

# 지구통계학적 기법을 이용한 터널 주변 암반물성의 3차원 공간정보 모델링

임종세<sup>1)</sup>, 최용근<sup>2)</sup>, 김태혁<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한국해양대학교, <sup>2)</sup>지오제니컨설턴트, <sup>3)</sup>삼성물산 건설부문

## 1. 서론

지반조사의 기본적인 목적은 암반 물성 값의 공간적인 추정치의 신뢰성을 증가시키는 것이며, 설계자가 암반 특성치의 불확실성을 줄일 수 있는 유용한 방법을 사용한다면 설계의 안전성은 확보된다고 할 수 있다.

컴퓨터의 발전으로 많은 양의 자료 분석이 편리해짐에 따라 여러 분야에서 자료의 통계학적 분석의 중요성에 대한 인식이 확산되고 있으며, 최근 석유공학·수리지질학·지질공학·암반공학 분야에서도 지구통계학적 기법을 이용한 자료 해석이 많이 이루어지고 있다. 일반통계학에서 다루는 자료는 그 자료를 설명하기 위한 각각의 변수들이 서로 독립적인 상호관계에 있다고 보고 해석하나, 지구통계학에서는 각각의 변수들이 서로 어떠한 공간적인 연관성이 존재하는가를 밝히는 것에 초점을 두고 있다.

이 연구에서는 지구통계학적 해석기법을 이용하여 지반조사에서 얻어진 시추공 분석 자료로부터 주변 암반의 공학적 특성을 예측하고자 하였다. 해석 대상이 되는 암반의 공학적 특성은 터널 구간의 설계 지반정수 산정과 지보패턴 선정에 활용되는 암반분류 값인 RMR과 Q-System이다. 암반의 공학적 특성을 3차원 공간정보로 모델링하기 위해 터널 주변 지역의 지형을 정확히 고려하고, 수평방향과 수직방향의 이방성 모델을 이용하여 최소분산의 불편선형 추정치를 구하는 지구통계학적 방법을 사용하였다.

이러한 방법으로 해석 영역에서 현실성 있는 암반물성 자료의 공간적 분포를 생성할 수 있으며, 이 결과를 토대로 설계 시 예측이 필요한 영역의 신뢰성 있는 암반 물성을 제공할 수 있다.

## 2. 지구통계학적 분석법

### 2.1 공간적 변화 분석

지구통계학에서 자료의 공간적 분포특성을 분석하는데 가장 많이 사용되는 도구는 베리오그램(Variogram)이며 다음 식과 같이 정의된다.

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [V(x_i) - V(x_i+h)]^2$$

여기서  $\gamma(h)$ 는 반베리오그램을 의미하며,  $N(h)$ 는 자료 쌍의 수이며,  $h$ 는 분리거리이다.  $V(x_i)$ ,  $V(x_i+h)$ 는 각각  $x_i$ ,  $x_i+h$  위치에서의 자료 값이다. 베리오그램 값이 일정해지는  $h$ 값을 상관길이(Correlation Length) 또는 영향반경(Range)이라 하며, 이 때의 베리오그램 값을 문턱값(Sill)이라고 한다. 일반적으로 많이 사용되는 베리오그램 모형은 너깃(Nugget) 영향 모형, 구형 모형, 지수 모형, 가우시안 모형, 선형 모형 등이다.

## 2.2 이방성 모형

불균질 암반특성 변수의 이방성은 공간적 상관관계의 이방성 여부에 따라 광역적으로 정해진다. 상관관계 이방성에는 모든 방향으로 분산은 같고 상관거리만 다른 기하학적 이방성(Geometric Anisotropy)과 방향에 따라 분산과 상관거리가 모두 다른 지역적 이방성(Zonal Anisotropy)이 있다. 기하학적 이방성 모형은 장축 방향과 단축 방향의 베리오그램이 다른 영향반경에서 같은 문턱값을 가지게 된다. 이 형태는 그림 1(a)와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 연속성이 가장 크게 나타나는 장축방향의 영향반경이  $a_1$ , 가장 작은 연속성을 나타내는 단축방향의 영향반경이  $a_2$ 이다. 양 방향 모두 같은 문턱값 값을 가진다. 이러한 형태는 주로 평면적 방향 자료를 분석할 때 많이 관찰된다. 지역적 이방성은 기하학적 이방성보다 일반적인 형태를 가진다. 지역적 이방성은 최대, 최소 연속성 방향에서의 영향반경과 문턱값 모두가 다르게 될 수 있다(그림 1(b)). 이 이방성 형태는 전형적으로 수직(시추공) 방향의 베리오그램과 평면 방향의 베리오그램이 비교될 때 나타난다.

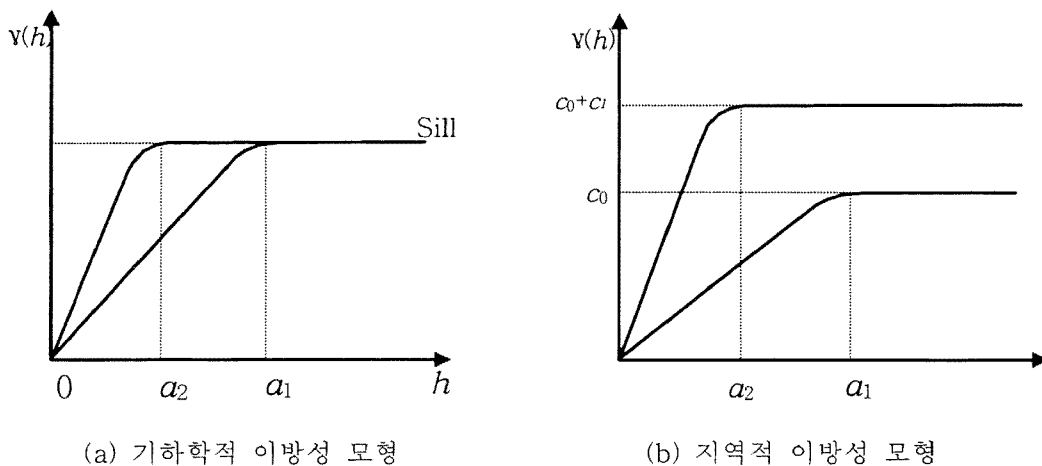


그림 1. 이방성 모형

### 2.3 크리깅

지구통계학에서 크리깅(Kriging)은 가중 이동평균 기법중의 하나로 특정한 위치나 블록에 추정된 값을 지정해주는 데 사용되며, 추정된 값은 추정하고자 하는 위치의 주변 값으로부터 가중 조합하여 얻어진다. 크리깅은 미지의 변수에 대한 최적 선형 불편 추정자(Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)를 산출하는 추정기법이다. 크리깅은 임의의 점 혹은 임의의 블록의 자료를 실측 자료의 가중조합에 의해 추정하기 때문에 선형이라고 하며, 불편이라는 것은 크리깅의 오차 혹은 잔차의 평균이 0이 되도록 추정하기 때문이다. 또한 최적의 추정법이란 오차의 분산이 최소가 되도록 추정한다는 것이다. 다른 추정방법(거리가중치법, 다각형법 등)도 선형이며 이론적으로 불편이 되게 추정하지만 크리깅이 다른 방법과 다른 점은 오차의 분산을 최소화시킨다는 것이다. 일반적으로 크리깅을 수행하는 데에는 분석하고자 하는 지역 블록에 대한 일변량 통계값과 베리오그램 모델, 이방성 매개변수들과 추정하고자 하는 변수에 대한 개괄적 서술 등과 같은 매개변수에 대한 고려가 선행되어야 한다.

크리깅 시스템 중 정점 크리깅(Point Kriging)은 채취한 무작위 물성 자료로부터 물성을 알고자 하는 임의의 정점에서의 물성을 추정하는 방법이다. 그림 2는 두 개의 실제자료  $z(x_i)$ ,  $z(x_j)$  간 변동도  $\gamma(x_i, x_j)$ 와 하나의 실제자료  $z(x_i)$ 와 하나의 정점에서 추정값  $z_v^*$ , 변동도  $\gamma(x_i, v)$  관계를 보여주고 있다.

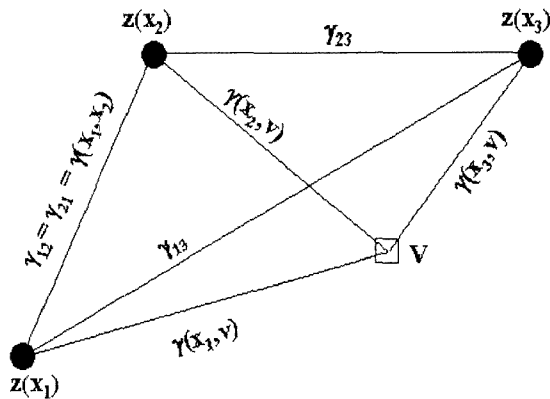


그림 2. 크리깅을 위한 정점 사이의 공간적 변화 분석

정점 크리깅 중 단순 크리깅(Simple Kriging)은 관측값의 선형조합과 오차분산을 최소화 하는 가중치를 이용하여 내삽 지점의 추정값을 예측하는 방법이다. 이 방법은 실제 물성자료의 대표값을 알고 있을 때 사용하는 것으로 실제로 대표 값을 예측하는 것이 불가능하므로 실용적이지 못하다. 반면 정상 크리깅(Ordinary Kriging)은 실제 물성치의 대표값을 알지 못할 경우에 이용되는 것으로 추정값의 편향을 해결하고 오차분산을 최소화 하여 추정값을 예측하는 방법이다.

### 3. 터널주변 암반 물성 해석

#### 3.1 해석 영역

터널 주변 지역에서 광범위하게 실시된 조사결과를 이용하여 암반의 공학적 특성 분포를 3차원적으로 모델링 하였다. 해석에 이용된 자료는 터널 주변 지역의 지형과 시추코어로부터 평가된 RMR 및 Q값이다. 해석의 효율성과 결과의 시각화를 위해 조사영역의 수평방향이 터널 방향과 평행하도록 위치시켰으며, 그림 3과 같이 1,834m × 976m의 영역을 갖도록 해석 범위를 설정하였다. 해석 영역 내에 설치된 시추공은 모두 23개이며, 각각 한 개씩의 수평시추공과 경사시추공이 포함되어 있다(그림 3 참조). 또한 수치 지형도에서 얻어진 해석 영역의 지형 정보를 정확하게 반영하여 전체 영역에서 현장감 있는 정보를 제공할 수 있도록 하였다. 그림 4는 해석 영역에서 2개의 터널 위치에 해당하는 종단면도이다.

전술한 바와 같이 해석 대상이 되는 암반 물성은 터널 구간의 설계 지반정수 산정과 지보패턴 선정에 필요한 암반 분류 값인 RMR과 Q-System 값이다. 해석은 전체 대상 영역에서 지구통계학적 기법을 이용하여 RMR과 Q값의 3차원적 분포를 계산하고, 터널시공이 이루어지는 위치 주변에서 RMR과 Q값의 분포를 평가하는 과정으로 수행되었다.

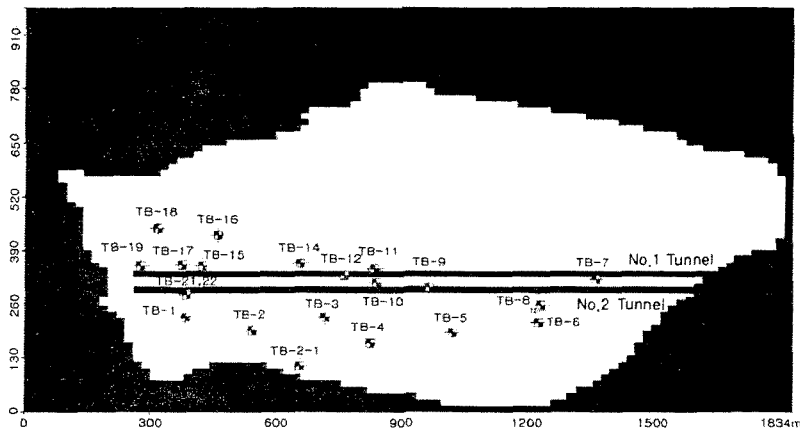
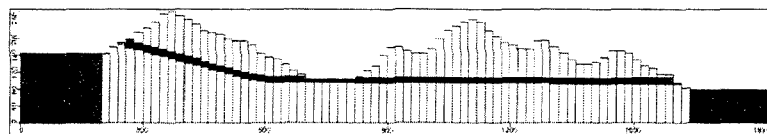
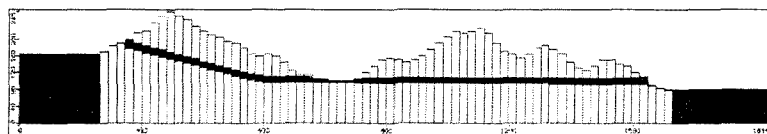


그림 3. 공간정보 모델링을 위한 해석영역 설정 및 시추공 위치



(a) No.1 Tunnel



(b) No.2 Tunnel

그림 4. 터널에 해당하는 해석 위치의 종단면도

### 3.2 RMR에 대한 공간정보 모델링

RMR 값의 공간적 변화를 해석하기 위해 사용된 자료는 23개의 시추공 중 수평과 경사 시추공을 제외한 21개의 수직시추공에서 얻어진 230개 자료이다. 분석에 사용된 RMR 자료에 대한 히스토그램과 일변량 통계량은 그림 5와 같다.

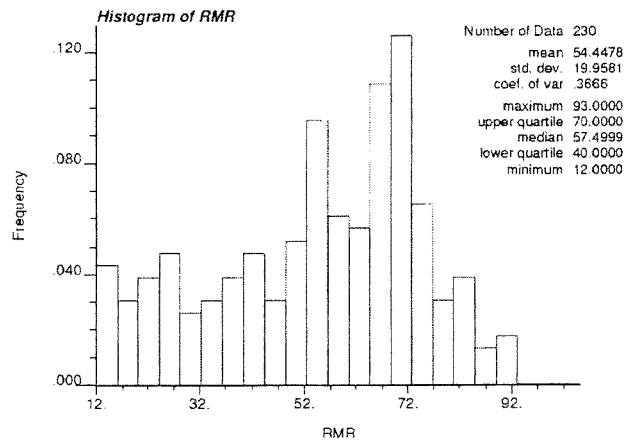


그림 5. RMR 자료에 대한 일변량 통계량

베리오그램 분석을 수행하여 RMR 자료의 공간적 변화를 조사한 결과 수평방향과 수직 방향(시추공 방향)에서 얻어진 분석값이 다르게 나타나는 이방성 모델로 판단되었으며, 수평 방향과 수직방향에 대해 얻어진 각각의 베리오그램 그림을 이용하여 분석한 결과 너깃이 있는 지수형 모델로 결정되었다(그림 6).

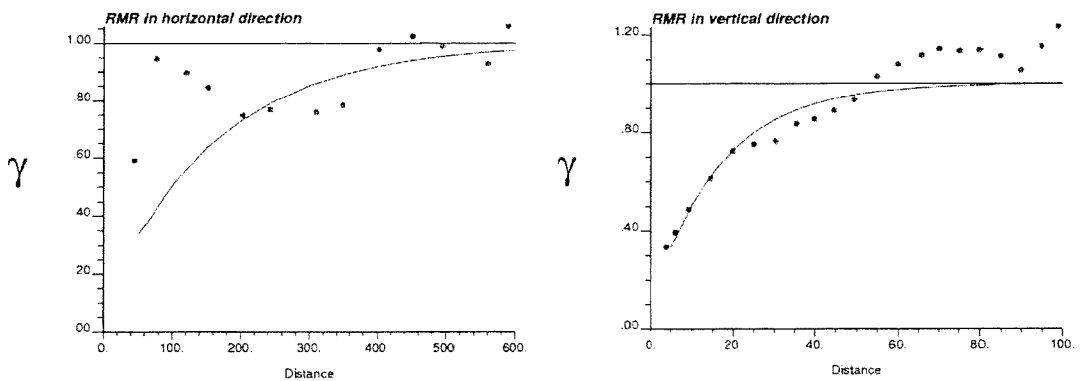
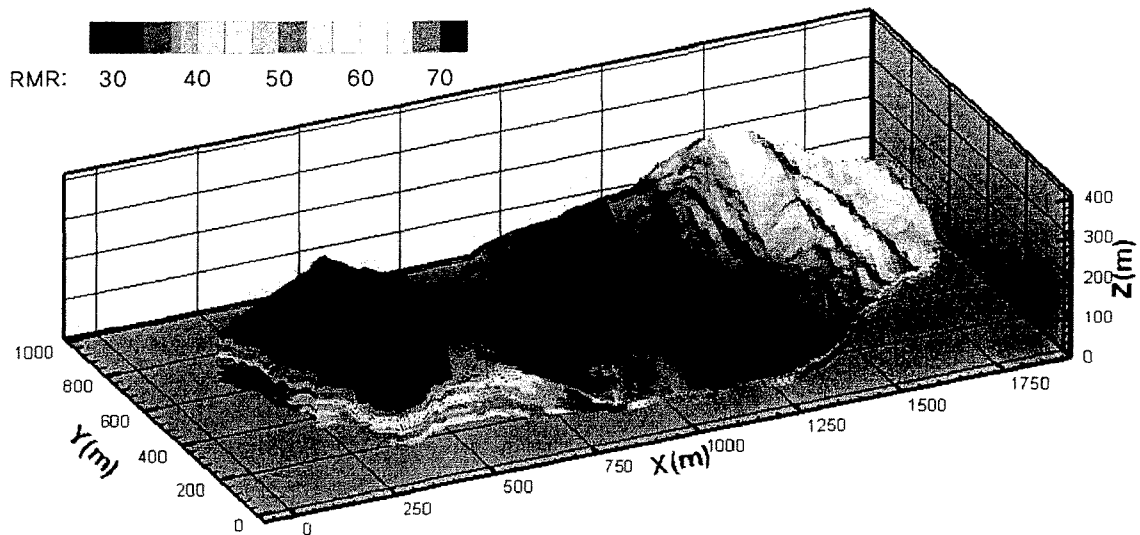


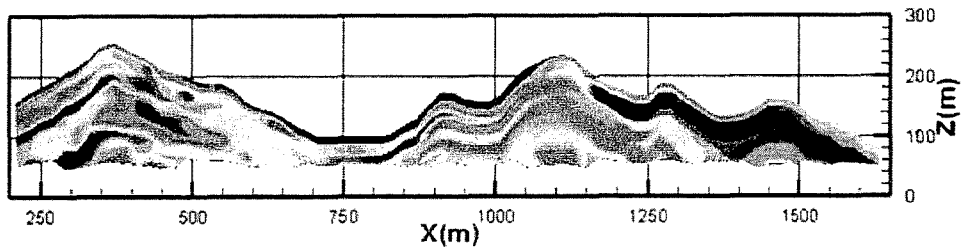
그림 6. RMR 자료의 베리오그램 모형

시추공의 RMR 자료와 크리깅을 통해 생성된 자료의 통계적 특성은 평균의 경우 원 자료에 근접한 값을 보이고 있으나 크리깅의 특성상 표준편차는 원 자료에 비해 작은 값을 나타내 다소 평탄한 예측 값을 제공한다.

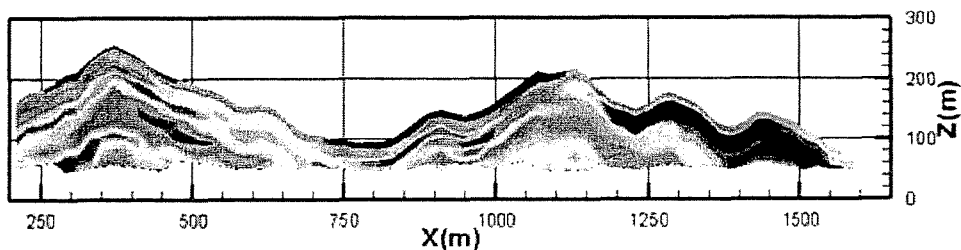
분석결과 터널 시점부근(그림 3의 좌측)과 중앙부 앞쪽 면에서 매우 낮은 RMR 값이 분포하는 것으로 평가되었다(그림 7(a)). 터널이 위치하게 될 지점에서의 RMR 분포는 그림 7의 (b) 및 (c)와 같다. X좌표의 1,050~1,200m 구간에는 시추공이 위치해 있지 않아 실제 예상되는 RMR 값보다 작게 예측되었을 가능성이 있으며, 비교적 시추공이 많은 지역인 X좌표 300~500m에서는 비교적 신뢰성 있는 예측값을 제공하고 있는 것으로 판단된다. 터널 심도에 대한 RMR 3차원 분석결과 일부 단층 통과 구간을 제외한 전 구간에서 비교적 높은 암반등급이 분포하는 것으로 평가되었다.



(a) 전체 해석영역에서의 3차원 RMR 분포



(b) No.1 터널 위치에서의 2차원 RMR 분포



(c) No.2 터널 위치에서의 2차원 RMR 분포

그림 7 해석 영역에서의 RMR 분포

### 3.3 Q-System에 대한 공간정보 모델링

분석결과 Q값의 분포는 RMR의 분포 특성과 달리 로그정규분포의 형태를 보이고 있으므로 Q값의 분석에는 원 자료값에 로그를 취해 변환한 값을 이용하였다. 원 자료와 로그 변환한 자료의 히스토그램과 일변량 통계량은 그림 8과 같다.

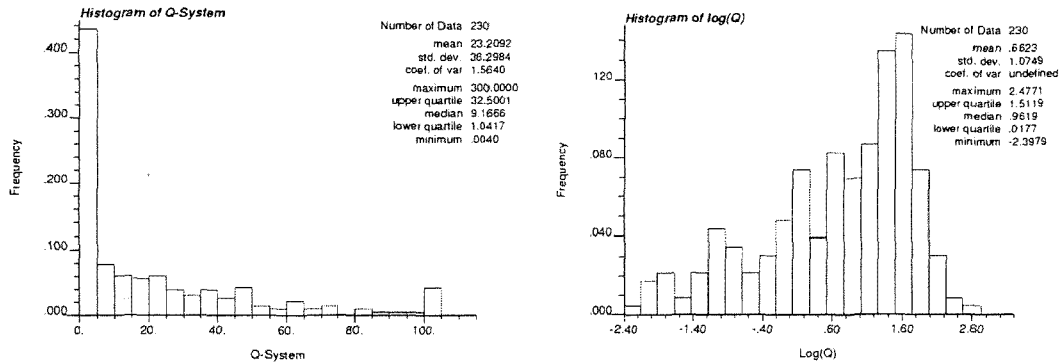


그림 8. Q-System 자료와 로그 변환한 자료의 일변량 통계량

변환된 Q-System 자료의 공간적 변화를 분석하기 위해 베리오그램 분석을 수행한 결과 수평방향과 수직방향(시추공 방향)에서 얻어진 분석값이 다르게 나타나는 이방성 모델로 판단되었으며, 수평방향과 수직방향에 대해 얻어진 각각의 베리오그램 그림을 이용하여 분석한 결과 너깃이 있는 지수형 모델로 결정되었다(그림 9).

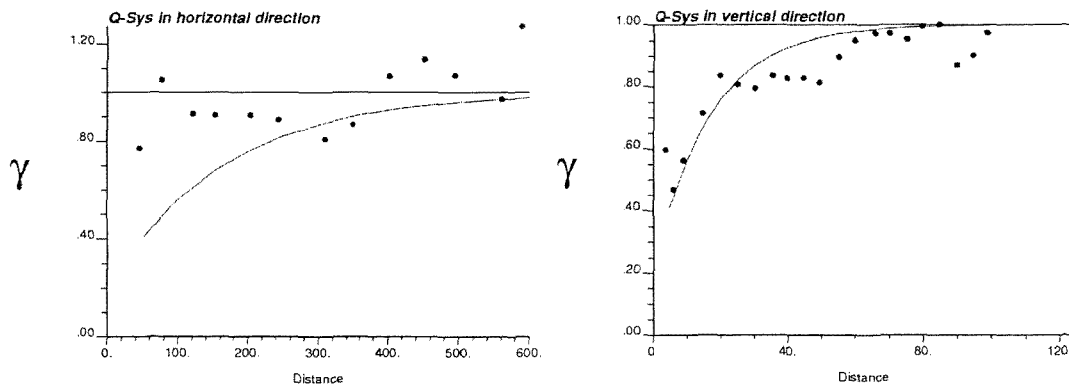
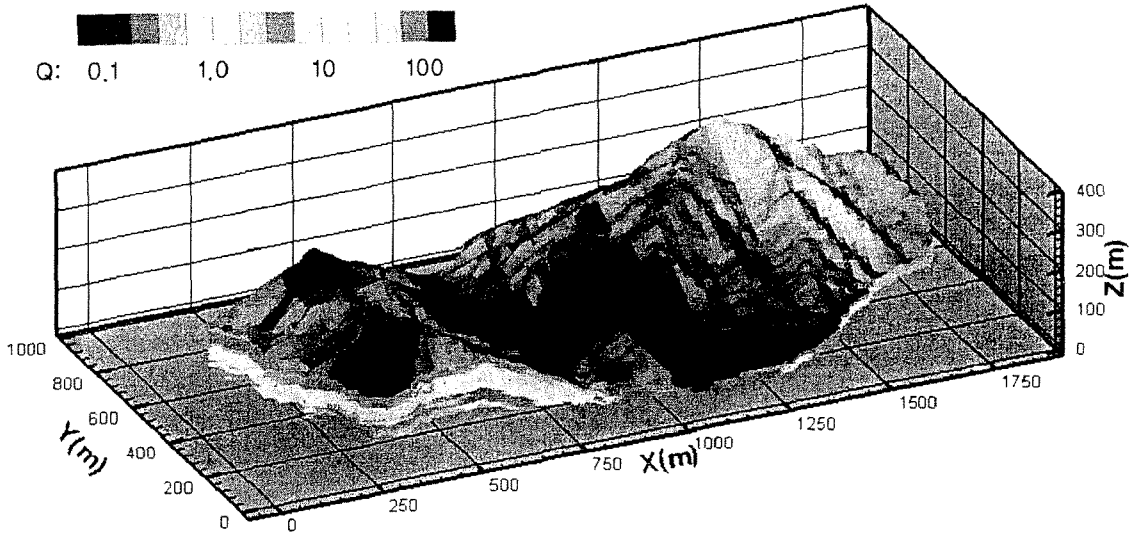


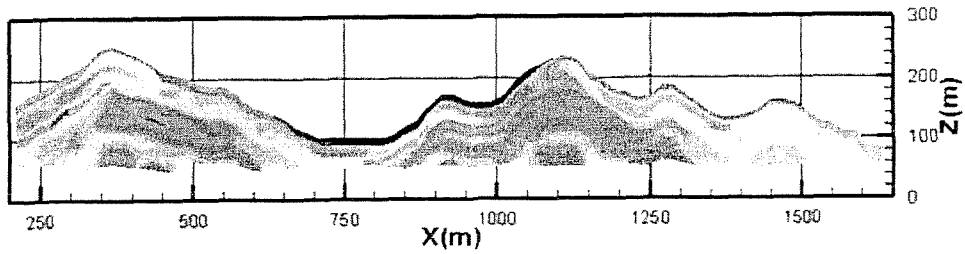
그림 9. Q-System 자료에 대한 베리오그램 모형

베리오그램 분석을 통해 얻어진 이방성 모델을 이용하여 3차원 정상 크리깅 방법으로 Q-System에 대한 3차원 공간 분포를 얻었다. 전체 해석 영역에 대한 Q값의 3차원 분포는 그림 10(a)와 같으며 터널이 위치하게 될 지점에서의 분포는 그림 10(b) 및 (c)와 같다.

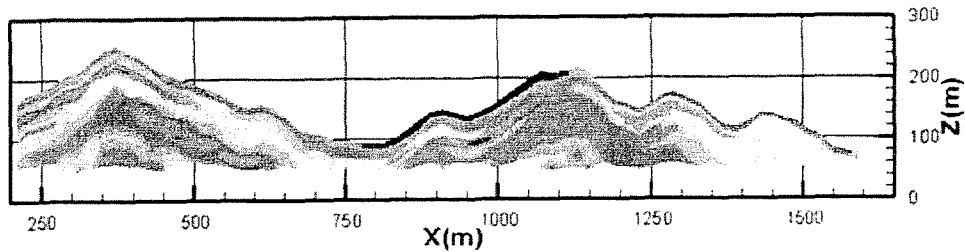
일반적으로 동일 지점에서 분석된 RMR과 Q값의 분포가 높은 상관관계(분석에 사용된 자료의 경우  $R^2=0.95$ )를 나타내므로 3차원적으로 분석된 결과도 유사할 것이라고 기대할 수 있다. 이 연구에서는 전체적인 분포 경향은 유사하게 나타났으나, Q값의 경우 No.2 터널의 시점부와 중앙부근에서 RMR에 비해 더 낮게 평가되는 결과를 보였다.



(a) 전체 해석영역에서의 3차원 Q-System 값 분포



(b) No.1 터널 위치에서의 2차원 Q-System 값 분포



(c) No.2 터널 위치에서의 2차원 Q-System 값 분포

그림 10. 해석 영역에서의 Q-System 값 분포



#### 4. 결론

이 연구에서는 지구통계학적 기법을 이용하여 지반조사에서 얻어진 자료를 이용하여 암반물성을 추정하는 방법을 제시하고, 이 방법을 RMR과 Q-System 값에 적용하여 터널 주변 암반물성에 대한 3차원 공간정보 모델링을 수행하였다. 이로부터 조사 지역의 지형과 암반물성의 이방성을 고려하여 해석 영역에서 현실성 있는 암반물성 자료의 3차원 공간적 분포를 생성할 수 있었다. 이 방법은 기존의 여러 유사한 해석이 지형특성과 공학적 특성의 이방성을 적절하게 고려하지 못했던 문제를 해결한 것으로써, 이를 토대로 터널설계 시 암반의 공학적 특성에 대한 보다 신뢰성 높은 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 보다 정확한 암석물성의 공간적 분포를 얻기 위해서는 지반조사 단계에서 얻어지는 시료의 위치, 즉 시추공의 위치 등을 편향되지 않게 선정하여 자료를 획득해야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Deutsch, C.V. and Journal, A.G., 1998, *Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, 369.
2. Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, 561.
3. Jensen J.L. et. al., 2000, *Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists*, Elsevier, 338.
4. 허대기 등, 2002, 지구통계학적 특성화 기법의 지하수 유동모델링 분석, 지하수 순환 해석 기술 워크샵 논문집, 수자원의 지속적인 확보기술 사업단, 156-170.