

조건부 모사 기법을 이용한 암반등급의 예측 및 불확실성 평기에 관한 연구

구청모^{1)*}, 홍창우²⁾, 전석원²⁾

Estimation of Rock Mass rating(RMR) and Assessment of its Uncertainty using Conditional Simulations

Chung-Mo Koo, Chang-Woo Hong and Seok-Won Jeon

Abstract In this study, conditional simulation was conducted to estimate rock mass rating(RMR) in unsurveyed regions. Sequential Gaussian simulation(SGS) and sequential indicator simulation(SIS) were applied for estimating RMR from the bore hole logging data. The uncertainty of SGS and SIS was verified by sample cross validation. A subset composed of 5 bore hole logging data among the original 30 bore hole logging data was set aside as test data. The remainder was training data. The quality of SGS and SIS estimation on the testing data reflects how well it would perform in an unsupervised setting. SGS and SIS were useful stochastic methods to estimate the spatial distribution of rock mass classes correctly and assess the uncertainty of estimation quantitatively. The result of conditional simulation can offer useful information of rock mass classes such as RMR in unsurveyed regions.

KeyWords conditional simulation, RMR, sequential Gaussian simulation, sequential indicator simulation, uncertainty of estimation.

초 록 본 연구에서는 조건부 모사 기법 중 순차 가우시안 시뮬레이션(SGS)과 순차 지시 시뮬레이션(SIS)을 이용하여 터널설계 시 미시추구간의 암반등급(RMR)을 예측하여 보았다. 총 30개의 시추공자료 가운데 25개의 시추공자료를 이용하여 순차 가우시안 시뮬레이션과 순차 지시 시뮬레이션을 수행하였으며, 나머지 5개의 시추공에서의 실제 암반등급과 예측 암반등급을 비교하여 보았다. 그 결과 조건부 모사 기법은 암반등급의 공간적 분포특성을 비교적 잘 예측할 수 있고, 예측의 불확실성을 정량적으로 평가할 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 따라서 조건부 모사 기법의 결과는 미시추구간의 암반등급을 예측하는데 있어서 유용한 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 조건부 모사 기법, RMR, 순차 가우시안 시뮬레이션, 순차 지시 시뮬레이션, 불확실성 평가

1. 서 론

터널설계 시 현장여건이나 조사비용 문제로 인해서 충분한 시추가 이루어지지 못하는 경우가 많이 발생하게 된다. 이러한 미시추구간의 암반물성을 추정하기 위해서 최근 크리깅(kriging)과 같은 지구통계학적 기법의 이용이 증가하고 있다.

크리깅은 주위의 알려진 값들의 가중 선형 조합을 이용하여 미지의 값을 예측하는 기법으로 오차분산을 최소로 하면서 편향되지 않게 주어진 자료를 재생해내

는 정확성이 있다. 하지만 크리깅은 자료의 통계량과 공간구조를 유지할 수 없으며, 예측의 불확실성을 정량적으로 평가할 수 없는 단점을 갖고 있다. 이와는 달리 조건부 모사 기법(conditional simulation)은 주어진 자료의 평균과 분산을 유지하면서 자료를 생성해내는 기법으로 주어진 자료의 공간적 상관관계가 반영되면서 자료의 불균질성을 묘사할 수 있는 기법이다(최종근, 2002). 또한 크리깅이 결정론적인 하나의 값만을 예측하는데 비해 조건부 모사 기법은 시뮬레이션을 수행할 때마다 다른 값을 생성해 내는 추계학적(stochastic) 특성을 이용하여 예측값의 불확실성을 정량화 할 수 있다.

국내 암반공학 관련분야에서 이러한 지구통계학적 기법을 이용한 연구 실적을 살펴보면, 유광호(1995,

¹⁾ 대한광업진흥공사 국내개발팀
²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부
* 교신저자 : kcm@kores.or.kr
접수일 : 2005년 11월 10일
심사 완료일 : 2006년 3월 17일

1998, 2003)의 지시 크리깅과 손실함수(loss function)를 이용한 터널 설계 시 미시추구간의 암반등급 산정에 관한 연구가 있었고, 전석원 등(2003)의 지하구조물 최적설계를 위한 암반물성 통합평가 시스템 개발을 위한 연구가 있었다. 또한, Hong and Jeon(2003)의 모의 담금질 모사(Simulated Annealing) 기법을 이용한 RMR의 추정에 관한 연구가 있었고, 홍창우와 전석원(2005)의 유전알고리즘을 이용한 암반물성의 최적평가에 관한 연구가 있었으며, 류동우 등(2003)의 불확실성 모델링을 위한 지구통계학적 시뮬레이션 기법에 관한 연구와 류동우(2005)의 모의 담금질 모사 기법을 이용한 지반 조건 추정 및 불확실성 평가에 관한 연구가 있었다.

본 연구에서는 크리깅 기법 중 정규 크리깅(ordinary kriging)과 조건부 모사 기법 중 순차 가우시안 시뮬레이션(sequential Gaussian simulation, SGS), 순차 지시 시뮬레이션(sequential indicator simulation, SIS)을 이용하여 터널설계 시 미시추구간의 암반등급을 추정할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 현장자료에 적용시켜 보았다. 또한 순차 가우시안 시뮬레이션과 순차 지시 시뮬레이션을 각각 100번 수행하여 예측값의 불확실성을 정량적으로 평가하여 보았다.

2. 지구통계학에 관한 이론적 배경

2.1 지구통계학의 기본 원리

지구통계학은 1960년대 초 G. Matheron의 지역화 변수이론(theory of regionalized variable)에 기초하여 발전된 학문이다. 여기서 지역화 변수라는 것은 확률변수가 시간적 또는 공간적으로 상관성을 갖고 있는 것을 말한다. 즉 지구통계학이란 시간적 또는 공간적으로 상관관계가 있는 자료에 대하여 이들의 분포특성과 상관관계를 분석하여 신뢰할 수 있는 결론을 이끌어내는 통계학의 한 분야이다.

지구통계학적 기법이 적용되는 과정에 대해서 살펴보면, 우선 지구통계학적 기법을 적용할 관심영역이나 대상을 설정한 후 이용 가능한 모든 자료를 수집하여 이들 자료의 공간적 상관관계를 분석하기 위해 실험변동도(experimental variogram)를 작성한다. 실험변동도가 작성되고 나면, 실험적변동도를 대표할 수 있는 이론변동도(theoretical variogram)를 작성한다. 상기의 과정을 거쳐 변동도가 완성되면 이를 이용하여 크리깅 기법으로 원하는 지점의 값을 예측하고, 조건부 모사 기법을 이용하여 예측 값의 불확실성을 평가하게 된다.

2.2 변동도

일반적으로 인접한 자료들 간의 공간적인 상관관계를 나타내는 척도로 공분산과 변동도와 같은 2차 적률을 이용한다. 본 연구에서는 내속성(intrinsincness) 가정 하에서 변동도를 활용하였으며, 변동도는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 h 는 두 자료 사이의 거리를 말하는 것으로 이격거리(separation distance) 또는 지연거리(lag distance)라고 하고, $N(h)$ 는 거리가 h 만큼 떨어진 자료 쌍들의 개수를 말한다.

2.3 크리깅

크리깅은 값을 알고 있는 주위 자료들의 가중선형조합을 이용하여 미지의 지점에서의 값을 예측하는 기법이다. 이를 간단히 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (2)$$

여기서 z^* 은 크리깅에 의한 예측치가 되며, z_i 는 공간상에 분포하는 알고 있는 자료의 값이고, λ_i 는 z_i 에 배당되는 가중치(weight)이며, n 은 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총 개수이다.

2.4 조건부 모사 기법

조건부 모사 기법이란 주어진 확률변수의 평균과 분산을 유지하면서 주어진 자료값을 그대로 보전하는 변수의 분포를 생성해 내는 기법으로 자료의 공간적인 상관관계가 반영되면서 자료의 불균질성을 묘사할 수 있으며, 동일한 조건 하에서도 시뮬레이션을 수행할 때마다 다른 결과를 나타내므로 추정값의 불확실성을 예측할 수 있는 장점을 갖고 있다(최종근, 2002). 본 연구에서는 조건부 모사 기법 중에서 가장 대표적인 순차 가우시안 시뮬레이션과 순차 지시 시뮬레이션을 이용하여 암반등급을 예측하였다.

2.4.1 순차 가우시안 시뮬레이션

순차 시뮬레이션은 식 (3)과 같이 주어진 n 개의 위치에서의 다변량 분포(multivariate distribution)함수를 n 개의 단변량 조건부 분포(univariate conditional distribution)함수의 곱으로 표현할 수 있다는 것에 기초한다(Johnson, 1987).

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; z_1, z_2, \dots, z_n) \\ = f(x_1; z_1) \times f(x_2; z_2 | z(x_1) = z_1) \times \dots \\ \times f(x_n; z_n | (z(x_\alpha) = z_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, n-1)) \quad (3)$$

여기서 n은 자료의 개수이며, z_α 는 위치 α 에서의 값이다. 식 (3)은 n개의 주어진 자료를 사용하여 하나의 확률변수 z_1 을 생성하고, n개의 자료와 첫 번째 값(z_1)을 모두 주어진 자료로 가정하여 두 번째 확률변수 z_2 를 생성하며, 이와 같은 과정을 마지막 분포까지 반복하면 하나의 순차 시뮬레이션이 완료되는 것을 의미한다.

순차 가우시안 시뮬레이션은 식 (3)과 같은 순차 시뮬레이션의 과정을 적용하여 시뮬레이션을 수행하는 것이며, 이로부터 알 수 있듯이 주어진 자료가 정규분포를 따를 때 적용이 가능한 방법으로 그 구체적인 과정은 다음과 같다.

- ① 주어진 자료가 정규분포를 따르는지 검사하고, 정규분포를 따르지 않을 경우 정규분포로 변환한다.
- ② 전체 영역에 대해서 일정한 크기의 격자망으로 나눈다.
- ③ 전체 격자망에 대해서 각각의 지점을 오직 한번만 지나도록 임의의 경로(random path)를 설정한다.
- ④ 임의의 i번째 격자점(node)에서 상관거리 내에 있는 자료를 이용하여 크리깅을 수행하여 얻은 예측값(z^*)과 오차분산(σ^2_k)을 정규분포의 평균과 분산으로 하는 누적분포함수를 생성한다.

- ⑤ 누적분포함수로부터 난수를 발생시켜 하나의 예측값을 생성하고, 생성된 예측값을 주어진 자료에 첨가한다.
- ⑥ 위의 ④-⑤의 단계를 반복하여 주어진 전체 공간에 대한 자료 생성을 완료한다.

2.4.2 순차 지시 시뮬레이션

순차 가우시안 시뮬레이션의 경우 주어진 자료가 정규분포를 따르거나 정규분포로 변환이 가능한 경우에만 적용이 가능하지만, 순차 지시 시뮬레이션은 주어진 자료가 특정한 분포를 따르지 않는 경우에도 적용이 가능한 방법으로 그 구체적인 과정은 다음과 같다.

- ① 주어진 자료를 경계값을 이용하여 지시 변환(indicator transformation)한다. 지시 변환은 주어진 본래의 자료를 지시 경계값(z_k)을 이용하여 지시변수(0또는 1)로 변환하는 것을 말하는 것으로 식 (4)의 변환규칙(transformation rule)에 의해 주어진 자료값을 지시자료(indicator data)로 변환한다.

$$I(x, z_k) = \begin{cases} 0, & \text{if } z(x) > z_k \\ 1, & \text{if } z(x) \leq z_k \end{cases} \quad (4)$$

- ② 지시 변환된 자료를 이용하여 식 (5)를 이용하여 각각의 경계값에 대하여 지시변동도를 작성한다.

$$\gamma_I(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I(x_i; z_k) - I(x_i + h; z_k)]^2 \quad (5)$$

여기서 h는 두 자료 사이의 이격거리, $N(h)$ 는 거리가 h만큼 떨어진 자료 쌍들의 개수를 말한다. 식 (5)는 주어진 자료값 대신 주어진 지시 경계값을 이용하여 실제로 변환된 지시들을 변동도 모델링에 사용한다는 것을 의미한다.

- ③ 전체 영역에 대해서 각각의 지점을 한번만 지나도록 임의의 경로를 설정한다.
- ④ 임의의 i번째 격자점에서 각각의 경계값에 대하여 지시 변환된 자료와 지시변동도를 이용하여 지시 크리깅을 수행한다.
- ⑤ 지시 크리깅을 통해 얻은 값을 이용하여 조건부 누적분포함수를 생성한다. 순차 가우시안 시뮬레이션의 경우 주어진 자료가 정규분포를 따르기 때문에 예측지점에서의 조건부 누적분포함수는 정규분포의 누적분포함수를 적용할 수 있다. 하지만 순차지시 시뮬레이션의 경우 특정한 분포를 따른다는 전제조건이 없기 때문에 식 (6)에 의해 지시 크리깅을 이용

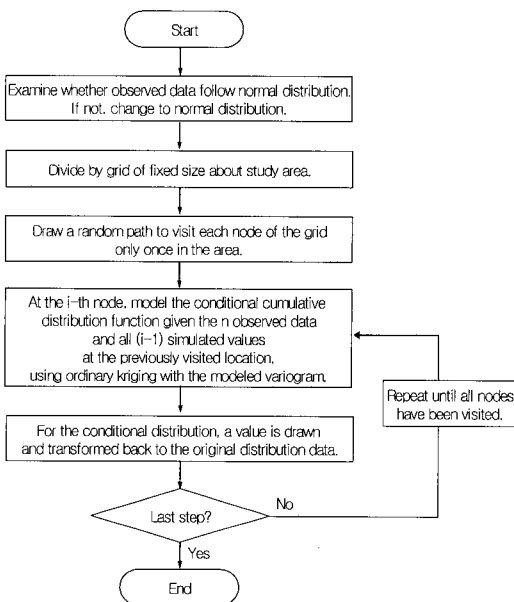


Fig. 1. Flow chart illustrating the procedure of SGS.

하여 조건부 누적분포함수를 얻게 된다.

$$F[z_k; x' | (n)] = F^*(x'; z_k) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i z_k) \quad (6)$$

여기서 λ_i 는 가중치이고, n 은 알고 있는 자료의 개수를 말한다. 각각의 경계 값에서 지시 크리깅에 의한 예측치를 구하면, 지시 경계값을 변수로 하고 지시 크리깅 예측치를 누적확률로 하는 조건부 누적분포함수를 작성할 수 있게 된다.

- ⑥ 조건부 누적분포함수로부터 난수를 발생시켜 하나의 예측값을 생성하고, 생성된 예측값을 주어진

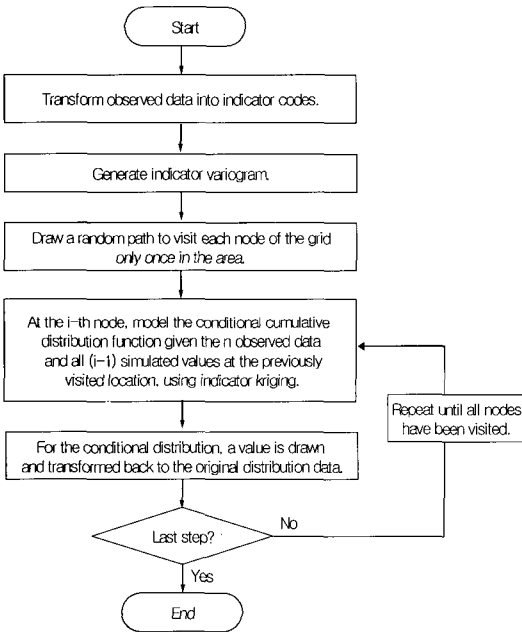


Fig. 2. Flow chart illustrating the procedure of SIS.

자료에 첨가한다.

- ⑦ 위의 ④-⑥의 과정을 반복하여 주어진 전체 공간에 대해 자료 생성을 완료한다.

3. 현장 자료에 대한 조건부 모사 기법의 적용

3.1 현장 자료 수집 및 분석

본 연구에 사용된 현장자료는 서울시 지하철 3호선 연장 사업 중 일부구간으로 총 연장 1,576.38 m에서 총 30개의 시추공 조사가 이루어졌다(Fig. 3). 총 30개의 시추공 조사 결과 값 중에서 25개의 시추공 자료를 이용하여 정규 크리깅과 순차 가우시안 시뮬레이션, 순차 지시 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용되지 않은 나머지 5개의 시추공에서의 실제 암반등급과 예측 암반등급을 비교하여 조건부 모사 기법의 적용 가능성을 검증하여 보았다.

우선 시추공에서의 RMR 값을 바탕으로 미시추구간의 RMR을 예측하기 위해 기본적인 통계치를 구하였으며, 주어진 자료가 정규분포를 따르는지를 판단하기 위해 분위수 대조도(q-q plot)를 작성하였다(Fig. 4, Table 1).

Fig. 4.(b)의 분위수대조도에서 확인할 수 있듯이 주어진 자료는 처음과 마지막의 양 끝 값 부근에서는 약간 선형성이 벗어나지만 전체적인 자료는 선형성을 보이기 때문에 정규분포를 따른다고 가정하고, 정규 크리깅과 순차 가우시안 시뮬레이션, 순차 지시 시뮬레이션을 모두 수행하였다.

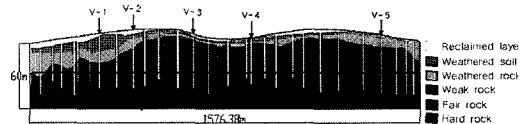
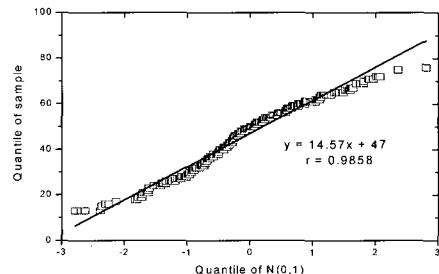
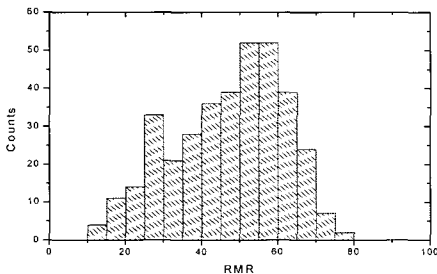


Fig. 3. Location of boreholes.



(a) Histogram of RMR distribution

(b) q-q plot of RMR data

Fig. 4. Statistical properties of the RMR data in the study area.

Table 1. Summary statistics of the field data.

Mean	SD	Min	Max	Skewness	Kurtosis	Number of Data
46.4365	14.4244	13	76	-0.37	-0.74	362

3.2 변동도 모델링

현장자료에 대한 실험변동도와 이론변동도를 작성하면 Fig. 5와 같다.

이론변동도는 비교적 단순한 수식을 이용하여 나타내게 되는데, 본 연구에서는 가장 일반적으로 많이 이용되는 구형모델(spherical model), 지수모델(exponential model), 가우시안모델(Gaussian model)을 적용하였다. 또한 현장자료의 실험변동도에 대해서 적합한 이론변동도 모델을 결정하기 위하여 회귀 제곱합(sum of squares of regression error, SSR), 총 편차 제곱합(sum of squares of total deviation, SST), 그리고 오차 제곱합(sum of squares of error, SSE)을 이용하여 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 구하였다. SSR은 추정치와 자료의 평균값과의 차이의 제곱이고, R^2 은 회귀방정식에의 적합도(goodness of fit)를 나타낸다. SSR은 값이 적을수록 베리오그램 모델이 우수하고, R^2 은 1.0에 가까울수록 베리오그램의 모델이 우수하다. 각각의 공식은 다음과 같다.

$$SSR = \sum_{i=1}^n (Y_i^* - \bar{Y})^2 \tag{7}$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \tag{8}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^*)^2 \tag{9}$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \tag{10}$$

여기서 Y_i 는 표본자료의 값, \bar{Y} 는 표본자료의 평균 값, Y_i^* 는 회귀곡선에 의한 자료의 추정치를 나타낸다. 각 변동도 모델에 따른 너깃, 문턱값, 상관거리, 적합도의 통계치는 Table 2와 같으며, R^2 과 SSR을 비교해 본 결과 이론변동도 모델로는 구형모델이 적합한 것으로 판단된다.

3.3 정규 크리깅

현장 자료에 대한 이론변동도를 작성한 후 정규 크리

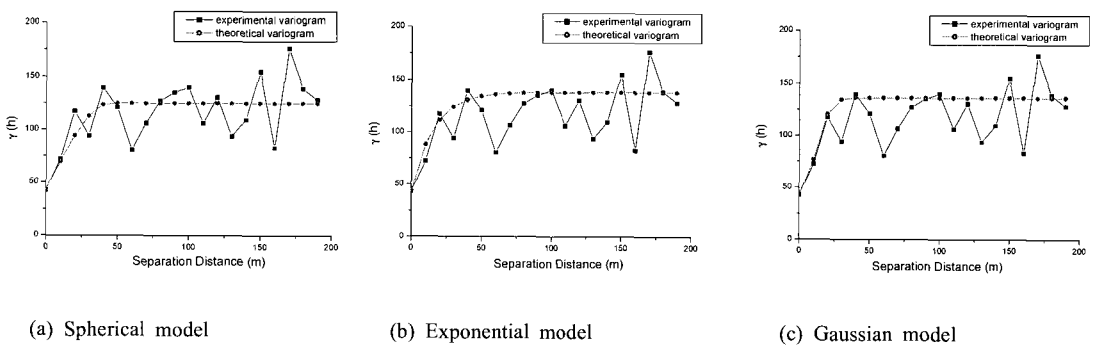


Fig. 5. Experimental and theoretical variogram models for the field data

Table 2. Variogram models and parameters of the field data.

Model	Nugget	Sill	Range (m)	R^2	SSR
Spherical	43.05	137	45	0.9616	279927.47
Exponential	43.05	138	46.5	0.9499	340119.76
Gaussian	43.05	136	45.03	0.9502	338015.64

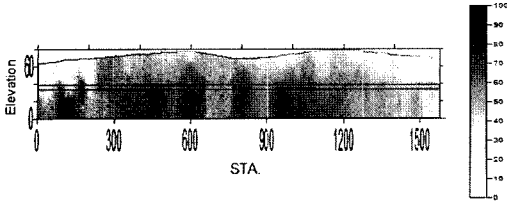


Fig. 6. RMR distribution using ordinary kriging for the field data.

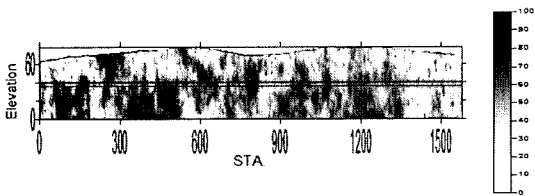
킹을 수행한 결과는 Fig. 6과 같다.

정규 크리깅 수행 결과 터널 시점부와 종점부는 암반 상태가 불량한 4등급이나 5등급의 암반이 분포하는 것으로 예측 되었으며, 터널의 시점부와 종점부를 제외한 터널의 전 구간에 대해서 주로 3등급의 암반이 분포하며, 국부적으로 2등급의 암반이 분포하는 것으로 예측 되었다.

3.4 순차 가우시안 시뮬레이션

현장 자료에 대해 순차 가우시안 시뮬레이션을 100번 수행하였으며, Fig. 7에 총 100번의 수행 결과 중 (a) 첫 번째 수행결과, (b) 50번째 수행결과, (c) 100번째 수행결과, (d) 100번의 수행결과와의 평균을 도시하였다.

순차 가우시안 시뮬레이션의 결과를 살펴보면, 전체적인 RMR 분포는 정규 크리깅의 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 시뮬레이션을 수행할 때마다 다른 결과가 나오는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 특징을 이용해서 여러 번의 시뮬레이션을 통해서 RMR 예측에 대한 불확실성을 확률로서 정량적으로 표현할 수 있게 된다.



(a) RMR distribution using SGS (#1).

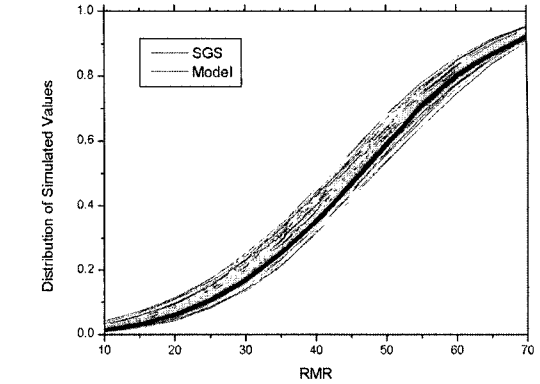
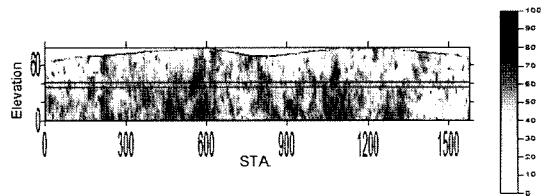


Fig. 8. Distributions of RMR data from SGS and model distribution.

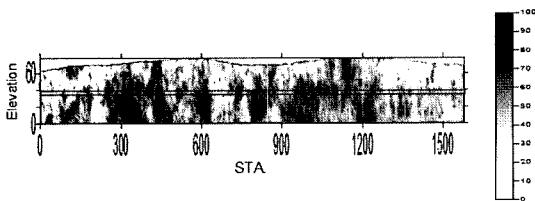
순차 가우시안 시뮬레이션에 대한 검증은 100번의 시뮬레이션으로부터 얻은 누적분포함수와 모델로 선정한 누적분포함수의 비교를 통해서 이루어졌다(Fig. 8). 각각의 시뮬레이션결과로부터 얻은 누적분포함수와 모델로 선정한 누적분포함수는 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이로부터 기설정된 변동도 모델의 타당성을 확인하였다.

3.5 순차 지시 시뮬레이션

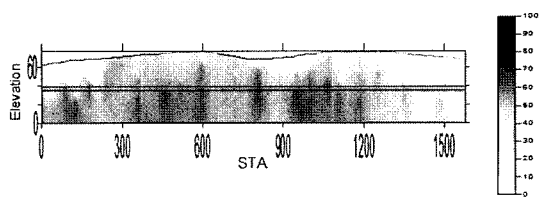
순차 지시 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 우선 경계값을 설정하고 그 경계값에 따라 주어진 자료를 지시 변환한 뒤 변환된 지시를 이용하여 지시변동도를 작성해야 한다. 우선 현장 자료에 대한 경계값은 제 1사분위수(36), 제 2사분위수(49), 제 3사분위수(58)를 사용하였다. 각각의 경계값에 대하여 지시 변환을 수행한 후



(b) RMR distribution using SGS (#50).

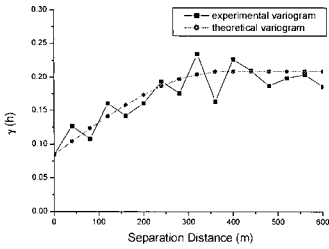


(c) RMR distribution using SGS (#100).

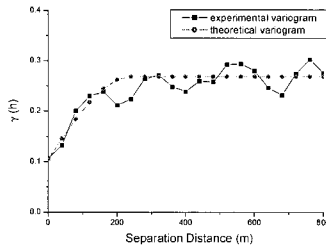


(d) RMR distribution using SGS (average).

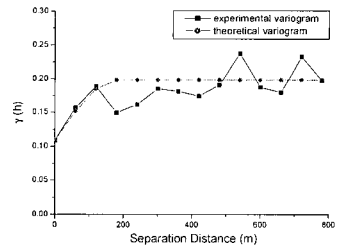
Fig. 7. RMR distribution using SGS for the field data.



(a) Indicator variogram for the 1st quartile



(b) Indicator variogram for the 2nd quartile

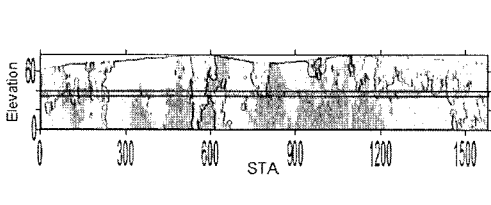


(c) Indicator variogram for the 3rd quartile

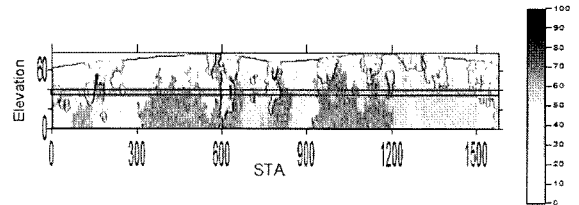
Fig. 9. Indicator variogram for the field data, given the cutoff values.

Table 3. Indicator variogram models and parameters of the field data.

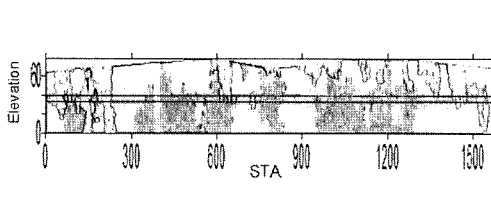
Cutoff	Model	Nugget	Sill	Range (m)	R^2	SSR
36	spherical	0.0847	0.2086	380	0.9721	0.7916
49	spherical	0.1047	0.2686	240	0.9917	1.4042
58	spherical	0.1090	0.1980	180	0.9826	0.4884



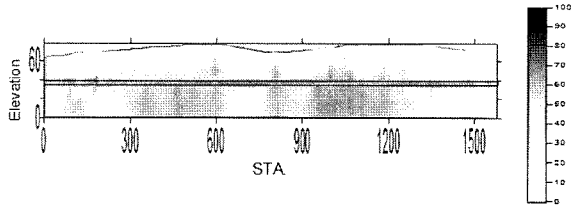
(a) RMR distribution using SIS (#1).



(b) RMR distribution using SIS (#50).



(c) RMR distribution using SIS (#100).



(d) RMR distribution using SIS (average).

Fig. 10. RMR distribution using SIS for the field data.

각각의 변환된 지시값에 대해서 지시변동도를 작성하면 Fig. 9, Table 3과 같다.

작성된 지시변동도를 바탕으로 현장자료에 대한 순차 지시 시뮬레이션을 100번 수행하였다. Fig. 10에 총 100번의 수행 결과 중에 (a) 첫 번째 수행결과, (b) 50번째 수행결과, (c) 100번째 수행결과, (d) 100번의 수행결과 의 평균을 도시하였다.

순차 지시 시뮬레이션의 결과 역시 전체적인 RMR 분포는 정규 크리깅의 결과나 순차 가우시안 시뮬레이션의 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6의 정규 크리깅 결과와 Fig. 7의 순차 가우시안 시뮬레이션, Fig. 10의 순차 지시 시뮬레이션의 결과를 비교해 보면, 크리깅에 의한 예측 결과는 예측값의 변화가 매우 부드럽게 예측되고, 결정론적인 하나의 예

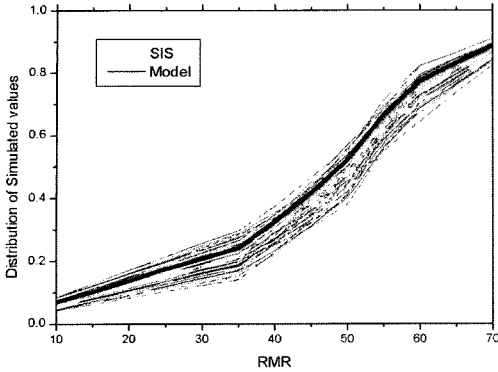


Fig. 11. Distributions of RMR data from SIS and model distribution.

측값을 갖는데 반해서 순차 가우시안 시뮬레이션이나 순차 지시 시뮬레이션의 경우 시뮬레이션을 수행할 때마다 다른 값을 예측하는 추계학적인 특징으로 인하여 자료의 불균질성을 효과적으로 묘사할 수 있고, 예측의 불확실성도 정량적으로 평가할 수 있게 된다.

순차 지시 시뮬레이션에 대한 검증은 순차 가우시안 시뮬레이션의 검증과 마찬가지로 100번의 시뮬레이션으로부터 얻은 누적분포함수와 3개의 분위수를 경계값으로 사용하여 얻은 누적분포함수 모델의 비교를 통해서 이루어졌다(Fig. 11). 각각의 시뮬레이션결과로부터 얻은 누적분포함수와 모델로 선정한 누적분포함수는 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이로부터 기설정된 지시변동도 모델의 타당성을 확인하였다.

4. 불확실성 평가

시뮬레이션의 검증 후 시뮬레이션 결과들로부터 불확실성 평가를 수행하였는데, 특정 지점에서의 불확실성은 식 (11)에 의해서 평가되어진다(Juang et al, 2004).

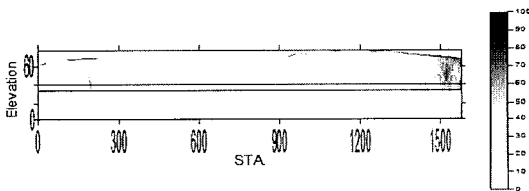
$$Prob_{sim}[z_a \leq z(x') \leq z_b] = \frac{n(x')}{100} \quad (11)$$

여기서 z_a 는 경계 값의 하한 값, z_b 는 경계 값의 상한 값이고, $n(x')$ 는 각각의 100번의 수행 중에서 시뮬레이션 결과 값이 z_a 에서 z_b 사이의 값이 나오는 개수를 말한다. 즉 식 (11)은 시뮬레이션의 결과 값이 z_a 에서 z_b 사이의 값일 확률을 의미한다. 본 연구에서 경계값은 암반등급의 경계값을 사용하였다. 즉 $0 \leq Prob_{sim} \leq 20$, $20 < Prob_{sim} \leq 40$, $40 < Prob_{sim} \leq 60$, $60 < Prob_{sim} \leq 80$ 네 가지 조건에 대해서 계산하였다.

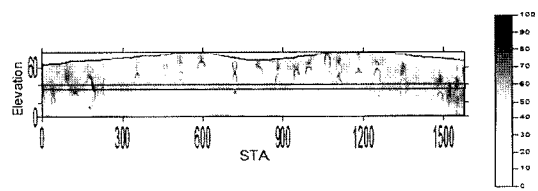
4.1 순차 가우시안 시뮬레이션의 결과에 대한 불확실성 평가

100번의 순차 가우시안 시뮬레이션 결과를 식 (11)을 이용하여 예측의 불확실성을 평가하였으며, 그 결과는 Fig. 12와 같다.

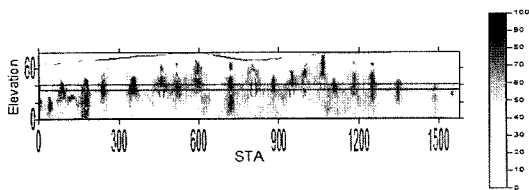
Fig. 12의 (a)는 암반 등급이 5등급일 확률을 나타내는 그림으로 터널 종점부의 지표부근에서 약 60~70% 정도의 확률로 암반등급이 5등급일 확률이 나타나는 것



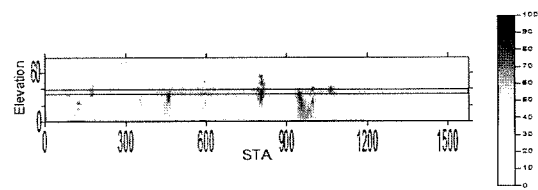
(a) Probability distribution of $0 \leq RMR \leq 20$.



(b) Probability distribution of $20 < RMR \leq 40$.



(c) Probability distribution of $40 < RMR \leq 60$.



(d) Probability distribution of $60 < RMR \leq 80$.

Fig. 12. Probability of RMR distribution using SGS.

으로 예측되었다. (b)는 암반 등급이 4등급일 확률로 터널 시점부와 종점부에서 약 60%이상의 확률로 암반등급이 4등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었으며, 전체 구간의 지표에서 약50%정도의 확률로 암반 등급이 4등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었다. (c)는 암반 등급이 3등급일 확률로 국부적으로 70~80%정도의 높은 확률이 분포하며, 터널의 시점부로부터 약 100m에서 1,300m 구간에 대해서 50%이상의 확률로 암반 등급이 3등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었다. (d)는 암반 등급이 2등급일 확률로 터널 시점부로부터 500m부근에서 약 50%의 확률로, 800m부근에서 70%이상의 확률로, 950m부근에 약 80%정도의 확률로 암반등급이 2등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었다.

순차 가우시안 시뮬레이션의 정확성을 알아보기 위해서 총 30개의 현장 시추 자료 중 시뮬레이션에 사용되지 않은 5개 시추공에서의 실제암반등급과 예측암반등급을 비교해 본 결과 총 52개 지점 중에서 32개 지점에서 정확한 암반등급을 예측 할 수 있었다.

4.2 순차 지시 시뮬레이션의 결과에 대한 불확실성 평가

순차 가우시안 시뮬레이션과 마찬가지로 100번의 순차 지시 시뮬레이션 결과를 식 (11)을 이용하여 불확실성을 평가하였으며, 그 결과는 Fig. 13과 같다.

Fig. 13의 (a)는 암반 등급이 5등급일 확률을 나타내는 그림으로 터널 종점부에서 약 50~60%의 확률로 암반 등급이 5등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었

다. (b)는 암반 등급이 4등급일 확률을 나타내는 그림으로 순차 가우시안 시뮬레이션의 경우 전체 영역의 지표에서 4등급일 확률이 높게 나오는데 반해서 터널 시점부 지표부근과 종점부 지표부근에서만 약 30~50%의 확률로 암반등급이 4등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었다. (c)는 암반 등급이 3등급일 확률로 전체 영역에서 상당히 많은 부분을 차지하는 것을 알 수 있으며, 순차 가우시안 시뮬레이션의 결과에 비해서 높은 확률로 존재하는 경향을 보이고 있다. 그림(d)는 암반 등급이 2등급일 확률로 터널 시점부로부터 100m부근에서 50~60%의 확률로, 180m부근에서 70~80%의 확률로, 450m~650 m부근에서 50~60%의 확률로, 800m부근에서 60~80%의 확률로, 950m~1,100m부근에서 약 60%이상의 확률로 암반등급이 2등급일 확률이 나타나는 것으로 예측되었다.

순차 지시 시뮬레이션의 정확성을 알아보기 위해서 순차 가우시안 시뮬레이션과 마찬가지로 총 30개의 현장 시추 자료 중 시뮬레이션에 사용되지 않은 5개 시추공에서의 실제암반등급과 예측암반등급을 비교해 본 결과 총 52개 지점 중에서 38개 지점에서 정확한 암반 등급을 예측 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널설계 시 미시추구간의 암반등급(RMR)을 보다 객관적으로 예측하기 위해 조건부 모사 기법을 서울시 지하철 3호선 연장사업 중 일부구간에

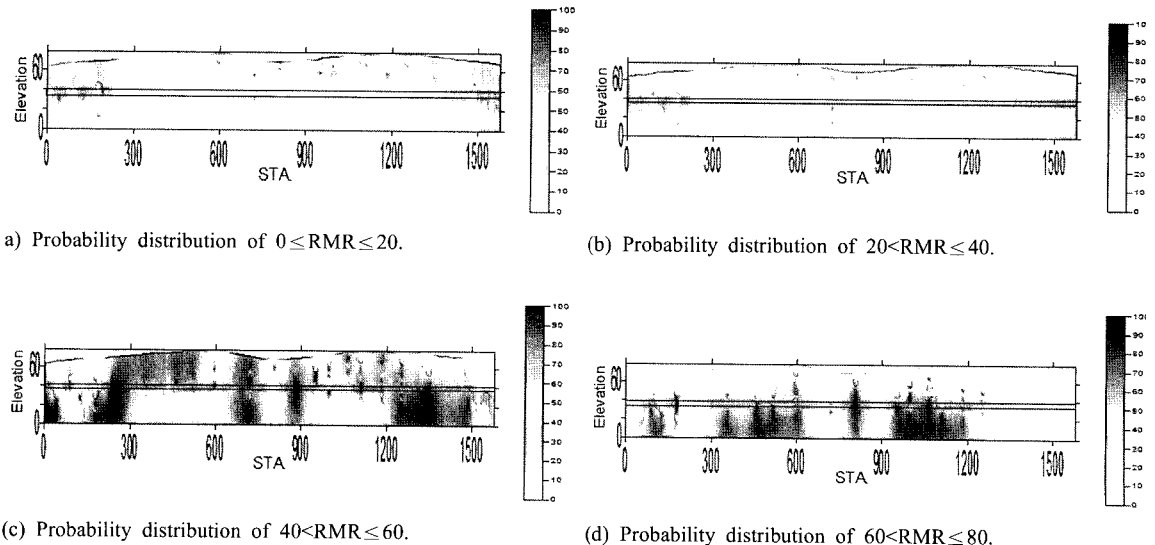


Fig. 13. Probability of RMR distribution using SIS.

적용시켜 보았다. 이상의 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 조건부 모사 기법을 이용하여 주어진 자료의 불균질성을 유지하면서 주어진 자료의 공간적 상관관계가 반영된 암반등급을 예측할 수 있었고, 조건부 모사 기법의 추계학적인 특징을 이용하여 추정값의 불확실성을 정량화 할 수 있었다.
- 2) 총 30개의 시추공자료 중에서 25개의 시추공자료를 이용하여 정규 크리깅과 순차 가우시안 시뮬레이션, 순차 지시 시뮬레이션을 수행하여 터널 구간간의 암반등급을 예측한 뒤, 나머지 5개 시추공에서의 실제암반등급과 예측암반등급을 비교하여 본 결과, 순차 가우시안 시뮬레이션은 총 52개 지점 중에서 32개 지점에서 정확한 암반등급을 예측할 수 있었으며, 순차 지시 시뮬레이션의 경우 38개 지점에서 정확한 암반등급을 예측할 수 있었다.
- 3) 실제 암반등급과 예측 암반등급이 다른 지점들은 주변의 RMR값과는 다르게 국부적으로 높은 RMR값이 존재하는 부분이었다. 조건부 모사 기법의 경우 주위 알고 있는 값에 기초하여 예측값을 계산하기 때문에 국부적으로 주변 암반등급에 비해 높은 암반등급이 출현할 가능성에 대해서는 낮은 확률의 결과가 제시된 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 류동우, 김택곤, 허종석(2003), RMR의 불확실성 모델링을 위한 지구통계학적 시뮬레이션 기법에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제13권 2호, pp87-99.
2. 류동우(2005), 모의 담금질 기법을 이용한 지반 조건 추정 및 불확실성 평가에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제15권 4호, pp275-287
3. 유광호(1995), 다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구(I), 한국지반공학회지, 제11권 2호, pp 71-77.
4. 유광호(1998), 다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구(II), 한국지반공학회지, 제14권 1호, pp 29-35.
5. 유광호(2003), 터널 설계를 위한 암반등급 산정 기법에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제19권 5호, pp319-326
6. 전석원, 박의섭, 박병기, 홍창우, 이희광(2003), "지하구조물 최적설계를 위한 암반물성 통합평가시스템의 개발" 연구보고서, 한국건설기술평가원, 257p
7. 최중근(2002), 공간정보모델링, 구미서관, 289p.
8. 홍창우, 전석원(2005), 유전알고리즘을 이용한 암반 물성의 최적 평가에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제 15권 2호, pp129-136
9. Changwoo Hong and Seokwon Jeon(2003), Optimal estimation of rock joint characteristics using simulated annealing technique - a case study, International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering, and Geophysical Exploration, pp. 78-82, Seoul, Korea, November 18-19.
10. Johnson, M.(1987), Multivariate statistical simulation, Wiley, 230p
11. Juang, K. W., Chen, Y. S., Lee, D. Y.(2004), Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils, Environmental Pollution, VOL.127, pp229-238.

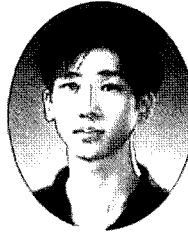
구 청 모



2003년 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 공학사
2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사

Tel: 02-840-5804
E-mail: kcm@kores.or.kr
현재 대한광업진흥공사 국내개발팀 국내기획부 사원

홍 창 우



1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2001년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사

Tel: 02-880-9304
E-mail: qoch@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수