

강변여과에서 콜로이드 물질과 오염물의 거동에 관한 연구

Transport of Colloids and Contaminant in Riverbank Filtration

이 상 일* / 김 대 환** / 이 상 신*** / 유 상 연****

Lee, Sang-II / Kim, Dae-Hwan / Lee, Sang-Sin / You, Sang-Yeon

Abstract

Riverbank filtration is a natural process, using alluvial aquifers to remove contaminants and pathogens in river water for the production of drinking water. In Korea, most of the drinking water is supplied by surface water in-take. However, maintaining the quality of the drinking water becomes more and more difficult due to the increase of contamination. In riverbank filtration, the understanding of contaminant transport is an important task for the production of high quality drinking water and for the maintenance of facilities. In this paper, the transport behavior of hydrophobic organic contaminants is investigated when contaminants coexist with dissolved organic matter (DOM) and bacteria. In the developed model, the aquifer is thought of as a four phase system: two mobile colloidal phases, an aqueous phase, and a stationary solid matrix phase. The model equations are solved numerically for various situations. Results indicate that the presence of colloidal matters can enhance the mobility of contaminant significantly and that partitioning coefficients play an important role in the process.

keywords : riverbank filtration, colloid, dissolved organic matter (DOM), bacteria, partitioning parameter

요 지

강변여과는 강물을 강변의 충적대수층에 통과시켜 지층의 자체정화능력을 이용하여 오염물질을 상당량 저감시킨 후 양수하는 방식이다. 국내에서는 대부분의 원수를 지표수에서 취수하여 사용하고 있는 실정이나, 오염물질의 증가로 인하여 지표수를 원수로 사용하기가 점점 어려워지고 있다. 강변여과를 이용하여 양질의 원수를 확보하기 위해서는 오염물 이동에 관한 이해가 중요하다. 본 연구에서는 대수층에 용존성 유기물질(DOM)과 박테리아가 동시에 존재할 경우를 대상으로 대수층을 4상(four-phase: 흡입자, 물, 박테리아, 용존성 유기물질)으로 모델링하고, 이들의 물리, 화학, 생물학적 특성을 고려하여 물질의 거동을 기술하는 수학적 모델을 제시하였다. DOM과 박테리아와 같은 콜로이드성 물질은 오염물의 이동을 가속시키고, 평형 분배계수가 중요한 역할을 하는 인자인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 강변여과, 콜로이드, 용존성 유기물질(DOM), 박테리아, 분배계수

- * 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Corresponding Author
Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715 Korea
(e-mail: islee@dongguk.edu)
- ** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
M.S., Dept. of Civil and Environment Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea
- *** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environment Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea
- **** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
Master Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

1. 서론

급속한 산업화와 인구증가로 인해 물의 수요가 증대되고 있는 한편, 소비증가에 따른 용수의 부족과 오염에 대처하기 위하여 수자원 개발 및 확보 그리고 효율적인 이용에 대한 중요성이 대두되고 있다. 우리나라의 경우 상수원의 대부분을 하천수에 의존하고 있으나 유량의 변동이 크고, 수질이 좋지 않아 상수원으로서 사용하기에 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나로 제시되고 있는 것이 간접취수 방식인 강변여과방법이다. 이는 수질등급이 낮은 하천수를 하천 변에 분포된 토양으로 여과시켜서 대수층의 자체 정화 능력을 이용하여 수자원을 안정적으로 공급하는 방법이다.

대수층에서의 오염물 거동 특성은 강변여과의 수질과 수량을 결정하는 중요한 요소이며 오염을 방지하고 효과적으로 관리하기 위해서 연구되어야 한다. 강변여과에서 대수층 내의 오염물은 콜로이드성 물질의 물리, 화학, 생물학적 특성에 따라 이송 속도 및 농도가 변화하게 되는데, 이를 해석하는 것은 강변여과 관련 연구의 중요한 부분이 되어 왔다(Fletcher and Loeb, 1979; Peterson and Ward, 1989; Fontes et al., 1991; Jenkins and Lion, 1993).

지하수에 유동성 콜로이드가 있을 경우 오염물이 콜로이드에 부착함으로써 가속이동이 발생한다. McCarty and Zachara(1989)는 대수층 내 음이온성 콜로이드를 고려하지 않았을 경우 오염물의 이동거리가 과소평가될 수 있고, 이 경우 오염물의 이동속도는 이류-분산에 기초한 보통의 지체인자로 계산한 값보다 훨씬 더 빠를 수 있음을 주장하였다. Enfield et al.(1989)은 용존성 유기물질(Dissolved Organic Matter: DOM)이 대수층에 존재할 경우에 소수성 유기오염물질이 토양 속을 더 빠르게 통과함을 밝혔다. 종래의 오염물 거동 해석에서는 대수층을 이상(two-phase) 다공 매질로 간주하였으나, Corapcioglu and Jiang(1993) 및 Kim et al.(2003)은 박테리아나 DOM이 존재할 경우에 대수층을 3상(three-phase) 혹은 4상으로 해석할 수 있음을 보였다(Fig. 1 참조).

본 연구는 대수층에 용존성 유기물질(DOM)과 박테리아가 동시에 존재할 경우를 상정하여 대수층을 4상(four-phase: 흡입자, 물, 박테리아, DOM)으로 모델링함으로써 강변여과에서 소수성 오염물질이 콜로이드 물질과 함께 존재할 경우 이들의 거동 특성과 이에 영향을 미치는 주요 인자를 규명하는데 그 목적이 있다.

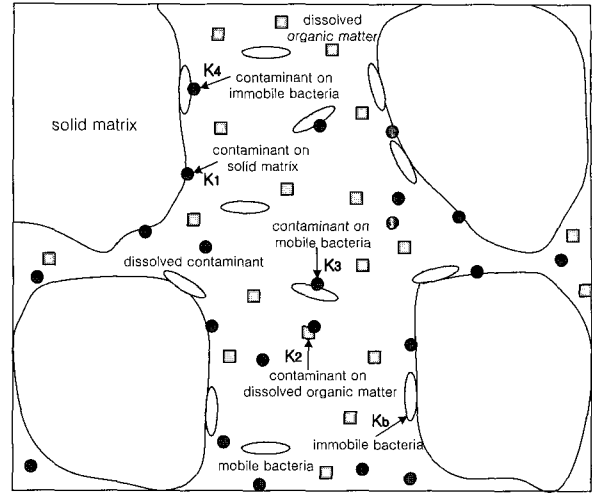


Fig. 1. Concept of Contaminant Transport in a Four-phase System

2. 강변여과

강변여과는 인공함양의 한 방식이며, 지하수 인공함양은 크게 직접 인공함양법과 간접 인공함양법으로 구분할 수 있다. 직접 인공함양은 지표수를 취수한 후 적당한 장소로 이송한 후 적절한 대수층에 함양시켜 실시하는 방법으로, 대수층이 지표 또는 지표 가까이 있는 경우와, 지표에서 적당한 심도 아래에 분포하는 경우, 깊은 심도에 분포하는 경우 등에 따라서 다양한 방법을 적용할 수 있다. 간접 인공함양은 일반적으로 강변여과로 불리는 유도함양법이 많이 사용되고 있다. 직접 인공함양과 다른 점은 지표수를 취수하여 대수층을 통과시켜 지하수를 보충하는 것이 아니라, 하천 주변에 분포되어 있는 대수층을 통하여 직접 처리된 물을 사용한다는 것이다(한국수자원공사, 1999).

강변여과는 원수를 강변의 대수층에 통과시켜 자연 지층의 자체정화능력을 이용하여 원수중의 오염물질을 상당량 저감한 후 양수한다. 강변여과수는 복류수와 비슷하지만, 양수정까지 도달하는 시간을 길게 하여 지층을 통과하는 동안 토양에 의한 흡착과 미생물에 의한 분해, 그리고 빛과 공기가 없는 상태에서 세균과 박테리아를 사멸하게 하여 양질의 원수를 확보하는 것이며, 지표수를 취수하여 처리할 때 필요한 화학약품 첨가와 고도정수처리 공정 없이 양질의 상수를 생산할 수 있는 장점이 있다. 강변여과의 개념도는 Fig. 2와 같다.

양수정을 설치하고 지하수를 양수하면, 지하수위가 하천보다 낮게 되어 하천에서 지하수로의 유입이 발생하게 되는데, 이 때 하천수는 대수층의 공극을 통과하면서 유기물질이나 오염물질이 제거된다. 이를 통해 하천수의 수질개선, 지하 오염원의 제어, 지하수의 염수화

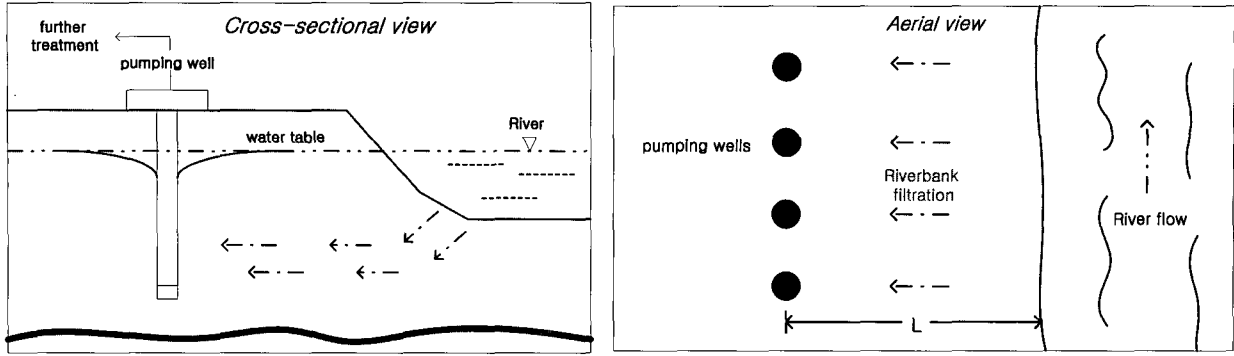


Fig. 2. Concept of Riverbank Filtration(Kim et al., 2003)

방지, 지하저장 및 지반침하 방지와 같은 효과를 기대할 수 있다.

우리나라보다 산업화의 과정을 먼저 겪은 라인강변의 서유럽 국가들을 포함한 미국, 영국, 독일, 이스라엘, 일본 등의 많은 국가에서는 오래 전부터 강변여과를 통한 지하수 취수로 오염된 상수원수를 개선하고 수질사고 등의 비상시를 대비하거나, 각종 인공함양을 실시하여 지하수의 저장, 지하수위 유지, 염수침입 방지 등의 효과를 거두어왔다.

국내에서 강변여과수를 도입하기 시작한 것은 1990년대 중반부터이다. 초기에 타당성 조사를 위해 설치된 지역은 충남 미호천, 금강 부여, 낙동강 유역의 이룡, 용산 지구 등이 있으며, 실제 적용된 지역은 낙동강의 북면, 갈전리 등이 있다. 강변여과수에 대한 타당성 조사에서는 주로 수리지질이나 오염저감능력 및 수질개선 효과 등을 조사하여 개발 가능성과 경제성을 검토하였다. 조사 결과 지질은 충적층이나 퇴적층으로 형성되어 있고, 수질개선 효과는 지표수에 비해 우수한 것으로 나타났다(동국대학교, 2005).

3. 오염물 거동과 지배방정식

3.1 대수층 내 물질 거동의 일반식

대수층 내에서 물질 거동을 기술하는 일반식은 Fig. 3과 같은 검사체적으로부터 유도된다(한정상, 2000). 질량보존법칙에 의해 체적 내로 유입되는 물질의 질량변화는 물질이 표면을 통해 체적으로 들어가는 순수유입율과 다양한 화학·물리적 작용에 의해 체적 내에서 발생하는 생성율을 더한 값과 같다.

검사체적 내로 유입되는 물질의 유입율의 x, y, z축에 평행한 세 가지 성분 F_x , F_y , F_z 을 고려한다. F_x , F_y , F_z 의 차원은 $[ML^{-2}T^{-1}]$ 이다. 물질의 순수유입율은 각 성분에 대한 유입과 유출의 차이로 Eq.(1)과 같다.

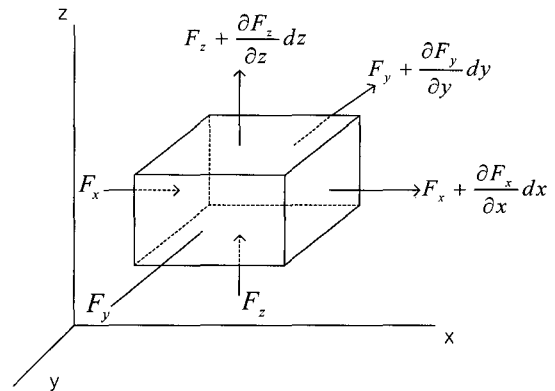


Fig. 3. Inflow and Outflow of Flux in Control Volume

$$\begin{aligned}
 \text{물질의 순수유입율} &= F_x - (F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx) \\
 &+ F_y - (F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy) + F_z - (F_z + \frac{\partial F_z}{\partial z} dz) \\
 &= -\frac{\partial F_x}{\partial x} dx - \frac{\partial F_y}{\partial y} dy - \frac{\partial F_z}{\partial z} dz \quad (1)
 \end{aligned}$$

콜로이드 물질과 소수성 오염물의 거동을 기술하기 위해 본 연구에서 고려된 기작은 다음과 같다.

- (가) 이류와 분산(advection and dispersion)
- (나) 흡착 및 탈착(adsorption and desorption)
 - 이동성 박테리아 ↔ 흡입자
 - 오염물 ↔ 흡입자
 - 오염물 ↔ 이동성 박테리아
 - 오염물 ↔ 비이동성 박테리아
 - 오염물 ↔ 용존성 유기물질(DOM)
- (다) 박테리아의 성장과 감쇠(growth and decay)
 - 박테리아의 성장을 위한 먹이원으로는 다음이 고려되었다.
 - 흡입자에 흡착된 오염물

- 용존성 유기물질(DOM)에 흡착된 오염물
- 박테리아에 흡착된 오염물
- 물 안에 녹아 있는 오염물
- 용존성 유기물질(DOM)

3.2 용존성 유기물질(DOM)과 박테리아의 거동

일반적으로 대수층은 강으로부터 DOM의 지속적인 유입으로 인해 유기물로 포화되어 있으므로 DOM은 평형상태로 간주할 수 있다(McCarthy et al., 1996). 한편, 포화된 다공질 매체의 액상에서의 박테리아의 1차원 물질수지식은 부록의 Eq.(8)에 제시되어 있다.

박테리아 거동에는 다음과 같은 가정이 전제되어 있다. 첫째, 흡입자의 표면에 흡착하는 박테리아 거동은 선형이고 가역적이라 가정하여 평형 모델을 사용한다. 이는 지하수 유동에 비해서 물질의 흡착은 매우 빠르게 일어나기 때문이며, 오염된 지하수의 대수층 내 체재시간이 평형을 이루는 데 충분하면 평형흡착이 일어난다고 볼 수 있기 때문에 설명할 수도 있다(van Loosdrecht et al., 1989). 둘째, 박테리아의 성장은 이동성 박테리아가 박테리아, DOM 그리고 흡입자에 흡착된 오염물을 먹이원으로 사용하는 것을 가정하였다. 셋째, 감쇠는 1차 반응으로 가정하였다.

물질수지식의 무차원화를 위해 다음과 같은 무차원 변수를 도입하였다.

$$X = \frac{x}{L}; T = \frac{tv_w}{L}; \theta^+ = \frac{\theta}{n}; \quad (2a)$$

$$C_b^+ = \frac{C_b}{C_{b0}}; C_c^+ = \frac{C_c}{C_{c0}};$$

$$K_1^+ = \frac{\rho_s K_1}{n}; K_2^+ = K_2 C_d;$$

$$K_3^+ = K_3 C_{b0}; K_4^+ = K_4 C_{b0}; K_b^+ = \frac{\rho_b K_b}{n} \quad (2b)$$

여기서 L 은 하천과 양수정 사이의 거리, v_w 는 공극유속 [LT^{-1}], θ 는 water content ($\theta = n - \sigma_b$), n 은 공극률, σ_b 는 흡입자에 부착된 박테리아의 부피비(다공질매체의 단위부피당 부착된 박테리아의 부피), C_b 는 액상에서의 박테리아의 농도, C_{b0} 는 $x=0$ 에서의 박테리아의 유입 농도, C_c 는 용존성 오염물의 농도, C_{c0} 는 오염물의 주입 농도를 나타낸다.

또한, ρ_s 는 대수층의 건조용적밀도, K_1 은 액상과 고상 사이에 오염물의 선형 평형분배계수, K_2 는 액상과 DOM 사이에 오염물의 선형 평형분배계수, C_d 는 액상

에서의 DOM의 농도, K_3 는 액상과 이동성 박테리아 사이에 오염물의 선형 평형분배계수, K_4 는 액상과 비이동성 박테리아 사이에 오염물의 선형 평형분배계수, ρ_b 는 박테리아의 밀도, K_b 는 액상과 고상 사이에 박테리아의 선형 평형분배계수를 나타낸다(김대환, 2005).

Pe 수와 $Damköhler$ 수를 사용하여 수리분산계수와 박테리아의 성장율과 감쇠율을 표현할 수 있다.

$$Pe = \frac{v_w L}{D_c}; Da_1 = \frac{Lk_{dm}}{v_w}; Da_2 = \frac{Lk_{di}}{v_w}; \quad (3)$$

$$Da_3 = \frac{L\mu C_{c0}}{v_w}; Da_4 = \frac{L\mu C_{b0}}{v_w Y}; Da_5 = \frac{Lk_0}{v_w}$$

여기서 D_c 는 오염물의 수리분산계수 [$L^2 T^{-1}$], k_{dm} 는 이동성 박테리아의 폐사율상수, k_{di} 는 비이동성 박테리아의 폐사율상수, μ 는 점성계수, Y 는 최대미생물 생산계수, k_0 는 DOM의 1차 감쇠율계수 [T^{-1}]이며, $Damköhler$ 수인 Da_1 는 이동성 박테리아의 폐사, Da_2 는 비이동성 박테리아의 폐사, Da_3 는 박테리아의 성장, Da_4 는 오염물의 이용, Da_5 는 DOM의 이용을 나타내는 척도이다.

Eqs.(2) and (3)에서 정의한 무차원변수를 이용해 박테리아 물질수지식 Eq.(9)를 무차원화하면 다음과 같다. 여기서, R_b^+ 는 박테리아의 지체인자(R_b)에 대한 무차원 수이다

$$\begin{aligned} \frac{\partial (R_b^+ C_b^+)}{\partial T} &= \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C_b^+}{\partial X^2} - \frac{\partial C_b^+}{\partial X} \\ &+ Da_3 C_c^+ \left(1 + \frac{K_1^+}{\theta^+} + K_2^+ + K_3^+ C_b^+\right) C_b^+ \\ &+ Da_3 C_c^+ \times \left(1 + \frac{K_1^+}{\theta^+} + \frac{K_b^+ C_b^+ K_4^+}{\theta^+}\right) K_b^+ C_b^+ \\ &- Da_1 C_b^+ - Da_2 K_b^+ C_b^+ + Da_5 C_b^+ \end{aligned} \quad (4a)$$

$$R_b^+ = \left(1 + \frac{K_b^+}{\theta^+}\right) \quad (4b)$$

3.3 오염물의 거동

지하수에 DOM과 이동성 박테리아가 존재할 경우 오염물은 액상에 용해되거나 흡입자, DOM 또는 박테리아에 흡착된다. 용존성 오염물의 물질수지식, 흡입자의 표면에 흡착된 오염물의 물질수지식, DOM에 흡착된 오염물의 물질수지식, 이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 물질수지식, 비이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 물질수지식 등에 기초하여 오염물의 1차원 물질수지식을 표현할 수 있으며(부록 2. 참조), 이를 무차원화

하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(R_c^+ C_c^+)}{\partial T} &= \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C_c^+}{\partial X^2} - \frac{\partial C_c^+}{\partial X} \\
 &+ \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2(K_2^+ C_c^+)}{\partial X^2} - \frac{\partial(K_2^+ C_c^+)}{\partial X} \\
 &+ \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2(C_b^+ K_3^+ C_c^+)}{\partial X^2} - \frac{\partial(C_b^+ K_3^+ C_c^+)}{\partial X} \\
 &- Da_4 C_b^+ \left(1 + \frac{K_1^+}{\theta^+}\right) C_c^+ \\
 &- Da_4 K_1^+ C_b^+ \left(1 + \frac{K_1^+}{\theta^+}\right) C_c^+ \\
 &- Da_4 K_2^+ C_b^+ C_c^+ - Da_4 C_b^+ K_3^+ C_b^+ C_c^+ \\
 &- Da_4 C_b^+ K_b^+ K_4^+ C_b^+ \frac{K_b^+}{\theta^+} C_c^+ \\
 R_c^+ &= \left[1 + \frac{(K_1^+ + K_b^+ K_4^+ C_b^+)}{\theta^+ (1 + K_2^+ + K_3^+ C_b^+)}\right]
 \end{aligned} \tag{5a}$$

여기서 R_c^+ 는 오염물 지체계수(R_c)에 대한 무차원수이다.

4. 수치모의

4.1 콜로이드 물질로 인한 오염물의 농도변화

박테리아와 오염물의 거동에 대한 물질수지식을 무차원화 시킨 Eqs.(4) and (5)의 수치해를 구하기 위해 유한차분법을 사용하였다. 시간적으로는 음해법(implicit), 공간적으로는 중심차분법을 적용하였다. 적용된 초기 및 경계조건은 박테리아가 일시적인 또는 지속적으로 유입될 수 있는 점을 고려하기 위해서 다음과 같이 두 가지 경우를 상정하였다.

(1) Case 1 - 박테리아가 T_0 까지 유입될 경우

$$C_b^+(X,0) = C_c^+(X,0) = 0 \tag{6a}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{Pe} \frac{\partial C_b^+}{\partial X}(0, T) + C_b^+(0, T) \\
 = \begin{cases} 1 & \text{at } 0 < T \leq T_0 \\ 0 & \text{at } T > T_0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6b}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{Pe} \frac{\partial C_c^+}{\partial X}(0, T) + C_c^+(0, T) \\
 = \begin{cases} 1 & \text{at } 0 < T \leq T_0 \\ 0 & \text{at } T > T_0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6c}$$

$$\frac{\partial C_b^+}{\partial X}(1, T) = \frac{\partial C_c^+}{\partial X}(1, T) = 0 \tag{6d}$$

여기서, T_0 는 오염물과 박테리아의 주입시간이다.

(2) Case 2 - 박테리아가 지속적으로 유입될 경우

$$C_b^+(X,0) = C_c^+(X,0) = 0 \tag{7a}$$

$$-\frac{1}{Pe} \frac{\partial C_b^+}{\partial X}(0, T) + C_b^+(0, T) = 1 \tag{7b}$$

$$-\frac{1}{Pe} \frac{\partial C_c^+}{\partial X}(0, T) + C_c^+(0, T) \tag{7c}$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{at } 0 < T \leq T_0 \\ 0 & \text{at } T > T_0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial C_b^+}{\partial X}(1, T) = \frac{\partial C_c^+}{\partial X}(1, T) = 0 \tag{7d}$$

수치모의시 사용된 매개변수의 값들은 Jenkins et al.(1993), Kim(2003)의 연구에서 사용된 값들을 이용하였다.

Fig. 4에서는 콜로이드 물질이 T_0 동안 유입될 경우 출구에서의 시간에 따른 농도 변화를, Fig. 5에서는 지속적으로 유입되는 경우의 농도 변화를 나타내었다.

오염물 이동은 콜로이드 물질이 동시에 존재하는 경우 DOM 또는 박테리아 한 가지만 존재하는 경우에 비해 최대농도의 도달시간이 단축되는 것을 보여준다. 즉, 박테리아나 DOM이 각각 존재하는 경우보다 동시에 존재하는 경우에 더욱 가속되고, 오염물의 가속이동 현상에는 박테리아보다는 DOM이 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 또한 박테리아의 유입이 지속될 경우는 최대농도 도달시간이 더욱 단축되는 현상을 보였고, 박테리아의 생물학적 분해 작용으로 인해 오염물의 농도를 크게 떨어뜨림을 알 수 있다.

4.2 오염물 평형분배계수의 민감도

Case 1과 2에 대하여 오염물 평형분배계수 K_1^+ , K_2^+ , K_3^+ 의 민감도를 분석하였다. 민감도 분석시 사용한 평형분배계수의 기본값은 K_1^+ 55.56, K_2^+ 0.44, K_3^+ 0.722이다.

Table 1. Parameters in base case

Parameters		Values
n	공극율	0.36
Pe	Peclet 수	50
K_b^+	박테리아의 상대적 평형분배계수 (액상 ↔ 고상)	15.31
K_1^+	오염물의 상대적 평형분배계수 (액상 ↔ 고상)	55.56
K_2^+	오염물의 상대적 평형분배계수 (액상 ↔ DOM)	0.44
K_3^+	오염물의 상대적 평형분배계수 (액상 ↔ 이동성 박테리아)	0.722
K_4^+	오염물의 상대적 평형분배계수 (액상 ↔ 비이동성 박테리아)	0.722
Da_1	<i>Damköhler</i> 수 (이동성 박테리아의 폐사)	$3.34 \times 10E-2$
Da_2	<i>Damköhler</i> 수 (비이동성 박테리아의 폐사)	$3.34 \times 10E-2$
Da_3	<i>Damköhler</i> 수 (박테리아의 성장)	$6.05 \times 10E-7$
Da_4	<i>Damköhler</i> 수 (오염물의 이용)	$1.24 \times 10E-3$
Da_5	<i>Damköhler</i> 수 (DOM의 이용)	$9.02 \times 10E-6$

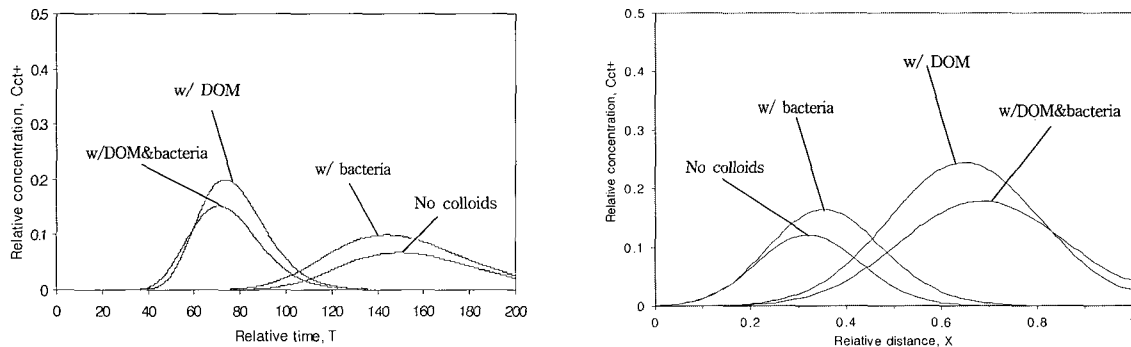


Fig. 4. Exit Concentration and Spatial Distribution of Pollutant (Case 1)

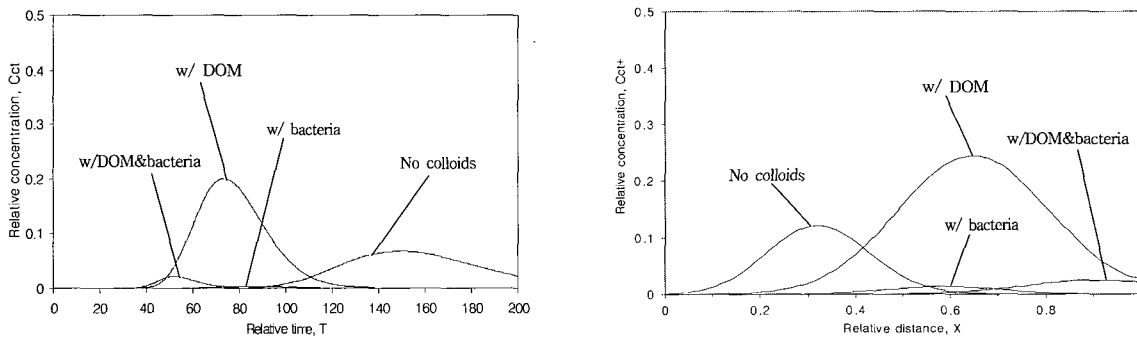


Fig. 5. Exit Concentration and Spatial Distribution of Pollutant (Case 2)

K_1^+ (액상과 고상 사이에서 오염물의 선형 평형분배 계수)가 증가함에 따라 breakthrough curve는 완만해지는 경향을 보이며 상대적 최대농도의 도착시간이 늦어 짐을 알 수 있다(Fig. 6). 이는 오염물의 지연인자의 증가로 오염물의 이동속도가 느려지고 이로 인하여 박테리아와 오염물의 접촉시간이 증가되기 때문이다.

Fig. 7은 K_2^+ (액상과 DOM 사이에서 오염물의 선형 평형분배계수) 값이 증가함에 따라 breakthrough curve의 상대적 최대농도 도착시간은 감소하는 반면 오염물의 농도는 증가하는 것을 보여준다. 도착시간은 오염물

의 지연인자의 감소에 기인한 것이며 농도의 증가는 박테리아와의 접촉시간 감소와 오염물이 고상과 접촉하는 시간의 감소에 기인한 것이다.

Fig. 8에서 보듯이 K_3^+ (액상과 이동성 박테리아의 선형 평형분배계수)가 증가하는 경우도 오염물의 지연인자의 감소로 최대농도 도착시간은 감소했지만 오염물의 농도는 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 오염물의 이동속도는 증가하였지만 박테리아에 오염물이 잘 흡착됨으로써 박테리아와의 접촉시간 증가에 기인한 것이다 (Tan et al., 1992).

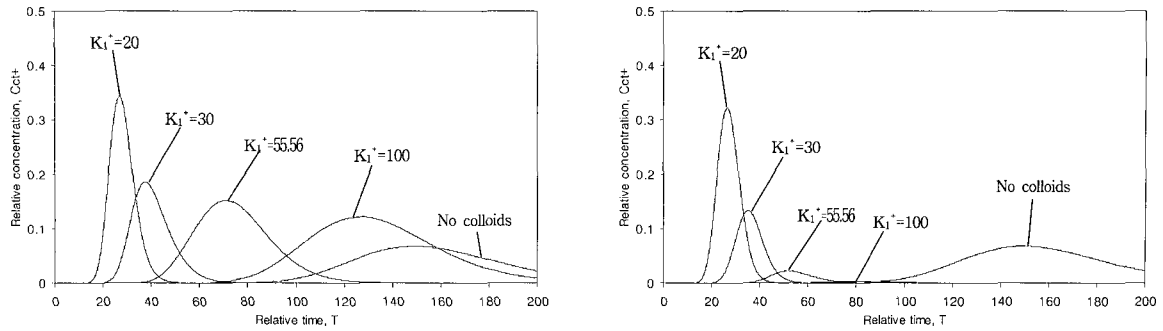


Fig. 6. The Influence of Partitioning Coefficient between Water and Solid (K_1^+): Case 1 & Case 2

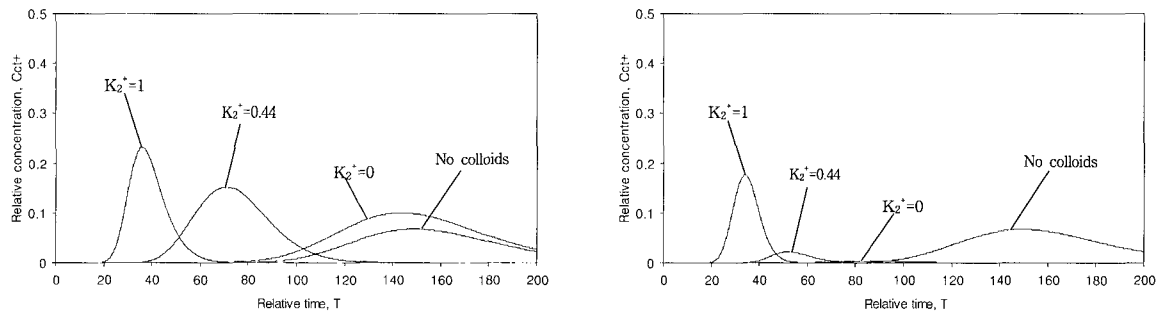


Fig. 7. The Influence of Partitioning Coefficient between Water and DOM (K_2^+): Case 1 & Case 2

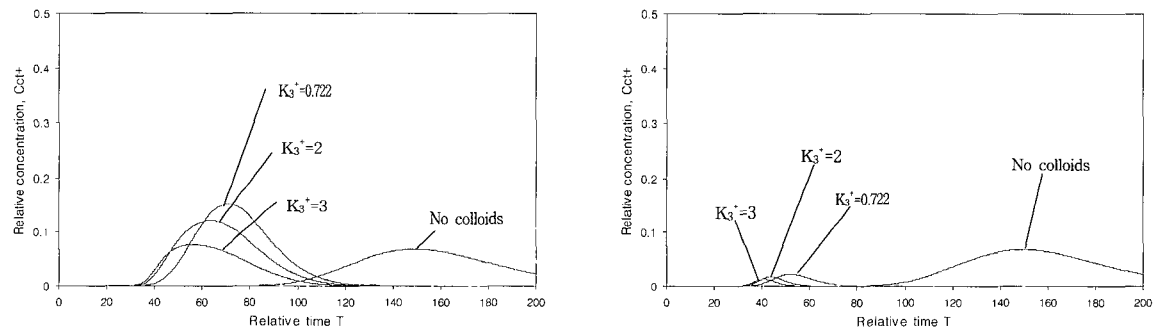


Fig. 8. The Influence of Partitioning Coefficient between Water and Bacteria (K_3^+): Case 1 & Case 2

민감도 분석결과 오염물 분배계수의 변화에 따라 오염물 거동은 민감하게 반응하였다. 흡입자에 오염물이 잘 흡착될수록 오염물 이동속도는 감소하며, 오염물이 콜로이드 물질에 잘 흡착될수록 오염물 이동이 가속화되는 것을 확인하였다. 오염물 분배계수가 현장특성에 따라 변화한다는 사실을 고려할 때, 이 같은 결과는 강변여과 현장을 모의할 때 분배계수의 결정에 신중해야 함을 시사한다.

5. 결론

강변여과에서 콜로이드성 물질은 운반자(carrier)의 역할을 하여 지체인자를 감소시켜 오염물의 가속현상을 유발하고, 대수층에 박테리아와 용존성 유기물질(DOM)이 동시에 존재하는 경우에는 오염물의 이동이 더욱 가

속화된다. 이는 강변여과 과정에서 콜로이드 물질을 고려하지 않은 2-phase 시스템보다는 박테리아 또는 DOM을 고려하였을 경우(3-phase)에 오염물은 더 빨리 이동하고, 박테리아와 DOM을 동시에 고려한(4-phase) 경우는 콜로이드 물질이 없거나 한가지만을 고려하였을 경우보다 훨씬 더 빨리 이동할 수 있음을 의미한다. 대수층으로의 박테리아의 지속적인 유입은 오염물의 가속현상을 더욱 촉진시키며, 지속적인 박테리아의 생물학적 분해 작용으로 인해 오염물의 농도를 크게 감소시킨다.

민감도 분석결과 오염물 평형 분배계수 K_1^+ , K_2^+ , K_3^+ 의 영향이 오염물 거동에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다. 즉, 흡입자에 오염물이 잘 흡착될수록 오염물 이동속도는 감소하며, 오염물이 콜로이드 물질에 잘

흡착될수록 오염물 이동이 가속된다. 또한 박테리아에 흡착이 잘 될수록 박테리아의 생물학적 분해로 인해서 오염물의 농도는 감소한다는 것을 확인하였다. 콜로이드로 인한 오염물 거동은 각 지역의 생물학적, 수리학적 영향에 의해서 달라질 수 있다. 특히 오염물과 콜로이드성 물질의 양이 많아지고 침투율이 증가될 수 있는 장마철의 경우에는 세심한 주의가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김대환 (2005). 강변여과에서 콜로이드성 물질이 오염물 거동에 미치는 영향. 석사학위논문, 동국대학교
- 동국대학교 (2005). **인공함양을 활용한 한강 및 낙동강 유역 수도공급 방안 연구**. 1차년도 요약 보고서.
- 한정상 (2000). 지하수환경과 오염, pp.553-561.
- 한국수자원공사 (1999). **지하수 함양 및 활용증대방안 연구**.
- Corapcioglu, M.Y., and Jiang, S. (1993). "Colloid-facilitated groundwater contaminant transport." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 7, pp. 2215-2226.
- Enfield C.G., Bengtsson G., and Lindqvist R. (1989). "Influence of macromolecules on chemical transport." *Environmental Science and Technology*, Vol. 23, (10), pp. 1278-1286.
- Fletcher, M. and Loeb, G.I. (1979). "Influence of substratum characteristics on the attachment of a marine Pseudomonad to solid surfaces", *Appl. and Environ. Microbiol.*, 37, pp. 67-72.
- Fontes, D.E., Mills, A. L., Hornberger, G.M., and Herman, J.S. (1991). "Physical and chemical factors influencing transport of microorganisms through porous media", *Appl. Environ. Microbiol.* 57. pp. 2473-2481.
- Jenkins, M.B., Lion, L.W. (1993). "Mobile bacteria and transport of polynuclear aromatic hydrocarbons in porous media", *Appl. Environ. Microbiol.* 59 (10), pp. 3306-3313.
- Kim, S.B., Corapcioglu, M.Y., and Kim, D.J. (2003). "Effect of dissolved organic matter and bacteria on contaminant transport in riverbank filtration." *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 66, Iss. 1-2, pp. 1-23.
- McCarthy, J.F., and Zachara, J.M. (1989). "Sub-surface transport of contaminants." *Environmental Science and Technology*, Vol. 23, Iss. 5, pp. 496-502.
- McCarthy, J.F., Gu, B., Liang, L., Mas-Pla, J., Williams, T.M., Yeh, T.-C.J. (1996). "Field tracer tests on the mobility of natural organic matter in a sandy aquifer." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 5, pp. 1223-1238.
- Peterson, T.C., and Ward, R.C. (1989). "Development of a bacterial transport model for coarse soils", *Water Resour. Bull.*, 25, pp. 349-359.
- Tan, Y., Bond, W.J., and Griffin, D.M. (1992). "Transport of bacteria during unsteady unsaturated soil water flow", *Soil Sci. Soc. of Amer. J.*, 56, pp. 1331-1340.
- van Loosdrecht, M.C. M., Lyklema, J., Norde, W., and Zehnder, A.J.B. (1989). "Bacterial adhesion: a physicochemical approach", *Microb. Ecol.*, 17, pp. 1-15.

부록 1. 박테리아 물질수지식의 유도(김대환, 2005)

대수층 내 물질 거동의 일반식을 박테리아에 대해 적용하면 다음과 같은 식을 얻는다(Kim et al., 2003).

$$\frac{\partial(\theta C_b)}{\partial t} = -\nabla \cdot [-D_b \nabla(\theta C_b) + v_w \theta C_b] - Q_{bs} + Q_{gm} - Q_{dm} + Q_{go} \quad (8)$$

여기서 θ 는 water content($(\theta = n - \sigma_b)$), n 은 공극률, σ_b 는 흡입자에 부착된 박테리아의 부피비(다공질매체의 단위부피당 부착된 박테리아의 부피), C_b 는 액상에서의 박테리아의 농도, D_b 는 박테리아의 수리분산계수($L^2 T^{-1}$), v_w 는 공극유속($L T^{-1}$), Q_{bs} 는 액상과 고상 사이에 박테리아의 질량이동(단위시간에 다공질매체의 단위부피당 박테리아의 질량), Q_{gm} 은 오염물을 먹이원으로 이용하는 액상에서의 박테리아의 성장율, Q_{dm} 은 액상에서의 박테리아의 폐사율, Q_{go} 는 DOM을 먹이원으로 이용하는 액상에서의 박테리아의 성장율을 나타낸다.

또한, 흡 입자의 표면에 부착된 박테리아의 물질수지 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho_b\sigma_b)}{\partial t} = Q_{bs} + Q_{gi} - Q_{di} \quad (9)$$

여기서, ρ_b 는 박테리아의 밀도, Q_{gi} , Q_{di} 는 흡입자의 표면에 부착된 박테리아의 성장율과 감쇠율을 각각 의미한다.

Eqs. (8) and (9)를 더하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta C_b)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b\sigma_b)}{\partial t} = & -\nabla \cdot [-D_b\nabla(\theta C_b) + \nu_w\theta C_b] \\ & + Q_{gm} + Q_{gi} - Q_{dm} - Q_{di} + Q_{go} \end{aligned} \quad (10)$$

윗 식을 박테리아의 성장률을 고려하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\theta C_b + \rho_b\sigma_b) = & -\nabla \cdot [-D_b\nabla(\theta C_b) + \nu_w\theta C_b] \\ & + \mu(C_c + \frac{\rho_s\sigma_{cs}}{\theta} + C_d\sigma_{cd} + C_b\sigma_{cbm})\theta C_b \\ & + \mu(C_c + \frac{\rho_s\sigma_{cs}}{\theta} + \frac{\rho_b\sigma_b\sigma_{cbi}}{\theta})\rho_b\sigma_b - k_{dm}\theta C_b - k_{di}\rho_b\sigma_b \\ & + k_o Y\theta C_d \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, C_c 는 용존성 오염물의 농도, ρ_s 는 대수층의 건조용적밀도, σ_{cs} 는 흡입자에 흡착된 오염물의 질량비(다공질 매체의 단위흡질량당 부착된 오염물의 질량), C_d 는 액상에서의 DOM의 농도, Q_{cd} 는 DOM과 액상 사이에서 오염물질의 질량 이동, σ_{cbm} 은 이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 질량비(이동성 박테리아의 단위 질량당 흡착된 오염물의 질량), σ_{cbi} 는 비이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 질량비(비이동성 박테리아의 단위 질량당 흡착된 오염물의 질량)이다.

Eq.(11)에 평형분배를 고려하여 박테리아의 1차원 물질수지식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(R_b\theta C_b)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}[-D_b\frac{\partial(\theta C_b)}{\partial x} + \nu_w\theta C_b] \\ & + \mu(C_c + \frac{\rho_s K_1 C_c}{\theta} + C_d K_2 C_c + C_b K_3 C_c)\theta C_b \\ & + \mu(C_c + \frac{\rho_s K_1 C_c}{\theta} + \frac{\rho_b K_b C_b K_4 C_c}{\theta})\rho_b K_b C_b - k_{dm}\theta C_b \end{aligned}$$

$$- k_{di}\rho_b K_b C_b + k_o Y\theta C_d \quad (12)$$

여기서 R_b 는 박테리아의 지체인자이다.

$$R_b = (1 + \frac{\rho_b K_b}{\theta}) \quad (13)$$

부록 2. 오염물 물질수지식의 유도(김대환, 2005)

· 용존성 오염물의 물질수지

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta C_c)}{\partial t} = & -\nabla \cdot [-D_c\nabla(\theta C_c) + \nu_w\theta C_c] \\ & - Q_{cs} - Q_{cd} - Q_{cbm} - Q_{cbi} - Q_a \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 D_c 는 오염물의 수리분산계수 [$L^2 T^{-1}$], Q_{cs} 는 액상과 흡입자 사이의 오염물의 질량 이동, Q_{cbm} 은 액상과 이동성 박테리아 사이에서의 오염물의 이동, Q_{cbi} 는 액상과 비이동성 박테리아 사이의 오염물질의 이동, Q_a 는 용존성 오염물의 이용율이다.

· 흡입자의 표면에 흡착된 오염물의 물질수지

$$\frac{\partial(\rho_s\sigma_{cs})}{\partial t} = Q_{cs} - Q_s \quad (15)$$

여기서 Q_s 는 흡입자에 흡착된 오염물의 이용율이다.

· DOM에 흡착된 오염물의 물질수지

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta C_d\sigma_{cd})}{\partial t} = & -\nabla \cdot [-D_d\nabla(\theta C_d\sigma_{cd}) + \nu_w\theta C_d\sigma_{cd}] \\ & + Q_{cd} - Q_d \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 σ_{cd} 는 DOM에 부착된 오염물의 질량비(DOM의 단위질량당 DOM위에 흡착된 오염물의 질량), D_d 은 DOM의 수리분산계수 [$L^2 T^{-1}$], 그리고 Q_d 는 DOM에 흡착된 오염물의 이용율이다.

· 이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 물질수지

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta C_b\sigma_{cbm})}{\partial t} = & -\nabla \cdot [-D_b\nabla(\theta C_b\sigma_{cbm}) + \nu_w\theta C_b\sigma_{cbm}] \\ & + Q_{cbm} - Q_{bm} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 Q_{bm} 은 이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 이용율이다.

· 비이동성 박테리아에 흡착된 오염물의 물질수지

$$\frac{\partial(\rho_s \sigma_b \sigma_{cbi})}{\partial t} = Q_{cbi} - Q_{bi} \quad (18)$$

여기서 Q_b 는 비이동성 박테리아에 흡착한 오염물의 이용율이다.

Eq. (14)~Eq. (18)을 더하면

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\theta C_c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \sigma_{cs})}{\partial t} + \frac{\partial(\theta C_d \sigma_{cd})}{\partial t} \\ & + \frac{\partial(\theta C_b \sigma_{cbm})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b \sigma_b \sigma_{cbi})}{\partial t} \\ & = -\nabla \cdot [-D_c \nabla(\theta C_c) + \nu_w \theta C_c] \\ & - \nabla \cdot [-D_d \nabla(\theta C_d \sigma_{cd}) + \nu_w \theta C_d \sigma_{cd}] \\ & - \nabla \cdot [-D_b \nabla(\theta C_b \sigma_{cbm}) + \nu_w \theta C_b \sigma_{cbm}] \quad (19) \\ & - Q_a - Q_s - Q_d - Q_{bm} - Q_{bi} \end{aligned}$$

오염물 이용율을 고려하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\theta C_c + \rho_s \sigma_{cs} + \theta C_d \sigma_{cd} + \theta C_b \sigma_{cbm} + \rho_b \sigma_b \sigma_{cbi}) \\ & = -\nabla \cdot [-D_c \nabla(\theta C_c) + \nu_w \theta C_c] \\ & - \nabla \cdot [-D_d \nabla(\theta C_d \sigma_{cd}) + \nu_w \theta C_d \sigma_{cd}] \\ & - \nabla \cdot [-D_b \nabla(\theta C_b \sigma_{cbm}) + \nu_w \theta C_b \sigma_{cbm}] \\ & - \frac{\mu C_c}{Y}(\theta C_b + \rho_b \sigma_b) \\ & - \frac{\mu \rho_s \sigma_{cs}}{Y\theta}(\theta C_b + \rho_b \sigma_b) - \frac{\mu C_d \sigma_{cd}}{Y}(\theta C_b) \quad (20) \\ & - \frac{\mu C_b \sigma_{cbm}}{Y}(\theta C_b) - \frac{\mu \rho_b \sigma_b \sigma_{cbi}}{Y\theta}(\rho_b \sigma_b) \end{aligned}$$

Eq. (18)에 평형분배를 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}[(\theta + \rho_s K_1 + \theta K_2 C_d + \theta K_3 C_b + \rho_b K_b K_4 C_b) C_c]$$

$$\begin{aligned} & = -\nabla \cdot [-D_c \nabla(\theta C_c) + \nu_w \theta C_c] \\ & - \nabla \cdot [-D_d \nabla(\theta K_2 C_d C_c) + \nu_w \theta K_2 C_d C_c] \\ & - \nabla \cdot [-D_b \nabla(\theta K_3 C_b C_c) + \nu_w \theta K_3 C_b C_c] \\ & - \frac{\mu C_c}{Y}(\theta C_b + \rho_b K_b C_b) \\ & - \frac{\mu \rho_s K_1 C_c}{Y\theta}(\theta C_b + \rho_b K_b C_b) \\ & - \frac{\mu C_d K_2 C_c}{Y}(\theta C_b) - \frac{\mu C_b K_3 C_c}{Y}(\theta C_b) \\ & - \frac{\mu \rho_b K_b C_b K_4 C_c}{Y\theta}(\rho_b K_b C_b) \quad (21) \end{aligned}$$

지체계수 R_c 를 이용하여 오염물의 1차원 물질수지식을 나타내면

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(R_c \theta C_c)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}[-D_c \frac{\partial(\theta C_c)}{\partial x} + \nu_w \theta C_c] \\ & - \frac{\partial}{\partial x}[-D_d \frac{\partial(\theta K_2 C_d C_c)}{\partial x} + \nu_w \theta K_2 C_d C_c] \\ & - \frac{\partial}{\partial x}[-D_b \frac{\partial(\theta K_3 C_b C_c)}{\partial x} + \nu_w \theta K_3 C_b C_c] \\ & - \frac{\mu C_c}{Y}(\theta C_b + \rho_b K_b C_b) \\ & - \frac{\mu \rho_s K_1 C_c}{Y\theta}(\theta C_b + \rho_b K_b C_b) - \frac{\mu C_d K_2 C_c}{Y}(\theta C_b) \\ & - \frac{\mu C_b K_3 C_c}{Y}(\theta C_b) \\ & - \frac{\mu \rho_b K_b C_b K_4 C_c}{Y\theta}(\rho_b K_b C_b) \quad (22) \end{aligned}$$

이고, 여기서 R_c 는 다음과 같다.

$$R_c = [1 + \frac{(\rho_s K_1 + K_4 K_b \rho_b C_b)}{\theta(1 + K_2 C_d + K_3 C_b)}] \quad (23)$$

액상에서의 오염물 총농도(C_{ct})는 액상에 녹아 있는 오염물의 농도와 DOM에 흡착된 오염물의 농도, 박테리아에 흡착된 오염물의 농도로 표현할 수 있다.

$$C_{ct} = C_c + C_d \sigma_{cd} + C_b \sigma_{cbm} \quad (24)$$

(논문번호:05-148/접수:2005.11.23/심사완료:2006.05.03)