

# 인천 송도국제도시 지층분포추정을 위한 크리깅 방법의 비교연구

## Comparative Studies of Kriging Methods for Estimation of Geo-Layer Distribution of Songdo International City in Incheon

|                    |                |                    |               |
|--------------------|----------------|--------------------|---------------|
| 김 동 휘 <sup>1</sup> | Kim, Dong-Hee  | 류 동 우 <sup>2</sup> | Ryu, Dong-Woo |
| 이 주 형 <sup>3</sup> | Lee, Ju-Hyoung | 최 인 걸 <sup>4</sup> | Choi, In-Gul  |
| 김 중 국 <sup>5</sup> | Kim, Jong-Kook | 이 우 진 <sup>6</sup> | Lee, Woo-Jin  |

### Abstract

Kriging techniques have been used to estimate the spatial distribution of soil layers and soil properties in the geotechnical engineering area. Since the selected kriging technique may provide different values of estimation, the selection of method is important in the geotechnical estimation. In this paper, the spatial distribution of the thickness of consolidation layer of Songdo International City is estimated using simple, ordinary, and universal kriging techniques, and the reliability of estimated results is analyzed. It is shown that the consolidation layer thickness estimated by the simple kriging technique is larger than those by other kriging techniques when the location of estimation is far from the locations where the measured data exist. In this case, the reliability of the simple kriging technique is observed to be lower than those of other techniques. Universal kriging gives a negative value for thickness of consolidation layer in some locations away from the data. It is concluded that the ordinary kriging is the most optimized estimation technique because the reliability of ordinary kriging technique is higher than those of other ones and the consolidation layer thickness estimated by the ordinary kriging locates within the reasonable range.

### 요 지

크리깅기법은 지반공학분야에서 지층 또는 지반정수의 공간적 분포 추정을 위하여 적용되고 있다. 각각의 크리깅 기법에 따라서 추정결과가 상이하기 때문에 추정목적에 부합하는 크리깅 기법 선택은 중요한 문제이다. 본 논문에서는 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅을 사용하여 인천 송도국제도시의 압밀층 두께를 추정하였으며, 크리깅 기법에 따른 추정결과의 신뢰성을 분석하였다. 분석결과 단순크리깅은 정규크리깅과 일반크리깅에 비하여 측정자료와 멀리 떨어진 위치에서의 압밀층 두께를 크게 추정하며, 추정결과의 신뢰성도 낮았다. 일반크리깅은 측정자료와 멀리 떨어진 일부 위치에서 압밀층 두께를 음의 값으로 추정하는 것으로 나타났다. 압밀층 두께를 추정하기 위한 가장 적절한 크리깅 기법은 가장 신뢰성이 높고 물리적으로 합당한 추정범위 내의 값을 추정한 정규크리깅 기법인 것으로 분석되었다.

**Keywords :** Kriging with a trend, Ordinary kriging, Simple kriging, Variogram

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)  
 2 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Senior Researcher, KIGAM)  
 3 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)  
 4 정회원, (주)유신 전무 (Member, Director of Incheon Office, Yooshin Engineering Corporation)  
 5 정회원, SGS건설시험연구원 인천지원 이사 (Member, Director, Incheon Office, SGS-Korea Construction Quality Test & Analysis Co., Ltd.)  
 6 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)  
 \* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지반공학분야에서의 지층분포는 말뚝길이, 압밀침하량 등을 추정하는데 필요한 정보이므로 지층분포의 정확한 추정은 매우 중요한 문제이다. 지층분포를 추정하기 위하여 일반적으로 지구통계학적(geostatistical) 분석방법이 많이 사용되고 있으며, 이 방법의 대표적인 것이 크리깅(kriging)이다. Baise 등(2006)은 정규크리깅(ordinary kriging, OK)을 이용하여 액상화 발생 확률의 공간적인 분포를 추정하였으며, Parsons와 Frost(2002)는 SPT N 값의 공간적인 분포를 정규크리깅으로 추정한 결과를 이용하여 액상화 가능성을 평가하였다. Soulie 등(1990)은 단순크리깅(simple kriging, SK)을 이용하여 비배수 전단강도의 분포를 추정하였다. 국내에서는 천성호 등(2005)이 지층분포의 공간적인 분포를 추정하기 위하여 크리깅기법 중 정규크리깅을 사용하였으며, 윤길립 등(2005)은 정규크리깅을 사용하여 연약층 두께 및 전단강도의 공간적인 분포를 추정하였다. 이혁진 등(2004)도 역시 정규크리깅을 사용하여 연약층 두께와 간극비의 공간적 분포를 추정하였다. 최근 김동휘 등(2010)은 인천 송도국제도시의 지층을 추정하기 위하여 베리오그램 모델에 따른 추정결과의 신뢰성을 분석하였으며, 크리깅 기법으로는 정규크리깅을 사용하였다. 이와 같이 크리깅기법은 지반공학분야에서 지층 또는 지반정수 등의 공간적인 분포 추정을 위하여 적용되고 있으며, 지반공학분야에서 보편적으로 사용되는 크리깅기법은 정규크리깅인 것으로 나타났다.

크리깅기법에는 단순크리깅과 정규크리깅 이외에도 일반크리깅(kriging with a trend, KT 또는 universal kriging, UK), 공동크리깅(Co-kriging, CK) 등이 있다. 국내의 지반공학분야에서는 크리깅 기법들에 따른 추정결과의 특성 및 신뢰성을 비교, 분석하지 않고 대부분 정규크리깅을 선택하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 크리깅 추정 방법들에 따라서 공간적인 추정결과의 특성과 신뢰성이 상이하기 때문에 각각의 추정특성을 파악하여 최종적으로 설계에 적용할 크리깅기법을 선택하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 김동휘 등(2010)의 논문에서 다루지 못한 크리깅 기법에 따른 추정결과의 특징을 제시하고자 한다. 이러한 연구를 수행하기 위하여 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅을 사용하여 인천 송도국제도시의 압밀층 두께 분포를 추정하였으며, 각각의 크리깅기법에 따른 압밀층 두께 추정결과의 신뢰성을 잭나이프 검증방법을 이용

하여 평가하였다. 신뢰성 평가와 함께 추정결과의 공간적 분포 특성을 비교 분석하여 각각의 추정방법의 특성이 추정결과에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였으며, 이러한 분석결과들을 바탕으로 송도국제도시 압밀층 두께 분포 추정에는 어떠한 방법이 적합한지 결정하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 베리오그램

크리깅기법에서 값을 추정할 때 가장 중요한 역할을 하는 것이 베리오그램(variogram)이며, 공간자료의 상관관계를 나타내는 척도이다. 크리깅을 이용하여 미조사 구간의 자료 값을 예측하기 위해서는 모든 분리거리  $h$ 에 대한 베리오그램이 필요하며, 이를 구하기 위해서는 주어진 자료로부터 계산된 실험적 베리오그램을 가장 잘 대표하는 이론적 베리오그램을 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, 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 있다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989; Journel과 Huijbergts, 1978; Cressie, 1991).

### 2.2 크리깅기법

분석영역  $A$ 의 기지 값  $z$ 를 이용하여 값을 알지 못하는 위치  $u$ 에서의  $z$  값을 추정하기 위해 사용되는 모든 크리깅방법들은 식 (1)로 정의되는 기본적인 선형회귀 추정자(linear regression estimator),  $Z^*(u)$ 의 일종이다.

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) [Z(u_{\alpha}) - m(u_{\alpha})] \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_{\alpha}(u)$ 는 확률변수  $Z(u_{\alpha})$ 의 실현치(realization)인  $z(u_{\alpha})$ 에 적용되는 가중치이며,  $m(u)$ 와  $m(u_{\alpha})$ 는 각각 확률변수  $Z(u)$ 와  $Z(u_{\alpha})$ 의 기대값이다. 추정에 사용되는 자료의 수와 자료들에 할당되는 가중치들은 추정 위치마다 변하며, 실제 문제에 있어서는 값을 추정하고자 하는 위치  $u$ 에 인접한  $n(u)$ 개의 자료, 즉 위치  $u$ 를 중심으로

한 일정 영역 내에서의 자료 값들만이 추정에 사용된다. 위치  $u$ 를 중심으로 한 주어진 영역은  $W(u)$ 로 표현되며, 전체 영역  $A$ 의 부분집합이다. 확률변수  $Z(u)$ 와  $Z(u_a)$ 의 실현치로 미지 값  $z(u)$ 와 측정 값  $z(u_a)$ 를 취급할 때 추정 오차(estimation error)인  $Z^*(u)-Z(u)$ 를 역시 확률변수로 취급할 수 있다. 모든 종류의 크리깅 기법들은 추정 값이 편향되지 않은 식 (3)의 조건 하에서 식 (2)로 표현되는 오차분산(error variance),  $\sigma_E^2(u)$ 를 최소화하는 것을 목적으로 한다.

$$\sigma_E^2(u) = \text{Var}\{Z^*(u) - Z(u)\} \quad (2)$$

$$E\{Z^*(u) - Z(u)\} = 0 \quad (3)$$

크리깅 추정자(kriging estimator)는 확률함수(random function)  $Z(u)$ 를 취급하는 모델에 따라서 변하며, 확률함수  $Z(u)$ 는 잔차성분  $R(u)$ 와 경향성분 또는 평균  $m(u)$ 로 구분될 수 있다. 크리깅 기법들은 경향성분 또는 평균  $m(u)$ 를 어떻게 고려하는가에 따라서 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅으로 구분된다. 단순크리깅은 식 (4)와 같이 평균  $m(u)$ 를 알고 있으며, 분석영역 전체  $A$ 에서 일정하다고 가정한다. 단순크리깅의 경우 추정하고자 하는 위치와 측정자료의 거리가 많이 떨어져 있는 위치들의 추정값으로 전체 자료의 평균을 추정하는 특징이 있다. 정규크리깅은 식 (5)와 같이 추정하고자 하는 위치  $u'$ 에 인접한 국부적인 영역,  $W(u)$  내에서의 평균  $m(u')$ 는 일정하나 알지 못한다고 가정한다. 일반크리깅은 알지 못하는 국부적인 영역에서의 평균  $m(u')$ 가 분석영역 전체에서 변한다고, 즉 경향성을 보인다고 가정한다. 이러한 경향성은 식 (6)과 같이 함수  $f_k(u')$ 의 선형조합으로 모델링 된다.

$$m(u) = m, \text{ known } \forall u \in A \quad (4)$$

$$m(u') = \text{constant but unknown } \forall u' \in W(u) \quad (5)$$

$$m(u') = \sum_{k=0}^K a_k(u') f_k(u')$$

$$\text{with } a_k(u') \approx a_k \text{ constant but unknown } \forall u' \in W(u) \quad (6)$$

크리깅은 위의 가정 하에서 식 (2)의 오차분산  $\sigma_E^2(u)$ 를 최소로 하는 식 (1)의 가중치  $\lambda_d(u)$ 를 구하여 기지 값의 선형조합으로 미지 값을 추정하는 방법이며, 가중치를 구하는 방정식을 크리깅 방정식 또는 시스템(kriging

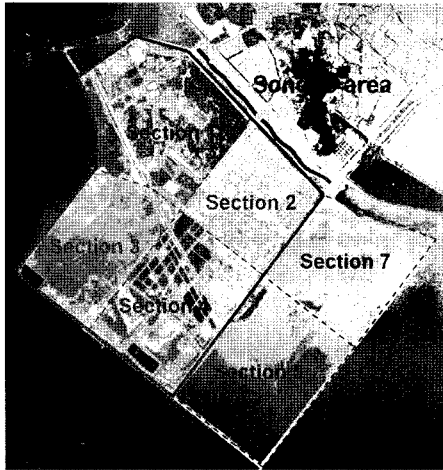
system)이라고 한다. 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅의 가중치를 구하는 크리깅 시스템의 상세한 풀이과정은 Goovaerts(1997), Isaaks와 Srivastava(1989), Cressie(1991) 등을 참고할 수 있다.

크리깅 추정결과와 검증방법으로 전체 자료 중 값을 알고 있는 위치에서의 값을 크리깅기법으로 추정하여 알고 있는 값과 비교하는 잭나이프 검증방법(Jackknife validation method)을 사용하였다. 또한, 추정결과와 정확성을 정량적으로 평가하기 위해 비교 통계량을 사용하였다. 비교통계량으로는 추정값의 정확성을 평가하는 MAPE(Mean Absolute Percent Error), MAE(Mean Absolute Error), MSE(Mean Squared Error), 추정결과와 편향성을 평가하는 PBIAS(Percent of BIAS), 예측의 효율성(effectiveness)을 평가하는 G 값(goodness-of-prediction(G) measure)을 사용하였다. MAPE, MAE, MSE는 계산 값이 작을수록 추정값이 정확하다는 것을 의미하며, PBIAS는 0에 가까울수록 추정결과가 편향되지 않았다고 할 수 있다. 또한, G값이 "100"일 경우에는 완벽한 추정이라고 할 수 있으며, G값이 음수일 경우에는 추정자(predictor)로 자료값의 평균을 사용하는 것보다 신뢰성이 없다는 것을 의미한다(Santra 등, 2008; 김동휘 등, 2010).

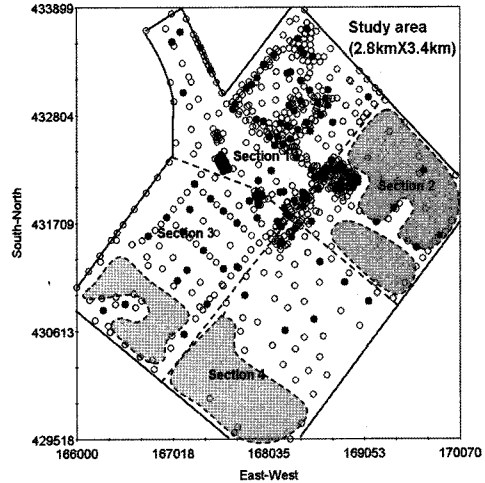
### 3. 분석자료

본 논문에서는 인천광역시 연수구에 위치한 송도국제도시에서 수행된 시추조사자료를 사용하여 압밀층 분포를 추정하였으며, 송도국제도시 매립현황은 그림 1(a)와 같다. 송도국제도시 중 1~4 공구(2.8km×3.4km) 내의 자료를 이용하여 압밀층 분포를 추정하였으며, 분석자료와 검증자료 위치는 그림 1(b)와 같다. 본 논문에서 사용한 시추자료는 총 702개이며, 그림 1(b)의 점선으로 표시한 부분은 상대적으로 조사자료가 충분하지 않은 구간이다. 인천송도지역은 표고(elevation)가 약 E.L+7m인 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암이 분포하고 있다. 퇴적층은 실트질 점토층 및 모래층이 번갈아 분포하고 있으며, 퇴적층 상부에 분포하는 평균 N값이 5인 실트질 점토층에서 압밀이 발생하는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 분석 대상 지반으로 송도 지층 중 압밀층을 선정하였으며, 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅으로 압밀층 두께를 추정한 후 그 결과를 분석하였다. 총 702개의 시추조사자료를 581개의 분석자료와 121개의 검증자료로 분리하였으며, 각각의 위치는 그림



(a) 매립현황 및 공구분할 현황



(b) 1~4공구 내의 분석자료(원)와 검증자료(점) 분포

그림 1. 매립현황 및 분석영역 내의 시추조사위치

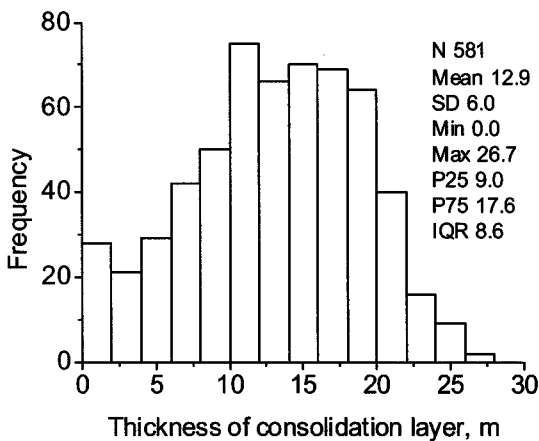


그림 2. 압밀층 두께의 히스토그램 및 통계량

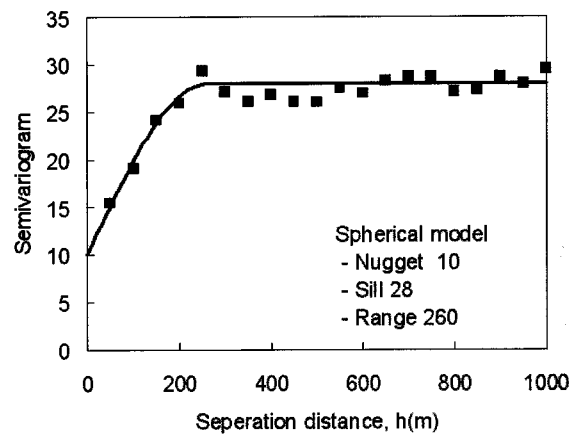


그림 3. 압밀층 두께의 베리오그램

1(b)와 같다. 속이 빈 원형의 자료가 581개의 분석자료이며, 검정색의 원형 점으로 표시되어 있는 자료가 121개의 검증자료이다. 581개의 분석자료를 이용하여 압밀층 두께에 대한 통계량을 산정하였으며, 산정결과 평균 12.9m, 표준편차 6.0m를 보이는 것으로 나타났다. 압밀층 두께의 히스토그램과 상세한 통계량은 그림 2와 같다.

#### 4. 베리오그램 및 크리깅 사용자료

##### 4.1 베리오그램

크리깅 기법을 이용하여 미조사 구간을 포함한 분석영역의 압밀층 두께를 추정하기 위해서 먼저 압밀층 두께에 대한 실험적 베리오그램을 작성하였다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 50m 분리거리마다 실험적 베리오그

램을 작성하였다. 실험적 베리오그램 작성 후에는 이를 이용하여 이론적 베리오그램을 결정하였으며, 김동휘 등 (2010)에 따르면 구형모델이 압밀층 두께의 실험적 베리오그램에 적합한 것으로 나타나 압밀층 두께 추정을 위한 이론적 베리오그램으로 구형모델을 사용하였다. 압밀층 두께 추정을 위해 사용한 구형모델의 너깃은 10, 문턱값은 28, 상관거리는 260이며, 본 논문에서 사용한 자료는 분석자료와 검증자료로 구분하였기 때문에 김동휘 등 (2010)이 제시한 구형모델의 세 모수와는 약간 상이하다.

##### 4.2 크리깅 사용자료(search neighborhood)

조사자료가 없는 위치에서의 값을 추정하기 위해 분석영역 전체자료를 사용하지 않고 추정하고자 하는 위치에 인접한 몇 개의 자료 또는 추정하고자 하는 위치를 중심으로 한 국부적인 영역,  $W(u)$  내의 자료만을 사

용한다. 일정한 영역은 일반적으로 추정하고자 하는 위치를 중심으로 한 원을 사용하게 된다. 미지값 추정 시 자료를 너무 많이 사용할 경우에는 추정하고자 하는 위치에 인접한 자료들의 국부적인 자료특성을 고려하지 못할 가능성이 있으며, 너무 작은 수의 자료를 사용할 경우에는 국부적인 영역의 평균값을 적절하게 추정할 수 없어 크리깅 사용 자료의 개수 선택에 유의해야 한다. 본 논문에서는 크리깅 사용 자료 수를 결정하기 위해 사용 자료 수에 따른 잭나이프 검증결과의 신뢰성을 MAPE를 이용하여 평가해 보았다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 단순크리깅은 분석에 사용한 자료의 범위(8~24개)에서 MAPE가 일정한 값을 보이는 것으로 나타났으

며, 정규크리깅과 일반크리깅은 12개 이상을 크리깅에 사용할 경우 약간 신뢰성이 증가하나 자료 수에 상관없이 거의 일정한 신뢰성을 보인다. 따라서 본 논문에서는 단순크리깅과 정규크리깅의 경우 최대 추정 자료 수는 12개, 일반크리깅의 경우에는 일정한 영역에 분포하는 자료들의 경향성을 분석해야 하므로 20개 자료를 사용하여 크리깅 분석을 수행하였다.

## 5. 추정결과

### 5.1 추정결과의 검증

표 1은 정규크리깅, 일반크리깅, 단순크리깅으로 추정된 압밀층 두께에 대한 신뢰성 검증결과이다. 신뢰성 검증결과 정규크리깅과 일반크리깅은 거의 유사한 신뢰성을 보이고 있으며, 단순크리깅이 상대적으로 신뢰성이 떨어지는 것으로 분석되었다. 그림 5는 동일한 위치에서의 실제 압밀층 두께와 추정 값을 비교한 결과이며, 정규크리깅과 일반크리깅의 실제 압밀층 두께와 추정 값의 상관계수는 0.74, 단순크리깅의 경우에는 0.69의 값을 보여 단순크리깅의 추정결과가 신뢰성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

크리깅 기법을 포함한 대부분의 추정방법들은 일반적으로 큰 값은 작게 작은 값은 크게 추정하는 경향을 보이며, 이를 smoothing effect라고 한다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 단순크리깅 기법이 다른 추정방법들에 비하

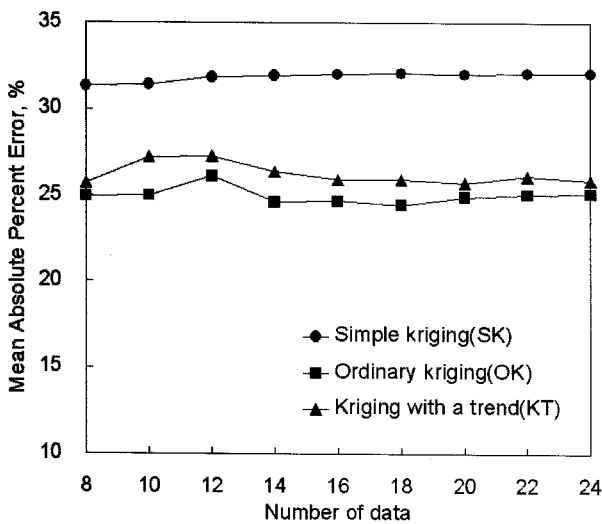


그림 4. 크리깅 사용자료 수에 따른 MAPE

표 1. 크리깅기법에 따른 압밀층 두께 추정결과의 신뢰성(잭나이프 검증)

| Kriging method            | MAPE, % | MAE, m | MSE, m <sup>2</sup> | PBIAS, m | G    |
|---------------------------|---------|--------|---------------------|----------|------|
| Ordinary kriging (OK)     | 26.104  | 2.408  | 9.831               | -0.051   | 54.5 |
| Kriging with a trend (KT) | 25.741  | 2.447  | 9.843               | 0.018    | 54.5 |
| Simple kriging (SK)       | 31.825  | 2.593  | 11.677              | -0.531   | 46.0 |

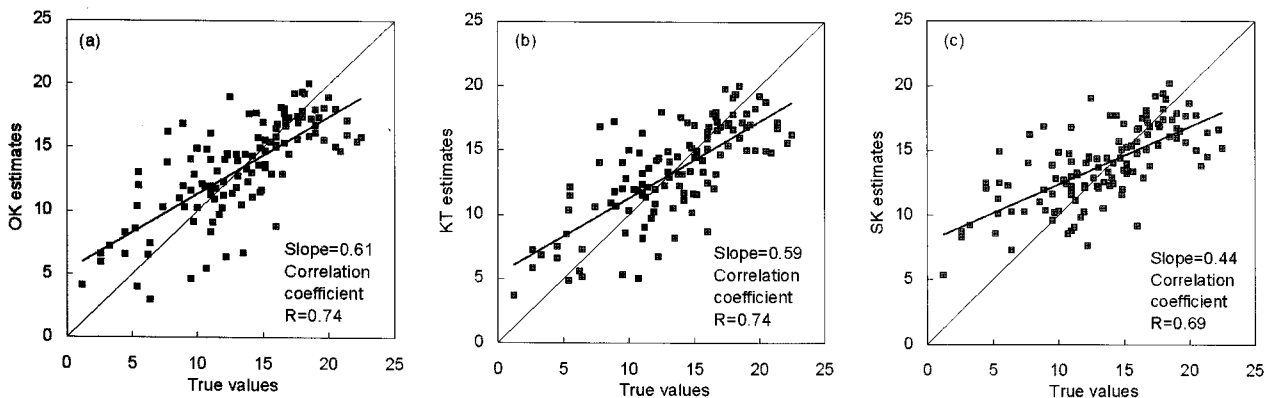


그림 5. 실제 압밀층 두께와 추정 값의 비교: (a) OK, (b) KT, (c) SK

여 smoothing effect가 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 잭나이프 검증결과에 사용한 위치의 압밀층 실제 두께와 추정값의 통계량을 비교하여 분석할 수 있다. 표 2에서 볼 수 있듯이 평균 및 중앙값은 실제 측정값과 세 가지 크리깅 추정값들이 유사한 결과를 보이지만 자료의 분산 정도를 나타내는 표준편차와 IQR(interquartile range), 자료의 범위(range)는 크리깅 추정결과가 실제자료보다 작으며 단순크리깅이 가장 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 보면 정규크리깅과 일반크리깅의 추정결과가 유사한 신뢰성을 보이는 반면 단순크리깅은 앞의 두 방법에 비하여 상대적으로 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 정량적인 신뢰성 분석과 함께 미조사 구간에 대한 추정 값들의 분포특성 또한 신뢰성 평가에 포함해야 할 것으로 판단된다. 분포특성 평가는 추정하고자 하는 위치 주변의 자료를 바탕으로 분석자의 공학적인 판단(engineering judgment)에 의해서 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 5.2 크리깅 기법에 따른 추정결과 분포특성

그림 6은 분석 영역을 50m의 격자로 나누어 각 격자 중심에서의 압밀층 두께를 정규크리깅, 단순크리깅, 일

반크리깅을 이용하여 추정한 결과이다. 추정결과 그림 1(b)에서 점선으로 표시된 구역 즉, 다른 구역에 비해 상대적으로 시추조사 자료가 적은 2, 4공구의 압밀층 두께 추정결과가 크리깅 기법에 따라서 차이를 보이는 것으로 나타났다. 단순크리깅에 의한 압밀층 두께 추정결과인 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 추정하고자 하는 위치와 측정자료의 거리가 많이 떨어져 있는 위치들은 압밀층 평균 두께인 12.9m에 가까운 값을 보이는 것으로 나타났다. 정규크리깅은 추정하고자 하는 위치에 인접한 12개 자료를 사용했기 때문에 추정하고자 하는 위치와 측정자료의 거리가 많이 떨어져 있는 위치의 추정값은 추정에 사용한 12개 자료의 평균값에 가까운 값을 보이고 있다(그림 6(a)).

일반크리깅은 그림 6(c)에서 볼 수 있듯이 일부 영역에서 압밀층 두께를 음의 값으로 추정하는 것으로 나타났다. 그러나 압밀층 두께는 음의 값을 보일 수 없으므로 이러한 추정결과는 타당한 추정결과라고 할 수 없다. 이러한 추정결과를 보이는 이유는 일반크리깅의 경우 주위자료의 경향성을 분석하여 미조사 구간의 값을 예측하게 되며, 그 경향성에 의해서 자료가 없는 구역에서의 추정값이 음의 값이 될 경우가 있기 때문이다. 본 논문의 분석결과인 압밀층 두께가 이러한 음의 값을 보이

표 2. 잭나이프 검증결과에 사용한 실제 자료와 추정자료의 통계량 비교(121개 자료 사용)

| Summary Statistics        | True values | OK estimates | KT estimates | SK estimates |
|---------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Mean                      | 13.3        | 13.3         | 13.3         | 13.8         |
| Standard deviation        | 4.7         | 3.8          | 3.8          | 3.0          |
| Minimum                   | 1.2         | 3.0          | 3.7          | 5.4          |
| Interquartile range (IQR) | 6.0         | 4.8          | 5.0          | 4.2          |
| Median                    | 13.7        | 13.9         | 13.6         | 13.9         |
| Maximum                   | 22.5        | 20.1         | 20.0         | 20.1         |
| Range                     | 21.3        | 17.0         | 16.3         | 14.7         |

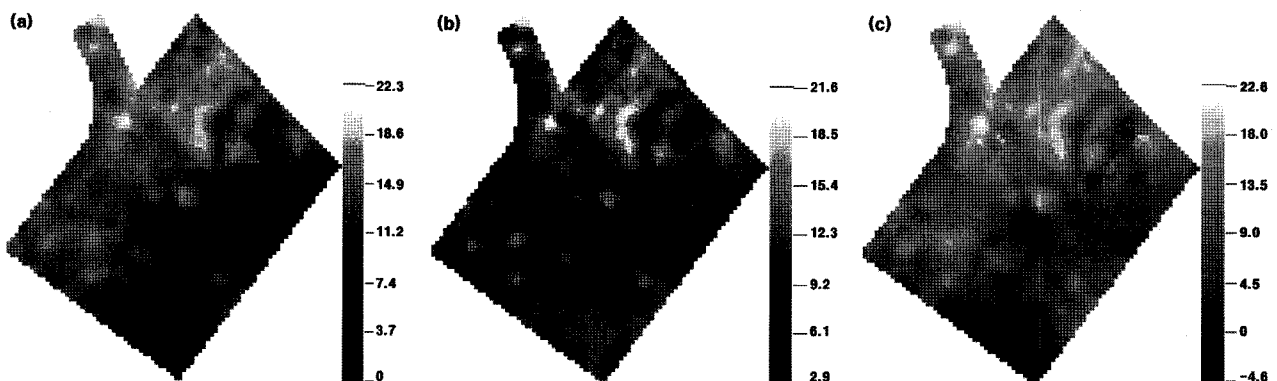


그림 6. 크리깅을 기법을 이용한 압밀층 두께 추정결과(단위, m): (a) 정규크리깅(OK), (b) 단순크리깅(SK), (c) 일반크리깅(KT)

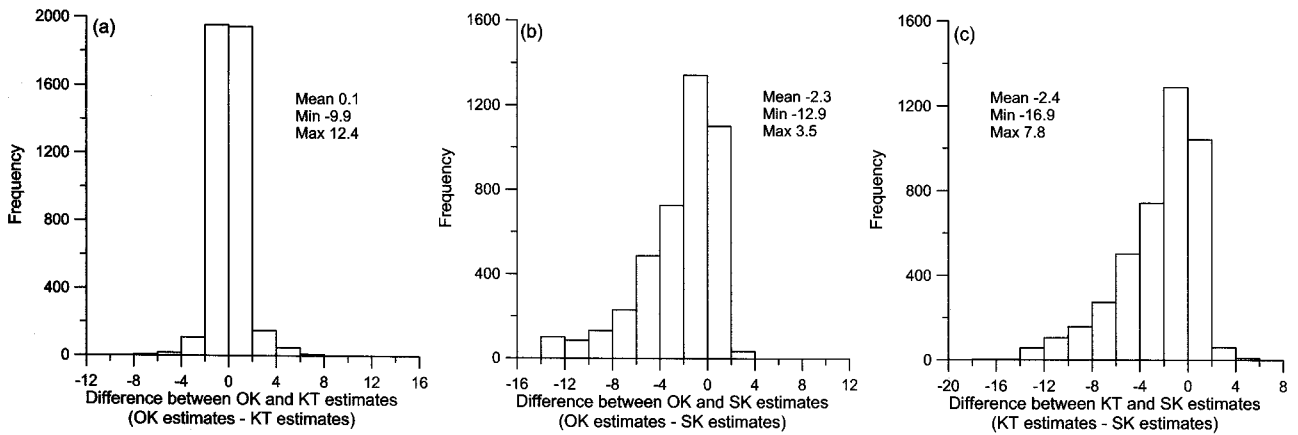


그림 7. 추정결과 차이의 통계량: (a) 정규크리깅과 일반크리깅 추정결과 차이, (b) 정규크리깅과 단순크리깅 추정결과 차이, (c) 일반크리깅과 단순크리깅 추정결과 차이

는 위치는 총 추정위치 4,245개소 중 28곳으로 나타났으며, 2개소를 제외한 모든 위치가 시추조사자료의 밀도가 가장 낮은 4공구에 집중되어 있다. 일반크리깅에서 음의 값을 보이는 위치를 제외하면 정규크리깅의 분포와 유사한 것으로 나타났다. 이와 같이 일반크리깅과 정규크리깅이 유사한 결과를 보이는 것은 정규크리깅이 추정하고자 하는 위치에 인접한 유한개의 자료를 미지 값 추정에 사용하여 분석영역 내에서 국부적으로 변하는 자료특성, 즉 경향성을 고려하기 때문으로 판단된다.

본 논문에서는 크리깅 기법들에 따른 추정결과와 특성을 비교 분석하기 위하여 각각의 크리깅 기법으로 추정된 값들의 차를 이용하였으며, 추정결과 차이의 통계량은 그림 7과 같다. 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 정규크리깅과 일반크리깅 추정결과와의 96%가  $\pm 2.0\text{m}$  이내의 오차를 보이고 있다. 정규크리깅과 단순크리깅, 일반크리깅과 단순크리깅 추정결과 차이를 그림 7(b), (c)에 나타냈으며, 1, 3공구는 크리깅기법에 따른 차이가 0에 가까우므로 추정결과가 유사하나 2, 4공구의 일부 구간에서는 그 차이가 5m 이상으로 추정결과와의 차이가 큰 것으로 나타났다. 단순크리깅의 경우 추정하고자 하는 위치와 측정자료의 거리가 많이 떨어져 있는 위치들의 추정값으로 압밀층 평균 두께인 12.9m에 가까운 값을 추정한 반면에 정규크리깅과 일반크리깅은 그림 8에서 볼 수 있듯이 대부분 9.0m 이하의 값들을 이용하여 미조사 구간의 압밀층 두께를 추정하므로 압밀층 평균 두께인 12.9m 보다 작은 값을 추정하게 된다. 따라서 2, 4공구의 미조사 구간은 단순크리깅의 추정결과가 정규크리깅과 일반크리깅의 추정결과보다 크게 된다.

이와 같이 크리깅 기법에 따라서 추정결과와의 분포가

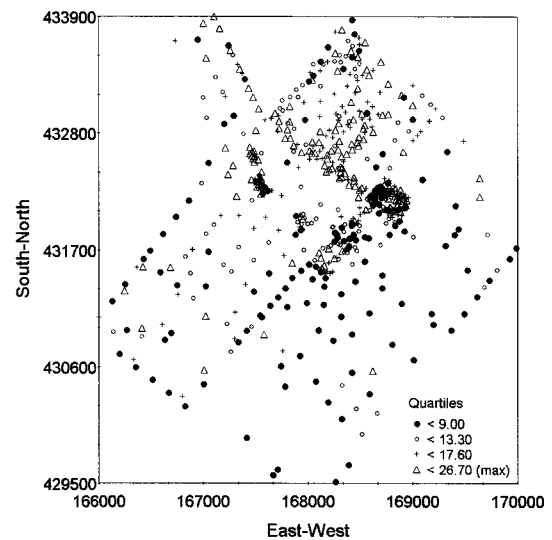


그림 8. 분석에 사용한 압밀층 두께의 분포(symbol plot)

상이한 것으로 나타났다. 즉, 단순크리깅은 추정하고자 하는 위치와 측정자료의 위치가 상관거리 이상 많이 떨어져 있는 구간들에서 분석영역 전체 자료의 평균에 가까운 값을 추정하는 경향을 보였다. 일반크리깅은 미지 값을 추정할 때 주위자료들의 공간적 경향성 분석결과를 사용하게 되며, 자료가 없는 일부 구역에서 압밀층 두께를 음의 값으로 추정하는 경우가 발생되었다. 이와 같이 일반크리깅은 추정위치와 측정자료의 위치가 많이 떨어져 있는 구간에서 분석자료의 일반적인 범위에서 크게 벗어나는 값을 추정할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 정규크리깅의 경우에는 추정하고자 하는 위치에 인접한 국부적인 영역의 자료를 이용하므로 일반크리깅과 같이 분석자료의 국부적인 자료특성을 고려할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 추정하고자 하는 위치와 조사자료의 위치가 많이 떨어져 있는 구간들에서

는 추정에 사용한 자료 범위 내의 값을 추정하게 되므로 일반크리깅에서와 같이 일반적인 범위에서 벗어나는 자료를 추정하지는 않는 것으로 나타났다. 결론적으로 압밀층 두께를 추정하기 위한 가장 적절한 크리깅기법은 잭나이프 검증결과 가장 신뢰성이 높았으며, 추정위치에 가장 인접한 자료를 이용하여 물리적으로 합당한 추정범위 내에서의 압밀층 두께를 제공한 정규크리깅기법인 것으로 판단된다.

## 6. 결론

크리깅기법은 지반공학분야에서 지층 또는 지반정수의 공간적 분포 추정을 위하여 적용되고 있으며, 가장 많이 사용되는 크리깅기법으로는 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅 등이 있다. 각각의 크리깅기법에 따라서 추정결과가 다르기 때문에 설계자의 추정목적에 부합하고 현장 자료분포특성을 적절히 반영하는 크리깅기법 선택은 매우 중요한 문제이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 크리깅 방법을 사용하여 인천 송도국제도시의 압밀층 두께를 추정하였으며, 크리깅 기법에 따른 추정 결과의 신뢰성 및 특징을 분석하였다.

본 논문에서는 각각의 크리깅기법에 의한 압밀층 두께 추정결과를 잭나이프 방법을 이용하여 검증하였으며, 정규크리깅과 일반크리깅이 단순크리깅에 비하여 추정결과와 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 일반크리깅의 경우에는 추정위치와 측정위치가 많이 떨어진 일부 영역에서 압밀층 두께를 음의 값으로 추정하는 것으로 나타났다. 따라서 일반크리깅은 추정위치와 측정자료의 위치가 많이 떨어져 있는 구간에서 분석자료의 일반적인 범위에서 크게 벗어나는 값을 추정할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 측정자료 위치와 멀리 떨어져 있는 위치에서의 값을 추정할 때 단순크리깅은 전체평균에 가까운 값을 추정하며, 정규크리깅은 추정위치에 인접한 값들의 평균에 가까운 값을 추정하는 특징이 있는 것으로 나타났다. 이러한 특성으로 인하여 본 논문에서는 단순크리깅이 정규크리깅과 일반크리깅에 비하여 측정자료와 멀리 떨어진 위치에서의 압밀층 두께를 크게 추정하는 것으로 분석되었다.

압밀층 두께를 추정하기 위한 가장 적절한 크리깅기

법은 잭나이프 검증결과 가장 신뢰성이 높았으며, 추정 위치에 가장 인접한 자료를 이용하여 물리적으로 합당한 추정범위 내에서의 압밀층 두께를 추정한 정규크리깅기법인 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. 김동휘, 류동우, 최영민, 이우진 (2010), “인천 송도지역 지층분포 추정을 위한 크리깅과 역거리가중치법의 적용”, *한국지반공학회논문집*, 제26권 1호, pp.5-19.
2. 선창국 (2009), “공간 GIS 기반의 지반 정보 시스템 구축을 통한 대전 지역의 부지 응답에 따른 지진재해 구역화”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 1호, pp.5-19.
3. 윤길립, 이강운, 채영수, 유광호 (2005), “지구통계학 크리깅 기법을 이용한 연약지반의 불확실성 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 3호, pp.5-17.
4. 천성호, 선창국, 정충기 (2005), “지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용”, *대한토목학회 논문집*, 제25권, 제2C호, pp.103-115.
5. 최종근 (2007), *지구통계학*, 시그마프레스, 서울.
6. 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.
7. Cressie, N. A. C. (1991), *Statistics for Spatial data*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
8. Goovaerts, P. (1997), *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York.
9. Goovaerts, P. (1999), “Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives”, *Geoderma*, 89, pp.1-45.
10. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989), *Applied geostatistics*, Oxford University Press, New York.
11. Journel, A. G., and Huijbergt, C. J. (1978), *Mining geostatistics*: Academic Press, London.
12. 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.
13. Santra, P., Chopra, U. K., and Chakraborty, D. (2008), “Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in agricultural farm”, *Current science*, Vol.95, No.7, pp.937-945.
14. Soulie, M., Montes, P., and Silvestri, V. (1990), “Modelling spatial variability of soil parameters”, *Canadian Geotechnical Journal*, 27(5), pp.617-630.

(접수일자 2009. 12. 01, 심사완료일 2010. 5. 21)