

# 수리지질학적, 화학적 특성의 복합 불균질성이 매립지반 내 침출수 이동에 미치는 영향 이 근 상

경기대학교 공과대학 환경에너지시스템공학과

(2009년 2월 20일 접수, 2009년 4월 28일 채택)

## Impacts of Combined Hydrogeological and Chemical Heterogeneities on the Transport of Leachate through Landfill Sites

Kun Sang Lee

Department of Environmental and Energy Systems Engineering, Kyonggi University

**ABSTRACT :** The transport of landfill leachate in the subsurface formations of unlined landfill sites is considered. The impacts of hydrogeological and chemical heterogeneities on the leachate transport are assessed by examining the results from a series of Monte-Carlo simulations. The landfill system simulated in this study is hypothetically represented with three levels of spatial variability for the hydrogeological and chemical parameter; (1) homogeneous hydraulic conductivity ( $K$ ) and distribution coefficient ( $K_d$ ), (2)  $K$  heterogeneity only, and (3) combined heterogeneities of  $K$  and  $K_d$ . To calculate the transport of leachate through negatively-correlated random hypothetical  $K$ - $K_d$  fields generated using geostatistical input parameters, a saturated flow model is linked with a contaminant transport model. Point statistic values such as mean, standard deviation, and coefficient of variation of the concentration were obtained from 100 Monte-Carlo trials. Results of point statistics show that the heterogeneities of  $K$  and  $K_d$  in the landfill site prove to be an important parameter in controlling leachate concentrations. Consideration of combined  $K$  and  $K_d$  heterogeneities results in enhancing the variability of contaminant transport. The variability in the leachate concentration for different realizations also increases as the distance between source and monitoring well increase.

**Key Words :** Landfill, Leachate Transport, Heterogeneity, Monte-Carlo Simulation

**요약 :** 차수막이 설치되어 있지 않은 매립지에서 하부 지반으로 누출된 침출수의 이동을 고려하였다. 일련의 Monte-Carlo 시뮬레이션의 결과를 검토하여 지반의 수리지질학적, 화학적 불균질성이 침출수 이동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 (1) 수리전도도( $K$ )와 분배계수( $K_d$ )가 균질, (2) 수리전도도만 불균질, (3) 수리전도도와 분배계수가 모두 불균질 경우 등 3단계의 공간 변동성이 있는 가상 매립지 시스템을 시뮬레이션하였다. 포화 유동 모델과 오염물 이동 모델을 이용하여 지구통계학적 입력 인자로부터 생성된 역상관관계의 랜덤 수리전도도-분배계수 장 내 침출수 이동을 평가하였다. 100회의 Monte-Carlo 시뮬레이션으로부터 얻은 결과에 대하여 평균, 표준편차, 변이계수와 같은 점기반 통계치들을 계산하였다. 통계치 결과에 따르면 매립지반의 수리전도도와 분배계수의 불균질성은 침출수 농도를 제어하는 주요한 인자로서 수리전도도와 분배계수의 복합 불균질성을 반영함에 따라 오염물 이동의 변동성이 증가하였다. 또한 오염원과 감시정 간의 거리가 커질수록 각 실현 간 침출수 농도의 변동성이 증가하였다.

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

### 1. 서론

매립 폐기물은 일반적으로 안정화 기간이 길기 때문에 장기간에 걸쳐 침출수가 발생하며 차수 시설이 없는 경우 침출수는 매립장 바닥을 통하여 하부 지반으로 누출된다. 누출된 침출수는 대수층으로 이동하여 우물이나 하천 등의 배출 지점까지 이동할 수 있다. 유해 물질이 다량 함유된 침출수가 주변의 지반 환경으로 누출될 경우 토양 및 지하수 오염을 야기할 가능성이 매우 크다.

침출수와 관련된 환경 문제를 검토하거나 오염 방지 전

략을 수립하기 위해서는 침출수의 지반 내 거동에 대한 체계적인 연구가 반드시 수행되어야 한다. 매립지반 내에서 침출수의 이동은 다양한 수리지질학적 특성과 화학적 요인들에 의해 좌우되므로 침출수의 유동과 오염물질의 이동 경로를 해석하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 침출수의 거동을 예측할 때는 수치 시뮬레이션 기법을 많이 활용하고 있다. 현재까지 국내외에서 발표된 연구는 주로 침출수의 생성과 생성된 침출수의 균질 지반 내 유동을 해석하거나 실제 매립장에 대한 사례 연구가 대부분이다.<sup>1~7)</sup>

전형적인 현장 스케일의 지반 환경에서 침출수의 이동 프로세스를 제어하는 물리적, 화학적 특성은 공간적 변동성이 매우 심한 것으로 알려져 있다. 최근 수리지질학의

† Corresponding author

E-mail: kslee@kyonggi.ac.kr

Tel: 031-2499738

Fax: 031-244-6300

여러 분야에서 지반 불균질성을 응용한 연구가 수행되고 있으며<sup>8)</sup> 침출수 이동 해석 시에도 불균질성을 고려할 필요성이 증가하고 있다. 지반 내 유체 유동과 오염물의 이류 이동에 가장 큰 영향을 미치는 수리전도도는 지질학적 특성에 의하여 랜덤하거나 경향성을 가지면서 위치에 따라 변동을 보이는 불균질 특성을 가지고 있다.<sup>9,10)</sup> 국내에서 권재필 등<sup>11)</sup>은 간단한 분포를 갖는 수리전도도를 가정하고 지반 내 중금속 농도를 예측하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 이근상<sup>12)</sup>은 매립 지반 내 수리전도도의 랜덤 불균질성만을 고려하여 침출수 이동에 대한 수치 계산을 수행하였다. 그러나 현재까지의 연구는 대부분 수리전도도만을 랜덤 인자로 처리하여 수리지질학적으로 불균질한 지반 내에서의 유체 유동을 해석한 경우가 대부분이며 다른 지반 특성의 불균질성은 종종 무시되고 왔다.

최근 지반의 화학적 특성들이 오염물 이동에 미치는 영향에 대한 관심이 증가함에 따라 흡착에 따른 질량 전달 프로세스에 대한 연구가 수행되고 있다. 흡착은 오염물의 이동에 영향을 미칠 수 있는 전형적인 화학적 질량 전달 프로세스 중 하나로서 평형 흡착 모델의 경우 분배계수(partition coefficient)로 계량화할 수 있다. 분배계수는 오염물 이동에 영향을 미치는 화학적 인자 중 공간 변동성이 가장 커서 모델링 결과의 불확실성에 큰 영향을 미칠 수 있으며 메커니즘의 특성상 수리전도도와 상관 관계를 나타낼 수 있다.<sup>13~15)</sup>

본 연구에서는 Monte-Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 음의 상관관계를 가진 지반의 수리전도도-분배계수 값들의 공간적 변동성이 침출수 이동에 미치는 영향을 검토하였다. 지구통계학적 기법으로 생성된 불균질 랜덤 수리전도도-분배계수 장에 대하여 포화상태의 정상상태 유동방정식과 천이상태의 물질 이동방정식을 적용하여 침출수 이동을 계산하였다. 계산 결과들의 점기반 통계치들을 균질 지반, 수리전도도만 불균질인 경우와 비교하여 매립지반의 수리지질학적, 화학적 특성의 복합 불균질성이 침출수의 거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 침출수 이동의 이론

### 2.1. 침출수 이동방정식

#### 2.1.1. 유동 방정식

일반적으로 함수율이 증가하면 수리전도도가 비선형적으로 증가하므로 동일한 수두 구배 하에서 완전히 포화된 지반을 가정할 경우 침출수의 최대 이동을 나타낼 수 있다. 또한 비포화 영역의 인자들이 침출수 이동에 미치는 영향은 크지 않다고 알려져 있기 때문에<sup>2)</sup> 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.

$$v_i = -\frac{K_{ij}}{n_e} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (1)$$

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

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

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

#### 2.1.2. 물질 이동 방정식

매립지 지반 내에서 흡착성 오염물의 이동은 보존성 용질의 질량 전달방정식인 천이 이류-분산방정식으로 묘사할 수 있다.<sup>16)</sup>

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

여기에서  $C$ 는 침출수 내 오염물의 농도[ML<sup>3</sup>],  $D_{ij}$ 는 분산지수[L<sup>2</sup>/T],  $\rho_b$ 는 고체의 겉보기 밀도(bulk density)[M/L<sup>3</sup>],  $C^*$ 는 고체에 흡착된 오염물의 농도[ML<sup>3</sup>]이다.

수상과 고체상 간의 평형 이동에 대하여 선형 흡착 등온선을 가정하면 고체 표면에 흡착된 오염물의 농도는

$$C^* = K_d C \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $K_d$ 는 용액 농도에 대한 흡착 오염물의 농도비를 나타내는 분배계수[L<sup>3</sup>/M]이다. 화학적으로 불균질 매질의 경우 분배계수는 공간의 함수  $K_d(x)$ 로 나타낸다. 식 (3)과 (4)를 결합하면

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

이 된다.  $R_d$ 는 이동 중 흡착으로 인한 오염물의 감쇠를 나타내는 지연인자(retardation factor)로서 다음 식으로 정의된다.

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n_e} \quad (6)$$

## 2.2. Monte Carlo 시뮬레이션

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

수리지질학적으로 불균질한 지반에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하기 위하여 유체 유동과 용질의 이동에 가장 큰 영향을 미치는 입력 인자인 수리전도도 장을 먼저 생성하였다. 불균질 수리전도도장은 spectral 알고리즘에 바탕을 둔 랜덤장 생성 기법으로 만들어졌다. 각각의 랜덤장에서 수리전도도는 로그정규분포를 따른다고 가정하였고 평균 수리전도도  $\bar{K}[L/T]$ ,  $x$  및  $z$  방향의 연관길이(correlation length)  $\lambda_x(K)[L]$ 와  $\lambda_z(K)[L]$ ,  $\ln K$ 의 분산  $\sigma^2(\ln K)$ 을 이용하여 지구통계학적인 특성을 반영하였다.

일반적으로 소수성 유기화합물은 고체 입자의 표면 중 유기 탄소 성분으로의 분배 프로세스를 통하여 흡착이 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup> 따라서 입자가 작을수록 표면적이 커지므로 흡착이 증가하며 수리전도도는 작아진다고 가정할 수 있다.<sup>17)</sup> 이러한 추론으로부터 분배계수의 불균질성은 수리전도도의 불균질성과 역상관 관계에 있는 물성으로 설정하였다. 분배계수 또한 일반적인 측정 결과를 따라 로그 정규분포를 따른다고 가정하였으며<sup>14)</sup> 평균 분배계수  $\bar{K}_d[L^3/M]$ , 각 방향의 연관길이  $\lambda_x(K_d)[L]$ 와  $\lambda_z(K_d)[L]$ ,  $\ln K_d$ 의 분산  $\sigma^2(\ln K_d)$ 를 이용하여 생성하였다.

$i$ 번째로 생성된 수리전도도 장  $K_i(x)$ 에 대하여 지하수 유동과 오염물 이동 방정식의 해인 수두  $h_i(x)$ 와 농도  $C_i(x)$ 를 구한 다음 그 결과들의 분포를 해석함으로써 지반 내 침출수 농도의 분포를 확률적으로 예측할 수 있다. Monte Carlo 시뮬레이션의 표본 오차는 랜덤장 생성 실현(realization)의 수,  $N$ 에 대하여  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ 에 비례하므로<sup>18)</sup> 사전 계산 결과를 바탕으로 안정적인 통계치를 얻을 수 있는 계산횟수를 100회로 결정하였다. 수치 시뮬레이션에 의해 도출된 농도 결과치들을 해석하기 위하여 점기반 통계치를 검토하였다. 특정 지점에서 구한 농도치와 오염 영역의 면적에 대하여 평균, 표준편차, 변이계수(coefficient of variation)를 구하여 수행된 계산 결과들의 분포를 확률적으로 평가하였다.

## 3. 침출수 이동 해석

### 3.1. 매립지 모델

Ritterling and Stansbury,<sup>5)</sup> 이근상<sup>12)</sup>이 유동 해석을 위하여 사용한 매립지 모델을 참고로 하여 설정한 이차원 모델(Fig. 1)을 대상으로 침출수 이동을 계산하였다.

매립지 지층은 상부의 고투수층과 하부의 중투수층으로 구성된 이층 구조를 가진다고 가정하였다. 각 층의 평균

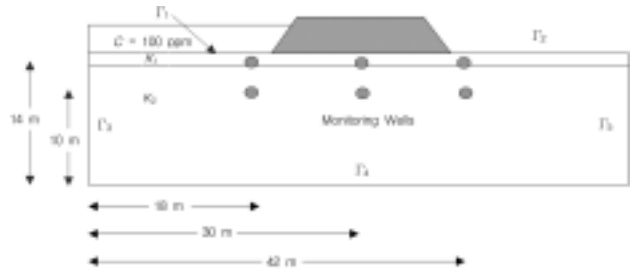


Fig. 1. Schematic of a landfill site for the simulation of leachate transport.

수리전도도  $\bar{K}_1, \bar{K}_2$ 는 심도에 따른 차이를 고려하여 각각  $2 \times 10^{-4}$  cm/sec와  $2 \times 10^{-5}$  cm/sec를 할당하였으며 유효 공극률  $n_e$ 는 0.3이다. 제방의 수리전도도와 공극률은 0으로 가정하여 제방을 통한 침출수의 이동을 차단하였다.

침출수의 유동을 해석하기 위한 경계조건은 일정 수두 경계와 비유동 경계로 나누어 설정할 수 있다. 매립지 제방의 안  $\Gamma_1$ 과 바깥  $\Gamma_2$ 는 각각 3 m와 0 m의 일정 수두를 가정하였으며 나머지 경계에는 비유동 조건을 설정하였다.

$$h = h_0 \text{ on } \Gamma_1, \Gamma_2 \tag{7}$$

$$K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} = 0 \text{ on } \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5 \tag{8}$$

일반적으로 침출수는 매립지의 특성 및 폐기물 성상에 따라 넓은 범위의 농도 분포를 나타낸다.<sup>5)</sup> 미국환경보호국(EPA)은 오염물 이동을 해석하기 위하여 정상상태의 연속 오염원을 고려한 보수적 매립장 설계 요건을 제안한 바 있다.<sup>19)</sup> 본 연구에서도 매립장 바닥에 침출수가 농도 100 ppm의 연속 오염원으로 작용한다고 가정하였고 나머지 경계에는 비유출 조건을 설정하였다.

$$C = C_0 \text{ on } \Gamma_1 \tag{9}$$

$$D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = 0 \text{ on } \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5 \tag{10}$$

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

수치 계산을 위하여 이차원 지하수 유동 및 오염물 이동 시뮬레이션 모델인 IGW<sup>20)</sup>를 사용하였다. 매립지 지하 토양에서 장기간에 걸친 침출수의 이동을 해석하기 위하여 모델을  $160 \times 80$ 개의 균일 격자로 이산화하고 최대 시간 증분을 10일로 설정하여 10년까지 계산을 수행하였다. 수직 방향으로의 침출수 이동을 측정하기 위하여 제1층과 2층 중 높이 14 m, 10 m 지점에, 수평 방향의 이동을 측정하기 위하여 매립지 제방 안쪽의 18 m, 중간지점인 30 m, 그리고 42 m 지점에 감시정을 배치하여 총 6개 지점에서 오염물 농도를 관측하였다.

### 3.2. 결과 해석

#### 3.2.1. 균질 수리전도도 지반 내 이동

수리전도도가 균일한 균질 매립지 지반 내에서 일정 농도의 연속 오염원인 침출수로부터 생성된 오염원의 이동을 계산하고 등수두선과 농도를 도시하여 수리지질학적 불균질 지반 내 이동 결과와의 비교를 위한 기준으로 사용하였다. Fig. 2는 분배계수의 반영 여부 및 분포 형태에 따른 10년 경과 후 오염원의 형상을 나타낸다. 흡착을 고려하지 않은 경우 10년 경과 후 계산 결과를 나타낸 Fig. 2(a)에 따르면 전반적으로 매립장 하부에서 오른쪽 방향의 정상상태 유동을 나타냈다. 특히 상부 지층의 수리전도도가 하부 지층보다 매우 크기 때문에 최초 1년간 유동이 집중되는 현상을 보인다. 일단 침출수가 1~3지점에 도달한 이후에는 수두구배가 작기 때문에 수평방향으로의 이동은 거의 일어나지 않고 이후 추가적인 이동은 주로 수직 방향으로 발생하였다. 오염물 농도가 1 ppm 이상인 셀들의 면적을 합산하여 얻은 오염 영역의 면적은 474 m<sup>2</sup>다. 전 영역에 대하여 일정한 분배계수를 설정할 경우( $K_d = 3.87 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{g}$ )의 결과를 나타낸 Fig. 2(b)는 동일한 등수두선 하에서 흡착에 의한 오염원 확산의 억제로 인하여 오염 영역의 면적은 233 m<sup>2</sup>로 축소되었다.

분배계수의 반영 여부에 따라 얻은 계산 결과를 정량적

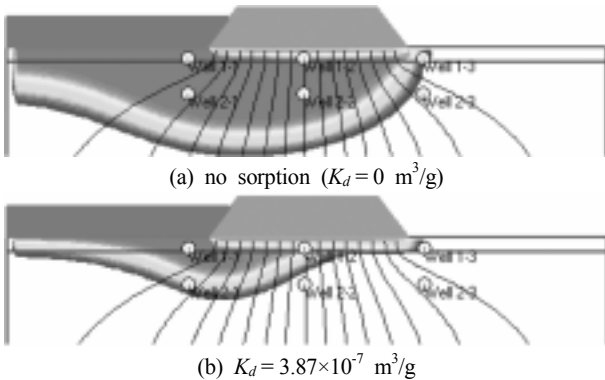


Fig. 2. Hydraulic head and concentration in the hydrogeologically homogeneous landfill system after 10 years.

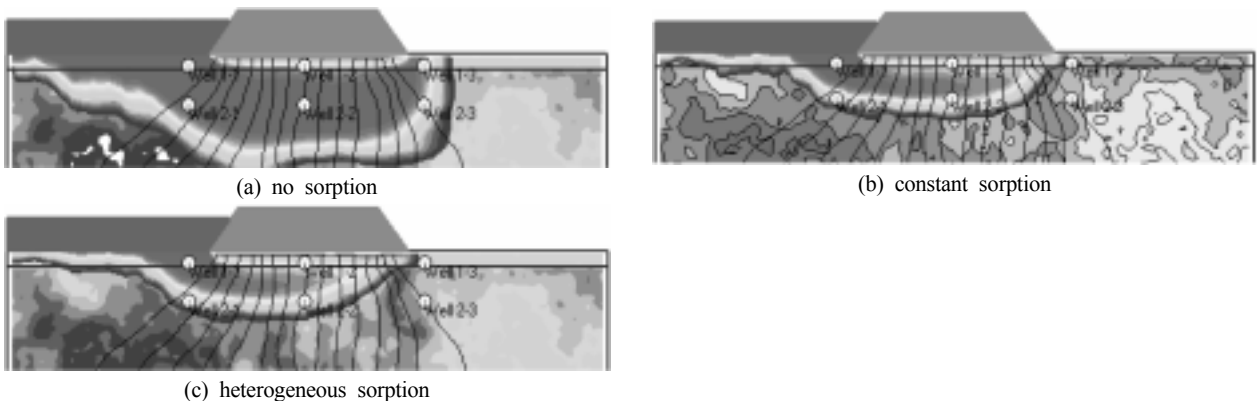


Fig. 4. Hydraulic head and concentration on (a),(b) hydraulic conductivity field or (c) distribution coefficient field in the hydrogeologically heterogeneous landfill system after 10 years.

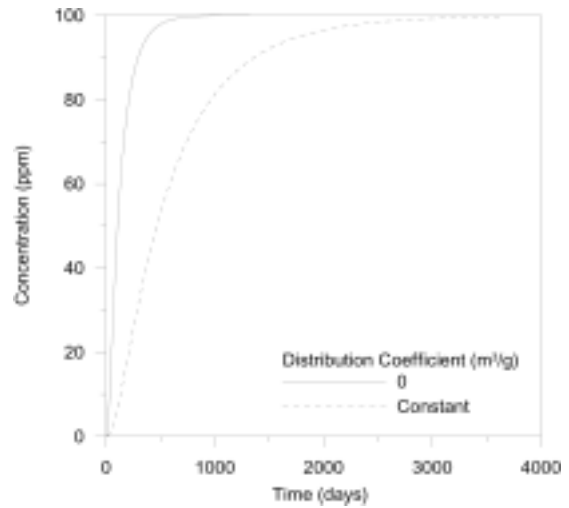


Fig. 3. Mean and variability of concentration at the monitoring well 1-1 for 10 years.

으로 비교하기 위하여 10년간 감시정 1-1 지점에서 관찰된 농도를 Fig. 3에 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 매립장에서의 누출량 증가로 인하여 오염물 농도는 증가하였으며 오염원 농도에 근접하면서 증가 속도가 감소하였다. 분배계수를 고려할 경우 흡착량 증가에 따른 이동 지연 현상이 분명하게 나타나기 시작하여 오염 시작 시점이 늦어지고 이후에도 낮은 농도를 나타내고 있다. 다른 감시정 지점에서도 이와 유사한 경향을 보이나 오염원에서 멀어짐에 따라 오염원 농도에는 도달하지 못하고 10년 기간 동안 지속적으로 농도가 증가하였다.

#### 3.2.2. 불균질 수리전도도 지반 내 이동

공간 변동성을 가진 불균질 수리전도도 장에 대하여 균질 또는 음의 관계로 연관된 불균질 분배계수 장의 반영 여부가 오염물 이동에 미치는 영향을 검토하였다. 각 층의 평균 수리전도도를 균질 수리전도도의 경우와 동일하게 유지하면서  $\ln K$ 의 분산 1.0,  $x$  및  $z$  방향 연관길이 각각 10 m를 입력 인자로 사용하였다. 비조건부 시뮬레이션 (unconditional simulation)을 수행하여 임의의 랜덤 수리전

도도 장을 생성하였다. 생성된 랜덤 수리전도도 장에 대하여 (1) 분배계수가  $3.87 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{g}$ 로 흡착이 일정한 경우, (2) 평균 분배계수가  $3.87 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{g}$ ,  $\ln K_d$ 의 분산이 0.5, 수리전도도장과 동일한 연관길이를 가지면서 [ $\lambda_s(K_d) = 10 \text{ m}$ ,  $\lambda_e(K_d) = 10 \text{ m}$ ] 수리전도도와 음의 연관관계를 갖는 경우에 대하여 침출수의 이동을 10년간 계산하였다.

적절한 불균질 수리전도도 장의 생성 여부를 확인하고 지반의 수리지질학적, 화학적 불균질성이 침출수 이동에 미치는 영향을 시각적으로 나타내기 위하여 계산 사례를 제시하였다. 각 경우별로 동일한 seed 번호에 의해 구현된 특성의 실현에 대하여 수리전도도 및 분배계수 장과 10년 후의 오염물 농도 계산 결과를 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4(a), (b)는 입력 변수로 설정한 연관길이에 따라 비교적 짧은 거리의 공간적 연관성을 가진 랜덤 수리전도도 장이 적절하게 생성되었음을 나타내고 있다. Fig. 4(c)의 분배계수 장은 Fig. 4(a)의 수리전도도 장에 대하여 동일한 위치에서 각각 반비례의 경향을 나타내므로 분배계수와 수리전도도 간에 설정한 음의 상관 관계를 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있다.

수리지질학적으로 균질한 지층의 경우인 Fig. 2와 비교할 때 지반 내 수리전도도의 불균질성에 따라 등수두선의 불규칙적인 변동과 왜곡이 발생하였으며 이에 따라 오염물의 농도 분포도 변화되었다. Fig. 4에 나타난 10년 경과 후 오염물 분포 결과에 따르면 동일한 수리전도도 장에 대하여 수행된 유동 계산의 결과이므로 모든 경우 얻어진 등수두선은 동일하다. 오염 영역의 크기는 흡착이 없을 경우(Fig. 4(a))  $486 \text{ m}^2$ 이며 전 영역에 대하여 일정한 분배계수를 설정할 경우(Fig. 4(b)) 흡착의 영향으로 오염 영역의 면적은  $254 \text{ m}^2$ 로 축소되었다. 동일한 유동 조건 하에서 음의 상관관계를 가진 불균질 분배계수 장을 복합적으로 고려한 경우(Fig. 4(c)) 오염운의 형상이 좀더 불규칙적으로 나타나며 오염운의 크기는  $273 \text{ m}^2$ 로 약간 증가하였다.

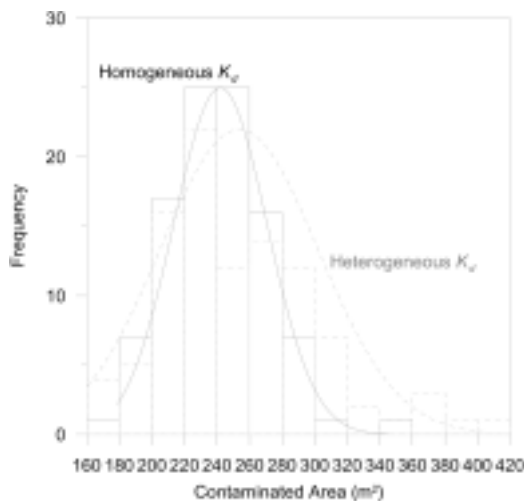


Fig. 5. Histogram on distribution of contaminated areas after 10 years.

Table 1. Point statistics values of contaminated areas after 10 years

statistics	case	homogeneous K		heterogeneous K	
		no sorption	constant sorption	constant sorption	heterogeneous sorption
mean [m <sup>2</sup> ]		474	233	216	207
standard deviation		-	-	29	49
coefficient of variation		-	-	0.12	0.19

역 상관관계를 갖는 불균질 수리전도도-분배계수 조건 하에서 각각 생성된 100회의 실현에 대하여 얻은 계산 결과를 수리전도도만 불균질한 경우의 결과와 정량적으로 비교하기 위하여 10년 경과 후 오염 영역의 면적에 대한 히스토그램과 점기반 통계치 결과를 Fig. 5와 Table 2에 요약하여 제시하였다. 비조건부 시뮬레이션을 수행하여 생성된 각 수리전도도-분배계수 장에 대하여 10년간 수행된 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 추산한 모든 실현의 결과 평균치는 최적 추정치(best estimate)와 동일하다고 말할 수 있다.<sup>18)</sup>

통계치의 계산 결과들에 따르면 분배계수 장의 공간적 변동성이 반영됨에 따라 평균은 별다른 영향을 받지 않았으나 산포도를 나타내는 표준편차와 변이계수는 크게 증가하였다. 즉 분배계수 장의 공간적 변동성이 계산 영역 내 농도 및 오염 영역의 변동성을 증대시키는 요인으로 작용하고 있다. 이와 같은 결과는  $\ln K(x)$ 와  $\ln K_d(x)$  간의 완전 역 상관관계로 인해 고수리전도도-저분배계수 영역을 따라 오염물이 이동하는 수지현상(fingering)에 따라 분산의 경향이 증가했기 때문에 나타난 것이다. 이로 인하여 균질 분배계수 지반의 비오염 지역까지 오염물이 이동하는 경우가 있기 때문이다.

10년간 각 실현으로부터 관찰된 감시정 지점에서의 평균 농도와 (평균 농도 ± 표준편차)의 범위를 계산하였다. 또한 지반 불균질성으로 인한 농도의 상대적 변동을 정량적으로 나타내기 위하여 감시정 지점의 농도에 대한 변이계수를 계산하고 비교하였다.

감시정 1-1 지점에서의 계산 결과를 Fig. 6에 제시하였으며 비교를 용이하게 하기 위하여 세로축의 범위를 동일하게 지정하였다. 시간이 경과함에 따라 매립장에서의 계속된 누출로 인하여 오염물 농도는 지속적으로 증가하였다. 0이 아닌 농도를 나타낸 시점부터 계산된 변이계수는 초반에 큰 값을 보인 후 급격히 감소하다가 일정한 수준을 유지하고 있다. 분배계수의 불균질성이 반영되면(Fig. 6(b)) 각 실현 간 관측 농도의 변동이 심해져 균질 흡착의 경우(Fig. 6(a))보다 변이계수가 커지는 경향을 보였다. 이는 수리특성의 불균질성에 화학적 불균질성이 결합되면서 감시정 지점까지 오염물 이동의 변동성이 크게 증가하였음을 의미한다.

감시정 1-2, 2-1 지점에서 관측된 결과도 Fig. 7과 8에 제시하였다. 감시정 1-1과 마찬가지로 시간의 경과에 따라

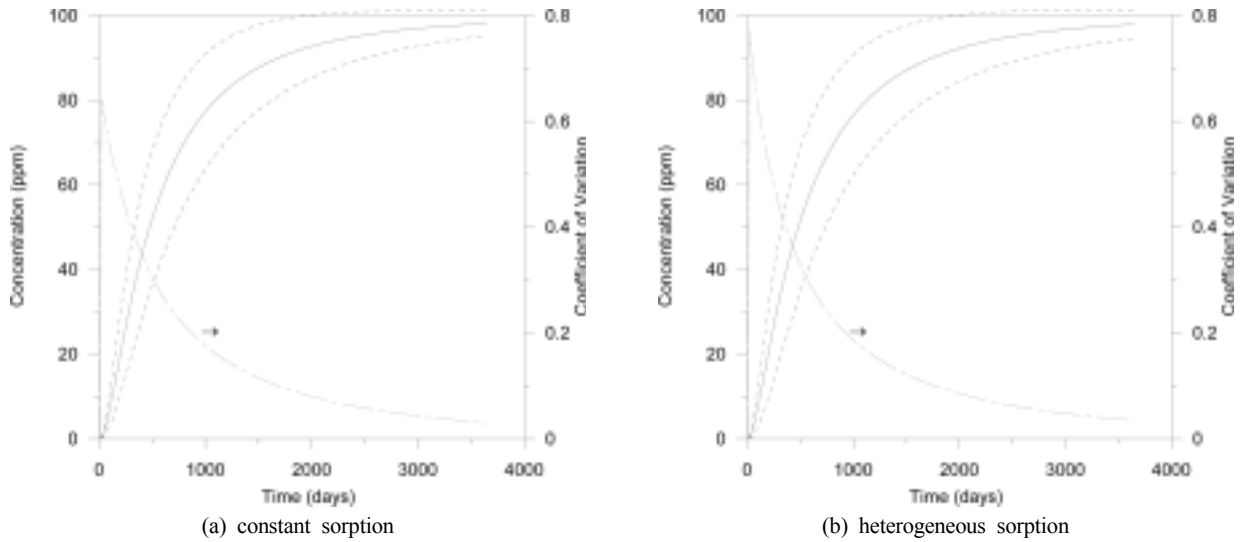


Fig. 6. Mean and variability of concentration at the monitoring well 1-1 for 10 years.

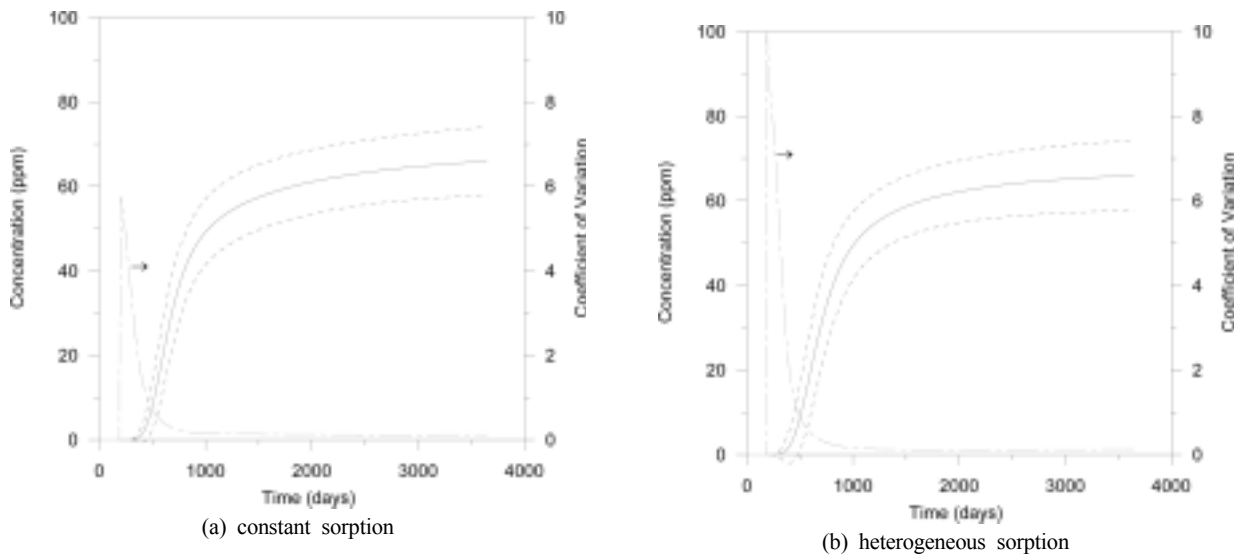


Fig. 7. Mean and variability of concentration at the monitoring well 1-2 for 10 years.

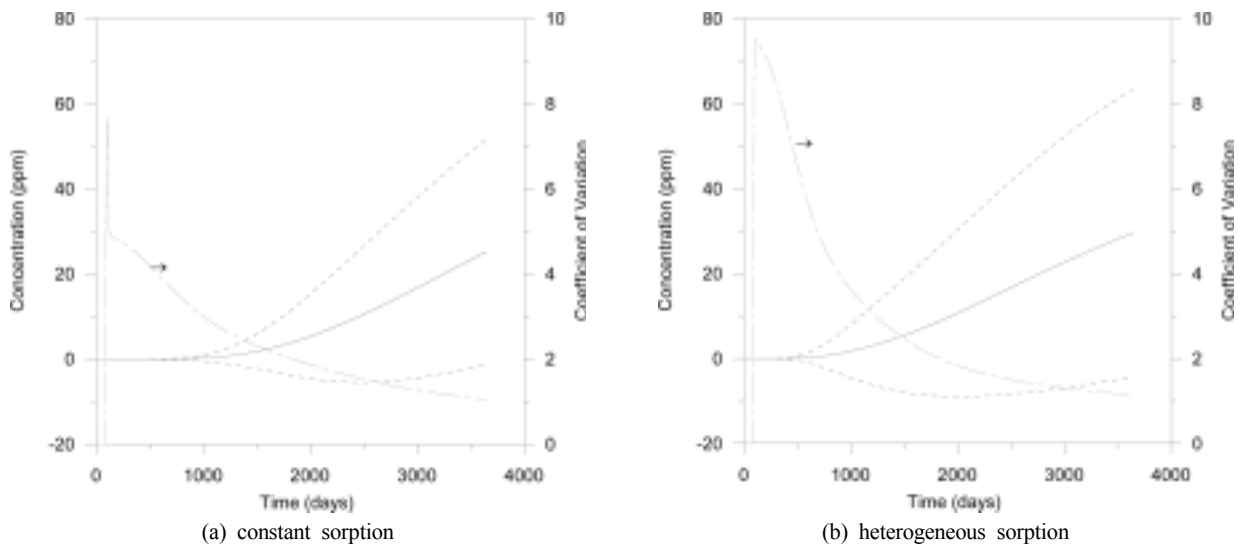


Fig. 8. Mean and variability of concentration at the monitoring well 2-1 for 10 years.

각 지점에서의 오염물 농도가 증가하며 변이계수는 급격한 증가 후 감소 경향을 나타낸다. 오염원과 거리 및 수리전도도의 대비 현상으로 인하여 오염원 농도의 20~60%의 농도를 나타냈다. 변이계수는 1-1 지점보다 훨씬 큰 값을 나타냈는데 이는 오염원에서의 거리가 멀수록 불균질 지층의 통과 거리 및 시간이 길어지므로 지반 불균질성이 미치는 영향이 증가하여 농도의 변동성이 커지기 때문이다.

#### 4. 결론

수리전도도-분배계수 분포의 불균질 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 침출수는 수두 구배가 큰 고투수성의 상부층을 통하여 이동하였으며 이후 수직 방향의 이동이 증가하였다. 수리지질학적으로 균질한 지반 내에서 일정한 흡착을 고려할 경우 오염원 확산이 억제되어 오염 영역의 면적은 크게 축소되었다. 불균질 수리전도도 장을 갖는 매립지반 내 각 감시 지점에서는 시간이 경과함에 따라 매립장에서의 누출량 증가로 인하여 오염물 농도가 증가하였으며 표준 편차는 지속적으로 감소하였다. 수리전도도와 음의 상관 관계를 갖는 불균질 분배계수 장을 동시에 고려할 경우 오염물 이동의 변동성을 크게 증가시켜 오염 영역의 면적 및 특정 지점 농도의 표준편차 및 변이계수가 증가하였다. 또한 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 불균질 지층의 통과 거리 및 시간이 길어지므로 지반 불균질성의 영향이 증가하여 농도의 변동성이 커지는 경향을 보였다.

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.

#### 사 사

본 연구는 2008학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구 과제) 지원에 의하여 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Khanbilvardi, R. M., Ahmed, S., and Gleason, P. H., "Flow investigation for landfill leachate (FILL)," *J. Environ. Eng.*, **121**(1), 45~57(1995).
2. Sophocleous, M., Stadnyk, N. G., and Stotts, M., "Mo-

- deling impact of small Kansas landfills on underlying aquifers," *J. Environ. Eng.*, **122**(12), 1067~1077(1996).
3. 이승희, 유호식, "매립지 지반에서의 침출수 거동현상에 대한 민감도 분석," 대한환경공학회지, **19**(9), 1135~1146 (1997).
4. Lee, K. K., Kim, Y. Y., Chang, H. W., and Chung, S. Y., "Hydrogeological studies on the mechanical behavior of landfill gases and leachate of the Nanjido landfill in Seoul, Korea," *Environ. Geol. Water Sci.*, **31**(3), 185~198(1997).
5. Ritterling, J. M. and Stansbury, J. S., "Alternative use of MULTIMED model for Subtitle D landfill applications," *Prac. Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, **2**(4), 172~182(1998).
6. Hudak, P. F., "Monitoring groundwater at landfills equipped with leachate collection systems," *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **66**, 156~161(2001).
7. Dho, N. M., Koo, J. K., and Lee, S. R., "Prediction of leachate level in Kimpo Metropolitan landfill site by total water balance," *Environ. Monitoring and Assessment*, **73**, 207~219(2002).
8. Aksoy, A. and Culver, T. B., "Impacts of physical and chemical heterogeneities on aquifer remediation design," *J. Water Resour. and Management*, **130**(4), 311~320(2004).
9. Poeter, E. P. and Gaylord, D. R., "Influence of aquifer heterogeneity on contaminant transport at the Hanford site," *Ground Water*, **28**(6), 900~909(1990).
10. Boggs, J. M., Young, S. C., Beard, L. M., Gelhar, L. W., Rehfeldt, K. R., and Adams, E. E., "Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer. 1: overview and site description," *Water Resour. Res.*, **28**(12) 3281~3291(1992).
11. 권재필, 박홍석, 김승현, "Monte carlo 해석법을 이용한 매립장 침출수의 중금속 농도 예측 모델 개발," 대한환경공학회지, **23**(1) 163~174(2001).
12. 이근상, "수리지질학적으로 불균질한 매립지반 내에서의 침출수 이동에 대한 Monte-Carlo 시뮬레이션," 한국지구시스템공학회지, **42**(5), 437~444(2005).
13. Goyette, M. L. and Lewis, B.-A. G., "Kd in screening-level ground-water contaminant-transport model," *J. Environ. Eng.*, **121**(7), 537~541(1995).
14. MacIntyre, W. G., Antworth, C. P., Stauffer, T. B., and Young, R. G., "Heterogeneity of sorption and transport-related properties in a sand-gravel aquifer at Columbus, Mississippi," *J. Contam. Hydrol.*, **31**, 257~274(1998).
15. Zhang, Z. and Brusseau, M. L., "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(2004).

16. Fetter, C. W., Contaminant Hydrogeology, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ(1999).
17. Burr, D. T., Sudicky, E. A., and Naff, R. L., "Nonreactive and reactive solute transport in 3-D heterogeneous porous media: mean displacement, plume spreading and uncertainty," *Water Resour. Res.*, **30**(3), 791~815(1994).
18. Kitanidis, P. K., Introduction to Geostatistics: Application to Hydrogeology, Cambridge University Press, Cambridge, U.K(1997).
19. Sharp-Hansen, S., Traverse, C., Hummel, P., and Allison, T., A Subtitle D Landfill Application Manual for the Multimedia Exposure Assessment Model (MULTIMED), U.S. EPA, Athens, GA(1990).
20. Li, S.-G. and Liu, Q., "Interactive ground water: an innovative digital laboratory for groundwater education and research," *Comp. Applic. in Eng. Edu.*, **11**(4), 179~202 (2004).