

비균질성을 고려한 해성점토매립장의 수리전도도 추정과 오염이동특성

Prediction of Heterogeneous Hydraulic Conductivity and
Contaminant Transport for the Landfill on Marine Clay

장 연 수*1

Jang, Yeon-Soo

정 상 용*2

Cheong, Sang-Yong

Abstract

The heterogeneity of hydraulic conductivity of Metropolitan Waste Landfill is analyzed by using geostatistical methods and the contaminant transport analysis is performed by using heterogeneous hydraulic conductivity. The hydraulic conductivity data are obtained from laboratory pressurized permeability tests and the in-situ slug test. Geostatistical methods used in this analysis are Ordinary Kriging and conditional simulation. It is concluded that the heterogeneities of hydraulic conductivity obtained from conditional simulation are greater than those from Ordinary Kriging analysis. The movement of the contaminant on the hydraulic conductivity with greater heterogeneity obtained from conditional simulation is faster than that observed in Ordinary Kriging analysis.

요 지

지구 통계학적 방법을 이용하여 수도권 쓰레기 매립지 수리전도도의 비균질성에 대하여 분석하고 오염 이동해석을 실시하였다. 수리전도도는 가압 실내투수시험 자료와 현장 투수시험 자료를 이용하였고 지구통계학적 방법으로는 일반크리깅과 조건부 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 그 결과 조건부 시뮬레이션에 의한 수리전도도의 비균질성이 일반크리깅에 의한 것보다 크게 나타났다. 비균질성이 큰 조건부 시뮬레이션에 의하여 구해진 수리전도도 상의 오염물이동성이 일반크리깅에 의하여 구해진 수리전도도 상의 이동 결과 보다 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Geostatistical method, Contaminant transport, Heterogeneity, Kriging

*1 정희원, 동국대학교 토목공학과 조교수

*2 부산수산대학교 응용지질학과 부교수

1. 서론

지반을 통한 침출수 이동으로 인한 매립지 주변의 오염 가능성은 지반 자체 수리전도도의 비균질성에 의하여 높아진다고 한다(Freeze and Cherry, 1976). 이러한 지반 수리전도도의 비균질성을 파악하기 위해서는 많은 지점과 깊이에서 흙시료를 채취하여 실내투수시험을 수행하거나 주수시험, 패커 시험(packer test) 등 현장투수시험을 수행하여야 하나 많은 시간과 비용을 필요로 하게된다. 따라서 지하수 흐름이나 오염물 확산 정도의 해석을 위하여 많은 양의 수리전도도를 조사시험만으로 도출하는 것은 현실적으로 어려운 일이다.

지구통계학적방법(geostatistics method)은 광상의 품위, 지층의 두께, 해저 지형의 높이, 지하수위 분포 등의 추정에 널리 이용되는 방법으로 Matheron에 의하여 개발되었고 Kriging 이라고도 불리운다(Matheron, 1969). 현재는 표본 자료의 성격에 따라 Ordinary kriging, Universal kriging, Disjunctive kriging, Cokriging 등이 개발되어 있다(Journel and Huijbregts, 1978).

본 논문에서는 국내 해성점토 매립장 중 가장 큰 규모인 김포 수도권 매립장 제1공구 지반에서 샘플링한 자료를 이용 지구통계학 기법을 이용 분석하였다. 수리전도도의 비균질 분포해석에 사용된 지구통계학 기법은 일반 크리깅(ordinary kriging)과 조건부 시뮬레이션(conditional simulation)의 2가지 기법을 이용하였는데 후자의 방법이 지반의 비균질성을 보다 면밀하게 보여 줄 수 있는 방법으로 알려져 있다. 오염물이동 해석은 위의 2가지 비균질 해석 방법에 의하여 구해진 수리전도도 수직단면 분포에 대하여 행하여졌으며 각 비균질 해석 방법에 따른 오염물 이동 정도를 분석하였다. 또한 제1공구에서 수행한 수리전도도가 실내 실험 자료인 관계로 현장값 보다 작은 값을 보이므로 동일 매립지 제3공구의 현장 slug test 시험 자료를 참조 하여 실내실험 자료의 값을 10배와 100배로 늘린 수리전도도 분포로부터 오염물 이동특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

본 논문 수리전도도 분포 해석에 사용된 지구통계학적 기법인 일반 크리깅(ordinary kriging)과 조건부 시뮬레이션(conditional simulation) 기법에 대하여 설명한 후 지반을 통한 오염물 이동 해석에 사용된 이론에 대하여 알아 보았다.

2.1 크리깅

크리깅은 최선의 선형 불편 추정자(best linear unbiased estimator, BLUE)를 제공해주는 방법으로 그 공식은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$Z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (1)$$

여기서, Z_i 는 공간상에 분포하는 자료 값

λ_i 는 Z_i 에 배당되는 가중치(weight)

Z_k^* 는 크리깅에 의한 추정치이다.

크리깅의 가중치는 추정치가 불편(unbiased)이고, 추정분산(estimation variance)이 최소가 되도록 결정되어야 한다. 즉, 크리깅의 불편 조건은

$$E[Z_v - Z_k^*] = 0 \quad (2)$$

이며 여기서 Z_v 는 미지의 참값, Z_k^* 는 추정치이다.

크리깅의 추정분산은

$$\begin{aligned} E\{[Z_v - Z_k^*]^2\} &= E[Z_v^*] - \\ &2E[Z_v Z_k^*] + E[Z_k^{*2}] \end{aligned} \quad (3)$$

로서 최소가 되어야 한다.

크리깅 시스템

크리깅 시스템은 Lagrangian 기법에서 얻어진다.

$$\frac{\partial [E[(Z_i Z_i^*)^2] - 2\mu \sum \lambda_i]}{\partial \lambda_i} = 0 \quad (4)$$

여기서, μ 는 Lagrangian 매개변수
 λ_i 는 점 i 에서의 가중치

크리깅 시스템은

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C(v_i, v_j) - \mu = C(v_i, V), \quad \forall i=1, \dots, n, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (6)$$

여기서, $C(v_i, V)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 두 영역 v_i 와 V 에 의한 공분산(covariance) 함수 $C(h)$ 이다.

크리깅 시스템의 행렬 형태

크리깅 시스템의 식 (5)와 (6)은 다음과 같은 행렬 형태로 표현될 수 있다.

$$[K] \cdot [\lambda] = [M^2] \quad (7)$$

여기서,

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix}$$

$$[M^2] = \begin{bmatrix} C(v_1, V) \\ \vdots \\ C(v_n, V) \\ 1 \end{bmatrix}$$

크리깅 행렬 K 는 다음과 같다.

$$[K] = \begin{bmatrix} C(v_1, v_1) \cdots C(v_1, v_j) \cdots C(v_1, v_n) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ C(v_i, v_1) \cdots C(v_i, v_j) \cdots C(v_i, v_n) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ C(v_n, v_1) \cdots C(v_n, v_j) \cdots C(v_n, v_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

크리깅 행렬은 대칭성을 갖는다.

$$C(v_i, v_j) = C(v_j, v_i), \quad \forall i, j \quad (8)$$

실제에 있어서 $C(v_i, v_j)$ 는 두 점 i 와 j 의 실험 자료 간의 공분산이고, $C(v_i, V)$ 는 점 i 에서의 실험 자료와 임의의 지점 추정치간의 공분산이다.

크리깅 시스템을 나타내는 식 (7)로부터 가중치 행렬을 식 (9)와 같이 구한다.

$$[\lambda] = [K]^{-1} \cdot [M^2] \quad (9)$$

실험 자료의 수가 많을 때는 크리깅 행렬 $[K]$ 의 역행렬을 계산하는 데 시간이 많이 걸리기 때문에, 보통 Gaussian 소거법이 가중치 결정을 위해 이용된다.

세미베리오그램(Semivariogram)

크리깅에 의한 추정치의 결정을 위해서는 실험 자료들 간의 공분산의 결정이 요구되는데 이는 현장 실험 자료로부터 구한 세미베리오그램으로부터 얻어진다.

공분산 결정에 사용되는 식은 식 (10)과 같이 나타나며

$$C(h) = \text{sill} - \gamma(h) \quad (10)$$

여기서, $C(h)$ 는 거리 h 떨어진 자료들간의 공분산:

$\gamma(h)$ 는 거리 h 떨어진 자료들간의 세미베리오그램:

실(sill)은 일정한 범위(range)를 넘

어서 세미베리오그램간의 상관관계가 없어지고 안정된 상태의 구간이다.

지질학적 자료분석에 많이 이용되는 세미베리오그램의 모델은 다음과 같다.

(1) Spherical 모델

$$\gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right] \quad (h \leq a) \quad (11)$$

$$\gamma(h) = C \quad (h > a) \quad (12)$$

여기서, C는 자료에서 얻어지는 공분산이고, a는 세미베리오그램이 상관관계를 갖고 있는 범위이고 h는 자료들 간의 거리이다.

(2) Exponential 모델

$$\gamma(h) = C [1 - \exp(-\frac{h}{a})] \quad (h \leq 3a) \quad (13)$$

$$\gamma(h) = C \quad (h > 3a) \quad (14)$$

이 모델은 실 값에 근사적으로 접근하며, 실질적인 세미베리오그램의 범위 a'은 3a이다.

이 모델은 수문학과 관련된 자료에 널리 이용되고 있다.

(3) Gaussian 모델

$$\gamma(h) = C [1 - \exp(-\frac{h^2}{a^2})] \quad (15)$$

이 모델 역시 실 값에 근사적으로 접근하며, 실질적인 세미베리오그램의 범위 a'은 $a\sqrt{3}$ 이다.

2.2 조건부 시뮬레이션

크리깅은 최선의 불편추정자(best linear unbiased estimator, BLUE)이므로 그 추정치들의 공간적 분포를 보면 부드러운 곡선(smooth curve)을 이루고 비교적 단순한 등고선도(contour map)를 만들어 낸다. 따라서 대수층내의 수리전도도 분포와 같이 매우 불규칙한 현상을

보여주는 표본자료에 대해서는 크리깅은 그 복잡성을 재현할 수 없고, 조건부 시뮬레이션을 이용해서 수리전도도 자료의 불규칙성을 만들어 낼 수 있다. 조건부 시뮬레이션의 공식은 다음과 같다.

$$Z_{oc}^*(x) = Z_{ok}^*(x) + [Z_o(x) - Z_{ok}^*(x)] \quad (16)$$

여기서, $Z_{ok}^*(x)$ 는 점 x에서의 조건부 시뮬레이션에 의한 추정치이며;

$Z_{ok}^*(x)$ 는 점 x에서의 크리깅에 의한 추정치이고;

$Z_o(x)$ 는 미지의 확률함수 $Z_o(x)$ 에 대한 비조건부 재현(nonconditional realization)이고;

$Z_{ok}^*(x)$ 는 $Z_o(x)$ 의 크리깅에 의한 추정치이다.

조건부 시뮬레이션의 구체적 이용절차는 다음과 같다.

- (1) 표본자료들을 이용한 베리오그램을 구하여 실, 범위, 너기트(nugget) 값들을 얻어낸다.
- (2) 크리깅을 이용하여 원하는 지점에서 추정치들을 만들어 낸다.
- (3) turning bands 방법을 이용하는 비조건부 시뮬레이션을 사용하여 추정치를 만들어 낸다.
- (4) 비조건부 재현에 대한 크리깅을 이용한 추정치를 만들어내서 비조건부 시뮬레이션에 의한 추정치와의 차이를 구한다.
- (5) 구해진 차이를 크리깅을 이용한 표본자료의 추정치에 합해주면 조건부 시뮬레이션에 의한 추정치가 얻어진다.

2.3 차원에서의 비조건부 시뮬레이션

미지의 眞무작위 함수(true random function $Z_o(x)$)와 똑같은 평균과 공분산을 갖는 무작위 함수 $Z_o(x)$ 의 값들을 구해내는 것을 비조건부

시뮬레이션이라고 하는데, 이것이 조건부 시뮬레이션의 첫 단계이다. Stationary 무작위 함수에 대한 일차원적인 시뮬레이션은 여러가지 방법이 이용 가능하지만, 2차원이나 3차원에서의 시뮬레이션은 많은 컴퓨터 사용시간이 필요하다. Turning bands 방법 (TBM)은 이러한 고차원의 시뮬레이션을 일련의 일차원의 시뮬레이션으로 변환시켜서 처리하는 방법인데, 컴퓨터 사용 시간이 많이 절감된다.

$$z_{n(x)} = \frac{1}{\sqrt{(N)}} \sum_{i=1}^N z_i(x) \quad (17)$$

여기서, $z_{n(x)}$: 고차원의 비조건부 재현
 $z_{i(x)}$: 1차원의 비조건부 재현
 N : turning band 선의 수

TBM은 Matheron(1973)에 의해 개발되었으며, Journel(1974)에 의해 실제적인 문제에 이용되기 시작하였다.

조건부 시뮬레이션의 특성

조건부 시뮬레이션의 목적은 실험자료가 갖는 미지의 분포가 이루는 변화 또는 변동을 재생산 해내는 데 있으며(Journel and Huijbregts, 1978), 그것의 통계학적인 특성은 다음과 같다.

(1) 조건부 시뮬레이션에 의해 얻어진 추정치 $z_{c}^*(x_i)$ 는 표본자료 $z_0(x_i)$ 에 조건적(conditional)이어야 한다. 즉,

$$z_{c}^*(x_i) = z_0(x_i), \forall x_i \in \text{dataset 1} \quad (18)$$

(2) 크리깅은 불편 추정치(unbiased estimator)이므로 시뮬레이션 된 값은 미지의 참값들과 똑 같은 평균을 갖는다.

$$E \{ Z_{0k}^*(x_i) \} = E \{ Z_0(x) \} \\ \text{and } E \{ Z_{ik}^*(x) \} = E \{ Z_i(x) \} \quad (19)$$

$$\text{따라서, } E \{ Z_{0k}(x) \} = E \{ Z_0(x) \} = m \quad (20)$$

(3) 크리깅의 가중치 λ 는 $Z_{0k}^*(x)$ 와 $Z_{ik}^*(x)$ 에 똑같이 이용된다. 왜냐하면 그들의 무작위 함수 $Z_0(x)$ 와 $Z_i(x)$ 는 동질성이고 그들의 kriging형태가 같기 때문이다.

(4) 조건부 시뮬레이션의 추정분산은 크리깅의 2배이다.

$$E \{ [Z_0(x) - Z_{0k}(x)]^2 \} = E \{ Z_0(x) - Z_{0k}^*(x) \}^2 + E \{ Z_i(x) - Z_{ik}^*(x) \}^2 \\ = 2E [Z_0(x) - Z_{0k}^*(x)]^2 = 2\sigma_k^2 \quad (21)$$

2.3 오염물질 이동이론

점토라이너를 통한 오염물질의 이동을 흡속을 통한 주요 이동 메카니즘인 이류(advection)와 분산(dispersion)으로 표현될 수 있으며 다음과 같은 방정식으로 나타내어진다.

$$\text{div} (D \text{ grad } C - C\bar{V}) = \frac{dC}{dt} \quad (22)$$

상기식에서 C 는 오염물질의 농도, D 는 분산계수 그리고 \bar{V} 는 라이너를 통한 물의 평균선형속도(average linear velocity)를 나타낸다. 이류에 의한 오염이동은 물의 평균 선형속도에 의존하고 오염물의 분산되는 정도는 다음과 같은 2가지 요소로 구성되는 분산계수에 의한다.

$$D = D^* + D_m \quad (23)$$

여기에서 D^* 는 흡속을 통한 오염이동물질의 유효확산계수로서 오염성분의 분자의 활동성인 브라우니안 모션(Brownian motion)에 의한 확

산을 나타내며 D_m 은 수리 동력 분산계수(hydrodynamic dispersion coefficient)로서 흙의 다공질 매체를 흐르는 물의 미세한 흐름에 의해 확산되는 정도를 나타낸다. 또한 수리동력 분산계수는 흐름속도로의 물의 흐름(V)에 비례한다고 가정하여 $D_m = \alpha \bar{V}$ 로 표시하고 상수 α 는 분산지수(dispersivity)라고 부른다. 라이너를 통한 물의 흐름은 Darcy 법칙에 의하여

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} \bar{V}_x \\ \bar{V}_y \end{bmatrix} = \frac{K}{n} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (24)$$

로 표시되며 \bar{V}_x 와 \bar{V}_y 는 평균선형속도의 X와 Z 방향 성분이며 n는 간극률, h는 수리수두를 나타낸다. 정상상태의 2차원 수리수두 분포는 식(25)와 같은 Laplace 방정식을 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial Y^2} = 0 \quad (25)$$

식 (22)와 (24), (25)는 Jang(1990)에 의하여 개발된 Galerkin 유한요소 오염이동 모델을 이용하여 수리수두 분포와 시간에 따라 이동된 오염수 농도 분포를 구하였다.

3. 수도권매립장 제1공구 수직단면의 수리전도도 자료 추정

K-Block에서 수행된 5개 지점의 시추에서 획득한 23개 토양 시료의 실내 투수시험 자료를 이용하여(그림 1 참조), 격자상으로 수리전도도를 추정하였다. 수리전도도 자료는 대수변환(log transformation)에 의해 정규분포(normal distribution)를 이룬다. 따라서 본 연구

표 1. 실험실 측정된 제1공구 수리전도도 K와 대수변환 값

샘플위치		수리전도도(K)	
X-Coord	Y-Coord	K(cm/sec)	ln K
0.00	0.85	0.490E-07	-16.831
0.00	-3.15	0.760E-06	-14.090
0.00	-7.15	0.600E-07	-16.629
0.00	-11.15	0.996E-06	-13.820
27.00	2.18	0.109E-05	-13.733
27.00	-1.82	0.100E-06	-16.118
27.00	-5.82	0.560E-07	-16.698
27.00	-7.82	0.362E-06	-14.832
45.00	0.6	0.199E-06	-15.430
45.00	-2.90	0.270E-07	-17.427
45.00	-4.90	0.520E-07	-16.772
45.00	-6.90	0.140E-07	-18.084
45.00	-7.90	0.127E-05	-13.579
45.00	-13.15	0.270E-07	-17.427
95.00	-0.90	0.850E-07	-16.281
95.00	-3.40	0.130E-07	-18.158
95.00	-5.90	0.307E-06	-14.996
95.00	-6.90	0.181E-06	-15.525
95.00	-9.90	0.140E-07	-18.084
95.00	-13.75	0.248E-06	-15.210
145.00	-0.30	0.155E-06	-15.680
145.00	-4.30	0.220E-07	-17.632
145.00	-10.30	0.168E-06	-15.599

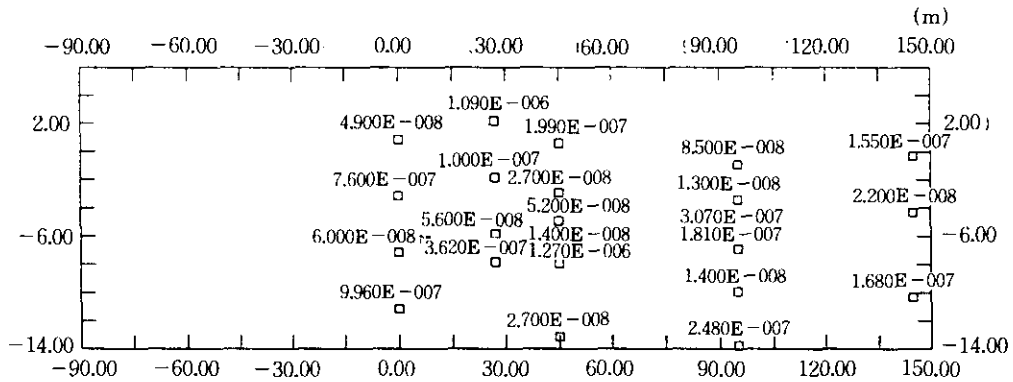


그림 1. 김포 제1공구 쓰레기 매립장 K블록 시료 채취 단면의 실내 수리전도도 측정치의 분포

표 2. 수리전도도 자료의 통계값

Statistics	ln K
Mean	-16.02761
Median	-16.118
Standard Deviation	1.43867
Variance	2.06977
Skewness	0.15291
Kurtosis(peakness)	1.79739
Minimul Value	-18.158
Max Value	-13.579

에서도 김포 자료를 대수변환시켜 지구통계학적 방법의 입력자료로 이용하였다. 표 1은 실험실에서 측정된 수리전도도와 그 대수변환된 자료이며 대수 변환된 수리전도도 자료의 통계치는 표 2에 나타내었다.

3.1 베리오그램의 계산

수리전도도 자료의 공간적 변화에 대한 분석을 위해 세미베리오그램을 식 (26)을 이용 계산하였다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[z(x) - z(x+h)]^2\} \quad (26)$$

그 결과 K-Block 자료의 베리오그램은 동서방향(X좌표 방향)과 남북방향(Y좌표 방향)에

서 크게 이방성을 보였고 각각의 방향에 따른 세미베리오그램의 값들은 안정적이지 못하고 불규칙한 변화를 보여 주었다(그림 2, 3).

본 연구에서는 김포 수리전도도 자료의 베리오그램에 통계수리지질 분야에서 보편적으로 사용되는(Hoeksma and Kitanidis, 1985; Dagan, 1989) 지수형모델(exponential model)을 이용하였는데 지하수 오염물질의 이동에 대한 이론적 연구지역인 캐나다 Borden 현장에서 획득한 수리전도도 자료의 베리오그램도 불

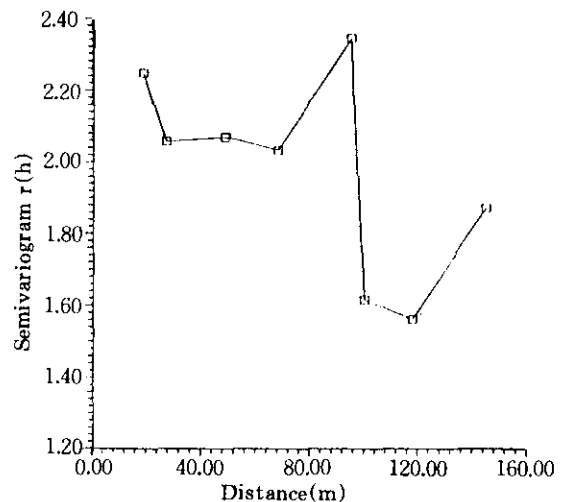


그림 2. 제1공구 동서방향의 수리전도도 semivariogram

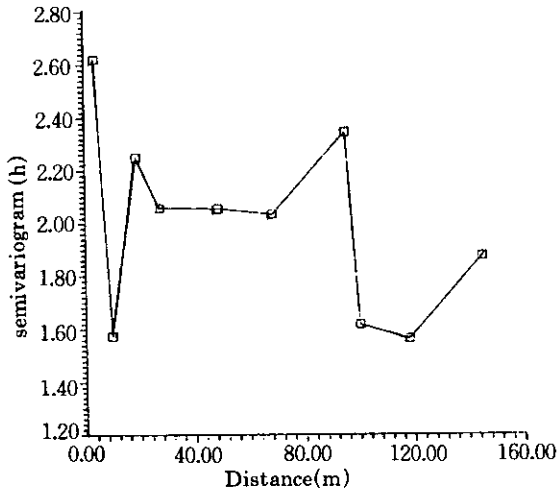


그림 3. 제1공구 남북방향의 수리전도도 세미베리오그램

표 3. 세미베리오그램의 상수값

방향	너기트 (nugget)	범위	실(sill)	사용모델
EW	1.83	84.0	2.07	지수형
NS	1.78	93.0	2.07	지수형

규칙한 변화를 보이지만 지수형모델을 이용한다(Sudicky, 1986; Woodbury and Sudicky, 1991).

지수형 모델의 적용에 의하여 구해진 세미베리오그램의 상수들을 표 3에 나타내었다.

3.2 크리깅에 의한 수리전도도 자료의 추정

김포자료의 베리오그램을 지수형 모델에 적합시켜서 stationary 무작위 함수의 자료 추정에 이용되는 일반 크리깅을 응용하였다. 크리깅 분석에 이용된 격자의 규모가 표 4에 표시되었다.

표 4. 크리깅 분석에 이용된 격자규모

축	간격(m)	추정횟수	최소 축의 값	최대 축의 값
X-축	15.0	11	0.0	+150.0
Y-축	2.0	11	-14.0	+6.0

23개의 샘플 자료를 이용하여 총 121 지점에서 수리전도도 자료를 만들어 그 추정치 $\ln K$ 와 K 를 등고선으로 나타낸 결과가 그림 4와 5에 있는데, y축이 x축에 비해 너무 짧아서 세부적인 변화를 알아보기 어려우므로 y축을 10배 확대시켜 그림 6과 7에 나타내었다. 등고선도에서

보면 오른쪽 부분(X좌표 60m~150m)의 수리전도도는 변화가 없고 대부분 대수변환된 값으로 -16 이하이며, 원래 값으로 1.2×10^7 cm/sec 이하이다. 왼쪽 부분은 수리전도도가 심도에 따라 변화하며 로그변환 값의 범위는 -16~-13.8이며, 또 실제 수리전도도 분포는 $1.2 \times 10^7 \sim 9.6$

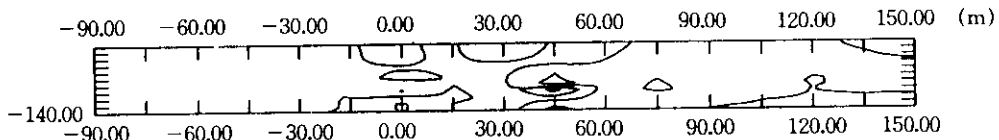


그림 4. 크리깅을 이용하여 평가한 제1공구 로그변환 수리전도도 분포

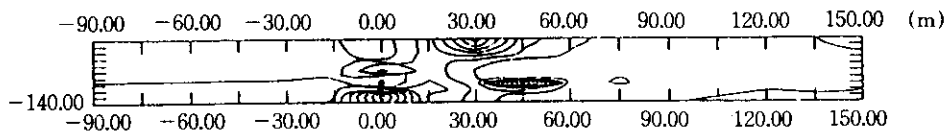


그림 5. 크리깅을 이용하여 평가한 제1공구 로그변환 수리전도도 분포

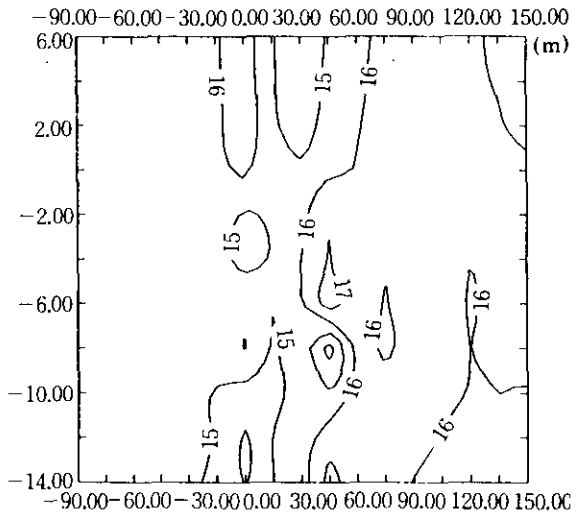


그림 6. 크리깅을 이용하여 평가한 제1공구 로그변환 수리전도도 분포(y축 10배 확대)

$\times 10^7 \text{ cm/sec}$ 의 범위에 있다. 또한 비균질성이 심한 $X = -15\text{--}60\text{m}$ 부분을 쓰레기 운송 전용도로와 매립제체가 있는 부분으로 이러한 흙구조물 조성시 형성된 비균질성으로 보여진다.

3.3 조건부 시뮬레이션에 의한 수리전도도 자료의 추정

불규칙한 현상을 보여주는 수리전도도의 분포는 조건부 시뮬레이션을 이용해서 그 복잡성을 만들어 낼 수 있다. 김포자료의 분석에서 얻은 지수형 모델의 베리오그램을 이용하여 일반 크리깅과 비조건부 시뮬레이션에 의한 추정치를 구하여 조건부 시뮬레이션의 결과치들을 생

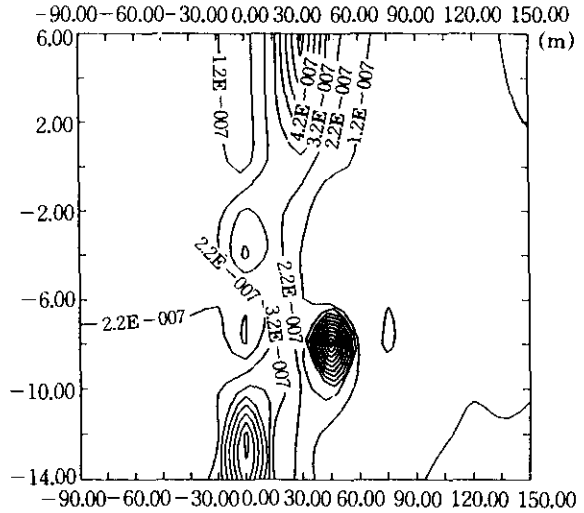


그림 7. 크리깅을 이용하여 평가한 제1공구 수리전도도 분포(y축 10배 확대)

산하였다. 이때 이용된 격자 규모는 크리깅 분석에 이용된 것과 같다.

김포자료에 조건부 시뮬레이션을 이용하여 추정된 자료로 그린 $\ln K$ 와 K 의 등고선도가 그림 8과 9에 있으며, 세부적인 변화를 보기 위해 y축을 10배 확대한 등고선도가 그림 10-11에 있다. 변환된 추정치들의 분포는 $-18.315 \sim -11.845$ 이고 참값 K 의 분포는 $1.1 \times 10^8 - 7.17 \times 10^6$ 로서 크리깅에 의한 추정치보다 변화의 폭이 훨씬 넓다.

조건부 시뮬레이션에 의해 만들어진 등고선도를 크리깅에 의한 등고선도와 비교해 보면 조건부 시뮬레이션의 등고선 변화가 훨씬 커서 불규칙한 변화 양상을 보여주는 것을 알 수 있다.



그림 8. 조건부 시뮬레이션을 이용하여 평가한 제1공구 로그변환 수리전도도 콘터

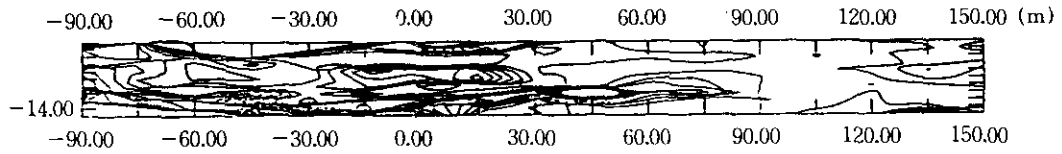


그림 9. 조건부 시뮬레이션을 이용하여 평가한 제1공구 로그변환 수리전도도 콘터

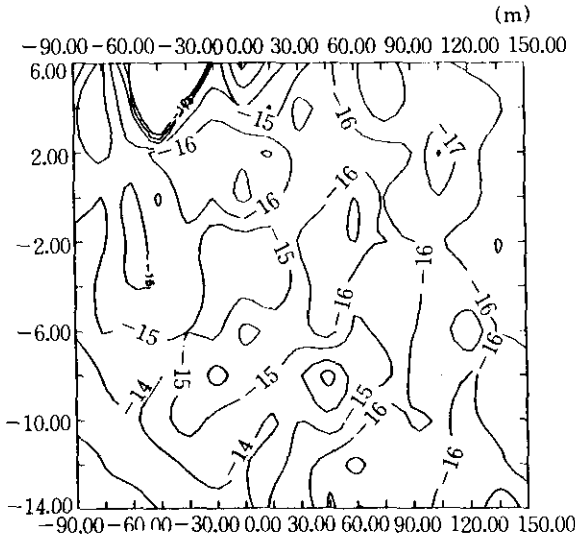


그림 10. 조건부 시뮬레이션을 이용하여 평가한 제1공구 로그변환 수리전도도 콘터 (y축 10배 확대)

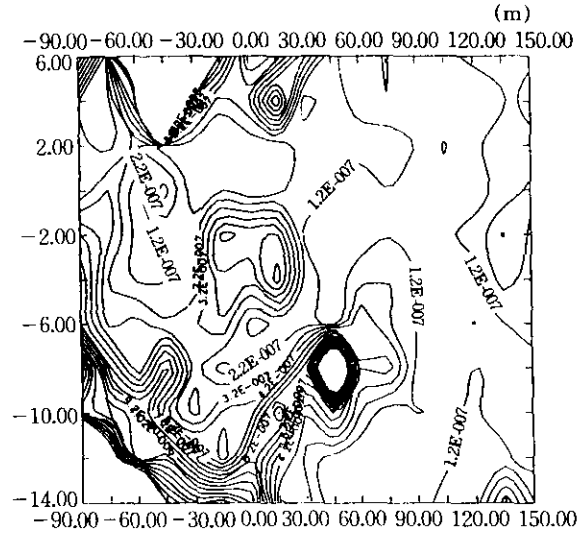


그림 11. 조건부 시뮬레이션을 이용하여 평가한 제1공구 수리전도도 콘터 (y축 10배 확대)

4. 비균질 기초지반을 통한 오염물의 이동

본절에서는 기 시공된 제1공구 성토 단면을 통한 오염물 이동을 오염이동 수치해석 모델을 이용하여 알아보았다. 매립지 기초 지반의 투수 계수는 앞절에서 크리깅과 조건부 시뮬레이션을 이용하여 구한 수리전도도 분포를 각 요소 별로 입력시켰으며 현장에서의 수리전도도가 약 2지수승 정도 높은 것을 감안하여 실내시험으로 부터 구한 분포값을 10배와 100배로 증가시켜 수치해석하고 그 결과를 비교하였다.

4.1 입력데이터의 구성

한서Eng. 보고서(1995, 5)에 수록된 제3공구 주수 시험결과를 보면 21개지점(그림 12)의 수리전도도 평균값은 5.3×10^{-5} cm/sec로 나타난다. 그런데 1공구 K블록에서 샘플링된 시료 23개를 이용한 실내투수 시험결과는 평균 2.7×10^{-7} cm/sec로서 평균값은 제3공구의 현장 조사결과와 비교(표 5)하여 2지수승 정도 적고 최대 최소값이 평균값에 대하여 갖는 편차는 두 자료에서 모두 약 1지수승 정도인 것으로 나타나고 있다.

따라서 본 오염이동 해석 모델에 입력된 수리전도도는 실내시험 결과값과 이를 10배, 100배로 곱한 자료를 각각 이용하였다. 매립체체 내외의 수두차는 현재의 침출수 수위가 10-14m인 것을 감안하여 10m로 입력하였으며 현장에서의 계측자료가 없는 매립 폐기물의 흡수

에서 유효확산계수는 매립물의 성상에 따라 큰 변화가 없으므로 $6 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 Goodal과 Quigley(1977)로 부터 인용한 값을 사용하였고 분산지수는 종단 방향 1.0m, 횡단방향 0.5m, 공극률은 0.3으로 가정하여 사용하였다.

표 5. 주수 시험으로 부터 구해진 세 3공구 수리전도도 K와 대수변환값

샘플위치		수리전도도(K)	
X-Coord	Y-Coord	K (cm/sec)	In K
100.00	50.00	0.896E-06	-13.925
0.00	200.00	0.370E-06	-14.810
500.00	200.00	0.191E-07	-17.774
100.00	300.00	0.714E-07	-16.455
200.00	400.00	0.404E-06	-14.722
400.00	400.00	0.972E-06	-13.844
600.00	400.00	0.213E-05	-13.059
1105.00	415.00	0.319E-05	-12.655
0.00	600.00	0.380E-06	-14.783
400.00	600.00	0.197E-04	-10.835
800.00	600.00	0.613E-06	-14.305
100.00	700.00	0.245E-08	-19.827
500.00	700.00	0.175E-06	-15.558
840.00	725.00	0.510E-07	-16.791
935.00	725.00	0.500E-07	-16.811
400.00	750.00	0.419E-05	-12.383
200.00	800.00	0.549E-07	-16.718
350.00	800.00	0.980E-07	-16.138
400.00	800.00	0.404E-06	-14.722
450.00	800.00	0.445E-05	-12.323
600.00	800.00	0.175E-06	-15.558
800.00	800.00	0.304E-06	-15.006
400.00	850.00	0.328E-07	-17.233
700.00	900.00	0.605E-07	-16.621
825.00	990.00	0.127E-06	-15.879
0.00	1000.00	0.218E-07	-17.641
400.00	1000.00	0.112E-06	-16.005
300.00	1100.00	0.862E-07	-16.267
200.00	1200.00	0.274E-06	-15.110
-125.00	1290.00	0.304E-06	-15.006
700.00	1300.00	0.420E-05	-12.380
0.00	1400.00	0.773E-07	-16.376
710.00	1480.00	0.208E-05	-13.083
200.00	1600.00	0.498E-07	-16.815
80.00	1765.00	0.152E-06	-15.699

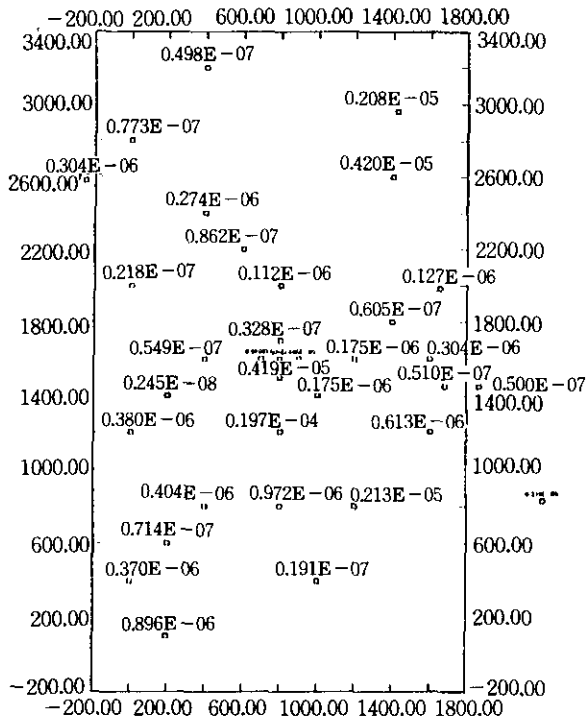


그림 12. 김포 제3공구 매립장의 주수시험으로부터 구한 수리전도도의 위치

4.2 해석모델의 작성

비균질성 토질의 성질을 포함한 지하수와 제체내 침출수 특성이 제체 하부로의 오염물질이동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다음과 같은 2가지의 예제를 구성하였다.

1) 매립층으로부터 라이너로 오염물질이 스며들어 하부로 이동할때 수리전도도의 변화에 의해 30년동안 오염물질이 이동하는 거리는? 또한 수리전도도의 분포를 일반 크리깅 방법과 조건부 시뮬레이션을 이용하였을 경우 오염물질 이동의 경향은?

2) 매립장 외측 제체 지반하부 2지점 A,B (그림 13 참조) 에서의 시간이 경과함에 따라 발생하는 오염물 농도의 증가는?

본 해석에 사용된 오염물은 안전층의 해석을 위하여 비반응성인 Chloride나 Iodine 계통의 물질로 가정하였으며 매립장 안정화 후 예상되는 오염원의 감소는 고려되지 않았다. 이 문제를 해석하기 위한 유한요소망은 상부 1층은 2×2.5m 요소를 나머지층은 3×2.5m요소를 사용하여 그림 13과 같이 작성하였다.

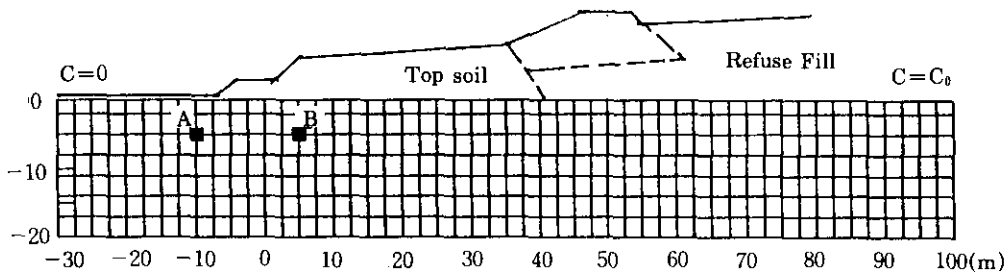


그림 13. 문제의 해석에 사용된 유한요소망과 농도 변화를 구한 A, B지점의 위치

4.3 해석결과

크리깅으로 수리전도도의 분포 해석한 지반에 대한 오염물질이 30년동안 이동한 모습을 그림 14에 보였다. 그림 14의 (a)그림은 수리전도도 실내시험 결과(K_{lab})를 그대로 이용한 경우이며 그림 14(b), (c)는 실내 수리전도도

시험결과를 10, 100배로 늘려 해석한 경우이다.

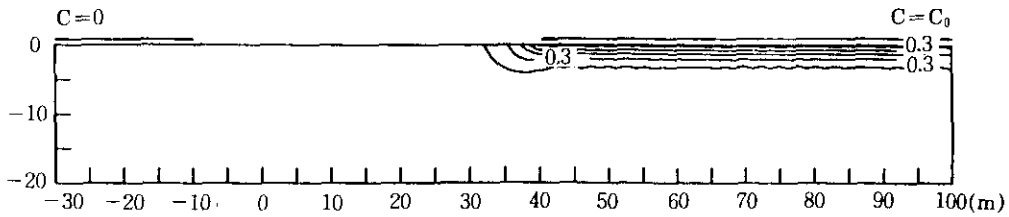
보는 바와 같이 그림 14(a)의 경우는 라이너의 깊이부분을 향하여 4m의 이동이 있었을뿐 가제방의 기초지반을 통한 이동은 미미하였다. 그림 14(b)의 경우 제체 하부를 통한 상당한 이동이 30년동안 이루어짐을 알 수 있고 그림 14(c)의 경우 평균 수리전도도의 값이

2.7×10^{-5} cm/sec의 경우로서 매립 제체 밖으로 오염물이 나오게 되는 것을 알 수 있었다. 그림 15(a), (b), (c)의 경우는 조건부 시뮬레이션으로 구한 수리전도도 단면에 오염물이 이동하는 모습을 보여주고 있다. 그림 15(a)의 경우는 크리깅으로 구한 수리전도도의 오염물 이동 모습과 크게 다른게 없으나 그림 15(b), (c)의 경우는 크리깅방법에 의한 수리전도도 분포의 오염물 이동 모습에 비교하여 조건부 시뮬레이션으로 구한 비균질성이 심한 지반에서의 오염물 속도가 큰것으로 나타났으며 같은 현장자료를 이용한 경우에도 비균질 정도를 해

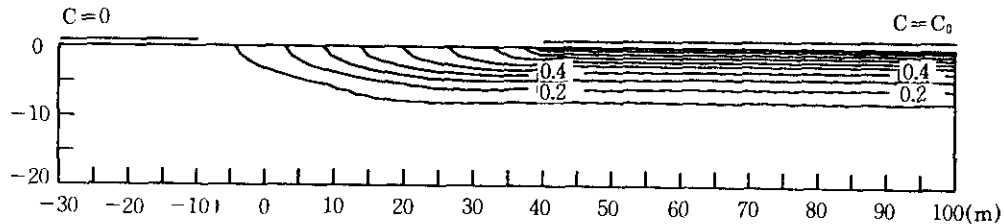
석하는 방법에 따른 차이가 있는 것을 알게 되었다.

그림 16에서 제방 끝단(Node A)와 제방중간부분(Node B)에서의 시간에 따른 오염물 농도 변화를 보인것으로 실내시험 수리전도도 범위에서의 오염물 농도증가는 나타나지 않아 이 그림에 삽입되지 않았다.

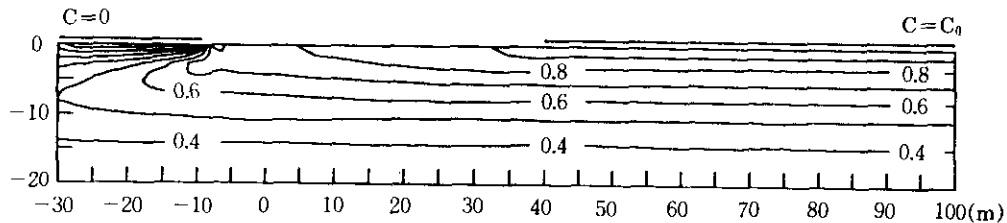
예상한 바와 같이 실내투수계수를 100배로 늘린 값에 대하여 오염이동성을 묘사한 경우의 농도증가가 실내투수계수값을 10배한 경우보다 많은 것으로 나타났으며 $K_{lab} \times 100$ 의 경우 끝단부에서의 농도증가가 5년 내외로부터 뚜



(a) K_{lab}

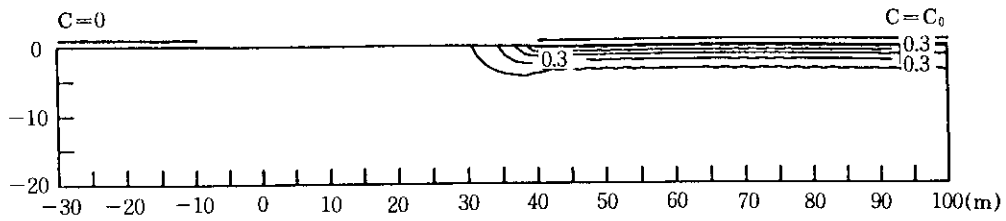


(b) $K_{lab} \times 10$

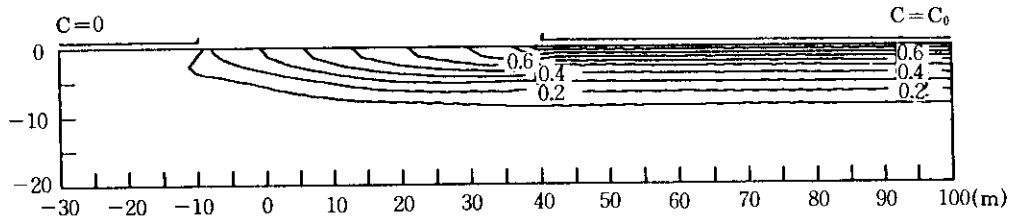


(c) $K_{lab} \times 100$

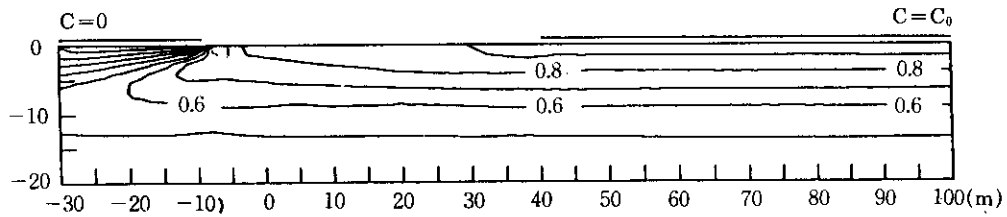
그림 14. 크리깅 방법으로 해석한 비균질 수리전도도 지반을 통한 오염물 이동



(a) K_{lab}

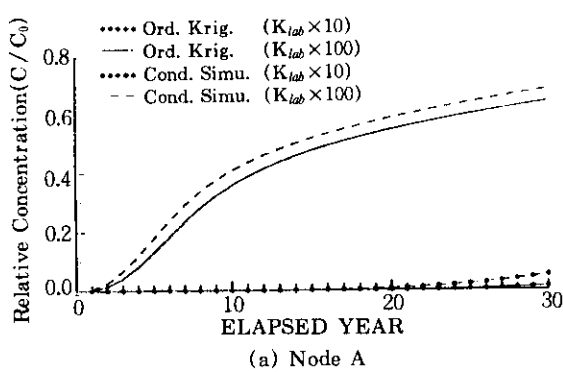


(b) $K_{lab} \times 10$

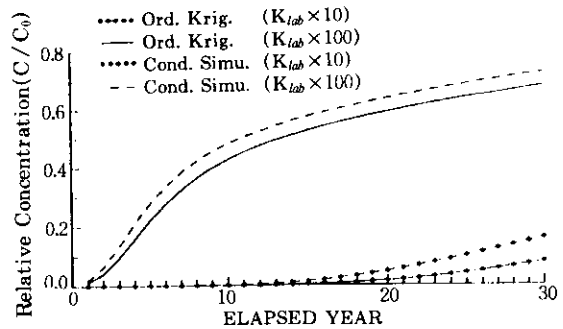


(c) $K_{lab} \times 100$

그림 15. 조건부 시뮬레이션 방법으로 해석한 비균질 수리전도도 지반을 통한 오염물 이동



(a) Node A



(b) Node B

그림 16. 제방끝단(Node A)와 제방 중간부분 (Node B)에서의 시간경과에 따른 오염물 농도(C/C_0)의 변화

렸이 증가하는 경향을 보였다. 비균질성이 심한 조건부 시뮬레이션 해석지반에서의 농도증가가 크리깅 방법으로 해석한 경우보다 일정한 차이로 큰 것을 알 수 있었다. 제체 끝단과 중간지점의 농도증가는 예상한 바와 같이 오염원에 가까운 B노드에서의 증가정도가 약간 더 큰 것으로 나타났다.

5. 결 론

지구통계학적 방법을 이용하여 수도권매립지 수리전도도에 대한 비균질성 해석 그리고 그 영향을 고려한 오염물이동 해석을 수행한 결론은 다음과 같다.

1. 크리깅으로 해석한 제1공구 K블록 단면의 경우 수리전도도 분포는 $1.2 \times 10^{-7} - 9.6 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 의 범위에 있었으며 도로와 제방이 위치하고 있는 부분의 비균질성이 심하게 나타났다. 이러한 비균질성은 쓰레기 운송 전용도로와 매립제체조성시 형성된 비균질성으로 보여진다. 동일지역을 일반 크리깅에 비교하여 추정 분산치를 2배 정도 크게 산출하는 조건부 시뮬레이션으로 해석한 경우 수리전도도의 분포는 $1.1 \times 10^{-8} - 7.17 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로서 크리깅으로 해석한 추정치 보다 변화폭이 크며 비균질성도 복잡한 것으로 나타났고 오염물 이동해석 결과에서도 조건부 시뮬레이션으로 해석한 비균질 지반에서의 오염물 이동 정도가 일반 크리깅에 의해 해석한 비균질 지반에서의 오염물 이동 정도보다 더 큰 것으로 나타나고 있다.
2. 제1공구 수리전도도 자료의 경우 실내시험 결과를 이용하였으며 제3공구의 경우 현장의 시추공에서의 수위저하시험을 통하여 얻어진 값으로 대략 현장시험의 값이 실내 시험값에 비교하여 수리전도도의 분포범위가 10배에서 100배 까지 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

3. 현장 수리전도도의 범위로 제3공구 주수 시험결과를 감안하여 실내 수리전도도 실험 결과를 10배와 100배로 늘리어 오염물 이동성 해석을 수행한 결과 실내 수리전도도를 이용한 비균질 지반에서의 30년동안의 침출수 이동정도는 크지 않았으나 현장성을 감안할 경우는 가장 안전측으로 본 $K_{100} \times 100$ 의 경우 매립 후 5년 이상이 경과하게 되면 제체밖으로의 이동표출 가능성을 보여주고 있다. 따라서 이에 대한 대비를 위해서는 매립장내 침출수 축적으로 인한 수두가 높아지는 것을 막거나 제체지반에 수직차수벽을 설치하여 침출수 이동을 차단하는 것을 고려할 필요가 있다.

4. 제체 중간지점과 제체 바깥지점 부근에서의 시간에 따른 오염물 농도 변화는 증가하는 것으로 나타났으며 오염원과 가까운 제체 중간지점에서의 농도증가가 제체 끝단보다 큰 것으로 나타났다. 수리전도도의 비균질 해석에 따른 각 지점에서의 농도 증가는 수리전도도의 분산성이 큰 조건부 시뮬레이션 해석 지반의 경우가 크리깅의 경우보다 그 지점에서의 농도 증가가 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 1994년도 수도권 매립지 사업조합의 학술 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구입니다. 또한 연구 수행 기간 동안 많은 도움을 주신 중앙대 김 수삼 교수님께도 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한서 Engineering(1995), 수도권 제3매립지 가반시설 조성사업 실시 설계 수리지질 보고서.
2. Dagan, G., (1989), Flow and Transport in Porous Formations, 465pp, Springer-Verlag, New York.
3. Goodal D.C. and Quigley, R.M. (1977), "Pollutant Migration from Two Sanitary Landfill Sites near Sarnia, Ontario",

- Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 2 pp.223-236.
4. Hoeksema, R. J., and Kitanidis, P. K. (1985) "Comparison of Gaussian Conditional Mean and Kriging Estimation in the Geostatistical Solution to the Inverse Problem", *Water Resour. Res.*, vol. 21(6), p.825-836.
 5. Jang, Y. S., Sitar, N. and Der Kiureghian, A. (1990), "Reliability Approach to Probabilistic Modeling of Contaminant Transport", Report No. UCB/GT-90/03. Dept. of Civil Eng., Univ. of California, Berkeley.
 6. Journel, A. G. (1974), "Geostatistics for Conditional Simulation of Ore Bodies, Economic Geology", vol. 69, pp.673-687.
 7. Journel, A. G., and Huijbregts, C. H. J. (1978), *Mining Geostatistics*, Academic Press.
 8. Matheron, G. (1969), *Le Krigeage Universel*, Cah. Centre Morphol. Math. 1.
 9. Matheron, G. (1973), "The Intrinsic Random Functions and Their Applications", *Advanced Applied Probability*, vol. 5, pp.439-468.
 10. Sudicky, E. A. (1986), "A Natural Gradient Experiment on Solute Transport in a Sand Aquifer : Spatial Variability of Hydraulic Conductivity and Its Role in the Dispersion Process", *Water Resour. Res.*, vol. 22(13), p. 2069-2082.
 11. Woodbury, A. D., and Sudicky, E. A. (1991), "The Geostatistical Characteristics of the Borden Aquifer", *Water Resour. Res.*, vol. 27(4), p.553-546.

(접수일자 1996. 7. 22)