

전기비저항을 이용한 확률론적 암반분류 - RMR과 전기비저항 관계 이론 중심으로 -

류희환¹ · 주건욱² · 조계춘^{3*} · 김경열⁴ · 임영덕⁵

¹정회원, 한전전력연구원 파워시스템연구소 선임연구원

²비회원, KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정

³정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수

⁴정회원, 한전전력연구원 파워시스템연구소 책임연구원

⁵정회원, 한국전력공사 개발사업본부 송변전개발처 처장

Probabilistic rock mass classification using electrical resistivity

- Theoretical approach of relationship between RMR and electrical resistivity -

Hee-Hwan Ryu¹, Gun-Wook Joo², Gye-Chun Cho^{3*}, Kyoung-Yul Kim⁴, Young-Duck Lim⁵

¹Power System Laboratory, KEPCO Research Institute, Senior Researcher

²Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Master Student

³Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Professor

⁴Power System Laboratory, KEPCO Research Institute, Principal Researcher

⁵Transmission Project Department, Project Development Division, KEPCO, Vice President

ABSTRACT: It is very important to understand the condition of the surround rock for the successful construction of underground space. Representative methods of estimating the rock mass condition are RMR method and Q-system, and they are applied on design, construction, and maintenance. However, many problems with the accuracy of the measurement method and the subjective viewpoint are questioned continuously, so many researchers have been studied for estimating rock condition from various methods. Most of them show only the local relation and a tendency between site investigation data and rock conditions. In this paper, the relationship between RMR method and electrical resistivity is deduced using the analytical equation derived theoretically from electric field analysis on jointed rock mass. And also, probabilistic relationship between RMR method and electrical resistivity is deduced for the increase of accuracy. If a suggested method is applied with the conventional method for estimating the rock condition, it will be helpful to estimate RMR values on the field.

Keywords: RMR, Electrical resistivity, Probabilistic rock mass classification

요 지: 성공적인 지하공간 건설을 위해서는 주변 암반의 상태를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 암반의 상태를 평가하는 방법 중에 대표적인 방법으로는 RMR 방법과 Q-system이 있으며, 설계, 시공, 유지관리 등에 적용되고 있다. 하지만 주관적인 시각과 측정 방법의 정확성 문제에 지속적으로 의문이 제기되어 많은 연구자들이 여러 방법을 통해 암반을 평가하고자 연구를 수행하고 있으나, 대부분의 방법이 국한적으로 지반조사 결과와 암반상태를 상관 맺거나 경향성만 보여주고 있다. 본 논문에서는 절리가 존재하는 암반에서 이론적으로 전기장 해석을 하여 유도된 이론식으로 부터 RMR과 전기비저항의 관계를 도출하였다. 또한, 확률론적 접근을 통해, 보다 신뢰성 있는 RMR과 전기비저항 관계를 획득하였다. 기존에 사용되고 있는 방법과 더불어 제시된 방법을 현장에 적용한다면, 현장에서 RMR을 평가하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: RMR, 전기비저항, 확률론적 암반분류

*Corresponding author: Gye-Chun Cho

E-mail: gyechun@kaist.edu

Received March 4, 2013; Revised March 11, 2013;

Accepted March 15, 2013

1. 서론

암반이 많이 분포된 지역에서 공사(예, 터널공사, 시추, CO₂저장 등)를 수행할 경우, 암반의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 공사이전 수행되는 사전 조사를 통해서 얻은 암반의 특성은 매우 거시적이고 공사에 영향을 줄 수 있는 암반의 특성을 파악하는데 한계가 있다. 사전 조사를 통해서 얻은 암반의 특성과는 다른 암반이 출현할 경우, 기존의 방법과 달리 예기치 못하게 새로운 방법으로 암반을 굴착하거나 보강을 수행해야 하기 때문에 불가피한 공사 지연으로 경제적 손해를 입는 경우가 많다.

암반은 흙과 다르게 신선암과 불연속면으로 구성되어 있으며, 신선암의 강도, 두께 등 신선암의 특징과 불연속면의 두께, 불연속면을 채운 물질, 풍화 정도 등 불연속면의 특징이 매우 다양하여 암반을 평가하는 작업이 매우 어렵다(Guéguen and Palciauskas, 1994). 따라서, 보다 정확하게 암반을 평가하기 위해서 많은 연구자들이 연구를 수행하고 있다(Barton et al., 1974; Bieniawski, 1973; Hoek et al., 1998; Palmstrom, 1996). 그 중에서 암반을 평가하는 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 것은 Barton이 제시한 Q-system(Barton et al., 1974)과 Bieniawski가 제시한 RMR 분류법(Bieniawski, 1973)이다. 하지만 위 방법은 간단한 장비와 전문가의 주관적인 시각으로 암반을 평가하기 때문에, 간혹 같은 암반에 다른 결과를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 암반과 불연속면의 전기전도도가 상대적으로 큰 차이가 있음을 이용하여 전기비저항을 이용한 암반의 상태를 파악하고자 한다. 전류는 상대적으로 전기비저항이 작은 지역으로 많이 흐르며 이로 인하여 암반 표면에서 측정되는 전기저항값은 이러한 정보를 포함하게 된다. 일반적으로 신선암보다는, 절리면에 채워진 물질에 의해, 절리면의 전기전도도가 크다. 시간이 진행되면서 암반은 햇빛, 물, 식물, 동결융해와 같은 물리적 풍화, 화학적 풍화로 인해

균열(fracture)이 발생하고 불연속면이 생성된다. 더욱 풍화가 진행되면 절리면의 간격이 좁아지게 되고 더 많은 불연속면이 만들어지게 된다. 따라서 암반이 풍화가 진전될수록 전기전도도의 값은 증가한다(Price, 1995; Cragg and Ingman, 1995; Dearman et al., 1978).

이와 같은 사실은 전기비저항이 신선암 및 불연속면의 특징에 깊은 관계가 있음을 말해주며, 동일한 관련 항목으로 구성된 RMR분류법과 서로 연관성이 있음을 시사한다. 전기비저항과 암반분류 관계에 대해 기존에 수행된 연구는 영상처리(Linek et al., 2007)를 이용하거나, 현장에서 수행한 전기비저항검층 자료와 암반분류와 비교(Choi et al., 2003; Kwon et al., 2008; Lee et al., 2012), 지시크리깅 이용(Lee et al., 2009), 그라우팅 주입량 이용(You et al., 2012), 등이 있다. 하지만 대부분의 연구에서 제안되는 전기비저항과 암반분류 관계는 범용적인 관계가 아닌, 현장 자료를 근거로 한 특정 현장에 제한적으로 도출되는 관계이다. 따라서, 본 논문은 범용적 적용을 위해 전기비저항과 RMR 분류법 관계를 이론적으로 정립하고 확률론적인 개념을 도입하여 신뢰성을 높이고자 하였다.

2. 암반에서 전기장 해석

RMR 암반분류에 속하는 평가항목들과 전기비저항과의 이론적 관계를 도출하기 위해서, 절리암반에서 생성되는 전기장을 이론적으로 해석하고자 한다(Ryu et al., 2008).

2.1 신선암에서 전기장 해석

전류는 전기밀도도의 합이며, 전류밀도는 전기장과 전기전도도의 곱으로 표현된다(Reitz et al., 1993).

$$I = -\oint_S \vec{J} \cdot \vec{n} da = -\oint_S \sigma \vec{E} \cdot \vec{n} da \quad (1)$$

여기서, da 는 표면 S 의 임의의 면적요소, \vec{j} 는 벡터로 표시된 전류밀도, \vec{E} 는 벡터로 표시된 전기장, \mathbf{n} 은 da (infinitesimal area)에 수직인 단위벡터이다.

신선암에 대한 전기장 해석은 균질하고 이방성이 없는 반무한체 이상매질을 고려하여 해석할 수 있다. Fig. 1과 같이 두 전극(한 전극(P)은 전류가 나가는 송신 센서인 반면, 다른 전극(Q)은 전류를 받아들이는 수신 센서)이 반무한 이상매질의 표면에 위치하고 있을 때, 두 전하에 의해 영향 받는 임의의 점에서의 전기장은 식 (2) 및 식 (3)과 같이 쿨롱의 법칙에 의해 표현된다.

$$\vec{E}_{+q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{ir}} \cdot \frac{Q_e}{x_{ir}^2 + z_b^2} \cdot \vec{i} \quad (2)$$

$$\vec{E}_{-q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{ir}} \cdot \frac{Q_e}{(L - x_{ir})^2 + z_b^2} \cdot \vec{i} \quad (3)$$

여기서, \vec{E}_{+q} 는 전하 $+q$ 를 가진 P 전극에 의해 형성된 전기장, \vec{E}_{-q} 는 전하 $-q$ 를 가진 Q 전극에 의해 형성된 전기장, ϵ_{ir} 은 신선암의 유전율, Q_e 는 P 전극과 Q 전극의 전하량, L 은 두 전극 사이의 거리, x_{ir} 는 전극 P 로부터 임의의 점(b)을 두 전극을 지나는 직선에 정사투영하

여 만나는 점까지의 거리, z_b 는 임의의 점(b)으로부터 두 전극을 지나는 직선에 정사투영한 점까지의 거리, \vec{i} 는 x 축 방향의 단위벡터이다. 전극 표면에서의 전압 (V_s)은 두 전극 사이의 전압(V)의 절반과 동일하다.

$$V_s = \frac{1}{4\pi\epsilon_{ir}} \frac{Q_e}{a} = \frac{V}{2} \quad (4)$$

여기서, a 는 전극의 반지름이다. 식 (2), 식 (3), 식 (4)를 식 (1)에 대입한 후 구면 좌표계를 사용하여 정리하면, 신선암 안에서 흐르는 전류(I_{ir})는 식 (5)와 같다.

$$I_{ir} = \int \sigma_{ir} \vec{E}_{ir} \cdot \mathbf{n} da = \int_0^\infty \frac{\vec{E}_{+q} + \vec{E}_{-q}}{\rho_{ir}} \cdot \pi z dz = \frac{Q_e}{2\epsilon_{ir}\rho_{ir}} = \frac{\pi aV}{\rho_{ir}} \quad (5)$$

여기서, σ_{ir} 는 신선암의 전기전도도, $\rho_{ir}(=1/\sigma_{ir})$ 는 신선암의 전기비저항, \vec{E}_{ir} 는 신선암 내부의 임의의 점 (b)에서의 전기장이다. 따라서 식 (5)를 정리하면, 신선암의 전기비저항은 식 (6)과 같이 신선암의 전기저항으로 표현할 수 있다.

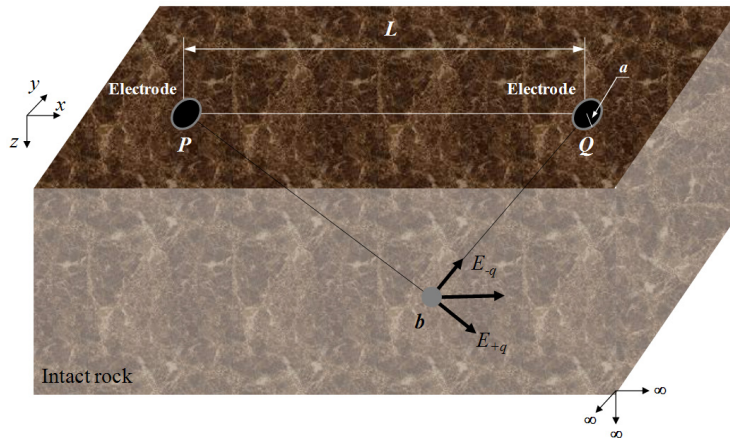


Fig. 1. Geometric parameters on intact rock for the electric field analysis

$$\rho_{ir} = R_{ir} \cdot \pi \cdot a \quad (6)$$

여기서, R_{ir} 은 두 전극으로부터 측정된 전기저항값이다.

2.2 절리암반에서 전기장 해석

신선암과 절리면으로 구성되고, 불연속면이 3 방향으로 서로 수직하며, 두 전극이 표면에 위치한 반무한 절리암반을 고려하자(Fig. 2). P 전극의 중심을 기준점으로, 두 전극을 점 전하로 가정하였을 때, 평면 MN 을 포함하는 반무한 y - z 평면(두 전극 사이 거리의 중심을 포함한 평면)의 임의의 점($U(x_u, y_u, z_u)$)에서, 절리면의

전기장(\bar{E}_j)와 신선암에서의 전기장(\bar{E}_{ir})은 각각 쿨롱과 가우스 법칙을 사용하여 표현될 수 있다(Fig. 3).

$$\begin{aligned} \bar{E}_{j \text{ or } ir} &= \frac{Q_e}{4\pi\epsilon_{j \text{ or } ir}} \frac{L/2}{\left[(L/2)^2 + y_U^2 + z_U^2 \right]^{3/2}} + \\ &+ \frac{Q_e}{4\pi\epsilon_{j \text{ or } ir}} \frac{L/2}{\left[(L/2)^2 + y_U^2 + z_U^2 \right]^{3/2}} \quad (7) \\ &= \frac{Q_e}{2\pi\epsilon_{j \text{ or } ir}} \frac{L/2}{\left[(L/2)^2 + y_U^2 + z_U^2 \right]^{3/2}} \end{aligned}$$

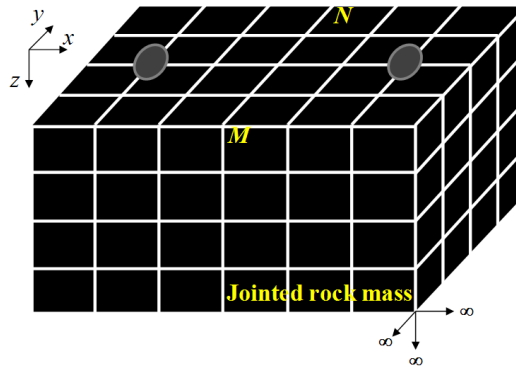


Fig. 2. Jointed rock mass with discontinuities and intact rock

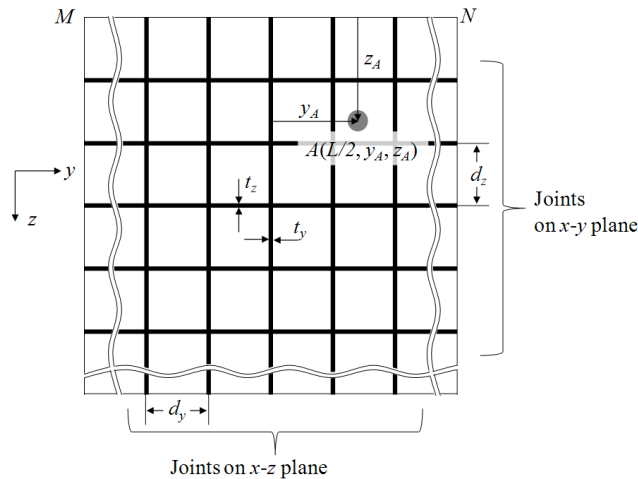


Fig. 3. MN plane on jointed rock mass (Fig. 2)

여기서, ε_j 는 절리면의 유전율이다. 평면 MN 을 포함하는 반무한 y - z 평면에서 수직 방향(x 방향)으로 흐르는 전류 I_{rm} 은 x - z 평면 위의 절리면을 통해 흐르는 전류($I_{j,xz}$), x - y 평면 위의 절리면을 통해 흐르는 전류($I_{j,xy}$)와 신선암을 통해 흐르는 전류(I_{ir})의 합으로 구성된다(여기서, $d \gg t$ 인 경우를 고려할 때, $I_{j,xz}$ 가 흐르는 평면과 $I_{j,xy}$ 가 흐르는 평면이 겹치는 부분은 상대적으로 미비하여 무시할 수 있다).

$$I_{rm} = I_{j,xz} + I_{j,xy} + I_{ir} \quad (8)$$

여기서, $I_{j,xz}$, $I_{j,xy}$ 와 I_{ir} 은 식 (1)을 이용하여 면적 적분을 통해 식 (9)와 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} I_{j,xy} &= \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{k(d_y+t_y)-t_y/2}^{k(d_y+t_y)+t_y/2} \sigma_j E_j \, dydz = \frac{\sigma_j Q_e}{2\pi\varepsilon_j} f_1 \\ I_{j,xz} &= \frac{1}{2} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \int_{p(d_z+t_z)-t_z/2}^{p(d_z+t_z)+t_z/2} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_j E_j \, dydz = \frac{\sigma_j Q_e}{2\pi\varepsilon_j} f_2 \\ I_{ir} &= \frac{1}{2} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{p(d_z+t_z)+t_z/2}^{p(d_z+t_z)+t_z/2+d_z} \int_{k(d_y+t_y)+t_y/2}^{k(d_y+t_y)+t_y/2+d_y} \sigma_{ir} E_{ir} \, dydz \\ &= \frac{\sigma_{ir} Q_e L}{8\pi\varepsilon_{ir}} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{p(d_z+t_z)+t_z/2}^{p(d_z+t_z)+t_z/2+d_z} \frac{g(z)_1 - g(z)_2}{(L/2)^2 + z_U^2} dz \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, d_x 는 y 방향의 신선암의 두께, d_z 는 z 방향의 신선암의 두께, t_x 는 x 방향의 절리면의 두께이다. $f_1, f_2, g(z)_1, g(z)_2$ 는 식 (10), 식 (11), 식 (12)와 같다.

$$f_1 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(\tan^{-1} \left(\frac{2k(d_y+t_y)+t_y}{L} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2k(d_y+t_y)-t_y}{L} \right) \right) \quad (10)$$

$$f_2 = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \left(\tan^{-1} \left(\frac{2p(d_z+t_z)+t_z}{L} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2p(d_z+t_z)-t_z}{L} \right) \right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} g(z)_1 &= \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{k(d_y+t_y)+d_y+t_y/2}{\sqrt{(L/2)^2 + z_U^2}} \right) \right) \\ g(z)_2 &= \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{k(d_y+t_y)+t_y/2}{\sqrt{(L/2)^2 + z_U^2}} \right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (7)과 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 간단히 정리하면 절리암반에서의 전기저항(R_m)식은 식 (13)과 같이 획득할 수 있다.

$$R_m = \frac{1}{a \left(\sigma_j (f_1 + f_2) + \frac{\sigma_{ir} L}{4} f_3 \right)} \quad (13)$$

여기서, f_3 는 식 (14)와 같다.

$$f_3 = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{p(d_z+t_z)+t_z/2}^{p(d_z+t_z)+t_z/2+d_z} \frac{g(z)_1 - g(z)_2}{(L/2)^2 + z_U^2} dz \quad (14)$$

식 (6)을 이용하면 절리암반에서의 전기비저항(ρ_{rm})식은 식 (15)와 같이 획득할 수 있다.

$$\rho_{rm} = \frac{\pi}{\sigma_j (f_1 + f_2) + \frac{\sigma_{ir} L}{4} f_3} \quad (15)$$

3. RMR과 전기비저항

Bieniawski가 제시한 RMR 분류법(Bieniawski, 1973)은 식 (16)과 같다.

$$RMR_{value} = UCS + RQD + SoD + CoD + GWC + OoD_{RF} \quad (16)$$

여기서, RMR_{value} 는 RMR 값, UCS 는 일축압축강도 (uniaxial compressive strength), SoD 는 불연속면의 간격(spacing of discontinuities), CoD 는 불연속면의 상태(condition of discontinuities), GWC 는 지하수의 조건(ground water condition), OoD_{RF} 는 불연속면 방향에 따른 감소효과(reduction factor for the orientation of discontinuities)이다. RMR 값(0~100)은 5개의 등급으로 나뉘며 각 등급마다 특징 및 보강 대책 등 다양한 적용 방법을 제시하고 있다. 보편적인 RMR 값과 전기비저항과 관계를 구하기 위해서 본 논문에서는 RMR의 6개 요인 중 암석 강도, RQD , 불연속면 사이의 거리와 조건, 불연속면 상태를 전기비저항과 상관관계를 맺으며, 지하수의 조건(wet 상태, $GWC = 7$)과 불연속면 방향에 따른 감소효과(very favorable 상태, $OoD_{RF} = 0$)는 가정하였다. 이와 관련하여 주로 사용된 식은 절리암반에서 전기장 해석을 통해 도출된 전기비저항식(식 (15))이다. 각 RMR의 변수와 전기비저항과의 상관성을 도출하기 위해서 표준이 되는 기준값을 산정하였다. 기준값을 도출하기 위해 식 (15)에 적용된 기본상수값은 Table 1과 같으며, 계산된 기준값은 909.689 Ωm 이다. 기본상수값은 임의로 정해진 값이며 현장 상황에 따라서 변하는 값이다.

3.1 일축압축강도와 전기비저항

암석의 일축압축강도는 암석의 결정구조에 의해

좌우된다. 결정구조가 동일한 암석의 경우 암석의 공극률에 따라 일축압축강도의 차이가 생긴다(Carmichael, 1989). 암석의 공극률 변화요인으로는 풍화에 의한 공극의 감소와 응력의 변화에 따른 공극의 변화가 대부분을 차지하며 풍화에 의한 공극의 변화가 응력의 변화에 따른 공극의 변화보다 영향력이 크다. 풍화가 진행이 많이 될수록 공극은 커지게 된다(Turgrul, 2004). 따라서 일축압축강도와 암석의 공극률은 암석에 따라서 일정한 관계를 가지고(Dearman et al., 1978), 암석의 공극률은 전기비저항, 형상전기비저항인자(F , formation resistivity factor)와 일정한 관계를 가진다(Archie, 1942). 공극률과 전기비저항과의 관계를 수정된 Archie의 법칙을 이용하여 도출할 수 있다(Doveton, 1986).

$$\frac{\rho_{rm}}{\rho_j} = \frac{1}{Q^m} \quad (17)$$

여기서, Q 는 n (공극률)/10,000, m 은 암종에 따라 달라지는 값이다. 본 논문에서는 사암에서의 공극률과 전기비저항 관계를 맺고자 m 을 1.3 “비고결 사암”으로 두었다. 일축압축강도와 암석의 공극률의 관계는 Tugrul (2004)에 의해 표현할 수 있다. 일축압축강도와 전기비저항의 관계는 Table 2와 같이 표현 가능하다. Table 2에서 언급된 $RUSC$ 는 각 일축압축강도 분류값에 해당하는 전기비저항값을 기준값 909.689 Ωm 으로 나누어 정향화 시킨 값이다. UCS^{ref} 값은 기준값 909.689 Ωm 에 해당하는 일축압축강도 값 2.28이다. Fig. 5(a)는 일축압축강도와 전기비저항과의 관계를 그래프로 표현한 것이다. Fig. 5(a)에서 볼 수

Table 1. Basic conditions for a standard reference value

Parameters	Description	Values	Unit
L	The distance between two sensors	2	m
d	The size of blocks	0.1	m
t	The size of joints	0.003	m
S	The measuring line	10	m
ρ_j	The electrical resistivity of joints	50	Ωm
ρ_{ir}	The electrical resistivity of intact rocks	10,000	Ωm

있듯이, 일축압축강도가 클수록 계산되는 전기비저항 값은 커짐을 알 수 있다.

3.2 RQD와 전기비저항

RQD 지수는 암반 시추 후 남은 암석부분이 10 cm 이상만을 고려하여 백분율로 계산된 값이다(Deere et al., 1966). Fig. 4에서 A부분은 신선암이며, B부분은 시추한 후 끊긴 부분이다. 따라서 전류는 A지역보

다 B지역으로 더 많이 흐른다. 이러한 사실과 절리와 신선암이 병렬로 연결되어 있다는 가정을 이용하면 RQD와 전기비저항의 관계식은 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{rm} = \frac{100}{\frac{100 - RQD}{\rho_j} + \frac{RQD}{\rho_r}} \quad (18)$$

식 (18)과 Table 1의 기본 상수값을 이용하여 RQD

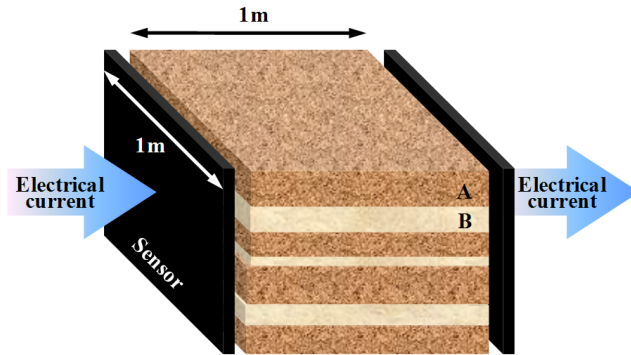


Fig. 4. Flow of electrical current on the rock core with intact rocks and joints

Table 2. Relationship between the uniaxial compressive strength (UCS) and the electrical resistivity in sandstone

Conditions	Uniaxial compressive strength (MPa)	Representative values	Rating	UCS/UCS^{ref}	Electrical resistivity (Ωm)	R_{USC}
Exceptionally strong	>250	300	15	6.590	7520	8.266
Very strong	100~250	175	12	5.272	4592	5.048
Strong	50~100	75	7	3.075	2250	2.474
Middle	25~50	37.5	4	1.757	1372	1.508
Weak	5~25	15	2	0.879	845	0.929
Very weak	1~5	3	1	0.439	564	0.620
Extremely weak	<1	0.5	0	0.000	505	0.556

Table 3. Relationship between RQD and electrical resistivity

RQD	Representative values	Rating	RQD/RQD^{ref}	Electrical resistivity (Ωm)	$RRQD$
< 25	12.5	3	0.150	57.102	0.063
25 ~ 50	37.5	8	0.400	79.761	0.088
50 ~ 75	62.5	13	0.650	132.231	0.145
75 ~ 90	82.5	17	0.851	279.135	0.307
90 ~ 100	95	20	1.001	913.242	1.004

지수를 전기비저항 값들로 표현하였다(Table 3). Table 3에서 언급되는 $RRQD$ 는 각 RQD 값에 해당하는 전기비저항값을 기준값 $909.689\Omega\text{m}$ 로 나누어 정량화 시킨 값이다. RQD^{ref} 값은 기준값 $909.689\Omega\text{m}$ 에 해당하는 RQD 값 19.988이다. Fig. 5(b)는 RQD 와 전기비저항과의 관계를 그래프로 표현한 것이다. Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이, RQD 가 클수록 계산되는 전기비저항값은 커짐을 알 수 있다.

3.3 불연속면의 간격과 전기비저항

불연속면 사이의 거리(d)와 전기비저항과의 관계는 식 (15)의 변수 d 를 변화시키면서 도출할 수 있다 (Table 4). Table 4에서 언급되는 $RSoD$ 는 각 대표 불연속면 사이의 거리 값에 해당하는 전기비저항값을 불연속면 사이의 거리가 0.1 m일 때 계산된 기준값 $909.689\Omega\text{m}$ 으로 나누어 정량화 시킨 값이다. SoD^{ref} 값은 기준값 $909.689\Omega\text{m}$ 에 해당하는 SoD 값 7.376이다. Fig. 5(c)는 불연속면 사이의 거리와 전기비저항과

의 관계를 그래프로 표현한 것이다. Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이, $RSoD$ 가 클수록 즉, 불연속면 사이의 거리가 클수록 계산되는 전기비저항값은 커짐을 알 수 있다.

3.4 불연속면의 상태와 전기비저항

RMR 분류법에서 제시하는 절리면의 상태는 불연속면의 폭과 불연속면이 풍화되어 다른 물질로 변질되거나 불연속면에 다른 물질로 채워짐을 의미한다. 따라서 불연속면 상태에 따른 전기비저항과의 관계는 식 (15)에서 불연속면의 두께(t)와 불연속면의 전기전도도(σ_j)를 변화시키면서 도출할 수 있다(Table 5). 채움물질이 없을 경우에는 불연속면의 전기비저항을 높여 적용하였다. Table 5에서 언급되는 $RCoD$ 는 각 불연속면의 상태에 해당하는 전기비저항값을 불연속면 상태가 표준일 때 계산된 기준값 $909.689\Omega\text{m}$ 으로 나누어 정량화 시킨 값이다. CoD^{ref} 값은 기준값 $909.689\Omega\text{m}$ 에 해당하는 CoD 값 10이다. Fig. 5(d)는

Table 4. Relationship between the spacing of discontinuities (SoD) and the electrical resistivity

Spacing of discontinuities (m)	Average values	Values	SoD/SoD^{ref}	Electrical resistivity (Ωm)	$RSoD$
> 2	4	20	2.711	7969	8.760
0.6 ~ 2	1.3	15	2.034	5955	6.546
0.2 ~ 0.6	0.4	10	1.356	2892	3.179
0.06 ~ 0.2	0.13	8	1.085	1149	1.263
< 0.06	0.03	5	0.678	308	0.338

Table 5. Relationship between the condition of discontinuities (CoD) and the electrical resistivity

Conditions	Rating	t (m)	Electrical resistivity of joints (Ωm)	CoD/CoD^{ref}	Electrical resistivity (Ωm)	$RCoD$
Very rough, no separation	30	0.0001	75	3	9467	10.407
Slightly weathering, separation < 1mm	25	0.0005	75	2.5	5052	5.554
Highly wreathing, separation < 1mm	20	0.001	75	2	3200	3.518
Separation 3mm	10	0.003	50	1	910	1.000
Separation 5mm	5	0.005	50	0.5	573	0.630
Separation 10mm	0	0.01	50	0	307	0.337

불연속면 상태와 전기비저항과의 관계를 그래프로 표현한 것이다. Fig. 5(d)에서 볼 수 있듯이, $RCoD$ 가 클수록 즉, 불연속면의 상태가 좋을수록 계산되는 전기비저항값은 커짐을 알 수 있다.

3.5 RMR값과 전기비저항

앞서 구한 $RUSC$, $RRQD$, $RSoD$, $RCoD$ 을 이용하여 식 (16)을 변경하면 식 (19)와 같이 유도할 수 있다. 각 변수의 합으로 이루어진 RMR 식은 기준값 909.689

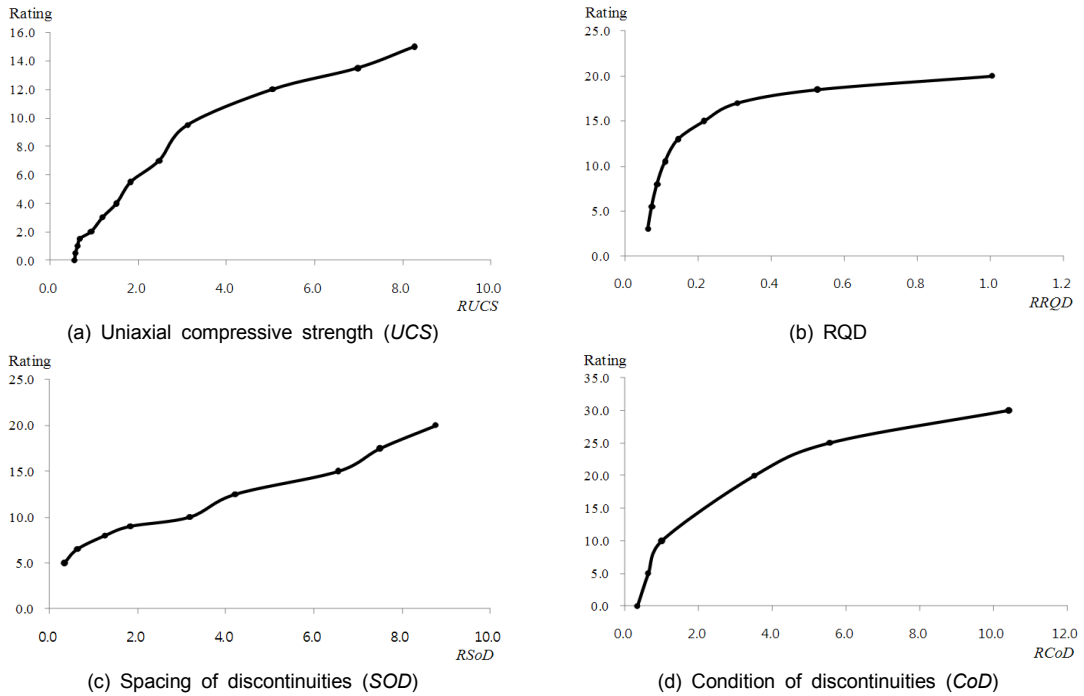


Fig. 5. Correlation between RMR parameters and electrical resistivity

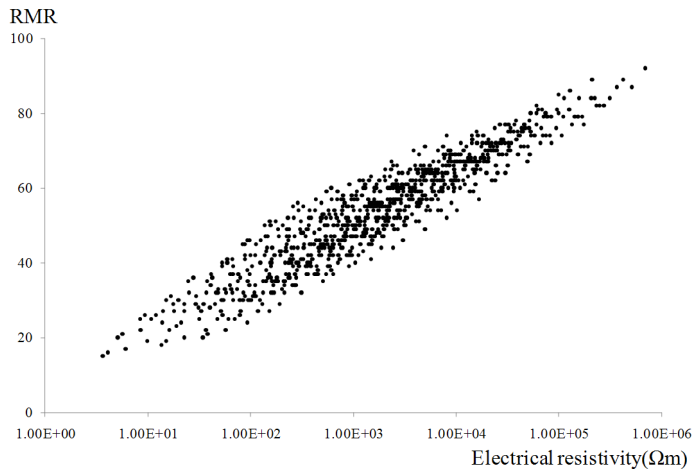


Fig. 6. Relationship between RMR value and electrical resistivity

Ω_m 으로 정규화시킴으로써 $RUSC$, $RRQD$, $RSoD$, $RCoD$ 의 곱으로 표현된다.

$$\rho_{rm}^{RMR} = W_{RMR} \times RUSC \cdot RRQD \cdot RSoD \cdot RCoD \cdot GWC(1) \quad (19)$$

여기서, W_{RMR} 는 기준값 909.689 Ω_m 이며, ρ_{rm}^{RMR} 는 암반의 상태에 따라 $RUSC$, $RRQD$, $RSoD$, $RCoD$ 이 정해져서, 기준값 909.689 Ω_m 의 배수에 따라 계산되는 전기비저항 값이다. 식 (19)를 이용하여 RMR 값과 전기비저항과의 관계를 Fig. 6과 같이 도출할 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, RMR 값이 증가함에 따라 계산되는 전기비저항값은 커짐을 알 수 있다.

각 RMR 변수와 전기비저항과의 관계, RMR 값과 전기비저항과의 관계는 Fig. 5 ~ Fig. 6, Table 2 ~ Table 5와 같이 항상 일정한 관계를 보여주는 것이 아니라, 위에서 언급하였듯이 신선암의 전기비저항 값, 불연속면의 전기비저항 값, 신선암의 두께 그리고 불연속면의 두께를 특정값(기본상수값 Table 1)으로 두었을 때의 관계이다. 실제 현장에서 전기비저항을 이용한 RMR 분류법을 적용할 시, 먼저 암반 표면의 여러 위치에 전극을 부착하여 전기비저항값을 측정 후 식 (15)를 이용하여 역해석을 통해 신선암의 전기비저항 값, 불연속면의 전기비저항 값, 신선암의 두께 그리고 불연속면의 두께를 예측한다(Table 1). 결정된 기본 상수값을 이용하여 Fig. 5 ~ Fig. 6, Table 2 ~ Table 5을 획득할 수 있으며 현장 상황이 고려된 각 RMR 변수와 전기비저항과의 관계, RMR 값과 전기비저항과의 관계를 도출할 수 있다.

4. 확률론적 암반분류

Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 하나의 전기비저항값에 해당하는 RMR 값이 큰 범위를 가짐을 알 수 있다(Fig. 6: 전기비저항: 1,000 $\Omega_m \rightarrow$ RMR 값: 38 ~ 62). 이는 하나의 전기비저항값에 여러 등급으로 판단되어

공사비용 및, 터널공사의 안정성에 큰 영향을 줄 수 있다(Fig. 7: 전기비저항: 1,000 $\Omega_m \rightarrow$ II (Good rock) ~ IV (Poor rock) 등급). 따라서, 분산된 데이터 범위를 줄이는 일환으로 실제 존재할 수 있는 경우만 고려하여 RMR 값과 전기비저항의 관계를 도출하고자 하였다. 앞서 수행한 RMR 값과 전기비저항과의 관계는 RMR 변수의 모든 분류값 경우를 서로 연관지어 도출한 것이다. 하지만 실제, RQD값이 100인 절리암반이 절리군수 값이 20 (crushed rock)이거나, 불연속면의 간격이 20 (the spacing of discontinuities > 2 m)인 경우는 매우 드물기 때문에 실제 존재할 수 있는 RMR 변수들 간의 관계를 규명해야 된다.

4.1 현장 data 분석

다양한 현장으로부터 RMR분류를 수행한 결과 자료를 획득하였다. 현장 정보는 다음과 같다.

- OO선 OO~OO간 제1공구 복선전철 건설공사 실시설계 지반조사
- OO 지방산업단지 진입도로 건설공사 대안설계 지반조사
- OO~OO 복선화 제5공구 노반건설공사 실시설계 지반조사
- OO선 OO~OO간 복선전철 민간투자 시설사업 지반조사
- OO시 지하철3호선 연장선(302공구) 지반조사
- OO고속철도 제14-3공구 노반시설 기타공사 대안설계 지반조사
- OO~OO리 제2공구 철도건설공사 지반조사
- OO선 복선전철공사 제3공구 지반조사
- OO~OO 복선전철 제6공구 건설공사 지반조사

Fig. 7은 현장에서 수행한 RMR 결과(4689개)를 토대로, 각 RMR 변수들 간 존재하는 경우의 수를 보여준다(그림에서 N 은 존재 수). Fig. 7(a)에서 볼

수 있듯이, 일축압축강도와 RQD 의 관계에서 일축압축강도 점수가 작으면 RQD 의 작은 점수에 많은 경우가 분포하고 있으며 일축압축강도 점수가 크면 RQD 의 큰 점수에 많은 경우가 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 일축압축강도와 불연속면 사이의 거리 관계에서 특별한 경향성은 볼 수 없다. Fig. 7(c)에서 볼 수 있듯이 일축압축강도와 불연속면의 상태 관계에서 일축압축강도 점수가 크면 불연속면의 상태의 큰 점수에 많은 경우가 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7(d)에서 볼 수 있듯이 RQD 와 불연속면 사이의 거리 관계에서 RQD 점수가 작으면 불연속면 사이의 거리의 작은 점수에 많은 경우가 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7(e)에서 볼 수 있듯이 RQD 와 불연속면의 상태 관계에서 특별한 경향성은 볼 수 없다. Fig. 7(f)에서 볼 수 있듯이 불연속면 사이의 거리와 불연속면의 상태 관계에서 특별한 경향성은 볼 수 없다.

4.2 전기비저항과 확률론적 암반분류

현장 데이터를 통해 실제 존재할 수 있는 RMR 변수 관계를 이용하여 RMR과 전기비저항의 관계를 도출하기에 앞서, 각 RMR 변수와 전기비저항 관계를 통계 프로그램(SPSS)을 이용하여 상관계수로 나타내었다(Table 6). Table 6에서 볼 수 있듯이 RMR과 전기비저항의 상관계수는 0.938(1에 가까울수록 상관관계가 있음)로 매우 높은 상관관계를 보여주며 이는 RMR이 전기비저항과 매우 밀접한 관계가 있음을 시사한다.

Fig 7에서 존재할 가능성이 적은 RMR 변수 관계를 제거하기 위해서 Table 7과 같이 3가지 경우의 기준을 두었다. 기준은 두 RMR 변수의 특정 분류값 사이 관계가 전체 개수(4689개)에 차지하는 비율(R_{at}), 특정 분류값 사이 관계가 한 RMR 변수에 차지하는 비율(R_{ap})을 조절하여 정하였다. Table 7의 기준을 통해

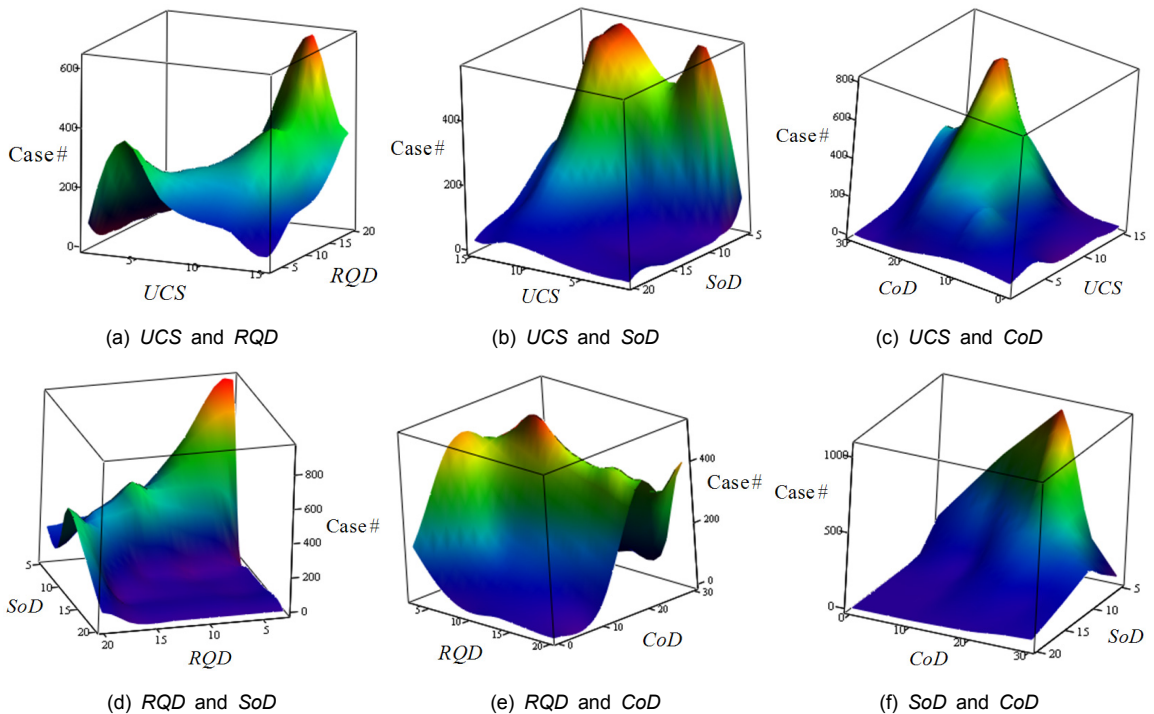


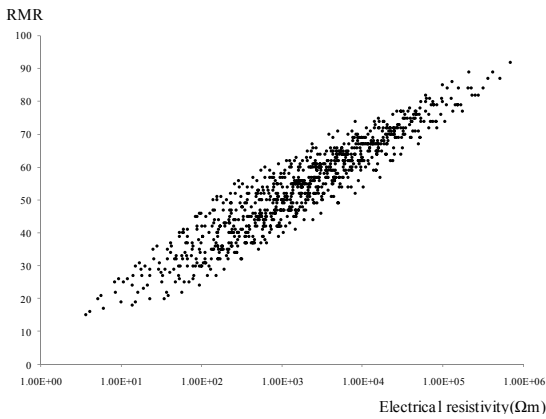
Fig. 7. Correlation between RMR parameters in field data

Table 6. Correlation relationship analysis at the relationship between RMR and electrical resistivity

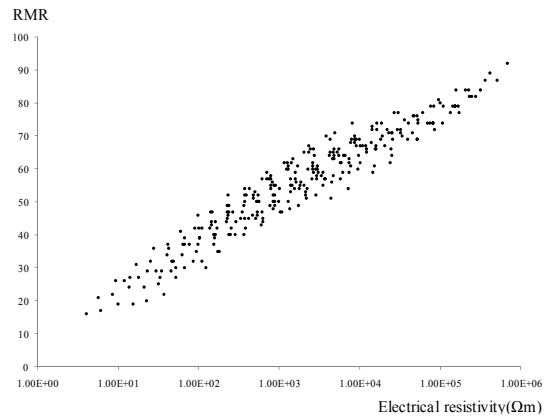
Relationship	Correlation coefficient	p-value
Uniaxial compression strength (<i>UCS</i>) & electrical resistivity	0.963	0.000 (significance level)
RQD & electrical resistivity	0.785	0.012 (significance level as 0.05)
Spacing of discontinuities (<i>SoD</i>) & electrical resistivity	0.993	0.000 (significance level)
Condition of discontinuities (<i>CoD</i>) & electrical resistivity	0.921	0.000 (significance level)
RMR & electrical resistivity	0.938	0.000 (significance level)

Table 7. Removal criteria at the relationship between RMR and electrical resistivity

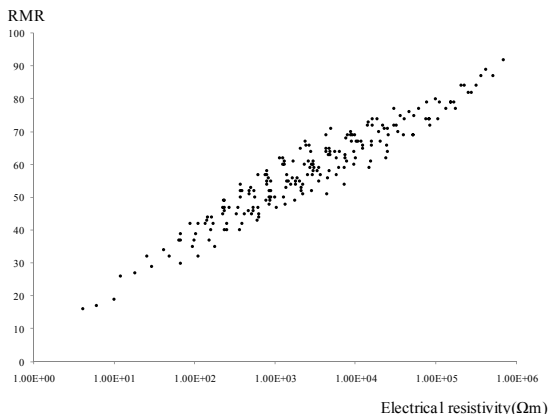
Categorization	Criteria
Case 1	$R_{at} < 0.002, R_{ap} < 0.1$
Case 2	$R_{at} < 0.005, R_{ap} < 0.15$
Case 3	$R_{at} < 0.008, R_{ap} < 0.2$



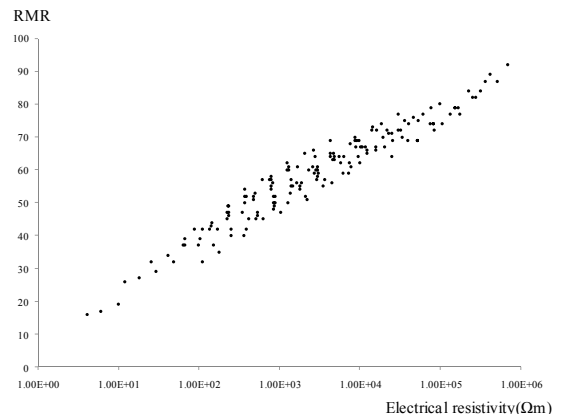
(a) Fig. 6



(b) Case 1



(c) Case 2



(d) Case 3

Fig. 8. Relationship between RMR and electrical resistivity using probabilistic approach

Table 8. Correlation coefficient of probabilistic rock mass classification

Relationship	Probability (%)	Correlation coefficient
Fig. 6	-	0.938
Case 1	98.7	0.962
Case 2	95.7	0.956
Case 3	91.0	0.967

Table 9. Accuracy of probabilistic rock mass classification using electrical resistivity

Contents	Fig. 6	Fig. 8(d)
Electrical resistivity (Ω m)	1000	1000
RMR	38 ~ 62	44 ~ 58
Class	II (Good rock) ~ IV (Poor rock) class	III (Fair rock) class

제외된 RMR 변수의 특정 분류값 사이 관계를 고려하면, case 1은 실제 존재하는 현장 데이터의 98.7% 신뢰성을 가지며, case 2는 95.7%, case 3는 91.0%의 신뢰성을 가진다.

따라서, 기준에 의해 RMR 변수의 특정 분류값 사이 관계를 제거하고 RMR 변수와 전기비저항의 관계를 도출하면 Fig. 8과 같다. 확률론적 접근을 통해서 도출된 RMR과 전기비저항 관계와 확률론적 접근을 하기 전 RMR과 전기비저항 관계를 비교하기 위해 통계 프로그램(SPSS)을 이용하여 각 case별로 상관분석을 통해서 상관계수를 산정하였다(Table 8). Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 확률론적 접근을 하기 전 RMR과 전기비저항의 관계보다 확률론적 접근을 통해서 도출된 RMR과 전기비저항의 관계가 산란이 적어졌음을 알 수 있다(Table 9). 또한 Table 8에서 볼 수 있듯이 case가 증가함에 따라 상관계수가 커짐을 알 수 있다. 확률론적 접근을 통해서, 보다 의미가 있고 산란이 적은 RMR과 전기비저항의 관계를 도출하였다.

5. 결론

기존 논문(Ryu et al., 2008)에서 수행된 신선암과 불연속면 혹은 절리가 존재하는 암반에서의 전기비저

항식을 이용하여 RMR의 각 변수와 전기비저항의 관계, RMR과 전기비저항의 관계를 도출하였다. 또한 현장 데이터를 이용하여 RMR 변수의 분류값들 사이의 확률적인 존재 여부를 고려한 후, 기준에 따라 case별로 RMR과 전기비저항의 관계를 도출하였다. 신뢰성을 확인하기 위해 통계 프로그램을 이용하여 RMR의 각 변수와 전기비저항 관계의 상관계수, RMR과 전기비저항 관계의 상관계수를 구하였다. 확률론적 접근을 통해 도출된 RMR과 전기비저항 관계가 확률론적 접근을 수행하지 않은 관계보다 상관 정도가 높고 산란 정도가 낮음을 확인하였다.

실제 적용에 있어서는, 우선 신선암과 불연속면이 존재하는 암반에서의 전기비저항 식을 이용하여 현장에서 측정된 전기비저항값과 일반적인 역해석 기법을 이용하여 신선암의 전기전도도, 불연속면의 전기전도도, 신선암의 두께, 불연속면의 두께를 예측한다. 예측값을 이용하여 그 현장에 적합한 RMR의 각 변수와 전기비저항과의 관계, RMR과 전기비저항의 관계를 도출할 수 있다. 기존 방법과 함께 암반 상태를 평가하는 방법으로 적용이 되면 암반을 신뢰성 있게 판단하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 KICTEP (Program No. : 10 Technology Innovation - E09), 국토해양부의 U-City 석박사과정 지원사업의 후원을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Archie, G.E. (1942), The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 146, pp. 54-62.
2. Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
3. Bieniawski, Z.T. (1973), "Engineering classification of jointed rock masses", *The Civil Engineering in South Africa*, Vol. 15, No. 12, pp. 335-343.
4. Carmichael, R.S. (1989), *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*, CRC Press, USA.
5. 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", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 13, No. 4, pp. 279 -286.
6. Cragg, D.J., Ingman, J. (1995), "Rock weathering descriptions: current difficulties", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No. 3, pp. 277-286.
7. Dearman, W.R., Baynes, F.J., Irfan, T.Y. (1978), "Engineering grading of weathered granite", *Engineering Geology*, Vol. 12, pp. 345-374.
8. Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., Cording, E.J. (1966), "Design of surface and near surface construction in rock", *Proceeding of the 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics, AIME, Minneapolis*, pp. 237-302.
9. Doveton, J.H. (1986), *Log analysis of subsurface geology*, John Wiley & Son, New York, USA.
10. Guéguen Y., Palciauskas, V. (1994), *Introduction to the Physics Rocks*, Princeton University Press, New Jersey, USA.
11. Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M. (1998), "Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 57, No. 2, pp. 515-160.
12. Kwon, H.S., Hwang, S.H., Baek, H.J., 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.
13. Lee, K.J., Ha, H.S., Ko, K.B., Kim, J.S. (2009), "Investigation of indicator kriging for evaluating proper rock mass classification based on electrical resistivity and RMR correlation analysis", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 19, No. 5, pp. 407 -420.
14. Lee, K.H., Seo, H.J., Park, J.H., Ahn, H.Y., Kim, K.S., Lee I.M. (2012), "A study on correlation between electrical 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.
15. Linek, M., Jungmann, M., Berlage, T., Pechinig, R., Clauser, C. (2007), "Rock classification based on resistivity patterns in electrical borehole wall images", *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 171-183.
16. Reitz, J.R., Milford, F.J., Christy, R.W. (1997), *Foundation of electromagnetic theory*, Addison Wiley, USA.
17. Ryu, H.H., Cho, G.C., Sim, Y.J., Lee, I.M. (2008), "Detection of Anomalies in Particulate Materials Using Electrical Resistivity Survey - Enhanced Algorithm", *Modern Physics Letters B*,

- Vol. 22, No. 11, pp. 1093-1098.
18. Palmstrom, A. (1996), "Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 175-188.
 19. Price, D.G. (1995), "Weathering and weathering processes", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No. 3, pp. 243-252.
 20. Tugrul, A. (2004), "The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey", *Engineering geology*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 215-227.
 21. You, K.H., Jie, H.K., Seo, K.W., Kim, S.J., You, D.W. (2012), "A study on the correlation between the rock mass permeability before and after grouting & injection volume and the parameters of Q-system in a jointed rock mass tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 6, pp. 617-635.