

지구통계학을 이용한 송도연약지반의 공간적 변화특성 분석 Characterizing Spatial Variability of a Soft Ground of Songdo by Geostatistics

김동휘¹⁾, Dong-Hee Kim, 고성권²⁾, Seong-Kwon, Ko, 박종익³⁾, Jong-Ik Park, 박정규⁴⁾, Jung-Gyu Park, 이우진⁵⁾, Woojin Lee

- ¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University
- ²⁾ 포스코건설 송도사업본부 상품설계그룹 대리, Assistant manager, Design Group, Songdo Business Division, POSCO E&C
- ³⁾ 포스코건설 송도사업본부 기술그룹 차장, Deputy General Manager, CM & Eng. Group, Songdo Business Division, POSCO E&C
- ⁴⁾ (주)유신코퍼레이션 지반터널1부 차장, Senior Engineer, Geotechnical & tunnel Engineering Division, Yoosin Engineering Corporation
- ⁵⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

SYNOPSIS : In this study, the spatial distribution of depth between alluvial soil and weathered soil of Song-do new city is analyzed using geostatistics. From analysis results, the boundary depth of north-east region is deeper than that of south-west region, and average depth of north-east region is 27.14m and average depth of south-west region is 23.25m. The boundary depth is estimated by ordinary kriging and inverse distance method, and estimated results are almost similarity. So, in Song-do new city, these two method can be used to estimate the boundary depth. The ordinary kriging method is a very useful tool because the more exact analysis of spatial continuity and distribution characteristic is possible.

Key words : Cross validation, Geostatistics, Kriging, Spatial variability, Variogram

1. 서론

지층과 지반특성치는 퇴적기원 및 이력, 지형의 변화 등에 의해 공간적 변동성(spatial variability)을 보인다. 지반의 변동성은 제방, 말뚝기초 등의 설계에 큰 영향을 미치므로 적절하게 정량화하는 것은 매우 중요하다. 이러한 변동성을 분석하기 위하여 자료의 분산뿐만 아니라 자료의 공간적 의존성을 정량화할 수 있는 크리깅(kriging) 기법을 사용할 수 있다(Chiasson 등, 1994). 크리깅은 위치를 정확하게 알고 있는 곳에서 측정된 주위값들의 가중선형조합을 이용하여 측정값이 없는 위치에서의 값을 적절하게 예측하는 방법이다. 크리깅 기법 개념은 광산학자인 Krige에 의해 처음으로 언급되었으며, 1960년대 초 프랑스의 지질학자 Matheron(1963)에 의해 이론적 수식이 제시되었다. 이러한 크리깅 기법은 현재 광산분야 뿐만 아니라 공간적으로 분포하는 자료 분석과 그 분포특성을 이용한 미지값의 예측을 필요로 하는 지질학, 기상학, 환경공학, 수자원 공학 등에서 사용되고 있다. 그러나 지반공학 분야에서는 지구통계학, 즉 크리깅 기법은 광산분야에만 적용될 수 있는 기법이라고 간주되고 있을 뿐만 아니라 이해하기

어렵다는 선입견 때문에 많이 사용되고 있지 못하다(Kulkarni, 1983). 국내 지반공학 분야에서는 윤길림 등(2005)이 정규크리깅(ordinary kriging)을 이용하여 동남해안의 2km×1.8km 영역에 분포하는 점토층의 두께, 비배수전단강도, 콘계수 N_k 의 공간적 분포를 분석하였으며, 그 결과를 토대로 크리깅 기법은 지반공학분야에 유용하게 사용할 수 있다고 하였다. 천성호 등(2005)도 정규크리깅 및 교차검증(cross validation)을 이용하여 서울지역의 지층분포를 지층경계면 고도 및 지층 두께를 이용하여 추정하였다. 크리깅 기법은 미시추구간의 지층분포 추정뿐만 아니라 공간적인 지반특성치의 변화를 추정하기 위하여 많이 사용되고 있다. Soulie 등(1990)은 베인시험의 비배수전단강도를 이용하여 단순크리깅(simple kriging)을 통해 미조사구간의 비배수전단강도와 비배수전단강도가 25kPa 이하일 확률이 20% 이상인 연약한 구간을 추정하였다. Chiasson 등(1994)은 CPT와 베인시험을 이용하여 측정한 비배수전단강도는 심도에 따라서 증가하는 경향을 보이는 변동성 문제(nonstationary problem)이므로 자기상관함수(autocorrelation function)는 일반화된 공분산(generalized covariance)을 이용하여 추정되어야 한다고 하였다. 이러한 방법을 이용하여 CPT와 베인시험으로 측정한 비배수전단강도의 증가경향을 나타내는 직선의 기울기와 절편을 결정하였으며, 그 결과를 기울기와 절편좌표 공간에 표시하여 공간적 변동성을 분석하였다(Chiasson 등, 1994). Parsons와 Frost(2002)는 지표크리깅(indicator kriging)을 이용하여 생성한 확률값(probability values)을 바탕으로 Treasure Island 전체 영역에 대한 액상화 발생확률 분포도 등을 제시하였다. Sitharam(2007)은 분리크리깅(disjunctive kriging)과 조건부 확률을 이용하여 SPT N값의 공간적 분포의 불확실성을 분석하였다. 이와 같이 최근에는 지표크리깅 등의 조건부 시뮬레이션(conditional simulation)을 이용하여 추정값의 불확실성을 예측하고자 하는 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 크리깅 기법을 이용하여 송도 000공사현장의 연약지반 심도의 공간적 분포경향을 예측하고자 한다. 또한, 크리깅 기법과 역거리가중치법(inverse distance method)을 크리깅 기법의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 지구통계학적 기법

2.1 자료의 공간적 분포특성 분석

주어진 자료들을 이용하여 미지값을 예측하기 위해서는 분석영역 자료들의 공간적 변동성(spatial variability)과 연속성(continuity)의 구조를 파악해야 한다. 지구통계학에서는 이러한 자료들의 공간적 상호관계를 분석하기 위하여 상관계수(correlation coefficient), 공분산(covariance), 매도그램(madogram), 베리오그램(variogram) 등이 사용된다. 이 중 베리오그램은 크리깅 방정식에 직접적으로 사용되는 공분산을 구하는데 사용되는 매우 중요한 척도이다. 공간정보를 분석하고 그 상관관계를 이용하여 자료가 알려져 있지 않은 지점에서 자료를 예측하기 위한 많은 지구통계학적 기법은 불변성 가정을 전제로 하고 있다. 불변성(stationarity)이란 값 자체가 변화하지 않는다는 의미가 아니라 자료의 분포가 위치에 따라 변화하지 않는 것을 의미한다. 강한 불변성이란 위치에 따라 확률함수의 분포가 변화하지 않는다는 뜻이고 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(z_1, z_2, \dots, z_n; x_1, x_2, \dots, x_n) = f(z_1, z_2, \dots, z_n; x_1 + c, x_2 + c, \dots, x_n + c) \quad (1)$$

그러나 우리가 실제로 사용하는 대부분의 자료는 식 (1)의 강한 불변성을 만족하지 않는다. 따라서 약한 불변성(weak stationarity)을 가정하게 되며 이는 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Cov[z(x), z(x+h)] = f(h) \quad (2)$$

$$E[z(x)] = \mu \quad (3)$$

식 (2)는 공분산(자기공분산)이 존재하며 이는 분리거리 h에 대한 함수임을 의미한다. 즉, 공분산은 주

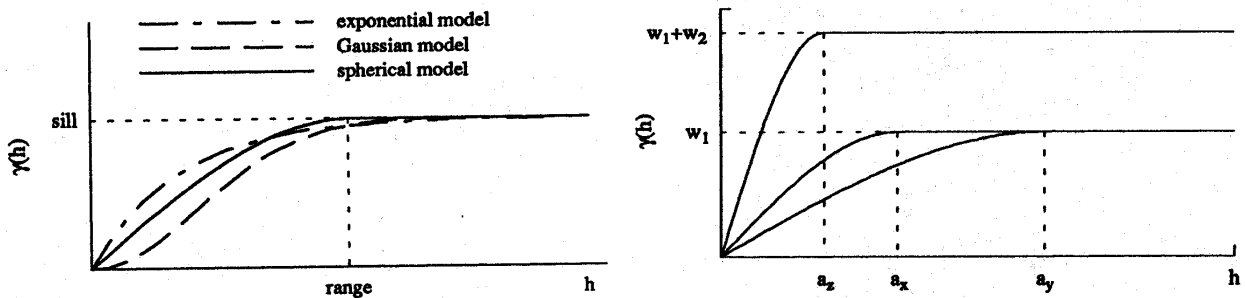
어진 자료들이 떨어져 있는 거리에 따라 변화될 뿐 자료의 절대위치에 따라 변화하지 않는다는 것을 의미한다. 식 (3)은 자료의 평균은 위치에 무관하게 상수로 일정하다는 것을 의미한다. 이러한 약한 불변성을 이용하여 베리오그램 식을 유도하게 된다. 베리오그램(variogram)은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 식 (4)과 같이 정의된다.

$$2\gamma(h) = E[\{z(x) - z(x+h)\}^2] \quad (4)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (5)$$

여기서, $2\gamma(h)$ 는 베리오그램, $\gamma(h)$ 는 반베리오그램(semivariogram), h 는 지연거리(lag distance) 또는 분리거리(separation distance), n 은 자료 쌍의 개수, $z(x)$ 는 임의의 위치 x 에서의 자료값을 의미한다. 지구통계학에서는 계산의 편의성을 위해 전통적으로 반베리오그램을 사용하며 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. 위의 식에서 볼 수 있듯이 베리오그램은 거리 h 만큼 이격된 두 자료들간의 차이를 제공한 것의 기대값(expected value)으로 거리가 가까우면 그 값들이 유사할 것이므로 베리오그램은 일반적으로 작고 거리가 멀어질수록 크게 나타난다. 또한, 식 (5)에서 유추할 수 있듯이 기울기가 1인 직선으로부터 떨어진 거리의 제곱 평균값이 반베리오그램이 되므로 반베리오그램이 크다는 것은 기울기 1인 직선으로부터 멀어지므로 두 값의 상관성이 저하됨을 의미한다. 이러한 성질의 베리오그램을 이용하여 이격거리에 따른 자료들의 관계를 분석하여 분석영역의 공간적 자료분포 구조를 파악한 후 미조사구간의 자료값을 추정하는데 활용할 수 있다.

크리깅을 이용하여 격자망의 자료값을 예측하기 위해서는 모든 분리거리 h 에 대한 베리오그램 $\gamma(h)$ 가 필요하며, 이것을 구하기 위해서는 주어진 자료로부터 계산된 샘플 또는 실험적 베리오그램(sample or experimental variogram)을 가장 잘 대표하는 베리오그램 모델(variogram model)을 결정해야 한다. 베리오그램 모델은 베리오그램이 분리거리 h 가 증가함에 따라 상관거리(range)에서 문턱값(sill)에 도달하는 모델과 그렇지 않은 모델로 구분된다. 전자를 전이모델(transition model)이라고 하며, 너깃모델(nugget model), 구형모델(spherical model), 지수모델(exponential model), 가우스모델(gaussian model) 등이 이에 해당되며 베리오그램 모델로 가장 많이 사용된다(Isaaks와 Srivastava, 1989). 베리오그램 모델은 앞에서 언급한 모델들을 독립적으로 사용할 뿐만 아니라 조합하여 사용하기도 하며, 샘플 베리오그램을 정확하게 나타내는 모델이 아니라 공간적인 자료의 구조를 적절하게 표현해 줄 수 있는 모델을 선택하는 것이 매우 중요하다. 동일한 상관거리(range)와 문턱값(sill)을 갖는 구형모델, 지수모델, 가우스모델을 나타내면 그림 1(a)와 같다. 지반의 베리오그램은 방향에 따라서 상이할 수 있으며, 이러한 경우에는 방향에 따른 베리오그램을 선정하여 지반의 공간적인 이방성을 적절하게 나타내야 한다. 그림 1(b)는 x , y 방향으로는 동일한 문턱값 w_1 을 가지나 상관거리는 각각 a_x , a_y 로 상이하며, z 방향은 x , y 방향과 다른 문턱값과 상관거리를 보이므로 이방성 베리오그램 모델을 사용하여 자료의 공간적인 특성을 분석해야 한다.



(a) 베리오그램 모델 (b) 이방성 베리오그램
 그림 1. 베리오그램 모델과 이방성 베리오그램(Isaaks와 Srivastava, 1989)

2.2 자료값의 예측

분석 대상 지역의 지반특성치를 위치와 깊이별로 추정할 경우 구조물의 중요성과 사업비용에 따라서 설계를 할 수 있는 최소한의 수량만이 계획되고 있다. 따라서 임의의 기지값으로부터 미지의 값을 추정할 경우 Interpolation과 Extrapolation 기법을 사용하여 추정하는 방법이 일반적으로 많이 사용된다. 그러나 이러한 방법들은 기지 자료 상호간의 연관성과 경향성 등을 수학적 또는 통계적으로 표현하는데 한계가 있다. 반면에 크리깅 기법은 수학적 방법과 통계학적 방법을 통하여 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(ordinary kriging), 구역크리깅(block kriging), 일반크리깅(universal kriging), 지표크리깅(indicator kriging) 등의 크리깅 기법 중 공간적 자료분포 특성을 적절하게 반영하여 미지값을 예측할 수 있는 크리깅 기법의 선택은 매우 중요하다. 크리깅은 관심있는 지점에서 특성값을 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위값들의 선형조합으로 식 (6)과 같이 미지값을 예측할 수 있으며, 오차분산식은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\hat{z}(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (6)$$

$$\sigma_{OK}^2 = E\left[\{z(x_o) - \hat{z}(x_o)\}^2\right] \quad (7)$$

여기서, $\hat{z}(x_o)$ 는 위치가 알려진 x_o 지점에서의 예측값, $z(x_i)$ 는 위치 x_i 에서의 기지의 자료값, w_i 는 기지의 자료값 $z(x_i)$ 의 가중치, σ_{OK}^2 은 정규크리깅의 오차분산, n 은 크리깅 예측을 위하여 사용한 총 자료수이다. 본 연구에서 사용한 정규크리깅은 가중치 결정을 위해서 예측값과 참값 사이의 오차가 최소가 되도록 하며 추정값이 편향되지 않아야(unbiased) 한다는 조건을 추가로 사용한다. 편향(bias)은 식 (8)과 같이 모집단의 인자 평균과 그 모집단의 인자를 예측하기 위한 추정식의 평균의 차이로 정의되고 그 차이가 없을 때 편향되지 않았다고 한다. 또한, 식 (8)의 불편향조건을 만족시키기 위해서는 식 (9)와 같이 가중치의 합이 1이 되어야 한다.

$$b_z = E(z) - E(\hat{z}) = E(z) - E\left(\sum_{i=1}^n w_i z_i\right) = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (9)$$

정규크리깅은 식 (9)의 제약조건 하에서 식 (7)로 주어진 오차분산을 최소화하는 가중치를 구하고, 이들 가중치를 이용하여 알려진 값들의 선형조합으로 미지값을 예측하는 기법이다. 이를 식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$\text{Minimize } \sigma_{OK}^2 = \sigma^2 - \text{Var}(z(x_o)) - 2\text{Cov}(z(x_o) - \hat{z}(x_o)) + \text{Var}(\hat{z}(x_o)) \quad (10)$$

$$\text{or } \sigma_{OK}^2 = \sigma^2 - 2\sum_{i=1}^n w_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \sigma_{ij}^2, \text{ where } \sigma_{ij}^2 = \text{Cov}(z_i, z_j)$$

$$\text{with a constraint } 1 - \sum_{i=1}^n w_i = 0$$

위의 문제를 라그랑제인자법(Lagrange parameter method)를 이용하여 풀면 정규크리깅의 크리깅방정

식을 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n w_i \sigma_{ij}^2 - \lambda = \sigma_{0l}^2, \quad l = 1, n \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

식 (11)을 이용하여 가중치 w 와 라그랑제 인자(Lagrange multiplier) λ 를 구하며, 구한 가중치 w 를 식 (6)에 대입하여 미지값을 예측할 수 있다. 이러한 방법은 정규크리깅 뿐만 아니라 모든 크리깅 기법에 적용되며, 기법에 따라서 단지 제약조건과 가중치를 고려하는 방법이 다를 뿐이다.

3. 연구지역 위치 및 지반특성

연구지역은 인천광역시 연수구 동춘동 송도국제도시 공사현장으로 인천광역시에서 경제자유구역(IFEZ)을 계획하고 해안을 따라 바다를 매립해서 조성한 부지이다. 본 논문에서는 송도국제도시 중 그림 2에서 볼 수 있듯이 1,200m×812m 영역을 분석대상 지반으로 선택하였다. 이 분석대상 영역에서는 총 164공의 시추를 수행한 것으로 조사되었다.



그림 2. 과업위치 및 분석 영역

검토지역의 지질은 기반암인 선캠브리아기 변성암과 이를 관입한 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암 및 화산암으로 구성되어 있으며, 상기 모든 층을 부정합으로 피복하고 있는 해성 퇴적층(충적층)과 매립층(실트질 모래)으로 구성되어 있다. 본 지역의 대표적인 지층현황은 다음 그림 3과 같으며, 상부로부터 매립층(두께 11.0m), 실트질 점토층(두께 18.0m), 모래층(두께 5.0m), 풍화토(두께 7.0m) 및 풍화암 순으로 분포하고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 검토구간 매립층의 N값은 약 10~21의 범위로 매우 느슨함 내지 보통 조밀한 상태이며, 위치에 따라서 10 이하의 N값을 보이고 있는 공간적으로 매우 불균질한 지반이다. 달라토메타시험(DMT)과 삼축압축시험으로 산정한 실트질 점토층의 비배수전단강도는 그림 5에서 볼 수 있듯이 약 1.58~4.85tf/m²로 조사되었다(김동휘 등, 2008). 송도의 연약지반은 순수한 점토지반이 아니라 실트 및 모래가 불규칙적으로 분포하고 있는 복잡한 특성을 보이고 있다. 이러한 실트 및 모래의 분포는 압밀시간을 단축시키는 역할을 할 수 있으며 비배수전단강도 및 변형특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 실트 및 모래가 포함된 연약지반은 도로설계, 가시설, 앵커 등의 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되므로 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

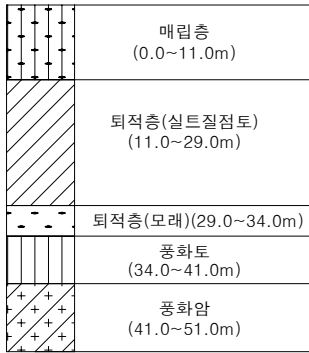
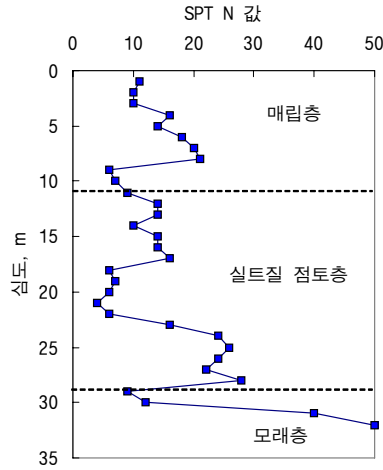


그림 3. 지층분포 현황 그림



4. 지층별 N값 분포현황

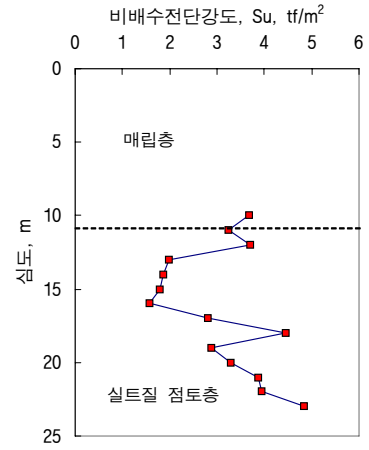
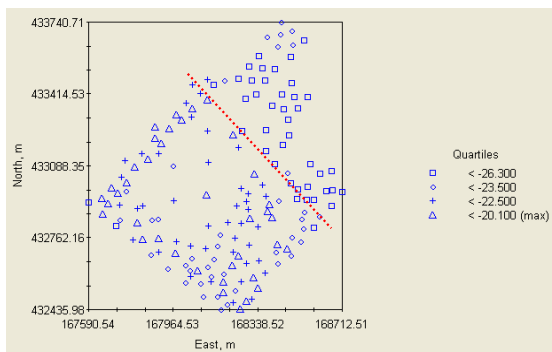


그림 5. 점토층의 비배수전단강도

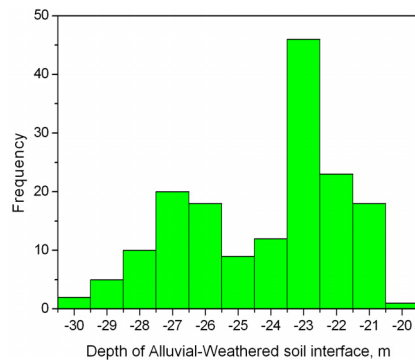
4. 분석결과

4.1 층적층-풍화토 경계심도의 공간적 연속성 분석

전술한 바와 같이 송도지역의 지반은 층적층 하부에 풍화토 또는 풍화암이 위치하고 있다. 본 절에서는 연약지반처리 및 말뚝기초시공 심도에 큰 영향을 미치는 층적층과 풍화토 경계심도의 공간적 분포특성을 베리오그램을 이용하여 분석하고자 한다. 이러한 분석을 수행하기 위해서는 우선 사용할 자료들의 개략적인 공간적 분포특성을 파악하는 과정이 필요하며, 본 연구에서는 1차적으로 심볼맵(symbol maps)을 이용하여 총 164개의 자료를 분석하였다. 그림 6(a)의 점들은 시추조사를 통해 층적층과 풍화토 경계심도를 알고 있는 위치를 의미하며 심볼맵을 이용하여 층적층과 풍화토 경계심도의 공간적 분포를 대략적으로 파악할 수 있다. 그림 6(a)는 경계심도를 4개의 범위로 구분하여 표시한 것으로 북동쪽은 경계심도가 대부분 E.L.-26.3m 이하로 깊으며 남서쪽과 서쪽은 경계심도가 대부분 E.L.-22.5~ -20.1m 의 범위로 얕은 것을 관찰 할 수 있다. 또한 점선을 경계로 경계심도가 급격하게 변하고 있으며 지도의 중앙부에는 조사자료의 밀도가 다른 구간에 비하여 상대적으로 낮은 것을 관찰 수 있다. 층적층과 풍화토 경계심도의 분포를 히스토그램(histogram)으로 나타내면 그림 6(b)와 같으며, 경계심도는 두 개의 그룹으로 구분됨을 히스토그램 모양으로 추정할 수 있다. 이는 그림 6(a)에서 점선을 경계로 깊은 경계심도와 낮은 경계심도로 구분되는 관찰결과와 일치한다. 북동쪽의 깊은 경계심도 그룹의 평균 경계심도는 -27.14m, 표준편차는 1.11m, 변동계수(coefficient of variation)는 0.041이며, 낮은 경계심도 그룹의 평균경계심도는 -23.25m, 표준편차는 1.77m, 변동계수는 0.076으로 분석되었다.



(a) 심볼맵을 이용한 분석



(b) 경계심도 히스토그램

그림 6. 층적층과 풍화토의 경계심도 분포 특성

지구통계학 분야에서 자료의 공간적 분포특성을 개략적으로 판단하기 위하여 베리오그램 면 (variogram surface)을 많이 사용한다. 베리오그램 면을 생성시키기 위하여 분리거리와 lag의 수는 각각 100m와 7개를 사용하였다. 경계심도자료의 베리오그램 면은 그림 7과 같으며 120° 방향으로 유사한 값을 갖는 자료들이 분포하는 경향을 보이고 30° 방향으로는 값의 변화가 큰 것으로 나타났다. 그림 6(a)의 구역경계선의 직각방향으로 경계심도가 급격하게 변하는 특성이 베리오그램 면에 반영된 것으로 판단된다.

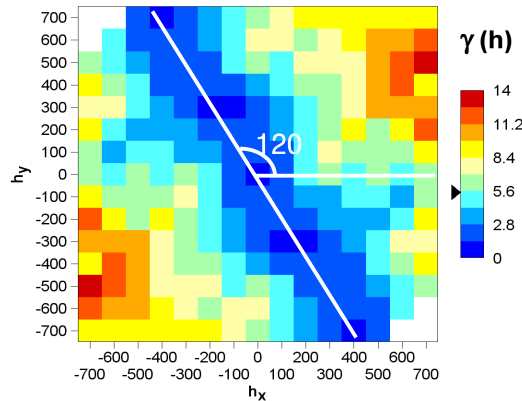


그림 7. 베리오그램 면(variogram surface)

지구통계학에서는 h-scatterplot를 이용하여 공간적 연속성(spatial continuity)의 개념을 쉽게 파악할 수 있어 많이 사용하고 있다. 일반적으로 분리거리 h 가 작을 경우에는 두 자료값이 인접한 위치에 있으므로 자료 값이 서로 유사할 것이며, 반면에 이격거리 h 가 클 경우에는 두 값의 유사성이 적어 자료값의 차이가 클 가능성이 높다. 이러한 특징을 h-scatterplot를 이용하여 확인할 수 있으며, 어느 정도의 분리거리 h 까지 자료들이 유사한 값을 보이는 가를 분석할 수 있다. h-scatterplot를 작성하기 위해서는 베리오그램을 우선 계산해야 한다. 일반적인 자료는 방향에 따라서 분포특성이 다르므로 등방성 베리오그램을 이용하면 방향성을 지닌 자료의 특징을 잘 묘사할 수 없다. 따라서 이러한 경우에는 이방성 베리오그램을 산정하여 공간적 연속성을 분석해야 한다. 우선 이방성 베리오그램을 계산하기 위해서는 그림 8과 같이 방향각을 결정해야 한다. 전통적으로 수평에서 45°씩 증가시켜 즉, 0, 45, 90, 135° 방향으로 방향성 베리오그램을 계산한다. 이때 각 방향에 대하여 각도 증가분의 반인 $\pm 22.5^\circ$ 의 허용한계를 두며 분리거리 h 에 대해서도 허용한계 Δh 를 사용한 완화거리를 사용한다. 이와 같이 방향과 분리거리에 대하여 허용한계를 두는 이유는 베리오그램을 계산하는 자료수를 충분히 확보하여 안정된 베리오그램을 계산하기 위해서이다. 분리거리가 증가함에 따라 완화각도의 영향이 증가하므로 일정한 밴드폭 (bandwidth)을 지정하여 그 계산영역이 너무 커지는 것을 방지한다(최종근, 2007).

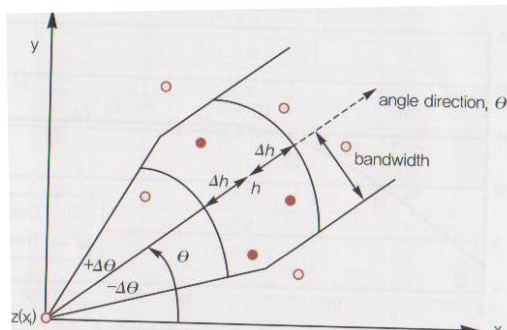


그림 8. 이방성 베리오그램 계산 방법(최종근, 2007)

다음 그림 9(a)는 층적층과 풍화토의 경계심도에 대한 자료를 이용하여 산정한 등방성 베리오그램이며, 그림 9(a), 9(b)는 120, 165° 방향에 대하여 계산한 방향성 베리오그램이다.

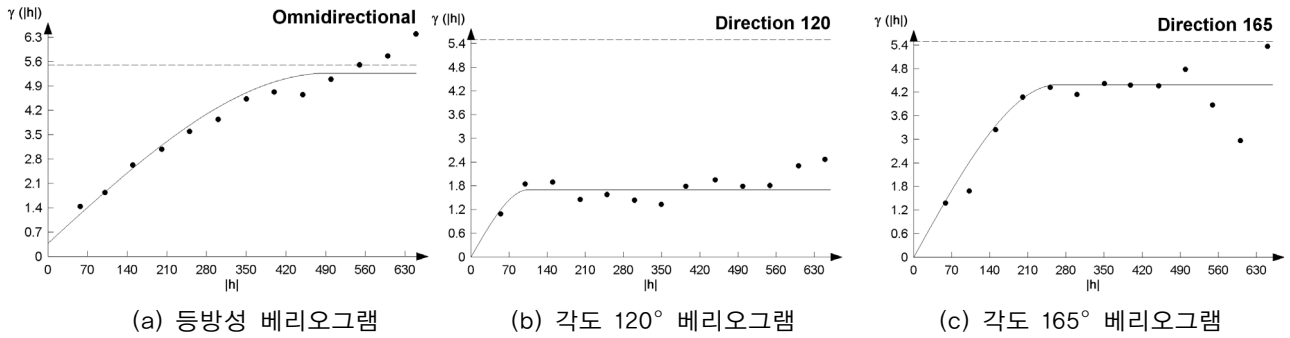


그림 9. 방향에 따른 베리오그램 계산 결과

전술한 바와 같이 분리거리 h 가 작다는 것은 두 자료가 인접해 있다는 것을 의미한다. 그림 10(a)는 165° 방향의 분리거리 59.34m의 h -scatterplot으로 대부분의 자료 값이 두 값이 일치하는 기울기 1인 점선 주위에 분포하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 그림 10(b)의 자료분포는 두 값이 일치하는 기울기 1인 점선 주위에 분포하기 보다는 특정한 규칙 없이 분포하고 있어 분리거리 151.18m의 자료들은 분리거리 59.34m의 자료들보다 상관성이 적음을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 분리거리 h 가 작을수록 본 연구지역의 자료들은 상관성이 높음을 의미한다.

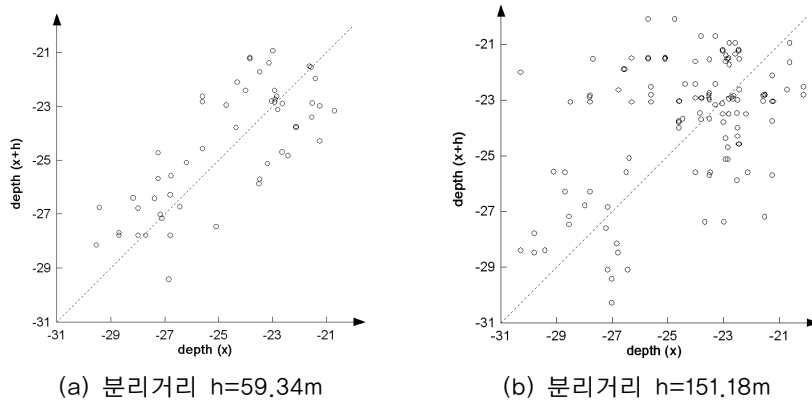


그림 10. 분리거리에 따른 h -scatterplot

4.2 지층분포 추정

그림 9와 같이 계산한 베리오그램을 실험적 베리오그램이라고 하며, 이를 이용하여 크리깅 기법에 사용할 이론적 베리오그램을 모델링해야 한다. 이론적 베리오그램은 실험적 베리오그램을 정확하게 모델링하기 위한 것이 아니라 자료 값의 공간적인 분포를 효과적으로 나타내주는 것을 선택해야 함에 유의해야 한다. 본 연구에서는 미조사구간의 자료값을 예측하기 위하여 그림 9(a)의 등방성베리오그램을 사용하였다. 베리오그램 모델은 구형모델의 관계를 보이며, 상관거리는 494m, 문턱값은 4.9로 나타났다.

본 연구에서는 미조사 구간의 충적층과 풍화토 경계심도를 예측하기 위하여 정규크리깅을 이용하였다. 크리깅을 이용하여 경계심도를 예측한 결과는 그림 11과 같으며, 북동쪽은 충적층의 심도가 깊은 반면에 남서쪽은 상대적으로 심도가 낮은 것으로 예측되었다. 북동쪽이 육지와 인접함에도 불구하고 충적층의 심도가 깊은 것으로 예측되었는데 과거 지형, 퇴적물질 등을 분석하여 그 이유를 밝히는 것이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 크리깅으로 예측한 값의 오차를 분석하기 위하여 교차검증(cross validation)을 수행하였다. 교차검증은 실제로 알고 있는 값을 고의로 누락시킨 후 크리깅 기법으로 그 위치에서의 값을 예측하여 실제값과의 차이를 분석하여 예측결과의 오차를 계산하는 방법이다. 교차검증은 추정된 자료를 검증하는데 효과적인 방법이지만 기지의 자료들이 국부적으로 분포할 경우에는 분석영역 전체에 대한 오차 분석이라기 보다는 자료가 집중되어 있는 곳의 오차분석이라는 것에 유의해야 한다. 또한, 교차검증결과는 단지 알고 있는 자료들에 대한 오차분석결과이지 추정된 값에 대한 오차분석결과는 아니라는 것에 유의해

야 한다. 그림 12와 같이 교차검증 수행결과 $\pm 5\%$ 이내의 오차가 85.4%를 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 국부적으로 얇은 심도 또는 깊은 심도를 보이는 위치에서의 값은 10% 이상의 예측오차를 보이는 것으로 나타났다. 이는 국부적으로 위치하는 자료를 정확하게 예측하는 것이 매우 어렵다는 것을 의미한다.

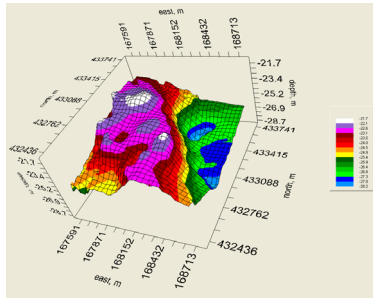
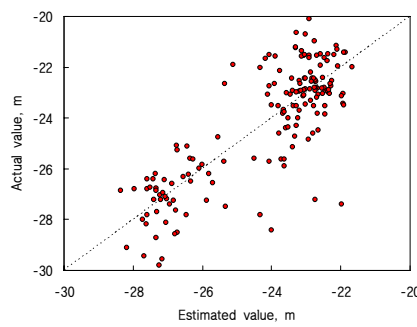
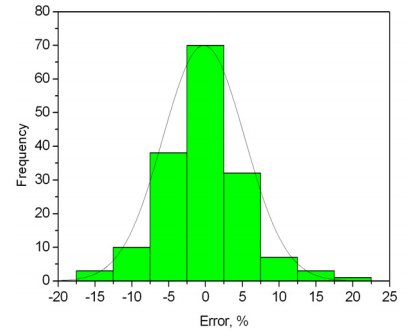


그림 11. 경계심도 분포(크리깅 기법)



(a) 예측값과 실제값의 비교



(b) 오차발생분포

그림 12. 크리깅기법의 교차검증 결과

베리오그램을 사용하지 않고 알려진 주위값들의 가중선형조합을 이용하여 새로운 값을 예측하는 많은 기법이 있으며, 다각형법, 삼각형법, 지역평균법, 역거리가중치법 등이 대표적인 방법이다. 지역평균법의 경우 영향반경 내에 존재하는 모든 자료값에 동일한 가중치를 부여하는 한계가 있어 이를 개선한 방법이 역거리가중치법이며, 그 가중치는 거리의 α 승에 반비례한다고 가정한다. 이것은 수학적 배경을 가진 것은 아니고 가까운 거리에 있는 자료값에 더 많은 가중치를 배당하는 논리이다. 역거리가중치법을 수식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i, \quad \lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^\alpha}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_j}\right)^\alpha} \quad (12)$$

여기서, d_i 는 예측점 x_0 와 자료점 x_i 사이의 거리이며, 일정한 완화거리를 더하여 사용할 수 있다. 식에서 α 가 0에 가까우면 역거리가중치법의 결과는 산술평균값이 되고, α 가 무한대로 커지면 다각형법의 추정결과와 같아진다. α 가 커질수록 가까운 점의 영향이 커지게 되며, 가까운 점의 영향이 지나치게 크게 나타나는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 층적층과 풍화토의 경계심도를 예측하기 위하여 크리깅 기법 뿐만 아니라 역거리가중치법을 사용하였다. 역거리가중치법으로 산정한 결과는 그림 13과 같으며, 크리깅 기법으로 예측한 결과와 매우 유사한 것으로 나타났다.

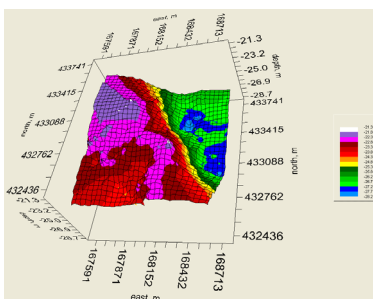
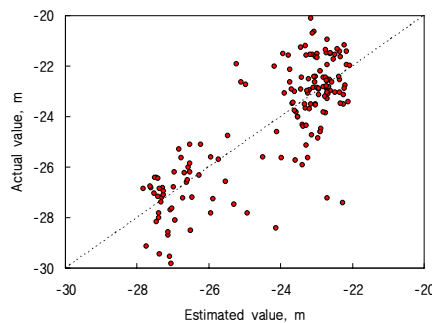
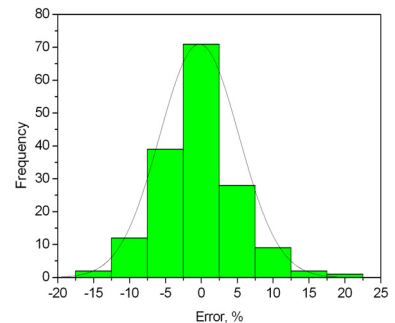


그림 13. 경계심도 분포(역거리가중치법)



(a) 예측값과 실제값의 비교



(b) 오차발생분포

그림 14. 역거리가중치법의 교차검증 결과

그림 12와 같이 교차검증 수행결과 $\pm 5\%$ 이내의 오차가 84.1%를 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 크리깅 기법을 이용한 예측결과와 유사하게 국부적으로 얕은 심도 또는 깊은 심도를 보이는 위치에서의 값은 10% 이상의 예측오차를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구대상 지역은 두 방법을 모두 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 크리깅 기법은 자료 값들의 공간적인 연속성 및 분포특징을 더 정확하게 파악할 수 있는 장점이 있으므로 그 활용도는 높을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 지구통계학을 이용하여 송도지역의 충적층과 풍화토 경계심도의 공간적 분포특징을 분석하였다. 또한, 크리깅기법과 역거리가중치법으로 미조사 구간의 경계심도를 추정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 충적층과 풍화토 경계심도를 분석한 결과 북동쪽이 남서쪽보다 심도가 깊은 것으로 나타났으며, 북동쪽의 경계심도 평균은 -27.14m , 남서쪽의 경계심도 평균은 -23.25m 으로 분석되었다.
- (2) 경계심도자료의 베리오그램 면 분석결과 수평면에서 120° 방향으로 유사한 값을 갖는 자료들이 분포하는 경향을 보이고 45° 방향으로는 값의 변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 구역경계선의 직각방향으로 경계심도가 급격하게 변하는 특성이 베리오그램 면에 반영된 것으로 판단된다.
- (3) 정규크리깅 기법과 역거리가중치법으로 산정한 미조사구간 예측결과는 유사한 것으로 나타났으며, 크리깅 기법을 이용하여 자료 값들의 공간적인 연속성 및 분포특징을 더 정확하게 파악할 수 있는 장점이 있으므로 그 활용도는 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김동휘, 홍성진, 민기훈, 이우진(2008), "CGS 시공으로 인한 지중연속벽체 거동에 관한 연구", 2008년 지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회.
2. 윤길립, 이강운, 채영수, 유광호(2005), "지구통계학 크리깅 기법을 이용한 연약지반의 불확실성 분석", 한국지반공학회 논문집, 제21권, 3호, pp.5-17.
3. 천성호, 선창국, 정충기(2005), "지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용", 대한토목학회 논문집, 제25권, 제2C호, pp.103-115.
4. 최종근(2007), 지구통계학, 시그마프레스, 서울, pp.150-151.
5. 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.
6. Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M.(1989), Applied geostatistics, Oxford University Press, N.Y., pp.369-399.
7. Kulkarni, R. B.(1983), "Bayesian kriging in geotechnical problems", In Geostatistics for natural resources characterization. Part 2. NATO ASI Series, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, pp.775-786.
8. Matheron, G.(1963), "Principles of Geostatistics", Economic Geology, Vol.58, pp.1246-1266.
9. Parsons, R. L.(2002), "Evaluating site investigation quality using GIS and geostatistics", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 6, pp.451-461.
10. 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.
11. Soulie, M., Montes, P., and Silvestri, V.(1990), "Modelling spatial variability of soil parameters", Canadian Geotechnical Journal, 27(5), pp.617-630.