

터널 중심선으로부터 이격된 자료를 활용한 미시추구간의 암반등급 산정에 관한 연구

A study on the estimation of rock mass classes using the information off a tunnel center line

유광호^{*1}, 이상호², 추석연³, 주광수⁴

You, Kwang-Ho · Lee, Sang-Ho · Choo, Suk-Yeon · Jue, Kwang-Sue

Abstract

In order to guarantee the stability of a tunnel and its optimum design, it is very important to obtain enough ground investigation data. In reality, however, it is not the case due to the limitation of measuring spatially distributed data and economical reasons. Especially, there are regions where drilling is impossible due to civil appeal and mountainous topology, and it is also difficult to estimate rock mass classes quantitatively with only geophysical exploration data.

In this study, therefore, 3 dimensional multiple indicator kriging (3D-MI kriging), which can incorporate geophysical exploration data and drill core data off a tunnel center line, is proposed to cope with such problems. To this end, two dimensional mutiple indicator kriging, which is one of the geostatistical techniques, is extended for three dimensional analysis. Also, the proposed 3D-MI kriging was applied to determine the rock mass classes by RMR system for the design of a Kyungbu express rail way tunnel.

KeyWords: 3D multiple indicator kriging (3D-MI kriging), rock mass classes, RMR, geostatistics, geophysical exploration data

요 지

터널의 안정성 확보 및 최적설계를 위해서, 충분한 지반조사 데이터를 확보하는 것이 가장 중요하나, 공간상에 분포하는 자료측정의 제한성 및 경제적인 이유로 그렇게 하지 못하는 것이 현실이다. 특히, 터널은 민원 및 산악지형 등의 이유로 노선의 본선부에서 시추가 불가능한 구간이 발생하고, 각종 물리탐사 자료만으로는 정량적인 암반등급 산정이 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본선에서 이격된 물리탐사 자료 및 시추데이터를 최대한 활용해 지구통계학 기법의 하나인 2차원 다분적 지시크리깅을 확장한 3차원 다분적 지시크리깅 (3D multiple indicator kriging, 3D-MI kriging) 기법을 제안하였다. 또한 제안된 3차원 다분적 지시크리깅 기법을 경부고속철도 제 0-0공구 터널설계 시 RMR분류에 의한 암반등급 산정을 위해 적용하였다.

주요어: 3차원 다분적 지시크리깅, 암반등급, RMR, 지구통계학, 물리탐사자료

*1 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수 (khyou@mail.suwon.ac.kr)

2 정회원, (주)삼보기술단 대리

3 정회원, (주)삼보기술단 이사

4 정회원, (주)현대건설 기술개발원 차장

1. 서론

지질, 해양, 대기 등 지구과학분야에서 공간상에 분포하는 자료 (spatial data)를 취득할 때, 자료측정의 제한성이나 경제적인 이유로 항상 충분한 자료가 확보될 수 없는 현실에 대해 지구통계학은 불충분한 자료의 추가 획득이나 공간자료의 구조적인 분석을 위해서 이용되는 새로운 학문분야이다 (Journel and Huijbregts, 1978).

기존의 일반적인 통계기법과는 달리 통계학에 기본을 두지만 자료의 공간적인 분포와 correlation function, random field, fractal과 같은 수학적 이론들을 결합함으로써 지구통계학은 위치에 따라 달라지는 자료를 해석하고 자료와 해석결과에 근거하여 2차원, 3차원 또는 4차원 모델을 만들어 사용할 수 있다. 예로 박 (2002)은 산악지형 지하수위의 추정에 보통크리깅 및 공크리깅을 적용한바 있다.

현재 일반적으로 터널지보패턴 설계를 위한 암반분류 (RMR법 등)에 있어서, 터널굴착 예정지역의 정확한 분석이나 평가 없이 미시추구간에 대해 물리탐사 데이터에 단순히 의존하여 암반분류를 산정해 사용하고 있는 실정이다. 더 나아가 본선부에 민원이나 산악지형 등으로 인해 시추를 시행하지 못할 경우 정량적 암반분류가 거의 불가능한 실정이다.

다분적 지시크리깅 (multiple indicator kriging, MI kriging)은 공간상에 분포하는 확률변수들을 이용하여 자료가 없는 임의의 지점에서 값을 추정해 내는 통계학적인 방법으로 시추데이터가 부족하며, 대신 물리탐사 데이터가 존재하는 경우, 미지점의 암반등급의 산정 등에 효율적으로 이용될 수 있고, 추정시 신뢰도를 제공하는 장점이 있다. 유 (2003)는 터널 설계시 미지점의 암반등급 산정을 위해 2차원 다분적 지시크리깅 기법을 적용한 바 있다.

하지만 기존의 1차원 및 2차원 다분적 지시 크리깅을 이용할 경우 터널 선상의 데이터만 이용될 수 있고, 터널 중심선상에서 벗어난 데이터를 효과적으로 이용하지 못하는 문제점이 발생한다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 다분적 지시크리깅을 이용하여 터널 중심선에서 벗어난 자료를 최대한 활용하여 터널 본선부의 암반등급을 결정하는 방법을 제시하고자

하였다.

2. 다분적 지시크리깅의 이론적 고찰

2.1 개요

산악터널의 경우 시추 불가능 구간이 발생하며, 각종 물리탐사 자료는 정량자료로 활용하기 힘든 실정이다. 다분적 지시크리깅은 물리탐사 자료와 같은 정성적인 자료를 활용하여 미지구간의 암반등급을 정량화 할 수 있는 방법으로 유 (1995a)에 의해 제안되었다.

또한, 암반등급 추정과정에서 다분적 지시크리깅은 사후 누적확률분포의 형태로 결과를 표현하므로 암반등급 추정의 신뢰도를 얻을 수 있다.

2.2 다분적 지시 크리깅

크리깅은 공간적으로 상호 상관관계를 갖는 변수 (a spatially correlation variable)에 대한 여러 추정기법 중 하나로써 해당 값의 불확실성이 분산값으로 정량화될 수 있는 모수적 방법이다.

보통크리깅 (ordinary kriging)은 공간상 위치와 해당 변수의 관계를 결정하는 변동도 (variogram)를 통해 미지점의 해당 값을 추정하는 방법으로서 최적의 선형 불편추정자 (best linear unbiased estimator)로 알려져 있다.

지시크리깅 (indicator kriging)은 공간상의 임의의 점 x 에서 미지값 $Z(x)$ 를 x 와 위치가 다른 주변 n 개의 기지값 $z(x_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 으로부터 추정하되, $Z(x)$ 가 주어진 경계값 z 보다 작거나 같을 확률에 따라 $Z(x)$ 의 확률을 구하는 방법이다.

한점 x_i 와 한 경계값 z 에 대하여 지시데이터 (indicator data)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{z}(z; x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } z(x_i) \leq z \\ 0, & \text{if } z(x_i) > z \end{cases} \quad (1)$$

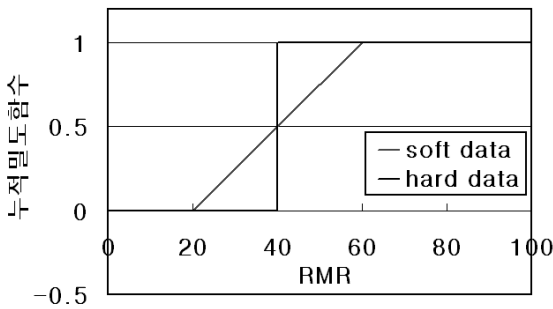


그림 1. 정량자료와 정성자료

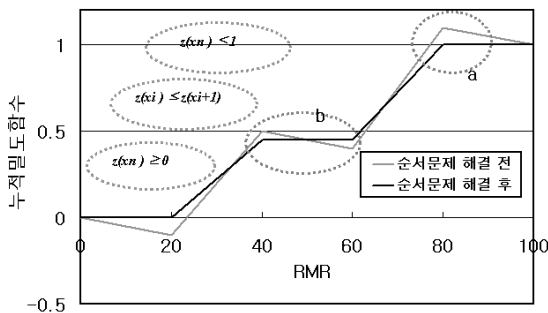


그림 2. 다분적 지시크리깅의 순서문제

2.3 정량자료와 정성자료

지반공학 자료는 신뢰도 (degree of certainty)에 따라 그림 1과 같이 정량자료 (hard data)와 정성자료 (soft data)로 구분될 수 있다.

시추조사 결과 및 각종 실험값과 같은 정량적인 자료는 전자에 속하고, 비저항탐사결과 및 전문가의 추정과 같은 정성적인 자료는 후자에 속한다고 할 수 있으며, 정량 자료가 부족한 경우 보조수단으로서 정성자료를 이용할 수 있는 많은 연구가 수행된 바 있다 (Bardossy et al., 1988; Dubrule and Kostov, 1986).

2.4 미지점의 누적밀도 함수

다분적 지시크리깅에 의해 임의 지점에 대한 값을 추정 하게 되면, 그 결과는 사후 누적확률밀도함수의 형태로 나오는데 이것은 각 경계에 대한 지시자가 누적밀도함수의 형태로 입력되기 때문이다.

기지데이터 n 개로부터 구하는 미지데이터의 누적밀도함수의 필요조건은 다음 식을 만족하는 데이터의 비율이다.

$$Prob[Z(x)|n개의 기지 데이터] \approx z(x_i) \leq z \quad (2)$$

한점 x_i 와 한 경계값 z 에 대하여 지시데이터는 식 (1)과 같이 표현할 수 있고 미지 데이터의 누적밀도함수는 다음 식과 같다.

$$Prob[Z(x) \leq z | n개의 기지 데이터] \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i(z, x_i) \quad (3)$$

식 (3)에 비균등 가중 평균값을 적용하면, 식 (4)가 된다.

$$F[z, x | n개의 기지 데이터] = Prob[Z(x) \leq z | n개의 기지 데이터] \approx \sum_{j=1}^n w(x_j) i(z, x_j) \quad (4)$$

2.5 누적밀도함수의 순서문제

누적확률밀도함수의 순서문제라 함은 크게 사후누적확률밀도 함수가 상한이나 하한 경계를 초과하는 문제 (그림 2의 a)와 감소하는 문제 (그림 2의 b)로 구분된다.

각 경계에서 구한 지시크리깅을 이용한 지시데이터의 누적확률밀도함수는 순서문제를 일으킬 수 있는데, 이 순서문제를 해결하는 가장 간단한 방법은 지시크리깅 값을 가장 가까운 적당한 값 (admissible value)으로 근사시키는 것이다 (Solow, 1986).

또한, 추정분산의 합을 최소화 시켜 구속 최적화문제 (constrained optimization problem)로 규정한 후에 순서문제를 만족하는 지시크리깅 가중치를 산정하는 방법이 유 (1995b)에 의해 제안된 바 있다.

본 연구에서는 각 경계에서 보통 지시크리깅을 이용한 지시데이터의 누적확률밀도함수는 순서문제를 만족하지 못하므로, 가장 가까운 적당한 값으로 근사시켜 순서문제를 해결하였다.

2.6 미시추구간 암반등급에의 적용

시추 및 불리탐사에 의해 구한 RMR 값을 $z_k = 20, 40, 60, 80$ 4개의 경계로 나눈다.

$$0 < z_2 (= 20) \leq \dots \leq z_8 (= 80) < 100 \quad (5)$$

각 경계 지시데이터가 식 (1)과 같이 정의되면, 미지데이터의 누적확률밀도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F[z_k; x | n \text{개의 지시데이터}] \\ = \text{prob} [Z(x) \leq z_k | n \text{개의 지시 데이터}] \\ \approx \sum_{j=1}^n u(x_k; x_j) \check{x}(z_k; x_j) \end{aligned} \quad (6)$$

미지점의 각 경계에서 보통크리깅을 이용한 누적확률 밀도함수는 식 (7) 및 식 (8)로 표현이 가능하다.

$$F(z_k) = i^T(z_k)w(z_k), \quad k=1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimize } u(z_k), \quad \sigma_E^2 = \sigma_i^2(z_k) + \\ w^T(z_k)A(z_k)w(z_k) - 2b^T(z_k)w(z_k) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$z_k =$ k 번째 경계의 지시값

$F(z_k) =$ 각 경계 k 에서 추정된 일반 지시크리깅의 누적확률밀도 함수

$i(z_k) =$ 각 경계 k 에서 추정된 지시값

$w(z_k) =$ 각 경계 k 에서 추정된 일반 지시크리깅의 가중치벡터

$\sigma_E^2(z_k) =$ 각 경계 k 에서 n 표본을 사용한 공간상의 추정 분산값

$\sigma_V^2(z_k) =$ 각 경계 k 에서 n 표본을 사용한 공간상의 확산 분산값

$A(z_k) =$ 각 경계 k 에서 각 표본간의 공분산

$b(z_k) =$ 각 경계 k 에서 n 표본과 미지점간의 공분산

2.7 변동도 (Variogram)

크리깅에 의한 자료의 추정에서는 조사자료간의 공분산이 필요한데, 이것은 조사자료간의 변동도에서 구해진다. 변동도는 공간상에 분포하는 표본자료의 변화특성을 나타내며, 공간상에 분포하는 임의의 거리 (h)에 있는 두 자료간의 차이의 분산 (variance)으로 구해진다 (Journel and Huijbregts, 1978).

$$2\gamma(h) = E\{ \sum [Z(x) - Z(x+h)]^2 \} \quad (9)$$

여기서 $\gamma(h)$ 는 반변동도 (semi-variogram)이고, $2\gamma(h)$ 는 변동도이다. $Z(x)$ 는 임의의 지점 x 에 있는 자료이며, $Z(x+h)$ 는 $Z(x)$ 에서 h 만큼 떨어진 지점의 자료이다.

RMR 자료를 지시경계자로 변환 후 각 경계자는 보통크리깅 (ordinary kriging)을 이용해 반변동도의 가장 적합한 모델을 산정하게 된다.

보통크리깅에 이용되고 있는 이론적 변동도 (theoretical variogram) 모델은 일반적으로 지수 모델 (exponential model), 구면 모델 (spherical model) 그리고 가우시안 모델 (gaussian model) 등이 있다. 이론적 변동도 모델의 식으로 정리하면 다음과 같다.

▪ 지수 모델

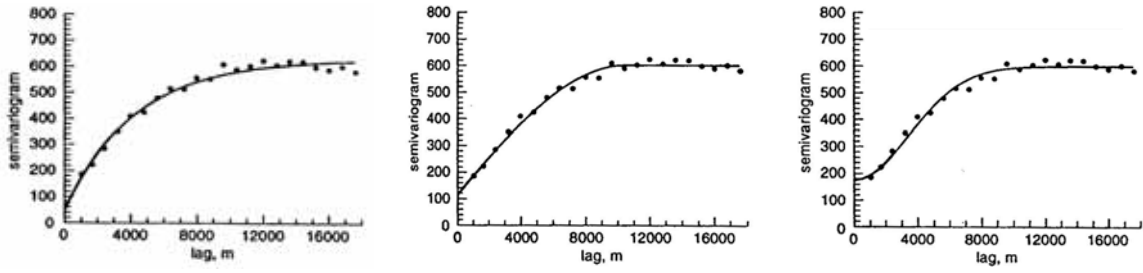
$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{r}\right) \right] \dots (h < r) \\ \gamma(h) &= \text{Sill} \quad \dots (h \geq r) \end{aligned} \quad (10)$$

▪ 구면 모델

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C \left(1.5 \frac{h}{r} - 0.5 \frac{h^3}{r^3} \right) \dots (h < r) \\ \gamma(h) &= \text{Sill} \quad \dots (h \geq r) \end{aligned} \quad (11)$$

▪ 가우시안 모델

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{r^2}\right) \right] \dots (h < r) \\ \gamma(h) &= \text{Sill} \quad \dots (h \geq r) \end{aligned} \quad (12)$$



(a) 지수모델 (exponential model) (b) 구면모델 (spherical model) (c) 가우시안모델 (Gaussian model)

그림 3. 각 변동도 모델의 비교예

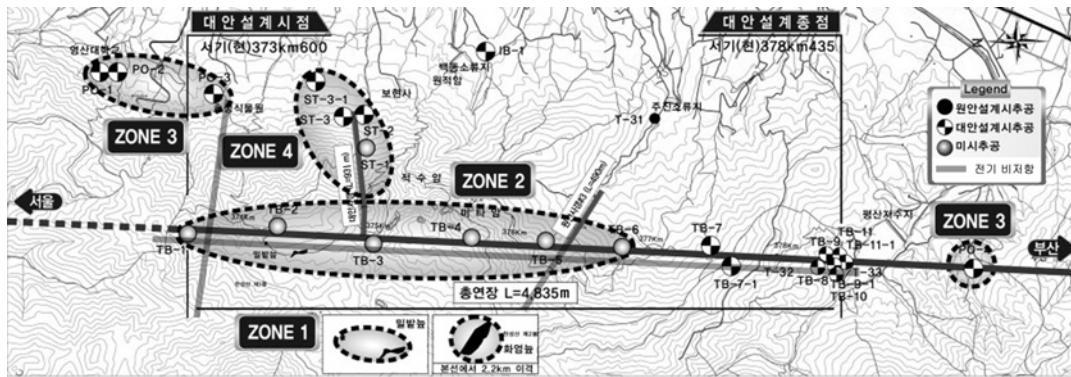


그림 4. 대상지역 개요도



그림 5. 연구대상 지역의 모식도

여기서, h 는 실험자료 간의 거리이며, C_0 는 nugget이고, Sill은 $C+C_0$ 이며, r 은 변동도가 안정될 때까지의 거리로서 영향범위 (range)이다.

이러한 각 변동도의 모델 적용결과의 예를 비교해 나타내면 그림 3과 같다.

경부고속철도 O-O공구 OO터널로서 (그림 4, 5참조), 원안설계시 지반조사 물량 미비와 단순히 양산도폭에 의한 지질특성 평가로 인해 터널설계 신뢰도 저하 문제를 그림 6과 같이 물리탐사자료와 3D-MI kriging 기법을 이용하여 최대한 극복하고자 하였다.

3. 3D-MI kriging의 적용사례

3.1 대상지역

3.2 암반분류 산정 흐름도 및 상관성 분석

본 터널구간의 암반이 갖는 다양한 성질을 공학적 특성별로 구분하여 설계에 적용 가능한 등급을 제시하였다 (표 1참조).

본 연구의 대상은 경상남도 양산시 구간을 통과하는 시추조사 구간에서는 RQD, RMR, Q-System 및

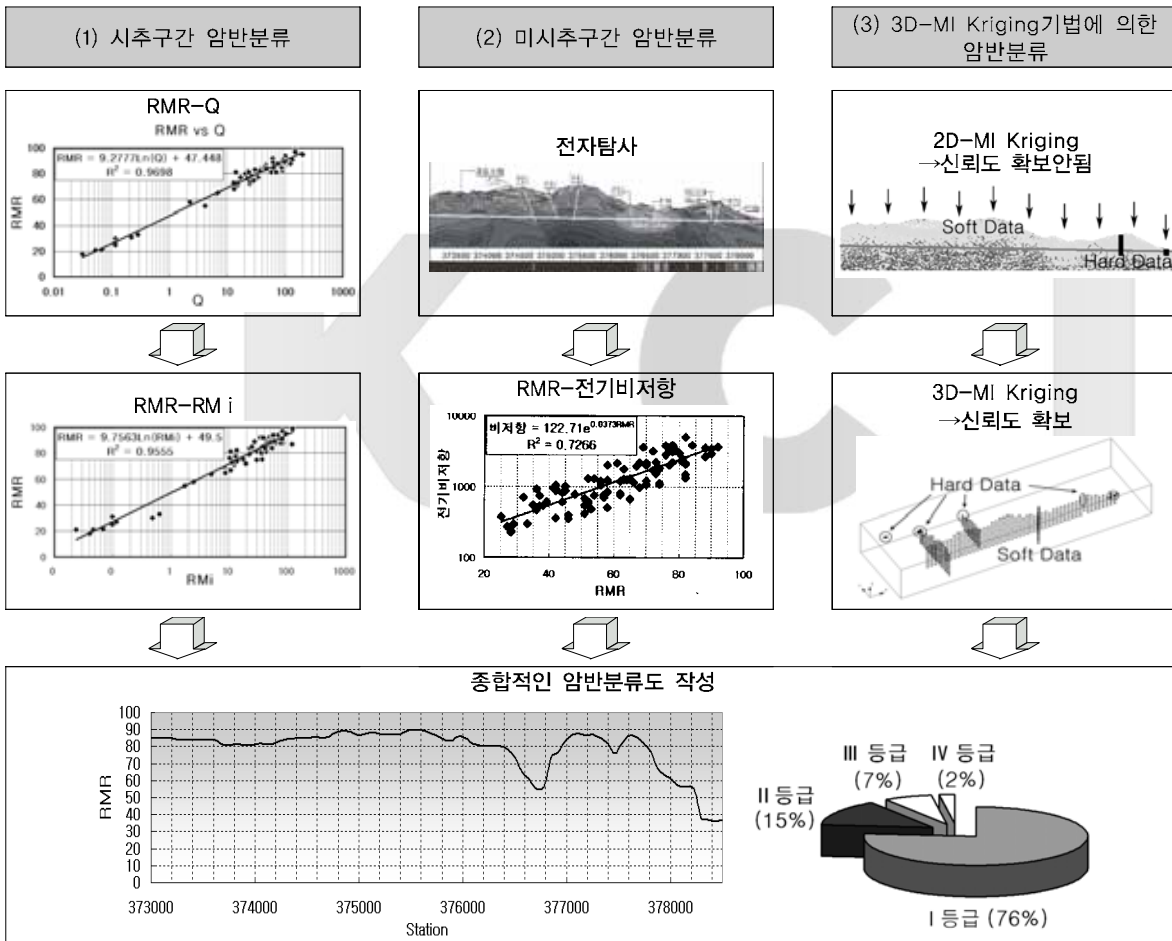


그림 6. 암반분류 산정 흐름도 및 상관성 분석

표 1. 암반등급 산정기준

암반등급	I	II	III	IV	V
지반평가	매우 양호	양호	보통	불량	매우 불량
RMR	81이상	61~80	41~60	21~40	20이하
Q-System	40이상	10~40	1~10	0.1~1	0.1이하
RMi	25이상	5~25	0.5~5	0.1~0.5	0.1이하
전기비저항 ($\Omega \cdot m$)	3,881이상	1,578~3,881	641~1,578	260~641	260이하
탄성파속도 (m/sec)	4,290이상	2,860~4,290	2,000~2,860	570~2,000	570이하

RMi에 의한 암반분류를 실시하였으며, 미시추구간에서는 암반분류 기준에 입각한 물리탐사 (전자탐사, 전기비저항탐사, 탄성과 토모그래피)결과와 암반분류 (RMR, Q, RMi)의 상관관계를 통해 터널 전구간에 대해 정성적인 암반분류를 시행하였다.

또한 민원으로 인해 (그림 7참조) 터널 본선부에서 이격된 곳에서 시추를 실시함에 따라, 미시추 구간의 암반분류 신뢰도 확보를 위해 그림 8과 같은 흐름에 의해 3차



그림 7. 민원에 의한 시추제지 상황

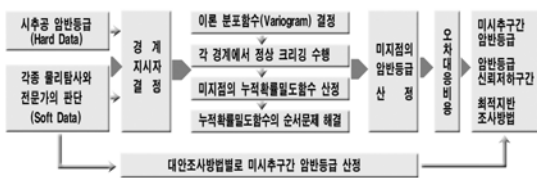


그림 8. 3D-MI Kriging기법을 이용한 암반등급 산정 흐름도

원 다분적 지시크리깅 (3D-MI kriging)을 이용해 암반등급을 검증하였다.

3.3 암반분류를 위한 정량자료 및 정성자료의 추출

시추공 자료와 같은 정량자료는 데이터값에 불확실성이 없는 반면, 전기 비저항 자료와 같은 정성자료는 많은 불확실성을 내포한다.

그림 1에서와 같은 정량자료의 경우 경계값 20에서는 0으로, 경계값 40, 60, 80에서는 지시데이터가 1.0으로 변환되고, 정성자료의 경우는 경계값 20에서는 0, 40에서는 0.5 60과 80에서는 1.0으로 변환된다.

그림 9는 본 연구에 사용된 정량 및 정성자료의 추출 위치를 보여주고 있다.

3.4 지시데이터 산출

터널 통과 구간 주변을 터널 진행방향으로 100m, 횡방향 100m, 높이방향 20m 간격으로 구분하여 전기

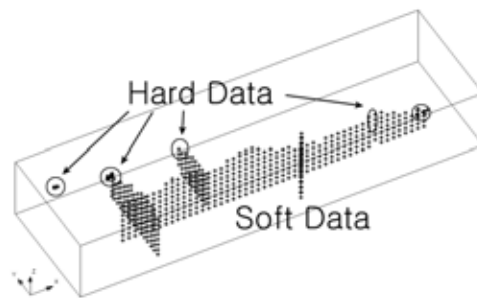


그림 9. 정량자료 및 정성자료의 추출 위치도

표 2. 시추공 지시변환 데이터

x (터널 진행 방향)	y (터널 횡 방향)	z (높이 방향)	RMR값 및 범위	지시경계자 (Z_k)			
				20	40	60	80
0	1632	306.8	81.00	0	0	0	0
0	1632	318.8	81.00	0	0	0	0
0	1632	327.5	51.00	0	0	1	1
0	1632	337.5	17.00	1	1	1	1
55	1632	306.8	84.00	0	0	0	0
55	1632	318.5	53.00	0	0	1	1
55	1632	327	32.00	0	1	1	1
764	1438	290	85.00	0	0	0	0
764	1438	296	88.00	0	0	0	0
764	1438	308	91.00	0	0	0	0
764	1438	317.2	85.00	0	0	0	0
764	1438	328.1	61.00	0	0	0	1
764	1438	337.7	78.00	0	0	0	1
764	1438	346.8	63.00	0	0	0	1
764	1438	358	81.00	0	0	0	0
764	1438	368	27.00	0	1	1	1
836	1443	304.7	75.00	0	0	0	1
836	1443	314.5	87.00	0	0	0	0
836	1443	325.5	78.00	0	0	0	1
836	1443	334.3	69.00	0	0	0	1
836	1443	344.5	88.00	0	0	0	0
836	1443	356	72.00	0	0	0	1
836	1443	365	69.00	0	0	0	1
836	1443	377	65.00	0	0	0	1
836	1443	384.4	41.00	0	0	1	1
1900	1400	100	91.61	0	0	0	0
1900	1400	200	82.24	0	0	0	0
1900	1400	300	73.04	0	0	0	1
1900	1400	400	47.09	0	0	1	1
4600	500	100	100.0	0	0	0	0
4600	500	200	92.52	0	0	0	0
4600	500	300	92.17	0	0	0	0
4600	500	400	66.12	0	0	0	1
4600	500	500	55.92	0	0	1	1
4600	500	600	24.89	0	1	1	1
5260	454	304.8	63.00	0	0	0	1
5260	454	315	42.00	0	0	1	1
5260	454	325.2	64.00	0	0	0	1
5260	454	335.8	45.00	0	0	1	1
5260	454	346	45.00	0	0	1	1
5321	550	309.9	64.00	0	0	0	1
5321	550	315.9	62.00	0	0	0	1
5321	550	326.2	45.00	0	0	1	1
5321	550	336	58.00	0	0	1	1
5369	485	300	61.00	0	0	0	1
5369	485	305	53.00	0	0	1	1
5369	485	316.8	52.00	0	0	1	1
5380	447	312	24.00	0	1	1	1
5450	498	295	48.00	0	0	1	1
5450	498	301.6	44.00	0	0	1	1

비저항 값을 구하고, 암반등급과의 상관관계를 이용하여 암반등급을 추정하였고 이에 해당하는 RMR 값의 가능한 범위를 구하였으며, 시추공에서 구한 RMR 값과 함께 지시변환을 통해 표 2에서와 같이 4개 (20, 40, 60, 80)의 경계값에서 지시데이터를 구하였다.

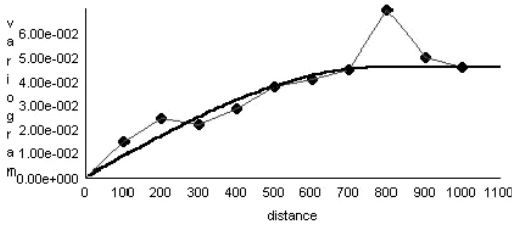
3.5 이론적 변동도 모델과 순서문제의 해결

시추공 자료와 터널 전구간에 걸쳐 존재하는 전기 비저항값을 사용하여 공간적 상관관계를 나타내는 변동도 모델을 구하여 표 3에 정리하였다. 그림 10은 경계값 60에서의 변동도 모델을 보여준다. 여기서 이론적 변동도 모델 추정을 위해 공간적 상관관계를 갖는 자료의 지구통계학적 분석용 프로그램인 GMS 3.0을 사용하였다.

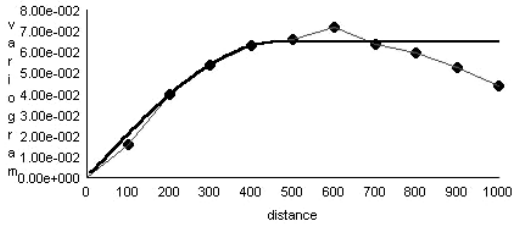
다분적 지시크리깅의 적용 시 각 지점의 누적확률밀도는 순서문제를 만족하지 못하므로 그림 11과 같이 동일 지점에서 경계가 변경되는 오차가 발생한다. 이것은 주로 정성자료만이 존재하는 구간에서 발생하게 되는데 순서문제 해결 후에는 이와 같은 경계변경구간의 중첩현상이 발생하지 않으며, 이것은 그림 12에서와 같이 순서문제가 극복될 수 있음을 확인할 수 있었다.

표 3. 각 경계에서의 이론적 변동도 모델

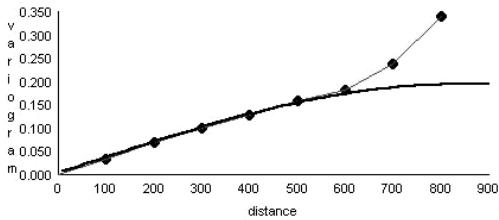
경계		모델	Nugget	Sill	Range
Z_k =20	X방향	Spherical	0	0.00185	335
	Y방향	"	0	0.00727	675
	Z방향	"	0.0006	0.00703	730
Z_k =40	X방향	"	0	0.04590	780
	Y방향	"	0	0.06470	465
	Z방향	"	0	0.19000	830
Z_k =60	X방향	"	0	0.04590	780
	Y방향	"	0	0.06470	465
	Z방향	"	0	0.19000	830
Z_k =80	X방향	"	0.0064	0.04490	765
	Y방향	"	0.0085	0.07750	600
	Z방향	Gaussian	0.0230	0.43100	780



(a) X 방향



(b) Y 방향



(c) Z 방향

그림 10. 지시경계 $Z_k=60$ 의 변동도

3.6 각 미지점에서의 암반등급 결정

시추공 자료와 전기 비저항 자료를 이용한 다분적 지시크리깅 결과 터널 통과 구간에 예상되는 RMR값 및 결과는 그림 13에서부터 그림 16까지와 같다.

시추공 위치에서의 암반상태는 다분적 지시크리깅에 의해 추정된 암반등급과 시추공 암반분류결과와 일치하여야 한다.

암반분류결과 대부분의 지점에서 암반상태가 I 등급과 II 등급만으로 암반상태가 양호하게 분류되었으며, 다만 STA. 378000 이후 구간에서는 암반상태가 III 등급으

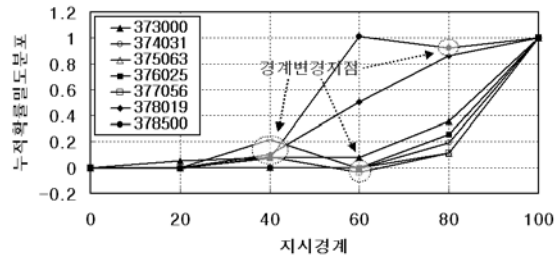


그림 11. 지시경계자의 순서문제 해결 전

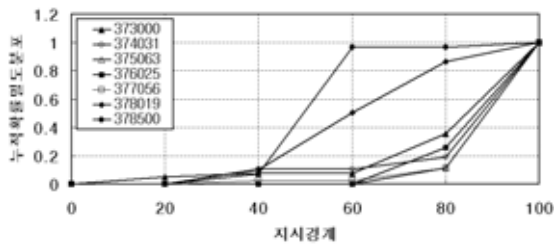


그림 12. 지시경계자의 순서문제 해결 후

로 다소 취약하게 평가되었다.

그림 17 및 18은 터널 중심선 상의 각점에서 얻어진 누적밀도함수를 사용하여 구한 암반등급의 신뢰도를 및 표준편차를 보여준다. 결과를 분석해 볼 때, 시추공 자료와 전기비저항 자료를 이용한 경우 터널 시점 구간에서 분류등급에 대한 사후누적밀도함수의 표준편차가 다른 구간에 비해 크게 나타나, 이 구간에서는 분류된 암반등급의 신뢰도가 떨어짐을 알 수 있다 (표준편차가 3.5 보다 큰 구간에서는 신뢰도가 낮다고 가정됨). 또한 신뢰확률이 높은 구간에서 표준편차가 적게 나타나 경향이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

이는 터널이 지나가는 심도에서 정량자료가 존재하는 구간이거나, 정량자료가 없더라도 정성자료의 암반등급이 80 이상의 1등급일 경우 지시경계에서 정량자료화 되는 경향 때문에 신뢰도가 높게 나타나고, 정성자료만 존재하는 구간에서는 신뢰도가 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 정량자료의 간격에 따라 신뢰도에 크게 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다.

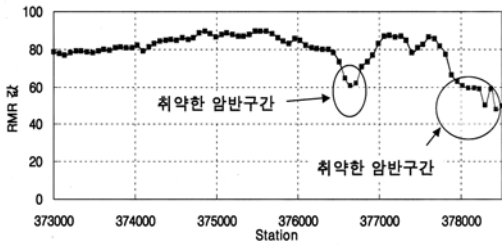


그림 13. 터널 Station에 따른 본선 RMR 분포값

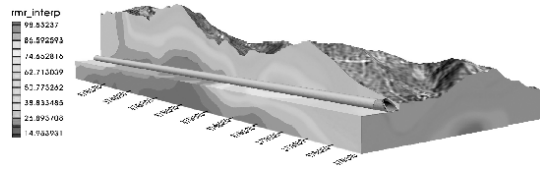


그림 14. 3차원 공간상 추정된 RMR 분포도

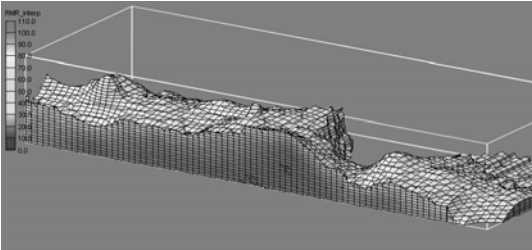


그림 15. 추정된 1등급 암반 분포도

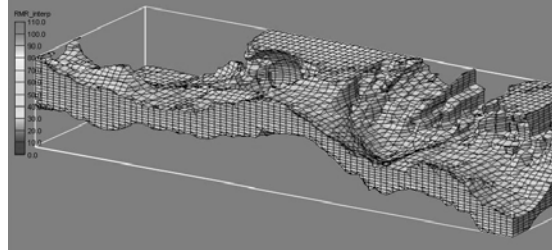


그림 16. 추정된 2등급 암반 분포도

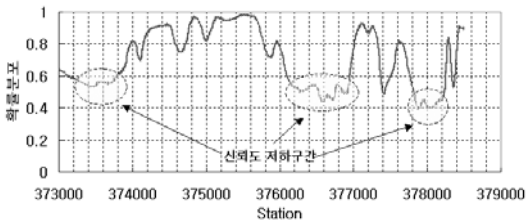


그림 17. 분류등급의 신뢰확률

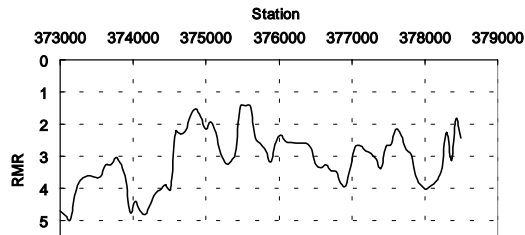


그림 18. 사후누적밀도 함수의 표준편차

4. 결론

본 논문에서는 정량자료가 극히 한정되어 있는 터널설계를 위한 암반분류시 터널 중심선 상에서 벗어난 시추 및 물리탐사 자료 등을 최대한 활용하기 위해 3차원 다분적 지시크리깅 (3D-MI kriging) 기법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수가 있었다.

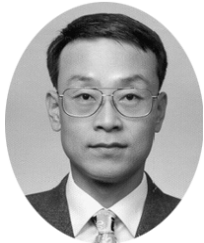
1. 본 연구에서 제안된 3D-MI kriging 기법을 활용하여 터널 중심선으로부터 이격된 3차원 공간상의 시추 자료 및 물리탐사 자료를 최대한 활용하여 최적의 암

반등급과 신뢰도를 효과적으로 산정할 수 있었다.

2. 다분적 지시크리깅은 정량자료와 정성자료가 상호 보완되어 적용되나, 정량자료의 간격에 따라 신뢰도에 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.
3. 본 연구 대상지역의 경우, 암반분류결과 대부분의 지점에서 암반상태가 I 등급과 II 등급만으로 암반상태가 양호하게 분류되었으며, 다만 터널 종점 갱구부 (STA. 378000 이후) 구간에서는 암반상태가 III 등급으로 다소 취약할 것으로 추정할 수 있었다.

참고문헌

1. 유광호 (2003), “터널 설계를 위한 암반등급 산정 기법에 관한 연구”, 한국지반공학회, 제 19권, 제 5호, pp. 319-326.
2. 유광호 (1995a), “다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구 - I. 이론”, 한국지반공학회지, 제 11권, 제 2호, pp. 71-77.
3. 유광호 (1995b), “A Solution for Order Relation Problem in Multiple Indicator Kriging”, 한국지반공학회지, 제 11권, 제 3호, pp. 17-26.
4. 박준경, 박영진, 이상호, 위용곤, 홍창수, 추석연 (2002), “Kriging 기법을 이용한 지하수위 분포추정”, 한국 터널 공학회 논문집, Vol. 4, No. 3, pp. 217-227.
5. Bardossy, A., I. Bogardi, and W. E. Kelly (1988), “Imprecise (Fuzzy) Information in Geostatistics”, *Mathematical Geology*, Vol. 20, No. 4, pp. 287-311.
6. Dubrule, O. and C. Kostov (1986), “An Interpolation Method Taking Into Account Inequality Constraints: I. Methodology”, *Mathematical Geology*, Vol. 18, No. 1, pp. 33-51.
7. Journé, A. G. and CH. J. Huijbregts (1978), *Mining Geostatistics*, Academic Press.
8. Solow, A.R. (1986), “Mapping by Simple Indicator Kriging”, *Mathematical Geology*, Vol. 18, No. 3, pp. 335-352.



유광호

수원대학교 토목공학과 조교수
khyou@mail.suwon.ac.kr



이상호

(주) 삼보기술단 대리
geotech@hanmail.net



추석연

(주) 삼보기술단 이사
sbege@chollian.net



주광수

(주) 현대건설 기술개발원 차장
ksjoo@hdec.co.kr