

## 다공성 지하에서 수용성 오염물의 이동에 관한 수치적 연구

A Numerical Study on the Transport of Soluble Contaminants in Porous Grounds

윤도영, 김민찬\*

광운대학교 화학공학과, \*제주대학교 화학공학과

### 요 약 문

본 연구에서는 다공성 지하에서 침출수에 지하 환경의 오염 및 대처 방안의 효과를 수치적으로 예측하였다. 연구대상으로 매립지 지하에서의 침출수의 흐름은 Darcy 법칙을 사용하여 해석하였고, 오염물질의 이동은 이산-분산 모델에 수착의 효과를 고려하여 해석하였다. 침출수의 흐름 및 오염물질의 이동 방정식을 2차원 계를 대상으로 하여 Galerkin 유한 요소법을 사용하였다. 수치해석 결과 침출수의 흐름은 매립지 제방 근처에서 강하게 일어나는 것으로 나타났다. 연직 차수막은 오염물질의 이동을 막는데 별 도움을 주지 못하나, 수착은 오염물질의 이동을 지연시키는데 상당한 효과가 있는 것으로 보인다.

주제어: 매립지, 침출수, 차수막, 이산-분산모델, Galerkin 유한요소법

### 1. 서론

산업의 고도화와 함께 산출되어지는 수용성 오염물의 증가로 인하여 강과 호수등의 오염은 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히 생활수준의 향상으로 물 문제에서도 양 뿐만 아니라 질이 중요하게 되었다. 이에따라 용수의 질에 대한 관심이 지하수에 이르게 되었다. 따라서 공업, 농업, 도시활동으로 인한 지하수 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 지하수 오염기구의 규명과 오염물의 이동에 대한 신뢰성있는 예측에 관심을 두어왔다. 오염물의 이동에 대한 연구에 초기에는 주로 간단한 계에 대한 해석적인 방법이 사용되었으나, 최근에는 컴퓨터의 발달과 함께 좀 더 복잡한 계를 해석하기 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 연구로는 대류 및 분산의 효과를 포함하는 오염물질의 전달 모델링과 선형 등온선 형태의 가역적 수착에 의한 지연의 효과를 포함하는 오염물질의 전달현상해석이 포함되기도 한다. 반면에 Pickens 와 Lennox [2]는 유한요소법을 사용하여 지하에서의 오염물질의 전달현상을 해석하였다.

이와같은 배경하에 본 연구에서는 쓰레기 매립지를 대상으로 수용성 침출수에 의한 지하 환경 오염 메카니즘을 검토하고 오염 방지 및 교정 대안의 효과를 정량화 하기 위한 방안을 고찰하였다. 이를 위하여 지하수의 흐름과 오염물의 이동을 유한 요소법을 사용하여 해석하였다. 한편 침출수에 의한 지하 환경의 오염을 방지하기 위하여 매립지에서 침출수의 이동을 예측하는 방법, 침출수 중의 오염물질과 토양과의 흡착을 이용하여 침출수에 포함되어 있는 오염물질의 이동을 늦추는 방법등의 효과를 살펴보았다.

## 2. 지하수흐름 및 오염물의 전달 모델링

지하토양에서의 지하수의 흐름 및 오염물질의 전달을 유한 요소법으로 모델링하기 위하여 본 연구에서는 Pickens 와 Lennox[2]이 사용한 바 있는 일반적인 가정을 사용하였다. 지하수의 흐름은 정상상태이고, 이 흐름은 Darcy 법칙이 적용되는 범위에 있고, 오염물질과 지하토양과의 수착은 항상 평형상태에 있는 것으로 가정된다. 지하수의 밀도, 점도등 흐름에 영향을 주는 물성들은 오염물질의 존재에 영향을 받지않고 일정하다.

토양을 통한 지하수의 흐름은 다공성 매질층에서의 흐름을 나타내는 Darcy 법칙에 의하여 표현될수 있으며, Darcy 의 방정식은 연속방정식과 결합하여 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = -\nabla \cdot \left( \frac{\hat{K}g\rho}{\epsilon\mu} \nabla h \right) = 0 \quad (1)$$

여기서  $\vec{v}$ ,  $\hat{K}$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $g$  와  $h$  는 속도벡터, 투수계수텐서, 공극률, 점도, 중력가속도와 수두를 각각 나타낸다. 이중에서 투수계수는 지하수 흐름에 영향을 주는 가장 중요한 인자로 작용한다. 위의 식은 지하수의 흐름을 해석하는데 기본이 되는 포텐셜 방정식이다.

침출수의 흐름에서 오염물질의 이동은 이산(advection), 분산(dispersion), 수착(sorption), 변환(transformation)에 영향을 받는다. 이산은 식(1)에 주어지는 지하수의 흐름의 평균속도로 오염물질이 이동하는 것을 나타낸다. 그러나 오염물질은 수력학적으로 기대되는 흐름 방향으로 부터 이탈하여 퍼지는 경향이 있다. 이러한 현상을 분산이라 하는데 분산에는 분자확산과 기계적 분산이 있다. 분자확산은 액상에서의 오염물질의 농도차에 의해 일어나며, 침출수의 속도가 작을때 중요하다. 다공성 매질에서의 확산계수는 공극률과 굴곡도에 영향을 받는다. 이를 유효 확산계수  $D_e (= e^{-1.3} D_m)$  로 나타낼 수 있다. 여기서 분자 확산계수  $D_m$  은 오염물질의 화학적 특성에 의해 결정되어진다. 분산계수  $D$  와 유체의 평균 속도  $v$  사이에는 다음과 같은 선형관계가 있다고 가정되어진다.[3]

$$D_L = a_L v, \quad D_T = a_T v \quad (2a,b)$$

여기서  $a$  는 분산자, 하첨자 L 과 T 는 종방향과 횡방향을 각각 나타낸다. 따라서 분자 확산 및 기계적 분산을 고려한 분산 tensor는 다음과 같이 나타내어진다.[3]

$$D_{ij} = a_{ijmn} \frac{v_m \cdot v_n}{|\vec{v}|} + D_e \delta_{ij} \quad \delta_{ij} : \text{Kronecker delta} \quad (3)$$

수착은 흡착과 탈착으로 나누어 지며, 오염물질의 전체 농도에는 영향을 주지않는다. 일반적으로 침출수에서 나오는 오염물질과 지하 토양사이의 수착은 매우 빨리 일어난다. 오염물질의 농도가 높지 않은 경우에는 넓은 농도 범위에 걸쳐서 평형 관계가 성립한다. 본 연구에서는 다음과 같은 선형 등온식  $dS/dC = K_d$  을 사용하였다. 여기서 S는 토양의 단위 건조 질량당 토양에 흡착된 오염물질의 질량, C는 오염물질의 농도, 그리고  $K_d$  는 분배계수를 각각 나타낸다. 화학적 반응등의 변환이 무시될 경우, 포화된 지하 토양에서 오염물질의 이동을 지배하는 방정식은 물질수지식으로 부터 다음과 같이 얻을수 있다.

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\hat{D} \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v}C) - \lambda R_f C \quad (4)$$

여기서  $R_f = 1 + \rho_b K_d / \epsilon$  은 지연인자이며,  $\lambda$  는 1차반응속도상수이다.

### 3. 수치해법 및 결과

본 연구에서 대상으로하고 있는 계는 Fig. 1에서 보는바와 같은 2차원 계이다. 김포 수도권 위생 매립지의 경우, 투수계수는 지하 8m 정도까지  $10^{-5} \text{cm/s}$ 로, 지하 8m 이하 10m까지는  $10^{-7} \text{cm/s}$ 로 알려지고 있다[4]. 따라서, 본연구에서는 이를 기초로하여 매립지 근처에서의 지하 환경의 오염 정도를 예측하려하고 있다. 공극률은 지하 8m까지는 0.6 이고 지하 8m이하 10m까지는 0.4라고 두었다. 본 연구에서는 매립지 안의 침출수의 수위를 3m, 매립지 밖의 수위를 0m로 가정하였다. 오염물질의 전달을 해석하는데 필요한 확산계수를  $10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$  로 가정하였고, 분산자는  $\alpha_L=5\text{m}$ ,  $\alpha_T=1\text{m}$  로 가정하였다. 본 연구에 사용한 경계조건은 Fig. 1a에 나와 있는 것과 같이 수위 및 농도가 주어지지 않은 곳에는 수직방향으로의 구배를 0으로 두었다. 그림에서 보듯이 본 연구에 사용된 mesh는 직사각형이다.

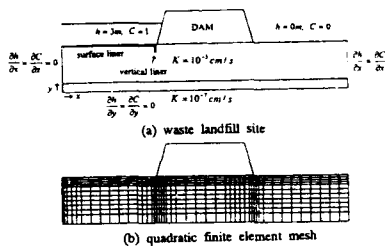


Fig.1 Schematic diagram.

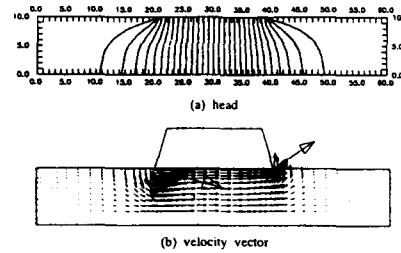


Fig.2 Distributions of head and velocity.

일반적으로 불균질한 수력학적 성질과 복잡한 경계를 포함하는 문제를 해석하는 데에는 유한 요소법이 유한 차분법 보다 유리하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 Galerkin 유한 요소법을 사용하여 해석하였다. 우선, 유동장에 대하여 유한 요소법을 사용하여 수두  $h$ 를 근사적인 함수로 나타내고, 경계조건을 만족하는 형태함수(shape function)를 사용하여 node에서의 수두의 근사치를 Galerkin 법에 의한 이산화할 수 있다. 계산된 수두에 대한 근사해를 다시 속도장으로 전환시킬수 있으며, 속도장에 대한 정보들은 분산자의 연산 및 농도 방정식에 직접적으로 적용할 수 있다. 농도장의 경우에도 유사하게 Galerkin 법에 의한 이산화를 시도할 수 있다. 이와같은 이산화식은  $dC/dt$  항을 포함하는  $n$ 개의 연립 상미분 방정식을 보여준다. 시간에 대한 미분을 유한 차분법으로 근사하기 위하여 일반적인 평균치의 정리를 사용한다. 본 연구의 경우에 유도된 식은 비선형 연립 방정식이 되므로, 이를 극복하기 위하여 잘 알려진 Newton-Raphson법에 의한 반복법을 사용하였다. 이에 대한 수치 방법은 Kim 과 Yoon [3] 에 의하여 자세히 설명되어 있다.

유한 요소법을 사용하여 구한 침출수의 수두와 속도분포는 Fig. 2에 나타나있다. 그림에서 보듯이 댐 경계면에서 강한 흐름이 존재하고 댐 하부에서는 거의 평행한 흐름이 존재한다. 이러한 속도장하에서 1, 3, 5년후의 오염물질의 분포를 해석한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 5년후에 오염물질의 농도가 5%이 되는 점이 이미 제방의 상당 부분까지 도달함을 알 수 있다. 연직 차수막의 효과를 보기 위하여 매립지 쪽 제방 경계면에 1m의 연직 차수막을 폭 50cm로 설치한 경우의 침출수의 수두와 오염물질의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 연직차수막의 효과는 계산 결과 그림에서 보듯이 차수막 근처에서 흐름이

우회하는 것을 제외하고는 차수막을 설치하지 않은 경우와 별 차이가 나지 않는다. 수평 차수막의 효과를 보기 위하여 매립지 표면에 50cm 가량의 차수막으로 가정하여 계산을 하였다. 차수막의 투수계수를  $10^{-7}$ cm/s로 설정한 경우에 유동장 및 농도장이 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 수평 차수막을 설치한 경우는 오염물질의 전달이 상당히 지연됨을 알 수 있다. 분배계수가 1 과 10l/mg인 경우의 오염물질의 분포가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 분배계수가 0인 경우, 즉 수축의 효과를 무시할수 있는 경우에는 5년후에는 오염물질의 상대농도가 5%가 되는 지점이 매립지 제방의 상당 부분까지 도달하고 있음은 Fig. 3으로부터 알 수 있었다. Fig. 6에서 분배계수가 10l/mg인 경우에는 대부분의 오염물질이 매립지 근처에서 벗어나지 못하고 있음이 나타나고 있다. 따라서 침출수의 오염물질에 대한 분배계수가 오염물질의 이동에 큰 영향을 미치므로 복토재의 선택이 매우 중요하다.

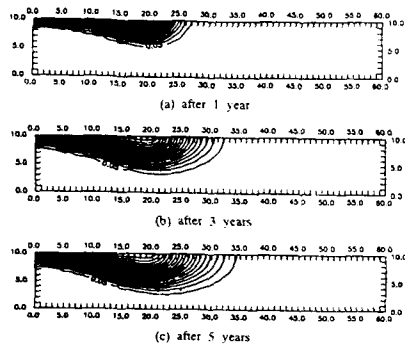


Fig.3 Concentration profiles.

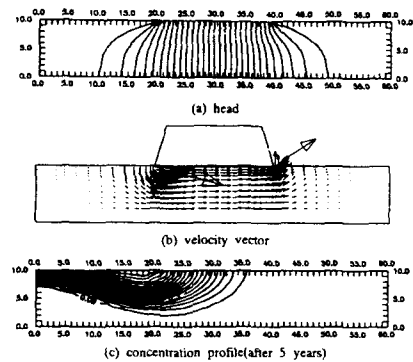


Fig.4 Effect of vertical liner.

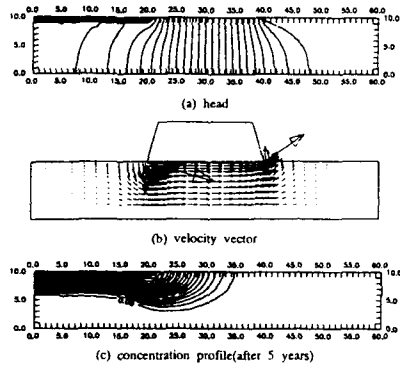


Fig.5 Effect of horizontal liner.

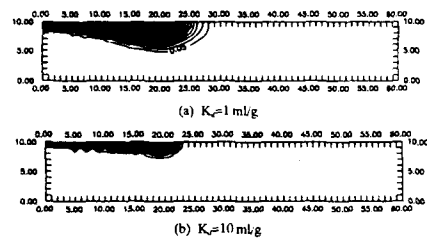


Fig.6 Effects of partition coefficient.

#### 4. 결론

본 연구에서는 침출수에 의한 지하 환경의 오염 메카니즘을 검토하고, 침출수에 의한 지하 환경 오염을 방지할 수 있는 방안을 고려하여 그 효과를 정량화 하였다. 본 연구의 결과에 의하면 수축이 침출수중의 오염 물질의 이동에 강한 영향을 미침을 알 수 있었으며, 침

출수의 흐름을 차단하기 위한 연직 차수막은 침출수의 흐름에 큰 영향을 주지 못하나 표면 차수막은 침출수의 흐름과 오염물의 이동에 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

1. Freeze, R.A., *IBM J. Res. Develop.*, **16**, 117 (1972)
2. Pickens, J.F. and Lennox, W.C., *Water Resour. Res.*, **12**, 171(1976).
3. 수도권 매립지 운영 관리 조합, 수도권 매립지 종합 환경조사 연구 보고서 (1993).
4. Kim, M.C. and Yoon, D.Y., *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 557(1997).