한국지하수토양환경학회지 Vol. 11, No. 5, pp. 1~8, 2006 ≪原著≫

매립지반의 화학적 불균질성이 침출수 이동에 미치는 영향

이 근 상*
경기대학교 환경공학과

Impacts of Chemical Heterogeneities in Landfill Subsurface Formations on the Transport of Leachate

Kun Sang Lee*
Department of Environmental Engineering, Kyonggi University

ABSTRACT

The objective of this study is to assess impacts of sorption heterogeneity on the transport of leachate leaked from unlined landfill sites and is accomplished by examining the results from a series of Monte-Carlo simulations. For random distribution coefficient (K_d) fields with four different levels of heterogeneity ranging from homogeneous to highly heterogeneous, the transport of leachate was investigated by linking a saturated flow model with a contaminant transport model. Impacts of a chemical heterogeneity were evaluated using point statistics values such as mean, standard deviation, and coefficient of variation of the concentration obtained at monitoring wells from 100 Monte-Carlo trials. Inspection of point statistics shows that the distribution of distribution coefficient in the landfill site proves to be an important parameter in controlling leachate concentrations. In comparison to homogeneous sorption, heterogeneous K_d-fields produce the variability in the leachate concentration for different realizations. The variability increases significantly as the variance in the K_d-field and the travel time between source and monitoring well increase. These outcomes indicate that use of a constant homogeneous K_d value for predicting the transport of leachate can result in significant error, especially when variability in K_d is high.

Key words : Landfill, Leachate transport, Distribution coefficient, Heterogeneity, Monte-Carlo simulation

요 약 문

본 연구에서는 매립장에서 하부 지반으로 누출된 침출수의 이동에 흡착 불균질성이 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 차수막이 설치되어 있지 않은 매립장을 대상으로 일련의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 검토하였다. 균질한 지층에서 강불균질 지층에 이르는 다양한 불균질도를 가진 랜덤 분배계수 장에 대하여 포화 유동 모델과 오염물 이동 모델을 연결시켜 침출수의 이동을 계산하였다. 100회에 걸쳐 수행된 Monte-Carlo 시뮬레이션의 결과치로부터 얻은 평균, 표준편차, 변이계수와 같은 점기반 통계치들을 이용하여 화학적 불균질도의 영향을 평가하였다. 통계치 결과에 따르면 매립지반의 분배계수 분포가 지반 내 침출수 농도를 결정하는데 매우 중요한 인자로 나타났다. 균질 흡착의 경우와 비교할 때 불균질 분배계수 장에서는 실현 간 침출수 농도 분포의 변동성이 나타났다. 분배계수 장의 분산 및 오염원과 감시정 간의 이동 시간이 커질수록 농도의 변동성이 증가하였다. 이러한 결과는 화학적 변동성이 큰 지반 내에서의 침출수 이동을 예측할 때 단일 분배계수 값을 사용하면 상당한 오차를 유발할 수 있음을 나타낸다.

주제어 : 매립장, 침출수 이동, 분배계수, 불균질성, Monte-Carlo 시뮬레이션

*Corresponding author : kslee@kyonggi.ac.kr
원고접수일 : 2006. 4. 6 게재승인일 : 2006. 10. 20
질의 및 토의 : 2006. 12. 31 까지

1. 서 론

일반적으로 매립 폐기물은 안정화 기간이 길기 때문에 장기간 침출수가 발생하게 된다. 1991년 매립지 설치기준이 폐기물관리법으로 구체화되기 전 사용되었던 차수 시설이 없는 매립지에서는 발생한 침출수가 쉽게 주위 환경으로 이동할 수 있다. 매립지 바닥을 통하여 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.

침출수에 대한 효율적 관리를 위해서 침출수의 지반 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. 이러한 이유로 인하여 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 수리지질학적 균질 지반 내에서의 유동 계산(이승희와 유호식, 1997), 간단한 분포를 갖는 불균질 장 내에서의 중금속 농도를 예측(권재필 등, 2001), 랜덤 불균질 수리전도도 장을 가진 매립 지반 내에서의 침출수 이동 계산(이근상, 2005) 등에 관한 연구결과들이 발표된 바 있다.

침출수의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 알려져 있는 지반 환경의 물리화학적 특성은 공간 변동성이 매우 심한 것으로 알려져 있다. 그러나 제한된 수의 샘플링에서 얻은 자료로는 해석 대상 매립지의 물성에 대하여 완전한 결정론적 묘사가 불가능하므로 통계적으로 불확실성을 반영하여 해석하는 것이 유용하다. 지반 내 유체 유동과 오염물 이동에 가장 큰 영향을 미치는 수리전도도는 지질학적 특성에 의하여 불규칙적 또는 경향성을 가지고 위치에 따라 변동을 보이는 불균질 특성을 가지고 있다(Poeter and Gaylord, 1990; Boggs et al., 1992; Illangasekare and Saenton, 2004). 현재까지의 연구는 대부분 수리전도도의 불확실성을 랜덤 인자로 처리하여 수리지질학적으로 불균질한 지반 내 유체 유동을 해석한 경우가 대부분이다. 그러나 수리전도도 외에 오염물 이동 특성과 관련된 다른 지반 특성의 불균질성은 종종 무시되고 왔으며 이러한 특성들이 오염물 이동에 미치는 영향을 규명할 필요성이 증가하고 있다.

흡착(sorption)은 침출수의 지반 내 이동에 영향을 미칠 수 있는 전형적인 화학적 질량 전달 프로세스 중 하나로서 분배계수(distribution coefficient)로 계량화할 수 있다. 분배계수는 오염물 이동에 영향을 미치는 화학적 인자 중 공간 변동성이 가장 커서 모델링 결과의 불확실성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Goyette and Lewis, 1995; MacIntyre et al., 1998; Thornton et al., 2000; Zhang and Brusseau, 2004). 본 연구에서는 지반 내 분배계수의 불균질 분포에 따른 흡착 불균질성이 매립장으로부터 누출된 오염물의 이동에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 화학적으로 불균질한 다수의 등확률 지반을 묘사하기 위하여 지구통계학적 기법으로 랜덤 분배계수 장을 생성하였다. 각 실현(realization) 별로 침출수 이동을 계산하기 위하여 포화상태의 정상상태 유동방정식과 천이상태 물질이동방정식을 적용하였다. 다수의 등확률 불균질 장에 대한 침출수 유동 및 이동 계산 결과로부터 지반 내 침출수 농도를 통계적으로 해석하는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 계산 결과를 화학적으로 균질한 지반의 경우와 비교하여 불균질 장의 특성을 나타내는 지반 내 지구통계학적 인자들이 침출수의 거동에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 침출수 이동의 이론

2.1. 침출수 이동방정식

2.1.1. 유동 방정식

매립지에서 발생한 침출수의 지반 내 거동에 가장 큰 영향을 미치는 메커니즘은 이류이다. 일반적으로 함수율이 증가하면 유효 수리전도도가 비선형적으로 증가하므로 동일한 수두 구배 하에서 이동 속도가 증가한다. 따라서 함수율이 100%인 완전 포화 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 j방향의 좌표를 나타낸다.

사전 수치 계산의 결과에 따르면 본 계산에서 설정한 경계 조건 하에서 비교적 단시간 내에 정상상태에 도달한다. Darcy 법칙을 정상상태의 연속방정식에 대입하면 포화층 내에서의 정상 상태 유체 유동을 묘사하는 미분방정식을 얻을 수 있다.

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

2.1.2. 이동 방정식

매립지에서 누출된 침출수의 이동 중 생화학적 반응에 의한 분해나 생성을 무시할 수 있다고 가정하면 매립지 지반 내에서 오염물의 이동은 보존성 용질의 질량전달방정식인 천이 이류-분산방정식으로 묘사할 수 있다.

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

여기에서 C는 침출수 내 오염물의 농도[M/L^3], D_{ij}는 분산지수[L^2/T], ρ_b는 고체의 총밀도(bulk density)[M/L^3], C^*은 고체에 흡착된 오염물의 농도[M/L^3]이다.

수상과 고체상 간의 평형 이동을 고려할 때 선형 흡착 등온선을 가정하면 흡착된 오염물의 농도는

$$C^*=K_d C \tag{4}$$

로 나타낼 수 있다. K_d는 용액 농도에 대하여 고체 입자에 흡착된 오염물 농도의 비를 나타내는 분배계수[L^3/M]로서 지반 내에서 침출수의 거동에 직접적으로 영향을 미치는 인자이다. 화학적으로 불균질 매질의 경우 분배계수는 공간의 함수 $K_d(\mathbf{x})$로 주어지게 된다. 식 (3)과 (4)를 결합하면

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(n_e D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial(n_e v_i C)}{\partial x_i}=\frac{\partial(n_e R_d C)}{\partial t} \tag{5}$$

이 된다. 여기에서 R_d는 이동 중 오염물의 감쇠를 나타내는 지연인자(retardation factor)로서 다음 식으로 정의된다.

$$R_d=1+\frac{\rho_b K_d}{n_e} \tag{6}$$

2.2. Monte Carlo 시뮬레이션

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

2.2.1. 랜덤 분배계수 장 생성

Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하기 위하여 본 연구에서 고려하는 입력 인자인 랜덤 분배계수 장을 생성하였다. 분배계수의 불균질 분포에 관한 연구에 따르면 분배계수는 로그 정규분포를 따르며 수직 방향으로의 변동성이 보다 큰 것으로 관측된 바 있다(MacIntyre et al., 1998; Aksoy and Culver, 2004; Zhang and Brusseau, 2004). 로그 정규분포를 따르는 분배계수 장의 확률밀도함수(PDF) $f(K_d)$는 다음과 같다.

$$f(K_d)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}K_d\sigma}\exp\left[-\frac{(\ln K_d-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{7}$$

여기에서 μ와 σ^2은 ln K_d의 평균과 분산이다.

분배계수 장은 평균 분배계수 $\overline{K_d}$[L^3/M], x 및 z 방향의 연관길이(correlation length) λ_x[L]와 λ_z[L], ln K_d의 분산 σ^2(ln K_d)를 이용하여 지구통계학적인 특성을 반영하였다. 수리전도도와 분배계수 간의 연관성의 존재 여부에 대한 연구 결과는 아직 충분치 않으므로(Aksoy and Culver, 2004) 두 인자 간의 연관성은 무시하였다. 불균질 분배계수 장은 spectral 알고리즘에 바탕을 둔 랜덤장 생성 기법으로 만들어졌으며 seed 번호에 의해 생성된 특정의 불균질 장을 실현이라고 부른다. 한정된 실현 횟수 N에 따른 표본 오차는 $\frac{1}{\sqrt{N}}$에 비례한다(Kitanidis, 1997). 사전 계산 결과에 따라 비교적 안정적인 통계치를 얻을 수 있는 N을 100으로 결정하고 계산을 수행하였다.

2.2.2. 통계학적 결과 해석

i번째로 생성된 분배계수 장 $K_{di}(\mathbf{x})$에 대하여 지하수 유동과 오염물 이동 시뮬레이션을 수행하여 지반 내 수두 $h_i(\mathbf{x})$와 농도 $C_i(\mathbf{x})$를 구한다. 지구통계학적 인자별로 생성된 등가 분배계수 장에 대하여 수행된 계산 결과들의 분포를 해석함으로써 지반 내 침출수 농도를 확률적으로 예측할 수 있다.

Monte-Carlo 시뮬레이션에 의해 도출된 일련의 농도 결과치를 해석하기 위하여 대푯값(representative value)과 산포도(spread) 등의 점기반 통계치(point statistics)를 계산하였다. 특정 지점에서 N개의 농도치들을 각각 C_1, C_2,..., C_i,..., C_N이라고 할 때 대푯값으로는 평균 $\overline{C}$, 산포도는 표준편차 σ로 평가하였다. 또한 농도 분포의 상대적인 변동성을 정량화하기 위하여 평균에 대한 표준

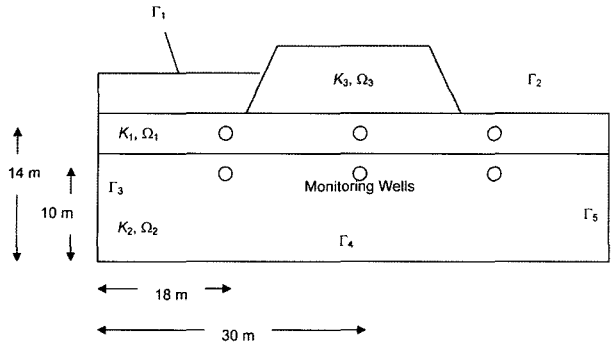


Fig. 1. Schematic of a landfill site for the simulation of leachate transport.

편차의 분율인 변이계수(coefficient of variation)를 계산하였다.

3. 침출수 이동 해석

3.1. 매립지 모델

매립지 모델을 설정하기 위하여 이승희와 유호식(1997), Rillerling and Stansbury(1998), 이근상(2005)이 유동 해석을 위하여 사용한 모델을 참고로 하였다. Fig. 1에 모식적으로 나타낸 것과 같은 이차원 매립지 모델을 대상으로 침출수 이동을 계산하였다.

매립 지반은 심도에 따라 상부의 고투수층 Ω_1과 하부의 중투수층 Ω_2로 구성된 이층 구조를 가지며 각층의 수리전도도는 $K_1 = 2 \times 10^{-4}$ cm/sec, $K_2 = 1 \times 10^{-5}$ cm/sec이다. 수리전도도는 분배계수와 연관성이 없는 독립 변수로 가정하였으므로 일정한 값을 가진다. 계산의 편의를 위하여 수리전도도를 제외한 인자들은 전체 하부 지반에 걸쳐 동일한 값을 갖는다고 가정하였다. 상하 지층 모두 유효공극율 n_e는 0.3, 고체의 총밀도 ρ_b는 2.65 g/cm^{3}이다. 제방 Ω_3는 비활성 영역으로 지정하여($n_e = 0$, $K = 0$, $D = 0$, $K_d = 0$) 제방을 통한 침출수의 이동을 차단하였다.

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

$$h = h_o \text{ on } \Gamma_1 \text{ and } \Gamma_2 \tag{8}$$

$$K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} = 0 \text{ on } \Gamma_3,\ \Gamma_4, \text{ and } \Gamma_5 \tag{9}$$

매립장에서 생성된 농도 100 ppm의 침출수가 수두 구배에 의하여 지반으로 침투한다고 가정하였다. 이는 매립장 바닥 Γ_1에 일정 농도 경계 조건을 나타내는 연속 오염원으로 작용하여 지반 내에 오염운을 형성하며 나머지 경계에는 비유출 조건을 설정하였다.

$$C = C_o \text{ on } \Gamma_1 \tag{10}$$

$$D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = 0 \text{ on } \Gamma_2,\ \Gamma_3,\ \Gamma_4, \text{ and } \Gamma_5 \tag{11}$$

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

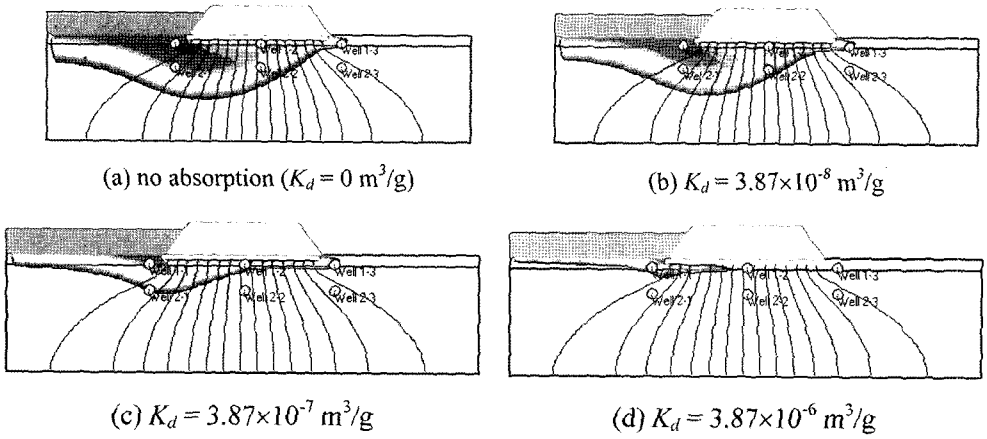
수치 계산을 위하여 이차원 지하수 유동 및 오염물 이동 시뮬레이션 모델인 IGW(Li and Liu, 2004)를 사용하였다. 분배계수의 분포가 매립지 지반 내 오염물 이동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 지반 내에 농도 관측을 위한 감시정을 설치하였다. 균질 지반에 대한 계산 결과를 바탕으로 수직 방향으로의 이동을 측정하기 위하여 제1층과 2층 중 높이 14 m, 10 m 지점에 감시정을 배치하였고 수평방향의 이동을 측정하기 위하여 매립지 제방 안쪽의 18 m, 중간지점인 30 m, 그리고 42 m 지점에 감시정을 배치하여 총 6개 지점에서 관측을 수행하였다.

3.2. 결과 해석

3.2.1. 균질 지반 내 이동

비균질 지반에 대한 계산 결과와 비교하기 위하여 다양한 범위의 분배계수값을 나타내는 균질 지반에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 분배계수가 각각 0-3.87 $\times 10^{-6}$ m^3/g 범위의 값을 갖는 화학적 균질 매립지 지반 내에서 침출수로부터 생성된 오염운의 이동을 계산하였다. 10년 경과 후 유동 해석에 따른 등수두선을 나타낸 Fig. 2에 따르면 전반적으로 매립장 하부에서 오른쪽 방향의 정상상태 유동을 나타내며 상부층 제방 하부의 수두구배가 크게 나타남을 알 수 있다. 동일한 유동 조건 하에서 분배계수의 값을 증가시키면서 흡착이 없는 경우($K_d = 0$ m^3/g)의 결과를 나타낸 Fig. 2(a)와 비교하였다. Fig. 2(b), (c), (d)는 지반 내 고체 입자 표면에 흡착되는 양이 커짐에 따라 오염운의 이동 범위가 현저하게 감소함을 보여주고 있다.

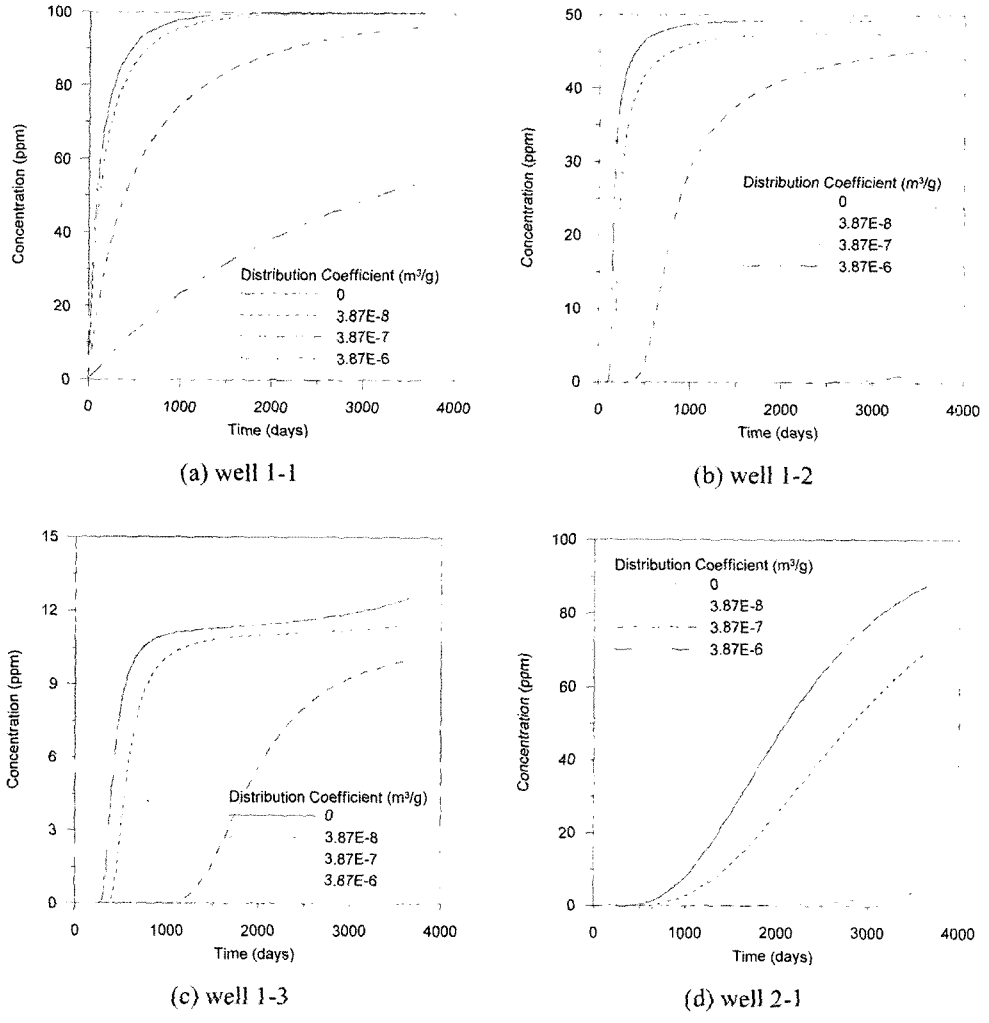
서로 다른 분배계수 조건 하에서 10년간 4개 감시정 지점에서의 관찰된 농도를 Fig. 3에 나타내었다. 감시정 1-1 지점의 농도 변화를 나타낸 Fig. 3(a)에 따르면 흡착이 일어나지 않거나 분배계수 값이 작을 경우 시간이 경과함에 따라 매립장에서의 누출량 증가로 인하여 오염물 농도는 급격히 증가하였으며 오염원 농도에 근접하는 수준이 되면서 증가 속도가 감소하기 시작하였다. 분배계수



(a) no absorption (K_d = 0 m^3/g) (b) $K_d = 3.87\times10^{-8}$ m^3/g

(c) $K_d = 3.87\times10^{-7}$ m^3/g (d) $K_d = 3.87\times10^{-6}$ m^3/g

Fig. 2. Hydraulic head and concentration in the chemically homogeneous landfill systems with different K_d values after 10 years.



(a) well 1-1 (b) well 1-2

(c) well 1-3 (d) well 2-1

Fig. 3. Concentrations at monitoring wells 1-1, 1-2, 1-3, and 2-1 in the chemically homogeneous landfill systems with different K_d values.

값이 커짐에 따라 흡착량 증가에 따른 이동 지연 현상이 분명하게 나타나기 시작하여 오염 시작 시점이 늦어지고 이후에도 낮은 농도를 나타내고 있다. 이같은 현상은 오염원에서 거리가 먼 감시정 1-2, 1-3, 2-1의 결과를 나타

낸 Fig. 3(b), (c), (d)에서 더욱 분명하게 관찰할 수 있다. 감시정 1-2, 1-3 지점의 경우 $K_d = 3.87 \times 10^{-6}$ m^3/g 일 때 농도는 0에 가까웠다. 이같은 현상은 오염물의 이동 거리 및 시간의 증가에 따른 흡착량 증대로 인하여 지연 효과가 더욱 크게 나타난 까닭에 발생한 것이다.

3.2.2. 불균질 지반 내 이동

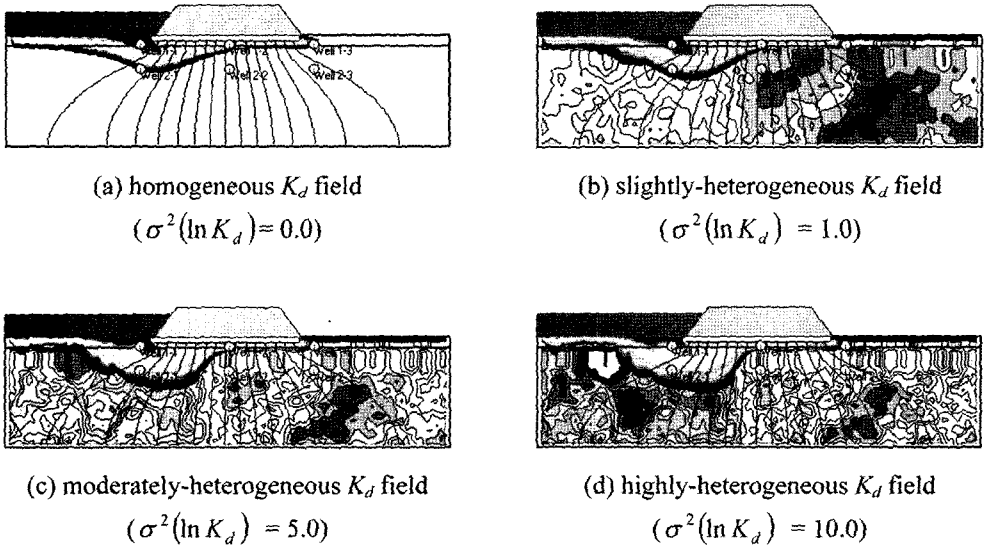
랜덤 분배계수 장의 불균질 정도를 분산으로, 각 방향의 연관성을 연관 길이로 표현할 수 있다. 일반적으로 평균 분배계수 $\overline{K_d}$는 지층 내 유기물 함량과 관련되어 있으며 지층에 관계없이 3.87×10^{-7} m^3/g으로 가정하였다. 분배계수 값의 x 및 z 방향 연관길이를 10 m로 일정하게 설정하고 ln K_d의 분산 $\sigma^2(\ln K_d)$를 0, 1, 5, 10으로 변화시키면서 각각의 경우를 균질, 약불균질, 중불균질, 강불균질 지층으로 명명하였다. 이같은 변동성은 Aksoy and Culver(2004) 및 Zhan and Brusseau(2004)가 모델링에 사용한 인자값을 참고하여 가상의 매립 지층에 설정한 것으로 일반적으로 현장에서 관측된 변동 범위보다 훨씬 큰 것이다.

적절한 불균질 분배계수 장의 생성 여부를 확인하고 지반 불균질성이 침출수 이동에 미치는 영향을 시각적으로 나타내기 위하여 동일한 seed 번호에 의해 구현된 특정의 실현에 대한 분배계수 장과 계산 결과를 Fig. 4에 예시하였다. 모든 경우에 수리전도도는 동일하므로 유동 계산의 결과 얻어진 등수두선도 동일하다. 화학적 불균질 지층을 나타낸 Fig. 4(b), (c), (d)를 비교하면 비슷한 위치에서 분배계수의 큰 값과 작은 값이 나타나고 있으나 그 크기는 변하고 있다. 즉 ln K_d의 분산이 커짐에 따라 분배계수 장 내에 극단치들이 생성되므로 평균은 동일하나 값의 변동성이 확대되어 불균질성이 증가하였다. 균질 흡착 조건 하에서의 결과를 나타낸 Fig. 4(a)와 비교할 때 지반의 불균질성이 커질수록 분배계수값의 변동이 커지고 이에 따라 오염물의 농도 분포도 불규칙적으로 변화되었다. 이러한 거동은 분배계수의 지반 내 분포 양상에 따른 흡착량의 공간적 변동에 기인한 것이다.

화학적 불균질 지반 내에서 오염물 이동을 계산하기 위하여 동일한 변동성을 가지는 등확률의 분배계수 장을 생성하고 유동 및 오염물 이동 방정식의 해를 계산하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 계산 결과를 이용하여 분배계수의 공간 불균질성이 오염물 이동에 미치는 영향을 통계적으로 평가하였다.

본 계산에서 사용한 지구통계학적 인자들의 값은 Table 1에 나타냈다. 주어진 입력 인자들을 이용한 실현 별로 고흡착 영역과 저흡착 영역의 위치가 변하기 때문에 안정된 통계치를 얻기 위하여 각 경우별로 100회의 분배계수 장을 생성하였다. 비조건부 시뮬레이션을 수행하여 생성된 각 분배계수 장에 대하여 10년간 수행된 시뮬레이션의 결과 중 일정 수준 이상의 의미있는 농도를 나타낸 감시정 1-1, 1-2, 1-3, 2-1 지점에서 3년 및 10년 경과 후의 통계 결과를 Table 1에 요약하여 제시하였다. 모든 실현의 결과 평균치는 최적 추정치(best estimate)와 동일하다고 말할 수 있다(Kitanidis, 1997).

분배계수 값을 고려할 경우 흡착이 없는 경우보다 낮은 농도값을 보여준다. 화학적 균질 지반으로부터 얻은 계산



(a) homogeneous K_d field ($\sigma^2(\ln K_d) = 0.0$)

(b) slightly-heterogeneous K_d field ($\sigma^2(\ln K_d) = 1.0$)

(c) moderately-heterogeneous K_d field ($\sigma^2(\ln K_d) = 5.0$)

(d) highly-heterogeneous K_d field ($\sigma^2(\ln K_d) = 10.0$)

Fig. 4. Hydraulic head and concentration in the chemically-heterogeneous landfill systems after 10 years.

Table 1. Statistical summary of heterogeneous fields and concentrations at monitoring well locations after 3 and 10 years

Cases	Parameters of K_d field	Statistics	3 years			10 years			
			1-1	1-2	2-1	1-1	1-2	1-3	2-1
Homogeneous no absorption	K_d= 0.0 m^3/g	$\overline{C}$ (ppm)	98.43	48.85	10.77	99.99	49.28	12.55	87.66
homogeneous	K_d= 3.87 × 10^{-7} m^3/g $\sigma^2(\ln K_d)$ = 0.0	$\overline{C}$ (ppm)	76.96	31.74	0.01	96.33	45.24	10.04	4.17
Slightly-heterogeneous K_d	$\overline{K_d}$ = 3.87 × 10^{-7} m^3/g $\sigma^2(\ln K_d)$ = 1.0 $\lambda_x = \lambda_z$ = 10 m	$\overline{C}$ (ppm)	76.15	30.26	0.07	95.79	44.99	9.89	7.33
		σ (C)	4.544	4.005	0.127	2.252	0.848	0.386	8.287
		CV(C)	0.059	0.132	1.755	0.023	0.018	0.039	1.129
Moderately-heterogeneous K_d	$\overline{K_d}$ = 3.87 × 10^{-7} m^3/g $\sigma^2(\ln K_d)$ = 5.0 $\lambda_x = \lambda_z$ = 10 m	$\overline{C}$ (ppm)	73.42	24.27	0.30	93.90	43.92	8.92	12.28
		σ (C)	9.770	9.787	0.576	4.926	2.210	1.531	16.003
		CV (C)	0.133	0.403	1.891	0.052	0.050	0.171	1.302
Highly-heterogeneous K_d	$\overline{K_d}$ = 3.87 × 10^{-7} m^3/g $\sigma^2(\ln K_d)$ = 10.0 $\lambda_x = \lambda_z$ = 10 m	$\overline{C}$ (ppm)	70.36	18.71	0.49	91.80	41.70	7.43	14.11
		σ (C)	13.940	12.365	0.891	7.405	5.980	2.878	18.839
		CV (C)	0.198	0.660	1.808	0.080	0.143	0.386	1.334

결과와 비교할 때 불균질 지층에서의 계산 결과들은 평균과 산포도에서 분명한 경향을 나타낸다. 지반 내 화학적 흡착이 침출수 이동에 미치는 영향은 분배계수의 불균질도에 의해 결정된다. 약불균질 지층 내 감시정 지점의 농도 평균은 단일 분배계수값을 사용한 균질 지층의 경우와 거의 비슷하게 나타났다. 일반적으로 분배계수의 불균질성이 커짐에 따라 1층 내 감시정(1-1, 1-2, 1-3)의 평균치는 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 불균질 지반의 경우 저분배계수 영역을 따라 오염물이 이동하는 수지현상(fingering)이 발생함에 따라 균질 지반 내의 비오염 지역까지 오염물이 이동하는 경우가 있기 때문이다. 이러한 현상은 오염원에서 가까운 감시정 1-1에서는 큰 영향을 미치지 않지만 1-2, 1-3에서는 분명하게 나타난다. 감시정 2-1의 경우 균질 지반의 경우 오염물이 거의 이동하지 않았으나 불균질 지반의 일부 실현에서 수지 현상에 의해 오염물이 이동한 까닭에 평균이 균질 지반보다 크게 나왔다.

감시정 지점에서 오염물 농도의 변동성을 나타내는 표준 편차와 변이계수도 Table 1에 정리하였다. 오염원에 인접한 1-1 지점의 오염물 농도는 오염원 농도에 90% 이상의 수준에 도달하였으며 지층의 불균질도가 증가함에 따라 농도의 변동성도 커졌다. $\sigma^2(\ln K_d)$가 0.0에서 10.0으로 증가함에 따라 각 지점에서의 변이계수가 크게 증가하였다. 오염원으로부터 거리가 증가한 1-2와 2-1 지점의 경우에도 동일한 현상을 나타내고 있다. 이는 각 실현별로 고흡착 영역과 저흡착 영역이 변하고 강불균질 지층의 경우 영역간 분배계수 값의 차이가 확대되기 때문이다.

중투수층 내의 2-1 지점은 1-2나 1-3 지점보다 오염원과의 거리는 가깝지만 유동 속도가 작기 때문에 도착에 걸리는 소요 시간은 더 긴 지점이다. 1-2 지점에 비하여 2-1 지점의 평균 농도는 작고 변동성은 크게 나타났다. 이는 오염원에서의 이동 시간이 길수록 불균질 지층의 통과 시간의 증가로 인해 불균질성의 영향이 증가하기 때문이다. 이러한 결과는 화학적 불균질성이 큰 지층에 대하여 단일 분배계수값을 이용한 결정론적 분석을 시도할 경우 상당한 오차를 유발할 수 있음을 나타낸다. 따라서 지반 내에 존재하는 화학적 불균질성을 정성적 또는 정량적으로 파악하고 이를 모델링에 반영하는 것이 보다 정확한 예측에 필수적임을 보여준다.

4. 결 론

매립장으로부터 누출된 침출수가 화학적으로 불균질한 2층 매립지층 내에서 10년간에 걸쳐 이동하는 과정에 대하여 정상상태의 유체 유동 및 비정상상태의 오염물 이동을 수치적으로 계산하였다. 로그 정규분포를 가지는 등확률의 랜덤 분배계수 장에 대하여 수행된 Monte-Carlo 시뮬레이션의 결과를 통하여 지반 내 분배계수의 분포 특성으로 인한 흡착 불균질성이 매립장으로부터 누출된 오염물의 이동에 미치는 영향을 평가하였다. 흡착을 무시한 경우와 비교하면 동일한 유동 조건 하에서 분배계수의 값이 커짐에 따라 지반 내 고체 입자 표면에 흡착되는 양이 증가하므로 오염물 이동이 현저하게 감소하였다. 이같은 지연 효과는 오염원에서 이동 시간이 커질수록 이동 중 흡착량이 증가하므로 더욱 분명하게 관찰할 수 있다.

단일 분배계수 값을 사용한 균질 흡착 조건 하에서의 오염물 이동 결과와 비교할 때 지반 내 분배계수 분포의

불균질성이 커질수록 흡착량의 공간 변동성이 커지므로 오염물의 농도 분포도 불규칙적으로 변화되었다. 약불균질 지층 내 감시정 지점의 농도 평균은 균질 지층의 경우와 거의 비슷하게 나타났으며 변동도 크지 않았다. 분배계수의 불균질성이 커지면 저분배계수 영역을 따라 오염물이 이동하는 수지현상이 발생함에 따라 오염원에 인접한 지점의 농도 평균치는 감소하고 저농도 지점의 농도는 증가하는 경향을 나타낸다. 실현 간 분배계수의 변동성 확대로 인하여 각 지점에서의 농도 변동성도 커지므로 변이계수가 크게 증가하였다. 또한 오염원으로부터 침출수의 이동 시간이 길어질수록 불균질 지층의 통과 시간의 증가로 인해 불균질성의 영향이 증가하기 때문에 농도 변동성이 커졌다. 이러한 결과는 화학적 불균질성이 큰 지층 내 침출수 이동을 계산할 때 단일 분배계수 값을 사용하면 상당한 오차를 유발할 수 있으며 분배계수의 분포 특성에 관한 정성적 또는 정량적 통계 정보를 파악하고 이를 모델링에 반영해야만 한다는 것을 보여준다.

참 고 문 헌

권재필, 박홍석, 김승현, 2001, Monte carlo 해석법을 이용한 매립장 침출수의 중금속 농도 예측 모델 개발, 대한환경공학회지, **23**(1), 163-174.

이근상, 2005, 차수막이 설치된 매립지로부터 누출된 침출수의 불균질 지반 내 이동에 관한 수치연구, 한국폐기물학회지, **22**(4), 372-380.

이승희, 유호식, 1997, 매립지 지반에서의 침출수 거동현상에 대한 민감도 분석, 대한환경공학회지, **19**(9), 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*, **130**(4), 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.*, **28**(12), 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*, **73**, 207-219.

Goyette, M.L. and Lewis, B.-A.G., 1995, K_d in screening-level ground-water contaminant-transport model, *J. Environ. Eng.*, **121**(7), 537-541.

Hudak, P.F., 2001, Monitoring groundwater at landfills equipped with leachate collection systems, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **66**, 156-161.

Illangasekare, T.H. and Saenton, S., 2004, Application of stochastic methods in the study of fluid flow, solute transport, and multiphase fluid behavior in heterogeneous porous media, *Proc. of the 10th Asian Congress of Fluid Mechanics*, May 17-21, Peradeniya, Sri Lanka.

Khanbilvardi, R.M., Ahmed, S., and Gleason, P.H., 1995, Flow investigation for landfill leachate (FILL), *J. Environ. Eng.*, **121**(1), 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.*, **31**(3), 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.*, **11**(4), 179-202.

MacIntyre, W.G., Antworth, C.P., Stauffer, T.B., and Young, R.G., 1998, Heterogeneity of sorption and transport-related properties in a sand-gravel aquifer at Columbus, Mississippi, *J. Contam. Hydrol.*, **31**, 257-274.

Porter, E.P. and Gaylord, D.R., 1990, Influence of aquifer heterogeneity on contaminant transport at the Hanford site, *Ground Water*, **28**(6), 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*, **2**(4), 172-182.

Sophocleous M., Stadnyk, N.G., and Stotts, M., 1996, Modeling impact of small Kansas landfills on underlying aquifers, *J. Environ. Eng.*, **122**(12), 1067-1077.

Thornton, S.F., Bright, M.I., Lerner D.N., and Tellam, J.H., 2000, Attenuation of landfill leachate by UK Triassic sandstone aquifer materials 2. sorption and degradation of organic pollutants in laboratory columns, *J. Contam. Hydrol.*, **43**, 355-383.

Zhang, Z. and Brusseau, M.L., 2004, Nonideal transport of reactive contaminants in heterogeneous porous media: 7. distributed-domain model incorporating immiscible-liquid dissolution and rate-limited sorption/desorption, *J. Contam. Hydrol.*, **74**, 83-103.