

오염된 다공성 지하에서 화학적 오염물의 이동에 관한 연구

김민찬 · 윤도영*†

제주대학교 공과대학 화학공학과

*광운대학교 공과대학 화학공학과

(1997년 1월 29일 접수, 1997년 6월 16일 채택)

A Study on the Chemical Transport through Contaminated-Porous Grounds

Min Chan Kim and Do-Young Yoon*†

Dept. of Chemical Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

*Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received 29 January 1997; accepted 16 June 1997)

요 약

침출수에 의한 폐기물 매립지 근처의 지하 환경의 오염 및 대처 방안의 효과를 수치적으로 해석하였다. 다공성 지하에서 Darcy 법칙을 만족하는 침출수의 흐름에 대하여, 오염물질의 이동은 이산-분산 모델에 수착의 효과를 부가하여 예측하였다. 이를 위하여 2차원계에 대한 침출수의 유동 및 오염물질의 전달현상을 Galerkin 유한 요소법을 사용하여 해석하였다. 해석 결과 침출수의 흐름은 매립지 제방 근처에서 강하게 일어나는 것으로 나타났다. 오염물의 전달을 지연하기 위한 방안으로의 연직 차수막과 표면 차수막을 채택하여 오염물의 오염 현상을 예측하였다. 연직 차수막은 오염물질의 이동을 지연시키는데 있어 큰 효과를 기대할 수 없으나, 표면 차수막의 경우 차수막의 투수계수가 작을수록 차수막 하부의 오염물 이동이 강하게 억제됨을 알 수 있었다. 한편, 토양의 수착능은 오염물질의 이동을 지연시키는데 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다.

Abstract—The leachate contamination of the ground environment and its preventive issues around the waste landfill site have been analysed using the numerical analysis. For the Darcian flow of leachate in porous grounds, the transport of chemical contaminants was predicted on the basis of the advection-dispersion model including the sorption effect. The Galerkin finite element method was adopted in order to characterize the 2-dimensional system involving both the flow of leachate and the transport of contaminants in the leachate. It is shown that the leachate flows strongly under the dam of the landfill. The effects of the vertical liner and the horizontal one instrumented on the waste landfill site for the retardation of the chemical transports were examined simultaneously. It is seen that the vertical liner is not proper to retard the transport of contaminants in the leachate. The horizontal liner, however, retards the transport in the direction of gravitational force. And the capacity of the sorption of soils was expected to make retardation rather than the liners.

Key words: Ground Environment, Contamination, Transport, Advection-Dispersion, Waste Landfill, Retardation, Liner

1. 서 론

최근 산업의 고도화와 함께 배출되어지는 수용성 오염물의 증가로 인하여 강과 호수 등의 오염은 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히 생활수준의 향상으로 물 문제에서도 양뿐만 아니라 질이 중요하게 되었다. 이에 따라 용수의 질에 대한 관심이 지하수에 이르게 되었다. 그러나 인간들의 소비 생활의 부산물인 수많은 수용성 화합물이 지하 환경을 심각하게 위협하고 있다. 지표수의 오염 문제는 강력한 배출 규제에 어느정도 해결될 가능성이 있지만 지하수의 경우에는 오염이 문제화되기까지 많은 시간이 걸리며, 오염지역

을 탐지하는 것이 어렵기 때문에 여러 면에서 해결책을 찾기가 어렵다. 또한 지하수계는 지표수와 연결되어 있기 때문에 지하 환경의 오염은 궁극적으로 지표수의 오염을 유발하게 된다.

이러한 배경에서 지표수의 오염 문제에 대한 관심은 알려진 오염물의 배출을 줄이는 쪽으로 집중되어 있으나, 지하수의 경우에는 현존하는, 또는 계획 중인 공업, 농업, 도시활동이 지하수 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 지하수 오염 기구의 규명과 오염물의 이동에 대한 신뢰성있는 예측에 관심을 두어 왔다. 오염물의 이동에 대한 연구에 초기에는 주로 간단한 계에 대한 해석적인 방법이 사용되었으나, 최근에는 컴퓨터의 발달과 함께 좀더 복잡한 계를 해석하

기 위해서 수치적인 방법이 사용되고 있다. Freeze[1]는 분산 및 지연의 효과를 무시한 대류 및 확산에 의한 오염물질의 전달을 유한차분 방법을 사용하여 예측하였다. 유한차분법을 사용한 대류 및 분산의 효과를 포함하는 오염물질의 전달 모델링은 Konikow와 Bredehoeft[2]와 Robson[3]에 의하여 진행되었다. Robertson과 Barraclough[4]는 선형 등온선 형태의 가역적 수축에 의한 지연의 효과를 포함하여 오염물질의 전달을 유한차분법으로 해석하였다. Pinder[5]와 Pickens와 Lennox[6]는 Galerkin 유한요소법을 사용하여 지하에서의 오염물질의 전달을 해석하였다.

선진국에서는 오염 물질의 지하로의 유입을 엄격히 규제하고, 지하수 보호 구역을 설정하여 오염물의 지하 유입에 대한 사전 사후 관리를 엄격히 하고 있다. 그러나 국내에서는 지하수 관리에 대한 제도적 방안이 미소하고, 현재까지는 다양한 폐기물을 처리하기 위해서 지하로 매립하는 방법이 일반화되어 있기 때문에 국내 전체 지하수 중 약 17%가 환경 기준치를 초과하는 것으로 밝혀졌다[7]. 특히 우리 나라의 경우 현재 전국에 약 700여 곳의 쓰레기 매립지가 운영되고 있으나, 상당 부분의 매립지가 소규모로 저습지, 폐하천 부지 등에 임시 방편적으로 임지하여 비위생적으로 관리되고 있는 실정이다. 이러한 소규모의 비위생적 매립지로부터 나오는 침출수에 의한 지하 환경의 오염은 심각한 문제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 폐기물 매립지 침출수에 의한 지하 환경 오염 메커니즘을 검토하고 오염 방지 및 교정 대안의 효과를 정량화하기 위한 방안을 고찰하였다. 이를 위하여 지하수의 흐름과 오염물의 이동을 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 본 연구에서는 침출수에 의한 지하 환경의 오염을 방지하기 위하여 매립지에서 발생하는 침출수의 이동을 차단하는 방법, 침출수 중의 오염물질과 토양과의 흡착을 이용하여 침출수에 포함되어 있는 오염물질의 이동을 늦추는 방법의 효과를 살펴보았다. 이와 같은 연구는 최근 폐기물 매립지 주변의 침출수 유출로 인한 환경 관리 방안으로서의 인근 토양오염을 억제하기 위한 공학적 자료 확보에 있어서 중요한 역할을 하게 될 것이다.

2. 지하수 흐름 및 오염물질의 전달 모델링

2-1. 기본 가정

지하에서의 지하수의 흐름 및 오염물질의 전달을 유한요소법으로 모델링하기 위하여 본 연구에서는 Pickens와 Lennox[6] 등이 사용한 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- (1) 지하수의 흐름은 정상상태이다.
- (2) 지하의 다공질 매질의 특성은 투수계수 등 흐름에 대해서는 이방성(anisotropic)이지만 분산 등 오염물질의 전달에 대해서는 등방성(isotropic)이다.
- (3) 지하수 흐름의 속도는 Darcy 법칙이 적용되는 범위에 있다.
- (4) 지하수의 밀도, 점도 등 흐름에 영향을 주는 물성들은 오염물질의 존재에 영향을 받지 않고 일정하다.
- (5) 오염물질과 지하 토양과의 수축은 항상 평형 상태에 있다.
- (6) 유한요소법에서 계산된 속도 분포는 불연속적이지만, 이 불연속성의 효과는 무시할 만하다.

2-2. 지하수 흐름

토양을 통한 지하수의 흐름은 다공성 매질층에서의 흐름을 나타내는 다음과 같은 Darcy 법칙에 의하여 표현될 수 있다.

$$\vec{v} = -\frac{k g \rho}{\mu} \nabla h = -\frac{K}{\epsilon} \nabla h \quad (1)$$

여기서 \vec{v} , k , ρ , g , μ , ϵ , h , K 는 각각 속도, 투수계수(permeability) 텐서, 유체의 밀도, 중력 가속도, 점도, 공극률, 수두, 도수율 텐서를 나타낸다. 음의 부호(-)는 흐름이 수두가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다는 것을 나타내므로 좌표계의 설정에 따라 생략될 수도 있다. 위식은 지하수의 흐름은 수두에 의한 압력 구배와 투수계수에 비례하고, 점도와 공극률에 반비례한다는 것을 나타낸다. 이러한 인자들 중에서 투수계수는 지하수 흐름에 영향을 주는 가장 중요한 인자로 작용한다. 만일 투수계수 텐서의 주 방향이 좌표계와 일치하면 투수계수 텐서는 다음과 같이 나타낸다.

$$k_{ij} = k_1 \delta_{1i} \delta_{1j} + k_2 \delta_{2i} \delta_{2j} + k_3 \delta_{3i} \delta_{3j} \quad (2a)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker의 delta이다. 등방성인 경우에는 투수계수 텐서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{ij} = k_1 \delta_{ij} \quad (2b)$$

식 (1)을 잘 알려진 연속 방정식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = -\nabla \cdot \left(\frac{K}{\epsilon} \nabla h \right) = 0 \quad (3)$$

위의 식은 지하수의 흐름을 해석하는데 기본이 되는 식이다.

2-3. 오염물질의 이동

침출수의 흐름에서 오염물질의 이동은 이산(advection), 분산(dispersion), 수착(sorption), 변환(transformation)에 영향을 받는다. 이산은 식 (1)에 주어지는 지하수의 흐름의 평균 속도로 오염 물질이 이동하는 것을 나타낸다. 그러나 오염 물질은 수력학적으로 기대되는 흐름 방향으로부터 이탈하여 퍼지는 경향이 있다. 이러한 현상을 분산이라 하는데 오염 물질이 주위와 섞이는 과정이다. 분산에는 분자 확산과 기계적 분산이 있다. 분자 확산은 액상에서의 오염물질의 농도차에 의해 일어나며, 침출수의 속도가 작을 때 중요하다. 다공성 매질에서의 확산 계수는 공극률과 굴곡도에 영향을 받는다. Millington과 Quirk[8]는 사암(sandstone)과 모래에서의 유효 확산 계수와 분자 확산 계수의 비는 $\epsilon^{4/3}$ 에 반비례한다고 하였다. 본 연구에서는 유효 확산 계수를 다음과 같은 관계로 나타내었다.

$$D_{eff} = \epsilon^{4/3} D_m \quad (4)$$

여기서 분자 확산 계수 D_m 은 오염물질의 화학적 특성에 의해 결정되어지고 공극률은 지하 토양의 특성에 의하여 결정되어진다.

과립상의 다공성 매질층에서 기계적 분산은 다음과 같은 세 가지 기구에 의하여 일어난다고 알려져 있다[9]. 첫번째 기구는 개별 기공 channel에서 기공 표면에 의해 유체에 작용하는 항력때문에 channel내의 위치에 따라 오염 물질 분자들이 서로 다른 속도로 이동하기 때문에 나타난다. 각 기공 channel들에서 물의 부피에 대한 표면적과 표면 거칠기가 다르기 때문에, 다른 기공 channel에서는 오염 물질의 이동 속도가 다르다. 따라서, 두번째 기구는 물 분자들이 흘러가는 방향에 따라 토양의 기공의 크기의 차이에 의하여 나타난다. 세번째 분산 기구는 기공 channel들의 굴곡도, 분지, 내부 구부러짐과 관련되어 있다.

Scheidegger[10]는 기계적 분산이 지배적인 경우 분산 계수 D 와 유체의 평균 속도 v 사이에는 선형관계가 있다고 제안하였다. 이 관계는 Bear[11]에 의하여 다음과 같은 방정식으로 주어졌다.

$$D_L = \alpha_L v \quad (5a)$$

$$D_r = \alpha_r v \quad (5b)$$

여기서 D_L 은 종방향 분산 계수, D_r 은 횡방향 분산 계수, α_L 은 종방향 분산자, α_r 은 횡방향 분산자이다. 분자 확산 및 기계적 분산을 고려한 분산 tensor는 다음과 같이 나타내어진다.

$$D_{ij} = \alpha_{ijm} \frac{v_m \cdot v_n}{|v|} + D_{eff} \delta_{ij} \quad (6)$$

여기서 α_{ijm} 항은 분산자를 나타낸다. 등방성인 경우에, 다음에 주어지는 항을 제외한 모든 α_{ijm} 항은 0이 된다.

$$\alpha_{iii} = \alpha_L \quad (7a)$$

$$\alpha_{ijj} = \alpha_L \quad (7b)$$

$$\alpha_{iji} = \alpha_{jji} = \frac{1}{2}(\alpha_L - \alpha_r), i \neq j \quad (7c)$$

Neuman[12]은 지하 토양에서의 분산자에 대한 총괄적인 값의 범위가 0.01 m에서 100 m까지 나타나고 있음을 보여 주었다.

수착(sorption)은 흡착(adsorption)과 탈착(desorption)으로 나누어지는데, 흡착은 오염 물질이 침출수에서 토양으로, 탈착은 오염된 토양에서 지하수로 오염 물질이 이동하는 현상을 말한다. 수착은 오염 물질의 전체 농도에는 영향을 주지 않는다. 일반적으로 침출수에서 나오는 오염 물질과 지하 토양사이의 수착은 매우 빨리 일어난다. 오염 물질의 농도가 높지 않은 경우에는 넓은 농도 범위에 걸쳐서 다음과 같은 평형 관계가 성립한다.

$$S = K_d C^b \quad (8)$$

여기서 S는 토양의 단위 건조 질량당 토양에 흡착된 오염 물질의 질량이고, C는 오염 물질의 농도이다. K_d 와 b는 오염 물질의 종류, 토양의 특성 등에 의존하는 상수이다. 본 연구에서는 b=1인 선형 등온 식을 사용한다. 따라서 식 (8)로부터 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\frac{dS}{dC} = K_d \quad (9)$$

여기서 K_d 는 분배계수로 알려져 있다. 이와 같이 분배계수를 사용하는 해석은 흡탈착은 완전히 가역적이고, 지하수 흐름에 비해서 매우 빨리 일어난다는 가정하에서만 가능하다.

만약 오염 물질이 이동하는 과정에서 화학적/생물학적 반응이 일어난다면, 오염 물질의 전체 농도는 감소하게 된다. 이를 변환이라 하는데, 이 변환 과정에는 이온 교환, 산화, 환원, 가수분해, 생물학적 변환이 있다. 변환에 의한 오염물질의 양의 변화는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\epsilon C)}{\partial t} = -\lambda(\epsilon C + \rho_b K_d C) \quad (10)$$

여기서 λ 는 반응속도 상수이다. 위식에서 반응은 1차라고 가정하였다.

포화된 지하 토양에서 오염 물질의 이동을 지배하는 방정식은 위의 전달 메커니즘을 기본으로 하여 물질보존식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v} C) - \lambda R_f C \quad (11)$$

여기서 $R_f = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\epsilon}$ 은 지연인자(retardation factor)이다. 지연인자는 수착과 관련이 있다. 일반적으로 ρ_b 와 ϵ 은 토양에 따라 크게 변하지 않으나 K_d 는 토양에 따라 크게 변한다. 따라서 지연인자 R_f 는 K_d

에 강하게 의존한다. 이산과 분산은 속도와 연관되어 있으므로 오염 물질의 이동을 해석하기 위하여서는 식 (1)과 (2)로 주어지는 속도장을 먼저 해석하여야 한다.

3. 수치해법

3-1. 대상계

본 연구에서 대상으로 하고 있는 계는 Fig. 1a에서 보는 바와 같다. 그림에서 매립지의 수평면이 상당히 넓고, 오염물의 농도는 수평면에 대하여 일정한 것으로 가정된다. 또한 수두에 의한 유체의 정압은 등방성이므로 압력차에 의하여 유발되는 흐름의 방향은 주로 수두가 상대적으로 낮은 댐의 반대편과 유체정압에 의한 연직방향의 2차원 흐름이 가정되어 진다. 본 연구에서 설정된 계에 대한 경계조건들은 그림에 도시되어 있다. 김포 수도권 위생 매립지의 경우, 투수계수는 지하 8 m 정도까지 10^{-5} cm/s로 측정되었고, 지하 8 m 이하 10 m까지는 10^{-7} cm/s로 알려지고 있다[13]. 따라서, 본 연구에서는 이를 기초로하여 매립지 근처에서의 지하 환경의 오염 정도를 예측하려 하고 있다. 공극률은 지하 8 m까지는 0.4이고 지하 8 m 이하 10 m까지는 0.3이라고 두었다. 본 연구에서는 매립지 안의 침출수의 수위를 3 m, 매립지 밖의 수위를 0 m로 가정하였다. 오염 물질의 전달을 해석하는데 필요한 확산계수를 1×10^{-5} cm²/s로 가정하였고, 분산자는 $\alpha_L=5$ m, $\alpha_r=1$ m로 가정하였다[6]. 확산계수는 오염 물질의 화학적 성질에 따라서 달라지고, 분산자는 지하 토양의 물리적 조건에 따라 크게 변할 수 있으나 본 연구에서는 위와 같은 값을 사용하였다. 본 연구에 사용한 경계조건은 Fig. 1a에 나와 있는 것과 같이 수위 및 농도가 주어지지 않은 곳에는 수직 방향으로의 구배를 0으로 두었다. 한편, 차수막을 설치할 경우에는 투수계수의 크기가 작을수록 수평방향 및 수직방향으로 침출수의 이동량 및 오염물의 전달이 약해지므로, 차수막의 투수계수를 1×10^{-7} cm/s 이하의 작은 값으로 정하였다. 실제 차수막에는 천연재료인 점토, 시멘트, 벤토나이트 등과 합성재료인 고밀도폴리에틸렌 등이 사용된다.

본 연구에서는 화학적/생물학적 변환의 효과를 무시하였다. 매립지에서는 오염 물질의 이동과 전달이 가장 잘 일어나는 조건에서 오염 정도를 예측하기 위하여 일반적으로 변환의 효과를 포함시키지 않고 해석을 진행한다. 일반적으로 생화학적 변환은 오염 물질의 농도를 떨어뜨리므로, 이를 이용하여 오염을 예방하거나 오염된 지하 환경 복원에 대한 연구를 할 경우에는 이의 효과를 도입하여야 한다.

3-2. 유한요소법 해석

Fig. 1a에 보이는 바와 같은 2차원 계에서 침출수의 흐름은 식 (3)으로 부터 구해지는 다음과 같은 2차원 Laplace 방정식으로 나타낼

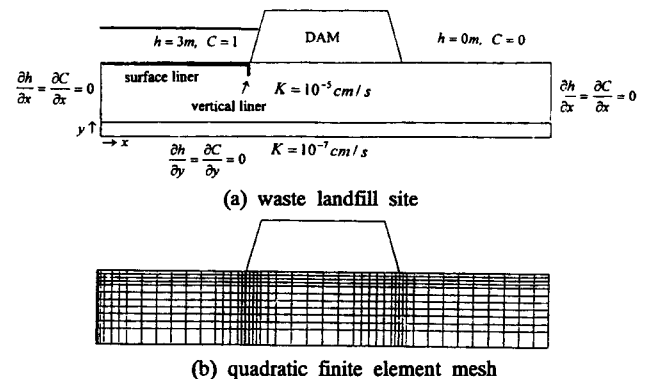


Fig. 1. Schematic diagram and finite element of the present system.

수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (12)$$

지하에서의 흐름을 수치적으로 해석하는 방법은 크게 유한차분법과 유한요소법이 많이 쓰인다. 일반적으로 불균질한 수력학적, 지질학적 성질들과 복잡한 경계를 포함하는 문제를 해석하는데에는 유한요소법이 유한차분법 보다 유리하다고 알려져 있다[14]. 따라서 본 연구에서는 잘 알려진 Galerkin 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 유한요소법을 사용하여 해를 구하기 위하여 수두 h 를 다음과 같이 근사적으로 나타낸다.

$$h \approx \hat{h}(x, z) = \sum_{i=1}^n h_i N_i(x, z) \quad (13)$$

여기서 $N_i(x, z)$ 는 경계조건을 만족하는 형태함수(shape function)이고, h_i 는 i 번째 node에서의 수두의 근사치이다. Galerkin 유한요소법에 의한 이산화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_e \int_{\Omega'} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{xz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) \right] N_i dx dz = 0 \quad (14)$$

여기서 e 는 element를 나타내고, Ω' 는 e 번째 element가 차지하는 영역을 나타낸다. 위식에 Green의 정리를 적용하여 2계 미분을 1계 미분으로 나타내고, 그 결과를 행렬의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$[A] \{h\} = \{B\} \quad (15)$$

여기서 A 와 B 는 다음과 같이 나타내어지는 행렬과 벡터이다.

$$A_{ij} = \sum_e \int_{\Omega'} \left(K_{xx} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dz \quad (16a)$$

$$B_j = \sum_e \int_{\Gamma} N_j \left(K_{xx} \frac{\partial N_i}{\partial x} n_x + K_{xz} \frac{\partial N_i}{\partial z} n_z \right) h_i d\Gamma \quad (16b)$$

여기서 Γ 는 e 번째 element의 경계면을 나타내며, n_x , n_z 는 경계면과 수직 방향의 단위 벡터이다. 행렬 A_{ij} 는 대칭 행렬이다. 벡터 B_j 는 j 번째 node에서의 플럭스를 나타낸다. 한편, 속도분포를 구하기 위하여 본 연구에서는 수두의 구배를 다음과 같이 차분법으로 근사하였다.

$$v_x^e \approx K_x \frac{h_{e,1} + h_{e,2} - h_{e,3} - h_{e,4}}{2\Delta x} \quad (17a)$$

$$v_y^e \approx K_y \frac{h_{e,1} + h_{e,2} - h_{e,3} - h_{e,4}}{2\Delta y} \quad (17b)$$

여기서, v_x^e , v_y^e 와 $h_{e,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$)는 e -th element에서의 x 방향과 y 방향의 속도와 수두를 각각 나타내고 있다.

본 연구에서 고려되고 있는 것과 같은 2차원 계에서 오염 물질의 전달을 지배하는 지배 방정식은 다음과 같다.

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{xz} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial z} + D_{zx} \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial x} + D_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial x} (v_x C) - \frac{\partial}{\partial z} (v_z C) \quad (18)$$

여기서 각 분산계수들은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} + \alpha_T \frac{v_z^2}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} + D_{eff} \quad (19a)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x \cdot v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} \quad (19b)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} + \alpha_T \frac{v_x^2}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} + D_{eff} \quad (19c)$$

본 연구에서는 고려되는 계에서는 흐름이 2차원이므로, 분산계수 $D_{zz}=D_{xx}(\neq 0)$ 이다. 만약 흐름이 x 방향으로의 1차원 흐름이라면, $v_z=0$ 이 되고, 따라서 $D_{xx}=\alpha_L v$, $D_{zz}=\alpha_T v$, 이고 $D_{xz}=D_{zx}(\neq 0)$ 이 된다[15]. 본 연구에서 고려되는 계와 비슷한 계에 대한 해석은 Pickens와 Lennox[6]에 의하여 수행되었다. 한편, 유한요소법을 사용하여 해를 구하기 위하여 농도 C 를 다음과 같이 근사적으로 나타내었다.

$$C \approx \hat{C}(t, x, z) = \sum_{i=1}^n C_i(t) N_i(x, z) \quad (19)$$

여기서 $N_i(x, z)$ 는 경계조건을 만족하는 형태함수(shape function)이고, C_i 는 i 번째 node에서의 농도의 근사치이다. Galerkin 유한요소법에 의한 이산화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[E] \{C\} + [F] \left\{ \frac{\partial C}{\partial t} \right\} = \{G\} \quad (20)$$

여기서 E , F 와 G 는 다음과 같이 나타내어지는 행렬과 벡터이다.

$$E_{ij} = \sum_e \int_{\Omega'} \left[\left(D_{xx} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + D_{xz} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial z} + D_{zx} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial x} + D_{zz} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} + v_x N_i \frac{\partial N_j}{\partial x} + v_z N_j \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) \right] dx dz \quad (21)$$

$$F_{ij} = \begin{cases} \sum_e \int_{\Omega'} R_f N_i N_j dx dz & \text{for } i=j \\ 0 & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (22)$$

$$G_j = \sum_e \int_{\Gamma} C_i \left[\left(D_{xx} \frac{\partial N_i}{\partial x} n_x + D_{xz} \frac{\partial N_i}{\partial z} n_x \right) + \left(D_{zx} \frac{\partial N_i}{\partial x} n_z + D_{zz} \frac{\partial N_i}{\partial z} n_z \right) \right] N_j d\Gamma \quad (23)$$

행렬 E_{ij} 는 속도에 대한 1차 미분항인 이산항 때문에 행렬 A_{ij} 와는 달리 대칭 행렬이 아니다. 벡터 G_j 는 j 번째 node에서의 분산에 의한 플럭스를 나타낸다.

유한요소법을 적용한 결과는 dC/dt 를 포함하는 n 개의 연립 상미분 방정식을 준다. 시간에 대한 미분을 유한차분법으로 근사하기 위하여 다음과 같이 평균치의 정리를 사용한다.

$$\frac{dC}{dt}(\tau) = \frac{C(t+\Delta t) - C(t)}{\Delta t} \quad (24)$$

여기서 τ 는 t 와 $t+\Delta t$ 사이의 시간이다. 위의 결과를 사용하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$C(\tau) = C(t) + (\tau - t) \frac{dC}{dt}(\tau) \quad (25)$$

따라서 t 와 $t+\Delta t$ 사이에서의 농도의 대표값은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C(\tau) = (1 - \bar{\omega})C(t) - \bar{\omega}C(t + \Delta t) \quad (26)$$

여기서 $\bar{\omega} = (\tau - t) / \Delta t$ 이다. 식 (20)에서 농도 C 에 이 관계를 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\{[F] + \bar{\omega}\Delta[E]\} \{C\}_{t+\Delta t} = \{[F] - (1 - \bar{\omega})\Delta t[E]\} \{C\}_t + \bar{\omega}\Delta t \{G\}_{t+\Delta t} + (1 - \bar{\omega})\Delta t \{G\}_t \quad (27)$$

여기서 $\bar{\omega} = 0$ 이면 전진 차분(forward difference), $\bar{\omega} = 1$ 이면 후진 차분(backward difference), $\bar{\omega} = 0.5$ 이면 Crank-Nicholson 식이 된다. $\bar{\omega} \geq 0.5$ 이어야 항상 안정하므로 해의 안정성을 위하여 일반적으로 $\bar{\omega} \geq 0.5$ 의 조건을 사용한다. 본 연구에서는 $\bar{\omega} = 1$ 을 사용하였다. $\bar{\omega} = 1$ 인 경우 이 식은 비선형 연립 방정식이 된다. 따라서 이 식을 풀기 위해서는 반복법을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 잘 알려진 Newton-Raphson법을 사용하였다. 반복법을 사용하는 경우, 수렴성은 시간 간격 Δt 에 의존하므로 직전 시간에서의 수렴성을 고려하여 적절하게 시간 간격을 결정하여야 한다.

4. 결과 및 검토

폐기물매립지 주변의 토양오염현황은 매우 심각하며, 이의 억제 방안으로 차수막의 설치가 제안되고 있다. 폐기물매립지에 설치되는 차수막에는 일반적으로 연직차수막과 표면차수막으로 분류되어진다. 차수막의 형태에 따라 침출수의 유동 및 화학적 오염물의 이동현상들이 달라질 것으로 예상되므로 이의 엄밀한 정량적인 평가가 이루어져야 할 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 우선 차수막이 없는 경우에서의 침출수의 유동 및 오염물의 이동현상을 해석하고, 이를 근거로 연직차수막이 설치될 경우와 표면차수막이 설치되었을 경우에 대한 유동 및 이동현상을 수치적으로 해석하여 그 결과들을 비교하였다. 따라서 본 연구의 결과들은 차수막 설치로 인한 토양오염의 억제효과들을 예측함과 동시에 차수막 설치조건 및 입지선정 등에 있어서 중요한 정보를 제공하여 줄 것이다. 본 연구에서 사용된 mesh는 Fig. 1b에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 본 연구에서는 직사각형 요소를 사용하였다. 앞서 설명된 유한요소법을 사용하여 침출수의 수위와 속도분포가 우선적으로 구해진다.

차수막을 설치하지 않을 경우에 대한 수위와 속도분포가 Fig. 2에 나타나 있다. 그림에서 수위의 등포텐셜선들이 매립지의 제방을 중심으로 대칭을 이루고 있으므로, 침출수의 이동이 존재하는 것을 나타내고 있다. 한편, 토양의 투수계수가 변화되는 지점에서 수두구배의 변화가 나타나고 있어 투수계수의 변화가 유동의 변화에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 속도벡터의 그림을 보면 제방의 경계면에서 강한 흐름이 존재하고 제방의 하부에서는 거의 평행한 흐름

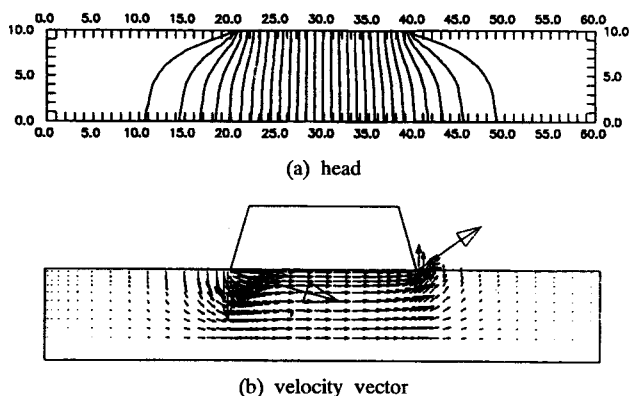


Fig. 2. Head and velocity distribution of leachate without liners.

이 존재한다. 즉, 침출수의 유동을 나타내는 유동벡터는 투수계수가 큰 지역에서 크게 나타나고 있으며, 투수계수가 작은 지역에서는 작게 나타나고 있어 매립지의 제방하부에서 침출수의 유동이 빠르다는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 속도분포는 제방의 입구부와 출구부의 지표면에서 유속이 제일 크다는 것을 보여주고 있다.

침출수 오염 물질의 농도는 전달현상의 지배방정식인 Advection-Dispersion 방정식에 의해 표현될 수 있다. 전달현상의 지배방정식을 풀기 위하여는 앞의 유동지배방정식의 해를 구하고 유동지배방정식에 의한 수위와 Darcy의 법칙으로부터 속도를 구하여 전달현상지배방정식에 도입하여야 한다. 전달현상지배방정식의 해를 구하기 위하여 마찬가지로 Galerkin 유한요소법을 사용하였다. 앞서 구한 속도장하에서 1년, 3년 그리고 5년후의 침출수의 오염물질의 농도분포를 Fig. 3에 도시하였다. 그림에서 매립지내의 농도를 1로 가정하였다. 1년후에는 농도의 5%가 되는 지점이 매립지 제방 하부로 5m 정도되고, 3년후에는 농도의 5%가 되는 지점이 8m를 지나게 된다. 그 이후에는 그림에 보이는 바와 같이 제방하부로의 이동은 증가되지 않고 오염물은 제방의 하류방향으로 확산되어진다. 즉, 오염물의 이동은 이동초기에는 토양의 하부로의 이동이 진행되나, 점차 시간이 흐르면 지하수의 유동방향으로의 진행이 확산(dispersion)과 함께 일어나게 된다. 그림에서 보이듯이 그림의 지표면 기준점을 (0, 10)으로 하였을 때, 지표면에서 오염물의 진행거리는 5%인 지점의 위치가 1년후에는 27m, 3년 후에는 32m 그리고 5년후에는 34.4m에 도달하게 된다. 그림에서 보듯이 5년 후에 오염물질의 농도가 5%가 되는 점이 이미 제방의 상단 부분까지 도달하므로, 궁극적으로는 오염물질이 매립지 제방을 완전히 통과하고 침출수의 유동에 많은 영향을 받아 농도분포가 침출수의 흐름과 유사하게 나타날 수 있음을 짐작할 수 있다.

연직 차수막의 효과를 검토하기 위하여 매립지 쪽 제방 경계면에 1m, 2m의 연직 차수막을 폭 50cm로 설치한 경우를 가정하였다. 연직 차수막을 1m로 설치하였을 경우에 대한 침출수의 수두, 유동벡터와 오염물질의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 차수막의 효과는 차수막을 설치한 부분의 요소의 투수계수를 아주 작은 값으로 두어서 계산을 할 수 있다. 본 연구에서는 차수막의 투수계수를 10^{-10} cm/s로 설정하였다. 그림에서 보이듯이 침출수의 수두에 대한 등포텐셜선은 차수막이 설치되지 않았을 경우와 큰 차이가 없게 된다. 한편, 속도벡터 역시 차수막 근처에서 흐름이 우회하는 것을 제외하고는

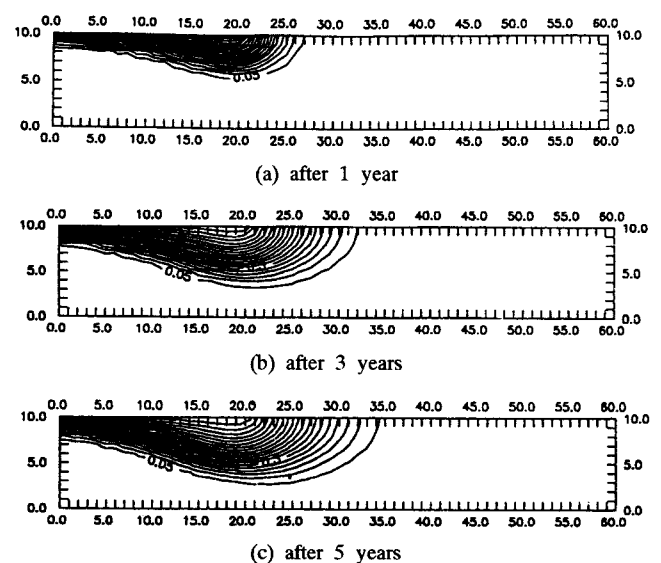


Fig. 3. Concentration distribution without liners.

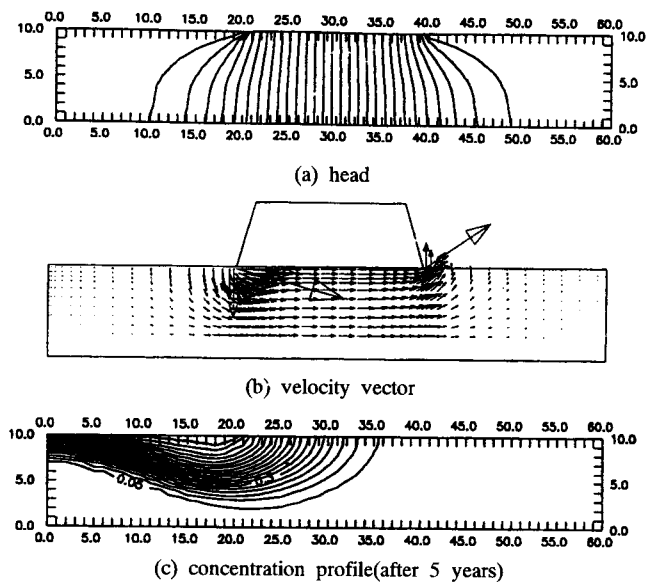


Fig. 4. Concentration behaviors for the vertical liner of depth 1 m.

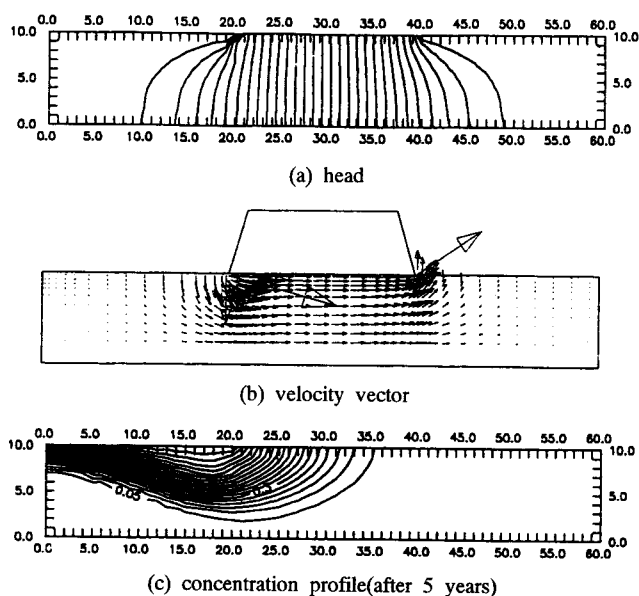


Fig. 5. Concentration behaviors for the vertical liner of depth 2 m.

차수막을 설치하지 않은 경우와 별 차이가 나지 않음을 볼 수 있다. 차수막의 깊이가 유동에 미치는 영향을 고려하기 위하여, 연직 차수막의 깊이가 2m인 경우에 대한 침출수의 수두, 유동벡터와 오염 물질의 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보이듯이, 차수막의 깊이는 수두 및 유동벡터의 변화를 기대할 수 없다. 이는 본 연구에서 채택된 Darcy 법칙하의 유동장이 잘 알려져 있는 포텐셜 유동이기 때문인 것으로 고려된다. 즉, 유속이 작은 경우에는 차수막에 수직으로 흐르는 유동장에 대한 속도분포는 차수막 전면에서의 유선이 차수막의 후면부에서도 일정하게 유지되어진다. 반면에 토양의 공극률이 크거나, 차수막의 깊이에 대하여 토양층의 특성이 다른 경우에는 차수막의 효과를 기대할 수 있으나, 이와 같은 가정은 현실성이 거의 없다고 말할 수 있다. 따라서 유동의 효과가 곧바로 오염물의 전달현상을 지배한다고 말할 수 있으므로, 농도분포는 차수막이 설치되지 않았을 경우와 거의 유사할 것으로 예측된다. 연직 차수막

을 설치하였을 경우 5년후에 대한 농도분포를 Fig. 4c에 차수막 깊이 1 m 그리고 Fig. 5c에 차수막 깊이 2m인 각각의 경우에 대하여 나타내었다. 차수막의 깊이가 클 때 오염물의 하부로 이동거리가 줄어들지만 그 차이는 매우 작다. 즉, 전반적인 오염형태가 차수막이 설치되지 않았을 때와 거의 변화가 없다고 말할 수 있다. 따라서 수두에 의한 침출수의 유동이 포텐셜 유동이므로 연직 차수막의 경우 두께와 같은 형태에는 거의 영향을 받지 않게 된다. 즉, 수두에 의한 압력차에 상응하는 차수막의 깊이가 설정되어 있지 못하면, 본 연구의 결과에서 보이듯이 침출수는 설치된 연직 차수막을 넘어갈 수 있는 유동상황이 발생할 수 있다. 그러나, 차수막의 깊이가 매우 깊어지면 수두에 의한 유동을 억제할 수 있으며, 지하의 지형구조 또한 침출수의 흐름에 어느정도 영향을 미치고 있을 것으로 예측할 수 있다. 차수막의 깊이가 깊어질 경우, 경제성을 감안하여야 할 것이며 최소의 차수막 깊이로 최대한의 침출수 유동방지를 할 수 있도록 침출수의 유동상황 및 매립지의 지형을 충분히 조사한 후 차수막을 설치하여야 할 것이다.

일반적으로 특정폐기물을 매립하는 경우에는 폐기물매립지에 표면 차수막을 설치한다. 이는 침출수내의 유해 화학적 오염물의 유출 및 이동현상을 차단하고 침출수를 수집하여 처리시설로 이송하기 위하기 때문이다. 표면 차수막의 효과를 정량적으로 고려하기 위하여 매립지 표면에 두께 50 cm 가량의 표면 차수막 설치를 가정하였다. 수치해석은 Fig. 1a에 나타나 있는 경계조건하에서 도출되었으며, 기본 설치조건들로는 매립지의 수두를 3m, 차수막의 두께를 50 cm 그리고 오염진행시간을 5년으로 각각 설정하였다. 한편, 수차는 일어나지 않는 경우로 가정되었다. 표면 차수막 설치로 인한 침출수의 유동장 및 농도장이동에 대한 영향을 살펴보기 위하여 매립지 바닥에 설치된 차수막의 투수계수를 10^{-7} cm/s와 10^{-9} cm/s로 설정한 각 경우에 대한 등포텐셜선을 Fig. 6a와 7a에 각각 나타내었다. 차수막의 투수계수를 10^{-7} cm/s로 하였을 경우의 수두의 등포텐셜선은 차수막을 설치하지 않았을 경우에 비하여 많은 차이가 나타나고 있다. 한편 토양의 투수계수가 변화되는 지역에서 등포텐셜선의 변화가 나타나고 있다. 차수막의 투수계수를 10^{-9} cm/s로 하였을 때 등포텐셜선을 살펴보면, 차수막하부의 등포텐셜선은 크게 변화되어 침출수의 흐름은 거의 없어지게 된다. 따라서 표면 차수막을 설치할

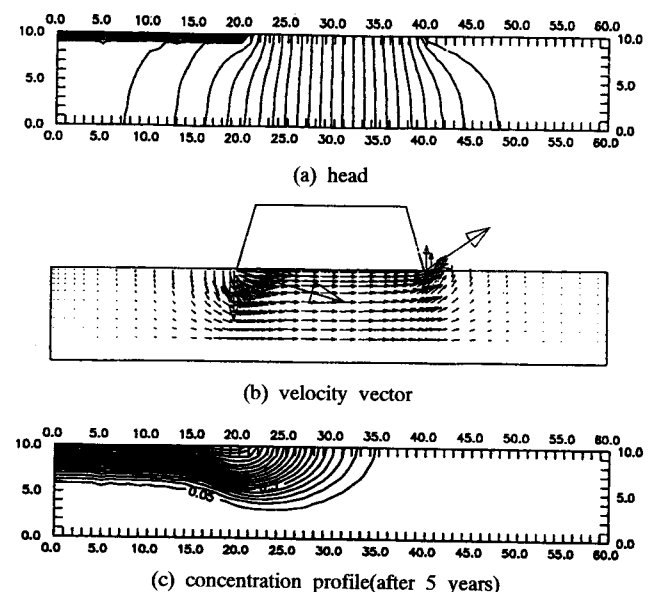


Fig. 6. Contamination behaviors for the horizontal liner with $K=10^{-7}$ cm/s.

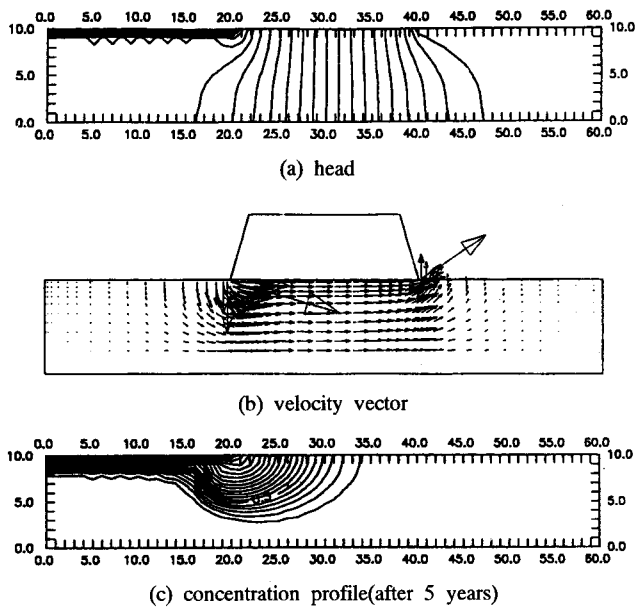


Fig. 7. Contamination behaviors for the horizontal liner with $K=10^{-9}$ cm/s.

경우에는 차수막의 투수계수가 침출수의 이동에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 표면 차수막의 설치시 침출수의 유동현상을 유동벡터로 나타내면 Fig. 6b와 7b와 같다. 유동벡터는 차수막을 설치하지 않았을 경우에 비하여 속도크기가 크게 변화되고 있지 않으나, 제방하부에서의 유동이 유동벡터의 크기가 모두 크게 나타나고 있다. 즉, 토양의 투수계수가 높은 지역층에서는 유동벡터가 크게 나타나고 있으며, 매립지의 제방하부의 입구부와 출구부에서 가장 큰 유동벡터가 나타나고 있다. 유동벡터의 분포가 차수막을 설치하지 않았을 경우와 거의 유사하게 나타나고 있음이 주목할 수 있다. 이와 같은 유동현상은 차수막의 두께가 흐름에는 거의 영향을 없을 것을 암시해준다.

표면 차수막이 설치된 폐기물 매립지 주변의 토양오염 현황을 오염물질에 대한 전달현상 지배방정식인 advection-dispersion 방정식을 앞의 방법과 마찬가지로 Galerkin 유한요소법으로 해석하였다. Fig. 6c와 7c에 5년 후의 침출수의 화학적 오염물의 농도분포를 도시하였다. 매립지의 오염농도를 기준으로 하여 5%가 되는 지역을 오염경계지역으로 하였을 경우, 차수막이 설치된 매립지하부의 토양오염은 현저히 감소되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 농도장을 크게 지배하는 영역인 매립지 하부에서의 수두분포가 거의 수평이다. 따라서 표면 차수막을 설치한 경우는 x 방향의 속도가 매우 작아서 농도분포도 수평인 형태를 보이나, 연직 차수막을 설치한 경우에는 담근처에서는 x 방향의 속도가 커서 x 방향으로 전달이 잘 일어나므로 담근처에서는 오염물이 넓게 퍼지게 된다. 매립지 내부에서는 표면 차수막을 설치한 경우보다 x 방향의 속도가 작아서 오염물이 x 방향으로 넓게 퍼지지 못한다. 한편, 차수막의 투수계수가 작을수록 오염물의 하부방향으로의 이동이 억제된다. 즉, 표면 차수막을 설치한 경우는 오염물질의 전달이 상당히 지연됨을 알 수 있다. 반면에 제방의 하부에는 오염물의 농도분포가 폭넓게 위치하므로 오염물의 2차적인 처리방안이 제방하부에서 이루어져야 효과적일 것으로 고려된다. 또한 제방하류로의 오염지역확산은 다른 경우와 매우 유사하게 된다. 이는 토양에서 침출수의 흐름이 작은 경우에는 일반적인 포텐셜 유동을 만족하므로 유동현상은 거의 유사할 것으로 고려된다. 한편, 침출수의 수두는 수직방향인 중력방향으로 작용하고 있

므로 수두의 높이가 클수록 상대적인 유동의 크기가 증가되는 경향을 보이게 되며, 이때에는 차수막의 투수계수가 충분히 작아 10^{-7} cm/s 이하인 경우에는 차수막에 대한 투수성을 거의 기대하기 어렵다고 말할 수 있다. 따라서, 차수막의 투수계수에 대한 영향이 크기 때문에 10^{-7} cm/s 이내의 투수계수가 낮은 차수재의 선택이 바람직하다.

폐기물매립지내에 표면 차수막을 설치하였을 경우에는, 차수막을 설치하였을 경우와 연직 차수막의 설치에 비하여 오염물질의 토양오염과 관련된 농도분포는 현저히 감소되고 있는 경향을 보여주고 있다. 물론 표면 차수막의 두께가 증가되면, 오염물의 지연효과를 기대할 수 있으나, 설치의 경제성이 고려되어야 할 것이며, 차수막의 설치와 투수계수의 특성 등을 고려할 수 있는 차수막의 재질의 선정이 더욱 중요하다고 말할 수 있다.

다짐과 복토는 침출수의 오염물질이 가능한 많이 수착되도록 하는 중요한 역할을 한다. 지하토양에서는 매립지에서 파생되는 침출수 오염물질의 수착은 선형평형등온선에 의해 표현될 수 있으며, 분배계수(K_d)에 의해 크게 영향을 받게 된다. 따라서 침출수의 화학적 오염물의 농도분포를 구하기 위하여 선형의 관계를 보이는 평형등온선 식을 포함한 전달현상 지배방정식을 유한요소법을 사용하여 수치적인 결과들을 구하였다. 침출수의 오염물질에 대한 K_d 수치는 오염물질의 성분에 따라 다르지만 전형적인 범위는 거의 0에서 10^3 ml/g 보다 큰 값을 가질 경우도 있으며, K_d 의 수치가 10 보다 크면 오염물질은 거의 움직이지 않는다고 알려져 있다[9].

매립지에서 지하토양의 수착으로 인한 오염물질의 지연되는 영향을 살펴보기 위하여 침출수에 대한 오염물질의 분배계수의 효과를 고려하였다. 침출수의 오염물질에 대한 분배계수는 오염물질의 구성원에 따라 다르지만 전형적인 범위는 0-10 ml/g 정도의 값을 가진다. 분배계수가 1, 10 ml/g인 경우의 오염물질의 분포가 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 분배계수가 1인 경우에는 수착의 효과를 무시할 수 있으며, 이는 5년 후에 오염물질의 상대농도가 5%가 되는 지점이 매립지 제방의 상당 부분까지 도달하고 있음을 보여주는 Fig. 2로부터 확인할 수 있다. 이때에는 차수막에 의하여만 오염물질의 이동현상이 영향을 받게 된다. Fig. 8에서 보듯이 분배계수가 10 ml/g인 경우에는 대부분의 오염물질이 매립지 근처에서 벗어나지 못하고 있음을 확실히 알 수 있다. 즉, 분배계수가 커지게 되면 수착에 의한 영향이 점차 증가되어지고 오염물질이 지하토양으로의 전달력이 저하되는 경향을 보여주게 된다. 또한 수착으로 인한 토양오염물의 이동에 대한 지연요인들이 전체적인 농도분포를 크게 감소시키게 되므로 분배계수가 비록 작다고 할지라도 수착에 의한 지연영향은 매우 크게 됨을 짐작할 수 있다. 따라서 침출수의 오염물질에 대한 분배계수가 오염물질의 이동에 큰 영향을 미치므로 매립지의

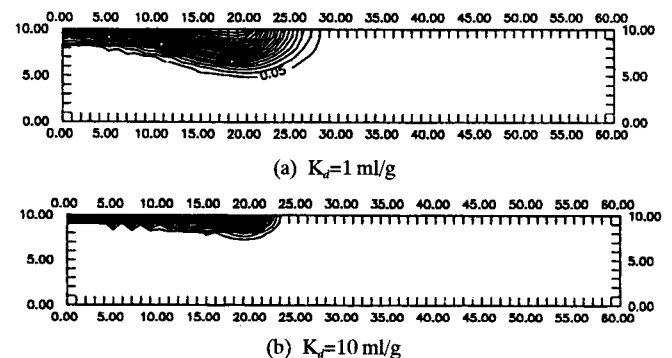


Fig. 8. Concentration distribution for the two different partition coefficients.

복토재의 선택이 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히, 매립지에서 유출되는 침출수에는 상당부분 유해성분이 포함되어 있으므로 낮은 오염농도에 대하여도 침출수가 분포되는 영역에서는 오염도가 심각하게 고려되기도 한다. 오염 물질의 이동을 억제하기 위한 방안들이 다양하게 제안되고 있으나, 현재로서는 수축의 영향을 도입하기 위한 다짐과 복토에 대한 역할을 1차적으로 고려하여야 할 것이다. 물론 침출수내의 화학적 오염 물질은 유기물 및 무기물 등으로 다양하게 구성되지만, 성분물질들이 다짐 및 복토를 통한 수축능력은 일반적인 오염물의 평균 분배계수값에 의존하게 된다. 따라서, 복토재에 수축된 오염물의 정량적 전달특성들을 확보한 후, 생물학적 또는 화학적 처리기법들이 2차방안으로 고려되어야 할 것이다. 이와같은 방안은 오염물의 억제지연 및 궁극적으로 오염물의 처리 등과 같은 일석이조의 효과를 거둘 수 있을 것이다. 따라서, 토양오염의 1차적인 억제방안으로서의 다짐과 복토재의 종류의 선택이 매립지 주변의 토양오염방지에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 침출수에 의한 지하 환경의 오염 메카니즘을 검토하고, 침출수에 의한 지하 환경 오염을 방지할 수 있는 방안을 고려하여 그 효과를 정량화하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 지하토양에서의 오염물의 이동현상을 예측할 수 있는 프로그램을 Galerkin 유한요소법을 근거로 구축하였다. 본 연구에서 구축된 프로그램은 우수한 적용력과 잠재력을 가지고 있는 것으로 고려된다. 이를 근거로, 폐기물매립지 주변의 토양오염현황을 정량적으로 예측할 수 있었으며, 토양오염을 억제하기 위한 방안으로의 차수막설치에 따른 효과들을 검토하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 수축이 침출수 중의 오염 물질의 이동에 강한 영향을 미침을 알 수 있었다. 침출수의 흐름을 차단하기 위한 연직 차수막은 침출수의 흐름에 큰 영향을 주지 못하나 표면 차수막은 침출수의 흐름과 오염물의 이동에 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히, 연직 차수막의 설치시에는 침출수의 유동조건을 충분히 고려하여야 할 것이다. 이와 같은 토양오염요인들은 흡착 및 이동현상에 따른 효과들을 엄밀히 예측하여 2차적인 처리방안들이 고려되어야 할 것이다. 즉, 침출수에 의한 지하 환경의 오염을 예측하고 이에 대한 대책을 수립하기 위해서는 대상 토양의 투수계수, 분산자 및 분배계수와 같은 기본적인 자료들의 확보가 필수적이라 할 수 있으나, 현재 우리 나라의 토양 특성에 맞는 이들 자료들은 미비한 형편이다. 따라서 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 하겠다.

감 사

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구(지역개발) 조성비의 지원하에 이루어졌습니다. 지원에 감사드립니다.

사용기호

C	: solute concentration [mole/m ³]
D	: dispersion coefficient [m ² /s]
D _{eff}	: effective diffusivity [m ² /s]
D _m	: molecular diffusivity [m ² /s]
g	: gravitational acceleration [m/s ²]
h	: head [m]

k	: permeability [m ²]
K	: hydraulic conductivity [m/s]
K _d	: partition coefficient [m ³ /kg]
N	: shape function [-]
R _r	: retardation factor [-]
S	: mass of the solute adsorbed on the solid [kg]
t	: time [s]
v	: velocity [m/s]
x,y,z	: Cartesian coordinate [m]

그리스 문자

α	: dispersivity [m]
ε	: porosity [-]
λ	: reaction rate constant [s ⁻¹]
μ	: viscosity [kgm ⁻¹ s ⁻¹]
ρ	: fluid density [kg/m ³]
τ	: time between t and t+Δt [s]
ω	: dimensionless time-increment parameter [-]

하첨자

b	: bulk quantity
i,j,k,m	: coordinate index
L	: longitudinal direction
T	: transversal direction

참고문헌

1. Freeze, R. A.: *IBM J. Res. Develop.*, **16**, 117(1972).
2. Konikow, L. F. and Bredehoeft, J. D.: *Water Resour. Res.*, **10**, 546 (1974).
3. Robson, S. G.: "Water-Resources Investigations", Geological Survey, Menlo Park, Ca., 46(1974).
4. Robertson, J. B. and Barraclough, J. T.: *Proc. Symp. Underground Waste Management and Artificial Recharge*, American Assoc. Petroleum Geologists, New Orleans, **1**, 291(1973).
5. Pinder, G. F.: *Water Resour. Res.*, **9**, 1657(1973).
6. Pickens, J. F. and Lennox, W. C.: *Water Resour. Res.*, **12**, 171 (1976).
7. 환경처, 한국환경년감, 서울(1992).
8. Millington, R. J. and Quirk, J. P.: *Trans. Faraday Soc.*, **57**, 1200 (1901).
9. Freeze, R. A. and Cherry, F. A.: "Groundwater", Prentice Hall, New Jersey(1979).
10. Schidegger, A. E.: *J. Geophys. Res.*, **66**, 3278(1961).
11. Bear, J.: "Dynamics of Fluids in Porous Media", American Elsevier, New York(1972).
12. Neuman, S. P.: *Water Resour. Res.*, **26**, 1749(1990).
13. 수도권 매립지 운영 관리 조합, 수도권 매립지 종합 환경조사 연구 보고서(1993).
14. Istok, J.: "Groundwater Modelling by the Finite Element Method", American Geophysical Union, Washington DC(1989).
15. Bear, J. and Bachmat, Y.: "Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht(1990).