

탄성과 속도와 전기비저항 자료의 지구통계학적 복합해석에 의한 암반등급의 확률적 평가

오석훈^{1*} · 서백수¹

¹강원대학교 지구시스템공학과

Geostatistical Integration of Seismic Velocity and Resistivity Data for Probabilistic Evaluation of Rock Quality

Seokhoon Oh^{1*} and Baek-Soo Suh¹

¹Dept. Geosystem Engineering, Kangwon National University

요약: 암반등급 평가를 위한 물리탐사 자료의 복합해석에 관한 새로운 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 시추공이 없는 지점에서의 암반등급을 추정하기 위해 직접적으로 RQD (Rock Quality Designation) 값을 지정하는 방식을 이용하지 않는다. 대신 시추공 자료를 보완하는 탄성과 속도와 전기비저항 탐사 결과를 복합하여 특정 RQD 값의 확률적 분포를 추정한다. 우선 시추공에서 확보한 RQD 값에 대해 지구통계학적 지시자 크리깅을 수행하고, 탄성과 속도와 전기비저항 자료에 대해서는 보조 자료를 활용한 지시자 크리깅을 수행하여 각각에 대한 확률분포를 구성하였다. 이러한 확률분포들에 대해 permanence ratio 법칙에 근거한 자료 통합을 수행하였다. 이와 같이 확률적으로 획득된 암반등급 평가 결과는 다양하게 이용될 수 있는데, 본 논문에서는 실제와 다르게 등급 평가가 이루어질 수 있는 가능성에 대한 활용 방안도 함께 제안하였으며, 이는 대상 구간에 대한 의사결정 시스템에 이용될 수 있음을 제시하였다.

주요어: 복합, 전기비저항, 탄성과 속도, permanence ratio, RQD, 의사결정, 지구통계학

Abstract: A new way to integrate various geophysical information for evaluation of RQD was developed. In this study, we do not directly define the RQD value where borehole data are not sampled. Instead, we infer the probability of RQD values with prior probability of data directly obtained from borehole, and secondary supporting probability from resistivity and seismic tomography data. First, we applied the geostatistical indicator kriging to get prior probability of RQD value, and indicator kriging with soft data to get the supporting probability from resistivity and seismic data. And we finally applied the permanence ratio rule to integrate these information. The finally obtained result was also analyzed to fully utilize the probabilistic features. For example, we showed the probability of wrongly classifying the RQD evaluation and vice versa. This kind of analytical result may be used for decision making process based on the geophysical exploration.

Keywords: integration, resistivity, seismic velocity, permanence ratio, RQD, decision making, geostatistics

서론

최근 천부 지질구조 조사를 위한 물리탐사 분야의 기술 발전은, 자연스럽게 다양한 분야에서 물리탐사 기술에 대한 필요성을 인지하게 되고 그 활용범위가 기하급수적으로 늘어나고 있다. 이 과정에서 기존의 단일 방법에 의한 물리탐사보다는 대상체에 대한 보다 정확하고 신뢰성 있는 결과 제공을 위해

다양한 기법의 복합 탐사가 적용되고 있는 시점에 있다(권병두 등, 2000). 또한 물리탐사를 통해 천부 지질구조에 대한 정확한 정보를 획득해야 하는 상황에서, 복합 탐사의 장점은 단일 탐사에 의한 결과 해석의 불확실성이 가져올 수 있는 위험 부담을 최소화하고, 탐사 결과에 의한 최종 의견 결정 시에 신뢰도를 높일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존의 복합 탐사에 대한 해석은 개개의 탐사 자료를 분석한 뒤 정성적으로 그 결과를 취합 해석하는 수준에 머물러 있어, 복합탐사의 장점을 살리기 보다는 각각의 탐사에 의한 이질적인 분석결과를 최소화하기 위해 왜곡되어 이용되고 있는 현실이다. 이는 각각의 물리탐사 방법이 측정하는 지하매질의 물리적 성질이나 그 분해능이 서로 다르기 때문에 발생하는 현상으로, 이를 수치적으

2007년 9월 4일 접수; 2007년 10월 15일 채택

*Corresponding author

E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

Address: Dept. Geosystem Eng., Kangwon Nat'l Univ.,
Hyoja2-dong, Chuncheon-Si, Kangwon-Do,
Korea

로 하나의 자료처리 체계를 통해 해석하기는 어려운 것으로 알려져 있다.

최근 이러한 문제점을 극복하기 위해 단순히 물성 추정치의 오차를 동시에 최소화하는 방법을 개선하고자 지구통계학적 접근을 수행하는 연구가 다양하게 이루어지고 있다(Haas and Olivier, 1994; Torres-Verdin *et al.*, 1999; Oh and Kwon, 2001; Oh, 2006). 지구통계학적 복합해석의 장점은 이종(異種)의 탐사 자료에 대한 공간적 특성을 연결고리로 하여 각각의 자료가 가지고 있는 공간 분포 특성을 동시에 반영하여 새로운 결과를 제공할 수 있다는 데 있다. 이 과정에서 추정하는 변수의 불확실성에 대한 정보를 제공하여 해석에 대한 신뢰도를 제공하여 최종결정권자의 의사 결정에 중요한 근거를 동시에 제공하는 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 지구통계학적 접근의 장점을 최대한 반영하는 방법을 통해, 전기비저항과 탄성과 속도 토모그래피 자료를 복합적으로 이용하여 암석의 분류기준인 RQD 값을 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 암반등급과 물리탐사 자료의 상관성에 관해서는 송무영 등(2002)이 탄성과 탐사 자료와 RQD를 비교하여 매우 높은 관련성이 있음을 보였으며, 오석훈 등(2004)은 RMR 추정에 MT 탐사 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 이와 같은 물리탐사를 통한 암반등급의 추정을 위해 두 가지 이상의 자료를 복합적으로 반영하는 방법에 대해 제안하고 지구통계학적 자료 통합 과정을 예시하고자 하였다.

지구통계학적 자료 통합

앞서 송무영 등(2002)의 연구에 의하면, 탄성과 속도와 RQD는 강한 상관성을 갖고 있는 것으로 보이나, 지역별, 암종별로 편차가 있는 것으로 파악하였다. 즉, 편마암지대에서는 탄성과 속도와 RQD가 강한 상관성을 갖지만, 퇴적암 지역에서는 고결 정도와 지역에 따른 편차가 나타났다. 이러한 특성은 탄성과 속도만을 이용하여 암반등급을 결정할 때 문제가 있음을 암시한다. 한편 전기비저항 값은 퇴적암의 고결 정도에 따라 비교적 정확한 상관성을 보이는 것으로 알려져 있다(박정빈 등, 2000). 이러한 점을 고려할 때, 암반등급의 직접적인 확보가 어려운 구역에 대해 탄성과와 전기비저항 자료를 복합적으로 이용하여 RQD 등을 추정한다면, 보다 정확한 결과 획득이 이루어질 수 있을 것이다.

Permanence ratio

Journel (2002)에 의하면, 어떤 정보 B, C에 근거하여 A를 추정하는 확률은

$$P(A|B,C) = \frac{a}{a+bc} \quad (1)$$

로 주어짐을 증명하였다. 여기서 a, b, c는 각각

$$a = \frac{1-P(A)}{P(A)}, b = \frac{1-P(A|B)}{P(A|B)}, c = \frac{1-P(A|C)}{P(A|C)} \quad (2)$$

이다. 이 결과의 의미는 어떤 사건 A가 일어날 확률을 자료 B와 C에 근거하여 구할 때(즉, $P(A|B,C)$), 사건 자체의 사전 확률(prior PDF)에 근거한 $P(A)$ 에 의한 값 a, B라는 자료에 근거한 확률 $P(A|B)$ 에 관한 값 b, 그리고 C라는 자료에 근거한 확률 $P(A|C)$ 에 관한 값 c의 대수적 조합으로 결정할 수 있다는 것이다.

이를 물리탐사 자료를 통해 임의의 물성을 조사하는 것과 연관 지어 생각해보면, 사건 A는 물리탐사를 통해 추정하고자 하는 사건, 즉 임의의 지점의 지반침하 확률, 공동의 존재 가능성, RQD가 60% 이상일 확률 등을 의미할 수 있다. 그리고, B, C 등의 정보는 물리탐사나 시추공 자료가 뒷받침하는 확률을 의미한다. 여기서 Permanence ratio 법칙에 의한 $P(A|B,C)$ 라는 확률은 물리탐사나 시추공(B, C)에 의한 자료에 기반하여 사건 A의 확률을 추정하는 것을 의미한다. 물론 이 법칙은 두 개 이상의 다른 정보(B, C, D ...)에 의존할 수 있으며, 이는 곧 관련 자료의 통합을 의미한다. 이 방법은 기존 조건부 독립 혹은 완전 독립의 가정하에 결합 규칙을 제공하는 베이저안 방식과 달리, 각 정보의 기여에 따른 최종 정보의 향상을 유도한다는 점에서 이종 확률의 결합에 매우 유효한 것으로 여겨진다.

본 연구에서는 임의의 지점에서 RQD값이 특정한 값 이상 혹은 이하(ex. RQD 60 이상 혹은 30 이하일 확률)를 가지게 될 확률을 A라고 정의하고, 그 확률을 전기비저항 ($P(A|B)$)과 탄성과 속도 ($P(A|C)$)의 복합($P(A|B,C)$)에 근거하여 추정하고자 한다.

확률값의 산정

물리탐사 자료를 확률론적으로 해석하고자 하는 시도는 다양하게 있었지만, 이를 객관적으로 산정하는 것은 매우 어려운 일이다. 그 이유는 기존의 확률해석이 빈도수(frequency)에 의존하여 추정되다 보니 물리탐사 자료와 같이 빈도 추정이 어려운 경우 적용이 쉽지 않았다. 그러나 지구통계학적 접근은 관측자료와 그로부터 유도되는 추정자료의 불확실성 정보가 포함되면서 이러한 문제점을 비교적 쉽고 객관적으로 해결하여 준다.

사전 확률분포 P(A)의 결정

본 연구에서는 대상 지역의 시추공에서 획득한 RQD 자료를 주요 정보(Primary information)로 규정하고 특정 값을 기준으로 지시자 변환(indicator transform)에 의한 크리깅(Kriging)을 수행하여 불확실성을 포함하는 사전 확률분포

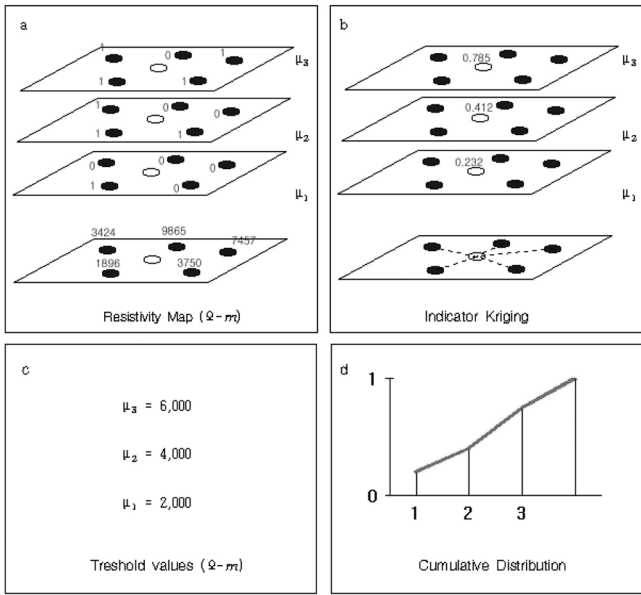


Fig. 1. Algorithm of indicator Kriging for assessment of local uncertainty.

P(A)를 구하였다. Fig. 1은 지시자 크리깅에 대한 원리를 간단히 보여준다. Fig. 1의 a에서 최하단의 평면은 측정치(여기서는 비저항 값)의 위치와 그 값을 나타내고 있으며, 나머지 세 개의 평면 (μ_1, μ_2, μ_3)은 도면 c의 문턱값(threshold value)에 따른 각 측정값의 지시자 변환을 의미한다. 즉, 각 문턱값 단계에서 각각의 측정값은 문턱값을 넘을 경우 1로, 아닐 경우 0으로 변환이 된다. 도면 b에서는 a와 c의 과정에 의해 지시

자 변환이 이루어진 자료에 대해 크리깅이 수행된다. 이 때 크리깅 결과는 0과 1로 이루어진 자료에만 의존하므로, 언제나 0과 1사이에서 결정된다. 이와 같은 식으로 각각의 문턱값에 대해 크리깅이 이루어지면 최종적으로 도면 d와 같이 미측정(unsampled) 지점에 대한 누적확률분포(cumulative density function; CDF)가 얻어진다.

Fig. 2는 RQD 60 이상을 가지는 것으로 추정되는 확률 분포를 시추공 자료로부터 구한 결과이다. 즉, 시추공에서 직접 획득한 RQD 값을 지시자 변환하여 크리깅을 수행하고 RQD가 60 이상일 확률 분포를 도식한 것이다. 그림에서 보듯이 자료가 한정되어 변동성이 적은 모습을 보인다. 이 자료는 탐사 자료와 상관없이 직접적으로 획득한 RQD에 대한 자료이므로 사전 확률 분포로 이용되었다.

보조 정보 P(A|B), P(A|C)의 결정

Fig. 3과 4는 본 연구에서 보조 정보(secondary information)로 사용한 전기비저항과 탄성과 탐사의 해석 결과이다.

Fig. 3과 4의 탐사자료는 시추공에서의 RQD 값과의 상관도 분석을 통해 보조적 크리깅 정보 (soft kriging information)를 제공하게 되고, 시추공 자료와의 지시자 크리깅 (indicator kriging)을 통해 각 위치에서 불확실성을 갖는 확률분포로써 추정된다. 본 연구에서는 공개된 지구통계학 라이브러리인 GSLIB (Deutsch and Journel, 1992)의 bicalib 루틴과 ik3d 루틴을 이용하여 P(A|B)와 P(A|C) 분포를 추정하였다.



Fig. 2. Prior probability of RQD value over 60 from direct borehole information.

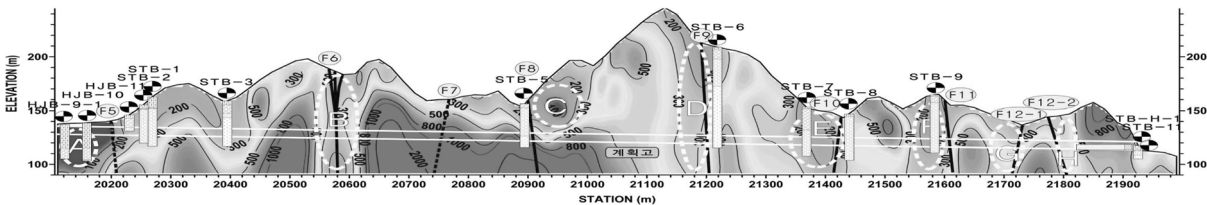


Fig. 3. Electrical resistivity survey result.

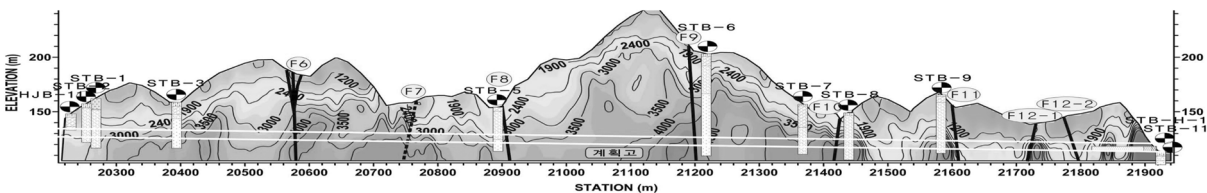


Fig. 4. Seismic velocity from tomography survey.

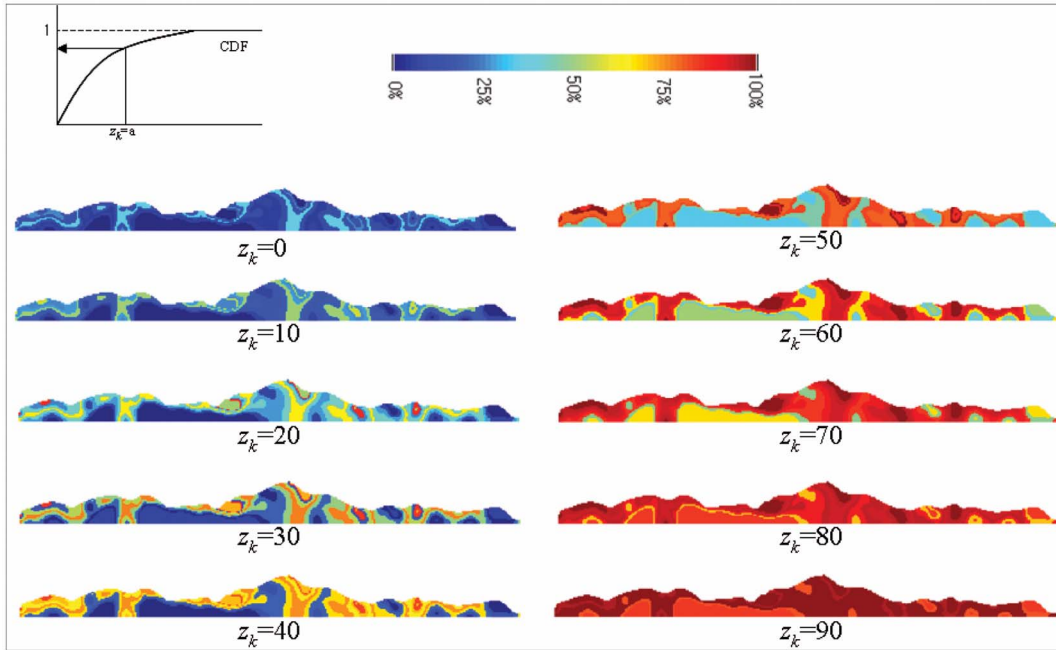


Fig. 5. Cumulative distribution of P(A|B) for each threshold value z_k from resistivity survey.

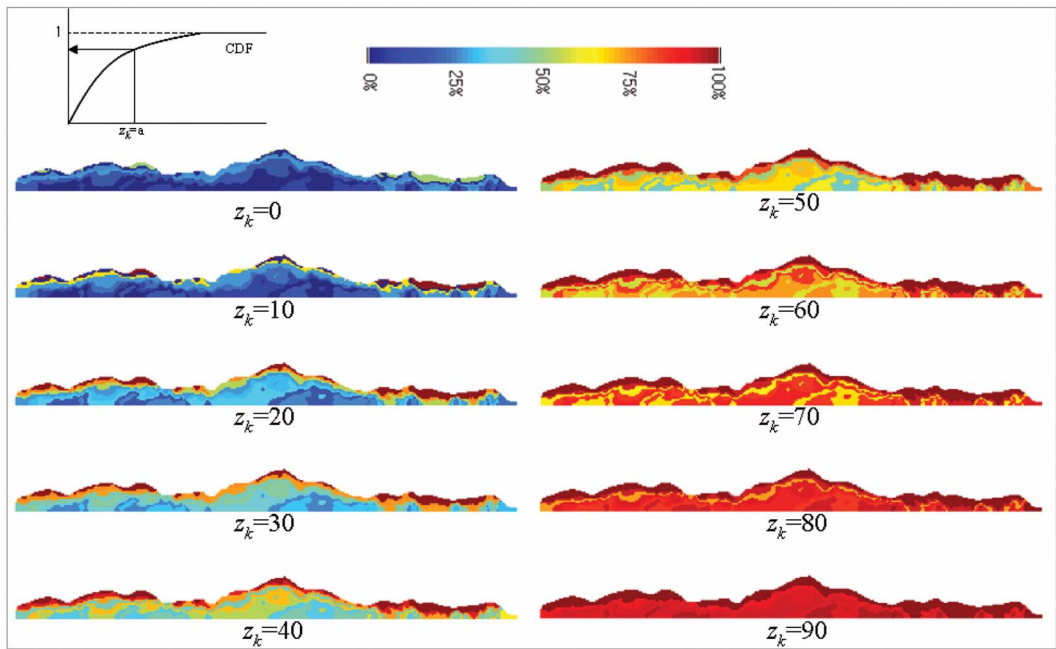


Fig. 6. Cumulative distribution of P(A|C) for each threshold value z_k from seismic refraction tomography survey.

bicalib 루틴을 이용한 이차 정보의 확률추정을 위해 각각 이차 정보의 문턱값(threshold value)을 균등한 확률분위(quantile)로 추정된 값으로 이용하였다. 즉, 0.1 확률분위 간격에 해당하는 이차 정보의 문턱값을 계산하여 사용하였고, 이 과정을 통해 이차 정보(전기비저항 혹은 탄성과 속도)와 일차 정보(RQD) 간의 상관성을 보다 정확하게 표현할 수 있었다.

ik3d 루틴을 통한 결과물은 각각의 임계값(threshold value)에 대한 확률 정보를 제공하게 된다. 즉, RQD 값이 예를 들어

각각 30, 50, 70, 80 일 때의 확률값을 제공하면 이를 내삽하여 각각의 위치에서의 RQD를 추정하기 위한 확률 분포를 구할 수 있다. 이를 이용하면 특정 값 이상을 가질 확률을 구할 수 있고 이를 P(A|B)와 P(A|C)의 값으로 사용하게 된다.

Fig. 5와 6은 이와 같은 방법을 통해서 획득한 각각의 탐사에 의한 RQD값 (z_k)에 따른 확률 분포, P(A|B) (전기비저항 탐사 자료에 의한 확률), P(A|C) (탄성과 탐사 자료에 의한 확률)이다. 이들 그림은 각각의 RQD 문턱값(z_k)에 따라 각 지점에

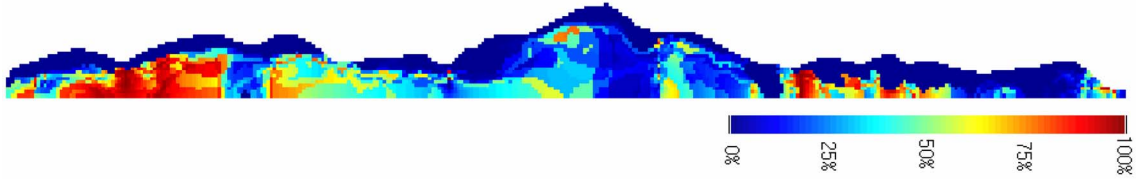


Fig. 7. Probability of locations considered as being over RQD 60 evaluated from direct borehole, resistivity and seismic tomography data.

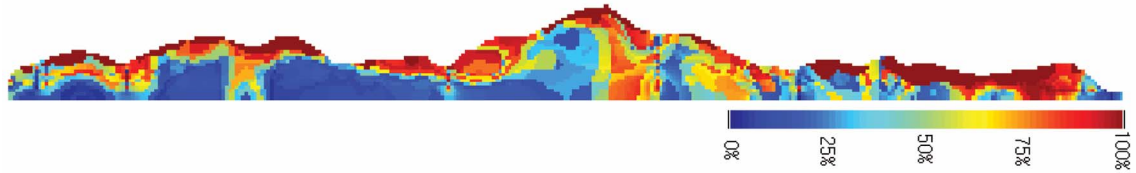


Fig. 8. Probability of locations considered as being below RQD 30 evaluated from direct borehole, resistivity and seismic tomography data.

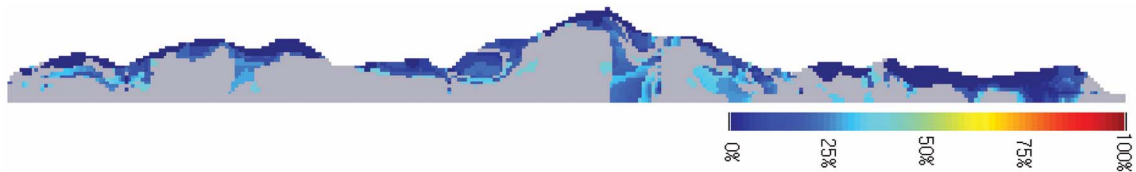


Fig. 9. Probability of locations wrongly classifying as below RQD 30 with 60% of belief.

서 그 보다 작거나 같을 확률을 보인다. 예를 들어, Fig. 6에서 $z_k = 20$ 인 그림의 경우, 대부분의 지역이 RQD가 20보다 작을 확률이 30% 이하이지만, 지표 부근에서는 비교적 확률이 높음을 보이고 있다.

Permanence ratio의 적용

Fig. 5와 6에 의하면, 각각의 탐사에 따른 경향이 잘 나타나고 있는 것으로 보인다. 즉, 전기비저항 탐사의 경우 구조적 경향에 따른 변화가 잘 나타나고 있는 반면, 탄성과 탐사의 경우 층서적으로 속도변화에 따른 변이가 반영되고 있다. 따라서 이와 같은 두 탐사 자료의 경향이 복합적으로 해석된다면 보다 실제에 가까운 추정이 이루어질 수 있을 것이다.

Fig. 7은 2.1절에서 제시된 전기비저항과 탄성과 속도 자료에 근거한 permanence ratio 법칙을 적용하여 RQD 값이 60 이상을 가질 확률을 나타낸 그림이다. 물론 해석자는 다양한 RQD 값에 대한 확률값을 구할 수 있다. 그림에서 높은 확률로 나타난 지역은 RQD 값이 60 이상을 가질 확률이 높다는 것을 의미하고, 상대적으로 터널이나 기타 지반공학적 적용에 있어 비교적 안정지역이라는 것을 의미한다. 안정지역을 의미하기 위한 RQD 값은 상황에 따라 달라질 수 있다.

또한 Fig. 8은 RQD 값이 30 이하로 나타날 확률을 위치에 따라 도시한 결과이다. 이는 상대적으로 암반의 안정성이 떨어지는 근거리 RQD 값을 30으로 가정한 것이며 경우에 따라 다양하게 바뀔 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 천부 지역에서 낮은 RQD 값을 보일 확률이 높음을 알 수 있

으며, Fig. 7과 Fig. 8을 최초의 사전 정보(Fig. 2)와 비교하면 이차 정보(전기비저항과 탄성과 속도)에 의해 많은 개선이 있었음을 알 수 있다.

이와 같은 확률론적 복합해석은 관심 대상이 되는 물성에 대한 추정 외에 다양한 정보를 제공할 수 있는데, Fig. 9는 이와 관련하여 새로운 정보를 제공한다. Fig. 8에서 비교적 불안정하다고 추정한 RQD 값 30 이하의 지역 중에서, 그 확률이 특정값(예를 들면 60%) 이상인 지역은 특히 위험하다고 (hazardous) 분류할 수 있을 것이다.

이런 지역은 위험 지역으로 분류되어 의사 결정권자에게 설계 및 시공과 관련한 기타 판단을 요구할 수 있는 지역이다. 즉,

$$\text{Prob}\{Z(u) < z_c | (n)\} > p_c \tag{3}$$

로 나타낼 수 있는데, 이는 임의의 지점에서의 RQD 추정값이 특정값(ex. 30) 보다 작을 확률이 $p_c (=60\%)$ 이상이 되면, 위험지역으로 분류하는 것이다. Fig. 9에서 회색이외의 색으로 나타난 지역은 이 기준에 의해 위험 지역으로 분류된 구간이다. 그런데 Fig. 6은 여기서 한 가지의 정보를 더 제공한다. 즉, 위험 지역으로 분류된 구간이 실제로는 위험 지역이 아닌 확률, 즉

$$\alpha(U) = \text{Pr}\{Z(u) \geq z_c | z_L^*(u) < z_c, (n)\} \tag{4}$$

을 추가적으로 제공한다. Fig. 9에 의하면, 지표에 가까운 천부 구간은 α 값이 매우 작게 나타나고 있어 위험 구간이 맞을 확

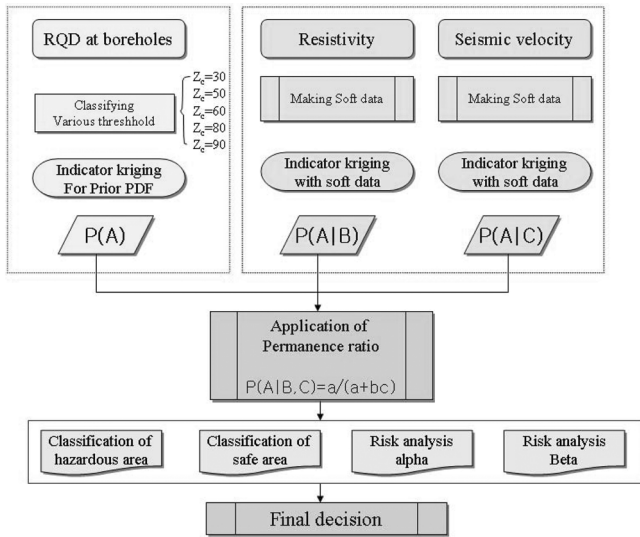


Fig. 10. Flowchart for probabilistic RQD evaluation and post processing with resistivity and seismic tomography data by permanence ratio.

률이 높으며, 중간 부분에서는 α 확률값이 30%~40%에 가까운 구간도 보이고 있다.

Fig. 10은 본 연구에서 제시한 복합해석 방법을 플로우 차트로 정리한 결과이다.

결론

물리탐사 자료의 복합해석을 통해서 탐사결과와 상관성을 갖는 임의의 물성을 확률적으로 추정하기 위한 새로운 방안을 제시하고자 하였다. 본 논문에서는 시추공이 없는 지점에서의 암반등급을 추정하기 위해 직접적으로 RQD값을 지정하는 방식을 이용하지 않는 대신에, 시추공 자료를 보완하는 탄성파와 전기비저항 탐사 결과를 복합하여 특정 RQD 값의 확률적 분포를 추정하였다. 물성의 확률론적 추정을 위해서는 각 단계에서 탐사 결과에 대한 확률적 처리가 필요한데, 이를 객관적으로 수행하기 위해 지구통계학적 접근 방법을 이용하였다. 즉, 시추공에서 확보한 RQD 값에 대해 지구통계학적 지시자 크리깅을 수행하고, 탄성파 속도와 전기비저항 자료에 대해서는 보조 자료를 활용한 지시자 크리깅을 수행하여 각각에 대한 확률분포를 구성하였다. 이를 이용하여 permanence ratio 범칙에 근거한 자료 통합을 수행하였다. 이와 같이 확률적으로 획득된 암반등급 평가 결과는 다양하게 이용될 수 있는데, 본 논

문에서는 위험 지역 분류를 위한 방법을 제시함과 동시에, 실제와 다르게 등급 평가가 이루어질 수 있는 가능성을 파악하는 오차 추정 기술도 함께 제시하여서, 사후 분석과 의사 결정을 위한 각종 정보를 제공하는 방안에 대해 제안하였다.

본 연구에서는 암반등급의 추정에 적용하였으나, 지반침하 가능성, 공동 존재 가능성 등 다양한 분야에 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 신진교수 연구지원 사업인 “지구통계학적 베이지안 방식에 의한 이중 물리탐사 및 보조 자료의 복합 역산 연구”의 지원을 받아 이루어진 연구임.

참고문헌

권병두, 이희순, 이규호, 임형래, 오석훈, 2000, 지하 동굴 탐지에 효율적인 지구물리탐사기법 연구: 제주도 만장굴을 대상으로, 한국지구과학회지, **21**, 408-422.

박정빈, 양영근, 김기주, 임헌태, 김영화, 2000, 검층물성과 코어 물성의 비교와 균열지수, 대한지질공학회 2000년 정기총회 및 학술발표회 논문집.

송무영, 김환석, 박종오, 2002, 시추공 물리탐사를 통한 지반물성과 암상과의 상관성 분석, 지질공학회지, **12**, 127-135.

오석훈, 정호준, 이덕기, 2004, 암반등급 평가를 위한 MT와 시추공 자료의 지구통계학적 복합해석, 물리탐사, **7**, 121-129.

Haas, A., and Olivier D., 1994, Geostatistical inversion- a sequential method of stochastic reservoir modeling constrained by seismic data, *The First Break*, **12**, 561-569.

Deutsch, C. V., and Journel, A. G., 1992, *Geostatistical software library and User's guide*, Oxford university press.

Journel, A. G., 2002, Combining Knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypothesis, *Mathematical Geology*, **34**, 573-596.

Oh, S., and Kwon, B., 2001, Geostatistical approach to Bayesian inversion of geophysical data: Markov chain Monte Carlo method, *Earth Planets Space*, **53**, 777-791.

Oh, S., 2006, Geophysical data integration from multiple sources by spatial approach, *One-day workshop on Geophysical Fusion*, KIGAM.

Torres-Verdin, C., Victoria, M., Merletti, G., and Pendrel, J., 1999, Trace-based and geostatistical inversion of 3-D seismic data for thin-sand delineation: An application in San Jorge Basin, Argentina, *THE LEADING EDGE*, **18**, 1070-1077.