

# 인천 송도지역 지층분포 추정을 위한 크리깅과 역거리가중치법의 적용

## Application of Kriging and Inverse Distance Weighting Method for the Estimation of Geo-Layer of Songdo Area in Incheon

김 동 휘<sup>1</sup> Kim, Dong-Hee

류 동 우<sup>2</sup> Ryu, Dong-Woo

최 영 민<sup>3</sup> Choi, Young-Min

이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woo-Jin

### Abstract

Geo-layer information is important to determine pile length and estimate residual settlement in the construction site. An overall spatial distribution of geo-layers in the entire construction site can be predicted using drill-log information. In this study, the geo-layer distribution at Song-do area was estimated by kriging and inverse distance weighting methods, and a cross validation was adopted to verify the reliability of estimation results. The analysis results indicate that the best fitted theoretical variogram model to the experimental variogram does not always provide the most reliable estimation in the kriging method. The proper  $\alpha$  value of inverse distance weighting method must be determined by types of geo-layer, because the  $\alpha$  value is affected by types of geo-layer. Results of the kriging method show more reliable results than those of inverse distance weighting method, and the structure of geo-layer distribution could be evaluated by variogram in the kriging method.

### 요 지

매립지반의 지층분포는 터파기 공사 시 지층파악, 말뚝 지지층 심도 예측, 잔류 침하량 예측 등에 직접적으로 사용되는 중요한 정보이다. 이러한 지층분포는 기존의 지반조사자료를 이용하여 지구통계학적 방법인 크리깅과 이격거리에 따라 가중치를 부여하는 역거리가중치법 등을 사용하여 추정할 수 있다. 본 논문에서는 크리깅과 역거리가중치법의 추정결과의 신뢰성을 교차검증한 후 각각의 방법에서 사용되는 적절한 베리오그램 모델과  $\alpha$  값을 제시하였다. 크리깅에서는 실험적 베리오그램에 가장 적합한 이론적 베리오그램 모델이 반드시 가장 신뢰성 높은 추정결과를 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 역거리가중치법에서는 지층의 형성과정에 따라 적정  $\alpha$  값이 다르며, 풍화토가 매립층과 퇴적층보다 큰  $\alpha$  값을 사용할 경우 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있었다. 크리깅의 추정결과가 역거리가중치법에 비하여 신뢰성이 높은 것으로 나타났으며, 크리깅은 베리오그램을 이용하여 지층분포의 구조를 파악할 수 있었다.

**Keywords :** Cross validation, Geostatistics, Inverse distance weighting method, Kriging, Variogram

### 1. 서 론

해안매립지반에서의 지층분포는 말뚝길이, 압밀침하

량, 가시설 공법 및 규모 등에 영향을 미치므로 지층분포의 정확한 추정은 중요한 문제이다. 지층분포를 추정하기 위하여 일반적으로 다각형법(polygon method), 삼

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KIGAM)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

각형법(triangulation method), 지역평균법(local sample mean method) 및 역거리가중치법(Inverse Distance Weighting (IDW) Method) 등의 방법들을 많이 사용하고 있다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989). 그러나 이들 방법들은 단순히 면적비 또는 거리를 추정인자로 사용하기 때문에 지반조사자료들이 보이는 공간변동의 통계적인 특성을 적절히 반영하지 못하는 단점이 있다. 이러한 방법들의 대안으로 사용되는 것이 지구통계학적(geostatistical) 또는 공간통계학적(spatial statistical) 분석방법이다. 이 방법의 대표적인 것이 크리깅(kriging)이며 현재 많은 분야에서 폭넓게 활용되고 있다.

지반공학분야에서 크리깅은 비배수전단강도 및 SPT N값의 공간적 분포 추정, 액상화 발생 구역 추정, 콘관 입시험결과의 공간적인 변동성 분석 등에 적용되었다(Baise 등, 2006; Chiasson 등, 1994; Jaksa 등, 1993; Parsons와 Frost, 2002; Sitharam, 2007; Soulie 등, 1990). 국내 지반공학분야에서는 김홍택 등(2002), Lee 등(2004), 윤길립 등(2005), 천성호 등(2005)이 크리깅을 이용하여 지층분포, 지반정수분포, 압밀침하량 등을 분석하였다. 최근에는 Sun 등(2008), 선창국(2009) 등에 의하여 대도시의 지반정보 시스템을 구축하는데 사용되고 있다. 이와 같이 지반공학분야에서 크리깅의 사용성이 증가하는 것은 지반조사의 중요성을 인하여 조사자료의 수가 증가하고 또한 이를 적극적으로 활용하고자 하는 노력이 있기 때문인 것으로 판단된다.

본 논문에서는 베리오그램 모델에 따른 송도지역 미조사 구간을 포함한 1~4공구의 지층 출현심도 및 두께 추정결과를 비교하여 송도지역에 가장 적합한 베리오그램 모델을 제시하고자 한다. 또한, 크리깅기법과 함께 가장 많이 사용되고 있는 역거리가중치법을 이용하여 미시추 구간의 지층분포를 추정된 후 이 결과를 크리깅 추정결과와 비교하여 두 기법의 송도지역 지층분포 추정방법으로의 적용성을 검토하고자 한다.

## 2. 배경이론

### 2.1 베리오그램 개요

공간정보를 분석하고 그 상관관계를 이용하여 자료가 알려져 있지 않은 지점의 자료를 예측하기 위한 많은 지구통계학적 기법은 불변성 또는 정상성(stationarity) 가정을 전제로 하고 있다. 불변성이란 값 자체가 변화하

지 않는다는 의미가 아니라 자료의 분포가 위치에 따라 변화하지 않는 것을 의미한다. 강한 불변성이란 위치에 따라 확률함수의 분포가 변화하지 않는다는 뜻이다. 그러나 우리가 실제로 사용하는 대부분의 자료는 강한 불변성을 만족하지 못하고 약한 불변성(weak stationarity)을 가정하게 된다. 약한 불변성은 첫째, 공분산이 존재하며 이는 분리거리  $h$ 에 대한 함수임을 의미하고 둘째, 자료의 평균은 위치에 무관하게 상수로 일정하다는 것을 의미한다. 이러한 약한 불변성은 많은 지구통계학적 기법의 기본이 되는 가정이며, 이를 내재가정(intrinsic hypothesis)이라 한다. 이러한 내재가정을 만족하는 경우 식 (1)로 표현되는 베리오그램과 공분산과의 중요관계식 (2)를 유도할 수 있다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989).

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

$$\gamma(h) = \sigma^2 - Cov(h) \quad (2)$$

여기서,  $2\gamma(h)$ 는 베리오그램,  $\gamma(h)$ 는 반베리오그램(semivariogram),  $h$ 는 지연거리(lag distance) 또는 분리거리(separation distance),  $N(h)$ 는 자료 쌍의 개수,  $z(x_i)$ 는 임의의 위치  $x_i$ 에서의 자료값,  $\sigma^2$ 은 자료의 분산,  $Cov(h)$ 는 분리거리  $h$ 만큼 떨어진 자료들의 공분산을 의미한다. 지구통계학에서는 계산의 편의성을 위해 전통적으로 반베리오그램을 사용하며 이를 베리오그램이라고도 한다. 베리오그램은 거리  $h$  만큼 이격된 두 자료들간의 차이를 제공한 것의 기대값이며, 거리가 가까운 자료값들이 유사한 경향을 보이므로 베리오그램은 자료의 거리가 가까울수록 작고 멀어질수록 크다. 이러한 성질의 베리오그램은 이격거리에 따른 자료들의 관계를 분석하여 분석영역의 공간적 자료분포 구조를 파악한 후 미조사구간의 자료값을 추정하는데 활용된다.

베리오그램은 그림 1에서 볼 수 있듯이 너깃(nugget), 문턱값(sill), 상관거리(range or correlation length)에 의해서 그 특성과 모양이 결정된다. 일반적으로 분리거리  $h$ 가 0일 경우에는 자료값이 동일하므로 베리오그램은 0이 되어야 하나, 주어진 자료에 따라서는 0으로 수렴하지 않는 경우도 있다. 이를 너깃효과(nugget effect)라 하며 이러한 불연속의 크기를 너깃이라고 한다. 너깃효과는 값을 알고 있는 지점들 간의 거리보다 더 짧은 거리에서의 상관관계에 대한 정보가 부족하기 때문에 발생

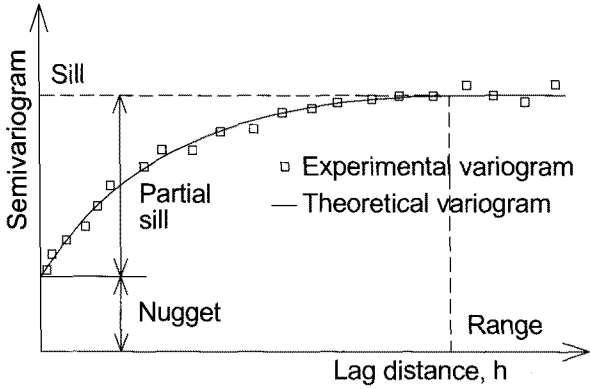


그림 1. 베리오그램

하는 효과이며, 짧은 거리내에서 값의 변화가 급격할 때 이를 적절하게 설명하지 못하는 원인이 될 수 있다. 공간자료가 약한 불변성을 만족하게 되면  $h$ 가 증가할 경우 분산이 특정한 값에 수렴하게 되며 이 경우의 분산을 문턱값이라고 부른다. 이 문턱값에서 너깃을 뺀 값을 부분적 문턱값(partial sill)이라고도 한다. 약한 불변성이 만족되지 않으면 문턱값은 존재하지 않고 계속해서 증가하는 경향을 보이게 된다. 상관거리는 두 지점간의 상관관계가 거의 "0"이 될 때 해당되는 거리를 말하며, 문턱값이 언어질 때의 거리가 상관거리로 정의될 수 있다. 일반적으로 상관거리보다 큰 거리에 있는 두 자료는 상관관계가 없는 것으로 간주한다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989; Journel과 Huijbergts, 1978; Cressie, 1991).

## 2.2 이론적 베리오그램

크리깅을 이용하여 미조사 구간의 자료값을 예측하기 위해서는 모든 분리거리  $h$ 에 대한 베리오그램  $\gamma(h)$ 가 필요하며, 이를 구하기 위해서는 주어진 자료로부터 계산된 실험적 베리오그램을 가장 잘 대표하는 이론적 베리오그램을 그림 1과 같이 결정해야 한다. 이론적 베리오그램 모델로는 구형모델(spherical model), 지수모델(exponential model), 가우시안모델(gaussian model) 등이 가장 많이 사용된다. 베리오그램 모델은 앞에서 언급한 모델들을 독립적으로 또는 조합하여 사용하기도 하며, 실험적 베리오그램을 정확하게 나타내는 모델이 아니라 공간적인 자료의 구조를 적절하게 표현해 줄 수 있는 모델을 선택하는 것이 매우 중요하다. 이론적 베리오그램은 너깃  $C_0$ , 문턱값  $(C+C_0)$ , 상관거리  $a$ 의 세 모수를 이용하여 정의할 수 있으며, 구형모델, 지수모델,

가우시안모델은 각각 식 (3), (4), (5)로 나타낼 수 있다.

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ if } 0 \leq h \leq a, \\ = C_0 + C, \text{ otherwise.} \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right], \text{ for } h \geq 0 \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right], \text{ for } h \geq 0 \quad (5)$$

지수모델과 가우시안모델 모두 문턱값의 95%에 해당하는 값에서의 분리거리를 실제적인 상관거리로 가정한다. 실험적 베리오그램에 이론적 베리오그램을 적합시키는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 모형 속에 포함된 오차의 분포와 상관구조를 가정하는 최대우도추정법이고 두 번째는 이론적 베리오그램에 관한 비선형 함수의 매개변수를 회귀분석에서처럼 최소제곱법(least square method)으로 추정하는 방법이다. 본 논문에서는 최소제곱법을 이용하여 일차적인 이론적 베리오그램을 산정하였으며, 자료의 분포구조를 잘 반영할 수 있도록 이를 수정하여 사용하였다.

자연계에서 얻게 되는 지구물리학적 자료는 지질분포나 층서구조의 영향으로 일정한 방향성을 나타내는 경우가 있다(최종근, 2007). 따라서 베리오그램은 방향에 따라서 상이할 수 있으며, 이러한 경우 분석자료 분포의 공간적인 이방성(anisotropy)을 적절하게 나타낼 수 있는 방향에 따른 베리오그램(directional variogram)을 산정하여 크리깅 방법에 적용해야 한다. Goovaerts(1997)는 분

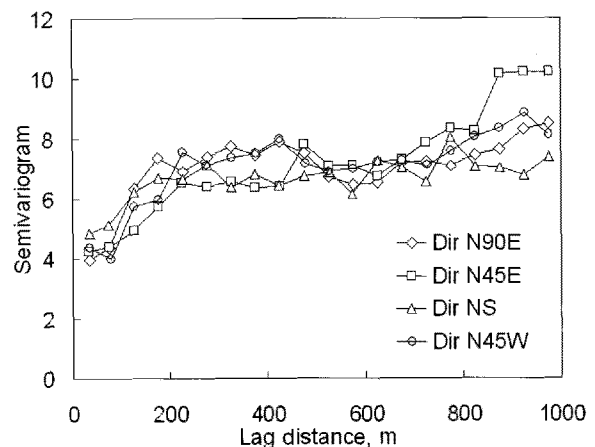


그림 2. 점토 및 실트층 출현심도의 방향성 베리오그램

석지역 지반특성값 분포의 이방성은 최소 세 방향에 대한 실험적 베리오그램을 고려하여 판단해야 한다고 하였으며, 지반특성값의 분포가 명확한 이방성을 보이지 않을 경우에는 등방성 베리오그램(isotropic variogram)을 사용해야 한다고 하였다. 그림 2는 송도지역 점토 및 실트층 출현심도의 네 방향에 대한 실험적 베리오그램이며, 방향에 따라서 베리오그램이 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않다. 점토 및 실트층 출현심도 이외의 매립층과 퇴적층의 경계심도, 풍화토 출현심도 등의 실험적 베리오그램도 뚜렷한 이방성을 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 등방성 베리오그램을 사용하여 지층분포를 추정하였다.

## 2.3 추정방법

### 2.3.1 크리깅기법

설계대상지역의 지층과 지반특성값을 파악하기 위한 지반조사의 수량 및 범위는 구조물의 중요성과 사업비용에 따라서 결정된다. 이 때 조사를 수행하지 못한 위치의 지층 및 지반정수를 파악해야 할 경우가 빈번하게 발생한다. 이러한 경우 크리깅은 수학적 방법과 통계학적 방법을 통해 기지 자료들의 상관관계, 기지 자료와 예측될 지점의 값과의 상관관계, 자료분포의 경향성 등을 분석하여 현장 자료특성이 반영된 값을 추정할 수 있다(천성호 등, 2005). 그러나 여러 가지 크리깅 기법 중 주어진 공간적 자료분포 특성을 적절하게 반영하여 미지값을 추정하지 못하는 크리깅 기법을 선택할 경우에는 예측한 자료값의 오차가 클 가능성이 있다. 따라서 정규크리깅(OK, Ordinary Kriging), 구역크리깅(BK, Block Kriging), 일반크리깅(UK, Universal Kriging) 등의 크리깅 기법 중 공간적 자료분포 특성을 적절하게 반영하여 미지값을 예측할 수 있는 크리깅 기법의 선택은 매우 중요하다. 이 중 일반적으로 가장 많이 사용되는 정규크리깅은 관심지점에서의 값을 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위값들의 선형조합으로 식 (6)과 같이 미지값을 예측할 수 있으며, 오차분산(error variance 또는 Ordinary kriging variance)은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i z(x_i) \quad (6)$$

$$\sigma_{OK}^2 = E[\{z(x_0) - z^*(x_0)\}^2] \quad (7)$$

여기서,  $z^*(x_0)$ 는 위치가 알려진  $x_0$  지점에서의 예측값,  $z(x_i)$ 는 위치  $x_i$ 에서의 기지의 자료값,  $\lambda_i$ 는 기지의 자료값  $z(x_i)$ 의 가중치,  $\sigma_{OK}^2$ 은 정규크리깅의 오차분산,  $n(x)$ 는 크리깅 예측을 위하여 사용한 총 자료 수이다. 본 논문에서 사용한 정규크리깅은 가중치 결정을 위하여 예측값과 참값 사이의 오차가 최소가 되도록 하며 추정값이 편향되지 않아야(unbiased) 한다는 조건을 추가로 사용한다. 편향(bias)은 모집단의 인자 평균과 그 모집단의 인자를 예측하기 위한 추정식의 평균의 차이로 정의되고 그 차이가 없을 때 편향되지 않았다고 한다. 또한, 불편향 조건을 만족시키기 위해서는 가중치  $\lambda_i$ 의 합이 1이 되어야 한다.

### 2.3.2 역거리가중치법

베리오그램을 사용하지 않고 알려진 주위값들의 가중선형조합을 이용하여 새로운 값을 예측하는 많은 기법이 있으며, 다각형법, 삼각형법, 지역평균법, 역거리가중치법 등이 대표적인 방법이다(Isaaks와 Srivastava, 1989). 지역평균법의 경우 영향반경 내의 모든 자료값에 동일한 가중치를 부여하는 한계가 있어 이를 개선한 방법이 역거리가중치법이며, 그 가중치는 거리의  $\alpha$ 승에 반비례한다고 가정한다. 역거리가중치법을 수식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i), \quad \lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^\alpha}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_j}\right)^\alpha} \quad (8)$$

여기서,  $d_i$ 는 예측점  $x_0$ 와 자료점  $x_i$  사이의 거리이며, 일정한 완화거리를 더하여 사용할 수 있다. 식에서  $\alpha$ 가 0에 가까우면 역거리가중치법의 결과는 산술평균값이 되고,  $\alpha$ 가 무한대로 커지면 다각형법의 추정결과와 같아진다.  $\alpha$ 가 커질수록 가까운 점의 영향이 지나치게 크게 나타나는 현상이 발생한다.

### 2.3.3 추정결과의 검증

본 논문에서는 크리깅과 역거리가중치법으로 추정된 값의 정확성을 평가하기 위하여 교차검증(cross validation)을 수행하였다. 또한, 교차검증을 통하여 예측결과의 정확성을 정량적으로 평가하기 위해 비교 통계량을 사용하였다. 비교통계량으로는 예측값의 정확성을 평가하는

MAE(Mean Absolute Error), MSE(Mean Squared Error), 추정결과의 편향성을 평가하는 PBIAS(Percent of BIAS), 예측의 효율성(effectiveness)을 평가하는 G 값(goodness-of-prediction(G) measure)을 사용하였으며, 각각의 값은 식 (9)~(12)와 같이 계산할 수 있다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right| \quad (9)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right]^2 \quad (10)$$

$$PBIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right) \quad (11)$$

$$G = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \left[ z(x_i) - \hat{z}(x_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left[ z(x_i) - \bar{z} \right]^2} \right) \times 100 \quad (12)$$

여기서,  $\hat{z}(x_i)$ 는 위치  $i$ 에서 추정된 값,  $\bar{z}$ 은 조사자료의 평균이다. MAE, MSE는 계산값이 작을수록 추정값이 정확하다는 것을 의미하며, PBIAS는 0에 가까울수록 추정결과가 편향되지 않았다고 할 수 있다. 또한, G값이 “100”일 경우에는 완벽한 추정이라고 할 수 있으며, G 값이 음수일 경우에는 추정자(predictor)로 자료값의 평균을 사용하는 것보다 신뢰성이 없다는 것을 의미한다.

### 3. 분석대상위치 및 지반특성

연구위치인 송도신도시는 인천광역시 연구구에 위치한 대규모 매립지로 평탄한 지형을 이루고 있으며, 북서

쪽으로는 인천국제공항이, 북쪽으로는 청라지구가 위치하고 있다. 본 논문에서 지층분포를 추정한 인천 송도지역의 1~4공구(2.8km×3.4km)는 1996년부터 매립이 진행되어 2005년에 매립이 완료되었으며, 매립완료 후 일정기간 이상 방치하여 압밀을 진행시킨 후 공사를 진행하고 있다(최현길, 2009). 인천 송도신도시의 매립현황과 분석에 사용한 시추조사자료위치는 그림 3(a), (b)과 같으며, 그림 3(b)의 점선으로 표시한 부분은 조사자료가 충분하지 않아 지층분포 추정결과의 신뢰성이 다른 부분에 비하여 상대적으로 떨어질 가능성이 있을 것으로 판단된다. 인천 송도지반은 그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 표고가 약 E.L.+7.0m인 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암이 분포하고 있다. 퇴적층은 실트질 점토층과 모래층이 번갈아 분포하고 있으며, 퇴적층 상부에 분포하는 N 값 10 이하 지반이 압밀 발생이 가능한 층으로 판단된다. 또한, 송도지반의 물리적 특성 및 강도특성에 대한 자세한 분석결과는 김동휘 등(2009)을 참고할 수 있다.

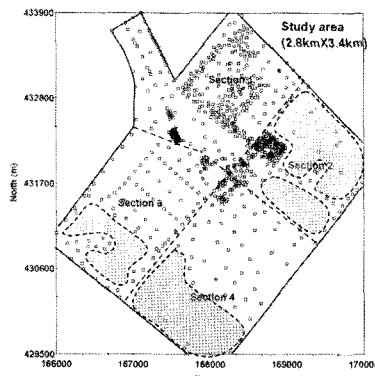
### 4. 지층분포 추정결과

#### 4.1 매립층과 퇴적층 경계심도 및 매립층 두께

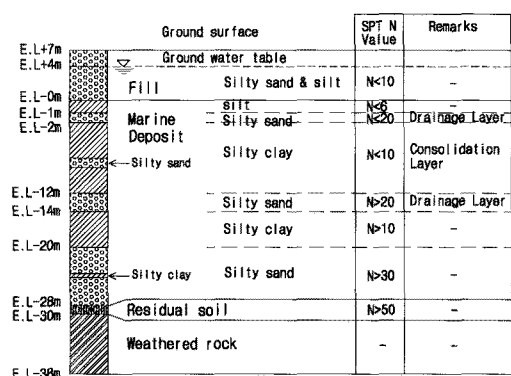
인천 송도지역은 해안매립지반으로 지표면으로부터 일정 깊이까지 느슨한 실트질 모래로 구성된 매립층이 분포한다. 매립층의 공간적 분포 추정결과는 구조물의 터파기 공사에 중요한 자료로 활용될 수 있으므로 본 논문에서는 매립층과 퇴적층의 경계심도 및 매립층 두께를 공간적으로 예측하였다. 송도신도시 1~4공구의 매립층과 퇴적층 경계심도 및 두께 평균은 각각 E.L.-0.73m, 7.23m로 분석되었다.



(a) 매립현황 및 공구위치



(b) 시추조사 위치(1~4공구)



(c) 송도지반 대표지층

그림 3. 연구 및 시추조사위치(김동휘 등, 2009)

매립층과 퇴적층 경계심도 및 매립층 두께에 대한 실험적 베리오그램과 이를 이용하여 산정한 이론적 베리오그램 모수 추정결과는 각각 그림 4 및 표 1과 같으며, 송도지역은 지표면 고도가 일정하므로 매립층과 퇴적층 경계심도와 매립층 두께의 베리오그램은 동일하다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 사용한 구형, 가우시안, 지수모델의 모수는 너깃만 약간 차이가 날 뿐 문턱값은 유사한 것으로 나타났다. 표 1에서 지수와 가우시안모델의 상관계수는 문턱값의 95% 지점에서의 상관계수를 의미하며, 이 실제적인 상관계수를 이용하여 베리오그램 모델을 작성하게 된다. 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )와 잔차제곱합(residual sum of square, RSS)을 이용한 이론적 베리오그램의 적합성 분석결과 구형모델이 가장 적합한 것으로 나타났으나 그림 4 및 표 1에서 볼 수 있듯이 세 모델의 실험적 베리오그램에 대한 적합도는 거의 유사한 것으로 판단된다. 세 모델 모두 너깃성분이 전체 문턱값의 50~64% 정도이며, 이는 매립층과 퇴적층 경계심도 및 매립층 두께가 작은 이격거리에서도 큰 변화를 보일 수 있음을 의미한다. 이는 송도가 위치하고 있는 서해안 지역의 조수간만의 차가 약 9.3m이며, 이러한 환경에서 퇴적된 지층의 변동성이 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 매립층과 퇴적층의 경계를 시추조사결과로 정확하게 판단하는 것이 어렵기 때문에 발생한 측정오차도 큰 너깃효과

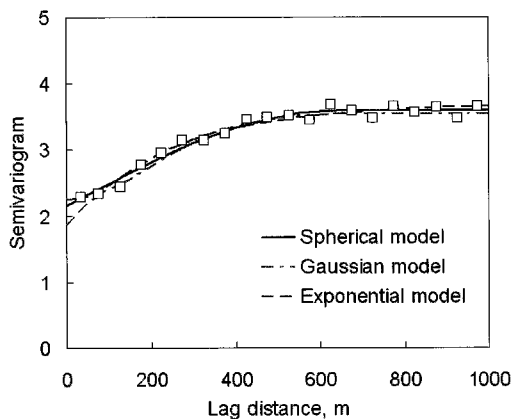


그림 4. 매립층과 퇴적층 경계심도의 베리오그램

표 1. 매립층과 퇴적층 경계심도의 이론적 베리오그램 모수

Semivariogram model	Nugget, $m^2$	Sill, $m^2$	Partial sill, $m^2$	Range, m	$R^2$	RSS, $m^2$
Spherical	2.17	3.59	1.42	638	0.97	0.11
Gaussian	2.26	3.55	1.29	502	0.97	0.12
Exponential	1.84	3.69	1.85	735	0.96	0.16

에 기여했을 것으로 판단된다.

매립층과 퇴적층의 경계심도와 매립층 두께 추정결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 그림 5와 같이 교차검증을 수행하였으며, 그 결과를 MAE, MSE, PBIAS 및 G값을 이용하여 표 2와 같이 정량적으로 평가하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 추정결과가 실제 측정값과 크게 다른 위치들이 있는 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 조수간만의 차가 큰 상태에서 퇴적된 변동성이 큰 지반특성과 매립층과 퇴적층의 경계를 정확하게 판단하기 어려운 측정오차 때문인 것으로 판단되며, 이러한 요인들이 매립층과 퇴적층의 경계심도 및 매립층 두께 추정결과의 정확성을 저하시키는 원인인 것으로 판단된다. 따라서 해양 매립층 및 퇴적층과 같이 변동성이 큰 지층 추정결과는 앞으로 설명할 풍화도 출현심도와 같은 모암에서 생성된 지층분포의 추정결과에 비해 신뢰성이 떨어짐에 유의해야 한다.

본 논문에서 사용한 조사자료를 이용하여 매립층과 퇴적층의 경계심도 및 매립층 두께를 추정할 경우 표 2에서 볼 수 있듯이 구형모델이 다른 모델에 비하여 신뢰성이 약간 높으며, PBIAS가 0에 가까우므로 추정결과는 편향되지 않은 것으로 나타났다. 대부분의 추정의 문제는 제한된 자료를 이용하여 산정한 실험적 베리오그램으로 이론적 베리오그램을 추정하게 되므로 실험적 베리오그램에 가장 적합한 이론적 베리오그램 모델이 반드시 가장 신뢰성 높은 추정결과를 주지 않을 수 있으므로 최적의 이론적 베리오그램을 선정하기 위해서는 반드시 추정결과에 대한 신뢰성 평가결과를 이용해야 할 것이다. 역거리가중치법은  $\alpha$  값이 0일 경우에 추정결과가 가장 신뢰성이 높은 것으로 분석되었으며, 크리깅기법에 의한 추정결과와 유사하거나 약간 낮은 신뢰성을 보이는 것으로 나타났다. 역거리가중치법에서  $\alpha$  값으로 4 이상을 사용할 경우 G 값은 음수를 보이게 되며, 이는 어떤 위치의 값을 추정할 경우 전체자료의 평균값으로 그 값을 추정하는 것보다 신뢰성이 떨어진다는 것을 의미한다. 역거리가중치법으로 추정한 결과 역시 PBIAS가 0에 가까우므로 크리깅에 의한 추정결과

와 마찬가지로 편향되지 않은 것으로 나타났다.

구형모델을 사용한 정규크리깅과  $\alpha$  값으로 0을 사용한 역거리가중치법으로 송도지역의 매립층과 퇴적층 경계심도 및 매립층 두께 분포를 추정한 결과는 각각

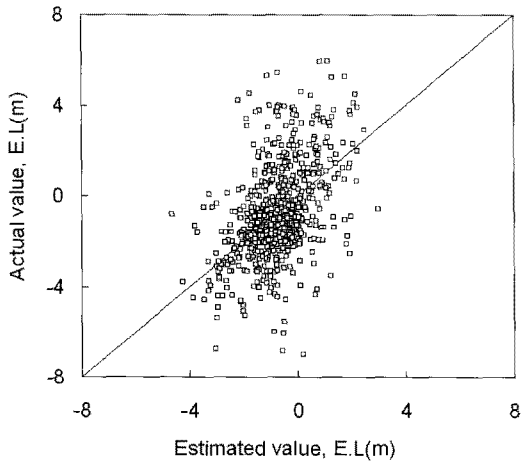
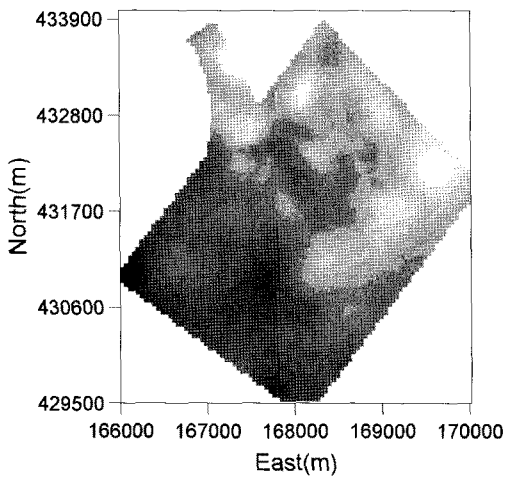


그림 5. 매립층과 퇴적층 경계심도 추정결과의 교차검증(크리깅, 구형 모델)

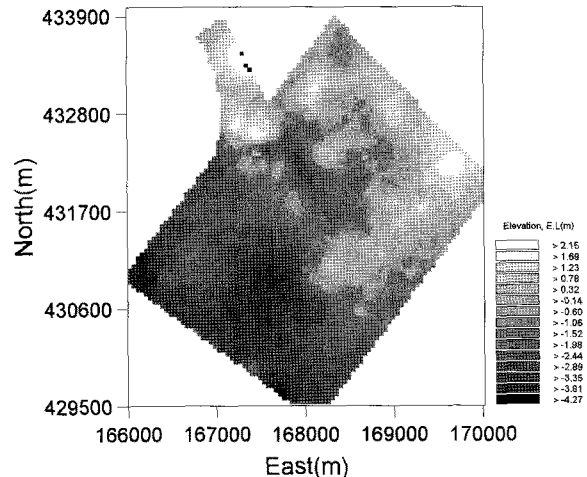
그림 6, 7과 같다. 추정결과 대략적으로 매립층과 퇴적층 경계심도는 해안에서 멀어질수록 깊어지며, 매립층 두께도 해안에서 멀어질수록 두꺼워지는 것으로 나타났다. 그러나 해안에서 가까운 1공구 중 일부는 매립층과 퇴적층의 경계심도가 깊어 매립층의 두께가 1공구의 다른 구간에 비하여 상대적으로 크게 분포하는 구간이 관찰되고 있다. 본 논문에서 추정된 송도지반의 매립층과 퇴적층의 경계심도 및 매립층 두께에 대한 공간적 분포는 터파기 시공 시 위치에 따른 지층정보와 압밀침하량 예측 시 상재하중 자료를 활용할 수 있다. 즉, 구조물 시공을 위한 터파기 공사를 수행할 경우 터파기 계획 고까지의 지층이 원지반 점토층인지 모래로 구성된 매립층인지에 따라 가시설의 규모 및 공법이 결정되며, 매립층의 두께는 원지반 점토층의 압밀침하량 산정 시 하중 증가량 계산에 직접적으로 사용된다. 따라서 송도와 같은 해안 매립지의 매립층 하부심도 및 두께를 추정하는 것은 매우 중요한 문제로 판단된다.

표 2. 추정방법에 따른 매립층과 퇴적층 경계심도 추정결과의 정확성 분석

Estimation method		MAE, m	MSE, m <sup>2</sup>	PBIAS, m	G
Kriging method	Spherical	1.322	3.253	0.009	20.8
	Gaussian	1.339	3.323	-0.008	19.1
	Exponential	1.338	3.318	-0.001	19.3
Inverse Distance Weighting Method (IDW)	$\alpha=0$	1.351	3.303	0.005	19.6
	$\alpha=1$	1.336	3.314	0.009	19.4
	$\alpha=2$	1.380	3.588	0.011	12.7
	$\alpha=3$	1.452	3.957	0.009	3.7
	$\alpha=4$	1.515	4.293	0.009	-4.5
	$\alpha=5$	1.562	4.550	0.010	-10.7

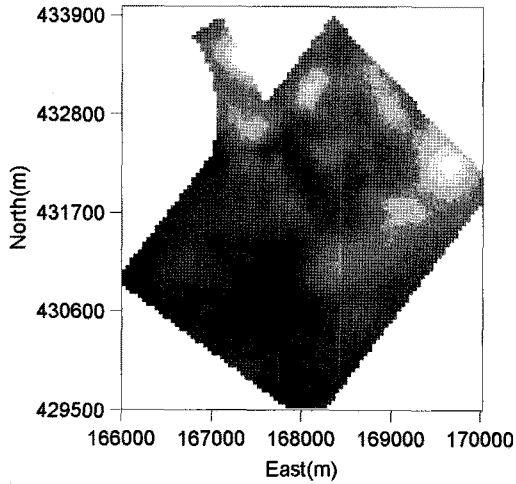


(a) 크리깅(구형모델)

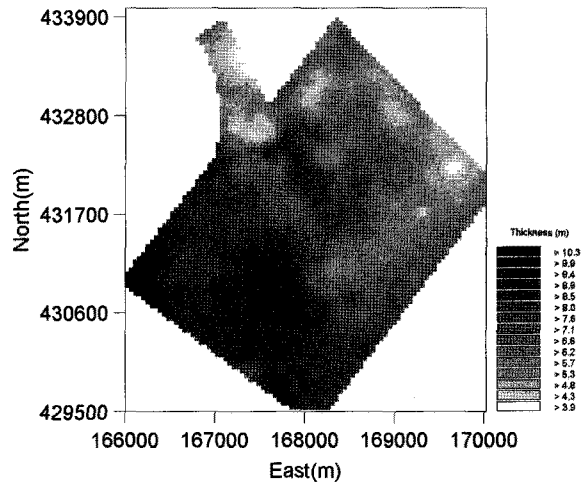


(b) 역거리가중치법( $\alpha=0$ )

그림 6. 송도지역 매립층과 퇴적층 경계심도 추정결과



(a) 크리깅(구형모델)



(b) 역거리가중치법( $\alpha=0$ )

그림 7. 송도지역 매립층 두께 추정결과

매립층과 퇴적층 경계심도 및 매립층 두께 추정결과 중 조사자료가 불충분한 2, 3, 4공구의 일부 구간(그림 3(b) 참조)의 추정결과는 조사자료가 상대적으로 많은 다른 구간들에 비하여 신뢰성이 낮을 가능성이 있다. 이와 같이 조사자료가 많지 않은 구간에서의 추정결과가 조사자료가 많은 구간에서의 추정결과에 비해 상대적으로 신뢰성이 낮은 이유는 추정하고자 하는 위치와 인접한 자료들을 추정에 사용하지 못하여 추정값이 추정 위치에서의 실제값과 상이할 가능성이 높기 때문이다. 즉, 추정위치에서 멀리 떨어져 있는 자료들은 추정위치에서의 실제값과 다를 가능성이 높기 때문에 추정결과의 신뢰성이 낮을 가능성이 있다. 이러한 추정결과의 신뢰성을 크리깅기법에서는 오차분산 즉, 크리깅 분산을 이용하여 정량적으로 나타낼 수 있으며, 자세한 내용은 5절에 언급하였다.

#### 4.2 점토 및 실트층 출현심도 및 두께

송도지역은 그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 퇴적층 상부에 N값 10 이하의 점토 및 실트층이 분포하고 있으며, 이 층에서 압밀침하가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 점토 및 실트층의 공간적 분포 추정은 공간적인 압밀침하 평가에 활용될 수 있을 것이다. 점토 및 실트층의 출현심도와 두께 평균은 각각 E.L-1.94m, 13.04m이다. 점토 및 실트층의 N값 분포를 분석하기 위하여 점토 및 실트층의 SPT 시험자료 160개를 분석하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 분석대상

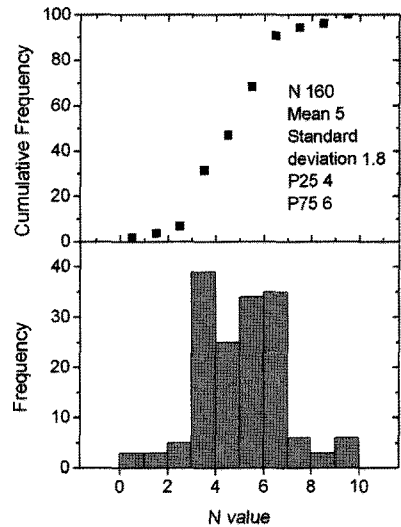


그림 8. 분석대상 점토 및 실트층의 N값 분포

점토 및 실트층은 N값 6 이하가 약 75%, 평균은 5, 표준편차 1.8로 나타났다. N값 6 이상의 강도를 보이는 점토 및 실트층(약 25% 분포)은 분석대상 지반 하부 및 중간에 국부적으로 존재한다. 또한, 본 논문에서 점토 및 실트층으로 규정한 지반은 건설교통부(2000)가 제시한 연약지반(N<6)과 유사한 강도를 보이고 있으며, Terzaghi와 Peck(1967)이 점토지반을 N값으로 구분하였을 경우 매우 연약~중간 연약한 강도를 보이는 지반이다.

점토와 실트층 출현심도 및 두께의 실험적 베리오그램과 이를 이용하여 산정한 이론적 베리오그램 모수 추정결과는 각각 그림 9 및 표 3과 같다. 점토 및 실트층 출현심도와 두께의 실험적 베리오그램에 가장 적합한 이론적 베리오그램은 각각 가우시안과 지수모델인 것



으로 분석되었으나 그림 9에서 볼 수 있듯이 세 모델의 적합성은 유사한 것으로 나타났다. 점토와 실트층 출현 심도와 두께에 대한 베리오그램의 너짓은 전체 문턱값의 24~56%로 너짓이 전체 문턱값의 50~64%인 매립층과 퇴적층 경계심도에 대한 이론적 베리오그램 모델의 너짓보다는 약간 작은 것으로 나타났다. 이러한 너짓과 전체 문턱값의 비를 상대너짓효과(relative nugget effect)라고 하며, 상대너짓효과가 클수록 분석자료는 변동성이 증가하므로 인접한 거리에 있는 자료들의 값의 차이가 클 가능성이 높아지게 된다. 또한, 상대너짓효과가

작을수록 분석자료들은 거리에 따라서 점진적으로 변한다.

점토 및 실트층의 출현심도와 두께 추정결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 매립층과 퇴적층 경계심도에서와 동일하게 교차검증을 수행하였으며, 추정결과에 대한 정량적 평가결과는 표 4와 같다. 교차검증결과 점토 및 실트층의 출현심도와 두께 추정결과에서도 매립층과 퇴적층의 경계심도 추정결과에서와 같이 추정결과와 실제 측정값이 크게 다른 위치가 존재하는 것으로 나타났다. 본 논문에서 사용한 조사자료를 이용하여 점

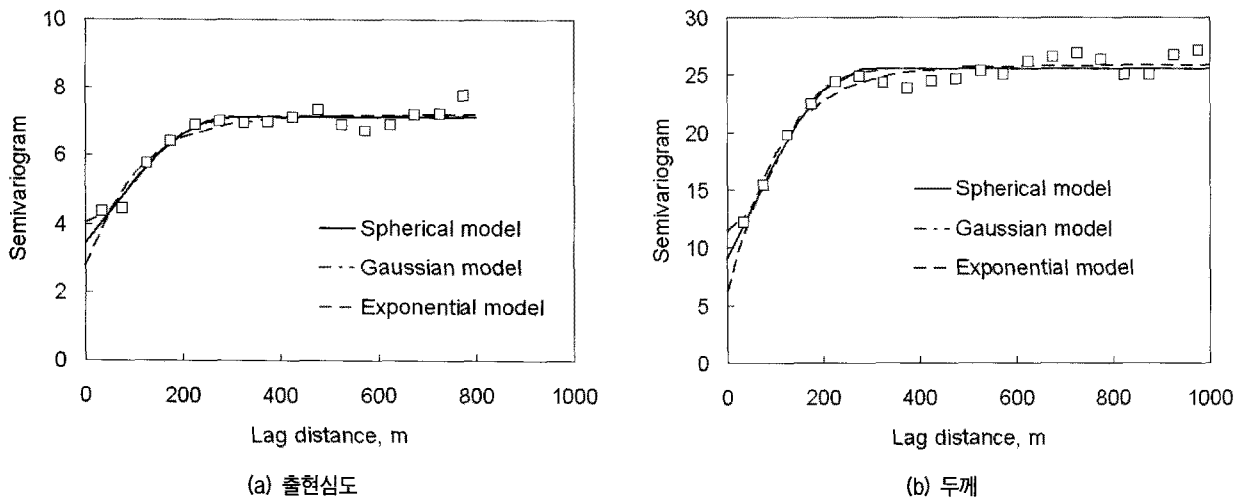


그림 9. 점토 및 실트층의 베리오그램

표 3. 점토 및 실트층 출현심도 및 두께의 이론적 베리오그램의 모수

Semivariogram model	Appearance depth, m						Thickness, m					
	Nugget, m <sup>2</sup>	Sill, m <sup>2</sup>	Partial sill, m <sup>2</sup>	Range, m	R <sup>2</sup>	RSS, m <sup>2</sup>	Nugget, m <sup>2</sup>	Sill, m <sup>2</sup>	Partial sill, m <sup>2</sup>	Range, m	R <sup>2</sup>	RSS, m <sup>2</sup>
Spherical	3.43	7.12	3.69	291	0.93	1.01	9.05	25.44	16.39	278	0.94	15.60
Gaussian	4.04	7.16	3.12	256	0.94	0.90	11.47	25.46	13.99	237	0.95	15.20
Exponential	2.75	7.21	4.46	324	0.91	1.27	6.23	25.77	19.54	318	0.95	13.20

표 4. 추정방법에 따른 점토 및 실트층 출현심도와 두께 추정결과의 정확성 분석

Estimation method		Appearance depth, m				Thickness, m			
		MAE, m	MSE, m <sup>2</sup>	PBIAS, m	G	MAE, m	MSE, m <sup>2</sup>	PBIAS, m	G
Kriging method	Spherical	2.020	8.533	-0.053	24.2	3.410	20.104	-0.084	39.7
	Gaussian	2.044	8.649	-0.062	23.1	3.443	20.468	-0.172	38.6
	Exponential	2.028	8.558	-0.064	24.0	3.418	20.098	-0.163	39.7
Inverse Distance Weighted Method (IDW)	$\alpha=0$	2.023	8.434	-0.065	25.0	3.489	20.897	-0.200	37.3
	$\alpha=1$	2.003	8.412	-0.067	25.2	3.425	20.151	-0.224	39.5
	$\alpha=2$	2.043	9.234	-0.069	17.9	3.465	21.190	-0.250	36.4
	$\alpha=3$	2.126	10.223	-0.073	9.2	3.593	23.158	-0.258	30.5
	$\alpha=4$	2.198	11.012	-0.070	2.1	3.719	25.032	-0.246	24.9
	$\alpha=5$	2.252	11.598	-0.063	-3.1	3.814	26.545	-0.231	20.3

토 및 실트층 출현심도와 두께를 추정할 경우 구형모델을 사용한 추정결과가 가장 신뢰성이 있는 것으로 나타났다. 표 4에서 볼 수 있듯이 나머지 두 모델을 사용한 추정결과도 거의 유사한 신뢰성을 보이고 있다. 역거리가중치법은  $\alpha$  값이 1일 경우에 추정결과가 상대적으로 가장 신뢰성이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 역거리가중치법을 이용한 점토 및 실트층 출현심도와 두께 추정 결과는 MAE, MSE 및 G값을 이용하여 판단한 결과 크리깅기법에 의한 추정결과와 유사한 신뢰성을 보이는 것으로 나타났다.

구형모델을 사용한 정규크리깅과  $\alpha$  값으로 1을 사용한 역거리가중치법으로 추정한 송도지역의 점토와 실트층 출현심도 및 두께 분포 추정결과는 각각 그림 10,

11과 같다. 추정결과 점토 및 실트층의 출현심도는 해안에서 멀어질수록 깊어지는 것으로 나타났다. 또한, 점토와 실트층 두께는 해안 가까운 위치에서도 두꺼운 지역이 있는 것으로 분석되었으며, 2, 4공구(남동쪽 지역)보다는 1, 3공구(북서쪽 지역)가 점토와 실트층 두께가 두꺼운 것으로 나타났다. 특히, 1공구가 점토와 실트층 두께가 가장 두꺼운 것으로 나타났다. 본 논문에서 추정된 점토 및 실트층의 출현심도는 매립층 두께와 마찬가지로 터파기 시 가시설의 규모 및 공법결정에 영향을 미치며, 점토 및 실트층의 두께는 압밀침하량에 영향을 미치는 중요한 지층정보이다. 매립층과 퇴적층 경계심도 및 매립층 두께 추정결과에서 언급한 바와 같이 조사자료가 불충분한 2, 3, 4공구의 일부 구간의 추정결과는 다

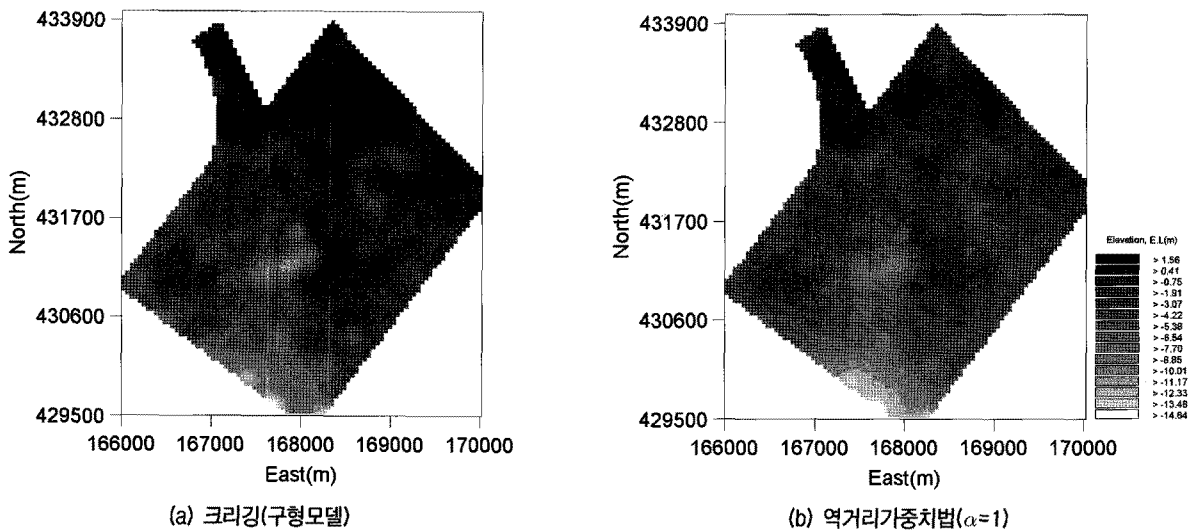


그림 10. 송도지역 점토 및 실트층 출현심도 추정결과

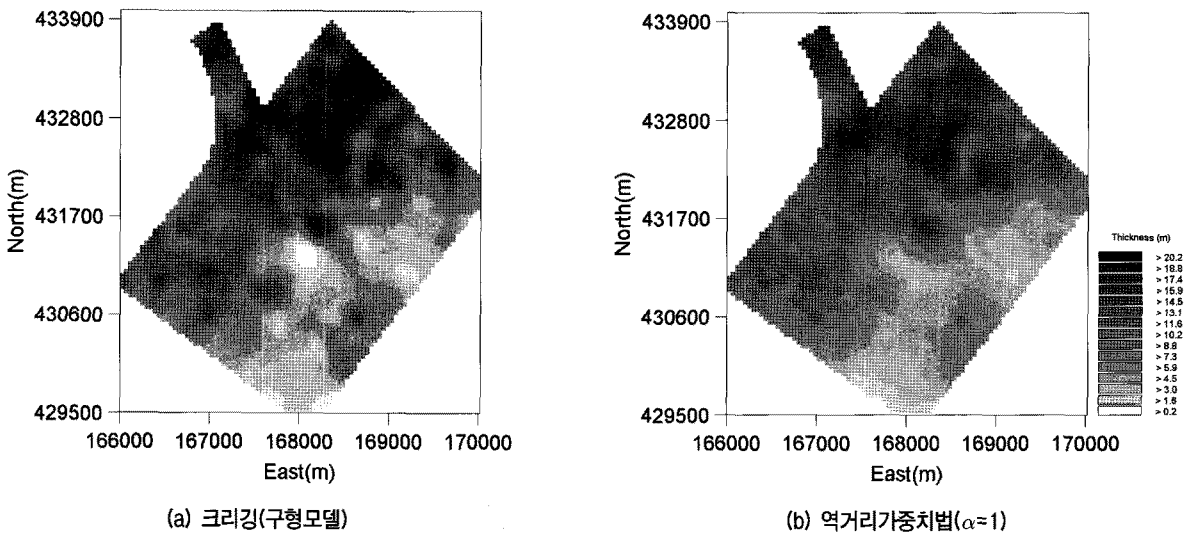


그림 11. 송도지역 점토 및 실트층 두께 추정결과

른 구간에 비하여 추정결과의 신뢰성이 낮을 가능성이 있을 것으로 판단되며, 크리깅 분산(오차분산)을 이용한 정량적인 추정결과의 신뢰성 분석은 5절에서 재논의하고자 한다.

### 4.3 풍화토 출현심도

인천 송도지역은 해안매립지반으로 깊은기초를 이용하여 상부의 하중을 지지층으로 전달하고 있다. 송도지역에서는 이러한 지지층으로 풍화토보다 견고한 지반을 이용하고 있으므로 풍화토의 출현심도예측은 구조물 계획 시 중요한 요소이다. 송도지역 풍화토 출현심도의 평균은 E.L-25.98m이다.

풍화토 출현심도의 실험적 베리오그램에 가장 적합한 이론적 베리오그램은 가우시안모델인 것으로 분석되었으나 그림 12 및 표 5에서 볼 수 있듯이 세 모델이 모두 유사한 적합성을 보이는 것으로 나타났다. 풍화토 출현심도에 대한 베리오그램의 너깃은 전체 문턱값의 6~22%로 매립층과 퇴적층의 경계심도와 점토 및 실트층의 출현심도에 대한 너깃과 전체 문턱값의 비율 즉, 상대너깃효과보다 작은 것으로 나타났다. 베리오그램 모델에서 문턱값과 너깃값 추정결과의 불확실성을 고려한다 할지라도 풍화토 출현심도에 대한 상대너깃효과가 매립층과 점토 및 실트층에 대한 추정결과의 상대

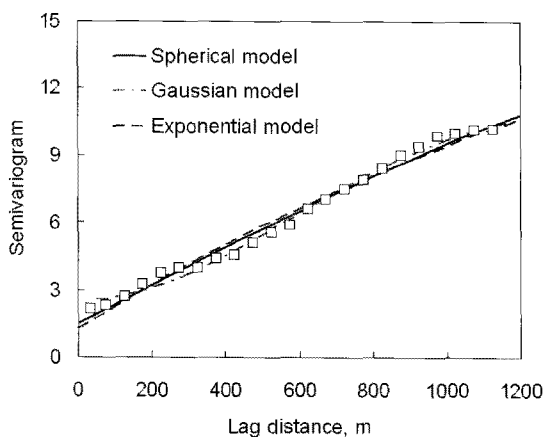


그림 12. 풍화토심도의 베리오그램 모델

표 5. 풍화토 출현심도의 이론적 베리오그램의 모수

Semivariogram model	Nugget, m <sup>2</sup>	Sill, m <sup>2</sup>	Partial sill, m <sup>2</sup>	Range, m	R <sup>2</sup>	RSS, m <sup>2</sup>
Spherical	1.51	14.72	13.21	2321	0.987	2.32
Gaussian	2.55	11.61	9.06	1394	0.993	1.33
Exponential	1.27	22.53	21.26	6198	0.981	3.33

너깃효과보다 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 이러한 현상은 풍화토가 암반이 풍화되어 형성된 지층으로 해수의 흐름에 영향을 받는 해안 퇴적층보다 심도의 공간적 변동성이 크지 않아 너깃효과가 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 따라서 풍화토 출현심도를 예측함에 있어 매립층과 퇴적층의 경계심도와 점토 및 실트층의 출현심도 추정에서보다 추정하고자 하는 위치에 가까운 자료에 상대적으로 큰 가중치를 부여할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 역거리가중치법을 이용하여 지층 분포를 추정할 때  $\alpha$  값에 반영된다.

풍화토 출현심도 추정결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 그림 13과 같이 교차검증을 수행하였으며, 추정결과에 대한 정량적 평가결과는 표 6과 같다. 본 논문에서는 풍화토심도 추정결과의 신뢰성이 매립층과 퇴적층 경계심도 추정결과와 점토 및 실트층 출현심도 추정결과의 신뢰성보다 우수한 것으로 나타났다. 이는 해양조건에서 형성된 퇴적층과 매립층 분포의 변동성이 풍화토층 분포의 변동성보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 이러한 변동성은 베리오그램의 너깃효과에 반영되었을 것으로 판단되며, 베리오그램의 너깃효과가 작은 풍화토 출현심도를 다른 층의 심도 및 두께보다 상대적으로 더 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 사용한 조사자료를 이용하여 풍화토 출현심도를 추정할 경우 구형모델을 사용한 정규크리깅 기법이 가장 신뢰성이 높은 것으로 분석되었다. 역거리가중치법은  $\alpha$  값이 2일 경우에 추정결과가 가장 신뢰성이 높은 것으로 분석되었으며, 크리깅기법에 의한 추정결과와 유사한 것으로 나타났다. 앞에서 분석한 매립층과 퇴적층의 경계심도 추정의 문제에서는  $\alpha$  값이 0, 점토 및 실트층 출현심도 추정의 문제에서는  $\alpha$  값이 1일 경우에 가장 신뢰성 있는 추정결과를 주는 것으로 나타났다. 따라서 풍화토 출현심도를 추정할 경우가 매립층과 퇴적층의 경계심도, 점토 및 실트층 출현심도를 추정할 경우보다 추정하고자 하는 위치에 인접한 자료에 상대적으로 큰 가중치를 부여함을 알 수 있다. 또한, 풍화토 출현심도 추정결과에 대한 G값이 매립층과 퇴적층 경

계심도와 점토 및 실트층 출현심도 추정결과에 대한 G 값보다 2배 이상 큰 70 내외의 값을 보이고 있다. 이는 크리깅기법과 역거리가중치법을 이용할 경우 평균을 이용하여 추정할 경우보다 매우 높은 신뢰성을 가진 결

과를 얻을 수 있음을 의미한다.

신뢰성이 가장 높은 구형모델을 사용한 정규크리깅과  $\alpha$  값으로 2를 사용한 역거리가중치법으로 추정된 송도지역의 풍화토 출현심도 추정결과는 그림 14와 같다. 전체적으로는 해안에서 멀어질수록 풍화토 출현심도가 깊어지는 것으로 나타났다. 그러나 해안에 가까운 일부 지역에서도 풍화토 출현심도가 깊은 것으로 나타났으며, 이 부분을 그림 14에 타원형의 점선으로 표시하였다. 풍화토 출현심도 추정결과는 구조물 말뚝기초의 길이를 예측하는데 사용될 수 있으며, 풍화토 출현심도가 깊은 3, 4공구가 1, 2공구에 비하여 말뚝길이가 길 것으로 예측할 수 있다. 따라서 상대적으로 말뚝길이가 긴 3, 4공구의 기초 공법에 대한 공사비가 더 많이 소요될 것으로 판단된다.

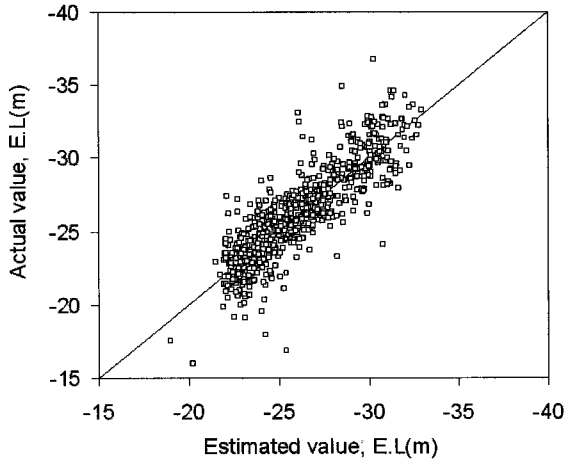


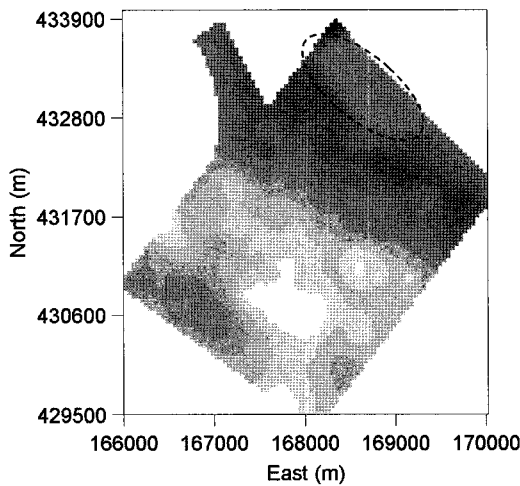
그림 13. 풍화토 심도 추정결과와의 교차검증(크리깅기법, 구형모델)

### 5. 토 의

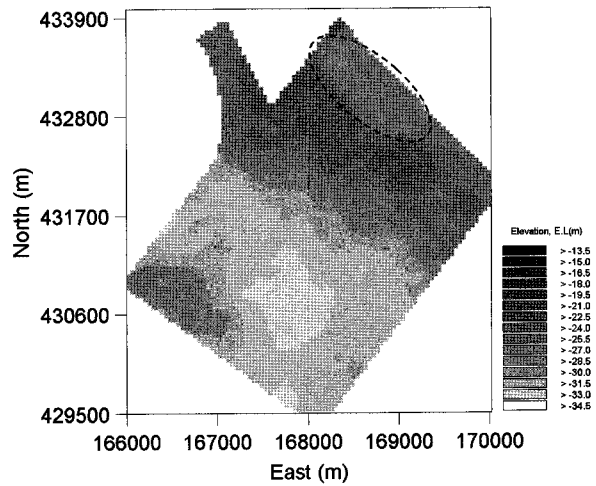
크리깅 또는 역거리가중치법 등의 방법을 이용하여 조사자료가 없는 위치의 지층분포 및 지반특성치를 추

표 6. 추정방법에 따른 풍화토 심도 추정결과와의 정확성 분석

Estimation method		MAE, m	MSE, m <sup>2</sup>	PBIAS, m	G
Kriging method	Spherical	1.186	2.944	-0.003	72.7
	Gaussian	1.225	3.110	0.015	71.2
	Exponential	1.215	3.028	0.005	72.0
Inverse Distance Weighting Method (IDW)	$\alpha=0$	1.261	3.381	-0.040	68.7
	$\alpha=1$	1.216	3.166	-0.025	70.7
	$\alpha=2$	1.215	3.117	-0.006	71.1
	$\alpha=3$	1.253	3.241	0.005	70.0
	$\alpha=4$	1.291	3.399	0.011	68.5
	$\alpha=5$	1.319	3.536	0.015	67.3



(a) 크리깅기법(구형모델)



(b) 역거리가중치법( $\alpha=2$ )

그림 14. 송도지역 풍화토 심도 추정결과

정할 경우에는 추정결과의 특성을 충분히 파악한 후 추정결과를 사용해야 한다. 따라서 본 절에서는 크리깅과 역거리가중치법으로 추정된 인천 송도지역 지층분포 추정결과의 특징에 대하여 논의하고자 한다.

먼저 크리깅을 이용하여 추정된 결과에 대한 정확성에 대하여 논의하고자 한다. 크리깅 기법은 추정결과의 정확성을 오차분산 즉, 크리깅 분산을 이용하여 평가할 수 있다. 그림 15는 풍화토 출현 심도 추정결과에 대한 크리깅 분산을 나타내고 있으며, 다른 지층 추정결과에 대한 크리깅 분산도 값은 다르나 그림 15와 유사한 분포 형태를 보이고 있다. 그림 15에서 X 표시는 실제 자료의 위치를 나타내고 있으며, 자료가 없는 위치에서 크리깅 분산이 큰 것을 볼 수 있다. 즉, 추정하고자 하는 위치와 값이 알고 있는 위치가 많이 떨어져 있을 경우에는 크리깅 분산이 크며, 크리깅 분산이 크다는 것은 추정값

의 정확성이 낮을 가능성이 크다는 것을 의미한다. 그러나 추정결과의 정확성을 평가하는 크리깅 분산은 자료의 배치(data configuration)에 영향을 받으나 자료의 크기에는 관계가 없는 특징이 있다(Goovaerts, 1997). 일반적으로 크기가 다른 자료에 둘러 쌓여 있는 위치의 추정결과보다 정확성이 떨어지는 것이 일반적이다. 그러나 크리깅 분산은 두 경우의 자료 배치가 동일할 경우에는 동일하게 크리깅 분산을 평가하는 단점이 있음에 유의해야 한다. 또한, 이와 같이 크리깅 분산이 커 추정결과의 신뢰성이 낮을 가능성이 있는 위치의 추정결과에 대한 신뢰성을 높이기 위한 유일한 방법은 그 위치에 추가적인 조사를 수행하여 추정에 활용할 수 있는 자료를 확보하는 것이다.

두 번째로는 측정값과 추정결과의 통계량을 비교하여 추정결과의 신뢰성을 검토하였다. 본 논문에서는 측정값과 추정결과를 비교하기 위하여 도수분포도 및 기본 통계량을 사용하였으며, 그림 16에 추정결과 중 매립층과 퇴적층 경계심도 및 풍화토 출현심도의 측정값과 추정결과에 대한 도수분포도를 나타내었다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 크리깅과 역거리가중치법 모두 실제 자료에는 분포하는 극한값(extreme value) 즉, 매우 작거나 매우 큰 값은 적절하게 추정하기 못하는 것으로 나타났다. 이를 추정결과의 smoothing effect라고 한다. 이러한 추정결과의 smoothing effect는 측정자료와 추정자료의 통계량들을 비교하면 더 구체적으로 알 수 있다. 표 7은 풍화토 출현심도의 측정자료와 추정자료의 통계량을 요약한 것으로 평균 및 중앙값은 두 자료가 유사한 결과를 보이지만 자료의 분산 정도를 나타내는 표준편

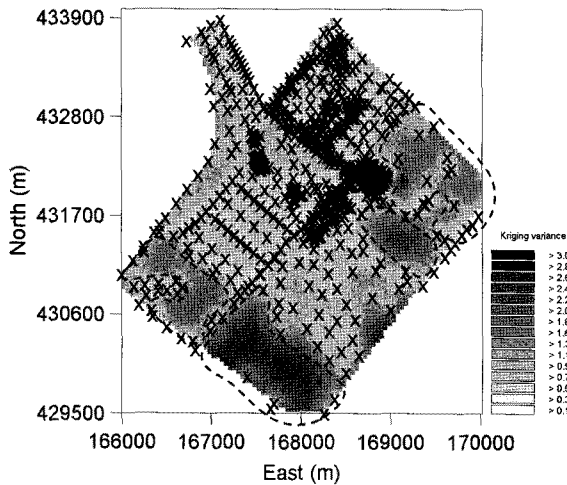


그림 15. 풍화토 출현심도 추정결과의 크리깅 분산(kriging variance)

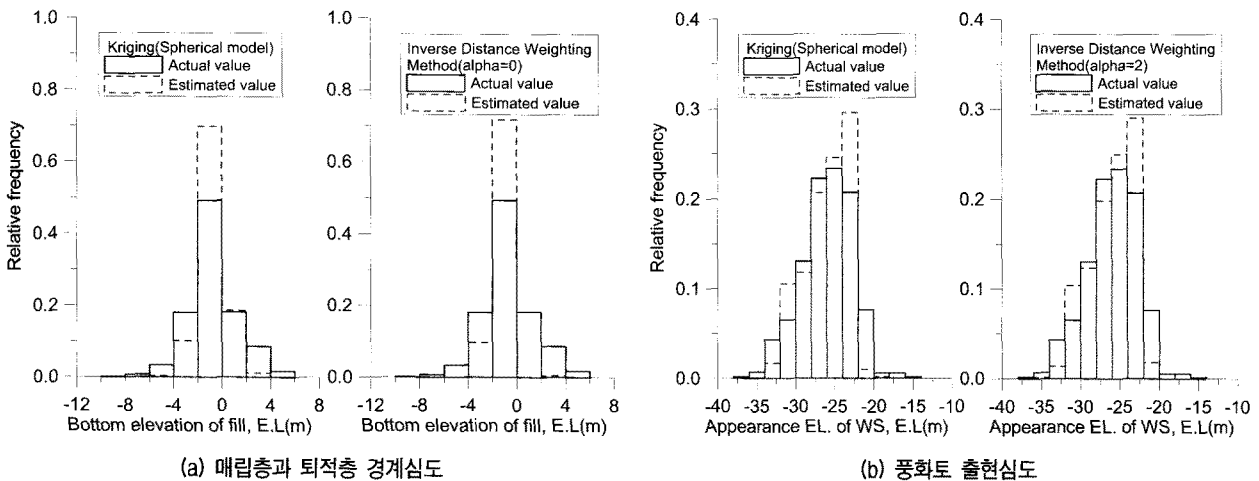


그림 16. 측정값과 추정결과의 도수분포 비교

차와 IQR, 자료의 범위(range)는 추정결과가 실제자료보다 작은 것으로 나타났다. 또한, 크리깅과 역거리가중치법의 추정결과는 최소값은 크게, 최대값은 작게 추정하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 풍화토 출현심도 이외의 추정결과에서도 나타났다. 크리깅 및 역거리가중치법과 같은 대부분의 추정방법들은 이러한 smoothing effect를 보이므로 극한값을 정확하게 추정하지 못하는 것으로 나타났으며, 추정결과를 이용할 경우에는 이러한 점을 유의해야 할 것이다.

마지막으로는 지층별 적정추정모델을 이용하여 추정한 결과에 대한 MAPE(Mean Absolute Percent Error)를 산정하여 지층에 따른 추정결과의 상대적인 신뢰성을 비교하였으며, 그 결과를 표 8에 요약하였다. 분석결과 모암이 풍화되어 생성된 풍화토 출현심도의 추정결과에 대한 MAPE가 매립층 및 퇴적층의 경계심도와 매립층의 두께, 해성 퇴적층인 점토와 실트층의 출현심도 및 두께 추정결과에 대한 MAPE보다 상대적으로 작은 것으로 나타났으며, 이는 풍화토의 출현심도 추정결과가 다른 지층에 대한 추정결과에 비하여 상대적으로 신뢰성 높다는 것을 의미한다. 또한, 매립층과 퇴적층의 경계심도에 대한 MAPE 보다는 매립층의 두께에 대한 MAPE가 작으며, 점토와 실트층의 출현심도에 대한 MAPE 보다 점토와 실트층 두께에 대한 MAPE가 작은 것으로 나타났다. 이는 지층의 경계심도 및 출현심도 보다는 해당 지층의 두께를 추정하는 것이 상대적으로 신뢰성이 높

은 결과를 줄 수 있다는 것을 의미한다. 본 논문에서의 이러한 분석결과는 지층 경계면의 고도보다 지층두께를 이용한 예측기법의 정확도가 높다는 천성호 등(2005)의 연구결과와 일치한다. 베리오그램 모델에서 너깃효과는 전술한 바와 같이 측정오차와 자료들이 가까운 거리에서도 큰 차이를 보일 경우에 나타나는 현상으로 일반적으로 너깃을 전체 문턱값으로 나눈 상대너깃효과(relative nugget effect)로 나타내며, 각 지층의 추정결과에 사용한 베리오그램 모델의 상대너깃효과를 표 8에 정리하였다. 표 8에서 볼 수 있듯이 추정결과의 MAPE가 작은 풍화토 출현심도에 대한 상대너깃효과가 추정결과의 MAPE가 큰 매립층 및 점토와 실트층의 상대너깃효과보다 작은 것으로 나타났다. 이는 풍화토의 출현심도의 변동성이 매립층 및 점토와 실트층에 비하여 상대적으로 작기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 또한, 너깃효과가 작을 경우에는 가까운 거리에 있는 자료들이 유사한 값을 보일 가능성이 높으므로 역거리가중치법에서 풍화토 출현심도 추정에 가장 적합한  $\alpha$  값이 다른 지층에 대한 추정에 가장 적합한  $\alpha$  값보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

## 6. 결론

본 논문에서는 인천 송도지역의 기존 조사자료를 이용하여 미조사 구역의 지층심도 및 두께를 크리깅과 역

표 7. 풍화토 실제 자료와 추정자료의 통계량 비교

Summary Statistics	Actual data	Estimated data	
		Kriging (Spherical model)	IDW (alpha=2)
Mean	-25.98	-25.97	-25.97
Standard deviation	3.29	2.81	2.82
Minimum	-36.72	-32.95	-34.13
Interquartile range (IQR)	4.44	4.33	4.33
Median	-25.80	-25.60	-25.61
Maximum	-8.58	-18.94	-21.03
Range	28.14	14.01	13.10

표 8. 지층별 적정추정방법 및 추정결과의 MAPE 비교

Estimation method Estimated value	Kriging method			IDW method	
	Model	Relative nugget effect	MAPE, %	Alpha	MAPE, %
Bottom EL. of fill	Spherical	0.60	137.3	0	138.9
Thickness of fill	Spherical	0.60	27.5	0	27.9
Appearance EL. of clay & silt	Spherical	0.48	197.1	1	190.9
Thickness of clay & silt	Spherical	0.36	34.6	1	34.9
Appearance EL. of weathered soil	Spherical	0.10	4.8	2	4.9

거리가중치법을 이용하여 추정하였다. 크리깅에서는 이론적 베리오그램으로 구형, 가우시안, 지수모델을 적용하였으며, 각 모델 추정결과의 신뢰성을 평가 하기 위해 교차검증을 사용하였다. 또한, 교차검증 결과를 정량적으로 평가하기 위하여 MAE, MSE, PBIAS 및 G 값을 사용하였다. 역거리가중치법에서는  $\alpha$  값을 변화시켜가며 추정결과를 비교하였으며, 추정결과의 신뢰성은 크리깅에서와 동일한 방법을 적용하였다.

크리깅 추정결과 본 논문에서 추정한 지층의 출현심도 및 두께는 모두 구형모델이 신뢰성이 높은 것으로 분석되었으나 분석에 사용한 세 모델을 이용하여 추정한 결과는 거의 유사한 신뢰성을 보이는 것으로 나타났다. 제한된 자료를 이용하여 산정한 실험적 베리오그램으로 이론적 베리오그램을 추정하게 되므로 실험적 베리오그램에 가장 적합한 이론적 베리오그램 모델이 반드시 가장 신뢰성 높은 추정결과를 주지는 않는다는 것을 알 수 있었다. 너깃과 전체 문턱값의 비는 풍화토 출현심도의 베리오그램이 퇴적층 출현심도의 베리오그램보다 작은 것으로 나타났다. 이는 퇴적층은 이격거리가 작은 두 위치에서도 출현심도 차이가 클 가능성이 있다는 것을 의미한다. 역거리가중치법을 이용하여 매립층과 퇴적층 경계심도 및 두께 추정할 경우에는  $\alpha$  값으로 0, 점토 및 실트층 출현심도와 두께를 추정할 경우에는  $\alpha$  값으로 1, 풍화토 출현심도를 추정할 경우에는  $\alpha$  값으로 2를 사용하였을 때 가장 신뢰성이 높은 추정결과를 얻을 수 있었다. 큰  $\alpha$  값을 사용한다는 것은 인접한 자료의 가중치를 크게 부여한다는 의미로 풍화토는 매립층과 퇴적층보다 인접자료에 큰 가중치를 부여하여 추정할 경우 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있었다.

미조사 구간의 지층분포 추정을 위해서는 하나의 방법을 사용하는 것보다 다양한 방법을 사용해야 한다. 또한, 추정결과의 신뢰성을 교차검증 등의 방법으로 평가하여 최종적으로 추정방법을 결정해야 할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 크리깅이 역거리가중치법에 비하여 약간 신뢰성 높은 결과를 주는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부분으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2000), 도로설계편람, 제4편 토공 및 배수편, pp.409-1.
2. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진 (2009), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 6호, pp.73-88.
3. 김홍택, 이혁진, 김영웅, 김진홍, 김홍식 (2002), “GIS 기법을 이용한 대규모 매립지반의 장기침하 예측”, *한국지반공학학회논문집*, 제18권, 2호, pp.107-121.
4. 선창국 (2009), “공간 GIS 기반의 지반 정보 시스템 구축을 통한 대전 지역의 부지 응답에 따른 지진재해 구역화”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 1호, pp.5-19.
5. 윤길림, 이강운, 채영수, 유광호 (2005), “지구통계학 크리깅 기법을 이용한 연약지반의 불확실성 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제21권, 3호, pp.5-17.
6. 천성호, 선창국, 정충기 (2005), “지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용”, *대한토목학회 논문집*, 제25권, 제2C호, pp.103-115.
7. 최준근 (2007), 지구통계학, 시그마프레스, 서울.
8. 최현길 (2009), “송도 국제도시 개발계획에 대한 개관”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.3-27.
9. Baise, L. G., Higgins, R. B., and Brankman, C. M. (2006), “Liquefaction hazard mapping-Statistical and spatial characterization of susceptible units”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.6, pp.705-715.
10. Chiasson, P., Lafleur, J., Soulie, M., and Law, K.T. (1994), “Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics”, *Canadian Geotechnical Journal*, 32, pp.1-10.
11. Cressie, N. A. C. (1991), *Statistics for Spatial data*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
12. Goovaerts, P. (1997), *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York.
13. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989), *Applied geostatistics*, Oxford University Press, New York.
14. Jaksa, M. B., Kaggwa, W. S., and Brooker, P. I. (1993), “Geostatistical modeling of the spatial variation of the shear strength of a stiff, overconsolidated clay”, *Probabilistic methods in geotechnical engineering*, Balkema, Rotterdam, pp.185-194.
15. Journel, A. G., and Huijbergts, C. J. (1978), *Mining geostatistics*: Academic Press, London.
16. Lee, H. J., Park, S. W., Yoo, S. D., and Kim, H. T. (2004), “An Estimation of Long-term Settlements in the Large Reclamation Site and Determination of Additional Sampling Positions Using Geostatistics and GIS”, *Jour. of the KGS*, Vol.20, No.2, pp.131-141.
17. Parsons, R. L., and Frost, J. D. (2002), “Evaluating site investigation quality using GIS and geostatistics”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.6, pp.451-461.
18. Sitharam, T. G. (2007), “Spatial variability of SPT data using ordinary and disjunctive kriging”, *ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*, pp.253-264.
19. Soulie, M., Montes, P., and Silvestri, V. (1990), “Modelling spatial variability of soil parameters”, *Canadian Geotechnical Journal*, 27(5), pp.617-630.
20. Sun, C. G., Chun, S. H., and Chung, C. K. (2008), “Spatial GIS-Based seismic zonation for regional estimation of site effects at Seoul metropolitan area”, *Proceedings of second Japan-Korea Geotechnical Engineering Workshop*, Tokyo, Japan, pp.115-122.
21. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, pp.729.

(접수일자 2009. 5. 6, 심사완료일 2009. 12. 29)