

# 통계적 지반 공간 정보 기법을 이용한 지층구조 분석

## Application of Statistical Geo-Spatial Information Technology to Soil Stratification

김 한 샘<sup>1</sup> Kim, Han-Saem

김 현 기<sup>2</sup> Kim, Hyun-Ki

신 시 열<sup>3</sup> Shin, Si-Yeol

정 충 기<sup>4</sup> Chung, Choong-Ki

### Abstract

Subsurface Investigation results always reflect a level of soil uncertainty, which sometimes requires statistical corrections of the data for the appropriate engineering decision. This study suggests a closed-form framework to extract the outlying data points from the testing results using the statistical geo-spatial information analyses with outlier analysis and kriging-based crossvalidation. The suggested analysis method is conducted to soil stratification using the borehole data in Yeouido.

### 요 지

지반조사 결과 자료는 지반의 불균질성과 낮은 신뢰성을 갖는 일부 자료로 인해 불확실성을 갖게 된다. 이에 따라 지반조사 결과 자료를 활용하여 지반 특성을 해석할 경우 합리적인 공학적 판단을 위해 적절한 통계분석이 요구된다. 본 연구에서는 이상치 분석기법과 교차검증기법을 접목한 통계적 지반 공간 정보 분석 기법을 이용하여 대상지역 지반조사 자료 중 경향성을 상회하는 지반조사 지점을 선별하는 전문가시스템을 개발하였다. 개발 시스템을 이용하여 서울시 여의도 지역의 시추조사 자료를 바탕으로 지층구조 분석을 수행하였다. 그 결과 신뢰도가 낮은 것으로 판단되는 시추조사 자료를 결정하고, 본 지점을 제외한 여의도 지역의 기반암 심도 분포를 확인하였다.

**Keywords :** Borehole, Crossvalidation, Kriging, Outlier analysis, Soil uncertainty, Statistical analysis

### 1. 서 론

대상 지역에 존재하는 다수의 지반조사 결과 자료를 이용하여 지반 특성을 해석할 경우에 지반의 불균질성과 일부 자료의 낮은 신뢰성으로 인해 지층구성 평가 및 각 지층의 지반 정수 산정을 함에 있어서 어느 정도 오차나 오류가 불가피하게 된다. 이에 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(2007), Eurocode 7: Geotechnical design(2004) 등의 설계 기준에서는 지반조사 결과를

통해 측정된 지반특성값이 지역적으로 다르게 나타남은 물론이고 동일지역 내에서도 관심 물리량에 따라 변동폭이 클 수 있음을 고려하여, 설계 예정 구조물의 중요도나 파괴예상 확률, 측정 물리량의 변동성에 따라 적절한 통계분석을 하여 물리량의 특성값 및 설계 정수 결정에 활용하도록 규정하고 있다.

국내에서는 구조물의 각종 설계변수의 확률적 변동성을 고려함으로써 외부 하중의 작용에 의한 위험도를 통계적으로 산정하여 설계에 반영될 수 있도록 관련 연

1 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

2 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kookmin Univ., geotech@kookmin.ac.kr, 교신저자)

3 학생회원, 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kookmin Univ.)

4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 1월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

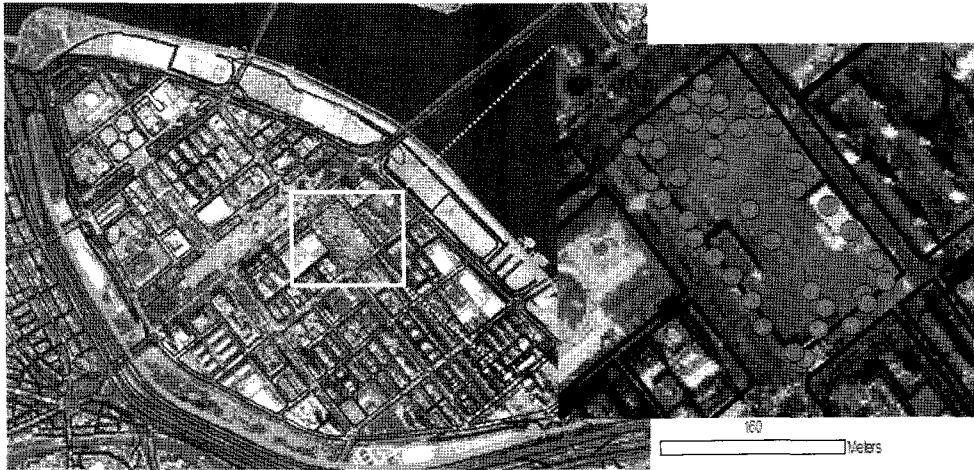


그림 1. 분석 대상 지역: 서울시 여의도 지역

구를 진행하고 있다. 국토해양부에 진행 중인 “항만구조물 신뢰성 설계표준서(2011)”에 관한 연구에서는 방파제, 안벽 등의 항만구조물이 외부하중에 저항하는 확률론적 신뢰성 설계방법에 관한 표준 절차를 제공하고 있다. 또한 윤길림 등(2008)은 국내외 주요한 해양토질에 대하여 불확실성을 고려한 특성치를 통계적 방법을 이용하여 산정하고, 그 값을 이용하여 지지력 및 침하량 계산 시 영향 정도를 파악하였으며, 선정된 대표치 및 특성치에 의한 설계결과를 비교한 바 있다. 이러한 지반구조물의 신뢰성 설계에 있어서, 통계처리 기법을 적용한 대상지역의 합리적인 층상정보 파악은 설계변수 산정 및 신뢰성 설계 기법 결정시 기초자료로서 활용될 수 있다.

한편 최근 제한적인 지반조사를 통하여 얻어진 정보를 체계적으로 데이터베이스(database)화하고 이를 보간하여 대상 영역 전체의 지반 정보를 예측하기 위하여 지구통계학적 기법인 크리깅(kriging)이 적용되고 있다(천성호 외, 2005). 크리깅 기법은 특히 지층(geo-layers) 구조, 즉 구성 지층의 판별과 각 지층의 두께 및 연속성에 관한 정보를 제한된 수량의 시추조사 결과로부터 보간하여 예측하는데 매우 효과적으로 활용될 수 있다. 이러한 지층 구조 예측 시, 한정된 시추조사 자료의 공간 분포 특성 및 통계 특성치를 반영한 공간 보간 및 보간 결과의 검증이 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 대상지역의 지반조사 자료를 통계 처리하여 설계에 필요한 정보를 제공하는 전문가시스템을 개발하였다(김정열 외, 2010; 한국건설교통기술평가원, 2011). 개발 시스템은 시추조사 자료의 층상정보를 입력받아 신뢰도가 고려된 기반암 심도를 결정함으로써, 구조물 설계 시 대상지역의 합리적인 지반

특성 평가가 가능하도록 한다.

본 시스템의 활용예시로서 서울시 여의도 일부 지역을 대상으로 지반조사 결과 자료 중 기반암 심도에 대한 신뢰성 분석을 수행하였다. 그림 1과 같이 서울시 여의도 지역 내의 일부 구역을 대상지역으로 선정하여 구역 내 존재하는 41개의 지반조사 자료 중 기반암 심도 결과를 이용하였다. 기반암 심도는 시추주상도 상에서 연암층보다 상부지층인 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층의 두께 총합으로 정의하였다.

개발된 전문가시스템의 분석과정은 그림 2와 같으며, 크게 통계 분석과 지구통계학적 분석 과정으로 구성되었다. 통계 분석 과정에서 해석 대상 자료가 가지는 기본적인 통계 분석을 수행하고, 자료의 분포양상에 가장 가까운 확률 분포 함수를 결정할 수 있도록 하였다. 지구통계학적 분석 과정에서는 기반암까지의 심도에 대해 크리깅을 활용한 지층 예측을 수행함과 동시에 예측 정확도의 비교 분석을 위해 교차검증을 수행하여 예측

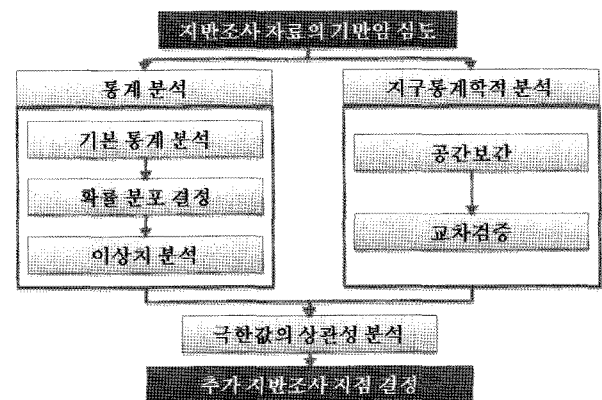


그림 2. 전문가시스템의 분석 과정

오차를 평가하였다. 그리고 이상치 분석기법과 교차검증 기법을 통해 분석 대상 물리량 가운데 통계적으로 동일한 성질의 측정값이 아니라고 할 수 있는 이상치(Outlier)를 분류하는 과정을 추가하였다. 그 결과 주어진 자료의 신뢰도를 정량적으로 평가할 수 있는 자료를 제공하고, 전반적인 경향성을 상회하는 지반조사 지점을 선별함으로써 추가조사가 필요한 지점을 결정하고 대상지반의 특성을 보다 정확하게 파악하는 기법을 제안하였다.

## 2. 본 전문가 시스템에 적용된 통계 분석 기법

### 2.1 기본적인 통계 분석

지반 조사 결과 자료에 대해서 통계 분석을 수행하기

표 1. 기본 통계 분석 식

기본 통계 분석 결과		기본 통계 분석 식
표준편차		$\sigma = \sqrt{E(x^2) - (E(x))^2}$
변동계수		$COV = \frac{\sigma}{E(x)}$
왜도		$E[x - E(x)]^3 = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^3 f_X(x) dx$
첨도		$E[x - E(x)]^4 = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^4 f_X(x) dx$
평균	산술평균	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
	기하평균	$\left( \prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}$
	조화평균	$\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$

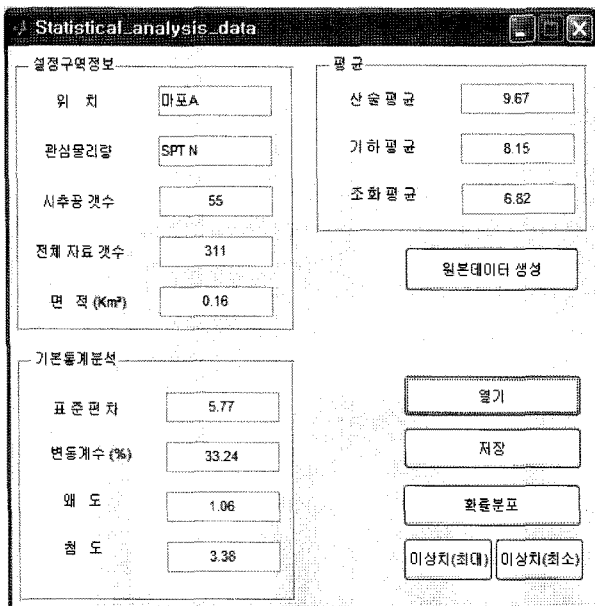


그림 3. 기본 통계 분석 모듈

위해서 일단 기본적인 통계 자료를 파악하는 것이 중요하다. 본 전문가시스템에서는 기본적인 조사 자료로 대상지역 지반 조사 자료의 위치 및 조사면적, 물리량 종류, 자료의 수량 등을 표시할 수 있도록 하였고, 기본적인 통계자료로 평균, 표준편차, 변동계수(COV, Coefficient of Variation), 왜도(skewness), 첨도(kurtosis) 등을 표시하였다(표 1).

여기서, 사용된 변수의 정의는 다음과 같다( $x$  : 확률변수,  $\sigma$  : 확률변수  $x$ 의 표준편차,  $E(x)$  : 자료값의 산술평균,  $f_X(x)$  : 이산자료들이 가지는 확률밀도 함수,  $n$  : 표본의 크기). 개발시스템의 기본 통계 분석 모듈은 그림 3과 같으며, 대상구역정보, 기본통계분석 정보, 평균을 산정할 수 있도록 지원한다.

### 2.2 확률 분포 형태의 결정

확률 분포 결정은 설정된 자료의 확률분포에 가장 가까운 분포 함수를 결정하는 방법으로, 본 연구에서는 K-S검정, Pearson 분류 도표, Beta함수 분류 도표 등의 방법을 활용하였다. 먼저 분석 대상 물리량에 대해 일반적으로 가장 많이 활용하는 정규분포, 대수정규분포, Weibull 분포에 대한 K-S 검정시험을 실시하여 세 가지 확률분포 가운데 가장 가까운 형태의 확률분포가 어떤 것인지 그림 4와 같이 확인할 수 있도록 하였다. 다음과 같이  $F(x)$ 는 비교대상인 정규, 대수정규, Weibull분포의 누적밀도 함수와  $G(x)$ , 대상 자료의 누적밀도 함수를 구

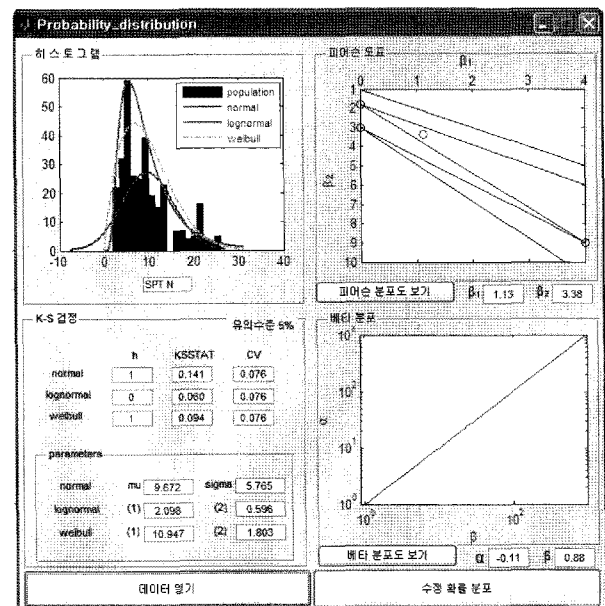


그림 4. 확률 분포 결정 모듈

하고, 이 두 누적밀도 함수간의 최대차이 D를 산정하여 이 값이 주어진 신뢰구간에 따라 정의되는 CV(Critical Value)보다 작을 때 그 분포함수의 형태를 따른다고 볼 수 있다(Smirnov, 1948). 식 (2)에서의 1.36은 신뢰수준이 95%인 경우를 의미한다.

$$D = \max(|F(x) - G(x)|) \quad (1)$$

$$CV = \frac{1.36}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

그리고 Pearson diagram 분류 도표, Beta distribution 분류 도표에 함께 적용함으로써 적합한 확률분포 형상을 가정할 수 있도록 하였다. Pearson diagram 분류 방법은 대상 자료의  $\beta_1, \beta_2$ , 두 계수값을 산정하여 분포형태를 결정하는데  $\beta_1$ 은 왜도의 제곱,  $\beta_2$ 는 첨도를 의미한다(Ord, 1972). 두 계수 값이 표시하는 좌표에 해당되는 영역에 따라 대상 자료가 어떠한 형태의 분포양상을 보이는지를 파악한다. Beta Distribution 방법은 대상 자료의 최대값  $a$ , 최소값  $b$ , 산술평균값, 표준편차 등을 이용해 다음의 수식을 이용하여 산정하는 두 계수  $\alpha, \beta$ 에 의해 분포의 형상을 결정한다(Harr, 1987).

$$X = \frac{E(x) - a}{b - a} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\sigma}{b - a} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{X^2}{Y^2}(1 - X) - (1 + X) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\alpha + 1}{X} - (\alpha + 2) \quad (6)$$

### 2.3 이상치 분석

통계분석 대상이 되는 표본내의 일부 자료가 표본 집단의 성질을 대표한다고 보기 어려울 수 있으며, 이러한 경우에는 통계분석에서 이에 대한 포함여부를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 이상치 분석기법을 적용하여 분석 대상 물리량 가운데 주어진 평가수준에서 통계적으로 동일한 성질의 측정값이 아니라고 할 수 있는 이상치(Outlier)를 골라내어 적절한

통계분석이 이루어 질 수 있도록 하였다. 이상치 분석을 간단하게 설명하면, 주어진 지반조사결과를 일정한 규칙에 따라 수 개의 하위그룹으로 분류한 뒤 각 하위그룹의 극한값들의 분포를 표현할 수 있는 GEV(Generalized Extreme Value) 확률 분포 함수를 결정하고 이의 누적확률분포에서 일정 설계수준에 따라 이상치를 규정하는 문턱값을 정의한다. GEV함수는 Gumbel, Frechet, Weibull의 극한값 분포를 일반화시킨 확률분포함수로서 다음 식 (7)과 같이 나타내어진다(Jenkinson, 1955; Park and Sohn, 2006; 김정열 외, 2010).

$$f = (x|\kappa, \sigma, \mu) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + \kappa \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right) \left(1 + \kappa \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{\kappa}} \quad (7)$$

여기는  $\kappa, \sigma, \mu$ 는 각각 형상계수, 크기계수, 위치계수를 나타낸다.

본 연구에서는 서울시 여의도 일부 지역을 대상으로 지반조사 결과 자료 중 기반암 심도에 대해 이상치 분석을 수행하였다. 이에 분석하고자 하는 지역에 대한 시추공 ID, 위치정보, 층 두께 등이 포함된 데이터를 구하고, 전체 대상지역의 10~15%를 포함할 수 있는 지역으로 구성된 조사자료의 하위그룹을 생성하였다. 그리고 41개의 지반조사 결과에 대한 공간분포를 베리오그램을 통해서 확인하였다. 사용한 베리오그램 모델은 분리거리가 증가하면서 자료들의 상관성이 줄어들어 베리오그램의 값이 일정한 값까지 증가하다가 상관거리 이상에서는 그 값이 일정한 경우로, 5개의 문턱값이 있는 모델(선형모델, 구형모델, 지수모델, 가우스모델, 너깃모델)을 적용하였으며, 각 모델별 유효거리는 표 2와 같다. 공간분포를 분석한 결과 입력된 지반조사 결과에 따라 구형모델이 상대적으로 적합한 분포결과로 나타났다(그림 5).

Variogram 분석을 통해 대상 자료의 유효거리가 약 60m 정도 됨을 확인하고 격자형태의 60m 간격으로 구성된 기준점을 잡고 기준점으로부터 유효거리의 1배와 1.5배에 해당하는 거리인 반경 60m와 90m안의 측정값을 각각의 하위그룹으로 설정하였다. 그리고 각 하위 그룹 안에서 측정된 기반암 심도의 산술평균값으로 각 측

표 2. 여의도 지역 기반암 심도 조사 자료의 베리오그램 모델별 유효거리

베리오그램 모델	선형모델	구형모델	지수모델	가우스모델	너깃모델
유효거리 [m]	49.3	55.6	68.2	70.5	58.1

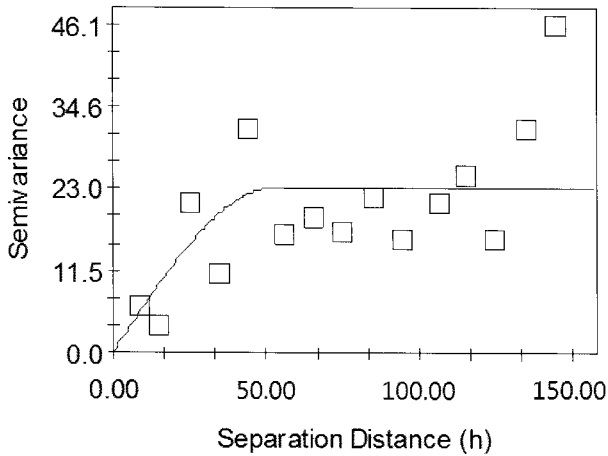


그림 5. 여의도 지역 기반암 심도 조사 자료의 베리오그램(구형모델)

정값을 나누어 정규화하고, 이렇게 구한 기반암 정규심도의 최대값과 최소값이 따르는 GEV 함수를 각각 구하였다(그림 6 참조).

그림 7은 하위그룹 설정반경을 60m와 90m로 설정했을 때 각각의 설정반경에 따라 최대값에 대한 이상치와 최소값에 대한 이상치를 구한 결과이다.

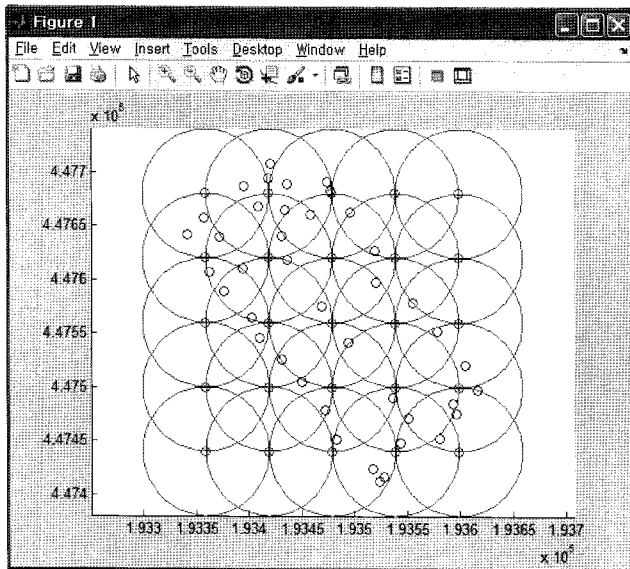
이에 따라 각 지반조사 지점별로 측정된 기반암 정규

심도에 대해서 유효거리에 따른 최대, 최소 극한값의 분포비율별 이상치를 표 3과 같이 산정하고, 각 지점에서의 측정값에 대한 기반암 정규심도의 이상치 선별을 위한 문턱값으로 최대 극한값의 경우 90% 분포비율을, 최소 극한값의 경우 10%의 분포비율을 설정하였다.

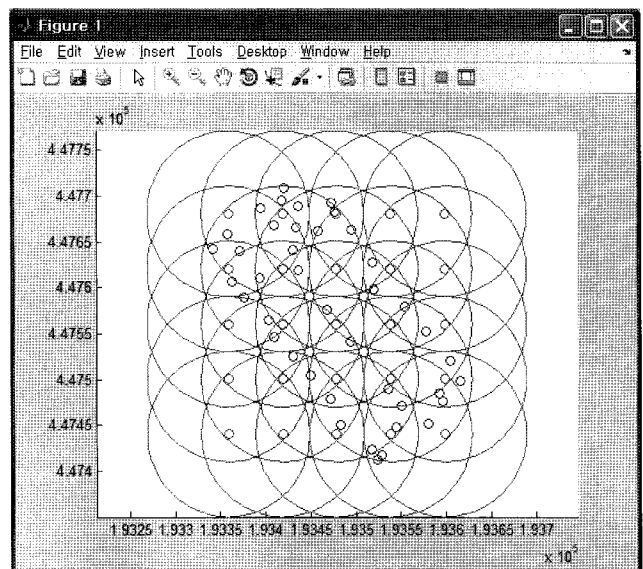
### 3. 지구통계학적 기법을 적용한 지반조사 자료의 신뢰도 분석

#### 3.1 크리깅 기법을 이용한 공간보간

불연속 분포 자료를 연속화하기 위한 방법인 공간 자료 보간 기법에는 단순 평균법(simple average method), 삼각형법(triangular method), 거리 반비례법(inverse weighted distance method) 등과 같은 단순 수학적 방법이 적용될 수 있으나, 대상 영역 내의 전체 자료를 수학적 또는 통계학으로 처리하기에는 한계가 있다(김인기 외, 1993). 반면 지구통계학적 기법인 크리깅은 수학적 방법과 통계학적 방법이 결합된 형태이며, 기지 자료간의 상관관계, 기지자료와 예측될 지점 값의 상관관계, 기지 자료



(a) 조사지역 자료의 설정반경 60m에 대한 하위그룹 생성

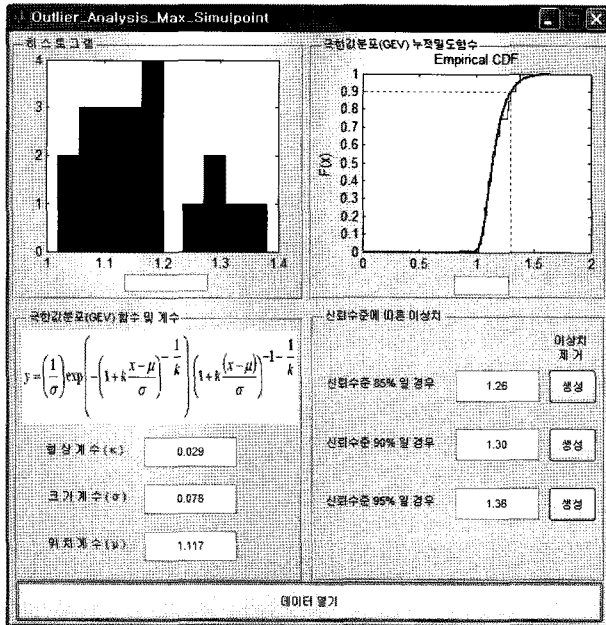


(b) 조사지역 자료의 설정반경 90m에 대한 하위그룹 생성

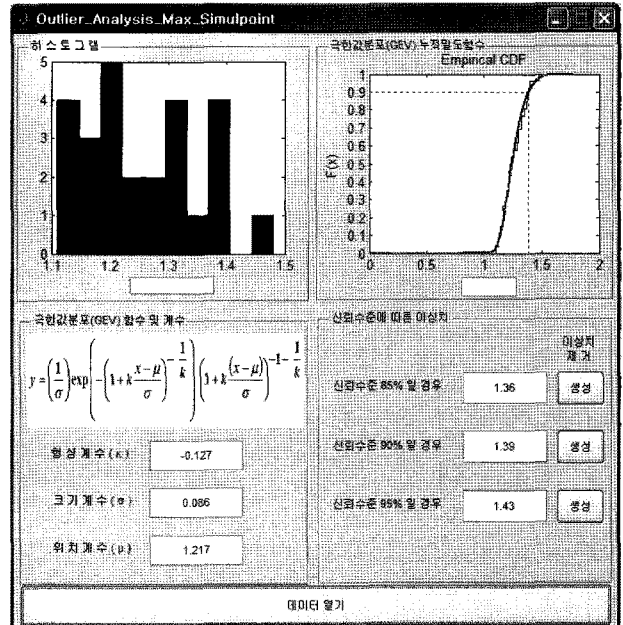
그림 6. 조사지역 자료의 설정반경에 대한 하위그룹 생성 모듈

표 3. 유효거리에 대한 최대, 최소 극한값의 분포비율별 이상치

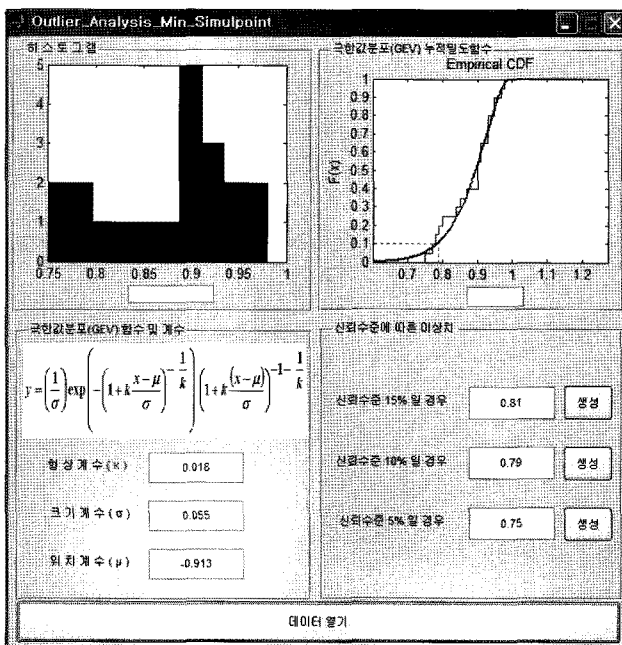
분포비율	최대 극한값		분포비율	최소 극한값	
	설정반경 60m	설정반경 90m		설정반경 60m	설정반경 90m
85%	1.26	1.37	15%	0.80	0.77
90%	1.29	1.39	10%	0.78	0.76
95%	1.34	1.42	5%	0.75	0.74



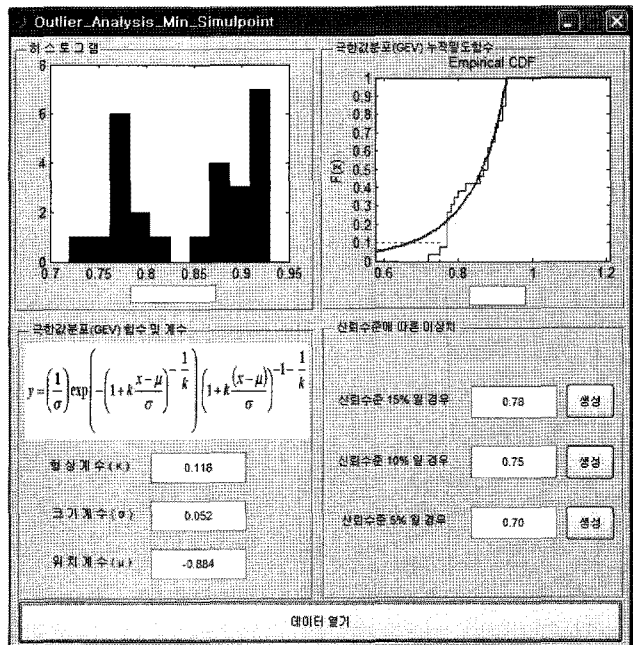
(a) 설정반경 60m에 대한 이상치 분석 결과(최대 극한값 자료)



(b) 설정반경 90m에 대한 이상치 분석 결과(최대 극한값 자료)



(c) 설정반경 60m에 대한 이상치 분석 결과(최소 극한값 자료)



(d) 설정반경 90m에 대한 이상치 분석 결과(최소 극한값 자료)

그림 7. 설정반경에 대한 이상치 분석 모듈

의 경향성 등을 반영할 수 있어서 넓은 영역의 공간적 보간에 매우 효과적이다.

크리깅은 대상 영역 내 모든 기지 자료들의 거리에 따른 변화 특성을 베리오그램을 이용하여 정량화 및 수식화하여 대상 영역의 자료를 보간한다. 즉 거리에 따라 개별 자료의 영향력이 변화하는 양상을 기지 자료를 토대로 분석하여 베리오그램을 설정한 후, 대상 영역 내 미지점들의 값을 주위 기지점들의 값과 베리오그램을

로부터 산정되는 거리에 따른 가중치를 이용하여 결정하여 보간한다(Chiles와 Delfiner, 1999).

크리깅이 적용된 주요 연구분야에는 지질학, 지구물리학, 수문학, 토양학이 있으며, 주로 지점형 자료를 이용한 미지점의 보간 및 예측에 활용되고 있다. Goovaerts(1992)는 토양 종류, 지역, 지형 등의 다변량 크리깅 방법을 제안하였으며, 이를 통해 각 변수에 따른 지구통계학적 상관관계를 도출하였다. Wackernagel(1988)은 토질, 암

표 4. 하위그룹 설정반경에 따른 기반암 정규 심도 산정 결과의 일부

최대 극한값				최소 극한값			
설정반경 60m		설정반경 90m		설정반경 60m		설정반경 90m	
지반조사 No.	기반암 심도 비율	지반조사 No.	기반암 심도 비율	지반조사 No.	기반암 심도 비율	지반조사 No.	기반암 심도 비율
17	1.38	17	1.47	34	0.79	33	0.76
4	1.28	35	1.36	33	0.80	34	0.77
18	1.27	10	1.35	16	0.82	19	0.82
35	1.21	4	1.33	19	0.84	13	0.86
10	1.20	26	1.28	9	0.86	9	0.89

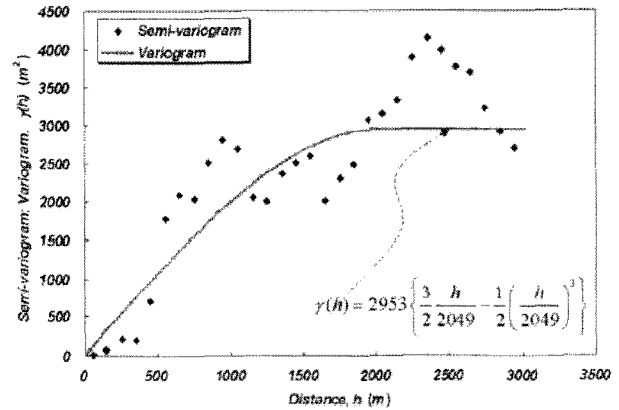
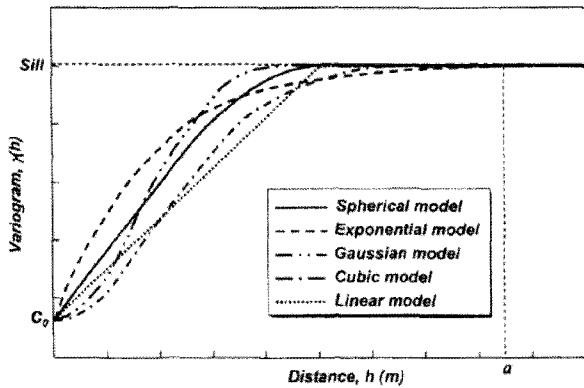


그림 8. 베리오그램의 예시

석 종류를 대상으로 암석 절리, 지하공동 등을 예측하는 연구를 수행한 바 있다.

실제 베리오그램을 그대로 크리깅에 적용하는 것은 많은 어려움이 있기 때문에 다음의 그림과 같이 구형 모델(spherical model), 지수 모델(exponential model), 가우스 모델(gaussian model), 삼차 모델(cubic model), 선형 모델(linear model) 등을 사용하여 가장 가까운 형태의 함수로 가중치를 산정하는데 활용하게 된다. 일반적인 것은 아니나, generalized Cauchy model, logarithmic model 등과 같은 다양한 이론적 모델 역시 사용되고 있다(Chiles

와 Delfiner, 1999). 그림 8에서 a는 유효거리로서 sill에 도달할 때의 거리이며, 유효거리보다 멀리 떨어진 두 지점은 서로 영향을 주지 않는다(최종근, 2007).

결정된 베리오그램을 이용하여 미지 영역의 자료들을 보간하는 크리깅에는 여러 방법들이 있으며, 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 ordinary kriging을 사용하였다. 기지점들의 분포에 따른 미지점에 대한 방향성과 기지점들의 밀집 분포를 고려하여 크리깅을 수행하기도

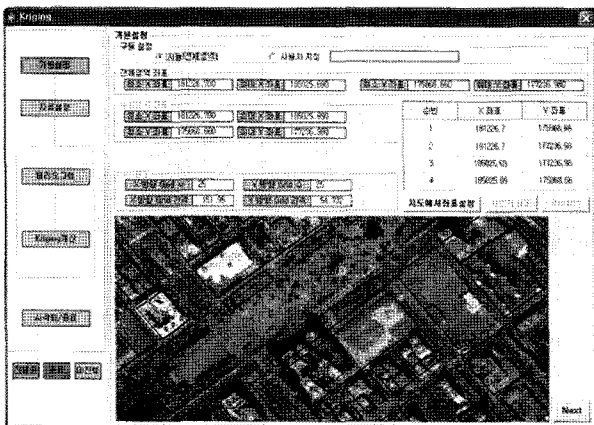


그림 9. 지반조사 자료의 공간보간 프로그램

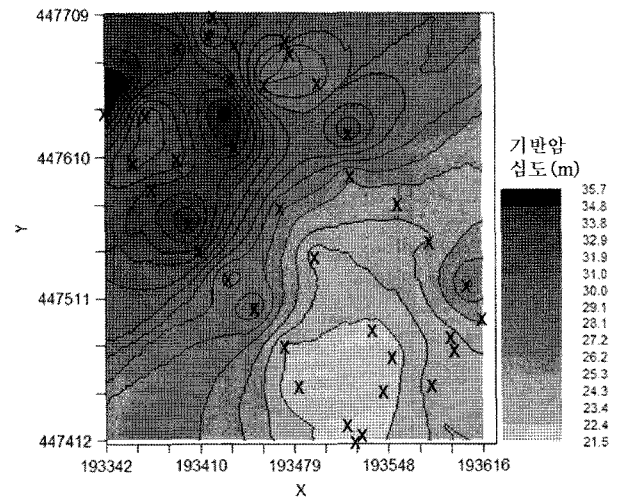


그림 10. 여의도 지역 기반암 심도 분포



한다. 본 연구에서는 공간보간 알고리즘을 반영한 공간 보간 프로그램을 그림 9와 같이 개발하였다. 공간 보간 과정은 보간하고자 하는 영역 설정 및 영역 분할, 보간할 자료 설정, 베리오그램 모델 설정, 그리고 공간보간으로 진행된다.

본 대상지역의 기반암 심도를 대상으로 구형 모델을 이용한 공간보간을 수행한 결과 그림 10과 같은 대상지역의 지층 분포를 도출할 수 있었다. 그 결과 대상지역 내에서 북서쪽 방향이 상대적으로 기반암 심도가 깊은 것으로 확인되었다.

### 3.2 공간보간 기법과 교차검증 기법을 이용한 신뢰도 평가

공간보간에 의해 미지점에 대해 예측한 물리량은 항상 오차가 존재할 가능성이 있다. 그 오차가 적정 범위에 있게 되면 별 문제가 되지 않겠지만, 허용하기 어려운 정도의 오차를 보인다면 이에 대한 보정을 위해 자료의 재확인이나 추가적인 자료 조사가 필요할 수밖에 없다. 이에 대한 판단을 정량적으로 할 수 있도록 본 연구에서는 교차검증(crossvalidation) 기법을 적용하였다. 이 방법은 대상 영역의 기지점의 자료 가운데 하나의 물리량을 미지값으로 가정하고 나머지 자료로부터 이를 예측함으로써 실측된 물리량과 예측된 물리량의 차이를 통해 해당 지점의 물리량이 주변의 측정값이 갖는 경향을 따르는지를 판단하게 된다(Isaaks 외, 1989). 교차검증은 기지의 자료점이 평가대상이기 때문에, 일부 지역에 편중되어 분포하는 자료를 분석하는 경우에는 평가의 정확도가 다소 왜곡될 수 있다는 점을 유의해야 한다. 본 연구에서는 교차검증 알고리즘에 따라 자동으로

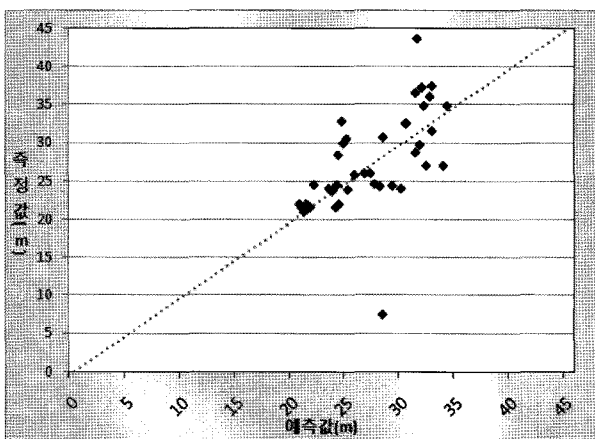


그림 11. 기반암 심도 측정값과 교차검증에 의한 예측값의 관계

일련의 과정을 수행할 수 있는 공간보간 자료의 신뢰성 평가 모듈을 개발하였다. 기지 값과 예측 값 사이의 오차를 결정할 수 있도록 설계하였으며 분석 과정은 다음과 같다.

- ① 실제 자료치, 베리오그램, 유효 반경을 이용하여 관심영역의 크리깅 예측값을 계산한다.
- ② 실제 자료치를 미지값으로 가정하고 제거한다.
- ③ 베리오그램, 크리깅을 통해 실제 자료값들이 제거된 지점에서의 값을 예측한다.
- ④ 예측된 값들과 실제 자료치(true value)를 비교하여 편향성이나 종속성을 파악한다.

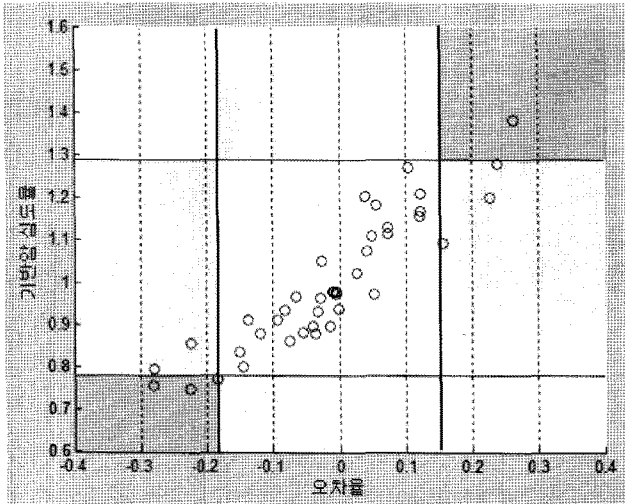
교차검증의 평가는 예측값과 실제 자료값을 그래프로 그려 기울기가 1인 직선상에서 벗어나는 정도를 보고 공간보간 자료의 신뢰성 평가를 하였다.

대상지역에 대하여 구형 모델에 따른 교차검증을 수행하여 그림 11과 같이 예측값과 측정값과의 관계 그래프 상에서 표현하였고, 평균적으로 3.3m 정도 실측값과 차이가 나는 것으로 나타났다.

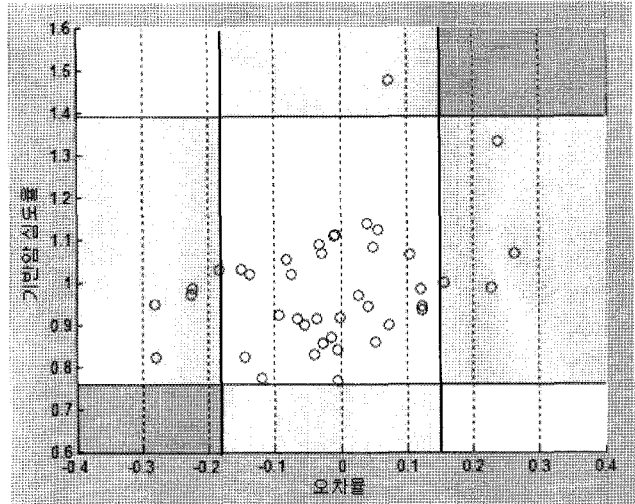
### 4. 이상치 분석 결과와 교차검증 분석 결과의 비교

전술한 바와 같이 대상지역의 기반암 심도 자료에 대해서 이상치 분석과 지구통계학적 분석을 적용한 결과 주변의 자료가 가지고 있는 통계적인 경향을 벗어나는 점들을 각각 찾아낼 수 있었다. 이상치 분석을 통해 하위그룹 설정반경이 60m일 때, GEV 상에서 하위 10%와 상위 10%에 해당하는 기준은 0.78과 1.29로 나타났으며, 하위그룹 설정반경이 90m일 때는 GEV 상에서 하위 10%와 상위 10%에 해당하는 기준은 0.76과 1.39로 나타났다. 그리고 크리깅을 이용한 교차검증 결과를 통해 대상 물리량이 공간보간을 통한 예측값보다 20% 적게 나타나거나 혹은 20% 크게 나타나게 되면 이는 각각 누적 확률분포 상에서 하위 10%와 상위 10%에 해당하는 것으로 나타났다. 이에 두 분석 간의 결과를 비교하기 위해 그림 12와 같이 크리깅을 이용한 교차검증을 통해 얻은 상대오차에 대해 각 지점의 기반암 정규심도를 60m와 90m의 하위그룹 설정반경에 따라 각각 도시하였다. 이 때 기반암 정규심도의 극한과 교차검증 상대오차 기준에 모두 포함되는 범위를 ‘신뢰도가 매우 낮음’, 두 가지 기준 중에 한 가지 기준에 해당되는 범위를 ‘신뢰도 낮음’으로 정의하였다. 그 결과 표 5와 같이 평가 기준에 해당하는 시추조사 지점을 선별하였으며, 대상





(a) 유효거리 60m의 기반암 심도 비율-교차검증 오차율



(b) 유효거리 90m의 기반암 심도 비율-교차검증 오차율

■ : 신뢰도 매우 낮음, □ : 신뢰도 낮음

그림 12. 유효거리별 기반암 심도 비율-교차검증 오차율

표 5. 신뢰도가 낮은 것으로 평가된 조사지점

	하위그룹 설정반경	
	60m	90m
신뢰도 매우 낮음	9, 16, 17, 19	-
신뢰도 낮음	4, 14, 24, 33, 34	1, 4, 9, 14, 16, 17, 19, 24, 33, 34

지역의 지반조사 경향성에 상회한다고 평가하여 정확한 지반특성 파악을 위해서는 기존 자료에 대한 검토 혹은 추가적인 지반 조사가 필요한 지점으로 판단하였다. 그리고 이상치 분석을 위해 가정하는 하위그룹 설정반경의 차이에 따라 분석결과가 크게 달라지는 것은 아니나 베리오그램 분석을 통해 주어진 유효거리 만큼 하는 것이 교차검증결과와의 차이가 더 적게 나타났는데 이에

대해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각한다.

하위그룹 설정반경을 유효거리만큼 한 경우에서 신뢰도가 매우 낮은 것으로 평가된 조사 결과를 제외하고 나머지 자료에 대해 크리깅을 실시한 결과로 그림 13과 같이 대상지역의 기반암 심도가 분포함을 도시하였다.

## 5. 결론

구조물의 신뢰성 설계 시 설계변수 산정 및 설계기법 결정에 대상지역의 지반특성 파악은 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 주어진 시추조사 자료에 대한 신뢰도 분석을 통해 통계적으로 유의미한 지점을 선별할 수 있는 전문가시스템을 개발하였다. 그에 대한 활용예시로서 서울시 여의도 일부 지역을 대상으로 지층구분을 위한 기반암 심도 결정을 위한 신뢰도 평가분석을 수행하였다.

신뢰도 평가분석을 위해 이상치 분석 방법과 크리깅을 이용한 교차검증 방법을 적용하여 분석 지반조사 지점 중 통계적으로 동일한 성질의 측정값이 아니라고 할 수 있는 이상치를 분류하는 과정을 수행하였다. 이를 통해 통계적인 관점에서 전반적인 경향을 벗어난 지반조

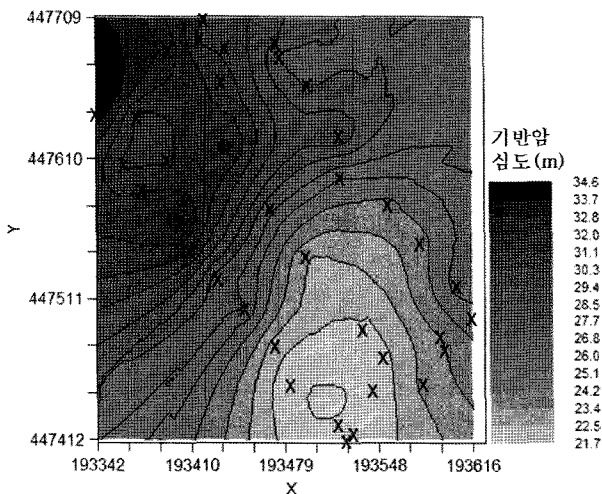


그림 13. '신뢰도 매우 낮음' 지점을 제외한 경우의 기반암 심도 분포

사 지점을 선별하고 이러한 지점에 대한 추가조사 실시 및 자료 배제 등을 통해서 공간보간 등의 기법으로 대상 자료의 공간상 분포를 예측하면서 발생할 수 있는 판단의 오류를 줄일 수 있도록 하였다.

두 방법 모두 조사결과의 신뢰성을 정량적으로 평가하는 지표를 산출하기는 하지만, 산출된 각각의 지표가 해당 자료의 신뢰도를 절대적으로 평가할 수 있는 척도라기보다는 다른 측정값들과 비교해서 상대적으로 신뢰도를 평가할 수 있는 지표에 적합하다고 할 수 있다.

향후 연구에서는 본 연구결과를 바탕으로 전문가시스템의 신뢰도 분석과정을 개선할 계획이다. 적합한 베리오그램 모델링 방법을 선택하고, 유효거리에 따른 하위 그룹 설정 반경을 결정함으로써 합리적인 이상치를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 아울러 광범위한 지역의 다수의 지반조사 자료를 개발 시스템에 적용함으로써 보다 신뢰할 수 있는 층상정보를 제공하는 기법을 개발할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2006년도 첨단도시개발사업(과제코드(07도시재생 B03)과 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(KRF-2008-D00600)의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 서울대학교 공학연구소와 2011년도 국민대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고 문헌

1. 국토해양부 항만정책관실 (2011), *안벽 신뢰성 설계 표준서*, 국토해양부, 서울, pp.1-25
2. 김인기, 성원모, 정문영 (1993), "수정된 Kriging법을 응용한 다목

- 적지구통계모델의 개발 및 타당성 검토", *대한광산지질학회지*, 제26권, 2호, pp.207-215.
3. 김정열, 김현기, 조남준 (2010), "이질적 지반의 확률적 지층구분을 위한 이상치 분석의 적용", *한국지반공학회 학술대회 논문집*.
4. 윤길림, 윤여원, 김홍연 (2008), "지반신뢰성 설계를 위한 설계변수의 특성치 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제24권, 5호, pp.27-35.
5. 최종근 (2007), *지구통계학*, 시그마프레스, 서울, pp.188-192.
6. 한국건설교통기술평가원 (2011), *복합용도 공간 개발을 위한 지반조사 및 지하공간 자료의 디지털 정보화 시스템 개발*, 국토해양부, 서울, pp.201-208.
7. Alfredo, H.S. A. and Wilson, H. T. (2007), *Probability Concepts in Engineering*, John Wiley & Sons Ins, pp.102-205.
8. American Association of State Highway and Transportation Officials (2007), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, pp.15-25.
9. Baecher, G. B. and Christian, J.T. (2003), *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons Ins, pp.25-80.
10. Chiles, J. P. and Delfiner, P. (1999), *Geostatistics-modeling spatial uncertainty*, Wiley, New York, pp.150-300.
11. Driscoll, R. and Simpson, B. (2001), *EN1997 Eurocode 7: Geotechnical design*, ICE, pp.52-68.
12. Goovaerts, P. (1994), "Study of spatial relationships between two sets of variables using multivariate geostatistics", *Geoderma*, Vol.62, pp.93-95.
13. Harr, M. E. (1987), *Reliability Based Design in Civil Engineering*, McGraw-Hill Inc, pp.120-212.
14. Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. (1989), *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, Oxford, pp.12-52.
15. Jenkinson, A. F. (1955), "The frequency distribution of the annual maximum of meteorological", *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol.81, pp. 158-171.
16. Ord, J. K. (1972), *Families of Frequency Distributions*, New York, Hafner, pp.205-295.
17. Orr, T. L. L. and Farrell, E. R. (1999), *Geotechnical design to Eurocode 7*, Springer, pp.33-39.
18. Park, H. W. and Sohn, H. (2006), "Parameter estimation of the generalized extreme value distribution for structural health monitoring", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.21, pp.366-376.
19. Smirnov, N. V. (1948), "Tables for estimating the goodness of fit of empirical distributions", *Annals of Mathematical Statistics*, Vol.19, pp.279-281.
20. Wackernagel, H. (1988), "Geostatistical techniques for interpreting multivariate spatial information", *Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources*, pp.394-403.

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 7. 22)