

암반등급 해석을 위한 비선형 지시자 변환과 3차원 크리깅 기술의 물리탐사 및 시추자료에 대한 적용

오 석 훈*

한국수자원공사 수자원연구원 땀안전연구소, 306-711, 대전광역시 대덕구 인주동 산 6-2

RMR Evaluation by Integration of Geophysical and Borehole Data using Non-linear Indicator Transform and 3D Kriging

Oh, Seokhoon*

Korea Institute of Water and Environment (KIWE), KOWAEO, Daejeon 305-730, Korea

Abstract: 3D RMR (Rock Mass Rating) analysis has been performed by applying the Geostatistical integration technique for geophysical and borehole data. Of the various geostatistical techniques for the integrated data analysis, in this study, we applied the SKIvm (Simple Kriging with local varying means) method that substitutes the values of the interpreted geophysical result with the mean values of the RMR at the location to be inferred. The substitution is performed by the indicator transform between the result of geophysical interpretation and the observed RMR values at borehole sites. The used geophysical data are the electrical resistivity and MT result, and 10 borehole sites are investigated to obtain the RMR values. This integrated analysis makes the interpretation to be more practical for identifying the realistic RMR distribution that supports the regional geological situation.

Keywords: RMR, SKIvm, Geostatistics, geophysical interpretation

요 약: 물리탐사와 시추 자료에 대해 지구통계학적 복합해석 기술을 적용하여 3차원의 암반등급 해석을 수행하였다. 자료 복합 해석을 위한 다양한 지구통계학적 기술 중에서, 본 연구에서는 물리탐사 자료의 값을 추정하고자 하는 지점의 암반등급의 평균치로 치환하는 국소 편이 평균에 의한 단순 크리깅 기술(Simple Kriging with local varying means)을 사용하였다. 암석의 전기비저항 값은 RMR(Rock Mass Rating)값과 양의 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있으나 상관관계 만에 의한 대응방식은 그 양상이 매우 복잡하고 공간적으로 연관되어 있는 경우가 많아 단순히 적용하기 어려운 경우가 많다. 본 연구에서는 전기비저항과 RMR의 일반적 선형 상관관계 외에 지시자 변환(indicator transform)에 의한 비선형 상관관계를 유도하는 방식을 제안하였다. 또한 본 연구에서는 선형 및 비선형 상관관계에 의해 대응된 비저항 값이 실제 RMR과 비교할 때 나타나는 잔차(residual)에 대해 3차원 지구통계학적 분석을 적용하여 이 결과를 상관관계 결과에 추가함으로써 공간적 특성을 반영하는 RMR 평가를 수행할 수 있었다. 사용된 물리탐사 자료는 전기비저항 및 MT(Magnetotelluric) 탐사 자료이며, 총 10공의 시추 자료를 통해 획득한 암반등급 값을 이용하였다. 이와 같은 해석은 조사 대상에 대한 광역적 지질조건을 보다 현실적으로 반영하는 암반등급 분포를 만들어내는 것으로 보인다.

주요어: 암반등급, 국소 편이 평균, 단순 크리깅, 지구 통계학, 지구물리탐사자료

서 론

일반적으로 터널 붕괴 같이 암반의 조건에 따라 설계 및 시공이 결정되는 대형 토목 공사에서 RMR

은 암반의 질을 판단하는 표준적 근거로써 널리 이용되고 있다. 그러나 RMR은 시추공에서 획득한 코어를 직접 분석하여 얻는 값이기 때문에 그 정보의 분포가 좁고, 제한적이어서 시추공 이외의 지역에 대한 양상을 파악하기가 매우 어렵다. 또한 RMR값은 일반적으로 시추공 자료를 통해 1차원적으로 획득되지만 실질적인 RMR 정보의 이용은 2차원 이상의 영역에 대해 주어질 때 사용이 가능하며, 기존의 경

*Corresponding author: gimul@geo.re.kr
Tel: 82-42-860-0420
Fax: 82-42-860-0339

우 이를 위해 1차원적으로 편중된 시추공 평가 자료만을 이용하거나 단순 선형 분석을 통해 해석하는 경우가 많았다. 특히 대상 지역의 해석을 3차원으로 수행해야 할 경우, 시추공만의 자료는 전체적인 지구조 양상을 반영하는 RMR 분포를 추정하기 매우 어렵다.

최근 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 RMR 측정 자료의 공간 특성을 고려하여 미 측정지점에 대한 대상값을 추정하는 지구통계학적 접근이 널리 이루어지고 있다. 지구통계학은 확률함수 모델(random function modeling)에 기반한 공간분석 기술로서, 측정되지 않은 지점의 값들이 공간적으로 의존하는 확률함수의 집합이라는 가정을 통해 대상 지역의 관심 변수에 대해 추정하는 방법이다(Goovaert, 1997). 지금까지 RMR 추정과 관련한 지구통계학의 적용은 단순히 시추공 상의 1차원 RMR 정보를 크리깅 기법(Kriging)을 통해 2차원 분포로 확장하거나 시뮬레이션을 이용하는 방법이었다(Ozturk, 2002; Ryu et al., 2003). 그러나 공간적으로 제한된 정보에 대해 크리깅을 적용하는 것은 오해석을 유발하거나 부족한 자료에 근거하여 추정 분석하는 과정에서 실제 현상과 거리가 먼 결과를 내놓을 가능성이 많다.

이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 가상 경제적인 방법은 물리탐사 자료를 이용하는 것이다. 그러나 일반적으로 물리탐사 자료를 RMR 값의 추정을 위해 사용한 사례들은 측정된 값의 공간적 분포에 대한 고려가 제대로 이루어지지 않은 경우가 많다(최재화 등 2001, 이광배 등 2004). 이에 대한 해결을 위해 Oh et al.(2004)은 지구물리탐사자료와 시추공 주변의 RMR 자료에 대한 지구통계학적 복합 해석 기술을 2차원 MT 해석 자료에 적용한 바 있다. 본 연구에서는 이와 같은 알고리즘을 확장하여 3차원 전기비저항 물성에 대하여 시추공 RMR 정보로 비선형 변환을 수행하고, 변환자료와 측정 RMR의 잔차에 대한 3차원 Kriging을 수행함으로써, 3차원 지구조를 반영하는 암반등급을 결정하였다.

복합해석을 위한 지구통계학 기법의 적용

Isaaks and Srivastava(1989)에 의하면 지구통계학적 방법에 의해 추정을 시도한 경우, 관심 변수에 대한 직접적인 측정과 더불어 부가적인 정보가 있을

경우 훨씬 정확한 결과를 제공함을 제시하였다. 특히 이러한 부가정보는 직접 측정된 변수의 자료가 부족하거나 공간적으로 연속성을 갖지 못한 경우 더욱 중요한데, 시추공 주변에 그 정보가 한정된 RMR 추정 문제의 경우 더욱 그 의미가 크다. 금번 연구 사례와 같이 조사 대상이 3차원일 경우에는 자료의 부족에 의한 해석의 오류 가능성이 더욱 크나 할 수 있다.

일반적으로 RMR값은 그 특성상 암석의 지구물리학적 물성 중, 전기비저항 결과와 유사한 특성이 많은 것으로 알려져 있다(Oh et al., 2004). Fig.1은 본 연구 대상 지역의 시추공에서 관측한 RMR 평가 값과, 그에 해당하는 지점에서의 비저항 결과를 함께 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, RMR과 비저항은 전체적으로 상관관계를 가지나, 어긋나는 자료도 매우 많은 것으로 보인다. 이는 지역적으로 RMR이 비저항과 완전히 비례하지 않으며, 따라서 RMR과 비저항 자료를 직접적으로 연관하기는 어려움을 암시한다. 이를 위해 본 연구에서는 두 가지의 절차를 통해 RMR과 비저항 자료를 복합 해석하였다. 즉, 지구물리탐사자료의 비선형 시시자 변환에 의한 가변적 평균 추정을 수행하고, 변환된 추정 평균과 관측된 RMR 값에 대한 잔차를 3차원 크리깅을 적용하여 암반 등급 분포도를 구하였다. 복합 해석 알고리즘에 대한 자세한 기술을 Oh et al.(2004)의 논문을 참고하기 바란다.

가변적 지역평균에 의한 단순 크리깅

지구통계학에서 평균을 알고 있을 때 임의의 지점에 대한 변수를 추정하는 기술인 단순 크리깅(Simple Kriging, SK)은 다음과 같이 주어진다.

$$Z^*_{SK}(u) - m = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{SK}(u) [Z(u_{\alpha}) - m]$$

여기서 $Z^*_{SK}(u)$ 는 u 지점에서의 SK 추정값이며, m 은 SK 평균, 그리고 λ_{α}^{SK} 는 관측값 $Z(u_{\alpha})$ 으로부터 결정되는 가중치이다. 본 연구에서는 단순 크리깅 추정시 이용되는 SK 평균 m 을 전기비저항 및 MT 자료의 역산에 의한 비저항 정보로부터 간접 추정하여 이용하는 방법을 택하였다. 이와 같이 가변적 지역 평균을 채택한 3차원 단순 크리깅은 아래와 같이 변환된다.

$$Z^*_{SKM}(u) - m^*_{SK}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{SK}(u) [Z(u_{\alpha}) - m^*_{SK}(u_{\alpha})] \quad (1)$$

여기서 는 가변적 지역 평균 $m^*_{SK}(u)$ 는 다음의 비선형 지시자 변환에 의해 설정되었다.

비선형 지시자 변환에 의한 가변적 지역 평균 추정

가변적 지역 평균을 구하기 위해서 RMR 값을 획득할 수 있는 시추공의 위치를 대상으로, 동일한 위치의 비저항 값을 K개의 구간으로 나누고 이에 해당하는 RMR 값을 대응시킨다.

$$m^*_{SK}(u) = m_{\mu} \text{ with } y(u) \in (y_1, y_{1-1}] \quad (2)$$

$y(u)$ 는 위치 u 에서의 비저항 값이며, 조건부 평균 m_{μ} 는

$$m_{\mu} = \frac{1}{n_{\mu}} \sum_{\alpha=1}^n i(u_{\alpha}; k) \cdot z(u_{\alpha})$$

으로 주어진다. u_{α} 는 시추공에서 비저항값과 RMR 값이 동시에 관측된 지점이다.

여기서 $y(u) \in (y_1, y_{1-1}]$ 에 해당하는 관측자료 $z(u_{\alpha})$ 의 개수는 n_{μ} 이며 지시자 변수 $i(u_{\alpha}; k)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$i(u_{\alpha}; k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (y(u) \in (y_1, y_{1-1}]) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이와 같이 정의된 가변적 지역 평균을 식 (1)의 3차원 단순 크리깅에 대입하고,

$$\sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_{\beta}^{SK}(u) C_R(u_{\alpha} - u_{\beta}) = C_R(u_{\alpha} - u) \quad \alpha = 1, \dots, n \quad (3)$$

에 의해 가중값이 결정된다. 은 RMR관측값과 지역평균의 잔차이다.

이상의 방법을 적용하여, 지구물리탐사 자료로부터 획득한 전기비저항 값은 있으나 RMR이 관측되지 않은 대상지역에 대해 식(2)의 값을 이용하여 지역평균을 결정하고, 식(3)을 이용하여 3차원 크리깅을 수행하여 획득한 잔차에 대한 정보를 더하면 물리탐사와

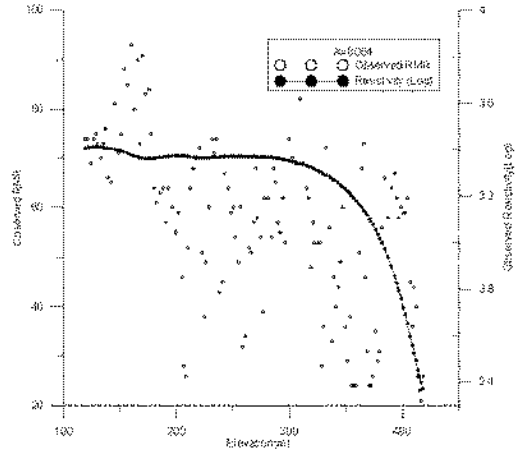


Fig. 1. Identification of RMR values at borehole position $x=8064$ (Fig. 3) with resistivity data. Resistivity values are indicated on the right axis.

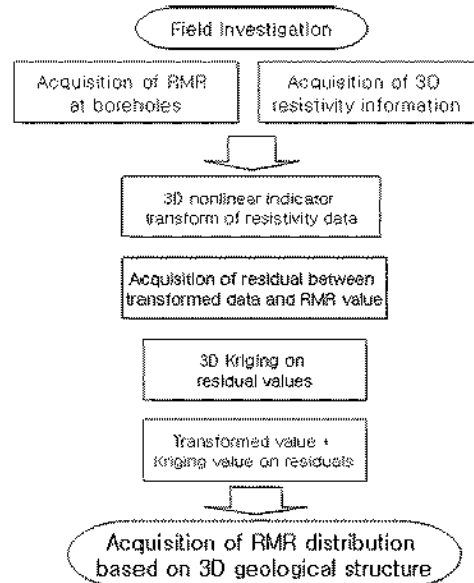


Fig. 2. Flowchart for the integrated geostatistical interpretation of 3D electrical resistivity and RMR data observed at borehole sites.

시추자료를 복합한 암반등급 분포를 추정할 수 있다. 이에 대한 순서도를 Fig. 2에 도시하였다.

3차원 탐사 자료에 대한 적용

대상 지역의 물리탐사 및 RMR 자료 분석

본 연구에서 이용할 자료는 터널 공사를 위해 수

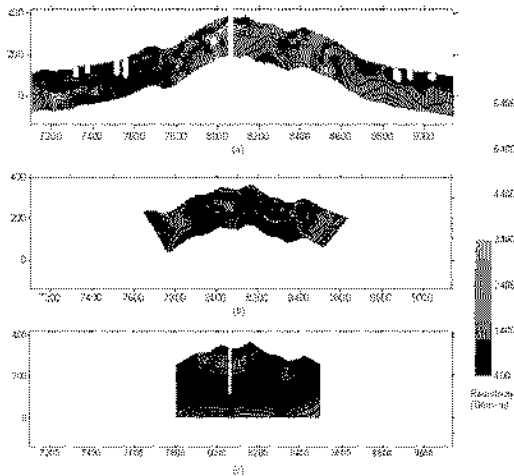


Fig. 3. Resistivity section and location of the borehole sites for study area. (a) profile shows the distribution of resistivity value along the plan of up line of the tunnel and (b) is the down line apart away about 40m from the up line.

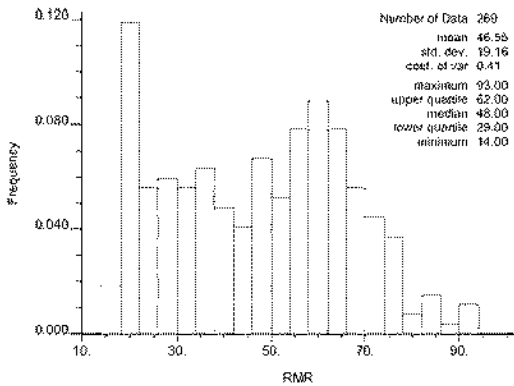


Fig. 4. Histogram for observed RMR value.

행한 전기비저항 탐사와 MT 탐사 자료이며, 이를 이용하여 3차원 암반등급 분포를 추정하였다. Fig. 3는 현장에서 취득한 물리탐사 자료를 해석하여 획득한 해당 지역의 전기비저항 분포이다. 연구 대상 지역은 산악지형에 상하행선 도로를 건설하기 위해 터널을 계획하고 있는 지역이다. Fig. 3의 (a)는 상행 도로를 따라 측정된 탐사 자료에 대한 비저항 분포와 RMR 자료를 획득한 시추공 위치를 표시한 그림이며, (b)는 이로부터 우측(서쪽)으로 40 m 떨어진 지점에서 수행한 탐사자료에서 획득한 하행선의 비저항 분포이다. 시추는 상행선 예정지에서만 수행되었으며, 하행선 지역에서는 전기비저항 조사만 수행되었다. 또한

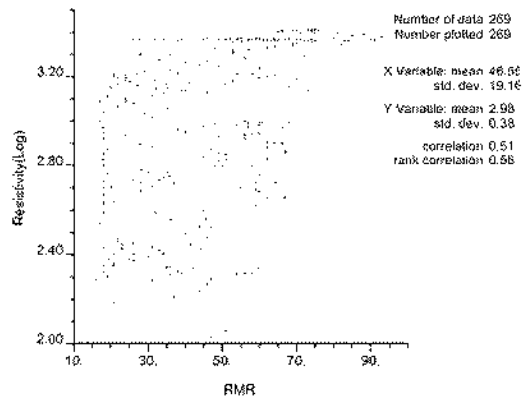


Fig. 5. Scatter plot for resistivity value and observed RMR values.

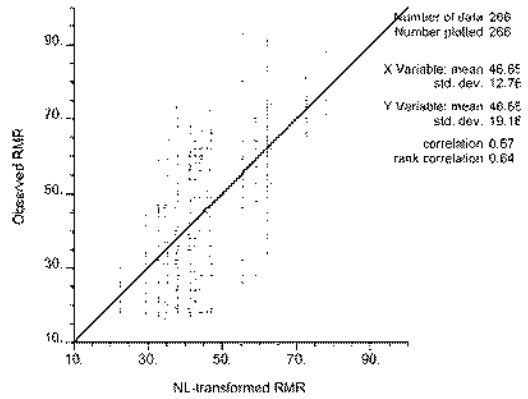


Fig. 6. Scatter plot for non-linear transformed RMR value and observed value.

(c)는 전기비저항 탐사의 특성으로 산악의 중심부에서 깊은 곳에 대한 비저항 정보를 획득하지 못하는 단점으로 보상을 위해 수행된 MT 탐사 결과 단편이다. 이상의 물리탐사 결과를 결합하여 대상 지역에 대한 비저항 정보를 획득하였다.

Fig. 4의 관측된 RMR 자료에 대한 히스토그램에서 볼 수 있는 바와 같이, 조사 대상 지역은 화상암 지대에 위치하고 있으나 단층대에 의한 파쇄 연약 구간이 넓은 구간에 나타나고 있어, RMR 분포가 매우 다양하게 나타나고 있으며, 그 값이 비교적 낮다. 특히 분석된 RMR값의 25%가 30이하의 값을 갖는 것으로 나타나고 있으며, 75%정도가 62 이하의 값을 보이고 있다.

Fig. 5와 6은 비저항 자료와 시추공에서 획득한 RMR 자료의 상관도를 살피기 위해 작성한 산포도의

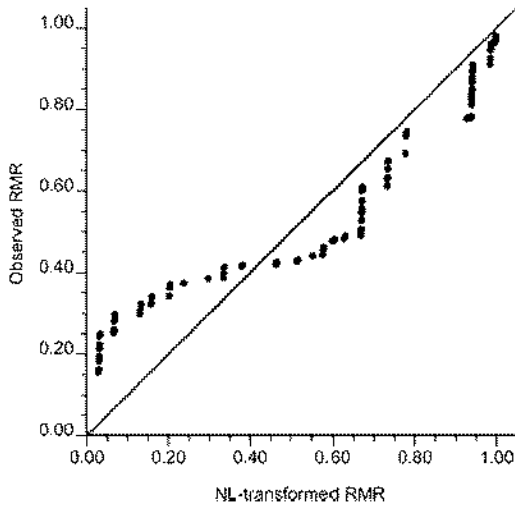


Fig. 7. QQplot for non-linear transformed RMR and observed RMR values.

다. Fig. 5는 상용 로그를 취한 비저항 자료와 시추공에서의 RMR 관측값을 도시한 결과이며, Fig. 6은 비선형 변환에 의해 획득한 RMR값과 시추공에서의 분석에 의한 관측 RMR 값의 산포도이다. Fig. 1에서 예상할 수 있는 바와 같이, Fig. 5는 비저항 자료와 RMR 값은 많은 차이가 있음을 암시하고 있다. 이러한 점을 보강하기 위해 수행된 비선형 변환에 의한 결과인 Fig. 6은 Fig. 5에 비해 상관도 매우 증가된 양상을 볼 수 있으나, 여전히 편차가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 편차는 잔차의 공간 모델링에 의해 보정되어야 한다. 한편 Fig. 7은 비선형 변환 값과 관측 RMR 값에 대한 QQ plot이다. QQ plot은 각 자료의 분포에 대해 특정 분위의 값을 대응하여 도시한 것으로 분포의 유사성을 추정할 수 있는 방법이다. 그 결과 비선형 변환 결과와 관측 RMR 값은 상관도가 높은 분포를 갖고 있는 것으로 나타났다.

비선형 변환과 3차원 잔차 크리깅을 통한 암반등급 분포 획득

Fig. 8은 Fig. 3의 비저항 자료와 시추공에서 획득한 RMR 관측 자료를 이용하여 식(2)에 의해 비선형 변환을 통해 지역 평균을 추정된 결과에 대한 분포를 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 대부분의 비저항의 로그값이 3.3에서 3.4사이에서 분포하고 있는 것으로 나타난다. 기존의 선형 분석에서는 이와 같은 비저항 값의 분포에 대한 고려를 하지 않

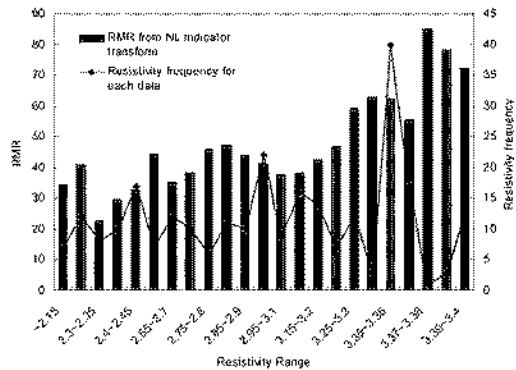


Fig. 8. RMR trend obtained by eq (2) for study area. RMR and resistivity values seem to be correlated each other, but show some local variability which needs special consideration for correction.

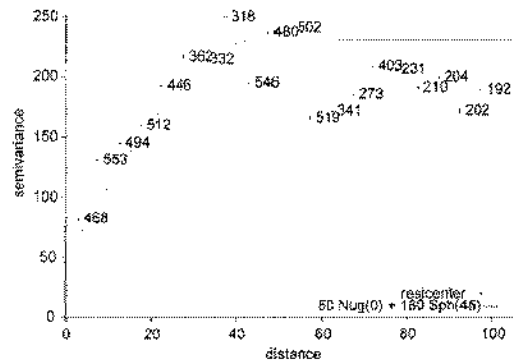


Fig. 9. Variogram for residual values between non-linear transformed RMR and observed RMR values at borehole sites.

고 단순히 회귀분석을 통해 비저항과 RMR 값을 치환하였으나, 본 연구에서는 비선형 변환 기술의 장점을 활용하여 자료가 많이 모여 있는 대역에 대해 보다 세밀히 구간을 결정하여 자료 분석의 신뢰도를 높이고자 하였다.

Fig. 9는 비선형 변환에 의해 추정된 RMR값과 실제 시추공 위치에서 관측된 RMR 값의 차이를 이용하여 식(3)의 3차원 단순 크리깅에 의해 연구 대상 전 지역에 대해 잔차를 추정하기 위해 사용한 매리오그램(variogram)이다(Goovaerts, 1997). 매리오그램으로부터 나타난 잔차의 공간적 특성은 약 45m 부근까지 분포의 연속성을 보이고 있으며, 구형 모델(spherical)에 의해 잘 근사가 이루어지고 있다. 너겟 효과(nugget effect)는 50으로 전체 분산크기에 비해

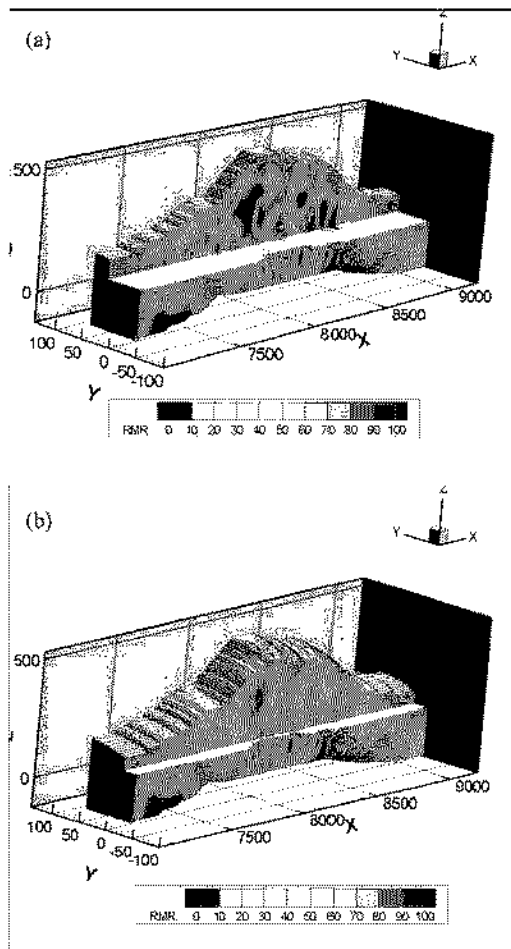


Fig. 10. Final result for the integrated analysis of RMR values by 3D geophysical survey and borehole data. (a) shows the RMR values around the down line and (b) for up line.

서는 작은 값을 보이고 있어, 비교적 안정적으로 공간 분석이 이루어지고 있음을 암시한다. 이 매리오크그램으로부터 시추공 이외의 지점에 대한 잔차를 구하고, 비선형 변환으로부터 추정된 국소 평균값에 더하면 최종적으로 물리탐사에 의해 지구구조가 반영된 암반 분류 등급 분포를 획득할 수 있다.

Fig. 10은 이상의 절차를 걸쳐서 물리탐사 자료와 시추공의 RMR 관측 자료를 복합 해석하여 획득한 3차원 암반등급 분포도이다. (a)는 하행선의 고도를 기준으로 절개하여 나타냈으며, (b)는 상행성의 고도를 기준으로 절개하여 도시하였다. Fig. 11은 특별히 상하행선의 위치에 대한 암반 등급을 도시하였다. 해석 결과, 중앙부에서 높은 RMR 값을 보이는 신선한

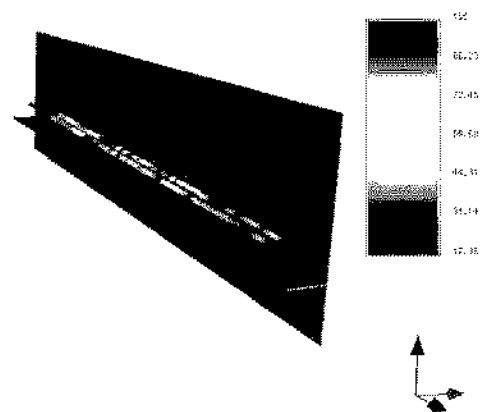


Fig. 11. The distribution of the RMR values along the planed highway of study area.

암층과 연약대로 파악되는 불량암층이 교호하고 있음을 살필 수 있으며, 시공시에 이에 대한 고려가 있어야 할 것으로 보인다.

결론

기존에 비저항 조사 결과를 암반 등급 분류에 이용하는 방법은 단순히 1:1 대응을 통한 선형 비교에 그쳐왔다. 이는 암반의 분포 특성이 그 생성 원인에 따라 구조적으로 연속적으로 나타나는 현상을 정확히 파악하지 못하며, 왜곡된 결과를 제공할 가능성이 크다. 본 기술에 의하면 비선형 분석을 통해 비저항과 측정 RMR의 경향성을 정확히 반영하며, 거기에서 그치지 않고 변환값과 측정 RMR의 잔차에 대하여 지구통계학적 공간 해석을 수행함으로써, 실제 구조를 정확히 반영할 수 있는 결과를 제공하고자 하였다. 본 연구에서는 탐사 대상 구역에 대한 3차원 암반 등급 분포의 추정에 물리탐사 자료와 시추공 해석 자료를 효과적으로 이용하였는데, 다른 분야에서도 널리 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 직접적으로 취득하기 곤란한 물리량을 물리탐사와 같은 경제적 방법을 통해서 획득한 정보를 보조 자료로 이용하여 간접적으로 추정하는 방법의 연구가 가능할 것이다.

참고문헌

최재화, 조철원, 류동우, 서백수, 권병두, 2001, 전기비저항과 터널착장 암반분류의 상관성 검토, 대한지구물리학

- 회 제4차 정기총회 및 학술발표회
이광배, 허승, 송영수, 송승엽, 김학수, 2004, 주음파-주사
결층 방법을 이용한 일반강도 평가에 관한 연구, 물리
탐사학회지, 7 (4), 225-233
Goovaert, P., 1997, Geostatistics for natural resources eval-
uation, Oxford University Press, Oxford
Issaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989, An introduction to
applied geostatistics, Oxford University Press, Oxford
Oh, S., Chung, H., and Lee, D.K., 2004, Geostatistical
integration of MT and borehole data for RMR evalua-
tion. Environmental Geology, 46, 1070-1078.
Ozturk, C.A., 2002, Geostatistical assessment of rock zones
for tunneling, Tunneling and Underground Space Tech-
nology 17, 275-285
Ryu, D.W., Kim, T.K., Hoo, J.S., 2003, A study on geo-
statistical simulation technique for the uncertainty mod-
eling of RMR, Tunnel and Underground 13, 87-99

2005년 4월 2일 원고 접수
2005년 5월 3일 수정원고 접수
2005년 5월 12일 원고 채택