

TBM 현장에서 막장전방 예측기법 결과의 확률론적 분석을 통한 지반상태 평가

이강현¹ · 서형준² · 박정준³ · 박진호⁴ · 이인모⁵

¹정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원

²정회원, 케임브리지대학교 공과대학 박사후 연구원

³정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

A probabilistic assessment of ground condition prediction ahead of TBM tunnels combining each geophysical prediction method

Kang-Hyun Lee¹, Hyung-Joon Seo², Jeongjun Park³, Jinho Park⁴, In-Mo Lee⁵*

¹Senior Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute

²Research Associate, Department of Engineering, University of Cambridge

³Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

⁴Ph. D Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁵Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: It is usually not an easy task to counter-measure on time and appropriately when confronting with troubles in mechanized tunnelling job-sites because of the limitation of available spaces to perform those actions with the existence of disk cutter, cutter head, chamber and other various apparatus in Tunnel Boring Machine (TBM). So, it is important to predict the ground condition ahead of a tunnel face during tunnel excavation. Efforts have been made to utilize geophysical methods such as elastic wave survey, electromagnetic wave survey, electrical resistivity survey, etc for predicting the ground condition ahead of the TBM tunnel face. Each prediction method among these geophysical methods has its own advantage and disadvantage. Therefore, it might be needed to apply several geophysical methods rather than just one to predict the ground condition ahead of the tunnel face in the complex and/or mixed grounds since those methods will compensate among others. The problem is that each prediction method will give us different answer on the predicted ground condition; how to combine different solutions into a most reasonable and representative predicted value might be important. Therefore, in this study, we proposed a methodology how to systematically combine each prediction method utilizing probabilistic analysis as well as analytic hierarchy process. The proposed methods is applied to a virtual job site to confirm the applicability of the model to predict the ground condition ahead of the tunnel face in the mechanized tunnelling.

Keywords: Probabilistic analysis, Analytic hierarchy process, Tunnel Boring Machine, Prediction method of ground condition, Tunnel face

초 록: TBM으로 터널 시공 중 막장면에서 갑작스럽게 문제가 발생하는 경우 공간적인 제한 때문에 NATM공법으로 시공되는 터널에 비해서 적절한 대처를 하기 어렵다. TBM으로 터널 시공 중에 막장전방의 지반상태를 예측하는 것은 매우 중요하기 때문에 탄성파, 전자기파 등을 이용하여 TBM 면판 전방의 지반상태를 예측하는 연구 및 기술개발이 이루어졌다. 대부분의 TBM 현장에서는 공사기간 및 비용을 고려하여 1개의 막장전방 예측기법을 적용한다. 그러나 막장전방 예측기법의 종류에 따라서 탐사심도, 적용 가능한 지질조건, 예측할 수 있는 대상, 예측 정확도 등이 다르다. 복합적인 지질조건에 위치한 TBM 터널 시공 시에는 여러 가지 막장전방 예측기법을

*Corresponding author: In-Mo Lee

E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received February 16; Revised May 12, 2016;

Accepted May 27, 2016

Copyright ©2016, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적용하는 것이 막장 전방의 지질 조건을 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 여러 가지 막장전방 예측기법을 동시에 적용하였을 경우 각각의 기법으로부터 얻어진 지반상태는 다른 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각각의 막장전방 예측기법으로부터 얻어진 막장전방의 지반상태를 종합적으로 평가하기 위한 방법을 제안하였다. 확률론적 분석과 계층분석기법을 이용하여 막장전방의 지반 상태를 종합적으로 평가할 수 있는 통합 모델을 제시하였다. 또한 본 연구에서 제안한 모델을 가상의 지반에 적용하여, 종합적으로 지반 상태를 평가할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 확률론적 분석, 계층분석기법, TBM, 막장전방 예측기법, 터널 막장

1. 서론

TBM 공사 중에 터널 전방을 예측할 수 있는 기법은 매우 다양하며, TBM 제작사가 위치한 유럽, 일본에서 다수의 기법이 이미 상용화되어 사용되고 있으며, 현재에도 지속적으로 새로운 기법 및 기술 개발이 이루어지고 있다. 직접 막장전방 지반을 천공하는 선진시추, 탄성파를 이용한 TSP (Tunnel Seismic Prediction) 탐사, SSP (Sonic Soft ground Probing) 탐사, 초음파 탐사 등의 막장전방 예측기법이 사용되고 있다(Kneib et al., 2000; Dowden and Robinson, 2001). 또한 전기를 이용한 BEAM (Bore-tunnelling Electrical Ahead Monitoring), 전자파를 이용한 레이더 토모그래피, GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사 등의 막장전방 예측기법이 TBM 현장에서 사용되고 있다(Kaus and Boening, 2008; Richter, 2011).

일반적으로 TBM으로 시공하는 터널 현장에서는 1개의 막장전방 예측기법을 선택하여 적용하는 경우가 대부분이다. 그러나 막장전방 예측기법의 종류에 따라 탐사심도, 적용 가능한 지질조건, 예측할 수 있는 대상, 예측 정확도 등이 다르다. 따라서 여러 가지 복합적인 지질조건이 있는 현장에는 1개의 막장전방 예측기법을 적용하는 것보다는 지반 조건, 공사기간 등의 현장 상황에 따라서 여러 가지 기법을 복합적으로 적용하는 것이 막장 전방의 지질 조건을 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 막장전방 예측기법을 동시에 적용하였을 경우 각각의 방법으로부터 얻어지는 결과로부터 막장전방의 지반을 종합적으로

평가하기 위한 방법을 제안하고자 하였다. 본 연구에서는 정기적으로 계측이 가능한 전기비저항탐사 (TEP, tunnel electrical resistivity prospecting), 선진시추 장비로 막장전방을 굴착하면서 얻어지는 천공지수, 시추공을 통해 탐사하는 전기비저항 토모그래피 기법을 동시에 적용하였을 경우를 가정하였다. 각각의 기법으로부터 얻어진 지반 상태에 대한 정보의 차이를 통합할 수 있는 방안을 제시함으로써 지반 상태에 대한 일관성 있는 정보를 얻고자 하였다.

2. 확률론적 분석에 사용된 막장전방 예측기법

터널뿐만 아니라 지하공간, 댐 등 다양한 토목공사에서 안전하고 합리적인 시공을 위해서는 지반의 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하여 공학적인 판단 자료나 설계를 위한 정량적 데이터를 획득하여 암반 분류를 실시한다. 일반적으로 터널구간에서는 RMR 분류법과 Q-System 분류법에 의해 암반 상태를 등급별로 분류하여 암반의 변형계수와 전단강도정수를 추정하며, 굴착난이도 및 지보패턴 등을 환산하는데 활용한다.

따라서 터널 노선에 걸친 암반상태를 평가하고 적합한 설계를 하기 위해서 시추조사, 지구물리탐사, 지표지질조사 등을 수행한다. 시추조사를 통해 얻어진 시추코어에 대한 육안관찰 및 계측, 암석물성시험과 현장에서의 지형측량, 지표지질조사, 시추공 영상촬영 등으로 얻어진 결과를 바탕으로 종합적인 암반 상태를 평가한다. 그러나 복잡한 지질구조를 가지거

나 시추공 사이의 간격이 넓은 경우에는 시추조사로는 암반상태의 정확한 평가를 할 수 없기 때문에 시추공간 사이의 미시추 구간에서 전기비저항 탐사, 탄성파 탐사, 전자탐사 등의 지구물리탐사를 수행하거나 시추공간 사이의 데이터를 바탕으로 통계학적 분석기법을 통하여 암반상태를 평가하게 된다(Ahn et al., 2008; You et al., 2004).

전기비저항과 암반등급과의 상관관계를 규명하기 위한 연구가 다수 수행되었다. Kwon et al. (2001, 2008)은 1개의 현장에서 전기비저항 탐사, 전기비저항 검층으로부터 얻어진 전기비저항과 RMR과의 상관관계에 대한 연구를 수행하였으며, Choi et al. (2003)은 전기비저항 탐사결과와 터널 막장에서 직접 측정된 암반분류와의 상관관계에 대한 분석을 수행한 바 있다.

막장면에서의 전기비저항 측정 및 보링을 통해 암반상태를 평가하는 연구도 다수 수행되었다. Ryu (2010)는 막장면에서 전기비저항탐사(TEP)로 얻어진 전기비저항과 RMR과의 상관관계를 도출하는 연구를 수행한 바 있다. Kim et al. (2001)은 점보드릴을 이용하여 지보패턴 분류에 기초적인 자료로 활용하기 위해 천공변수들과 지보패턴에 따른 평균비트마모율과 막장지질조사결과를 비교 분석한 바 있다. 또한 Kahraman et al. (2000)은 암반의 특성으로부터 천공속도를 예측 할 수 있는 천공용이도지수(drillability index)를 제안하였으며, 이는 암반 특성과 높은 상관관계를 가지는 경향을 보여주었다. 이처럼 전기비저항 탐사, 천공지수, 전기비저항 토모그래피 등의 막장전방 예측기법으로부터 얻어진 측정값과 암반상태와 연관시킴으로써 간접적으로 암반상태에 대한 정보를 얻어낼 수 있다.

이처럼 여러 가지 막장전방 예측기법 중에서 TBM 현장에 적용하기에 적합하다고 판단되는 전기비저항 탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피를 확률론적 분석에 사용하였다.

2.1 전기비저항탐사(TEP)

Ryu (2010)에 의해서 개발된 전기비저항탐사(TEP, tunnel electrical resistivity prospecting)는 탐사 시스템을 통해 터널 막장전방 지반에서의 전기저항을 구하고, 역해석을 수행하여 암반상태, 연약대의 존재유무 및 위치, 크기, 상태 등을 파악하는 방법이다. 전기장의 원리를 이용하여 막장 전방의 지반 정보를 해석하는 이 방법은 터널 직경의 약 3~4배까지 탐사 가능하며, 측정에 필요한 시간은 30분 이내로 터널 공사에 지연을 초래하지 않는다. TBM 공사 현장에 본 기법을 적용할 때는 디스크 커터를 전극으로 활용하므로 별도의 전극 설치 시간이 필요하지 않아 공사시간에 크게 영향을 미치지 않는다.

전기비저항탐사(TEP)는 일축압축강도, RQD, 불연속면의 간격, 불연속면의 상태 등의 RMR 변수와 전기비저항과 각각의 상관관계로부터 얻어진 점수, 불연속면 방향에 따른 감쇄효과는 0점, 지하수의 조건은 젖어있는 상태인 7점을 조합하여 보편적인 RMR을 구하게 된다.

신선암의 전기비저항, 불연속면의 전기비저항, 신선암의 두께, 불연속면의 두께를 임의로 가정하고, 각각의 RMR 변수와 전기비저항의 상관관계를 도출하기 위해 사용되는 기준 전기비저항을 구한다. RMR 변수와 전기비저항의 상관관계를 RMR 항목별로 도출하게 되는데 일축압축강도(uniaxial compressive strength)와 전기비저항의 상관관계를 통해 *RUCS*, RQD와 전기비저항의 상관관계를 통해 *RRQD*, 불연속면의 간격(spacing of discontinuities)과 전기비저항의 상관관계를 통해 *RSoD*, 불연속면의 상태(condition of discontinuities)와 전기비저항의 상관관계를 통해 *RCoD*를 구한다.

하나의 예로 *RUCS*를 구하는 방법은 다음과 같다. RMR분류법은 일축압축강도 요소에 대한 점수를 매길 때 7개 구간(<1, 1~5, 5~25, 25~50, 50~100, 100~250, >250 MPa) 중에서 일축압축강도가 속하

는 구간을 정하고 구간에 따른 점수를 매긴다. 이론식을 통해 7개 구간의 분류값(0, 1, 2, 4, 7, 12, 15점)에 해당하는 전기비저항을 구하고 기준 전기비저항으로 나누어 $RUCS$ 를 구하게 된다(Ryu, 2010). 같은 방법으로 $RRQD$, $RSoD$, $RCoD$ 를 구할 수 있다. RMR 점수를 전기비저항으로 환산한 변수인 $RUCS$, $RRQD$, $RSoD$, $RCoD$ 을 RMR을 구하는 식에 대입하여 암반의 전기비저항을 구하는 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$\rho_{rm}^{RMR} = W_{RMR} \times RUCS \cdot RRQD \cdot RSoD \cdot RCoD \cdot GWC \quad (1)$$

여기서, W_{RMR} 은 기준 전기비저항이고, $RUCS$, $RRQD$, $RSoD$, $RCoD$ 는 각각의 RMR 변수와 전기비저항의 상관관계로부터 얻어진 값이다. 여기서 ρ_{rm}^{RMR} 은 기준 전기비저항의 배수로 계산되는 암반의 전기비저항이다. 식 (1)을 이용하여 RMR과 전기비저항의 관계를 Fig. 1과 같이 도출할 수 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 RMR이 증가하면 전기비저항이 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이는 일반적으로 알려져 있는 RMR과 전기비저항의 상관관계와 일치한다.

각각의 RMR 변수와 전기비저항의 관계, RMR과 전기비저항과의 관계는 Fig. 1처럼 항상 일정한 관계를 가지는 것은 아니고, 신선암의 전기비저항, 불연속

면의 전기비저항, 신선암의 두께, 불연속면의 두께를 임의로 가정한 값으로 구했을 때의 관계이다. 실제 현장에서 전기비저항탐사(TEP)로부터 RMR을 분류하기 위해서는 TBM 면판에 5개 이상의 전극을 이용하여 전방 지반과 전극이 접촉하였을 때 저항을 측정하고 역해석을 통해 신선암의 전기비저항, 불연속면의 전기비저항, 신선암의 두께, 불연속면의 두께를 예측한다. 이를 바탕으로 각 현장에 적합한 RMR과 전기비저항의 상관관계를 도출할 수 있다.

2.2 천공지수

유압착암기 등의 선진시추 장비를 이용한 천공탐사 및 지반 평가 기법들은 국내외에서 다양하게 개발되어 왔다. 선진시추를 통해 막장 전방의 지질이나 용수 상황을 직접 확인하거나, 시추장비에 데이터 로거를 장착하여 천공 시 얻어지는 각종인자(parameters)를 분석하여 막장 전방의 지질구조를 파악하는 기법 등이 개발되었다.

일반적으로 회전압과 천공속도는 RQD 및 연경 정도와 높은 상관관계를 보이며, 피드압의 급격한 저하는 파쇄대를 인지할 수 있는 중요한 요소로 알려져 있다. 따라서 일차적으로 국내 대표 암종인 화강암과 편마암에서 지질조건 등을 고려하고 회전압, 관입속도, 토크, 추력, 심도 등의 천공 변수와 RMR과의 관계를 산출하였고, 천공지수를 이용한 지반평가를 하기 위해서 지반조사 현장에서 시추조사 시 천공영향변수를 측정하였다(Kim et al., 2015).

현장에서 측정한 피드압(F), 회전속도(N), 토크(T), 굴진속도(V)와 비트의 면적(A)를 이용하여 천공지수(E_{sp})를 도출하였으며, RMR분류 결과와의 상관관계를 분석하였다. 천공지수(E_{sp})는 식 (2)를 이용하여 도출하였다.

$$E_{sp} = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{AV} \quad (2)$$

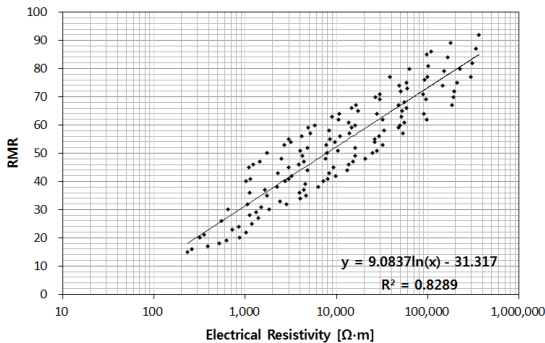


Fig. 1. Correlation between RMR and electrical resistivity obtained from electrical resistivity survey (TEP) (Ryu, 2010)

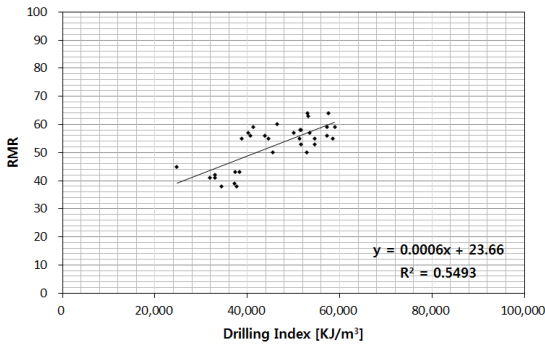


Fig. 2. Correlation between RMR and drilling index

천공영향변수는 0.01 m 단위로 데이터가 측정되지 만 암반분류는 1회 굴진으로 회수된 코어의 심도를 기준으로 분류하는데, 일반적으로 3 m를 기준으로 사용하나 코어회수상태, 파쇄대 등의 이상대 출현 시 1~2 m로 분류하기도 한다. RMR분류 기준으로 코어 회수 구간별 천공지수 평균값과 천공지수 기준으로 심도 0.01 m 당 암반분류의 값을 적용하여 상관관계를 분석하였다(Fig. 2). 암반을 구성하는 광물, 강도, 불연 속면의 분포에 따라 굴진능력이 조금씩 차이를 보이 기에 천공영향변수도 차이가 나타나게 되므로 0.01 m당 측정되는 천공영향변수를 코어회수 구간의 평균 측정값으로 천공지수를 도출하면 정확성이 높게 나타 났다. 또한 암반분류 2, 3등급의 구간에서 데이터 측정을 실시하여 전체적인 경향을 살펴보기에는 다소 오 류가 있을 수 있으나 천공지수와 RMR과의 경향성을 살펴볼 수 있다.

2.3 전기비저항 토모그래피

대부분의 현장에서 RMR을 구하는 심도의 간격은 코어가 채취되는 형태에 따라서 다르나, 전기비저항 검층은 수cm에서 수십cm 간격으로 연속적으로 전기 비저항 측정을 한다. 따라서 RMR을 측정할 심도와 전기비저항 검층으로 전기비저항을 측정한 심도에는 다소 차이가 있다. 전기비저항 검층은 연속적으로 측

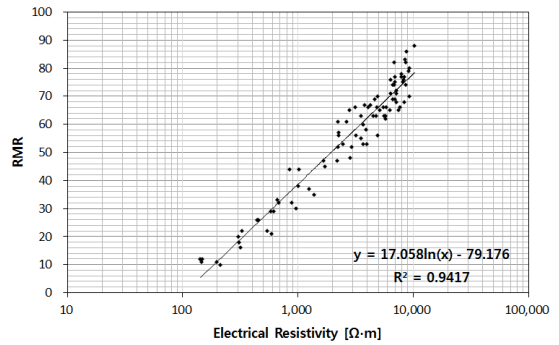


Fig. 3. Correlation between RMR and electrical resistivity obtained from electrical resistivity tomography (Lee et al., 2012)

정이 가능하므로 RMR을 측정한 심도에 맞추어 전기 비저항 검층으로 얻어진 심도별 전기비저항 데이터를 평균하여 상관관계 분석을 수행하였다. RMR은 일반 적으로 암반상태에 대한 점수를 합산한 후에 터널과 의 불연속면의 방향성에 따른 점수를 반영하여 최종 적인 RMR을 구하게 된다. 암반상태와 전기비저항과 의 상관관계를 분석하기 위해서 터널과 불연속면의 방향성에 따른 항목은 고려하지 않은 RMR을 사용하 였다. 또한 전기비저항 검층 데이터는 여러 가지 측정 방법 중에서 측정 지점 주위의 암반 상태를 대표하고 해상도가 좋은 단노말 검층에 의해 측정된 전기비저 항을 이용하였다(Lee et al., 2012).

총 3곳의 현장에서 측정된 단노말 검층에 의해 측정 된 전기비저항과 RMR의 상관관계를 분석하였으며, 전체적으로 전기비저항이 증가하면 RMR이 증가하 는 결과를 나타내었다. 이 경향은 Kwon et al. (2008)의 연구와도 일치하는 결과이다. 총 3곳의 현장 데이터로 부터 얻어진 RMR과 전기비저항의 상관관계를 분석 한 결과가 Fig. 3에 나타나있다. 결정계수가 약 0.94 정도로 매우 양호한 상관관계가 나타났으며, RMR이 증가하면 전기비저항이 증가하는 경향을 보였다. 현 장에서 측정된 전기비저항이 약 1,000 Ωm라고 가정 하였을 때 전기비저항으로부터 RMR이 약 28~48로 추정할 수 있었으며, 평균 RMR은 약 38로 나타났다.

2.4 본 연구에의 적용

본 연구에서는 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피로 얻어지는 전기비저항과 천공지수와 RMR의 상관관계를 이용하여, 막장 전방의 지반 상태에 대한 정보를 통합할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

3가지 방법 모두 Fig. 1~3에서 알 수 있듯이 데이터의 형태가 일정한 경향을 가지면서 흩어져 있는 분포 형태를 가지고 있다. 본 연구에서 얻어진 대부분의 데이터가 일정한 경향을 보이고 있기 때문에 상관성이 높은 회귀식을 얻을 수 있으며, 상한선과 하한선으로 데이터의 분포를 제한할 수 있다. 따라서 각각의 막장전방 예측 기법으로 얻어진 측정값을 회귀식에 대입하여 RMR의 중간값을 구하고, 상한선과 하한선으로부터 RMR의 최대값과 최소값을 구할 수 있다. 이 값들을 이용하여 각각의 막장전방 예측기법으로 얻어진 지반 상태에 대한 확률 분포를 도출할 수 있다. 또한 각각의 막장전방 예측기법의 신뢰도 및 정확성을 고려하여 가중치를 줌으로써 통합된 막장 전방의 지반 상태를 제시할 수 있을 것으로 보인다.

3. 막장전방 예측기법별 지반 상태 확률론적 분석

막장전방 예측기법인 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피로부터 얻어지는 전기비저항과 천공영향변수로부터 암반상태를 파악할 수 있다. 측정값과 RMR의 상관관계를 통해 암반상태를 도출할 때 현재 지반에서 얻어지는 측정값이나 RMR 측정 시의 불확실성, 측정값과 RMR의 상관관계에서 오는 결합변동성을 포함하고 있기 때문에 하나의 값으로 RMR을 도출하는 것보다 특정한 확률분포를 가진 산술 모델로 나타내는 것이 바람직하다고 판단된다. 이처럼 확률분포를 가진 산술 모델로 나타내는 방법은 건설공사의 공사기간 및 리스크 관리, 암석의 일축압축강도 분석, 흙의 지반정수 평가, 교통기반시

설의 기획과 설계, 구조부재 기계 및 설계 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(O and Kim, 2000; Moon and Kwon, 2007).

3.1 삼각분포

공학 문제에 존재하는 불확실성은 피할 수 없는 것이고, 가용한 정보는 종종 불완전하거나 불충분하고 언제나 변동성을 포함한다. 더욱이 공학적인 계획과 설계는 실제에 비해 불완전성의 정도가 알려지지 않은 이상화된 모델에 근거한 예측치나 추정치에 의존해야 하기 때문에 불확실성은 더욱 증가한다. 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 가우스분포(정규분포), 대수정규분포, 삼각분포, 기하분포, 포아송분포, 지수분포, 베타분포, 지수분포, t분포 등의 확률분포 중 현상의 특성에 적합한 확률분포를 선택하여 산술 모델로 표현하고 주 특성값(평균, 분산, 표준편차 등)을 도출함으로써 공학적 문제를 해결한다.

본 연구에서는 막장전방 예측기법으로부터 얻어지는 측정값과 RMR과의 회귀분석을 통해 회귀식을 얻을 수 있고, 상한선과 하한선으로 데이터의 분포를 한정시킬 수 있기 때문에 여러 가지 확률 분포 중에서 3점으로 그 분포를 결정할 수 있는 삼각분포를 사용하고자 한다. 삼각분포는 최소값, 중간값, 최대값을 통해 그릴 수 있는 분포이며(Fig. 4), 특히 확률변수(데이터 수, n)에 크게 영향을 받지 않는다(O and Kim, 2000).

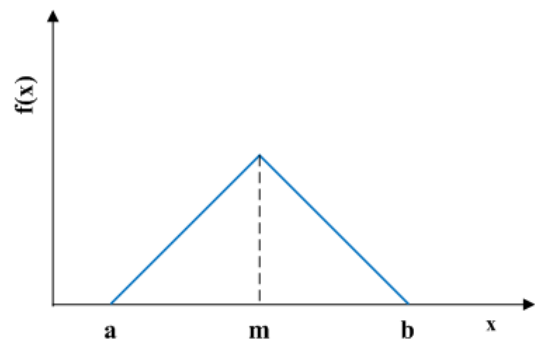


Fig. 4. Triangular probability density function

따라서 신뢰성 있는 유사한 데이터를 추출하기가 어려운 막장전방 예측기법으로부터 얻어지는 측정값과 RMR의 확률론적 분석 시 삼각분포를 사용하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.

일반적으로 연속형 확률변수의 평균과 분산은 확률 밀도함수를 적분하여 구할 수 있다. 삼각분포 역시 연속형 확률변수이므로 확률밀도함수를 적분하여 구할 수 있으나, 삼각분포의 성질을 고려하여 간략화된 식 (3), (4)를 이용하면 좀 더 간단하게 삼각분포의 평균과 분산을 구할 수 있다(Ang and Tang, 1975).

$$Mean = \bar{x} = \frac{a+m+b}{3} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{(a^2 + b^2 + m^2 - ab - am - bm)}{18} \quad (4)$$

여기서, \bar{x} 는 평균, a 는 최소값, m 은 중간값, b 는 최대값이다.

삼각분포의 확률밀도함수는 식 (5), (6)과 같이 표현할 수 있으며, 중간값을 기준으로 서로 다른 식을 사용한다.

$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(b-a)(m-a)} \quad a \leq x \leq m \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-m)} \quad m \leq x \leq b \quad (6)$$

누적분포함수는 확률밀도함수의 면적이므로 식 (5), (6)으로 표현되는 확률밀도함수 $f(x)$ 를 임의의 x 까지 적분함으로써 얻어지며, 식 (7), (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(x) = \frac{(x-a)^2}{(b-a)(m-a)} \quad a \leq x \leq m \quad (7)$$

$$F(x) = 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-m)} \quad m \leq x \leq b \quad (8)$$

3.2 지반 상태 확률론적 분석

TBM 현장에서 막장전방 예측기법을 사용함으로써 막장 전방의 지반 상태를 파악할 수 있으나, 적용되는 기법에 따라 탐사할 수 있는 거리가 다르고 지반 상태를 파악할 수 있는 구간이 다르다. 전기비저항탐사(TEP)는 TBM 상하부 지역 구분 없이 막장면으로부터 TBM 직경의 약 3~4배를 탐사하고, 천공지수는 시추공의 길이에 따라 탐사 범위가 변하지만 일반적으로 TBM 장비 본체의 상부에 설치된 선진 시추장비를 이용하여 얻게 되므로 상부지역만 탐사 가능하다. 또한 전기비저항 토모그래피는 시추공의 길이에 따라 탐사지역의 범위가 변화한다. 본 연구에서는 공사의 효율성과 탐사시간을 고려하여 TBM 하부에 약 1 m 시추공을 굴착하고, TBM 상부에 약 20 m의 시추공을 굴착한 상태에서 전기비저항 토모그래피 탐사를 수행한 경우로 가정하였다. 따라서 전기비저항의 토모그래피의 탐사 지역은 삼각형 분포를 가지게 된다. 이 연구에서는 막장면으로부터 약 20 m 전방의 지반을 탐사한다고 가정하였으며, TBM의 직경은 10 m로 가정하였다.

또한 각각의 막장전방 예측기법에 따라서 탐사 간격이 다르다. 전기비저항탐사(TEP)는 막장면에서 인접한 지반이 기반암을 구성하고 있다고 가정하고 이상대에 대한 해석을 하기 때문에 기반암과 이상대의 위치, 두께에 따라서 탐사 간격이 결정된다. 천공지수의 경우는 코어링을 하는 경우 코어길이에 따라 탐사 간격이 설정되며, 천공만 하는 경우에는 사용자가 설정한 구간에 따라 탐사 간격이 결정되며, 수cm~수m로 탐사 간격을 결정할 수 있다. 전기비저항 토모그래피도 탐사영역 내의 전체적인 전기비저항 분포를 얻을 수 있기 때문에 사용자가 설정한 구간에 따라 탐사 간격이 결정되나, 전방 지반에 이상대가 존재하는 경우에 이상대가 위치한 지점에서 급격하게 전기비저항이 변화하는 것이 아니라 이상대의 범위보다 넓은 구간에 걸쳐 완만하게 변화하기 때문에 1 m 이상의

탐사간격을 설정하는 것이 바람직하다.

따라서 각각 막장전방 예측기법의 탐사심도와 탐사간격을 고려하여 막장 전방으로의 거리와 상하부 지역을 5 m 간격으로 나누어 막장전방 예측기법의 탐사 지역을 크게 8개의 구간으로 설정하였다(Fig. 5).

확률론적 분석을 하기 위해서는 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피를 TBM 현장에 동시에 적용한 실제 사례가 있어야 하나, 현재까지 대부분의 현장이 1개의 막장전방 예측기법을 적용하기 때문에 실제 적용 사례는 없다. 따라서 본 연구에서는 현재 굴착지반의 RMR이 50이고 Zone 3-1, 3-2 지역에 이상대가 위치한 가상의 암반지반에서 각 구간의 측정값을 가정하고 확률론적 분석을 진행하였다.

각각의 막장전방 예측기법으로 얻어진 전기비저항과 천공지수와 같은 측정값과 RMR과의 상관관계는 Fig. 1~3에 나타나있다. 따라서 본 연구에서는 삼각분포를 사용할 수 있도록 측정값과 RMR의 상관관계에 상한선과 하한선을 도시하여 측정값으로 추정할 수 있는 RMR의 범위를 구하기 위해, 데이터 분포를 고려하여 Fig. 1~3에 상한선과 하한선을 도시하여 Fig. 6~8에 나타냈다. 따라서 각각의 막장 전방 예측기법으로 얻어진 측정값을 회귀식에 대입하여 RMR의 중간값을 구하고, 상한선과 하한선으로부터 RMR의 최대값과 최소값을 구했다. 전기비저항탐사(TEP)는 중심선인 회귀식으로 부터 ±13의 RMR 편차를 가지는 것으로 분석되었으며, 천공지수와 전기비저항 토모그래피는 중심선인 회귀식으로부터 ±10의 RMR 편차를 가지는 것으로 분석되었다. 막장전방 예측기

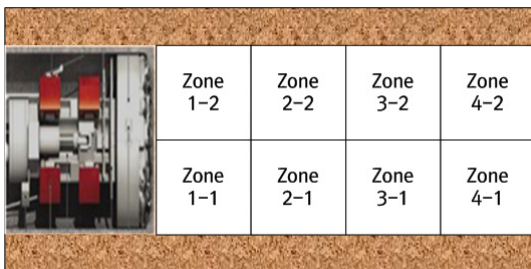


Fig. 5. Schematic view of each prediction zone

법으로부터 얻어지는 측정값으로부터 8개의 구간별로 RMR의 범위와 각 구간에서 막장전방 예측기법별 확률분포의 주 특성값을 Table 1에 정리하였다.

각각의 막장전방 예측기법별로 얻어진 최소값, 중간값, 최대값을 식 (5), (6)에 대입하면 삼각분포의

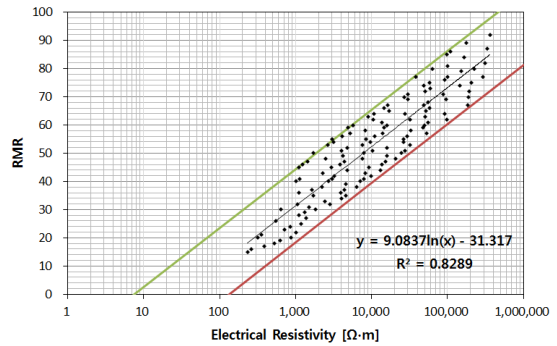


Fig. 6. Range of RMR values obtained from electrical resistivity survey (TEP)

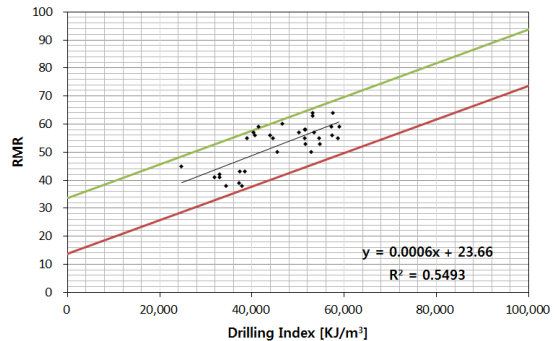


Fig. 7. Range of RMR values obtained from drilling index

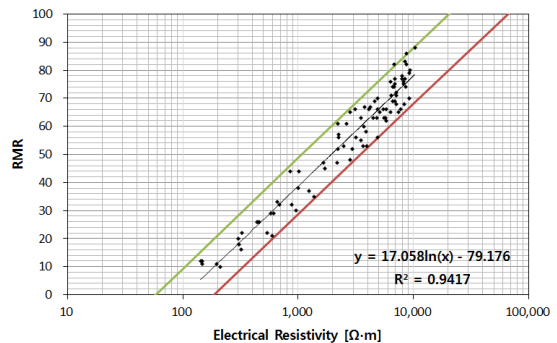


Fig. 8. Range of RMR values obtained from electrical resistivity tomography

확률밀도함수를 구할 수 있다. 각 구간별로 얻어진 확률분포 중 일부를 Fig. 9에 나타냈다. 전기비저항탐사(TEP)의 경우 최빈값에서의 확률이 다른 탐사기법

에서 얻어진 확률보다 작게 나타났는데, 이는 RMR 편차가 ±13으로 크기 때문에 RMR의 분포범위가 넓게 나타났다.

Table 1. Measurement value and Statistical RMR estimation in each zone

Zone	Method	Measurement value	RMR						
			Minimum value	Median value	Maximum value	Average	Variance	Standard deviation	Coefficient of variation
1-1	Electrical resistivity survey(TEP)	1,500 Ω·m	22	35	48	35.000	28.167	5.307	0.152
	Drilling index	45,000 KJ/m ³	41	51	61	51.000	16.667	4.082	0.080
	Electrical resistivity tomography	2,000 Ω·m	40	50	60	50.000	16.667	4.082	0.082
1-2	Electrical resistivity survey(TEP)	1,500 Ω·m	22	35	48	35.000	28.167	5.307	0.152
	Drilling index	45,000 KJ/m ³	41	51	61	51.000	16.667	4.082	0.080
	Electrical resistivity tomography	2,000 Ω·m	40	50	60	50.000	16.667	4.082	0.082
2-1	Electrical resistivity survey(TEP)	1,500 Ω·m	22	35	48	35.000	28.167	5.307	0.152
	Drilling index	50,000 KJ/m ³	44	54	64	54.000	16.667	4.082	0.076
	Electrical resistivity tomography	1,500 Ω·m	36	46	56	46.000	16.667	4.082	0.089
2-2	Electrical resistivity survey(TEP)	1,500 Ω·m	22	35	48	35.000	28.167	5.307	0.152
	Drilling index	50,000 KJ/m ³	44	54	64	54.000	16.667	4.082	0.076
	Electrical resistivity tomography	1,500 Ω·m	36	46	56	46.000	16.667	4.082	0.089
3-1	Electrical resistivity survey(TEP)	400 Ω·m	10	23	36	23.000	28.167	5.307	0.231
	Drilling index	10,000 KJ/m ³	20	30	40	30.000	16.667	4.082	0.136
	Electrical resistivity tomography	800 Ω·m	25	35	45	35.000	16.667	4.082	0.117
3-2	Electrical resistivity survey(TEP)	400 Ω·m	10	23	36	23.000	28.167	5.307	0.231
	Drilling index	10,000 KJ/m ³	20	30	40	30.000	16.667	4.082	0.136
	Electrical resistivity tomography	800 Ω·m	25	35	45	35.000	16.667	4.082	0.117
4-1	Electrical resistivity survey(TEP)	1,500 Ω·m	22	35	48	35.000	28.167	5.307	0.152
	Drilling index	50,000 KJ/m ³	44	54	64	54.000	16.667	4.082	0.076
	Electrical resistivity tomography	2,000 Ω·m	40	50	60	50.000	16.667	4.082	0.082
4-2	Electrical resistivity survey(TEP)	1,500 Ω·m	22	35	48	35.000	28.167	5.307	0.152
	Drilling index	50,000 KJ/m ³	44	54	64	54.000	16.667	4.082	0.076
	Electrical resistivity tomography	2,000 Ω·m	40	50	60	50.000	16.667	4.082	0.082

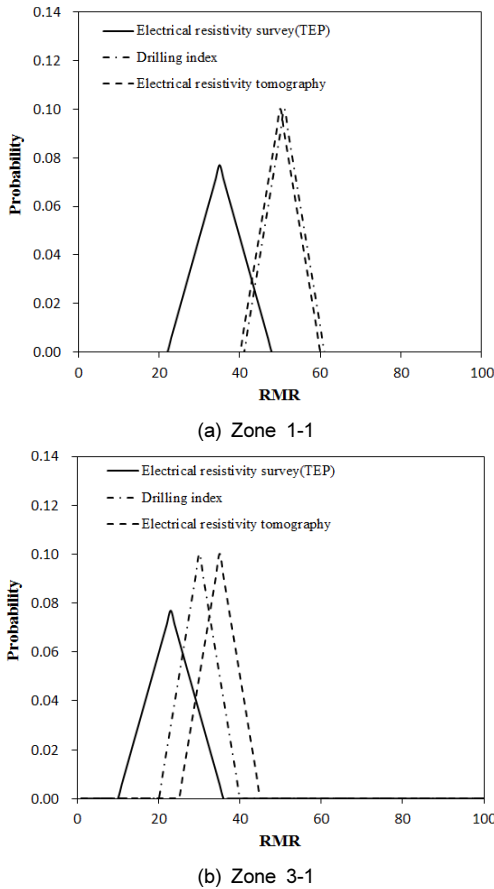


Fig. 9. RMR distribution of each method to predict the ground condition ahead of tunnel face

4. 막장전방 예측기법별 가중치 산정

가중치를 설정하는 방법으로는 평가인자 간 상대 중요도를 평가하기 곤란한 경우 균등배분으로 가중치를 설정하거나 계층분석기법(analytic hierarchy process) 중 의사결정요소의 상대 중요도 평가방법을 이용하여 가중치를 결정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하여 막장전방 예측기법별 가중치를 결정하였다. 계층분석기법은 상호비교, 동질성, 독립성, 기대성의 기본공리에 바탕을 두며, 문제 해결을 위한 효과적인 인간사고는 계층적 구조설정(hierarchical structuring)의 원리, 상대적 중요성 설정(weighting)의 원리, 논리적 일관성(consistency)의 원

리가 지켜진다는 특징에 착안하여 개발된 의사결정기법의 하나이다(Saaty, 1980). 이러한 원리들은 모델의 계층적 구조를 설정하고, 설정된 구조를 구성하는 평가요소들에 대하여 상대적 중요도를 측정하며, 이러한 판단이 일관성이 있는지를 검증함으로써 모델의 구축이 완료된다. 계층구조에 대한 상대적 가중치의 추정에는 쌍대비교를 통한 요소간 상대적 중요도의 측정결과를 종합하여 결정한다.

본 연구에서 선정된 막장전방 예측기법인 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피를 TBM 현장에 적용하였을 때 막장 전방을 탐사하는 심도와 위치에 따라 신뢰도와 정확도가 다소 다를 수 있다. 따라서 막장전방 예측기법의 신뢰도와 탐사하는 지역에 따라 각 기법에 서로 다른 가중치를 적용하여 막장전방 예측기법으로부터 얻어진 결과를 통합하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 본 통합모델에서는 앞에서 설정한 8개의 구간별, 막장전방 예측기법에 따라 서로 다른 가중치를 주었으며, 각각의 막장전방 예측기법간의 상대 중요도를 전문가 설문조사와 다음과 같은 기준을 통해 결정하였다.

- 전기비저항탐사(TEP)는 크게 2단계로 나누어 탐사를 수행한다.
 - 1단계: 막장면에 설치된 여러 개의 전극 중에서 가장 인접한 구간의 전극으로부터 전기저항을 측정한다. 그리고 측정된 저항을 바탕으로 역해석을 수행하여 막장면에 근접한 암반의 상태에 대한 정보를 얻고, 이를 기반암의 상태로 가정한다.
 - 2단계: 나머지 전극을 이용하여 전기저항을 측정하고, 전 단계에서 얻은 기반암의 정보와 측정된 전기저항을 바탕으로 역해석을 수행하여 이상대의 위치 및 상태에 관한 정보를 얻는다.

따라서 1단계에서 얻은 막장면에 근접한 암반 상태

를 기반암으로 가정하여 2단계 해석을 실시하기 때문에 막장면에 설치된 전극에서 전류를 흘려주므로 전류 침투 거리를 고려하여 막장면에 근접한 구간에서만 중요도를 높게 주고, 막장면에서 멀어진 구간에서는 중요도를 낮게 주었다.

- 천공지수는 TBM 장비 본체 상부에 설치된 선진 시추장비를 통해 상부지역을 굴착할 때 얻어지는 피드압, 회전속도, 토크 등을 통해 계산할 수 있다. 전기비저항탐사(TEP)와 전기비저항 토모그래피와는 달리 탐사 구간에 따른 신뢰성은 변함없이 일정하기 때문에 주로 천공장비가 설치되는 상부 모든 구간에 대해 중요도를 동일하게 설정하였다. 또한 물리탐사 방법과 달리 직접 시추를 통해 지반 상태를 파악하므로 다른 막장 전방 예측기법보다 중요도를 높게 설정하였다. 다만 하부지역을 직접 굴착하지 않기 때문에 하부지역의 암반 상태를 알 수 없기 때문에 하부지역의 중요도를 낮게 설정하였다.
- 전기비저항 토모그래피는 탐사는 상부 시추공 20m, 하부 시추공 1m에서 탐사를 수행하기 때문에 삼각형 형태의 탐사 영역을 가진다. 막장전방을 예측하기 위한 총 8개의 구간에서 탐사범위 내의 삼각형은 중요도를 높게 주고 탐사범위 외의 삼각형은 중요도를 낮게 주었다. 또한 천공지수와 달리 하부지역도 탐사가 가능하기 때문에 하부지역에 대한 중요도를 높게 주었다.

위에서 설정한 기준을 바탕으로 공사 현장의 공사 기간, 비용 등의 상황에 따라 막장전방 예측기법의 적용 개수 등이 달라질 수 있음을 고려하여 2가지 경우로 나누어 상대 중요도를 평가하였다. 3가지 막장전방 예측기법을 적용한 경우의 상대 중요도를 Table 2에 정리하였으며, 2가지 막장전방 예측기법을 적용한 경우의 상대 중요도를 Table 3에 정리하였다.

계층분석기법에서는 상대중요도로 구성되는 쌍대 비교행렬의 수치들이 일관성을 가지고 있는지 검증하기 위하여 일관성지수(CI)와 난수지수(RI)의 비인 일관성 비율(CR)을 구하고, 일관성 비율이 10% 이내인 경우 해당 쌍대비교행렬은 일관성이 있다고 규정한다. 막장전방 예측기법별 상대 중요도를 바탕으로 막장전방 예측기법/구간의 쌍대비교행렬을 구성하고 일관성을 검증하기 위하여 일관성비율을 구한 결과, 일관성 비율이 10%이내의 값을 가지는 것으로 나타나 쌍대비교행렬의 적정성을 확인하였다.

막장전방 예측기법별 상대 중요도를 고려한 쌍대비교행렬로부터 Table 4, 5와 같이 가중치 행렬(weight matrix)을 구했다. 각 구간의 가중치 합계는 1이 되며,

Table 2. Relative importance of each prediction method (The case of adopting three methods)

Zone	Electrical resistivity survey (TEP)	Drilling Index	Electrical resistivity tomography
Zone 1-1	5	1	3
Zone 1-2	5	5	3
Zone 2-1	3	1	3
Zone 2-2	3	5	3
Zone 3-1	1	1	1
Zone 3-2	1	5	3
Zone 4-1	1	1	1
Zone 4-2	1	5	3

Table 3. Relative importance of each prediction method (The case of adopting two methods)

Zone	Electrical resistivity survey (TEP)	Drilling Index
Zone 1-1	5	1
Zone 1-2	5	5
Zone 2-1	3	1
Zone 2-2	3	5
Zone 3-1	1	1
Zone 3-2	1	5
Zone 4-1	1	1
Zone 4-2	1	5

Table 4. Weighting factor of three predicting methods

Zone	Electrical resistivity survey (TEP)	Drilling Index	Electrical resistivity tomography
Zone 1-1	0.556	0.111	0.333
Zone 1-2	0.385	0.385	0.231
Zone 2-1	0.429	0.143	0.429
Zone 2-2	0.273	0.455	0.273
Zone 3-1	0.333	0.333	0.333
Zone 3-2	0.111	0.556	0.333
Zone 4-1	0.333	0.333	0.333
Zone 4-2	0.111	0.556	0.333

Table 5. Weighting factor of two predicting methods

Zone	Electrical resistivity survey (TEP)	Drilling Index
Zone 1-1	0.833	0.167
Zone 1-2	0.500	0.500
Zone 2-1	0.750	0.250
Zone 2-2	0.375	0.625
Zone 3-1	0.500	0.500
Zone 3-2	0.167	0.833
Zone 4-1	0.500	0.500
Zone 4-2	0.167	0.833

각 구간에서 탐사하는 막장전방 예측기법의 탐사 신뢰도에 따라 서로 다른 가중치를 가진다. 상대 중요도로부터 예측할 수 있듯이 막장면에 인접한 구간에서는 전기비저항탐사(TEP)가 높은 가중치를 가지며, 막장면에서 점차 멀어질수록 낮은 가중치를 가지는 경향을 보인다. 천공지수는 상부 구간에서 높은 가중치를 보이며, 하부 구간에서는 매우 작은 가중치를 가진다. 전기비저항 토모그래피 탐사는 대부분의 구간에서 비슷한 가중치를 가지는 경향을 보인다.

5. 통합 모델을 이용한 지반 상태 분석

본 연구에서는 막장전방 예측기법별 지반 상태의 확률론적 분석과 가중치를 고려하여 막장 전방의 지

반 상태를 평가할 수 있는 통합 모델을 제안하고자 하였다. 따라서 각각의 확률분포를 통합하기 위하여 본 연구에서는 Barlow (1984)가 제안한 방법을 본 연구에 적용하였다. Barlow (1984)가 제안한 방법은 여러 전문가로부터 얻어진 리스크 확률을 의사결정권자가 통합하기 위하여 사용한 방법으로 식 (9)와 같다.

$$P_i = \sum_j \omega_j P_{ij}, \quad \sum \omega_j = 1 \quad (9)$$

여기서, P_i 는 사건 i 가 일어날 확률이고, P_{ij} 는 전문가 j 에 의하여 이벤트 i 가 일어날 확률, ω_j 는 의사결정권자가 생각하는 전문가 j 의 신뢰도 또는 가중치를 의미한다.

Wu et al. (1987)은 여러 연구자들에 의해 제안된 경험식들로부터 마찰각(ϕ')을 구하고, Barlow (1984)가 제안한 방법과 같이 경험식들의 신뢰도를 고려하여 하나의 마찰각으로 통합하여 제시하는 연구를 수행한 바 있다. 이처럼 본 연구에 Barlow (1984)가 제안한 방법을 적용하면 P_{ij} 는 각각의 막장전방 예측 기법으로부터 얻어지는 RMR의 분포확률, ω_j 는 막장 전방 예측기법 각각의 신뢰도 또는 가중치를 의미하는 것으로 적용할 수 있다.

막장전방 예측기법별 지반 상태의 확률론적 분석 결과와 가중치를 고려한 통합 모델은 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피 탐사를 통해 막장 전방을 탐사하여 얻게 되는 전기비저항, 천공지수 등의 측정값과 RMR의 상관관계를 통해 막장 전방의 RMR을 구하고, 확률론적 분석을 통해 RMR의 확률분포를 구한다. 그리고 각각의 확률분포에 막장전방 예측기법별, 구간별 가중치를 적용하여 통합된 막장 전방의 지반 상태에 대한 결과를 제시한다. Fig. 10은 확률론적 분석을 이용한 지반 상태 평가 통합 모델의 주요단계를 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서 제안하는 통합 모델에서는 각 구간별로 구해진 RMR의 확률분포와 가중치를 식 (9)와 같이 곱한 후에 각각을 합했다. 이로부터 얻어진

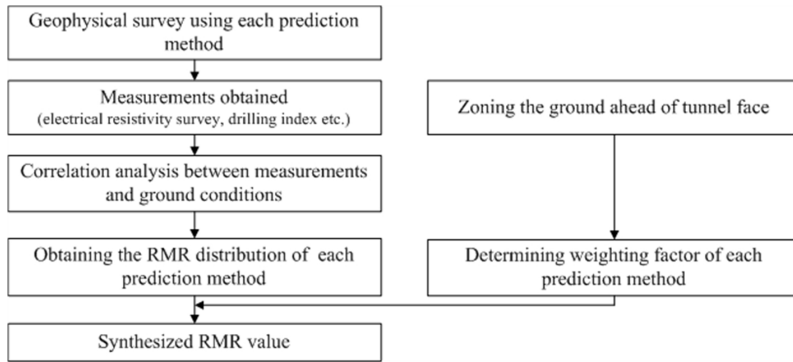


Fig. 10. A synthesised model for assessment of ground condition using probabilistic analysis (Lee, 2014)

결합확률분포로부터 막장 전방의 지반 상태에 대한 각 구간별 통합 RMR의 평균, 표준편차, 변동계수 (coefficient of variance)를 구했다(Table 6). 통합하여 지반 상태를 평가한 결과 가중치가 높은 막장전방 예측기법에서 얻어지는 RMR과 비슷한 결과를 나타냈다. 대부분 현재 굴착지반과 유사한 RMR을 가지는 것으로 분석되었으며, Zone 3-1, 3-2에서 4등급 암반이 출현하는 것으로 예측되었다. Table 6의 결과는 다양한 막장전방 예측기법 중 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피 3가지 기법을 적용하였을 경우를 고려하여 구한 것이다. 만약에 공사 현장의 공사기간, 비용 등의 상황으로 인하여 전기비저항탐사(TEP)와 천공지수만 이용하여 막장 전방을

탐사하는 경우에는 각각의 확률분포를 구한 후에, 식 (9)에 Table 5에 정리된 가중치를 대입하여 통합된 지반 정보를 제시할 수 있다.

측정값과 지반 상태의 상관관계가 매우 정확하고 여러 현장에 일괄적으로 적용할 수 있는 경우 지반 상태를 정량적으로 평가하는 것이 바람직하다. 그러나 현장의 암종, 풍화정도, 지하수 등의 여러 가지 지질조건에 따라 전기비저항, 천공지수 등의 측정값과 지반 상태의 상관관계가 현장에 따라 다르게 나타날 가능성이 있다. 각각의 현장마다 막장전방 예측기법으로부터 얻어지는 측정값과 RMR의 상관관계를 도출하면 지반 상태를 평가하는데 있어 정확도가 증가할 수 있으나, 시간 및 비용적인 측면에서 매우

Table 6. Average, standard deviation, and coefficient of variation of synthesized RMR value in each zone

Zone Y \ Zone X	1	2	3	4
2	44.615 (±8.80) Cov = 0.199	46.636 (±9.018) Cov = 0.193	30.889 (±5.547) Cov = 0.180	50.556 (±7.166) Cov = 0.142
1	41.778 (±8.966) Cov = 0.215	42.429 (±8.347) Cov = 0.197	29.333 (±6.675) Cov = 0.228	46.333 (±9.339) Cov = 0.202

Table 7. Average, standard deviation and coefficient of variation of synthesized RMR ratio in each zone

Zone Y \ Zone X	1	2	3	4
2	0.892 (±0.178) Cov = 0.199	0.933 (±0.180) Cov = 0.193	0.618 (±0.111) Cov = 0.180	1.011 (±0.143) Cov = 0.142
1	0.836 (±0.179) Cov = 0.215	0.849 (±0.167) Cov = 0.197	0.587 (±0.133) Cov = 0.228	0.927 (±0.187) Cov = 0.202

비효율적이며 현실적으로 어렵다.

실제 TBM 터널 공사에서 오퍼레이터가 TBM을 운용할 때 막장전방의 정량적인 지반상태보다는 현재 굴착지반 대비 막장전방의 지반상태가 어떻게 변화하는지 파악하는 것이 더 중요하다. 따라서 본 연구에서는 현재 굴착 지반의 RMR을 고려하여 막장전방의 지반상태를 정성적으로 비교해보았다. 현재 굴착 지반의 RMR로 막장전방의 지반 상태를 정규화(Normalized)하여 구간별 통합 RMR비를 구하고, 그 결과를 Table 7에 정리하였다. 정량적인 지반 상태 평가와 마찬가지로 Zone 3-1, 3-2에서 현재 굴착지반 대비 연약한 지반이 있는 것으로 나타났으며, 현재 굴착지반 대비 약 60% 수준의 지반이 위치한 것으로 예측되었다.

6. 결론

본 연구에서는 여러 가지 막장전방 예측기법을 동시에 적용하였을 경우 각각의 방법으로부터 예측된 막장전방의 지반 상태를 종합적으로 평가하기 위한 방법을 제안하고자 하였다. 여러 가지 막장전방 예측기법 중에서 전기비저항탐사(TEP), 천공지수, 전기비저항 토모그래피 탐사가 적용된 경우를 가정하고, 각각의 막장전방 예측기법으로부터 얻은 측정값과 RMR의 상관관계로부터 확률론적 분석을 수행하여 RMR의 확률분포를 구했다. 계층분석기법을 이용하여 막장전방 예측기법별, 구간별 가중치를 설정하였다. 막장전방 예측기법별 RMR의 확률분포와 가중치를 이용하여 막장전방의 지반 상태를 평가할 수 있는 통합 모델을 제시하였으며, 정량적·정성적 분석을 수행함으로써 막장 전방의 지반 상태에 대한 평가를 수행하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 내용들은 다음과 같다.

1. 막장전방 예측기법으로부터 얻어지는 전기비저항, 천공지수 등의 측정값과 막장전방 지반 상태의 상관관계에 대한 분석을 수행하였다. 막장전방 예

측기법으로부터 얻어지는 측정값과 RMR의 확률론적 분석에 적합한 확률분포는 데이터의 수의 영향을 적게 받는 삼각분포가 가장 적절한 것으로 판단되었다.

2. 여러 가지 막장전방 예측기법을 동시에 적용하였을 경우를 가정하고 막장전방 예측기법의 신뢰도와 탐사 간격을 고려하여 막장전방 20m 이내의 지반을 8개 구간으로 나누고, 각 구간별 RMR 확률분포를 구했다. 또한 계층분석기법을 이용하여 각 구간별로 막장전방 예측기법의 탐사영역과 탐사 신뢰도를 고려한 가중치를 선정하였다.

3. 여러 가지 막장전방 예측기법을 동시에 적용하였을 경우 구간별 RMR분포와 가중치를 이용하여 지반 상태를 종합적으로 평가할 수 있는 통합 모델을 제안하였다. 통합 모델을 이용하여 Zone 3-1, 3-2지역에 이상대가 위치한 지반을 가정하고 해석을 수행한 결과, Zone 3-1, 3-2지역에 4등급 암반이 위치한 것을 예상할 수 있었다. 또한 현재지반 대비 약 60%정도의 상태를 가지는 이상대가 위치한 것으로 예측되었다. 제안된 통합 모델로부터 막장전방의 지반 상태를 정량적·정성적으로 분석할 수 있었으며, 이상대의 위치 등 실제 지반의 상태를 잘 반영하는 결과를 보여주었다. 따라서 여러 개의 막장전방 예측기법이 TBM 현장에 적용되었을 때 본 연구에서 제안한 통합 모델을 통해 막장 전방의 지반 상태를 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

4. TBM 현장의 막장면에서 여러 가지 탐사를 실시하기에는 어려움이 있어 본 연구에서 제안한 통합 모델을 가상의 지반에 적용하였다. 향후 TBM 현장의 막장면에서 여러 가지 탐사를 실시해 얻어진 탐사결과를 본 연구에서 제안한 통합모델에 적용하여 예측된 종합적인 지반상태와 실제 지반상태를 비교 분석하는 것을 계획 중에 있으며, 제안한 통합모델의 신뢰성을 더욱 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술 개발” 연구비지원(15SCIP-B066321-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, H.Y., Jeong, J.H., Cho, I.K., Kim, J.H., Bae, G.J. (2008), “Application of resistivity monitoring with tunnel excavation area”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 10, No. 4, pp. 405-420.
- Ang, A.H-S., Tang, W.H. (1975), “Probability concepts in engineering planning and design”, John & Wiley Sons, New York, US.
- Barlow, R.E. (1984), “The bayesian approach in risk analysis”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 1, Issue. 2, pp. 113-115.
- Choi, J.H., Jo, C.H., Ryu, D.W., Kim, H., Oh, B.S., Kang, M.G., Suh, B.S. (2003), “A study on the correlation between the result of electrical resistivity survey and the rock mass classification values determined by the tunnel face mapping”, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 13, No. 4, pp. 279-286.
- Dowden, P.B., Robinson, R.A. (2001), “Coping with boulders in soft ground TBM tunneling”, *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Littleton, US, pp. 961-977.
- Kahraman, S., Balci, C., Yazici, S, Bilgin, N. (2000), “Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 37, Issue. 5, pp. 729-743.
- Kaus, A., Boening, W. (2008), “BEAM-geolectrical ahead monitoring for TBM-drives”, *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 1, No. 5, pp. 442-449.
- 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.
- Kim, N.Y., Kim, S.H., Chung, H.S. (2001), “Correlation between drilling parameter and tunnel support pattern using jumbo drill”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 3, No. 14, pp. 17-24.
- Kneib, G., Kasselm, A., Lorenz K. (2000), “Automatic seismic prediction ahead of the tunnel boring machine”, *First Break*, Vol. 18, Issue. 7, pp. 295-302.
- Kwon, H.S., Synn, J.H., Hwang, S.H., Baek, H.J., Kim, K.S., Kim, J.S. (2001), “A study on the correlation of resistivity and rock quality”, *Proceedings of Korean Geotechnical Society*, Bundang, pp. 81-88.
- Kwon, H.S., Hwang, S., Baek, H., Kim, K.S. (2008), “A study on the correlation between electrical resistivity and rock classification”, *Geophysics and Geophysical Exploration*, Vol. 11, No. 4, pp. 350-360.
- Lee, K.H., Seo, H.J., Park, J.H., Ahn, H.Y., Kim, K.S., Lee, I.M., (2012), “A study on correlation between electircal resistivity obtained from electrical resistivity logging and rock mass rating in-situ tunnelling site”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 5, pp. 503-516.
- Lee, K.H. (2014), “Predictions of ground conditions ahead of tunnel face applicable to TBM”, Ph.D. Dissertation, Korea University.
- Moon, S., Kwon, K. (2007), “Modification of activity duration for construction scheduling using triangular distribution”, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, Daegu, pp. 3282-3285.
- O, S.D., Kim, Y.S. (2000), “A study on the cost risk analysis model using the triangular distribution”, *Proceedings of Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 2, Gwangju, pp. 675-678.
- Richter, T. (2011), “Innovative geophysical invest-

- igation technology in karstified and fractured rock formations”, 1st Scientific Congress on Tunnels and Underground Structures in South-East Europe, Dubrovnik, Croatia, pp. 20-21.
18. 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.
 19. Saaty, T.L. (1980), “The analytic hierarchy process”, McGraw-Hill, New York, US.
 20. Teale, R. (1965), “The concept of specific energy in rock drilling”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 2, Issue. 1, pp. 57-73.
 21. Wu, T.H., Lee, I.M., Potter, J.C., Kjekstad, O. (1987), “Uncertainties in evaluation of strength of marine sand”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 7, pp. 719-738.
 22. You, K.H., Lee, S.H., Choo, S.Y., Jue, K.S. (2004), “A study on the estimation of rock mass classes using the information off a tunnel center line”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 6, No. 2, pp. 101-111.