

Biobarrier를 이용한 유기오염물질의 생물학적분해모의를 위한 수치모델개발

왕수균

이화여자대학교 환경문제연구소
sookyun@ewha.ac.kr

요 약 문

This study presents a mathematical model for simulating the fate and transport of a reactive organic contaminant degraded through cometabolism in dual-porosity soils during the *in situ* bioaugmentations. To investigate the effect of dual-porosity on transport and biodegradation of organic hydrocarbons, a bimodal approach was incorporated into the model. Modified Monod kinetics and a microcolony concept [Molz et al., 1986] were employed to represent the effects of biodegrading microbes on the transport and biodegradation of an organic contaminant. The effect of permeability reduction due to biomass accumulation on the flow field were examined in the simulation of a hypothetical field-scale *in situ* bioaugmentation. Simulation results indicate that the presence of the immobile region can decrease the bioavailability of biodegradable contaminants and that the placement of microbes and nutrients injection wells should be considered for an effective *in situ* bioaugmentation scheme.

key word : *in situ* bioaugmentation, biobarrier, dual-porosity soils, bioaccumulation, permeability reduction

1. 서론

다공성 매질(porous media)을 통과하는 유기오염물을 처리하기 위한 방법 중에서 매질에 부착(혹은 부유)하는 미생물을 응용한 생물학적 처리방안은 부가적으로 이에 수반되는 여러 가지 현상들에 관한 이해가 필수적이며, 이는 곧 처리 시스템의 효율을 결정하는 중요한 요소로써 작용된다. 미생물의 성장에 따른 공극 폐쇄 및 지반 투수계수와 지하수 흐름의 변화는 시스템 내부의 여러 지화학적 및 생물학적 현상들과 유기적으로 연결된다. 즉 처리 시스템 안의 미생물 성장은 다공성 매질의 여러 특성을 변화시키며, 이는 다시 오염원의 이동 및 흐름에 영향을 미쳐 미생물의 성장에 다시 영향을 미치게 되므로 시간과 공간에 따른 다공성 매질 시스템 전체의 종합적인 이해가 필수적이며, 수학적 모델의 구축 및 해석은 이러한 요구에 부합된다 하겠다.

생물벽체(biobarrier)를 이용한 원위치(*in-situ*)처리 기술은 지중에 주입된 미생물의 성장을 촉진시켜 토양입자 사이의 공극을 biomass로 채움으로써 이를 통과하는 오염물(유기물 혹은 중금속)의 생물학적 분해를 유도함으로써 오염물의 확산을 막는 기술이다. 이러한 기술의 성패는 지하수 오염원에 적합한 미생물의 선정, 미생물 성장을 촉진하는데 필요한 영양분의 주입 및 환경인자 등 많은 고려조건이 있다. 다공성 매질 속에서 biomass의 축적은 유체의 거동, 물질이동, biotransformation 등을 내포하는 복잡한 과정이므로 연결된 여러 현상들을 단순화하여 지하수 유체의 흐름, 각종 영양분 혹은 오염물의 이동, 미생물 성장 및 이동 등 그룹화 된 수학적 모델을 구축하고, 상호 유기적인 관계에 따라 일련의 물질수지식을 정립한다. 이러한 수학적 표현들을 수치해석 기법을 이용하여 해석함으로써 다공성 매질 내에서의 관심 물질이동의 예측 및 효

과적인 오염원 처리를 위한 생물벽체 형성(예, 생물벽체 내 미생물에 의한 오염물질의 생물학적 분해, 투수계수의 변화) 메커니즘을 이해하는데 도움을 주는 도구로 활용하고자 한다.

2. 본론

이중공극 토양을 수학적으로 표현하기 위하여 두 개의 서로 다른 특성의 등질성 대수층이 하나의 대수층으로 중첩되어 있다는 가정을 근간으로, 대수층을 이송과 분산이 물질이동을 지배하는 유동유역(mobile region)과 확산이 지배하는 부동유역 (immobile region)의 두 유역으로 분리하고, 두 유역은 용존 물질의 물질교환(mass transfer)을 통해 유기적으로 관계하는 것으로 가정되었다 [Corapcioglu and Wang, 1999]. 이러한 토양에서 다른 용존물질에 비하여 절대적으로 크기가 큰 미생물들은 유동유역에서만 존재하고, 부동유역 안으로는 유입될 수 없는 것으로 가정하면 액상과 토양상 미생물의 성장과 거동은 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

$$\frac{\partial \theta^{ma} C_c^{ma}}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J}_c^{ma} + \left[\mu_m(C_P^{ma}, C_O^{ma}) \left[\frac{C_P^{ma}}{K_P + C_P^{ma} + (K_P/K_D)C_D^{ma}} \right] \left[\frac{C_O^{ma}}{K_O + C_O^{ma}} \right] - k_d - k_1 \right] \cdot \theta^{ma} C_c^{ma} + k_2 N_c m_c$$

$$\frac{\partial N_c}{\partial t} = \left[\mu_m(C_{Pc}, C_{Oc}) \left[\frac{C_{Pc}}{K_P + C_{Pc} + (K_P/K_D)C_{Dc}} \right] \left[\frac{C_{Oc}}{K_O + C_{Oc}} \right] - k_d + \frac{k_1 \theta^{ma} C_c^{ma}}{m_c} \right] \cdot N_c - k_2 N_c$$

여기서 아래첨자 c, P, O, D 는 각각 미생물, 기질, 전자수용체, 오염물질을 나타내며, 위첨자 ma 와 mi 는 유동유역과 부동유역을 나타낸다. θ^{ma} 는 유동유역의 지역 공극률이며, \mathbf{J}_c^{ma} 는 미생물의 mass discharge vector, C 는 농도, K 는 Monod kinetics의 half-saturation 농도, k_1, k_2, k_d 는 미생물의 토양입자상 흡착과 탈착계수 및 사멸계수이다. N_c 와 m_c 는 각각 microcolony density와 개당 microcolony의 질량이며, $\mu_{ma}(\)$ 는 영양물질의 농도함수로 표현되는 미생물의 최대성장계수 함수이다. C_{Pc}, C_{Dc}, C_{Oc} 는 각각 microcolony 내의 기질, 전자수용체의 농도이다.

지하수의 흐름을 따라 유동하는 기질, 유기오염물질, 전자수용체는 토양입자상 흡착과 유동·부동유역 간 및 bulk liquid와 microcolony 간의 물질교환을 거치면서 액상에 부유하거나 microcolony를 이루는 미생물에 의해 소비되거나 분해 된다. 이러한 과정들을 수학적으로 표현하면 cometabolism에 의해 분해 되는 유기오염물질의 성장과 거동에 관한 물질수지식은 유동유역과 부동유역에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\left[1 + \frac{K_{3D} \rho_b}{\theta^{ma}} \right] \frac{\partial (\theta^{ma} \phi C_D^{ma})}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_D^{f,ma} - D_{Db} N_c A_c \left[\frac{C_D^{ma} - C_{Dc}}{\delta} \right] - \frac{\alpha_D}{\phi} (C_D^{ma} - C_D^{mi})$$

$$- \frac{\mu_m(C_P^{ma}, C_O^{ma}) \theta^{ma} C_c^{ma}}{Y_D} \left[\frac{C_P^{ma}}{K_P + C_P^{ma}} \right] \left[\frac{C_D^{ma}}{K_D + C_D^{ma} + (K_D/K_P)C_P^{ma}} \right] \left[\frac{C_O^{ma}}{K_O + C_O^{ma}} \right]$$

$$\left[1 + \frac{K_{3D} \rho_b}{\theta^{mi}} \right] \frac{\partial (\theta^{mi} \phi C_D^{mi})}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_D^{f,mi} + \frac{\alpha_D}{1-\phi} (C_D^{ma} - C_D^{mi})$$

여기서 K_{3D} 는 유기오염물질의 평형흡착계수, ρ_b 는 다공성 매질의 건조밀도, ϕ 는 전체 다공성 매질의 부피에 대한 유동유역 부피의 비, D_{Db} 는 bulk liquid와 microcolony 사이에 존재하는 경계층 내에서 유기오염물질의 확산계수, A_c 는 단일 microcolony의 상부 단면적, δ 는 경계층의 두께, α_D 는 유동·부동유역 간 유기오염물질의 물질교환계수, Y_D 는 cometabolism에 의한 유기오염물질의 yield coefficient이다. 이외에 기질과 전자수용체에 관한 물질수지식도 일련의 지화학적 및 생물학적 과정에 있어서 각각의 역할과 토양입자와의 반응에 따라 전개되었다.

Clement 등[1996]은 미생물의 축적으로 인한 투수계수의 감소를 거시적 개념 (macroscopic approach)을 사용하여, 축적된 biomass의 형태에 대한 어떤 특정한 가정을 세우지

않는 해석식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 모형에서는 Clement 등[1996]의 식에 이중공극 토양의 개념을 적용하여 부동유역의 존재가 투수계수 감소에 미치는 영향을 다음의 식을 통하여 고려하였다.

$$\frac{K_s}{K_{s0}} = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\phi n}\right)^{1/6}$$

여기서 K_s 와 K_{s0} 는 각각 포화대수층 내에서 biomass에 의해 감소된 투수계수와 초기 투수계수이다. σ_c 는 biomass의 부피, n 은 전체 대수층의 공극률이다. 일반적으로 입자의 크기가 작은 토양에서 ϕ 가 작은 값을 가지므로, 이중공극토양 개념이 적용되었을 때 Clement 등[1996]을 포함한 기존의 연구에서 발표된 수식들에 비하여 입자가 작은 토양에서 보다 정확한 투수계수 감소의 예측이 이루어질 수 있는 것으로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서 개발된 2차원 생물벽체 모형의 거동을 살펴보기 위하여 소규모 2차원 in situ bioaugmentation 실험을 가상하여 모형을 적용하였다. 20m X 20m 크기의 포화대수층 내에 초기 2m X 2m 크기의 유기오염물질의 오염원이 진행되고 있을 때 이를 처리하기 위한 생물벽체를 설치하였다. 미생물의 과속적은 생물벽체의 성장을 저해하고 그 효율을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있으므로, 미생물과 영양물질을 따로 주입하므로써 그 역효과를 감소시켰다. 이중공극토양에서 유동유역과 부동유역은 두 유역간의 mass transfer에 의해서 용존 물질을 교환한다. 그림 1은 모의시작 5일이 경과한 후 두 유역에서의 오염물질 농도의 분포를 나타내고 있다. 초기에는 두 유역에 같은 농도의 오염물질이 가정되었으나, 이송과 분산에 의해 거동하는 유동유역 내의 오염물질은 빠른 속도로 하류를 향해 이동한 후 생물벽체를 만나게 되면 미생물의 대사 작용에 의해 분해된다. 확산에 의해서만 매우 느린 속도로 거동하는 부동유역 내의 오염물질은 초기농도분포에서 크게 벗어나지 못한 상태에서 이송에 의해 농도가 낮아진 유동유역으로 물질교환이 이루어져 유동유역의 source로서의 역할을 담당하게 된다. 미생물 주입정 주변의 부동유역 오염물질은 유동유역으로부터 물질교환 되어 유입된 것으로서 미생물의 대사 작용에 대한 sink로 작용된다.

그림 2는 수치실험 기간인 48일 동안 미생물 (초기 4일간)과 영양물질의 주입에 따른 생물벽체의 형성과 소멸, 오염물질의 성상과 거동을 나타내고 있다. 초기 4일간 주입된 미생물은 토양흡착으로 인해 주입정을 중심으로 타원형의 생물벽체를 형성한다. 급격하게 증가한 미생물 군집은 상류의 영양물질 주입정으로부터 공급되는 용존 영양물질을 소비하며 활발한 대사 작용을 하면서 유입되는 오염물질을 분해한다. Day 12의 그림에서는 생물벽체를 통하는 유기오염물질의 농도가 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. 시간이 흐름에 따라 풍부한 영양물질이 존재하는 영양물질 주입정 부근에서 존재하는 자연 미생물들이 급속하게 증가하여 주입되는 영양물질의 대부분을 소비하고 하류의 생물벽체로의 영양공급을 저해하게 되면서, 생물벽체는 급속도로 감소하게 된다. Day 24 - Day 30에서는 생물벽체를 이루던 미생물의 대부분이 소멸되어 매우 낮은 속도의 대사 작용만이 잔류하는 오염물질을 분해한다.

그림 3에서 나타난 바와 같이 미생물의 축적, 생물벽체의 형성으로 인한 투수계수의 감소는 초기에는 미생물 주입정을 중심으로, 말기에는 영양물질 주입정을 중심으로 한 타원형의 국부지역에서 발생한다. 초기의 투수계수 감소가 주로 미생물의 주입으로 인한 급속한 토양흡착으로 발생한다면, 말기의 현상은 고농도의 영양물질 주입으로 인한 고영양상태가 주입정 부근 미생물의 성장을 촉진하여 발생한다고 사료된다.

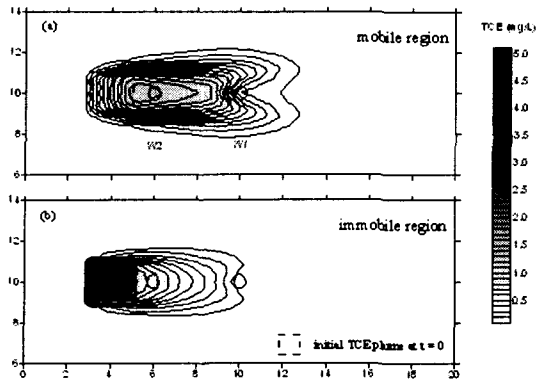


그림 1. 주입 5일 후의 유동유역과 부동유역에서의 오염물질의 농도분포

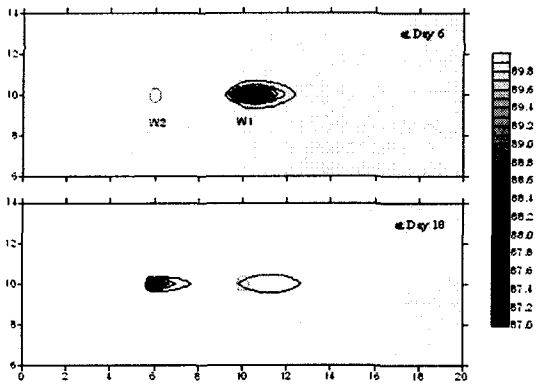


그림 3. 미생물의 축적으로 인한 투수계수의 감소

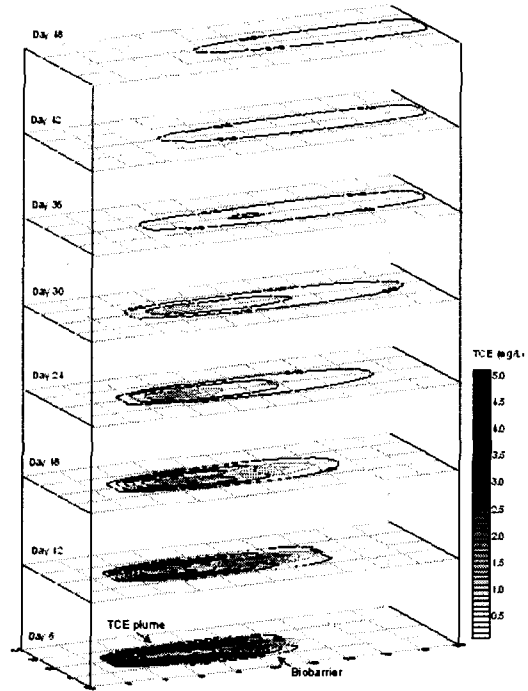


그림 2. 48일 동안의 오염물질과 생물벽체의 성장과 거동

4. 참고문헌

- Clement, T.P., B.S. Hooker, and R.S. Skeen, Macroscopic models for predicting changes in saturated porous media properties caused by microbial growth, *Ground Water*, 34(5), 934-942, 1996.
- Corapcioglu, M.Y. and S. Wang, Dual-porosity groundwater contaminant transport in the presence of colloids, *Water Resour. Res.*, 35(11), 3261-3273, 1999.
- Molz, F.J., M.A. Widdowson, and L.D. Benefield, Simulation of microbial growth dynamics coupled to nutrient and oxygen transport in porous media, *Water Resour. Res.*, 22(8), 1207-1216, 1986.