

암반터널설계를 위한 지층분포의 3차원 모델링과 3D Krigging 기법을 이용한 암반등급분포의 지구통계학적 처리방안 연구

3D Modelling of Geological Distributions for the Rock Tunneling Design and the Study for Geostatistical Approaching of the Distributions of Rock Classifications by 3D Krigging

배기훈¹⁾, Gi-Hoon Bae, 윤운상²⁾, Woon-Sang Yoon, 추석연³⁾, Seok-Youn Chu, 이상태⁴⁾, Sang-Tae Lee

¹⁾ 주식회사 넥스지오 컨설팅사업부 과장, Manager, Consulting Div., Nexgeo Inc.

²⁾ 주식회사 넥스지오 대표이사, CEO of Nexgeo Inc.

³⁾ (주) 삼보기술단 지반부 부장, General Manager, Geotechnical Div., Sambo Engineering. Co., Ltd

⁴⁾ 동아컨설턴트 지반정보기술연구소 부장, Chief Engineer, Dong-A Consultants. Co., Ltd

SYNOPSIS : The Rock mass in which constructed a tunnel consist of the geological formations or the engineering rock type. Each layers are distinguished by the mineral, weathering and distributions of faults and joints. Therefore, a tunneling design in rock mass starts from understanding and analyzing of the various geological engineering factors and then the engineering characteristics and distributions for each layers are determined to analysis and collection of the efficient informations. For this working, next two problems have to be solved. First, the layers in rock mass have to be classified and their distributions have to be defined. Second, the rock mass classifications and distributions based on the standard engineering classification have to be determined. Efficiently to approaching this two problems, the best solution is all geotechnical data are embodied to 3-D.

Key words : rock mass, tunneling design, geotechnical data, 3-D.

1. 서 론

터널이 굴착되는 암반은 다양한 지질 시대와 공학적 특성을 가지는 지층(또는 암층)으로 구성되어 있다. 각 지층 단위는 구성 광물, 풍화 상태 및 단층이나 절리 분포 특성 등의 차이를 가진다. 따라서 암반 내 터널 설계는 다양한 지질 공학적 요인들을 파악하고 이해하는 것으로부터 출발하며, 효과적인 정보의 수집과 해석을 통하여 각 지층 단위의 공학적 특성과 분포 상태를 예측하여야 한다. 이 과정에서 다음의 두 가지 문제가 해결되어야 한다.

첫째는 암반 지층 단위의 구분과 분포 상태 규명이다. 각 지층 단위가 공간상에서 3차원으로 분포하는 반면, 대부분의 조사 및 탐사는 1차원 또는 2차원의 정보를 제공한다. 지표지질 조사에서 수집되는 정보는 3차원 공간상의 분산된 점 상의 지반 정보를 제공하며, 시추 조사는 수직 또는 경사 선상의 지반 정보를 제공한다. 각종 물리탐사는 대부분 2차원 정보를 제공하지만 그 정보는 반드시 시추 정보와 결합되어야 실질적인 지층 단위의 구분과 특성화에 사용될 수 있다. 이와 같이 각 조사 및 탐사 자료가 제공하는 정보의 형태 및 특성이 다르므로, 각 지층 단위의 분포에 대한 단편적 정보를 통합하여 가장

적절한 3차원 지층 분포를 예측하여야 한다. 3차원 지질 모델링 기법은 채반 조사 자료의 성과를 최적화 하기 위한 방법으로 지질조사자료와 시추자료를 결합하여 이들 자료를 내삽(interpolation)이나 외삽(extrapolation) 기법을 이용하여 3차원 분포로 확장시킴으로써, 지층 단위에 대한 공간적 분포 특성을 보다 정확히 이해할 수 있으며, 설계로의 적용성을 높일 수 있다.

둘째는 공학적 분류안에 기준한 암반 등급 분포의 예측이다. 대부분의 경우, 터널 설계를 위한 암반 분류는 시추 코어를 대상으로 실시되지만, 전체 터널 지반의 암반 등급 분포를 예측하기에는 획득되는 자료의 양이 미흡한 것이 사실이다. 현재, 이러한 문제를 해결하기 위하여 물리 탐사에 의한 보완 작업을 실시하고 있으나, 적용상 부적절하거나 해석자의 의지에 따라 주관적인 결과가 유도될 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로, 분산되어있는 각종 조사 및 탐사 자료의 암반 등급 예측 활용을 위해 지구통계학적 접근 방법을 채택하여 variogram model에 의한 3D Krigging 기법을 도입하였다.

2. 데이터 구조(Data Structures)

이번 연구에 사용된 프로그램은 조사된 자료로부터 3차원 모델링을 구성하기 위한 데이터 구조를 크게 4가지로 나누고 있는데, 이는 각각 Hole data, Map data, Volume data, 3D Grid data이다. 이러한 데이터 구조가 서로 연계되어 3차원 모델링을 구축하는 과정을 나타내면 다음 <그림 1>과 같다.

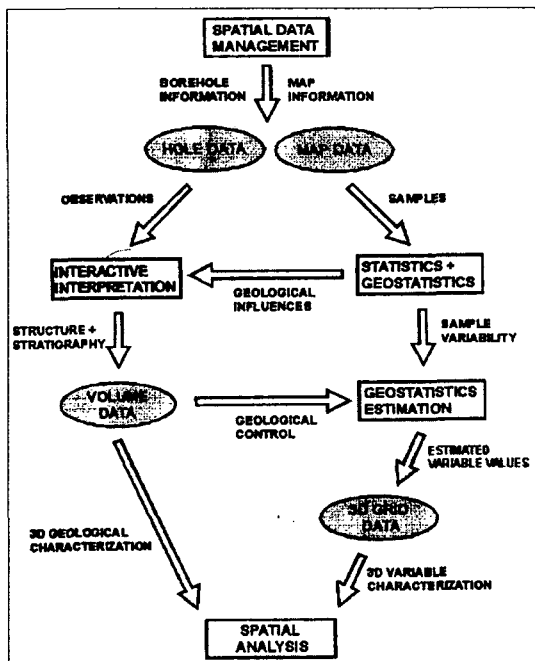


그림 1. 프로그램의 데이터 구조

는 그 자체적으로 3차원 정보(X, Y 좌표 및 고도값)를 포함하고 있으므로 모델링 과정동안 각 데이터의 공간적이 위치에 대한 기준을 마련한다(그림 3).

2.3 Volume data

Volume data는 시추자료나 2차원의 지질도 및 단면도로부터 3차원의 지층 분포를 모델링함으로써 형성되는 공간적인 자료로서, 이 자체가 가시화되어 나타냄으로써 시각적으로 인지되어진다.

2.1 Hole data

기본적으로 본 프로그램은 시추자료를 입력데이터로 한다. 이러한 시추자료는 지표 지질조사 자료와 함께 보다 정확한 지층 분포를 구성하기 위해 필요하다. 시추자료는 기본적으로 시추공의 trace, 각 지층의 분포 심도를 나타내는 지표면으로부터의 거리(distance), 각 지층 또는 입력 지점의 방향(azimuth)과 경사(dip) 그리고 시추공의 공간좌표(X, Y, Z 값)등으로 구성된다(그림 2).

위의 값들이 정밀할수록 3차원 모델링의 구축도 정확성을 가지게 된다.

2.2 Map data

Map data는 해당 지역의 지형 및 도로 등 지형, 지물의 현황에 대한 것으로, 시추 데이터가 지표 및 지하의 지층 분포를 나타내고 있는 것에 반해 이는 지표면에 대한 정보를 설정하거나 표현하는데 필요하다. Map data는 일반적으로 수치지형도를 이용하면 편리하며, 이 수치지형도

Volume data는 각각의 단위(unit)로 구성되어 있으며 그 각각이 서로 결합하여 하나의 지층 체적을 구성하게 된다. 3차원의 체적(volume)은 기본적으로 1차원 자료인 시추자료로부터 시작해 이로부터 2차원의 단면을 구성하고 이 단면들을 서로 내삽(interpolation)시킴으로써 최종적으로 구성된다(그림 4).

2.4 3D Grid data

3D Grid data는 구획되어지지 않은 공간을 적절한 간격으로 나눔으로써 일종의 단위 격자로 구분되어진 공간을 형성시켜 이를 Volume Data와 연계하여 통계학적 내지 지구통계학적 분석에 적용시키기 위한 것이다. 이러한 grid data의 형성은 krigging을 위한 기초 자료가 된다(그림 5).

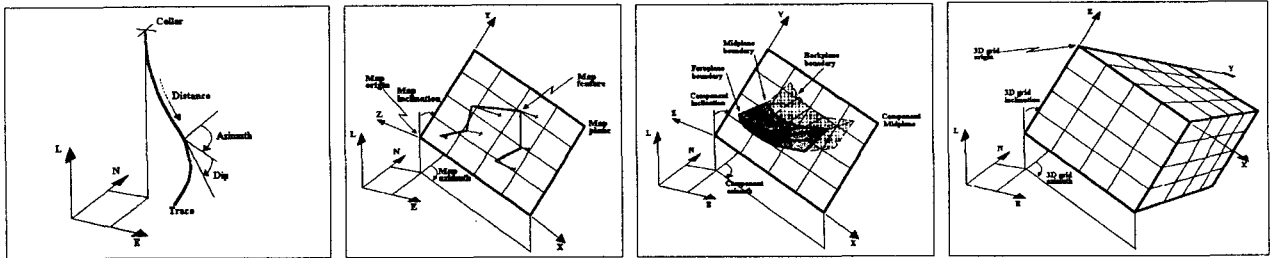


그림 2. Hole data의 기본구조

그림 3. Map data의 기본구조

그림 4. Volume data의 기본 구조

그림 5. 3D Grid data의 기본 구조

3. 지층분포의 3차원 모델링

3.1 3차원 모델링 과정

3.1.1 데이터의 좌표계 설정 ; 수치지형도

본 프로그램상에서 모든 자료는 공간좌표를 가지게 된다. 즉, 시추공의 위치뿐만이 아니라 각 지층의 위치 및 터널의 분포도 공간적인 위치로써 자리잡게 된다. 따라서 이러한 위치에 대한 기준을 마련하기 위해 가장 손쉬운 방법이 수치지도를 이용하는 것인데, 이 수치지도상에 시추공의 위치를 표현함으로써 실제 조사 지역의 지형과 지층의 정보를 가진 시추와의 오차를 최대한 줄일 수 있다(그림 6).

3.1.2 시추자료의 입력

해당 지역에 대한 시추자료를 입력한다. <그림 6>은 수치지도상에 표시된 시추공의 위치와 본 프로그램상에서의 시추 입력창을 나타낸 그림이다. 시추 입력창에 들어가는 정보는 각 시추공의 공간좌표값(X, Y축, 고도), 각 지층의 심도 및 암상 및 각종 정량적 자료(물성치, 암반등급, 품위도 등)가 있다.

3.1.3 단면도 작성

각 시추공에 대한 정보가 입력되면, 이를 2차원의 단면으로 변환시킴으로써 수직적인 지층의 분포를 display한다. 이로부터 동일한 지층의 절점을 서로 연결시킴으로써 각각의 단면을 형성한다(그림 6).

3.1.4 각 단면의 interpolation

앞서와 같이 한 지층에 대한 각각의 단면들이 구성되면 이들을 서로 연결시킴으로써 체적을 가지는 3

차원의 지층이 완성된다. 이러한 단면들의 연결은 각 단면의 절점들을 대응시켜 interpolation시킴으로써 두 단면사이의 공간을 보정하게 된다(그림 7).

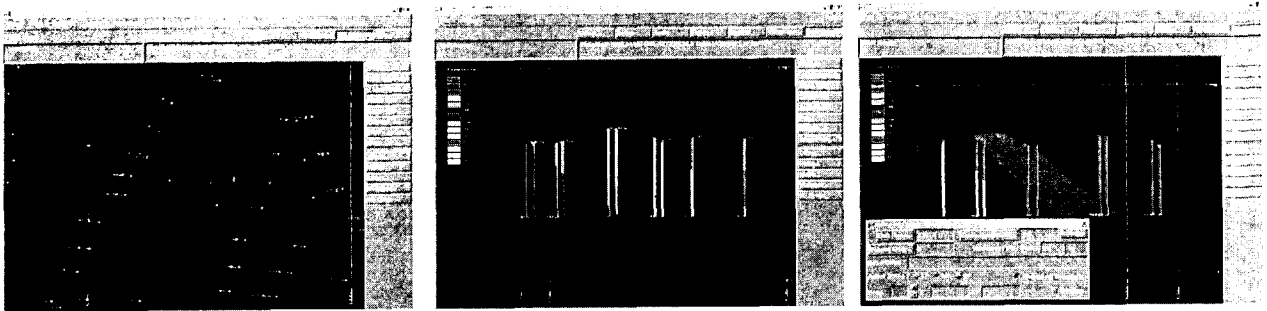


그림 6. 수치지형도와 시추공의 2차원 단면 display 및 지층 단면 작성

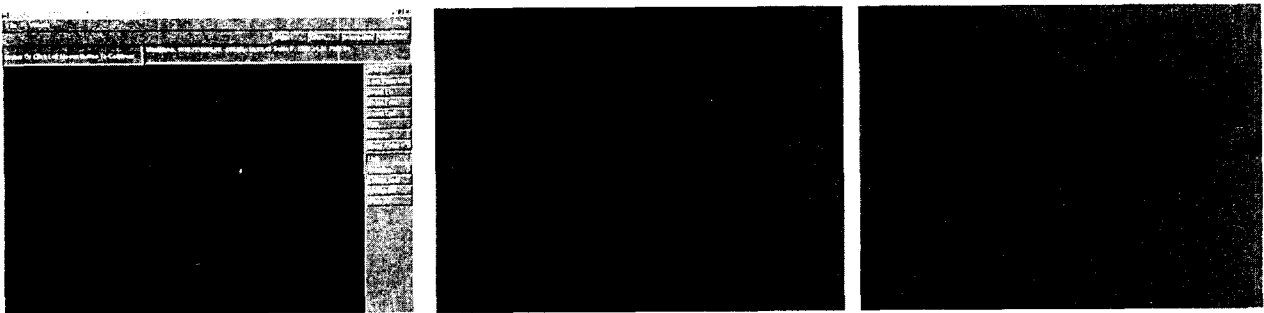


그림 7. 각 단면의 interpolation 및 3차원 단위 solid 개체화

3.1.5 3차원 지층 모델링

위와 같은 과정을 거쳐 모델링하고자 하는 지역의 각 지층들을 3차원의 체적을 가지는 개체로 구성하여 이를 결합하면 다음 그림과 같이 화면상에 각 개체가 프레임으로 나타나며, 이를 3차원의 solid로 변환하여 구성하면 아래 <그림 8>과 같다.

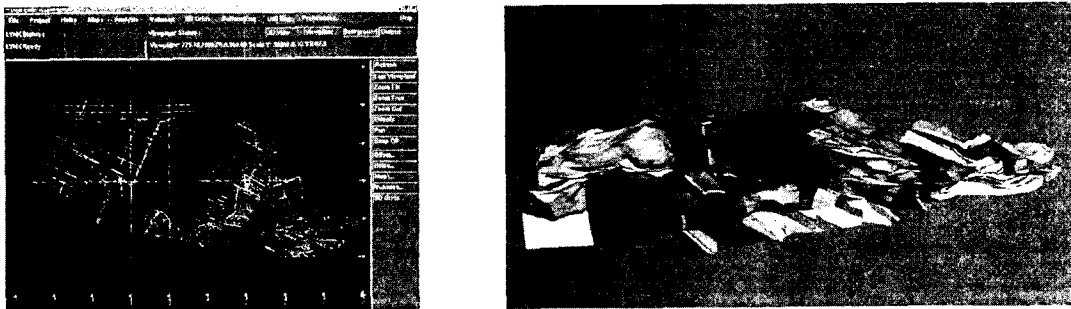


그림 8. 완성된 3차원 프레임과 솔리드 모델링

3.2 Case Study ; OO터널 3차원 모델링

서울시 OO터널 갱구부 일대에 대한 지층분포를 공간적으로 이해하고 이에 대한 터널과의 간섭관계를 분석하기 위해 앞서 기술한 모델링 과정에 따라 3차원 지층 분포 모델링을 수행하였다.

현재 지반조사 항목 중, 지반을 구성하는 지층에 대한 가장 정확하고 직접적인 정보를 획득할 수 있는 방법은 시추를 통한 암반 샘플의 채취이다. 이러한 시추자료는 조사 지역의 평면상에 불규칙적으로 분포하며 각 시추공으로부터 얻는 자료는 일차적으로 각 심도에 따른 지층 분포나 불연속면 특성에 대한 정보를 제공한다. 특히 지층 분포 자료는 각 지층 경계면에 대한 좌표나 분포 두께와 같이 주로 1차

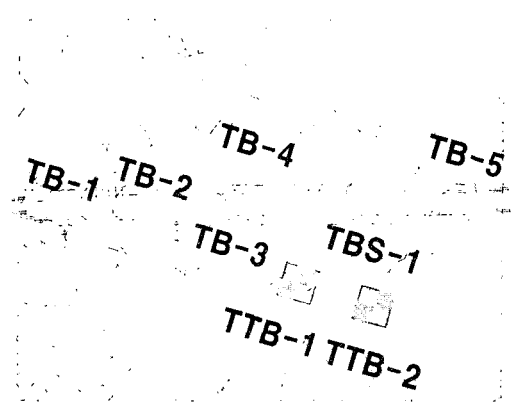


그림 9. OO터널 모델링 범위 및 터널 선형과 시추 위치도

원적으로 정의된다. 기존에는 이러한 1차원적인 자료를 연결하여 주요 방향(중단, 횡단)에 따른 2차원적 단면도를 작성하였다. 그러나 본 프로그램을 사용하여 이를 3차원으로 확장함으로써 조사지역에 대한 전반적인 지층 패턴을 모델링하고 이로부터 터널과 같은 주요 구조물과의 분포 관계를 종합적으로 분석할 수 있었다. 또한 물리탐사 자료를 삽입함으로써 시추자료에 의한 지층 모델링과 비교, 검토할 수 있었으며, 또한 이들 자료를 서로 보완함으로써 가장 적절한 지반 내 지층 분포를 재구성할 수 있었다. <그림 9>는 OO터널의 모델링 범위를 나타낸 것으로 전체 터널 구간 중 시점부 지역 갱구부 및 수직구를 포함한 약 500m 구간으로, 모델링에 사용된 시추공은 총 6개이며, 이 외에 전기비저항탐사 2개소와 공대공 및 공대지 토모그래피 2개소가 실시되었다.

이러한 지반조사자료로부터 구축된 지층 및 물리탐사 모델링은 아래 <그림 10>과 같다.

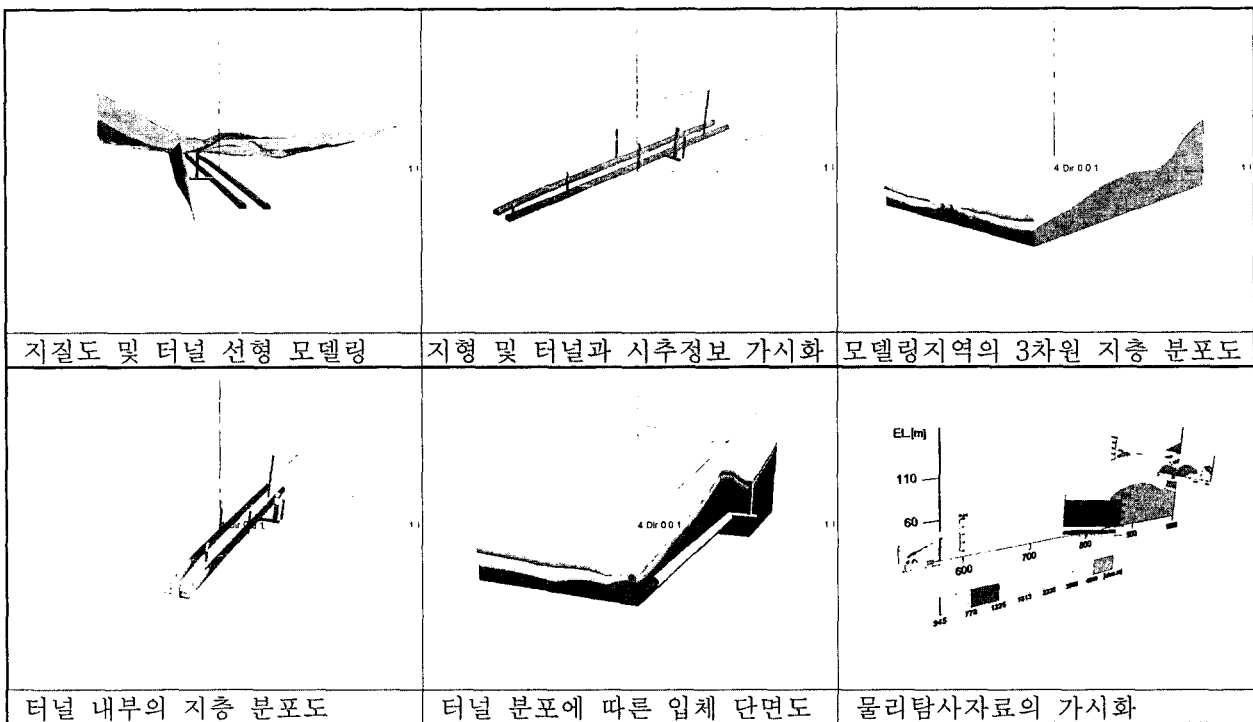


그림 10. 각종 지반조사 자료에 의한 3차원 모델링 및 가시화

4. 3D Krigging 기법을 통한 암반등급분포의 지구통계학적 모델링 연구

터널이 굴착되는 암반에 대한 등급을 분류하기 위해 사용되는 가장 일차적인 자료는 core-logging으로부터 획득된 불연속면 특성이다. 이로부터 RQD, RMR 및 Q-system 등을 산출하는데, 이 역시 전체 지반 중 시추된 지점에 대해서만 매우 국부적이고 제한적인 값을 얻을 수 밖에 없다. 때문에 일반적으로 시추지점 사이에 대한 유추를 위해 물리탐사자료를 이용하여 개인의 주관적인 개입을 통한 2차원적인 암반등급 단면도를 작성한다. 본 연구에서는 이러한 주관적인 판단으로부터 오는 불특정성에 대한 오류를 최소화하고, 현실적으로 제한되어질 수밖에 없는 실제 획득 자료로부터 전체 지반으로의 확장을 위해 지구통계학적인 방법을 이용하여 3D krigging 기법을 적용하고자 한다(그림 11).

4.1 자료분포특성 분석

자료의 입력은 시추공의 좌표로부터 시작하여 각 심도에 따른 암반등급 산출값을 입력한다. 이는 직접 암반등급값을 입력하거나 각 암반등급분류안에 따른 세부 항목에 대한 요소들의 점수를 입력하는 방식으로 진행될 수 있다. 이로부터 암반등급 또는 각 항목들의 점수에 대한 histogram(그림 12) 및 누적도수 분포표와 이들에 대한 상관성 분석을 위한 Scatter plot(그림 13)을 작성함으로써 입력 자료에 대한 일차적인 자료분포특성을 분석할 수 있다.

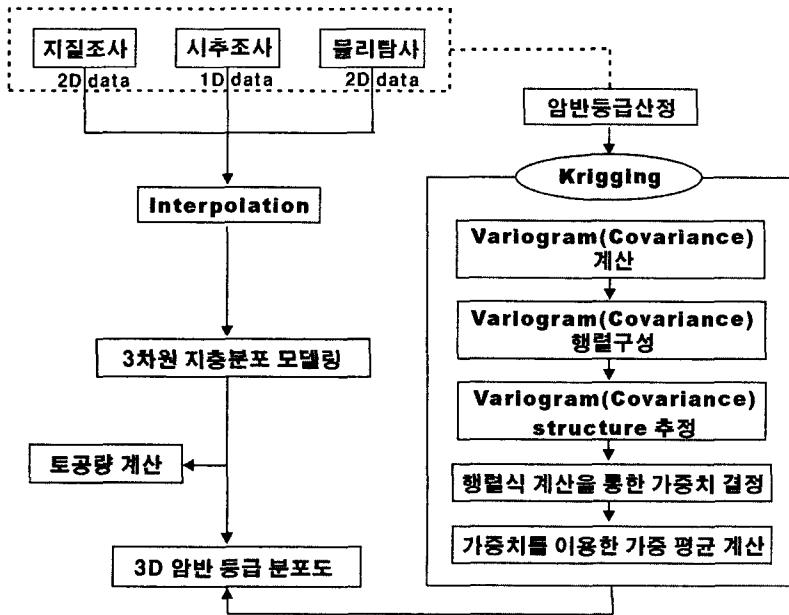


그림 11. 3D 암반등급 분포도 모델링을 위한 kriging 과정

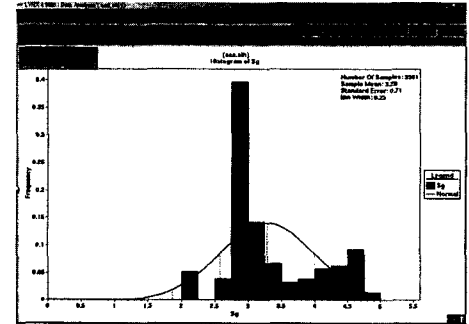


그림 12. Histogram과 정규분포곡선

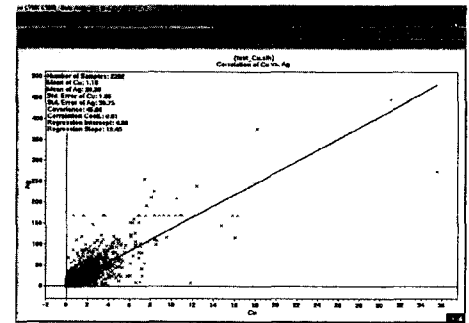


그림 13. 상관성 분석을 위한 Scatter plot

4.2 Variogram Model의 정의

4.2.1 Variogram의 정의

공간상에 분포하고 있는 변수에 대해, 공간의 이동에 변화량 제곱값에 대한 평균을 의미한다. 이는 공간상의 이동에 따른 해당 변수의 변화량에 대한 절대값을 그 기댓값으로 표현한 것이다. 이의 수학적 정의는 다음과 같다.

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \{V(x) - V(x+h)\}^2 \quad (1)$$

이 때, $2\gamma(h)$ 를 variogram으로 정의한다. 하지만 일반적인 사용상에서는 variogram보다는 semi-variogram ($\gamma(h)$)를 주로 사용한다.

4.2.2 Variogram Model

앞서 설명한 것은 실제 계산상의 적용을 위한 variogram을 나타낸다. 하지만, 이는 실제 측정값에 기초한 것이며, 관측값의 오차를 그대로 포함한 형태로 정의되는 것이다. 따라서 이를 실제적으로 적용하지는 않는다. 이의 실제 적용은 이 자체보다도, 이미 통계적으로 타당하다고 인정되는 모델을 사용하게

된다. 이 때 계산된 결과는 합당하다고 생각되는 모델의 계수 (parameter)를 추정하는데 이용된다.

실제 variogram의 적용에서 많이 이용되는 모델은 다음과 같은 것들이 있다.

Exponential Model $\gamma(h) = C_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right\}$ (2)

Gaussian Model $\gamma(h) = C_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right\}$ (3)

Spherical Model $\gamma(h) = \begin{cases} C_0 \left(\frac{h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right), & h \leq a \\ C_0 & h > a \end{cases}$ (4)

이 때, a 를 characteristic length라고 하고, 본 모델 구성을 위한 추정값이 된다. 각각의 모델의 형태는 <그림 14>에 제시된 바와 같다.

이 이외에도 많이 이용되는 모델로 hole-effect model과 power 모델이 있다. 하지만 실제 적용에서 위의 모델을 독자적으로 사용하지 않고 몇 개의 모델을 중첩해서 사용하는 경우가 있다. 몇 개의 모델이 중첩되어 하나의 전체적인 variogram 모델을 구성하는 구조를 nested structure라고 부른다. 실제로 본 프로그램에서 적용되는 모델로는 exponential model, gaussian model, spherical model 그리고 power model 등이 있으며, 실제 variogram 모델 구성에는 nested structure를 적용할 수 있다(최대 3개 모델의 중첩 가능).

또한, 실제 variogram 모델을 구성하다 보면, 공간상의 거리가 0에서 아주 가까울 때, variogram 값이 순간적 급격히 변하는 경우를 관찰할 수 있다 (그림 15). 이러한 경우 실제 variogram 모델의 구성을 nugget effect를 제외한 부분에서만 설정하고, 전체 모델에 nugget에 해당하는 양을 더해 주면 전체 variogram 모델이 구성된다. (Mining Geostatistics, Journel and Huijbregts, 1978)

4.3 실측값 입력에 따른 variogram 계산과 variogram model 추정

위와 같은 variogram model을 작성하기 위해 실측값을 입력하였다. 입력값은 RMR을 대상으로 하였으며, 이에 대한 histogram 및 variogram model 추정 결과는 다음 <그림 16, 17>과 같다.

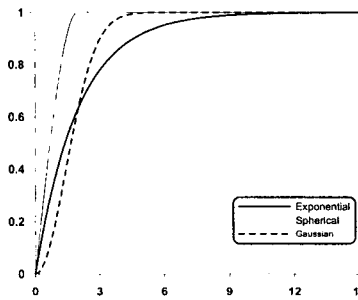


그림 14. Variogram model에 따른 그래프

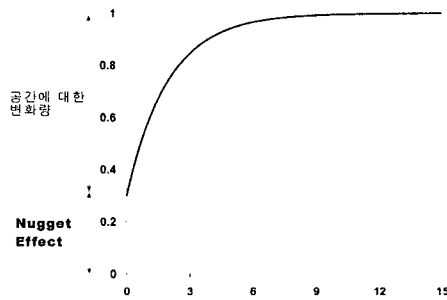


그림 15. Nugget effect에 대한 모식도

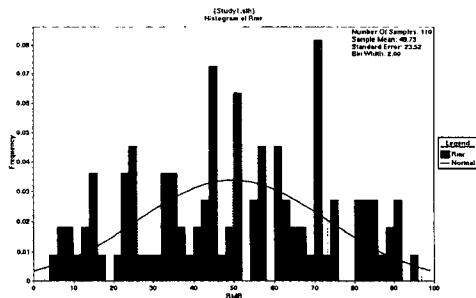


그림 16. 실측값에 의한 histogram

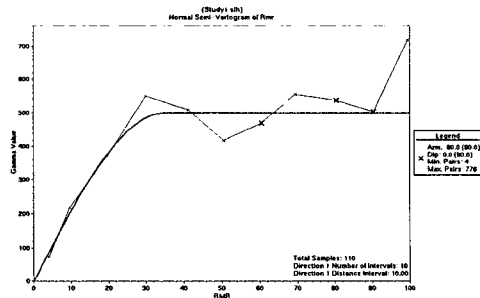


그림 17. Variogram model의 추정

4.4 Variogram model에 의한 3D Kriging 및 3차원 암반등급 분포도

이상과 같은 variogram model을 추정하고, krigging할 영역을 설정한다. 영역의 설정은 3D Grid를 형성함으로써 이루어지는데, 이 3D grid는 공간상의 X, Y, Z 좌표에 대해 일정한 간격으로 나눔으로써 수많은 단위 cell로 구성된다. 이러한 cell 내부는 실측된 자료로부터 추정된 variogram model에 의해 krigging되어 통계적인 값을 부여받게된다.

이로부터 얻은 개개의 cell을 3차원적으로 표현한 암반등급 분포도는 아래 <그림 18>과 같다.

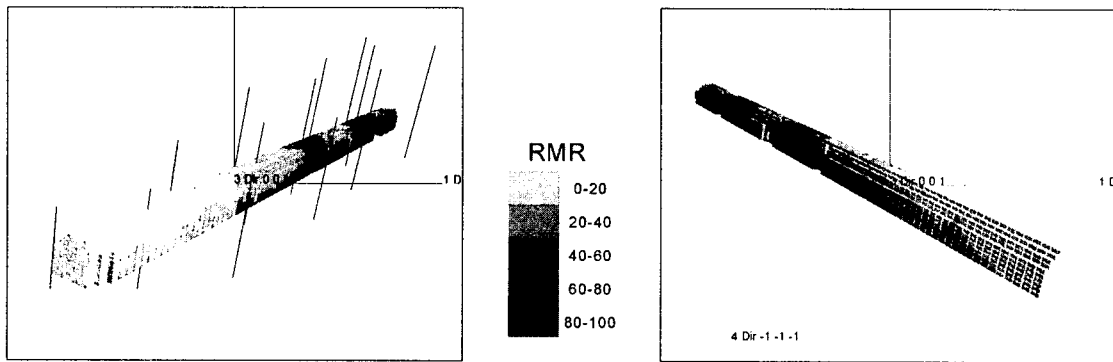


그림 18. 실제 자료(RMR)에 의한 3차원 암반등급분포도.

5. 결 론

터널과 같은 구조물이 계획되는 지반은 그 내부의 속성이 3차원적으로 규명될 때 비로서 효율적인 해석이 가능함에도 불구하고, 현실적으로 지반조사를 통해 획득된 자료는 그 속성상 0차원에서 2차원 사이에서 정의된다. 이렇게 직접적인 자료의 획득은 그 한계상 2차원 이하의 속성으로 이루어질 수밖에 없으므로, 이를 실제 지반이 형성하고 있는 3차원적인 공간으로 확장함으로써 보다 효율적이고 사실적인 분석을 하고자 하였다. 이를 위해 기본적으로 시추자료를 통한 지층 분포의 3차원 모델링을 적용하였으며, 그 결과 조사 지역에 대한 보다 입체적이고 가시적인 분석 및 터널과의 상관 관계를 이해하는데 큰 증진이 있었다. 또한 암반의 정량적인 등급을 결정하기 위한 암반등급도에 대한 기존 방식의 한계를 보완하고, 부족한 실측 자료의 객관적인 적용을 위해 variogram model 추정과 같은 지구통계학적 방법을 이용하여 3D krigging 기법을 연구하였다. 이로부터 얻은 결과는 앞으로 터널 설계를 위한 지반 조사시 보다 객관적이고 실효성있는 성과를 가져올 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. 배기훈(2002), "암반터널설계를 위한 지질분포의 3차원 모델링과 가시화", 서울대학교 석사논문.
2. Journel, A.G.(1986)., "Geostatistics: Model and tools for the earth sciences", Math. Geol., 18(1), 3. pp.119~141.
3. Journel, A., and C. Huijbregts(1978), "Mining Geostatistics", Academic Press, NY.
4. Kitanidis, P. K.(1985), "Minimum-variance unbiased quadratic estimation of covariances of regionalized variables", Math. Geol., 17, pp.195~208.
5. Kitanidis, P. K., and E. G. Vomvoris(1983), "A geostatistical approach to the inverse problem in groundwater modeling(steady state) and one-dimensional simulations", Water Resour. Res., 19(3).