한국지구시스템공학회지
Vol. 42, No. 5 (2005) pp. 437-444

연구논문

수리지질학적으로 불균질한 매립지반 내에서의 침출수 이동에 대한 Monte-Carlo 시뮬레이션

이근상[1)]*

Monte-Carlo Simulations on the Transport of Leachate through Hydrogeologically Heterogeneous Landfill Sites

Kun Sang Lee*

Abstract : The transport of landfill leachate in the subsurface formations of unlined landfill sites is considered. The objective of this study is to assess impacts of heterogeneities on the leachate transport and is accomplished by examining the results from a series of Monte-Carlo simulations. The landfill system simulated in this study is hypothetically represented with spatial variability for the hydrogeological parameter. To assess the transport of leachate through random hypothetical hydraulic conductivity(K) fields generated using geostatistical input parameters, a saturated flow model is linked with a contaminant transport model. Point statistics values such as mean, standard deviation, and coefficient of variation of the concentration were obtained from 100 Monte-Carlo trials for various degrees of heterogeneity ranging from homogeneous to highly heterogeneous. Results of point statistics show that the distribution of hydraulic conductivity in the landfill site proves to be an important parameter in controlling leachate concentrations. The variability in the leachate concentration for different realizations of a heterogeneous K-field increases as K-heterogeneity and the distance between source and monitoring well increase. Consideration of anisotropic heterogeneities represented by correlation length in K-field does not show any apparent impacts.

Key words : landfill, leachate transport, heterogeneity, Monte-Carlo simulation

요 약 : 차수막이 설치되어 있지 않은 매립장에서 하부 지반으로 누출된 침출수의 이동을 고려하였다. 일련의 Monte-Carlo 시뮬레이션의 결과를 검토하여 지반 불균질성이 침출수 이동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 수리지질학적 인자의 공간 변동성이 있는 매립지 시스템을 시뮬레이션하였다. 포화 유동 모델과 오염물 이동 모델을 이용하여 랜덤 수리전도도 장을 통한 침출수 이동을 평가하였다. 다양한 범위의 불균질 지반에 대하여 100회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하고 평균, 표준편차, 변이계수와 같은 점기반 통계치들을 계산하였다. 통계치 결과에 따르면 매립지반의 수리전도도 분포가 침출수 농도를 결정하는 주요한 인자로 나타났다. 수리전도도의 불균질성 및 오염원과 감시정 간의 거리가 커질수록 침출수 농도의 변동성이 증가하였다. 수리전도도 장의 연관길이로 표현되는 불균질성의 이방성이 미치는 영향은 분명하게 나타나지 않았다.

주요어 : 매립장, 침출수 이동, 불균질성, Monte-Carlo 시뮬레이션

서 론

1990년 이전 우리나라에서 설치된 매립시설은 침출수를 차단할 수 있는 시설을 갖추지 않은 상태에서 폐기물이 매립되었다. 1991년에 이르러 매립지 설치기준이 폐기물관리법으로 구체화되면서 차수시설이 설치되기 시작하였다. 매립 폐기물은 안정화 기간이 길기 때문에 장기간 침출수가 발생하게 되며 차수 시설이 없는 경우 침출수는 매립장 바닥을 통하여 지반으로 누출된다. 누출된 침출수는 비포화 영역을 거쳐 대수층으로 이동하여 우물이나 하천 등의 배출 지점까지 이동할 수 있다. 따라서 유해물질이 다량 함유된 침출수가 주변의 지반 환경으로 누출될 경우 토양 및 지하수 오염을 야기할 가능성이 매우 크다.

침출수를 효율적으로 관리하기 위해서는 침출수의 지

2005년 4월 8일 접수, 2005년 7월 8일 채택
1) 경기대학교 토목환경공학부 환경공학 전공
*Corresponding Author(이근상)
E-mail: kslee@kyonggi.ac.kr
Address; Div. of Civil and Environmental Eng., Kyonggi University, Suwon, Kyonggi 442-760, Korea

반 내 거동에 대한 체계적인 연구가 지속적으로 수행되어야 한다. 침출수의 이동은 매립지 지반의 다양한 수리지질학적 특성과 화학적 요인들에 의해 좌우되므로 침출수의 유동과 침출수 내 오염물질의 이동 경로를 해석하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 침출수의 거동을 예측할 때는 수치 시뮬레이션 기법이 많이 사용되고 있다. 현재까지의 연구는 주로 침출수의 생성과 생성된 침출수의 균질 지반 내 유동을 해석하거나 실제 매립장에 대한 사례 연구가 대부분이었다(Khanbilvardi *et al.*, 1995; Sophocleous *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1997; Ritterling and Stansbury, 1998; Hudak, 2001; Dho *et al.*, 2002). 국내에서도 이승희와 유호식(1997)이 균질 지반 내에서의 침출수 유동에 대한 계산을 수행하였다. 권재필 등(2001)은 간단한 분포를 갖는 수리전도도를 가정하고 지반 내 중금속 농도를 예측하기 위한 연구를 수행한 바 있다.

지반 환경의 물리적 특성은 변동성이 매우 심한 것으로 알려져 있다. 지반 내 유체 유동과 오염물 이동에 가장 큰 영향을 미치는 수리전도도는 지질학적 특성에 의하여 랜덤하거나 경향성(trend)을 가지면서 위치에 따라 변동을 보이는 불균질 특성을 가지고 있다(Poeter and Gaylord, 1990; Boggs *et al.*, 1992). 최근 수리지질학의 여러 분야에서 지반 불균질성을 응용한 연구가 수행되고 있으며(Aksoy and Culver, 2004) 침출수 이동 해석 시에도 불균질성을 고려할 필요성이 증가하고 있다.

불균질 지반 내 침출수 이동 해석 시 매립지반 내 모든 지점에서의 수리전도도 값을 알 수 없으므로 결정론적 해석법(deterministic method)을 사용하는 것이 불가능하다. 따라서 수리전도도의 불확실성을 랜덤 인자로 간주하여 처리함으로써 불확실성을 반영하는 확률론적 해석법(stochastic method)을 적용하는 것이 보다 타당하다.

본 연구에서는 Monte-Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 수리전도도의 불균질 특성이 매립장으로부터 누출된 오염물의 지반 내 이동에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 불균질 지반을 묘사하기 위하여 지구통계학적 기법으로 다양한 랜덤 수리전도도 장을 생성하였다. 다수의 등확률 수리전도도 장에 대하여 포화상태의 정상상태 유동방정식과 천이상태 물질이동방정식을 적용하여 침출수 이동을 묘사하였다. 수치해석 기법을 이용하여 침출수의 유동 및 이동을 계산하고 지반 내 침출수 농도를 통계적으로 해석하고자 한다. 계산 결과를 균질 지반의 경우와 비교하여 불균질 수리전도도 장의 특성을 나타내는 지반 내 지구통계학적 인자들이 침출수의 거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

침출수 이동의 이론

침출수 이동방정식

유동 방정식

매립지반 내 침출수의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 메커니즘은 이류이다. 일반적으로 함수율이 증가하면 수리전도도가 비선형적으로 증가하므로 동일한 수두 구배 하에서 유동 속도가 증가한다. 따라서 포화도가 100%가 되면 유동 속도가 가장 커지므로 완전히 포화된 지반을 가정할 경우 침출수의 최대 이동을 나타낼 수 있다. 또한 비포화 영역의 인자들이 침출수 이동에 미치는 영향은 크지 않다고 알려져 있기 때문에(Sophocleous *et al.*, 1996) 본 연구에서는 포화 영역 내 이동만을 고려하였다.

포화된 다공성 매체 내에서 유체의 이동 속도를 결정하는 공극 유속 벡터의 i 방향 성분 v_i[L/T]는 Darcy 법칙에 의하여 계산할 수 있다.

$$v_i = -\frac{K_{ij}}{n_e}\frac{\partial h}{\partial x_j} \tag{1}$$

여기에서 K_{ij}는 수리전도도[L/T], n_e는 유효공극률, h는 수두[L], x_j는 j 방향의 좌표를 나타낸다. 수리전도도는 지반 내에서 침출수의 거동을 직접적으로 결정하는 가장 중요한 인자로서 불균질 매질의 경우 공간의 함수 $K_{ij}(\boldsymbol{x})$로 주어지게 된다.

사전 계산의 결과에 따르면 본 계산에서 설정한 경계조건 하에서 수두 분포는 비교적 단시간 내에 정상상태에 도달한다. 따라서 불균질 매질에 대한 Darcy 법칙을 정상상태의 연속방정식에 대입하면 포화층 내에서의 유체 유동을 묘사하는 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right) = 0 \tag{2}$$

이동 방정식

매립장에서 누출된 오염물의 이동 중 흡착이나 생분해가 오염물의 이동에 미치는 영향을 무시할 수 있다고 가정하였다. 따라서 매립지 지반 내에서 오염물의 이동은 보존성 용질의 질량전달방정식인 천이 이류-분산방정식으로 묘사할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(n_e D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial (n_e v_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial (n_e C)}{\partial t} \tag{3}$$

여기에서 C는 침출수 내 오염물의 농도[M/L^3], D_{ij}는 분산지수[L^2/T]이다.

Monte Carlo 시뮬레이션

Monte Carlo 시뮬레이션은 주어진 정보 하에서 통계적으로 동등한 다수의 모델을 생성하고 해를 계산한 다음 결과를 통계적으로 해석하는 기법이다. 이는 모델의 입력치와 관련된 불확실성이 계산 결과에 미치는 영향을 추정하기 위하여 사용된다.

랜덤 수리전도도장 생성

Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하기 위하여 유체 유동과 용질 이동에 가장 큰 영향을 미치는 입력 인자인 수리전도도 장을 생성하였다. 불균질 수리전도도장은 spectral 알고리즘에 바탕을 둔 랜덤장 생성 기법으로 만들어졌다. 각 수리전도도장은 로그정규분포를 따른다고 가정하였고 평균 수리전도도 $\overline{K}$[L/T], x 및 z 방향의 연관길이(correlation length) λ_x[L]와 λ_z[L], ln K의 분산 $\sigma^2(\ln K)$을 이용하여 지구통계학적인 특성을 반영하였다.

통계학적 결과 해석

i번째로 생성된 수리전도도 장 $K_i(\boldsymbol{x})$에 대하여 지하수 유동과 오염물 이동 방정식의 해인 수두 $h_i(\boldsymbol{x})$와 농도 $C_i(\boldsymbol{x})$를 구한 다음 그 결과들의 분포를 해석함으로써 지반 내 침출수 농도를 확률적으로 예측할 수 있다. 랜덤장 생성에 따른 계산 비용 때문에 일반적으로 실현(realization)의 수 N은 제한되어 있으므로 표본 오차가 발생한다. 표본 오차는 $\frac{1}{\sqrt{N}}$에 비례하므로(Kitanidis, 1997) 사전 계산 결과를 바탕으로 비교적 안정적인 통계치를 얻을 수 있는 계산횟수를 결정하였다. 본 연구에서는 지구통계학적 인자별로 100개의 등가 수리전도도 장을 생성하고 그 결과를 분석하였다.

Monte-Carlo 시뮬레이션에 의해 도출된 농도 결과치들을 해석하기 위하여 점기반 통계치를 검토하였다. 특정 지점에서 구한 N개의 농도치들을 각각 C_1, C_2,..., C_i,..., C_N이라고 할 때 본 계산에서는 이들로부터 평균 $\overline{C}$와 표준편차 σ를 계산하였다. 또한 농도 분포의 상대적인 변동성을 정량화하기 위하여 평균에 대한 표준편차의 분율인 변이계수(coefficient of variation)를 구하였다.

$$CV=\frac{\sigma}{\overline{C}} \tag{4}$$

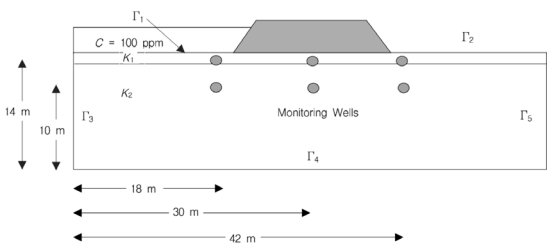


Fig. 1. Schematic of a landfill site for the simulation of leachate transport.

침출수 이동 해석

매립지 모델

침출수 이동 해석을 위한 매립지 모델을 설정하기 위하여 이승희와 유호식(1997), Ritterling and Stansbury (1998)가 유동 해석을 위하여 사용한 모델을 참고로 하였다. Fig. 1에 모식적으로 나타낸 것과 같은 이차원 매립지 모델을 대상으로 침출수 이동을 계산하였다.

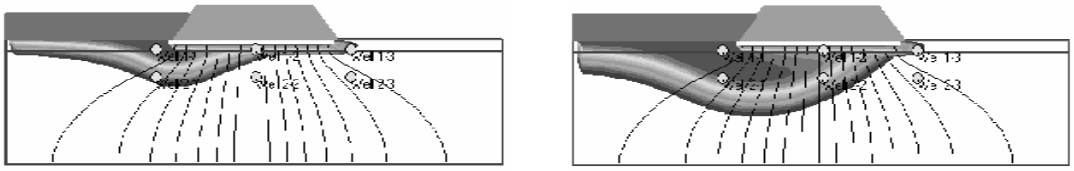
매립지 지층은 상부의 고투수층과 하부의 중투수층으로 구성된 이층 구조를 가진다고 가정하였다. 각 층의 평균 수리전도도는 심도에 따른 차이를 고려하여 $\overline{K}_1$ =2×10^{-4} cm/sec와 $\overline{K}_2$=1×10^{-5} cm/sec를 할당하였으며 유효 공극률 n_e는 0.3이다. 제방의 수리전도도와 공극률은 0으로 가정하여 제방을 통한 침출수의 이동을 차단하였다.

침출수의 유동을 해석하기 위한 경계조건은 일정수두 경계와 비유동 경계로 나누어 설정할 수 있다. 매립지 제방의 안 Γ_1과 바깥 Γ_2는 각각 3 m와 0 m의 일정 수두를 가정하였으며 나머지 경계에는 비유동 조건을 설정하였다.

$$h=h_o \text{ on } \Gamma_1,\ \Gamma_2 \tag{5}$$

$$K_{ij}\frac{\partial h}{\partial x_j}=0 \text{ on } \Gamma_3,\ \Gamma_4,\ \Gamma_5 \tag{6}$$

일반적으로 침출수는 매립지의 특성 및 폐기물 성상에 따라 넓은 범위의 농도 분포를 나타낸다(Ritterling and Stansbury, 1998). 미국환경보호국(EPA)은 오염물 이동을 해석하기 위하여 정상상태의 연속 오염원을 고려한 보수적 매립장 설계 요건을 제안한 바 있다(Sharp-Hansen *et al.*, 1990). 본 연구에서도 매립장 바닥에 침출수가 농도 100 ppm의 연속 오염원으로 작용한다고 가



(a) 3 years (b) 10 years

Fig. 2. Hydraulic head and concentration in the homogeneous landfill system after 3 and 10 years.

정하였고 나머지 경계에는 비유출 조건을 설정하였다.

$$C = C_o \text{ on } \Gamma_1 \tag{7}$$

$$D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j} = 0 \text{ on } \Gamma_2,\ \Gamma_3,\ \Gamma_4,\ \Gamma_5 \tag{8}$$

또한 t = 0일 때 지반 내 오염물 농도를 0으로 설정하여 초기 농도조건으로 사용하였다.

수치 계산을 위하여 이차원 지하수 유동 및 오염물 이동 시뮬레이션 모델인 IGW(Li and Liu, 2004)를 사용하였다. 매립지 지하 토양에서의 침출수 이동을 해석하기 위하여 모델을 120×40개의 균일 격자로 이산화하고 최대 시간 증분을 10일로 설정하여 10년까지 계산을 수행하였다. 수리전도도의 분포가 매립지 지반 내 오염물 이동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 지반 내에 농도 및 수두 관측을 위한 감시 지점을 지정하였다. 수직 방향으로의 이동을 측정하기 위하여 제1층과 2층 중 높이 14 m, 10 m 지점에 감시정을 설치하였고 수평방향의 이동을 측정하기 위하여 매립지 제방 안쪽의 18 m, 중간지점인 30 m, 그리고 42 m 지점에 감시정을 설치하여 총 6개 지점에서 농도를 관측하였다.

결과 해석

균질 지반 내 이동

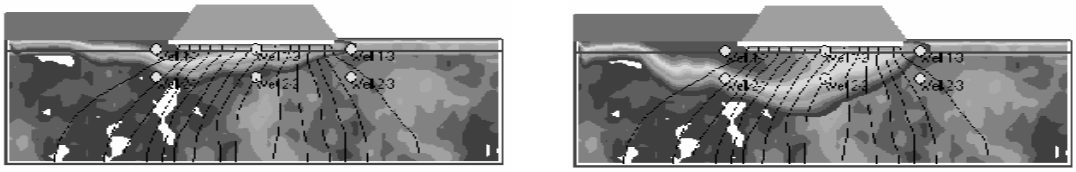
균질 매립지 지반 내에서 일정 농도의 연속 오염원인 침출수로부터 생성된 오염운의 이동을 계산하고 등수두선과 농도를 도시하여 비균질 지반 내 이동 결과와의 비교를 위한 기준으로 사용하였다. 3년 및 10년 경과 후 유동 해석의 결과를 나타낸 Fig. 2에 따르면 전반적으로 매립장 하부에서 오른쪽 방향의 정상상태 유동을 나타냈다. 특히 상부 지층의 수리전도도가 하부 지층보다 매우 크기 때문에 최초 3년간 유동이 집중되는 현상을 보인다. 일단 침출수가 1-3지점에 도달한 이후에는 수두구배가 작기 때문에 수평방향으로의 이동은 거의 일어나지 않고 추가적인 이동은 주로 수직 방향으로 발생하였다.

불균질 지반 내 이동

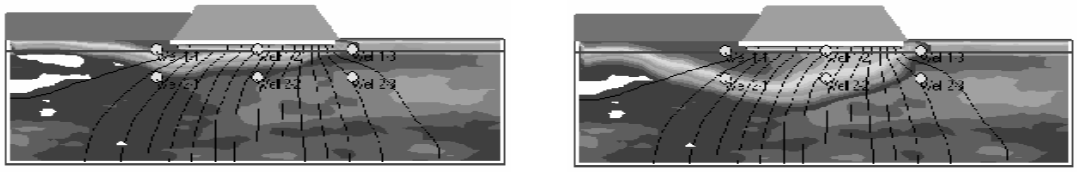
불균질 지반 내에서 오염물 이동을 계산하기 위하여 전체 수리전도도 장의 불균질 정도를 분산으로, 각 방향의 연관성을 연관 길이로 표현할 수 있다. 본 계산에서 사용한 지구통계학적 인자들의 값은 Table 1에 나타냈다. 수리전도도 값의 x 및 z 방향 연관길이와 ln K의 분산을 변화시키면서 비조건부 시뮬레이션(unconditional simulation)을 수행하여 임의의 랜덤 수리전도도 장을

Table 1. Geostatistical parameters of heterogeneous fields

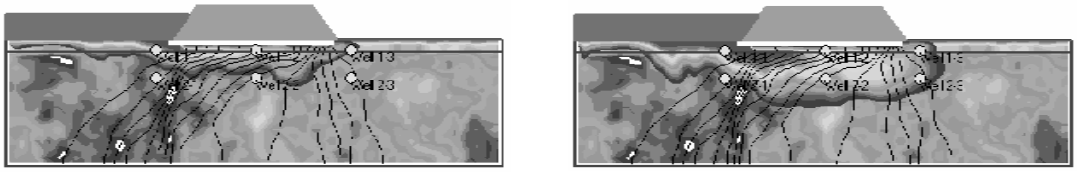
Cases	Geostatistical Parameters		
	λ_x [m]	λ_z [m]	$\sigma^2(\ln K)$
Homogeneous	-	-	0.0
Moderately Heterogeneous 1(MH1)	10	10	1.0
Moderately Heterogeneous 2(MH2)	50	10	1.0
Highly Heterogeneous 1(HH1)	10	10	5.0
Highly Heterogeneous 2(HH2)	50	10	5.0



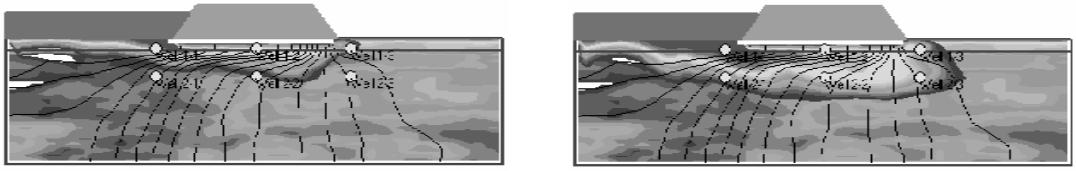
(a) Case MH1



(b) Case MH2



(c) Case HH1



(d) Case HH2

Fig. 3. Hydraulic head and concentration in the heterogeneous landfill system after 3 and 10 years.

생성하고 각각의 경우를 MH1, MH2, HH1, HH2로 명명하였다.

적절한 불균질 수리전도도 장의 생성 여부를 확인하고 지반 불균질성이 침출수 이동에 미치는 영향을 시각적으로 나타내기 위하여 계산 사례를 제시하였다. 각 경우별로 동일한 seed 번호에 의해 구현된 특정의 실현에 대하여 3년 및 10년 후의 계산 결과를 Fig. 3에 예시하였다. Fig. 3(a),(b)와 비교할 때 ln K의 분산이 커짐에 따라 Fig. 3(c),(d)에서 수리전도도 장의 변동성이 확대되었다. 또한 (b)와 (d)의 수리전도도 분포는 (a)와 (c)에 비하여 x 방향의 연관성이 크게 나타남을 보여주고 있다. 균질 지층의 경우인 Fig. 2와 비교할 때 지반의 불균질성이 커질수록 등수두선의 불규칙적인 변동과 왜곡이 커지고 이에 따라 오염물의 농도 분포도 변화되었다.

등확률의 수리전도도장에 대하여 수행된 100회의 계산 결과를 이용하여 지반의 불균질성이 오염물 이동에 미치는 영향을 검토하였다. 각 경우별로 3년 및 10년 경과 후의 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 계산한 점기반 통계치들을 Table 2에 요약하여 제시하였다. 모든 실현의 결과 평균치는 최적 추정치(best estimate)와 동일하다(Kitanidis, 1997).

Table 2(a)는 시간의 경과에 따라 각 지점에서의 오염물 농도가 증가함을 보인다. 최초 3년간은 고투수성의 1번층을 통하여 오염물이 많이 이동하였으며 이후 2번층을 통한 이동량이 증가하였다. 감시정 지점에서 오염물 농도의 표준 편차를 Table 2(b)에 요약하였다. 모든 경우에 1-1 지점의 오염물 농도는 오염원 농도에 근접한 수준으로 증가하였으므로 10년 경과 후 표준 편차는 감소

Table 2. Comparison of mean and standard deviation of concentrations at monitoring well locations after 5 and 10 years

(a) mean

case	3 years			10 years		
	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3
	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3
homo	98.4	48.8	11.1	99.9	49.2	12.5
	10.7	0.0	0.0	87.6	57.8	0.0
MH1	97.4	42.4	7.0	99.8	44.4	14.6
	19.2	3.6	0.0	77.1	52.0	0.9
MH2	97.6	44.5	7.9	99.8	46.5	17.3
	19.9	3.9	0.0	78.6	49.9	2.1
HH1	94.2	32.5	5.6	98.6	35.6	19.0
	25.2	12.0	0.7	57.3	41.2	6.5
HH2	95.3	36.2	10.4	99.0	40.2	28.9
	30.7	19.4	1.6	63.7	44.0	13.8

(b) standard deviation

case	3 years			10 years		
	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3
	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3
homo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MH1	2.7	4.4	2.5	0.2	5.7	7.4
	21.0	6.4	0.0	22.1	30.8	3.9
MH2	2.5	5.1	3.2	0.3	6.5	10.5
	19.5	7.4	0.0	21.5	34.3	8.6
HH1	7.2	9.9	5.9	2.6	11.0	16.1
	30.8	19.1	4.3	38.0	30.9	14.6
HH2	6.6	12.5	13.5	2.2	13.3	24.6
	33.5	26.7	9.3	36.3	37.4	25.6

하였다. 오염원과의 거리가 가까운 1-2 및 2-1 지점에서는 대부분의 경우 40%이상의 농도를 나타냈으며 표준편차가 약간 증가하는데 그쳤다. 그 외 지점에서는 시간의 경과에 따라 농도 분포의 표준편차가 크게 증가하였다. 이는 오염원에서의 거리가 멀수록 불균질 지층의 통과 거리 및 시간이 길어지므로 지반 불균질성의 영향이 증가하여 농도의 변동성이 커지기 때문이다.

MH1과 HH1, MH2와 HH2를 비교하면 $\sigma^2(\ln K)$가 1.0에서 5.0으로 증가함에 따라 각 지점에서의 표준 편차가 크게 증가하였다. 이는 수리특성의 불균질성이 오염물 이동의 변동성을 크게 증가시켰음을 의미한다. x 및 z 방향의 연관길이의 비율 변화에 따른 불균질성의 이방성도 평균 및 표준편차에 약간의 영향을 미치고 있다. $\frac{\lambda_x}{\lambda_z}=5$일 경우 $\frac{\lambda_x}{\lambda_z}=1$과 비교하여 오염원으로부터 x 방향으로 인접한 1-1, 2-1 지점에서는 거의 유사한 표준편차를 나타내고 있다. 오염원에서 거리가 멀어짐에 따라 즉 1-2, 1-3, 2-1, 2-3 지점에서는 $\frac{\lambda_x}{\lambda_z}=5$일 경우 표준편차가 커졌다.

10년간 감시정 1-1 지점에서의 관찰된 평균 농도, (평균 농도±표준편차)의 범위, 표준편차를 Fig. 4에 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 매립장에서의 누출량 증가로 인하여 오염물 농도는 증가하였으며 일정 농도에 도달할 때까지 표준 편차도 증가하였다. 이후 표준 편차가 급격히 감소하다가 일정한 수준을 유지하고 있다.

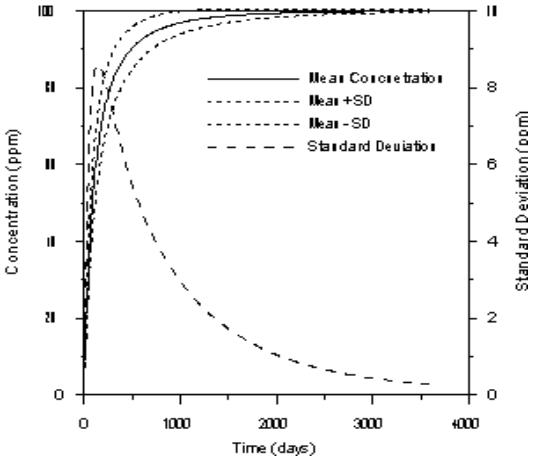


Fig. 4. Mean and variability of concentration at the monitoring well 1-1 for 10 years.

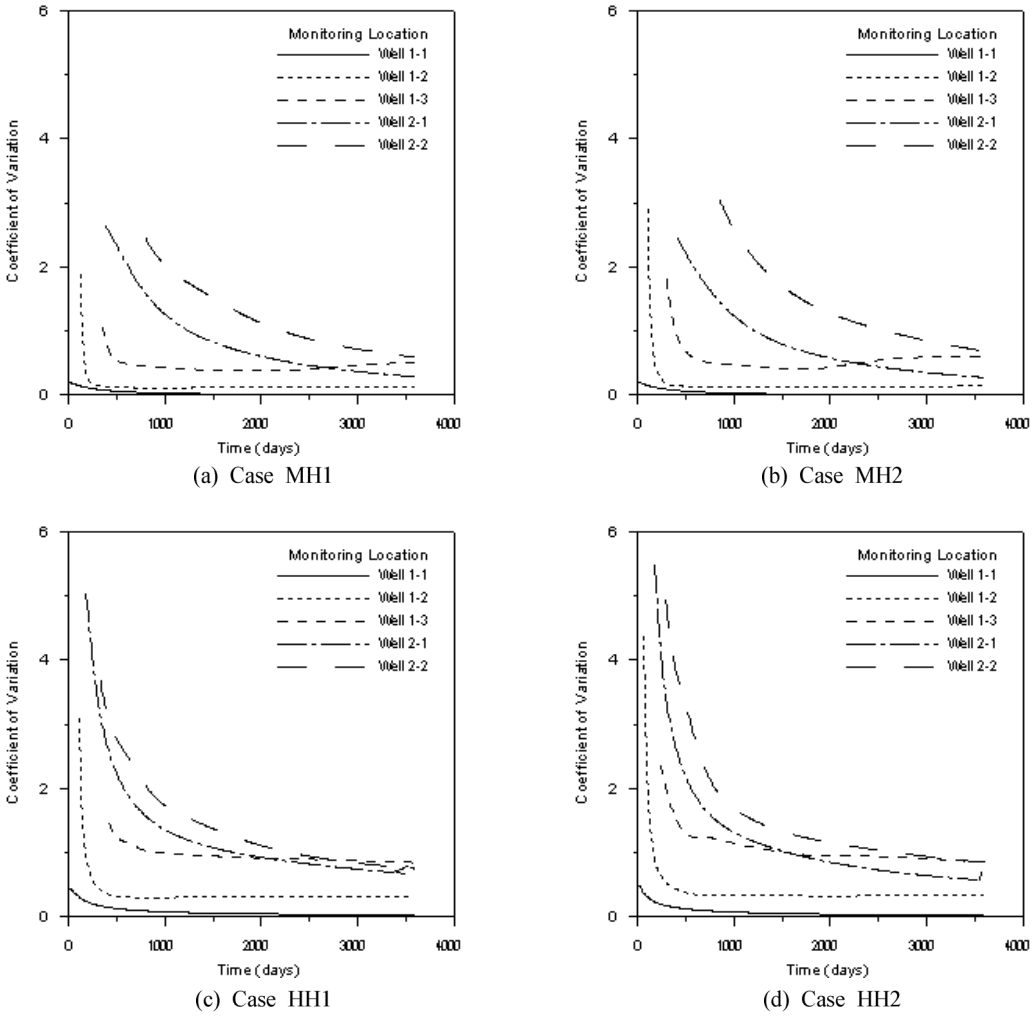
다른 감시정 지점 1-2와 2-1에서도 이와 유사한 경향을 보이나 최대 표준편차를 나타내는 시점의 평균 농도는 1-1보다 작았다. 그 외의 3개 지점에서는 10년 기간 내에 최대 표준편차 시점에 도달하지 못하고 지속적으로 증가하였다. 오염원에서 멀어질수록 농도의 변동이 심해져 표준편차가 커지는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 오염원에서 멀어질수록 오염물의 이동 거리가 증가하므로 지반 불균질성이 미치는 영향이 커짐을 의미한다.

지반 불균질성으로 인한 농도의 변동을 정량적으로 나타내기 위하여 감시정 지점에서의 변이계수를 계산하고 비교하였다. 평균 농도가 1 ppm 이상인 시점부터 변이계수를 계산하였으며 감시정 2-3 지점에서는 시뮬레이션 기간 동안 기준 농도를 초과하지 않았으므로 비교 대상에서 제외하였다. Fig. 5의 (a)-(d)에 계산 결과를 제시하였으며 비교를 용이하게 하기 위하여 세로축의 범위를 고정하였다.

모든 경우에 변이계수는 초기에 급격한 감소 경향을 나타내다가 일정 수준의 값을 유지하는 경향을 보인다. 또한 오염원에서 거리가 멀어질수록, 제2층의 측정점으로 갈수록 변이계수의 값이 증가한다. Fig. 5의 (a), (b)를 (c), (d)와 비교하면 지반의 불균질성이 커질수록 농도값의 변동이 커짐을 알 수 있다. x 방향의 연관길이의 변화가 농도의 변동에 미치는 영향은 분명하게 나타나지 않았다.

결 론

불균질 매립지반 수리전도도 분포 특성이 매립장으로부터 누출된 오염물의 이동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2층 구조의 매립지층 내에서 10년간에 걸쳐 정상상태의 유체 유동 및 비정상상태의 오염물 이동에 대한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 누출 초기 침



(a) Case MH1 (b) Case MH2

(c) Case HH1 (d) Case HH2

Fig. 5. Coefficient of variation of concentration at the monitoring well locations for 10 years.

출수는 수두 구배가 큰 고투수성의 상부층을 통하여 이동하였으며 이후 수직 방향의 이동이 증가하였다. 매립지반 내 각 감시지점에서는 시간이 경과함에 따라 매립장에서의 누출량 증가로 인하여 오염물 농도가 증가하였으며 일정 농도에 도달할 때까지 표준 편차도 증가하였다. 측정한 오염물 농도의 점기반 통계치들은 랜덤 수리전도도 장의 지구통계학적 특성이 지반 내 오염물 이동에 큰 영향을 미치고 있음을 보여주었다. 수리특성의 불균질성이 커질수록 오염물 이동의 변동성을 크게 증가시켜 특정 지점에서의 농도 표준편차 및 변이계수가 증가하였다. 또한 오염원에서의 거리가 멀수록 불균질 지층의 통과 거리 및 시간이 길어지므로 지반 불균질성의 영향이 증가하여 농도의 변동성이 커지는 경향을 보였다. x 방향의 연관길이의 변화에 따른 불균질성의 이방성이 감시지점의 농도 변동에 미치는 영향은 분명하게 나타나지 않았다.

매립지반의 불균질성은 농도 예측치의 변동성에 큰 영향을 미치므로 오염물 이동 경로 파악 및 경제적인 복원 설계에 필수적인 지구통계학적 통계인자들을 얻는 것이 필요하다. 그러나 본 연구에서 고려한 것과 같은 대다수의 소형 매립장에서 지반의 완전 특성화(characterization)는 경제적으로 매우 비효율적일 수 있으므로 적절한 균형점을 찾는 것이 중요하다고 판단된다.

참고문헌

권재필, 박홍석, 김승현, 2001, “Monte carlo 해석법을 이용한 매립장 침출수의 중금속 농도 예측 모델 개발,” *대한환경공학회지*, 제23권, 1호, pp. 163-174.

이승희, 유호식, 1997, “매립지 지반에서의 침출수 거동현상에 대한 민감도 분석,” *대한환경공학회지*, 제19권, 9호, pp. 1135-1146.

Aksoy, A. and Culver, T.B., 2004, “Impacts of Physical and Chemical Heterogeneities on Aquifer Remediation Design,” *J. of Water Resour. and Management*, Vol. 130, No. 4, pp. 311-320.

Boggs, J.M., Young, S.C., Beard, L.M., Gelhar, L.W., Rehfeldt, K.R., and Adams, E.E., 1992, “Field Study of Dispersion in a Heterogeneous Aquifer. 1: Overview and Site Description,” *Water Resour. Res.*, Vol. 28, No. 12, pp. 3281-3291.

Dho, N. M., Koo, J. K., and Lee S. R., 2002, “Prediction of Leachate Level in Kimpo Metropolitan Landfill Site by Total Water Balance,” *Environ. Monitoring and Assessment*, Vol. 73, pp. 207-219.

Hudak, P.F., 2001 “Monitoring Groundwater at Landfills Equipped with Leachate Collection Systems,” *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 66, pp. 156-161.

Khanbilvardi, R.M., Ahmed, S., and Gleason, P.H., 1995, “Flow Investigation for Landfill Leachate (FILL),” *J. of Environ. Eng.*, Vol. 121, No. 1, pp. 45-57.

Kitanidis, P.K., 1997, *Introduction to Geostatistics: Application to Hydrogeology*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Lee, K.K., Kim, Y.Y., Chang H.W., and Chung S.Y., 1997, “Hydrogeological Studies on the Mechanical Behavior of Landfill Gases and Leachate of the Nanjido Landfill in Seoul, Korea,” *Environ. Geol.*, Vol. 31, No. 3, pp. 185- 198.

Li, S.-G. and Liu, Q., 2004, “Interactive Ground Water: An Innovative Digital Laboratory for Groundwater Education and Research,” *Comp. Applic. in Eng. Edu.*, Vol. 11, No. 4, pp. 179-202.

Porter, E.P. and Gaylord, D.R., 1990, “Influence of Aquifer Heterogeneity on Contaminant Transport at the Hanford Site,” *Ground Water*, Vol. 28, No. 6, pp. 900-909.

Ritterling, J.M. and Stansbury, J.S., 1998, “Alternative Use of MULTIMED Model for Subtitle D Landfill Applications,” *Prac. Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, Vol. 2, No. 4, pp. 172- 182.

Sharp-Hansen, S., Traverse, C., Hummel, P., and Allison, T., 1990, *A Subtitle D Landfill Application Manual for the Multimedia Exposure Assessment Model (MULTIMED)*, U.S. EPA, Athens, GA.

Sophocleous M., Stadnyk, N. G., and Stotts, M., 1996, “Modeling Impact of Small Kansas Landfills on Underlying Aquifers,” *J. of Environ. Eng.*, Vol. 122, No. 12, pp. 1067-1077.

이 근 상

현재 경기대학교 토목환경공학부 환경공학전공 부교수
(本 學會誌 第41卷 第2号 參照)