

지구통계학을 활용한 지반정보 가시화 기법 개발

The Development of Technique for the Visualization of Geological Information Using Geostatistics

송명규, Myung-kyu Song, 김진하, Jin-ha Kim, 황제돈, Je-Don Hwang, 김승렬, Seung-Ryull Kim

(주)에스코컨설턴트 기술연구소, ESCO R&D Institute, ESCO Consultant Co., Ltd.

SYNOPSIS : A graph or topographic map can often convey larger amounts of information in a shorter time than ordinary text-based methods. To visualize information precisely it is necessary to collect all the geological information at design stage, but actually it is almost impossible to bore or explore the entire area to gather the required data. So, tunnel engineers have to rely on the judgement of expert from the limited number of the results of exploration and experiment. In this study, several programs are developed to handle the results of geological investigation with various data processing techniques. The results of the typical case study are also presented. For the electric survey, eleven points are chosen at the valley to measure the resistivity using Schlumberger array. The measured data are interpolated in 3-dimensional space by kriging and the distribution of resistivity are visualized to find weak or fractured zone. The correlation length appears to be around 5 to 20 meter in depth. Regression analyses were performed to find a correlation length. No nugget effect is assumed, and the topographic map, geologic formation, fault zone, joint geometry and the distribution of resistivity are successfully visualized by using the proposed technique.

Key Words : Geological information, Visualization, Geostatistics, Data processing

1. 서론

최상의 그래프는 보는 사람으로 하여금 단시간에 가장 적은 공간으로 최대의 정보를 전달하는 것이다. 지반정보의 있어서도 과학적 가시화는 공학적 판단에 도움을 주며, 자료의 부적절한 표현으로 인해 발생할 수 있는 오류를 줄여준다. 또한 설계단계에 있어서 지반자료의 수집은 필수 불가결한 것이지만, 설계 전 구간에 대한 조사의 빈도는 한계가 있으므로 설계자는 조사지역의 지반자료를 바탕으로 미 조사 지역으로 확장할 필요성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 지표지질조사, 탄성파탐사, 전기비저항탐사, 시추조사 등의 지반조사자료를 처리하는 방식을 자동화 할 수 있도록 프로그램을 개발하고, kriging 등의 지구통계학적 분석 알고리즘을 통해 처리된 자료를 직관적으로 표현하며, 이를 설계과정에 도입할 수 있는 방안에 역점을 두었다. 가시화에 필요한 데이터의 입력과 분석을 위한 프로그램을 Borland C++ Builder를 사용하여 개발하였고, 데이터의 가시화를 위해서는 미국의 Advanced Visual Systems Inc.에서 개발한 AVS/Express 가시화프로그램을 사용하였다.

2. 지구통계학 개요

2.1 지반의 특성규명

지반의 특성은 퇴적작용(sedimentation), 숙성작용(diagenesis) 및 구조작용(tectonism) 등의 차이로 위치에 따라 불균질하게 되지만 불균질성 속에서도 어떤 구조적인 연결성이나 연속성이 존재하게 된다. 따라서, 지반의 특성은 무작위 분포를 하는 공간 변수 형태로 나타낼 수 있다. 이때 시료치의 상관성은 단지 시료가 위치한 좌표에 대한 거리만의 영향을 받는 함수가 된다. 불규칙한 특성을 보이는 지층의 특성 규명을 위해서는 현대 수학의 확률 이론을 도입하여야 하는데, 이를 위한 첫 번째 단계로서 암석의 특성을 어떤 특정한 지점에 대하여 나타낼 수 있는 특성화된 값으로 상응시켜야 한다. 그런 다음에 이 값을 확률 밀도 함수(probability density function) 형태로 표현하여야 한다. 여기서 확률 밀도 함수란 주어진 변량의 영역 내에서 무작위 변수값이 나타날 수 있는 상대적인 빈도를 의미한다.

2.2 이론분포함수

이론분포함수의 모델은 총분산값(sill)의 존재 유무에 따라서도 구분할 수 있는데, 여기서 총분산(sill)이란 자료가 내포하고 있는 무작위분산(random variance)과 공간분산(spatial variance)의 합을 의미하는데, 총분산이 존재하는 모델은 구형모델(spherical model)과 지수모델(exponential model)로서 시료간의 거리가 멀어짐에 따라 서로 상관도가 낮아져서 일정거리 이상에 도달하게 되면 더 이상 시료사이에는 상관성이 존재하지 않게 된다. 총분산이 존재하는 모델에는 또한 영향권이란 매개 변수가 존재하는데, 여기서 영향권이란 일종의 상관성에 영향을 미치는 시료사이의 거리로서 상관길이(correlation length)라고도 한다. 반면 선형함수(linear model)는 총분산이 존재하지 않는 모델로서 상관성은 단지 시료 사이의 거리가 멀어짐에 따라 감소한다.

- 구형모델(spherical model)

$$\gamma(h) = C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right), \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = C, \quad h > a$$

- 가우스모델(gaussian model)

$$\gamma(h) = C \left(1 - \exp \left(-\frac{h^2}{a^2} \right) \right), \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = C, \quad h > a$$

- 지수모델(exponential model)

$$\gamma(h) = C \left(1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right), \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = C, \quad h > a$$

- 선형모델(linear model)

$$\gamma(h) = ph$$

여기서 C는 총분산치(sill value), h는 샘플들이 놓인 위치 사이의 거리, a는 상관길이, p는 직선의 기울기이다.

2.3 Kriging 이론 개요

Kriging 과정은 일종의 오류최소화 과정으로 많은 수치해석기법에서 사용하는 가중잔차법과 매우 유사하다. 즉, 임의의 변수의 특성으로부터 가능한 공간적인 분포양상을 미리 가정(1차원의 경우, 직선, 2차곡선, 3차곡선 등)하고 이를 수학적 모델로 만들어 이미 알려진 자료로부터 형상을 결정짓는 파라미터를 계산한다. 수치해석기법중 유한요소법에서 사용하는 형상함수가 kriging에서는 분포경향(trend)에 해당한다. 최소화 목적함수는 분포경향(형상함수)으로부터 추정된 값과 측정값을 비교하여 얻어진 오차함수로서 이함수를 최소화시키는 값을 찾아낼 수 있다.

3. 수직 전기비저항 결과의 지구통계적 접근

3.1 탐사 개요

계곡부의 단층파쇄대 위치파악을 위해 수직 전기비저항 탐사법을 시행하였다. 조사지점은 총 11곳으로 그림 1과 같다. 조사는 깊이에 대해 5m 씩 측정하였다. 수직탐사법은 지표면상의 한 점에서 그 하부의 심도에 따른 전기비저항의 수직적인 변화양상을 측정하고, 그 결과를 다른 지질학적인 정보 또는 지식과 대비시켜 지하의 구조를 더욱 상세히 파악하고자 하는 목적을 갖고 있다. 수직탐사는 대지에 공급되는 전극의 간격이 넓어지면 더 깊이 통과하므로 간격이 넓을수록 심부의 상태를 반영한다. 본 연구에서는 수직법 중 가장 많이 사용되는 Schlumberger 배열을 사용하였다.

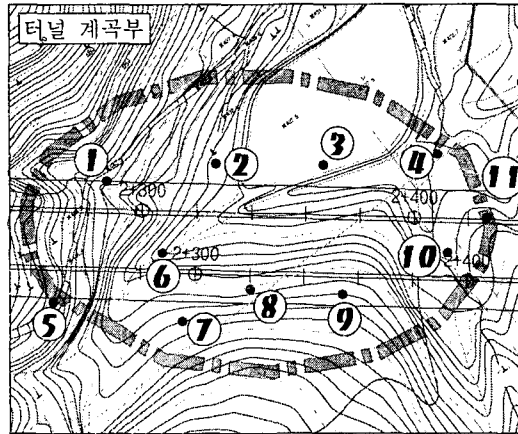


그림 1. 계곡부 전기비저항 탐사위치도

3.2 탐사결과

탐사결과는 표. 1과 같다. 지표하 20m로부터 50m에 이르는 구간에서 구조대가 분포하고 있는 경향이 인지되고 있으며 대체로 수직에 가까운 경사도를 보인다. 동서방향의 구조대 1개와 북동-남서 방향의 구조대 1개 등 2개의 구조대가 인지되고 있다. 그림 1에서 ⑤-⑥-②-③을 연결한 방향성과 ④에서 ⑩-⑪의 사이를 가로지르는 방향성을 가진 것으로 추정된다.

3.3 탐사결과의 분석 및 가시화

Kriging을 보다 정확히 적용하기 위하여 측정된 값을 회귀분석하여 가장 적합한 variogram 함수를 사용하고자 하였다. 측정위치 9,10,11의 결과는 covariogram이 일반적인 양상을 보이지 않는 관계로 분석대상에서 제외시켰다. 측정된 값을 semivariogram 형태로 하여 가정된 variogram 함수와 비교를 통해 오차를 최소화하고자 하였으며, 이를 위하여 genetic algorithm이 사용되었다. variogram 함수는 위에서 언급한바와 같이 구형, 지수형, 가우스형, 선형 함수를 대상으로 하였다.

$$f(a) = \sum_{i=1}^n (\gamma(h, a) - \gamma_i) \quad (1)$$

여기서 h는 시료간의 거리, a는 상관길이, γ 는 variogram 함수, γ_i 는 i번째 시료의 측정치이다. 분석결과 지수형 함수가 가장 오차가 적은 것으로 나타났으며, 선형함수가 가장 오차가 크게 나타났다. 각 함수별 상관길이(a)는 구형함수가 14.7, 지수형함수가 4.8, 가우시안함수가 5.35, 그리고 선형함수가 0.4인 것으로 조사되었으며, 회귀분석 결과를 통해 밝혀진 내용을 전기비저항의 분포를 추정하는데 반영하였다.

4. 지반구조 가시화 시스템 개발 및 수행결과

4.1 지반구조 가시화 시스템 개요

자료의 입력, 분석과 가시화 자료 생성 프로그램을 개발하였으며, 생성된 가시화 자료는 AVS/Express로 가시화작업을 수행하였다. 개발된 프로그램은 입력받아야 할 정보의 양이 많고, 종류도 다양하기 때문에 프로그램의 전체적인 디자인과 구성을 명료하게 유지할 수 있도록 하였으며, 특히 C++ 언어의 객체지향 특성을 최대한 이용하여 프로그램의 복잡성을 가능한 감소시키는데 노력하였다. 터널별 선형, 지형, 지층, 2차원 토모그래피, 터널단면, 시추공 BIPS, 중단 탄성과 결과, 수직전기비저항 자료, 연약대 정보 등은 모두 그 형태가 다르기 때문에 각각에 대해 저장 클래스와 자료 입력 클래스를 작성하여 모듈의 재사용 능력을 유지하였다. 각 클래스 객체를 통해서 입력된 자료는 독립된 객체로, 클래스 객체간에 정보를 주고받을 수 있는 객체지향 프로그래밍 기법을 이용하였다. 프로그램의 주요 구성은 크게 다음과 같이 이루어진다. 첫째, 터널단면형상과 선형자료의 입력과 출력. 둘째, 지형과 지층, 탄성과 토모그래피 및 수직 전기비저항 자료의 입력과 처리 및 출력. 셋째, BIPS 혹은 BHTV에 의한 절리 방향성 자료의 입력과 통계적 분석을 통한 임의 위치에서의 막장면의 절리패턴 예측 등이다. 입력된 자료는 처리모듈을 통해 최종적으로 AVS로 개발된 가시화 프로그램의 입력파일을 저장하는 작업을 수행하게 된다. 지형구조 가시화에는 지구통계학적 기법이 적용되어 비교적 정확한 지형을 재현할 수 있다. 가시화적용 위치의 지표고가 필요하며, 정확한 지형을 만들어 내기 위해서 대상영역을 포괄하는 자료의 수집이 권장된다. 지층구조 가시화에도 지구통계학적 기법이 적용되었으며, 지층구조 파악을 위해 시추조사 및 탄성과 탐사의 특성상 자료가 노선을 따라 1차원적으로 얻어지기 때문에 노선방향에 대해서 횡방향으로 지층구조를 예측하기 위한 분석을 수행하였다. 절리의 가시화는 BIPS와 BHTV등에 의한 방향성의 통계적 분석을 통해 가시화 했으며, 터널과의 관계를 입체적으로 표현하였다. 또한, 터널 시공시 굴착에 따른 막장면의 절리패턴을 추정하여 가시화 하였다. 단층등의 연약대 가시화는 시추와 탄성과 탐사 및 비저항 탐사등으로부터 얻어진 연약대의 위치, 방향 및 크기를 입력하여 연약대를 가시화 하였다.

4.2 지형구조 가시화

지형구조 가시화작업은 후속작업의 기본이 되는 작업으로서 다른 작업에 폭넓게 사용되기 때문에 지형구조에 대한 정보는 필수적이다. 지형을 평면에 대해 등고선으로 표현하는 방식은 2차원적 표현으로써 좋은 방법이나, 실제 지형을 3차원으로 가시화 할 경우 더 쉽고 빠르게 지형에 대해 인식을 할 수 있는 장점이 있다. 전체 지형정보를 얻은 경우, 터널노선정보에 따라서 영역을 설정하고, 영역에 대해서 자료를 추출하여 필요에 따라서 가시화 할 수 있는 필드파일 형태로 저장할 수 있다. 지형구조는 등고선은 물론 색으로 고도를 표현할 수 있다(그림 3).

4.3 지층구조 가시화

지층구조를 추정하기 위해서 가장 정확한 방법은 시추조사작업이다. 그러나 시추조사는 지점자료에 불과하다. 이에 반해 탄성과 탐사는 정확도가 다소 떨어지지만 광역에 대해 조사가 가능하기 때문에 시추조사결과와 탄성과 탐사결과는 상호보완적으로 사용될 수 있다. 가용한 자료를 모두 사용하여 통계학적 분석을 수행 지층구조를 파악하였으며, 가시화 하였다. 통계적 분석의 정확성을 높이기 위해서는 분석영역 전반에 걸쳐 고르게 자료가 분포하는 것이 바람직하지만 탐사방식의 한계에 의해 선형 혹은 부근의 자료만을 얻을 수 있다. 그러나 선형 종방향에 대하여 분석된 상관성이 횡방향에 대해서도 동일하게 적용된다는 가정하에 횡방향으로 일정범위 안에서 비교적 정확한 지층구조를 추정할 수 있다.

4.4 절리/단층/연약대 가시화

절리, 단층 및 연약대는 지반이 불균질성을 갖게 하는 요소로서 터널굴착에서 불연속면의 존재를 파악하고, 지하구조물의 안정성에 미치는 영향을 규명하는 것은 대단히 중요한 일이다(그림 4, 그림 5). 암반에 존재하는 불연속면은 3차원 공간상에 위치하기 때문에 터널과 불연속면 사이의 관계를 3차원 공간상에 표현

해야 불연속면이 터널에 미치는 영향을 정확하게 이해할 수 있다. 단적인 예로 횡단상에서 수평절리가 나타나는 경우에 경사방향에 따라서 터널의 안정성에 미치는 영향은 다르다. 따라서, 3차원 공간상에 표현하여 터널과의 관계를 시각화하는 작업은 중요하다. 가시화 방식은 자료가 측정된 방식에 따라서 다르게 적용될 수 있다.

4.5 터널 막장면 매핑

앞절에서 언급한 바와 같이 암반에 존재하는 불연속면은 3차원 공간상에 위치하기 때문에 터널과 불연속면 사이의 관계를 3차원 공간상에 표현해야 불연속면이 터널에 미치는 영향을 정확하게 이해할 수 있다. 따라서, 시추공조사 및 노두관찰 결과를 종합한 절리의 평균방향성 등의 통계적 데이터를 이용하여 터널내에 예상되는 불연속면을 입체적으로 가시화하는 것은 불연속면 특히 절리와 터널과의 관계를 이해하는데 도움을 준다(그림 6). 또한, 시공시 막장면의 주절리 방향에 대한 예측이 가능함으로 막장면 매핑시 절리의 패턴을 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 추정 불연속면의 생성은 BHTV 혹은 BIPS의 결과로부터 분석된 주절리군을 추계적 기법을 이용하여 처리함으로써 이루어진다. 통계변수는 절리의 방향성, 절리의 길이, 방향성 편차, 길이편차 등이 될 수 있다. 절리방향성의 통계적 분포함수는 반구정상분포함수를 사용하였으며, 터널굴착 예정지 전역에서의 절리패턴을 예측할 수 있는 모듈을 작성하였다.

4.6 탄성과 토모그래피 및 전기비저항 3차원 분포추정

탄성과 토모그래피 및 수직 전기비저항을 통해서 얻어진 자료를 이용하여 3차원 kriging 방법 및 inverse distance법을 통해서 공간상에서의 탄성과속도 및 전기비저항치의 분포를 얻었으며, 이를 가시화하였다(그림 7). Kriging의 적용시 trend 함수는 2차원함수, 이론분포함수는 지수형 함수를 사용하였다.

5. 결론

지반조사자료의 통계적 분석과 실시간 3차원 가시화 구현 시스템 개발로 가시화뿐만 아니라 지반조사자료의 종합적인 분석을 통한 종합 설계시스템을 구축하였다. 가시화를 위한 시스템의 분석자료는 전문가의 판단에 도움을 줄뿐만 아니라 나아가 객관적인 근거자료로서 활용될 수도 있을 것이다. 지형자료, 지층구조, 탄성과 분석결과는 kriging법을 이용하여 공간보간을 수행하였고, 연약대의 위치와 방향 추계적 기법을 이용하여 구현함으로써 입체적 가시화를 실현하였다. BIPS 탐사로부터 분석된 절리자료를 통계적 처리를 통해 공간상에 위치시키고 가시화하여 터널과 절리의 상관관계를 분석하고 수치해석에 반영하였다. 특히 연약대 예상구간에 대하여 실시한 탄성과 토모그래피 결과를 거리반비례법에 의해 공간적으로 보간함으로써 굴착 예정지의 상태를 추정하였다. 같은 맥락에서 전기비저항 탐사결과 예상되는 연약대를 입체적으로 표현하였으며, 이를 연약대 통과계획 수립에 활용하였다. 또한, 개발된 프로그램에 실제 시공시 조사된 자료를 입력하여 실시간 가시화 기술을 통해 사전분석을 수행, 안전한 시공을 유도할수 있다.

참고문헌

1. Rendu, J.M., "An Introduction to Geostatistical Methods of Mineral Evaluation", *South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1978
2. Priest, S.D., "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", *Chapman & Hall*, 1993
3. AVS/Express manual ver. 4.0, *Advanced Visual System Inc.*, 1998
4. Løset, E., N. Barton, R.K. Bhain, C.G. Rawligns, G. Vik, "A System for Presentation of Engineering Geological Data for Tunnel Design, Tunnelling and Ground Conditions", *Balkema*, pp. 391-396, 1994
5. Koyama, S. & R. Morita, "A 3D CAD Geological Analysis System, Tunnelling and Ground Conditions", *Balkema*, pp. 385-390, 1994
6. Haftka, R.T., Z. Gürdal, "Elements of Structural Optimization", *Kluwer academic publishers*, 1992

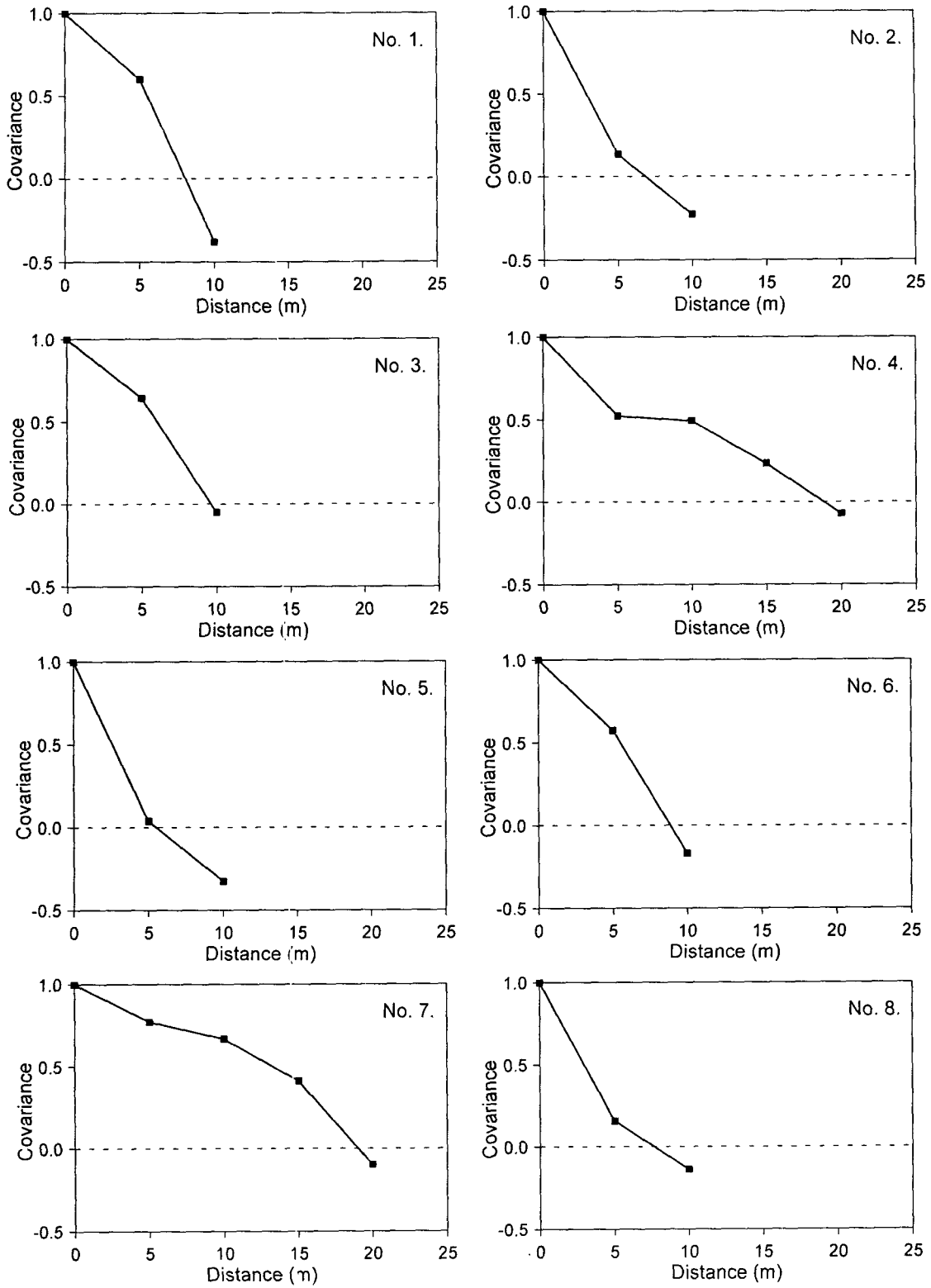


그림 2. 측정위치별 covariance 양상

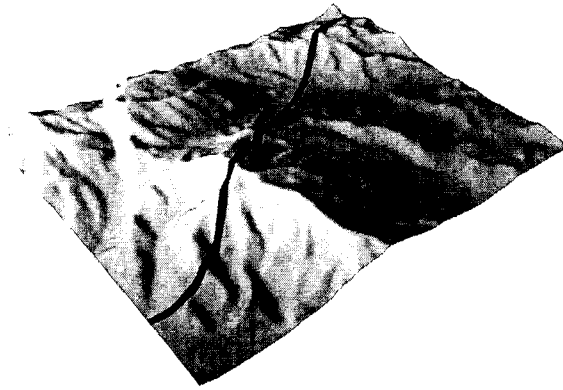
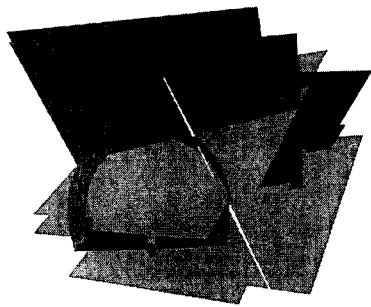
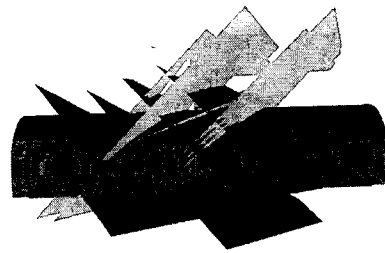


그림 3. 지형 및 지표에 투영된 터널선형



(a) 정면



(b) 측면

그림 4. 절리 가시화

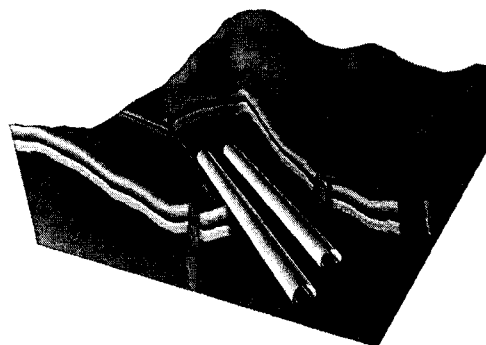
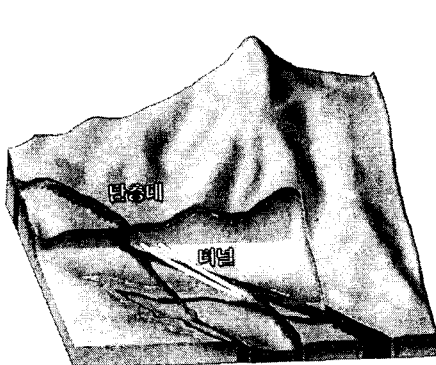
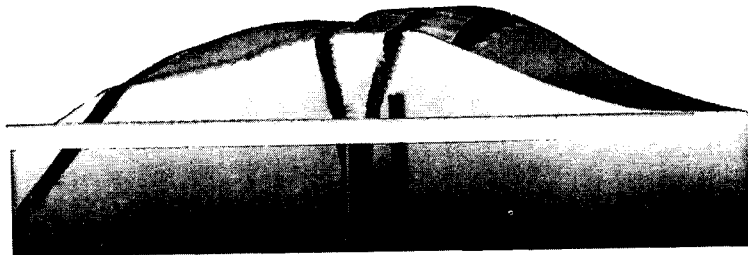


그림 5. 지층 및 단층/연약대 가시화

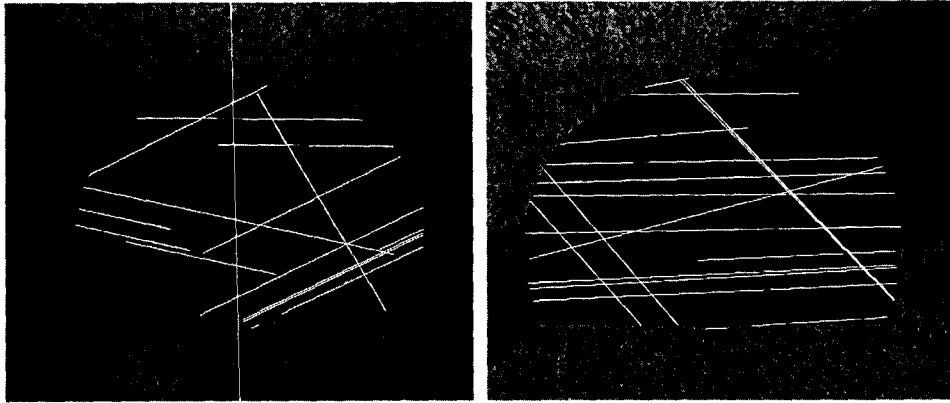


그림 6. 터널 막장면 매핑

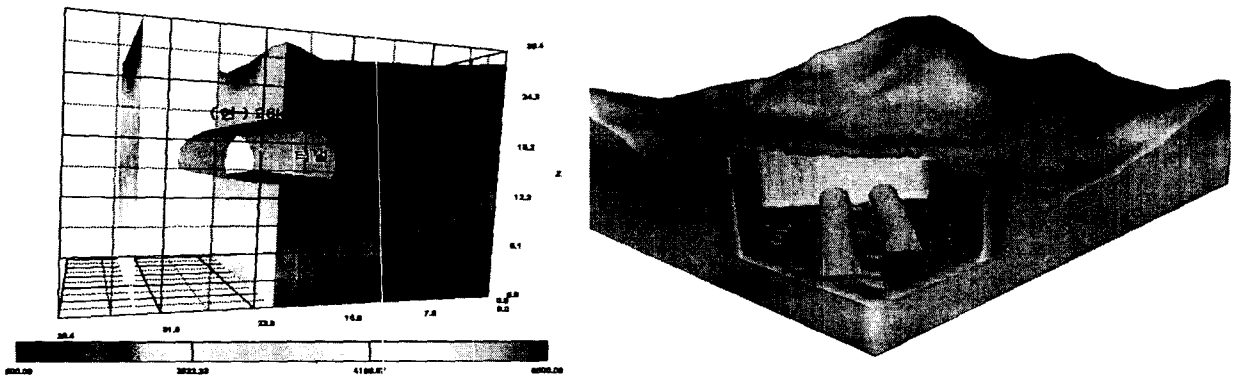


그림 7. 탄성과 및 전기비저항 분포추정

표 1. 11개 조사위치에서의 심도별 전기비저항치

| 구분 | 조 사 지 점(비저항, Ωm) | | | | | | | | | | |
|----|---------------------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ |
| 0 | 816 | 2414 | 447 | 1913 | 2031 | 9684 | 37833 | 17052 | 9949 | 11862 | 9408 |
| 5 | 1272 | 3874 | 493 | 1100 | 5025 | 1606 | 2736 | 3779 | 2950 | 187 | 2267 |
| 10 | 8257 | 2078 | 1134 | 3335 | 393 | 4945 | 934 | 1118 | 568 | 166 | 606 |
| 15 | 24362 | 2201 | 3444 | 3137 | 714 | 7978 | 1233 | 1702 | 451 | 533 | 959 |
| 20 | 29208 | 2887 | 4408 | 2121 | 1496 | 8116 | 1374 | 1217 | 871 | 1400 | 2425 |
| 25 | 25140 | 2942 | 4107 | 1798 | 2564 | 7298 | 1639 | 1341 | 3499 | 1885 | 3221 |
| 30 | 17892 | 2379 | 4107 | 2152 | 3103 | 6160 | 2241 | 1495 | 5319 | 2241 | 3221 |
| 35 | 17892 | 2000 | 3041 | 3007 | 2781 | 5189 | 3228 | 1870 | 6155 | 2399 | 3567 |
| 40 | 12554 | 2000 | 2107 | 3902 | 2781 | 4555 | 3228 | 1870 | 6155 | 2399 | 3540 |
| 45 | 12554 | 2060 | 2107 | 3902 | 2874 | 4555 | 4336 | 2585 | 18538 | 6787 | 3540 |
| 50 | 16684 | 2060 | 745 | 11276 | 2874 | 3351 | 4336 | 2585 | 18538 | 6787 | 5302 |