

전기비저항탐사결과와 터널막장 암반분류의 상관성 검토

A study on the correlation between the result of electrical resistivity survey and the rock mass classification values determined by the tunnel face mapping

최재화¹⁾, Jai Hoa Choi, 조철현²⁾, Churl-hyun Jo, 류동우¹⁾, Dong-Woo Ryu, 김학규³⁾, Hak Gyu Kim, 서백수⁴⁾, Baek Soo Suh

¹⁾ 지하정보기술(주) 선임연구원, Senior Researcher, Subsurface Information Technologies, Inc.

²⁾ 지하정보기술(주) 대표이사, President, Subsurface Information Technologies, Inc.

³⁾ 두산건설주식회사 영월-덕포도로현장 소장, Doosan Construction & Engineering Co., Ltd.

⁴⁾ 강원대학교 지구시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Geosystem Engineering, Kangwon University

SYNOPSIS : In this study, the rock mass classification results from the face mapping and the resistivity inversion data are compared and analyzed for the reliability investigation of the determination of the rock support type based on the surface electrical survey. To get the quantitative correlation, rock engineering indices such as RCR(rock condition rating), N(Rock mass number), Q-system based on RMR(rock mass rating) are calculated. Kriging method as a post processing technique for global optimization is used to improve its resolution.

The result of correlation analysis shows that the geological condition estimated from 2D electrical resistivity survey is coincident globally with the trend of rock type except for a few local areas. The correlation between the results of 3D electrical resistivity survey and the rock mass classification turns out to be very high. It can be concluded that 3D electrical resistivity survey is powerful to set up the reliable rock support type.

Key words : rock mass classification, face mapping, resistivity survey, correlation analysis

1. 서 론

최근에 들어 지구물리탐사자료결과를 설계에 적용하고자 하는 시도가 확산되어 오고 있으며, 특히 터널분야에서는 시추자료와 전기비저항의 상호 관련성을 연구하여 전기비저항 자료로부터 암반분류 나아가 지보패턴의 선정에 필요한 정량적인 정보를 얻고자 하는 시도가 수행되고 있다. 시추공전기검층결과와 암반분류와는 상당히 높은 상관관계가 있는 것으로 보고되었지만(권형석 등, 2001), 2차원 지표전기비저항탐사자료와 시추코아에서 얻어진 암반분류 기준을 단순히 도시한 결과로는 그리 높은 상관성을 보이지 않고 있는 것으로 나타나고 있어, 해석자의 주관에 많이 반영하여 상관관계를 설정하는 편이다.

그럼에도 불구하고 현실적으로 전기비저항탐사 자료만큼 터널전반에 대한 정보를 제공하는 자료가 없는 실정이므로 전기비저항탐사자료에 기반한 지보패턴 설정이 실제 시공 시에 설정된 지보패턴과 얼마나 정확히 일치하는가에 대한 검토를 수행할 필요가 있다.

본 연구는 이러한 배경에서 전기비저항 탐사의 해석 결과와 시공과정 중 터널을 굴착하면서 얻은 막장 매핑 자료에 기반한 실제 암반분류를 비교 분석함으로써 상호 관련성을 살펴보고자 하였다. 연구 대상은 시공직전에 2차원과 3차원 전기비저항탐사가 선행되었고 매 막장마다 막장관찰이 세밀히 수행된 터널을 선택하였다. 막장관찰은 암석강도, RQD, 절리면의 간격, 절리면의 상태, 지하수, 불연속면 방향 등 6가지 조사항목으로 수행되었다.

2 전기비저항탐사와 막장관찰

연구 대상은 38국도 확장 및 포장공사 영월-덕포 구간에 존재하는 영월1터널이다. 대상터널은 지리적으로는 영월군 영월읍 방절리에 위치하며 지질학적으로는 석회암지역에 속한다. 석회암 지역에서 흔히 발생하는 석회암 공동 발견 등 암반상태를 예측하기 위하여 터널 전구간에 대하여 시공 전에 2차원 전기비저항탐사를 수행하였다. 한편 지표지질조사에 의하면 터널 시점부에서 중반까지 단층이 관찰되었으며, 시공 중 발견된 석회공동의 존재범위를 정확히 파악하기 위하여 3차원전기비저항탐사를 추가적으로 수행하였다.

2.1 전기비저항탐사

터널 전구간에 대하여 수행한 2차원 전기비저항탐사의 전극배열은 지하영상화의 분해능이 가장 높은 것으로 연구된(김정호 등, 2001) 쌍극자배열을 채택하였다. 전극간격은 해상도와 가탐심도를 적절히 고려하여 10m 간격으로 수행하였다. 한편 단층이 교차하는 예상취약부위에서 수행한 3차원전기비저항탐사의 탐사구간은 상행선을 중심으로 좌우 각각 40m 구간을 탐사영역으로 설정하였다. 3차원 전기비저항탐사 시에 적용한 전극배열은 단극자-단극자 배열을 채택함으로써 탐사 시 요구되는 측정면적을 최소화하였다. 탐사측선은 터널 종방향으로 12 측선, 터널 횡방향으로 17 측선을 설정하였다. 터널심도를 고려하여 측정간격과 측선간격은 모두 8m로 설정하였다. 전기비저항탐사자료는 유한차분법에 기초한 비선형역산 프로그램을 이용하여 해석하였다.

2-2. 막장관찰 및 암반공학적 변수의 추출

터널을 굴진하면서 매 단면마다 막장관찰에 의한 RMR (Rock Mass Rating)을 구하였다. 조사한 항목은 암석강도, RQD, 절리면의 간격, 절리면의 상태, 지하수, 불연속면 방향 6가지 요소이다 (Bieniawski, 1973). 이렇게 RMR을 정할 때 상당히 주관적인 요소가 많이 개입되고 있는 것이 사실이다. 따라서 RMR 값과 전기비저항 값의 상호 관련성을 보고, 주관성에 기인한 오류를 최대한 배제하기 위해 20m씩 구간을 나누어 RMR 값의 평균을 내고, 10m씩 중첩되게 자료를 정리하여 비저항 값과 비교하였다. 또한 RMR 값의 요소를 보면 절리면의 방향이나, 암석강도는 전기비저항값을 결정하는 요소와 상관성이 낮게 나타나므로 이 두 가지 요소를 배제한 4가지 요소, 즉 RQD(rock quality designation), 절리면의 간격, 절리면의 상태, 지하수만의 값으로 구성된 RCR(rock condition rating)을 구하여 전기비저항 값과의 상관성을 분석하고자 하였다. RCR은 N(Rock mass number)과의 관계식을 통하여 N값을 추정하고 N값을 통하여 다시 Q값을 추정하였다(Goel, 1996; Barton, 1993). 전기비저항값과 RMR, RCR, N, Q 등을 모두 비교하여 각 변수별 상관성 분석을 수행하였다.

2-3. 지구통계학적 추정

역산된 비저항 값은 지층을 유한한 개수의 나눈 절점에서 얻어지며 절점의 간격은 측정 간격보다 같거나 크므로 지층분해능은 높지 않다. 따라서, 역산 결과에 대한 후처리 과정을 통해 지층분해능을 높이고자 하였으며, 특히 암 판정이 내려진 막장 위치에서 최적 전기비저항 추정치를 얻기 위해 크리깅 기법을 활용하였다. 크리깅 추정기법은 자료의 변동도 분석을 통한 변동도 모델에 기초하여 수행할 수 있다. 크리깅은 최적 선형불편향 추정자(best linear unbiased estimator: BLUE)이며, 기지 값들의 가중치 선형 결합형태를 가지는 추정자를 말한다.

$$\hat{Z} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$

여기서, Z_i 는 공간 상에 분포하는 자료 값이며, λ_i 는 Z_i 에 해당되는 가중치(weight), \hat{Z} 는 크리깅에 의한 추정치이다. 크리깅의 가중치는 추정치가 불편향적(unbiased)이고, 추정분산(estimation variance)이 최소가 되도록 결정한다. 즉, 불편향조건과 최소추정분산조건을 만족시키도록 가중치를 결정하며, 이 두 조건은 다음과 같다.

$$E[Z - \hat{Z}] = 0$$

$$E\{[Z - \hat{Z}]^2\} \rightarrow \text{Minimum}$$

상기와 같은 크리깅 추정자는 최소자승법의 개념에서 국부적 최적 추정치(locally optimal prediction)를 제공한다.

본 연구에서 변동도 모델링은 다음의 구형모델(spherical model)을 기본 모델로 설정하여 수행하였다.

$$\gamma(h) = \begin{cases} \left(\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) \sigma^2 & \text{for } 0 \leq h \leq a \\ \sigma^2 & \text{for } h > a \end{cases}$$

여기서 h 는 두 지점간의 이격거리(separation distance)를 의미하며, a 는 영향범위, σ^2 는 분산을 나타낸다.

3. 전기비저항탐사 및 막장관찰에 의한 암반분류

3-1. 2차원 전기비저항탐사 결과 검토

전기비저항값과 RMR의 상관성을 Fig. 1 (a)에 나타내었으며, 그래프의 A 구간은 RMR이 커질수록 비저항값도 커지는 경향성을 보이나, B구간의 RMR은 30점대를 보이는 반면 비저항값은 수천 ohm-m 값을 갖아 경향성을 벗어나고 있다. 그래프 (b)는 일정구간 RMR의 평균을 계산하여 전기비저항값과의 상관도를 고찰하기 위하여 나타낸 그래프다. RMR 평균은 터널진행 방향에 20m 구간으로 나누어서 구

하였고, 구간 구간 사이에 10m 중첩을 하였다. 그래프 (a)의 B 구간이 상당부분 축소되어 나타나고 있다. 전기비저항과 RCR의 분포를 나타낸 그래프 (c)도 B지역의 40점 내외의 낮은 RMR과 3000 Ω m 내외의 상대적인 고전기비저항 값을 나타내고 있다. 이는 지역적으로 보면 터널 굴착시 공동이 존재하는 구간으로서 Sta. 6+056 ~ 6+075 구간이다. 여기서 유의할 점은 공동이 존재하는 구간이 고비저항대로 나타나고 있는 점인데, 막장 매핑도를 참고로 하면 공동은 충전된 점토가 건조된 상태로 존재하기 때문에 비저항 값이 높게 나타난 것으로 판단되며, 이 지점의 지형을 관찰하면, 산 정상부분 능선 사이의 대체적으로 완만한 계곡 부에 해당되며, 주변부에 단층이 발달된 것으로 나타나고 있다.

Fig. 1의 그래프 (a)와 (c)를 비교하면 전반적으로 동일한 양상을 나타내고 있다. 그래프 (d)는 전기비저항값과 N의 상관성을 나타내며, 그래프 (e)는 전기비저항값과, Q와의 상관성을 나타내고 있다. 2차원 전기비저항탐사 결과와 RMR을 비롯한 다양한 종류의 암반분류값들과의 상관성을 정량적으로 평가하기 위해 건조한 점토로 충전된 공동의 이상치를 제거한 후 상관성분석을 수행하였으며, 분석결과는 Table 1과 같다.

Fig. 2의 (a)는 터널 구간별 순수 RMR 값과 전기비저항의 상관성을 나타낸 그래프로써 D지역은 RMR 값의 변화가 매우 심한데 이는 지역적으로 절리가 발달하고 지하수의 용출이 관찰되는 지역이 교차되고 있다. 그러나 전기비저항 값은 상대적으로 안정적으로 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 2의 (b)그래프는 터널 구간별 전기비저항 값과 RMR 평균값의 경향성을 비교하기 위해 나타낸 것으로 B지역은 Fig. 1 (a)의 B 지역과 동일 지점으로 경향성이 반대로 나타나고 있다. C 지역은 급격히 RMR이 낮아지고 있는데 이는 국부적으로 파쇄대가 발달되어 있고, 누수가 발생하는 지역으로 나타나고 있다. Fig. 2의 (c)는 터널 구간별 전기비저항 값과 RCR의 경향성을 비교하기 위해 나타냈으며, (d) 그래프는 RMR을 점수별로 5등급으로 구분한 암반등급으로 나타낸 것으로써 대체적으로 2등급과 3등급으로 시공이 이루어 졌음을 알 수 있고, 공동이 노출된 Sta. 6+050 주변과, 국부적인 파쇄대가 발달한 Sta. 6+200 주변은 4등급으로 시공이 이루어 졌다. 암반분류와 전기비저항의 상관성을 볼 때, 건조된 점토가 충전된 공동이 존재하는 지점과 국부적인 파쇄대를 제외한 전 구간에서 상관성이 비교적 잘 일치하고 있다.

Table 1. Results of correlation analysis between rock mass classification values and specific resistivity.

	Correlation coefficients			
	RMR	RCR	N	Q
Res.	0.772	0.712	0.711	0.711
Log(Res)	0.764	0.711	0.658	0.658

3-2. 3차원 전기비저항탐사 결과 검토

3차원 전기비저항 탐사는 상행선 굴착시, Sta. 6+056~6+076 부근 터널 천정부에서 공동이 발견되어 터널의 안전한 시공을 위하여 정밀 탐사가 필요하게 되어 실시하였다. Fig. 3의 (a) 그래프를 보면 전기비저항과 RMR의 상관성이 일정한 경향성을 나타내고 있다. 회귀분석으로부터 정량적인 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$Y = 12.2017 \times \ln(x) - 47.3288$$

그래프 (b)를 보아도 전기비저항의 분포 곡선 패턴과 RMR의 분포 곡선 패턴이 매우 높은 상관도를 보임을 알 수 있다. 그림 (c),(d),(e)는 RMR 자료를 바탕으로 한 각각 RCR 및 N, Q 등과의 상관성을 보여주고 있다.

동일 구간에서 수행한 2차원탐사의 상관도가 비교적 낮게 나타나는 구간이 존재하는데, 이는 탐사측선 외곽 근처에 구조선이 존재하는 등 2차원탐사의 전제조건을 크게 벗어나는 지질을 지니고 있기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 1). 따라서 복잡한 지형을 가지는 탐사현장의 경우, 3차원효과를 고려할 수 있는 3차원 전기비저항 탐사가 2차원 탐사로는 파악하기 힘든 이상대를 매우 정확하게 탐사 할 수 있음을 보여 주고 있다.

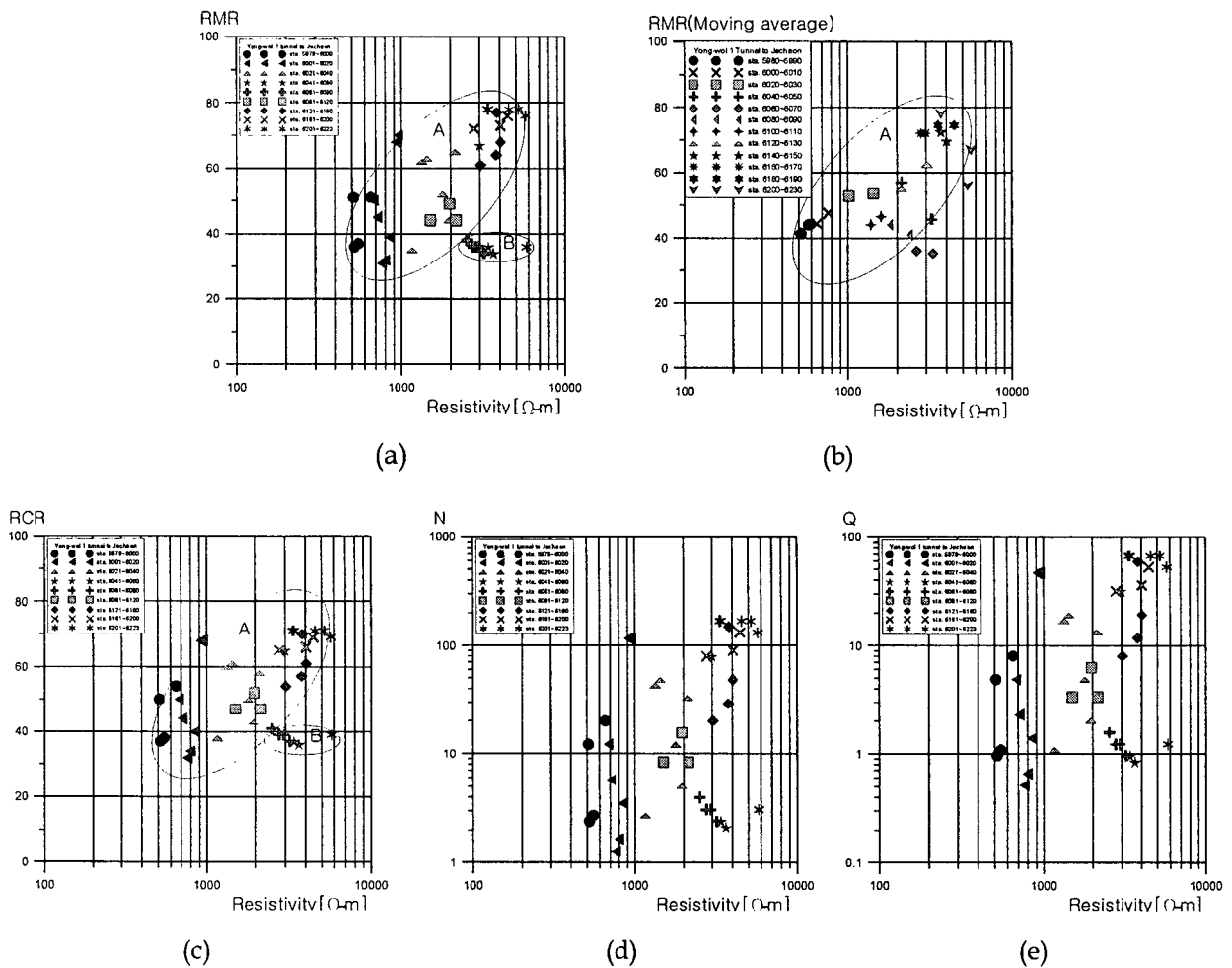


Fig. 1. Relationship between resistivity and rock-mass classification at Yong-Wol 1 Tunnel to Jecheon : (a) RMR, (b) RMR(moving average), (c) RCR, (d) N and (e) Q.

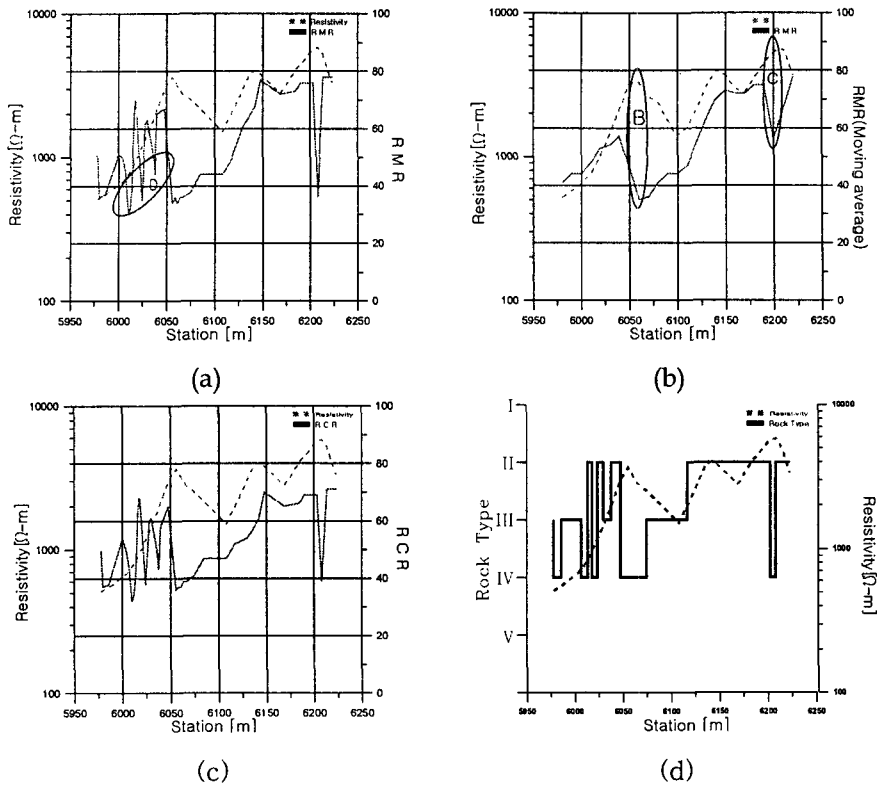


Fig. 2. Distribution of resistivity and rock-mass classification according to station at Yong-Wol 1 Tunnel to Jecheon : (a) RMR, (b) RMR(moving averaged), (c) RCR and (d) rock type

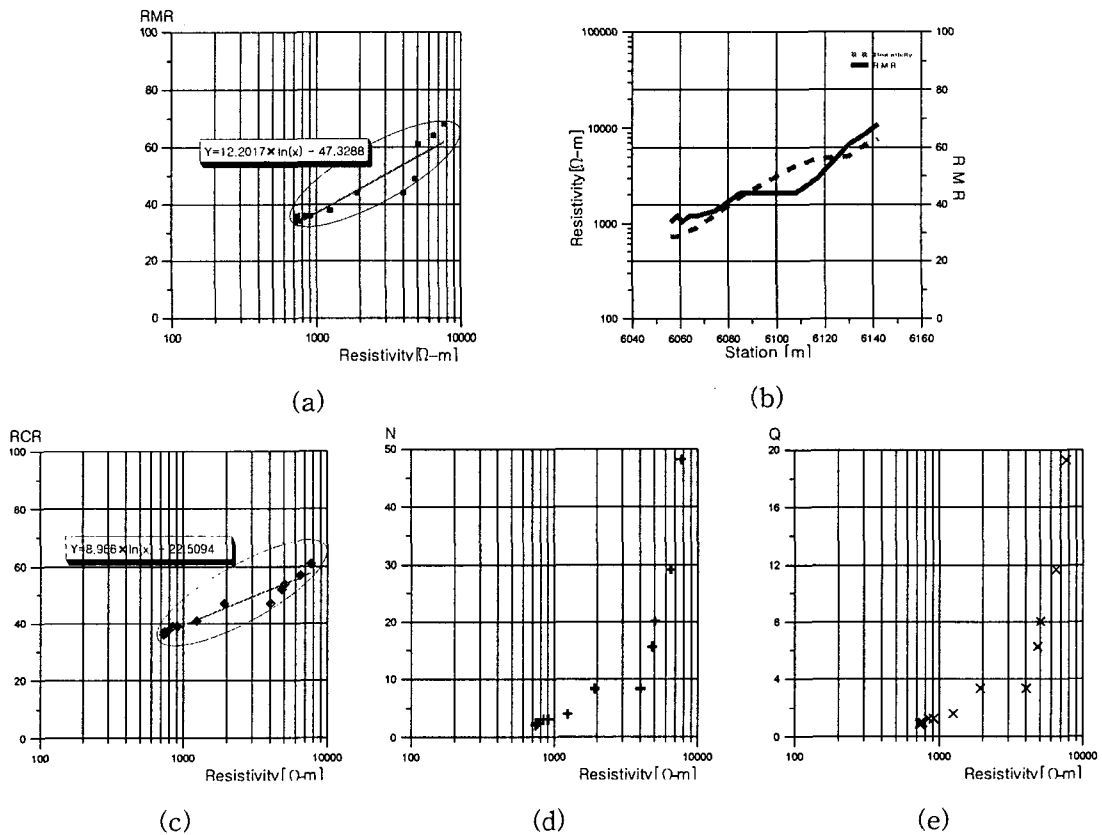


Fig. 3. Relationship between resistivity and rock-mass classification at Yong-Wol 1 Tunnel by 3D resistivity survey : (a) RMR, (b) RMR, according to station, (c) RCR, (d) N and (e) Q.

4. 결론

근래에 이르러 토목 건설 현장에서는 보다 합리적인 설계를 위하여 지구물리탐사의 활용이 증대되고 있다. 특히 전기비저항탐사는 터널현장에 가장 적용성이 높을 것으로 판단되는 탐사법이다. 그러나 아직까지 탐사결과를 설계 단계에서만 주로 사용할 뿐, 전기비저항탐사결과를 기반으로한 예측된 암반분류가 시공 과정에서 어느 정도 정확하게 일치하는지, 정확하게 일치하지 않았다면 원인은 무엇인지에 대한 연구는 아직 발표된 바 없다. 본 연구에서는 시공전 수행한 전기비저항탐사와 시공과정에서 막장관찰에 의해 확인된 실제 암반상태를 비교함으로써 현재 활용되고 있는 전기비저항탐사에 의한 암반분류의 정확성을 고찰해보고자 하였다.

시공시 얻은 RMR 자료를 바탕으로 하여 RCR, N, Q 값들을 차례로 작성하여 각각을 전기비저항탐사결과와 비교하였다. 또한 터널 구간별 전기비저항값과 암반분류값들의 분포 특성에 대하여도 고찰하여 보았다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 통상적으로 가장 많이 수행되는 2차원 전기비저항과 RMR과의 상관 그래프는 일반적으로 높은 상관도를 찾기가 힘들었으나, 터널 굴진에 따른 전기비저항과 RMR의 경향성은 많은 구간에서 비교적 높은 상관도를 나타내었다. 따라서 정성적인 암질의 변화예측 목적으로는 만족스럽게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 2차원전기비저항탐사시 일부 구간에서 상관관계가 낮은 원인으로서는 무엇보다도 실제 지질조건은 3차원인데 일반탐사는 2차원적인 지질조건을 가정하여 해석되기 때문이라 판단된다. 많은 구간에서 정성적으로 상관관계가 높게 나타나는 이유 역시 터널은 산맥(2차원 구조에 가까움)에 수직되게 굴착하는 경우가 많아 2차원 가정에 어느 정도는 들어맞기도 하기 때문이라고 판단된다.
- 3) 터널 굴진에 따른 전기비저항과 RMR의 분포 경향성이 일치하지 않는 지역의 특성을 막장 매핑 자료로 알아보면, 국부적인 파쇄대나, 약한 용수 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 오류의 원인은 앞서 언급한 2차원탐사의 한계임과 동시에 탐사법 자체가 지하지질에 대한 분해능에 한계가 있기 때문이다.
- 4) RMR을 기반으로 전기비저항과 보다 밀접한 요소만으로 구성된 RCR, Q, N을 계산하였으며 이들 값과 전기비저항사이의 상관성을 구하여 보았으나 상관도가 높게 나타나지는 않았다. 반면, RCR의 분포가 보다 밀집된 형태로 나타나는데 이는 RMR에서 터널굴착방향에 대한 불연속면의 방향의 보정인자가 제거되었기 때문으로 해석된다.
- 5) 3차원 전기비저항 탐사는 전기비저항과 RMR의 상관성이 확연하게 높게 나타나고 있다. 이는 3차원 전기비저항 탐사가 복잡한 지형 및 지질을 가지는 지역에서 2차원 전기비저항으로는 근사화될 수 없는 현실 지질조건을 충실히 고려하여 보다 정확한 자료를 제시해 주고 있기 때문이다.

시공전 설계단계에서 수행한 지표물리탐사인 전기비저항탐사, 그것도 지하지층을 2차원으로 가정하여 수행된 탐사결과로 지하상태를 정확히 파악한다는 것은 무리이다. 그러나 정성적으로는 상당한 구간에서 비교적 높은 상관도를 보이고 있음을 부정할 수 없다. 더구나 3차원 전기비저항탐사는 시공시 막장관찰에서 확인된 암반분류와 매우 높은 상관도를 나타내고 있으므로, 정확한 예측이 필요한 구간에 수행되면 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 권형석, 2001, 전기비저항과 암반등급의 상관관계에 대한 고찰, 한국지반공학회 2001 봄 학술발표회 논문집 pp.81~88
- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환(2001), "2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열비에 관한 연구", 물리탐사, 제4권, 제3호, pp.59~69.
- Bieniawski, Z. T.(1973). Engineering Classification of Joint Rock masses, The Civil Engineering in South Africa, 15, pp. 335-334
- Goel, R. K., Jethwa, J. L. and Paithankar, A.G. (1996). Correlation Between Barton's Q and Bieniawski's RMR - A New Approach, Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., pergamon, Vol. 33, No. 2, pp. 179-181
- Barton, N. (1993). Application of Q-system and Index Tests to Estimate Shear Strength and Deformability of Rock Masses, Workshop on Norwegian Method of Tunnelling, New Delhi, India, pp.66-84