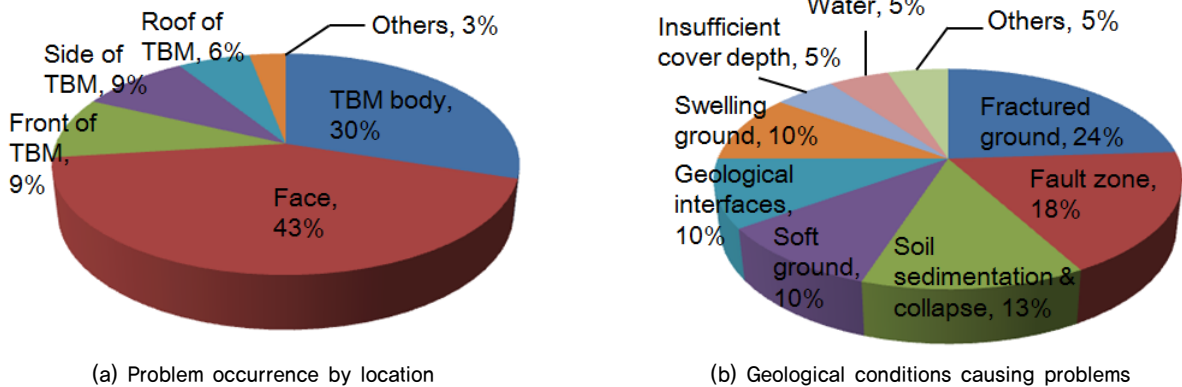


Fig. 6. Distribution of geological problems during TBM construction (Bae & Chang, 2006)

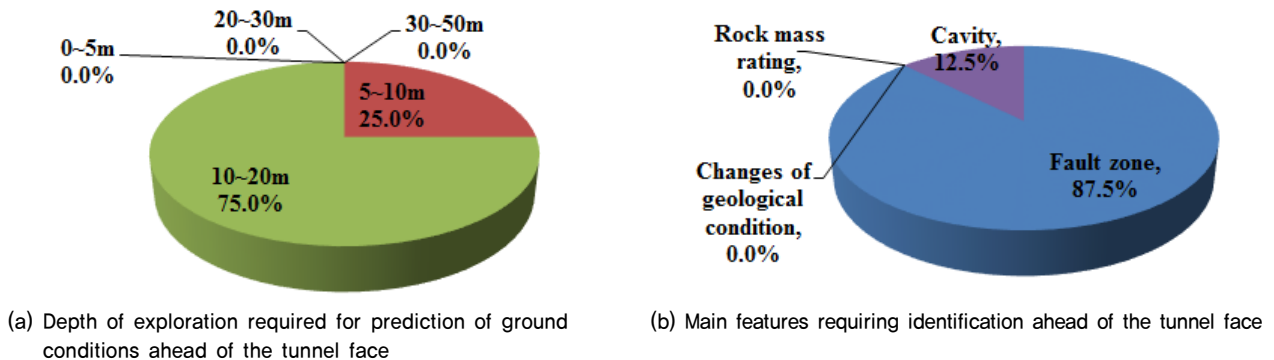


Fig. 7. Requirements for predicting ground conditions ahead of the tunnel face

Table 1. Geological conditions and depth of exploration by technology for predicting ground conditions ahead of the tunnel face (Lee, 2014)

Company	Method	Applicable geological condition	Depth of exploration
AMT	Seismic prospecting (TSP)	Harder than soft rock	100 m
AMT herrenkecht	Seismic prospecting (SSP)	Harder than soft rock	30 m
GET	Electrical prospecting (BEAM)	All soil types	15~20 m
Bo-ra-tec	Electromagnetic survey (Borehole radar)	Almost all soil types	-
Hitachi zosen	Seismic prospecting (acoustic wave)	All soil types, groundwater must be present	20 m
Kawasaki heavy industries	Seismic prospecting (Rayleigh wave)	All soil types, unsuitable for soil with high moisture content	10 m
	Electromagnetic survey (GPR)	All soil types, unsuitable for soil with high moisture content	2 m
IHI	Electromagnetic survey (GPR)	Almost all soil types, unsuitable for soils containing clay, salts	1.5 m
Mitsubishi heavy industries	Electromagnetic survey (GPR)	Easy to apply to sandy soil, difficult for exploration of cohesive soil	2 m
	Seismic prospecting (Ultrasonic wave)	Groundwater must be present	-
Komatsu	Electrical prospecting (Electrical Resistivity)	Almost all soil types, measuring works well when ground water is present	50 m

가 나타났다. Table 1에 나타난 유럽 및 일본 등에서 개발된 TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법의 특성을 고려하였을 때, 전기 또는 탄성파를 이용하는 방법이 국내 TBM 현장에서 요구하는 탐사심도에 적합하고 이상대(파쇄대 등)를 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존에 지구물리탐사에서 주로 사용되는 4전극 전기 탐사를 통해 측정되는 전기비저항을 이용하여 막장전방에 존재하는 이상대(파쇄대 등)를 예측할 수 있는지 시험을 수행하였다.

## 4. 전기비저항 탐사

### 4.1 전기비저항의 특성

전기비저항은 전류의 흐름에 저항하는 물질의 특성으로 물체의 모양이나 크기에는 관계없이 물체의 전기적 특성을 나타내는 상수로 단위 저항은 옴미터( $\Omega\text{m}$ )이다. 전기저항이 물체에 전류가 통과하기 어려운 정도를 나타내는 수치라고 한다면 전기비저항은 단위체적의 물질이 갖는 전기저항이다. 임의의 도선에서 전기비저항( $\rho$ )과 전기저항( $R$ )과의 관계는 Eq. (1)과 같다.

$$R = \rho F_s \quad (1)$$

여기서,  $F_s$ 는 전류가 흐르는 곳의 형상에 따라 변하는 형상계수(Shape factor)이며, 원통형 도선에서  $F_s$ 는 물체의 길이와 물체의 단면적으로 나눈 값을 사용한다.

암석에서 전기비저항은 공극률, 포화도, 지하수의 전기전도도, 점토의 함유량 등에 의해 변화한다. 신선한 암반일수록 공극률이 작고, 점토 함유량이 작기 때문에 전기비저항이 크게 나타난다. 반면에 파쇄대나 절리 등이 발달한 암반은 풍화가 많이 진행되었기 때문에 공극률이 크고 공극 사이에 점토 등의 충전물질로 인하여 전기비저항이 작게 나타난다. Fig. 8은 토사와 암석의 종류별 전기비저항 분포도를 보여준다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 토사와 암석의 특성에 따라 서로 다른 전기비저항 분포를 가지고 있음을 알 수 있으며, 토사는 암석에 비해 전기비저항이 상대적으로 작고, 강도가 큰 암석 종류는 전기비저항이 크게 나타나는 경향을 보인다. 일반적으로 타 암종에 비해 높은 일축압축강도를 가지는 화강암은 전기비저항이 매우 크게 나타난다.

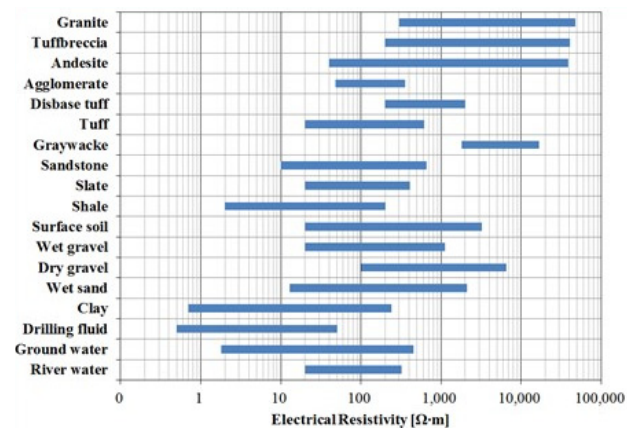


Fig. 8. Distribution of electrical resistivity classified by the type of soil and rocks

## 4.2 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 기본적으로 2개의 전류전극과 2개의 전위전극을 지표에 설치하고 지층의 전기비저항을 파악하는 방법이다. 지반의 전기적 성질인 전기비저항 분포에 의해 지반상태를 파악할 수 있으며 토목 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 전기비저항 탐사는 탐사하고자 하는 대상에 따라 여러 가지 배열에 맞추어 전극을 설치하고 인공적으로 지하에 전류를 흘려 이때 발생하는 지반의 전위 분포로부터 전기비저항을 구하여 지하의 지반구조를 파악하는 방법이다(Fig. 9). 전기비저항 탐사에 사용되는 배열은 단극 배열, 단극-쌍극자 배열, 쌍극자 배열, 웨너 배열, 슬럼버저 배열 등이 사용되는데, 국내에서는 주로 쌍극자 배열을 이용하여 탐사를 수행한다.

전기비저항은 암석의 공극률과 포화도, 공극 내의 유체의 성질, 조암광물의 종류, 암석 구성입자의 크기 및 성질, 암석의 고화도 등 암석 자체의 성질과 파쇄대, 단층 등의 외부적인 요인에 의해 영향을 받는다. 탐사방법은 수평 탐사, 수직 탐사, 2차원 탐사, 3차원 탐사 등이 있지만 현재는 2차원 탐사가 주로 사용되고 있다. 전기비저항 탐사는 넓은 범위의 지질 분포나 단층파쇄대의 유무 등의 지질 구조, 지층의 풍화 변질 정도, 지하수 상황 등을 파악할 수 있어, 경제적이고 효율적인 탐사방법이다(Lee, 2014).

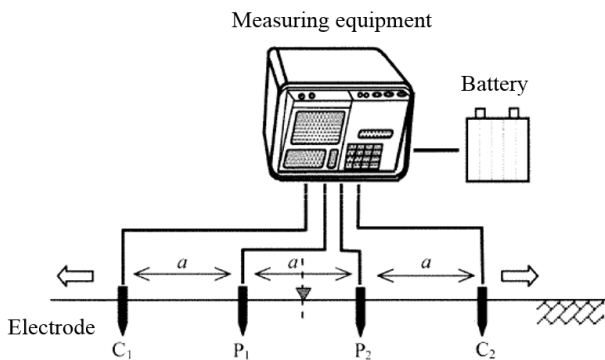


Fig. 9. Schematic diagram of electrical resistivity survey (Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 2011)

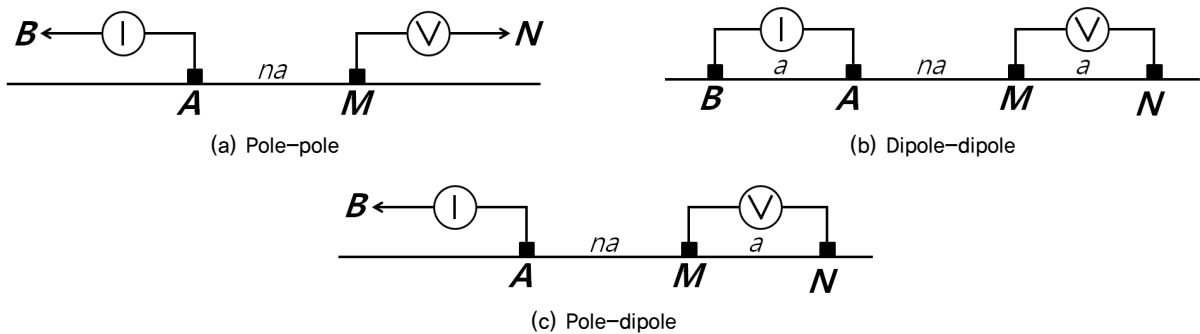


Fig. 10. Electrode format according to electrode array (Lee, 2014)

4전극 전기탐사를 이용해서 측정된 전위값을 통해서 전기비저항을 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다. 그러나 Eq. (2)로부터 구해지는 전기비저항은 지하매질이 균질하다고 가정하여 구한 결과이다. 실제로 지반은 흡입자, 공기, 물로 구성되어 있고, 위치에 따라 입도분포 등의 특성이 달라지기 때문에 불균질하다. 따라서 Eq. (2)로부터 얻어지는 전기비저항은 참 전기비저항이 아닌 겉보기 전기비저항(Apparent resistivity,  $\rho_a$ )이다. 겉보기 전기비저항은 참 전기비저항과 달리 지하매질의 실제 물성이 아니다. 탐사장비를 통해 측정된 전기비저항은 겉보기 전기비저항으로, 여러 지점에서 측정된 겉보기 전기비저항을 해석기법을 통하여 참 전기비저항으로 산출해야 한다. 다만 겉보기 전기비저항만으로도 일정한 구간에서 지반조건의 상대적인 변화를 유추하는데 사용할 수 있다고 판단되므로, 본 연구에서는 겉보기 전기비저항의 상대적인 차이로부터 지반조건의 변화를 유추하였다.

$$\rho = G \frac{V_{pp}}{I} = GR \quad (2)$$

여기서,  $V_{pp}$ 는 측정전위(단위 : V),  $I$ 는 송신전류(단위 : A)이다. 또한  $G$ 는 거리계수를 의미하는데 탐사에 사용되는 전극배열의 종류에 따라 다른 값을 가진다. 기본 전극 간격( $a$ )와 전극전개수( $n$ )을 이용하여 각각의 전극 배열에서 측정되는 전위 또는 전위차를 단극 배열에서 측정되는 전위( $V_{pp}$ )로 정규화(Normalized)한 Eq. (3)-(5)를 대입하여 Eq. (2)의 거리계수에 대입하여 사용할 수 있으며, 각각의 전극 배열에 대한 형태가 Fig. 10에 나타나 있다.

$$\text{단극배열} : V_{pp} \quad (3)$$

$$\text{단극-쌍극자배열} : \frac{1}{n+1} V_{pp} \quad (4)$$

$$\text{쌍극자배열} : \frac{2}{(n+1)(n+2)} V_{pp} \quad (5)$$

### 4.3 본 연구에의 활용

국내에서 주로 사용되는 쌍극자 배열에 대해서 Fig. 10(b)의 쌍극자 배열 전극 배치도를 참고하여 쌍극자 배열에 대한 탐사심도 및 총 전극전개거리(전극이 설치된 총 거리)에 대해서 정규화한 탐사심도를 구하면 Eq. (7), (8)과 같다. 정규화탐사심도는 탐사심도를 총 전극전개거리로 나누어준 값이다.

$$\text{총 전극전개거리} : 2a + na = a(2+n) \quad (6)$$

$$\text{탐사심도} : a(n+1)/2 \quad (7)$$

$$\text{정규화 탐사심도} : (n+1)/(2n+4) \quad (8)$$

보통 사용되는 TBM 면판의 직경은 전력구 터널의 경우 3~4m, 지하철 터널의 경우 7~9m, 대단면 터널의 경우 10~12m이다. 따라서 직경을 고려하였을 때 TBM 현장에 4전극 전기탐사를 하기 위한 기본 전극간격(a)과 전극 전개수(n)은 그다지 크지 않은 값을 가진다. 본 연구에서는 기본전극간격과 전극 전개수에 따른 탐사심도의 변화 양상을 살펴보기 위하여 기본 전극간격 a=1~5이고, 전극 전개수 n=1~10인 경우를 고려하여 총 전극전개거리에 따른 정규화 탐사심도를 구했다. Fig. 11은 a=1, 2, 3, 4, 5로 고정된 상태에서 n이 증가함에 따라 총 전극전개거리가 증가할 때의 정규화 탐사심도의 변화 양상을 보여준다. Eq. (8)에서 알 수 있듯이 a가 변화하더라도 정규화 탐사심도에 영향을 주지 못하며, n이 무한으로 증가할 때 정규화 탐사심도가 총 전극전개거리의 0.5배를 넘지 않는다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 정규화 탐사심도는 0.5로 수렴하는 경향을 보여주고 있으며, 같은 총 전극전개거리를 가진다 하더라도 a가 작고 n값이 커야 정규화 탐사심도가 커지는 것으로 나타났다.

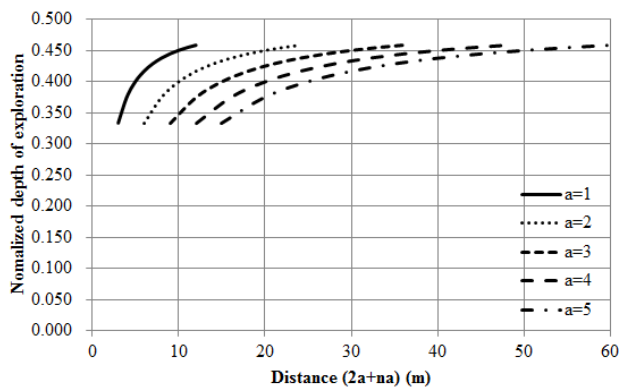


Fig. 11. Normalized depth of exploration according to the distance of installed electrode

### 5. TBM 환경을 고려한 전기비저항 탐사 축소 모형시험

본 연구에서는 TBM 면판에 설치된 디스크 커터가 막장면의 지반과 접촉하므로 디스크 커터를 전극으로 활용하여 전기비저항 탐사를 수행하는 것으로 가정하였다. TBM 면판 설계도로부터 디스크 커터가 설치된 위치를 고려하여, 수조에 전극을 설치할 위치를 결정하였다(Fig. 12). 수조는 전기가 흐르지 않도록 목재를 이용하여 제작하였으며, 상수도 물을 매질로 사용하여 기반암을 모사하였다. 파쇄대는 기반암에 비하여 전기비저항이 작기 때문에 2cm, 4cm, 6cm 두께의 금속판을 이용하여 막장 전방에 파쇄대를 모사하였다. 또한 TBM 굴착 중 극경암이 나타나는 경우도 굴진효율에 상당한 영향을 미치기 때문에 막장 전방에 강도가 높은 암반 등이 나타나는 경우를 고려하여, 전기비저항이 높은 아크릴을 이용하여 2cm, 4cm, 6cm의 강도가 높은 암반을 모사하였다. 축소모형 시험에 대한 개요도가 Fig. 13에 나타나 있다. TBM이 막장 전방을 굴착해 나가는 것을 고려하여 막장면에 설치된 전극과 이상대의 거리를 점점 가깝게 변화시켜가면서 쌍극자 배열을 이용해 전기비저항 측정을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 쌍극자 배열의 배열상수는 a=5, n=2이며, 이론적 탐사심도는 총 전극전개거리의 약 0.375배이다. 여기서 총 전극전개거리는 TBM 면판의 직경을 영향을 받기 때문에 TBM 면판의 직경을 고려하여 배열상수를 결정하였다.

전기비저항을 측정하기 위한 측정장비는 미국 AGI사에서 판매하는 Supersting R8/IP/SP 탐사기를 사용하였으며, 전기비저항 탐사, 자연전위(SP, Self Potential) 탐사, 유도분

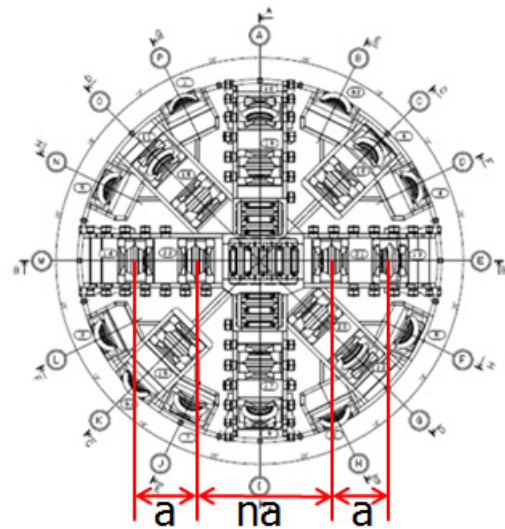


Fig. 12. The location of disk cutter to use electrode at cutter-head of TBM



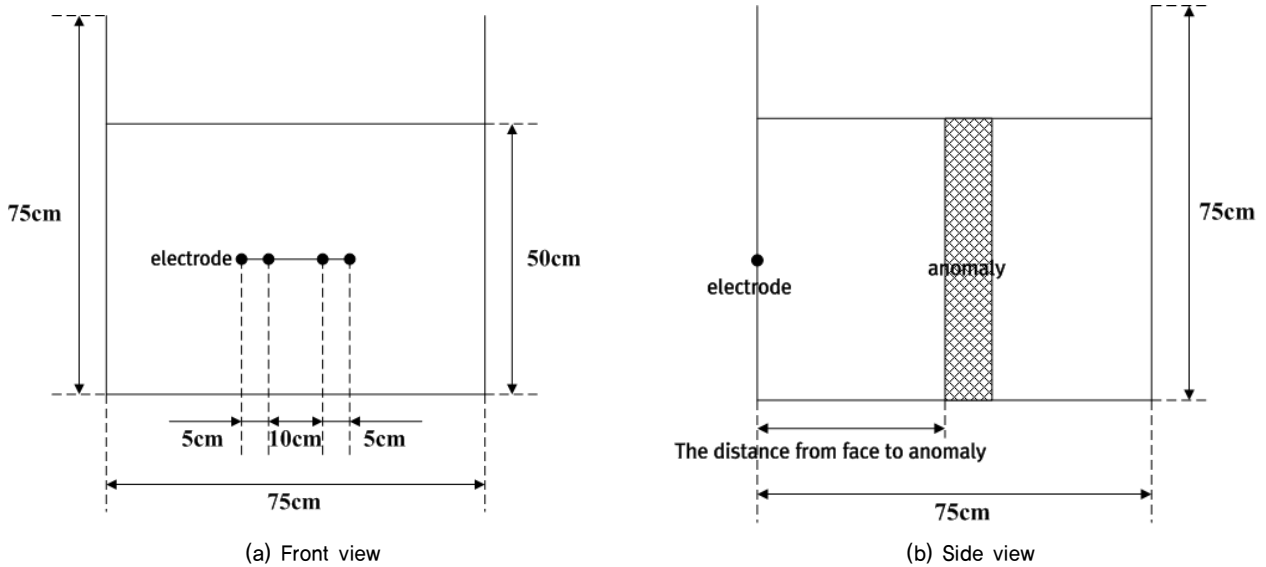


Fig. 13. Schematic diagram of laboratory experiment setup

극(IP, Induced Polarization) 탐사가 가능하다. 본 장비의 출력전류는 1~1250mA이며, 출력전압은 ±10V이다.

축소모형 시험을 실시하기에 앞서 전기전도도계(Conductivity meter)를 이용하여 수조 내의 매질인 상수도 물의 전기전도도를 측정하였다. 상수도 물의 전기전도도는 약 178.9 $\mu$ S/cm로 측정되었으며, 전기비저항으로 환산하면 약 55.9 $\Omega$ m이다. Hong(1999), Song et al.(2000)이 상수도 물의 전기비저항을 측정한 결과, 약 47 $\Omega$ m, 58~62 $\Omega$ m 정도로 나타났다. 약 2~7 $\Omega$ m 정도의 차이가 나타났는데, 수원지, 수질, 정수방법 등으로 인하여 지역별로 상수도 물의 특성이 다르고, 상수도 물을 수조에 채우고 안정화 시키는데 소요된 시간의 차이가 원인인 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서 측정한 상수도 물의 전기비저항 55.9 $\Omega$ m는 적절한 것으로 판단된다.

파쇄대의 두께별로 막장면과 파쇄대까지의 거리에 따른 전기비저항의 변화가 Fig. 14(a), 파쇄대의 두께별로 정규화된 거리(=막장면과 파쇄대까지의 거리/총 전극전개거리)에 따른 정규화된 전기비저항(=측정된 전기비저항/기반암의 전기비저항)의 변화가 Fig. 14(b)에 나타나 있다.

막장면과 파쇄대의 거리가 가까워지면서 이론적 탐사심도에 근접하여 전기비저항이 약 5~6 $\Omega$ m, 10% 증가한 이후에 감소하는 경향을 보여준다. 파쇄대의 두께가 두껍고, 막장면과 파쇄대의 거리가 가까워질수록 전기비저항이 감소하는 폭이 크게 나타났다. 특히 파쇄대의 두께가 6cm인 경우에는 측정되는 전기비저항이 기반암의 전기비저항보다 약 40% 감소하는 것으로 나타나는 경향을 보였다. 파쇄대의 두께가 2cm인 경우에는 막장면과 파쇄대까지의 거리가 0.5cm인 경우에만 기반암의 전기비저항보다 작게 나타나, 파쇄대가 너무 얇은 경우에는 예측이 불가능한 것으로 나타났다.

축소 모형시험에서 탐사심도는 총 전극전개거리의 약 0.3배 정도로 이론적 탐사심도보다 다소 작게 나타났다. 파쇄대의 두께에 관계없이 탐사심도는 일정한 것으로 나타났다.

암반의 두께별로 막장면과 암반까지의 거리에 따른 전기비저항의 변화가 Fig. 15(a), 암반의 두께별로 정규화된 거

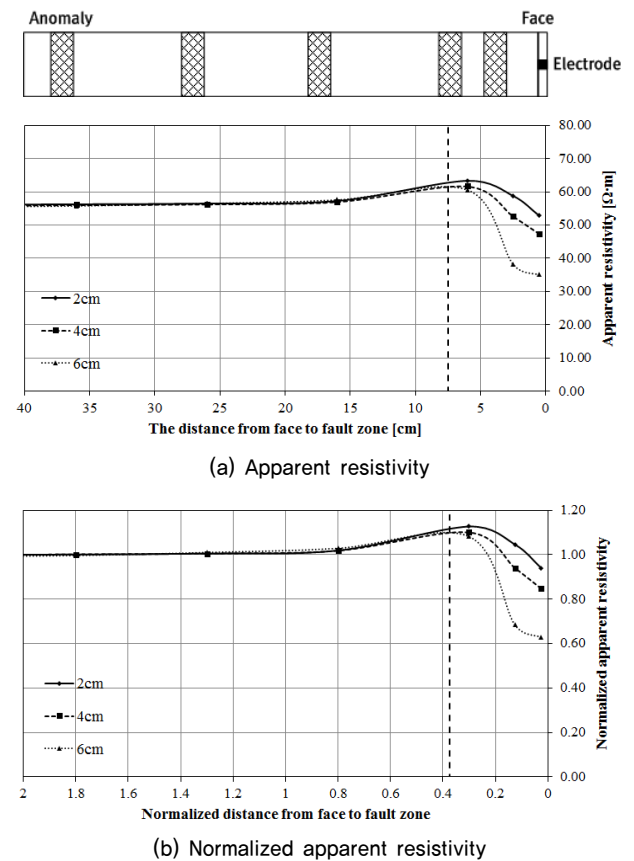


Fig. 14. Effect of the location of fault zone

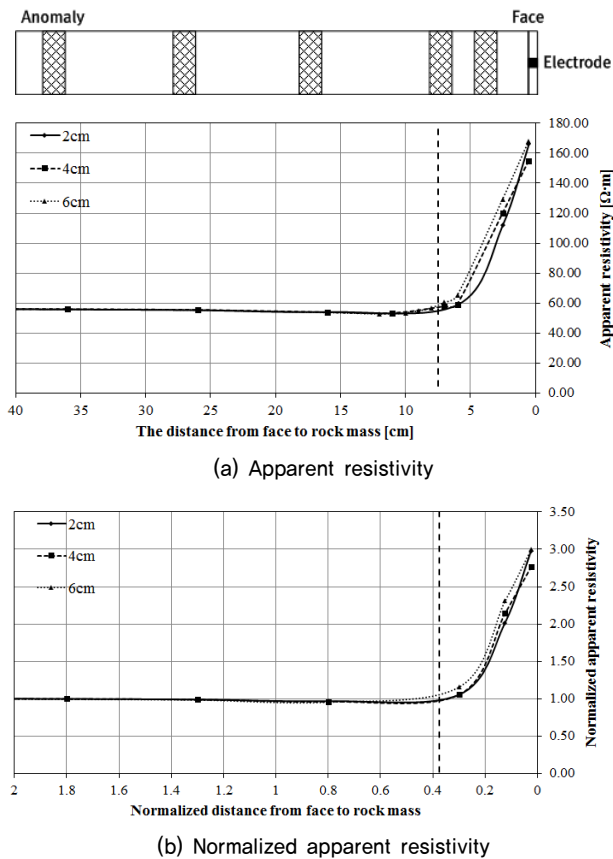


Fig. 15. Effect of the location of hard rock mass

리(=막장면과 암반까지의 거리/총 전극전개거리)에 따른 정규화된 전기비저항(=측정된 전기비저항/기반암의 전기비저항)의 변화가 Fig. 15(b)에 나타나 있다.

암반의 두께가 두껍고, 막장면과 암반의 거리가 가까워질수록 전기비저항이 증가하는 경향이 나타났다. 다만 이상대의 두께에 관계없이 전기비저항이 약  $100\Omega\text{m}$ , 200% 수준까지 증가하였다. 이는 파쇄대 축소모형시험 결과와 다른 경향으로, 기반암과 모사한 암반(아크릴)의 전기비저항 차이가 워낙 크기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 축소 모형 시험에서 탐사심도는 총 전극 전개거리의 약 0.3배 정도로 이론적 탐사심도보다 다소 작게 나타났으며, 암반의 두께에 관계없이 탐사심도는 일정한 것으로 나타났다. 이는 파쇄대 축소 모형시험에서 나타난 결과와 동일한 결과를 보여준다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 TBM 공법으로 시공되는 터널에 적용 가능한 막장전방 예측기법에 관한 연구 및 기술 사례를 조사하였다. 또한 국내 TBM 현장에서 필요한 막장전방 예측기법의 요구사항에 대해서 분석을 수행하고, TBM에 적용 가

능한 막장전방 예측기법의 개발 방향에 대한 고찰을 수행하였다. 이를 바탕으로 지표탐사에서 주로 수행되는 전기비저항 탐사를 TBM 공법으로 시공되는 터널 현장에 적용하였을 경우를 고려하여 실내시험을 수행하고, 실제 활용 가능성을 분석하였다. 이상의 연구결과로부터 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

- (1) TBM 제작사가 위치한 유럽, 일본 등지에서는 탄성과, 전자기파, 전기를 이용한 TBM에서 막장전방의 지반을 예측할 수 있는 다양한 기법이 개발되었다. 탐사방법에 따라 적용 가능한 지질조건 및 탐사심도에 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 국내의 지질 특성에 적합하고 TBM에 적용 가능한 막장전방 예측기법의 개발이 필요하다.
- (2) TBM 오퍼레이터를 대상으로 수행한 설문조사 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. TBM 시공 중 막장전방의 지반상태를 예측할 수 있다면 이상대로 인해 발생하는 시공 중 지체시간을 줄이고 공기를 단축할 수 있다. 따라서 막장전방으로 약 5~20m 이내까지 탐사 가능하고, 이상대 및 복합지반을 탐지할 수 있는 막장전방 예측기법이 필요하다. 기존의 막장전방 예측기법에 대한 분석 결과, 탄성과 및 전기를 이용하는 탐사방법이 요구사항에 적합한 것으로 판단되었다.
- (3) 본 연구에서는 지표탐사에서 주로 수행되는 4전극 전기탐사를 통해 막장전방의 지질조건을 예측할 수 있는지 검토를 수행하였다. TBM 면판에 전극을 설치하는 것으로 가정하고 쌍극자 배열을 이용하여 전기비저항 탐사를 수행하는 모형시험 결과, 파쇄대 및 암반 등의 이상대는 TBM 직경의 약 0.3배까지 탐사 가능한 것으로 나타났다. 8m 직경의 TBM에 일반적으로 사용되는 세그먼트의 종방향 폭은 약 1.5m인데, 세그먼트의 폭을 TBM 직경으로 정규화하면 약 0.188이 된다. 즉, TBM 면판에 설치된 디스크 커터를 이용하여 전기비저항 탐사를 수행하는 경우, 세그먼트 1~2링 정도의 막장 전방 지반 상태를 개략적으로 예측할 수 있는 것이다.
- (4) 실제 현장에서 4전극 전기탐사를 사용하기 위해서는 디스크 커터와 면판 사이에 절연체가 위치하거나, TBM 면판 등 여러 가지 금속성 장비와 절연이 된 별도의 전극을 설치한 이후에 탐사를 수행해야 한다. 또한 막장면에서 먼 거리에 위치해있거나 매우 얇은 이상대를 예측하는 것은 무리가 있으나, TBM 오퍼레이터에게 현재 굴착 중인 지반 상태에 대한 개략적인 상태를 제공함으로써, 추력, RPM, 막장압, 첨가제 투입량 등의 TBM 운영에 필요한 요소를 결정할 때 참고 값으로 사용할 수

있을 것으로 예상된다. 다만 이상대와 기반암의 전기비저항 차이에 따라 탐사 심도 및 측정되는 전기비저항 값이 달라질 수 있기 때문에 다양한 매질을 이용하여 추가 시험을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 연구사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발” 연구비 지원(17SCIP-B066321-05)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Bae, G. J. and Chang, S. H. (2006), Improvement and evaluation of TBM performance by considering construction risk, 7th Symposium on Mechanized Tunnelling Techniques, Korean Tunnelling and Underground Space Association, pp. 11~46 (In Korean).
2. Dowden, P. B. and Robinson, R. A. (2001), Coping with boulders in soft ground TBM tunneling, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Littleton, US, pp. 961~977.
3. Geotechnical Investigation Technical Committee (2004), Geotechnical investigation research and technology trend, The History of Korean Geotechnical Engineering, Kim, M. M., Korean Geotechnical Society, pp. 366~380 (In Korean).
4. Hong, I. G. (1999), A physical model study on resistivity tomography for 2-D and 3-D models using pole-pole array, Master's thesis, Chonbuk National University, pp. 9~44 (In Korean).
5. Jo, C. H., Cha Y. H., Yang, J. H. and Bang, K. M. (2005), Seismic reflection imaging ahead of tunnel face using 3 component geophones, Proceedings of Korean Society for Railway Fall National Conference, pp. 412~417 (In Korean).
6. Kaus, A. and Boening, W. (2008), BEAM-geolectrical ahead monitoring for TBM-drives, Geomechanics and Tunnelling, Vol. 1, No. 5, pp. 442~449.
7. Kneib, G., Kasselm, A. and Lorenz K. (2000), Automatic seismic prediction ahead of the tunnel boring machine, First Break, The European Association of Geoscientists and Engineers, Vol. 18, Issue. 7, pp. 295~302.
8. Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists (2011), Geophysical survey guide, Hanrimwon, pp. 173~282 (In Korean).
9. Lee, I. M., Kang, G. D. and Park, K. J. (1998), Prediction of ground-condition ahead of the tunnel face by using 3-dimensional absolute displacements, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 14, No. 4, pp. 17~31 (In Korean).
10. Lee, I. M., Choi, S. S., Kim, S. T., Kim, C. K. and Jun, J. S. (2002), 3D analysis of fracture zones ahead of tunnel face using seismic reflection, Journal of the Korean Tunnelling Association, Vol. 4, No. 4, pp. 301~316 (In Korean).
11. Lee, K. H. (2014), Predictions of ground conditions ahead of tunnel face applicable to TBM, Ph D. dissertation, Korea University, pp. 6~40 (In Korean).
12. Richter, T. (2011), Innovative geophysical investigation technology in karstified and fractured rock formations, 1st Scientific Congress on Tunnels and Underground Structures in South-East Europe, ITA Croatia, Dubrovnik, Croatia, pp. 20~21.
13. Ryu, H. H. (2010), Development of a tunnel electrical resistivity prospecting system and its application, Ph D. dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 49~254 (In Korean).
14. Song, Y. S., Hong, I. G., Lee, T. J. and Yoon, K. J. (2000), An experimental study on resistivity tomography for 2-D and 3-D models, Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 37, No. 1, pp. 26~37 (In Korean).
15. Yamamoto, T., Shirasagi, S., Yamamoto, S., Mito, Y. and Aoki, K. (2003), Evaluation of the geological condition ahead of the tunnel face by geostatistical techniques using TBM driving data, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 213~221.