

지구통계학적 방식에 의한 물리탐사 자료의 복합해석과 그 응용

오석훈¹⁾, 정호준²⁾, 서백수¹⁾

¹⁾강원대학교 지구시스템공학과, gimul@kangwon.ac.kr

²⁾(주) Human & Earth

Integrated Interpretation of Geophysical Data and its Application by Geostatistical Approach

Seokhoon Oh¹⁾, Hojoon Chung²⁾, Baek-Soo Suh²⁾

¹⁾Dept. Geosystem Engineering, Kangwon National University

²⁾Human & Earth Inc.

Abstract: A new way to integrate various geophysical information for evaluation of RQD was developed. In this study, we did not directly define the RQD value where borehole data are not sampled. Instead, we infer the probability of RQD values with prior probability from borehole direct data, and secondary supporting probability from resistivity and seismic tomography data. For the integration, 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 use the permanence ratio rule to integrate these information. The finally obtained result was also analyzed to fully utilize the probabilistic features. We show the probability of wrongly classifying the RQD evaluation and vice versa. This result may be used for decision making process based on the geophysical exploration.

Keywords: integration, resistivity, seismic tomography, permanence ratio, RQD, decision making, Geostatistics

1. 서론

최근 천부 지질구조 조사를 위한 물리탐사 분야의 기술 발전은, 자연스럽게 다양한 분야에서 물리탐사 기술에 대한 필요성을 인지하게 하고 그 활용범위를 기하급수적으로 넓히고 있는 상황이다. 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 위험부담을 최소화하고, 탐사 결과에 의한 최종 의견 결정 시에 신뢰도를 높일 수 있다는 데 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 탐사

에 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 수치적으로 하나의 자료처리 체계를 통해 해석하기는 어려운 것으로 알려져 있다.

최근 이의 극복을 위해 단순히 물성 추정의 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 반영하는 새로운 결과를 제공하며, 이 과정에서 추정하는 변수의 불확실성에 관한 정보를 제공함으로써 해석에 대한 신뢰도를 제공하여 최종결정권자의 의사 결정에 중요한 근거를 동시에 제공하는 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 지구통계학적 접근의 장점을 최대한 반영한 방법을 통해, 전기비저항과 탄성과 토모그래피 자료를 복합적으로 이용하여 암석의 분류기준인 RQD 값을 추정하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 지구통계학적 자료 복합

2.1. 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

$a = \frac{1-P(A)}{P(A)}$, $b = \frac{1-P(A|B)}{P(A|B)}$, $c = \frac{1-P(A|C)}{P(A|C)}$ 이다. 이 결과의 의미는 어떤 사건 A

가 일어날 확률을 자료 B와 C에 준거하여 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.

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 토모그래피 ($P(A|C)$)에 준거하여 추정하고자 한다.

2.2 확률값의 산정

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

본 연구에서는 대상 지역의 시추공에서 획득한 RQD 자료를 주요 정보(Primary information)로 규정하고 특정 값을 기준으로 지시자 변환 (indicator transform)에 의

한 Kriging을 수행하여 사전 확률분포 $P(A)$ 를 구하였다. 그림 1은 RQD 60 이상을 가지는 것으로 추정되는 확률 분포를 시추공 자료로부터 구한 결과이다. 그림에서 보듯이 자료가 한정되어 변동성이 적은 모습을 보인다.

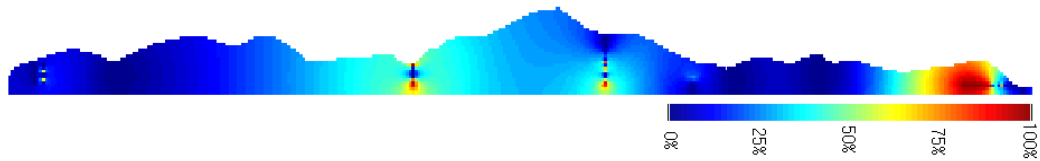


Fig. 1. Prior probability of RQD value over 60 from direct borehole information.

또한 그림 2와 3은 본 연구에서 보조 정보 (secondary information)로 사용한 전기비저항과 탄성과 토모그래피 해석 결과이다.

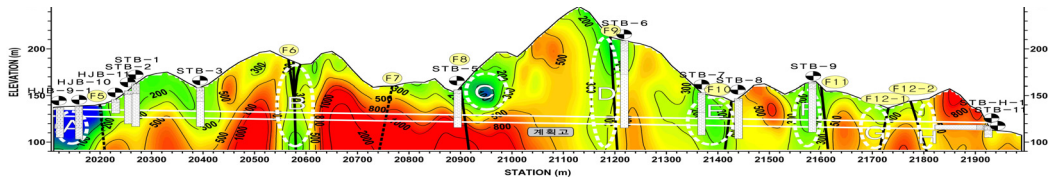


Fig. 2. Electrical resistivity survey result.

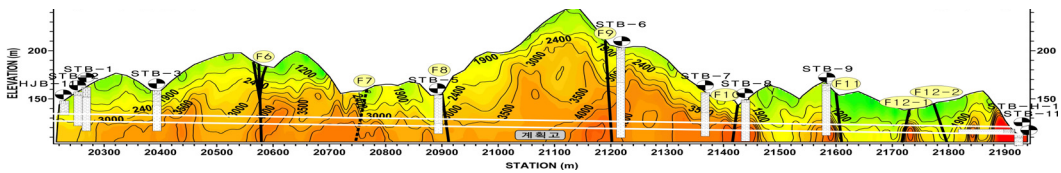


Fig. 3. Seismic velocity from tomography survey.

그림 2와 3의 탐사자료는 시추공에서의 RQD 값과의 상관도 분석을 통해 soft kriging information을 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.

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.

2.3 Permanence ratio의 적용

그림 4는 전기비저항과 탄성과 토모그래피 자료에 기반한 permanence ratio rule을 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 60이상을 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.

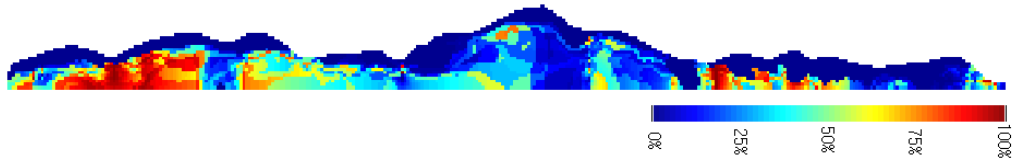


Fig. 4. Probability of locations considered as being over RQD 60 evaluated from direct borehole, resistivity and seismic tomography data.

또한 그림 5는 RQD 값이 30 이하로 나타날 확률을 위치에 따라 도시한 결과이다. 이는 상대적으로 암반의 안정성이 떨어지는 근거로 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 있으며, 그림 4와 그림 5를 최초의 사전 정보 (그림 1)와 비교하면 이차 정보 (전기비저항과 탄성과 토모그래피)에 의해 많은 개선이 있었음을 알 수 있다.

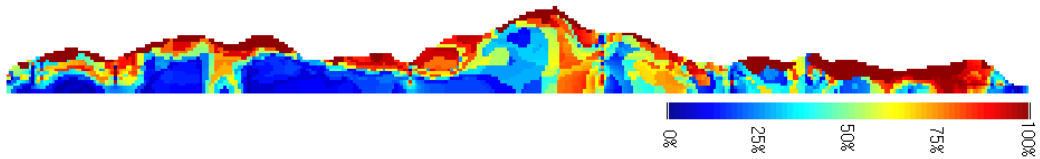


Fig. 5. Probability of locations considered as being below RQD 30 evaluated from direct borehole, resistivity and seismic tomography data.

이와 같은 확률론적 복합해석은 관심 대상이 되는 물성에 대한 추정 외에 다양한 정보를 제공할 수 있는데, 그림 6은 이와 관련하여 새로운 정보를 제공한다. 그림 5에서 비교적 불안정하다고 추정한 RQD 값 30 이하의 지역 중에서, 그 확률이 60% 이상인 지역은 특히 위험하다고 (hazardous) 분류할 수 있다. 이런 지역은 위험 지역으로 분류되어 의사 결정권자에게 설계 및 시공과 관련한 기타 판단을 요구할 수 있는 지역이다. 즉,

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

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

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

을 추가적으로 제공한다. 그림 6에 의하면, 지표에 가까운 천부 구간은 alpha 값이 매우 작게 나타나고 있어 위험 구간이 맞을 확률이 높으며, 중간 부분에서는 alpha 확률값이 30%~40%에 가까운 구간도 보이고 있다.

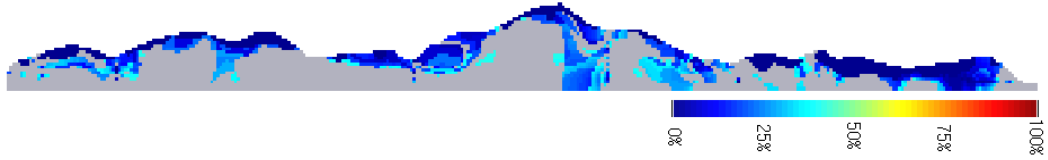


Fig. 6. Probability of locations wrongly classifying as below RQD 30 with 60% of belief.

그림 7은 본 연구에서 제시한 복합해석 방법을 플로우 차트로 정리한 결과이다.

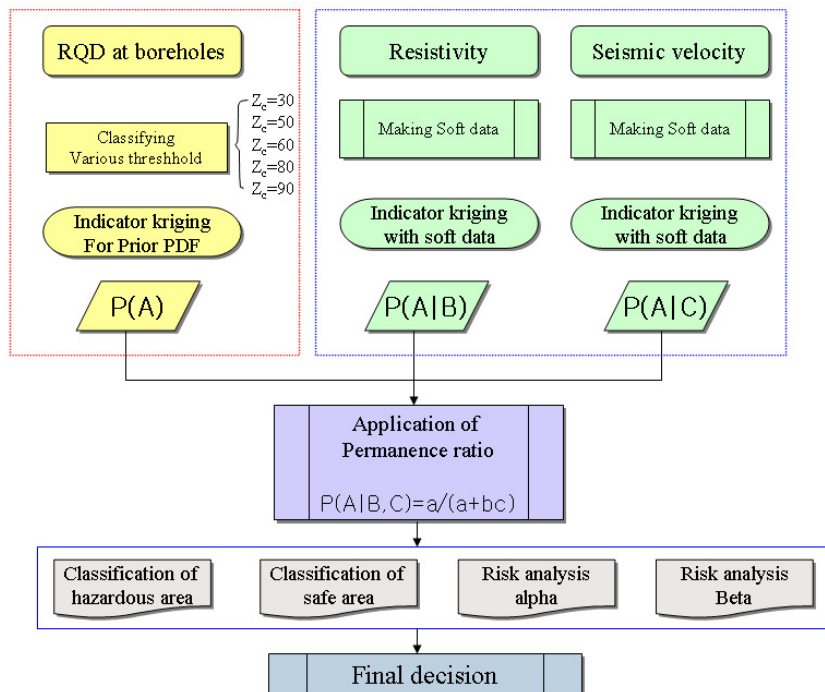


Fig. 7. Flowchart for probabilistic RQD evaluation and post processing with resistivity and seismic tomography data by permanence ratio.

3. 결론

본 연구에서는 permanence ratio에 의해 전기비저항과 탄성과 토모그래피 자료를 복합적으로 이용하여 RQD 값을 확률적으로 추정하는 방법에 대해 제시하였다. 또한 확률적으로 획득한 자료의 이점을 활용하여 사후 분석과 의사 결정을 위한 각종 정보를 제공하는 방법도 제시하였다.

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, 408-422
- 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.
- Oh, S and Kwon, B., 2001, Geostatistical approach to Bayesian inversion of geophysical data: Markov chain Monte Carlo method, *Earth Planets and 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.