

## 경유오염토양에서 미생물에 의한 경유의 생물학적 분해 모델

노상철, 장덕진

명지대학교 청정기술원 및 환경·생물공학과

(0335) 330-6340, Fax (0335) 337-2902

### Abstract

A model was developed to describe the microbial decontamination of diesel contaminated soil in a soil column. The biodegradation rate of diesel in nature depends on temperature and the pH of soil, availability of nutrients, oxygen and water. The soil moisture content is one of the essential factors because it characterizes the availability not only of water to microorganisms but also of oxygen and nutrient dissolved in soil. In this work, the rate of biodegradation was modeled by coupling Michaelis-Menten kinetics for the aqueous-phase solute with adsorption-desorption equation for diesel sorption and desorption from soil.

### 서론

최근 들어 토양오염에 대한 심각성과 유해성이 알려지면서 유류로 오염된 토양의 생물학적인 처리에 대한 연구가 국내외적으로 증가하고 있다. 생물학적인 기술은 물리·화학적인 방법과는 달리 오염물질을 직접 광물화하여 2차 처리에 대한 비용과 오염을 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 처리 현장의 환경에 따라 성공여부가 달라질 수 있으며, 특히 토양의 경우 유기오염물질의 흡착과 내부 확산으로 인하여 효과적인 처리가 어려운 것이 현실이다. 본 연구에서는 이러한 현상을 표현하는 모델을 개발하였다. 이 모델은 흡착과 탈착에 대한 항과 미생물에 의한 기질의 소모항을 Adsorption-desorption equation과 Monod equation을 사용하여 정리하였으며, 토양의 환경변화 중 미생물의 활성에 크게 영향을 미칠 수 있는 토양 수분의 함량변화를 water balance를 이용하여 도입하였다.

### 이론

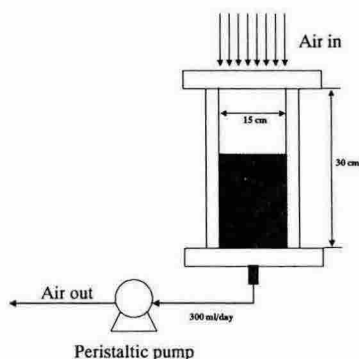
지금까지 연구된 토양에서의 유기화합물의 분해에 관한 모델은 매우 다양하나, 크게 두 가지로 구분하여 볼 수 있다. 먼저 비교적 최근에 연구되어지고 있는 모델로서 radial diffusion model을 적용하여 유기화합물의 토양 내로의 확산과 내부 흡착과의 관계를 미생물에 의한 분해항인 Monod equation과 결합한 모델을 예로 들 수 있으며<sup>1,2)</sup>, 두 번째는 탈착 속도에 초점을 두고 Adsorption-desorption equation과 Monod equation을 결합한 모델을 예로 들 수 있다<sup>3)</sup>. 두 모델은 각기 장단점을 가지고 있으나, 본 연구에서는 후자의 모델을 기본 골격으로 하여 모델을 개발하였다.

이는 전자의 경우 토양 내부로의 확산을 모사하여 비교적 정확하고 토양 내부의 현상을 잘 설명할 수 있는 장점이 있으나, 장시간의 처리시간이 소요되는 경우 또는 매우 긴 탈착시간을 가지는 경우, 실패할 가능성이 커지며 adsorption-desorption hysteresis를 표현할 수가 없으며, 토양 수분함량의 변화를 고려할 수 없다는 단점이 있는 반면, 후자의 경우 내부확산에 대한 요소를 정확하게 표현할 수 없다는 단점에도 불구하고, 우리나라의 토양과 같이 점토의 함량이 많아 흡착에 대한 영향이 높은 경우의 모사에 적합하며 토양 내 수분 함량의 변화를 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 후자의 모델을 기본 골격으로 하여, 토양 내의 수분 함량의 변화를 적용하였다.

## Model development

### 결합된 흡착·탈착 방정식과 monod equation

본 연구에서 사용한 토양 컬럼은 다음과 같다.



토양 컬럼은 실린더 형태로 제작하였으며, 컬럼 상단에서 공기를 공급하였다. 효과적이 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 토양의 입자는 균일하다.
- 2) 토양 내에 흡착된 경유는 미생물에 의하여 이용될 수 없으며, 수용액상에 용해되어 있는 경유만이 미생물에 의해 분해가 가능하다.
- 3) 최초 토양 컬럼 내의 경유와 수분의 분포는 일정하다.

오염 토양에서 수용액 내에 존재하는 경유의 감소는 크게 흡착과 탈착에 의한 변화, 토양 내부로의 확산, 그리고 미생물에 의한 소모를 들 수 있다. 토양 입자의 크기가 작아 질수록 토양 내부로의 확산보다 표면적 증가로 인하여 흡착과 탈착에 의한 영향이 bioremediation에 크게 영향을 미치게 된다. 그러므로 본 연구에서는 토양 내부로의 확산은 없다고 가정하고 흡착과 탈착, 그리고 미생물에 의한 소모와 토양 수분 함유량의 변화에 초점을 맞추어 모델식을 구상하였다.

수용액상 내의 전체 경유농도의 변화는 흡착·탈착에 대한 항과 미생물에 의하여

소모되는 항을 결합하면 다음과 같다.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{V_s}{V} \frac{dS}{dt} - X \left[ \frac{1}{Y_{XC}} \left( \frac{\mu_{\max} C}{K_m + C} \right) - m_c \right] \dots\dots(1)$$

위의 식에서 미생물의 개체수는 시간에 따라 변화되므로 시간에 따른 유류분해 미생물의 개체수의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = \left( \frac{\mu_{\max} C}{K_m + C} \right) \cdot X \dots\dots (2)$$

대부분의 경우 미생물의 개체수를 항상 일정하다고 보았으나, 본 연구에서는 기질의 감소에 따른 개체수의 감소를 고려하여 미생물의 개체수를 변수로 간주하였다. 또한 시간에 따른 흡착량의 변화는 분배계수(linear sorption partition)에 의하여 액상 농도에 관련하여 변하게 되므로,

$$\frac{dS}{dt} = K_p \rho_s (1-n) \frac{dC}{dt} \dots\dots(3)$$

와 같이 표현할 수 있다.

(3)식을 최종적으로 (1)식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{X}{Y_{XC}} \left( \frac{\mu_{\max} C}{K_m + C} \right) \left( 1 + \frac{\theta_s}{\theta_w} K_p \right)^{-1} \dots\dots(4)$$

그러나 (4)식은 미생물에 의한 기질의 소모와 흡착-탈착에 의한 변화를 비교적 정확하게 모사할 수 있으나, 토양 내의 수분의 함량이 적거나 변화하는 경우에는 오차가 증가하는 경향이 있다. 그러므로 본 연구에서는 Glascoe 등<sup>4)</sup>에 의해 제안된 모델을 위 식에 도입하였다.

### 토양 수분 함량의 변화

토양 내에 함유된 수분의 함량은 시간에 지남에 따라 감소하게 되며 특히 bioventing 시 공급되는 공기의 수분 함량에 따라 토양 내의 온도와 수분의 함량은 크게 영향을 받게 된다. 수분의 함량은 미생물의 활성에도 영향을 미쳐 전체적인 biodegrading activity를 변화시키므로, 본 연구에서는 토양 수분의 변화를 Glascoe 등의 모델식을 변형하여 본 식에 적용하였다.

Liquid water와 water vapor가 서로 평형상태에 있다고 가정하면, 전체 water balance equation은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \theta_g \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial \theta_w \rho_w}{\partial t} + \frac{\partial J_v}{\partial x} + \frac{\partial J_w}{\partial x} = 0 \dots\dots (5)$$

이를 본 연구에 알맞게 변형한 후 컬럼 내의 온도가 일정하다고 간주하면 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$\left[ (\rho_w - \rho_v) \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \right] \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho_w K_w \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] = 0 \dots\dots (6)$$

### Numerical simulation

위에서 제안된 식 (2), (4), 그리고 (6)식을 수치해석을 이용하여 컴퓨터로 프로그래밍 하였다. (6)식의 편미방의 경우 Crank-Nicolson method를 사용하였으며 (4)식의

경우 Implicit Euler method와 Runge-Kutta method로 풀었다. 이를 Matlab과 Visual Fortran을 이용하여 simulation 하였다.

## Symbols

- $C$  = the aqueous concentration of diesel  
 $S$  = the average solute concentration in the solid integrated over the sphere  
 $V_s$  = the volume of the solid =  $V \rho / (1-n) \rho_s$   
 $\rho$  = soil to water ratio (=  $\theta_s / \theta_w$ )  
 $\rho_s$  = the specific weight of the solid  
 $n$  = the intraaggregate porosity of the solid  
 $V$  = the volume of the liquid phase  
 $t$  = time  
 $K_D$  = linear sorption partition coefficient  
 $\mu_{\max}$  = maximum growth rate  
 $X$  = cell number  
 $Y$  = the yield factor for conversion of substrate to biomass  
 $K_m$  = the half-saturation coefficient  
 $\rho_v$  = density of water vapor  
 $\rho_w$  = density of liquid water  
 $\theta_g$  = gaseous volumetric phase content  
 $\theta_w$  = volumetric water content  
 $J_v$  = mass flux of water vapor,  $J_v = q_g \rho_v - \theta_g D_{v,g} \frac{\partial \rho_v}{\partial x}$   
 $J_w$  = mass flux of liquid water,  $J_w = -\rho_w K_w \frac{\partial \psi}{\partial x}$   
 $D_{v,g}$  = effective dispersion coefficient of vapor in air  
 $K_w$  = unsaturated hydraulic conductivity  
 $\psi$  = water potential  
 $m_c$  = specific maintenance rate

## 사사

본 연구는 한국과학재단(97-0502-0701-3) 및 BK21 사업의 도움으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. James R. Mihelcic, and Richard G. Luthy, "Sorption and Microbial Degradation of Naphthalene in Soil-Water Suspensions under Denitrification Conditions", 1991, Environ. Sci. Technol., 25, 169-177.
2. Marcel J. Geerdink, Mark C. M. Van Loosdrecht, and Karel Ch. A. M. Luyben, "Model for Microbial Degradation of Nonpolar Organic Contaminants in a Soil Slurry Reactor", 1996, Environ. Sci. Technol., 30, 779-786.
3. Anne Belinda Thomsen, Kaj Henriksen, Christian Gron, and Per Moldrup, "Sorption, Transport, and Degradation of Quinolone in Unsaturated Soil". 1999, Environ. Sci. Technol., 33, 2891-2898.
4. Lee G. Glascoe, Steven J. Wright, Members, ASCE, and Linda M. Abriola, "Modeling the Influence of Heat/Moisture Exchange during Bioventing", 1999, Journal of Environmental Engineering., December, 1093-1102.