

## 유동층 생물막 반응기에서의 폐수 탈질화 모델

서 일 순

건국대학교 화학공학과  
(2001년 2월 21일 접수, 2001년 5월 24일 채택)

## Modeling the Denitrification of Wastewater in a Fluidized Bed Biofilm Reactor

Il-Soon Suh

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea  
(Received 21 February 2001; accepted 24 May 2001)

### 요 약

모래와 활성탄입자를 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기에서의 폐수 탈질화에 대한 모델을 제시하였다. Boaventura와 Rodrigues에 의해 제안된 두 개의 순차적 영차 반응에 기초한 생물막 모델을 수정하였다. 반응기 모델은 질산과 아질산의 액상-생물입자 간의 물질전달도 함께 고려하였다. 반응기 액상의 혼합도 영향은 액상 플러그 흐름 및 완전혼합을 가정하여 고찰하였다. 모래담체 생물입자에 형성되는 얇은 생물막은 질산과 아질산에 의해 완전히 침투되며, 활성탄입자 담체에 형성되는 두꺼운 생물막은 질산 또는 아질산에 의해 부분 침투되는 것으로 나타났다. 질산 및 아질산의 제거속도는 완전침투의 경우 생물막 균체량에 의해, 부분침투의 경우 생물입자 표면적에 의해 각각 결정된다. 또한 생물막 부분침투의 경우, 생물막 내 물질확산, 액상과 생물입자 간의 물질전달 및 반응기 액상 혼합도가 반응기 단위부피 당 질산성질소 및 아질산성질소의 제거속도를 결정하는데 있어 중요한 역할을 한다.

**Abstract** – A reactor model was developed for the wastewater denitrification in the fluidized bed biofilm reactors with sand and activated carbon particles as support media. The biofilm model proposed by Boaventura and Rodrigues was modified based on the reaction scheme of two consecutive zero-order reactions. The reactor model also includes mass transport of nitrate and nitrite through the liquid film around bioparticles. The effects of liquid-phase mixing in the reactors were also taken account for by assuming the plug flow and the perfect mixing. Thin biofilms formed on the sand support media were fully penetrated by both nitrate and nitrite. On the other hand, the partial penetrations of both species were predicted to occur in thick biofilms on the activated carbon support particles. The removal rates of nitrate and nitrite in the case of full penetration were determined by the biomass quantity of the biofilm, while the surface area of bioparticles determined those in the partial penetration. In the case of partial penetration, the effective diffusivity in the biofilm, the liquid-bioparticle mass transfer and the liquid-phase mixing in the reactor play an important role in determining the volumetric removal rate of nitrate and nitrite.

**Key words:** Denitrification, Fluidized Bed Biofilm Reactor, Penetration Depth, Effective Diffusivity, Liquid-Bioparticle Mass Transfer, Liquid-Phase Mixing

### 1. 서 론

폐수 중의 유기성 질소는 미생물에 의한 분해나 가수분해에 의해 암모니아성 질소로 변하고(암모니아화), 암모니아성 질소는 독립영양균주에 의해 산화되어 아질산성 질소를 거쳐 질산성 질소로 변한다(질화). 질화단계에서 생성된 질산성질소는 종속영양균주에 의해 다시 아질산성질소를 거쳐 최종적으로 가스상태의 질소분자로 변하여 폐수로부터 제거된다(탈질화):



여기서, 질산 및 아질산 이온은 균의 에너지 생성을 위한 호흡과정에

서 전자수용체(electron acceptor)로 작용하며 이때 메탄올, 에탄올, 초산 및 포도당을 전자공급체(electron donor)로서 사용할 수 있다[1]. 탈질화 균주는 에너지 생성을 위한 이화작용 외에도 균주 증식을 위한 동화작용도 필요로 한다. 균주 생성을 위한 질소원과 탄소원으로 이화작용에 사용된 질산이온과 전자공급체가 각각 사용될 수 있다.

생물막 반응기는 반응기 내 균체농도를 높게 유지할 수 있어 높은 반응속도를 나타낸다[2, 3]. 따라서 공간수요와 초기투자비를 상당히 줄일 수 있는 장점이 있다. 특히 높은 비표면적을 나타내고 반응기의 막힘과 압력손실 등의 문제를 피할 수 있는 작은 크기의 담체를 사용하는 유동층 생물막 반응기는 폐수의 탈질화에 적용되고 있다[4, 5].

유동층 생물막 반응기에서의 폐수 탈질화에 생물입자 담체로 모래 또는 활성탄 입자를 사용할 경우 담체의 특성 및 반응기 질산성질소 부하

<sup>†</sup>E-mail: issuh@konkuk.ac.kr

율이 담체 표면에 형성되는 생물막 두께에 커다란 영향을 미친다[6]. 14.7 kg N/m<sup>3</sup>d의 반응기 질산성질소 부하율에서 활성탄입자를 사용한 경우 약 750 μm의 두꺼운 생물막이 형성된 반면에 모래 담체의 경우 약 140 μm의 얇은 생물막 형성이 관찰되었다. Boaventura와 Rodrigues[7] 및 Coelho 등[8]은 각각 영차 반응속도를 가정하여 모래 및 활성탄 입자를 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기에서의 탈질화 반응을 해석하였다. 그들의 유동층 생물막 반응기 특성 해석에서 액체-생물입자 간의 물질전달 저항 및 반응기 액상 혼합특성의 영향은 고려되지 않았다.

본 연구에서는 모래 및 활성탄입자를 생물입자 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기를 폐수의 탈질화에 적용할 때, 유입수 질산성질소농도 및 유량과 생물막두께의 변화가 질산성질소 및 아질산성질소 제거속도에 미치는 영향을 고찰하였다. 생물입자의 유동화 특성, 생물막 모델, 액상-생물입자 간의 물질전달 및 반응기 액상 혼합특성을 함께 고려하여 이들의 영향을 수치모사적으로 분석하였다.

## 2. 모델링

유동층 생물막 반응기에서의 탈질화 반응 모델링은 생물막 모델, 반응기 액상의 혼합특성, 액-고 물질전달 및 생물입자 유동화특성으로 구성된다.

### 2-1. 생물막 모델

본 연구에서는 영차 반응속도론을 가정하여, 정상상태에서의 질산성질소와 아질산성질소의 생물막 내 농도분포에 관한 식을 유도하였다. 생물막 내에서 질산성질소와 아질산성질소의 물질수지식은 식 (1)과 (2)로서 각각 나타낼 수 있다:

$$D_1 \frac{d^2 N_1}{dx^2} - k_1 = 0 \quad (1)$$

$$D_2 \frac{d^2 N_2}{dx^2} + (k_1 - k_2) = 0 \quad (2)$$

생물막 두께 L과 생물막 표면에서의 질산성질소 농도  $N_{1s}$ 를 이용한 다음 무차원수들을 정의하여 적용하면;

$$f_1 = \frac{N_1}{N_{1s}}, f_2 = \frac{N_2}{N_{1s}}, x = \frac{x}{L}, \delta = \frac{D_1}{D_2}, s = \frac{k_1}{k_2}, \Phi_1 = L \sqrt{\frac{k_1}{D_1 N_{1s}}} \quad (3a-f)$$

식 (1)과 (2)는 각각 무차원식 식 (4)와 (5)로 표현된다:

$$\frac{d^2 f_1}{dx^2} - \Phi_1^2 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2 f_2}{dx^2} + \delta \Phi_1^2 \left( \frac{s-1}{s} \right) = 0 \quad (5)$$

질산환원단계의 반응속도상수가 아질산환원단계의 반응속도보다 높은 값을 보이므로, 질산성질소 및 아질산성질소의 생물막 내 농도분포는 주어진 생물막 두께에서 생물막 표면에서의 질산성질소 농도가 감소함에 따라 Fig. 1에 나타난 바와 같이, (a) 질산 및 아질산이 생물막 표면에서부터 생물막과 담체의 경계면까지 완전히 침투되는 경우, (b) 질산은 부분적으로 침투된 반면 아질산은 완전히 침투되는 경우, (c) 질산 및 아질산 모두 생물막 표면으로부터 생물막 내에 부분적으로 침투되는 경우로 구분할 수 있다.

가장 일반적인 질산 및 아질산이 모두 생물막 내에 부분적으로 침투되는 경우, 경계조건 식 (6)과 (7)을 식 (4)와 (5)에 각각 적용한다:

$$f_1 = 1 \quad \text{at } x = 1 \quad (6a)$$

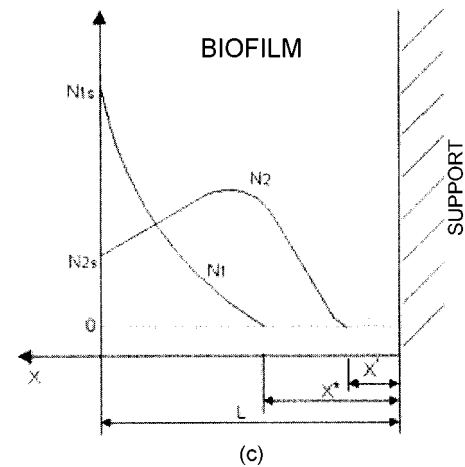
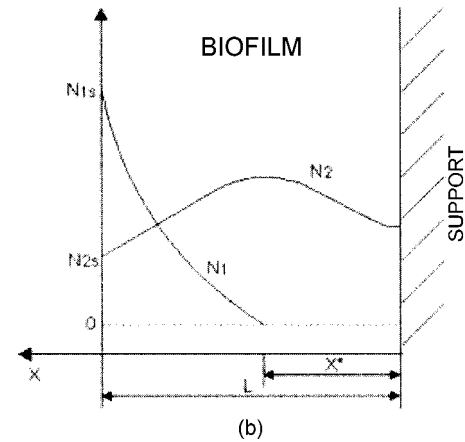
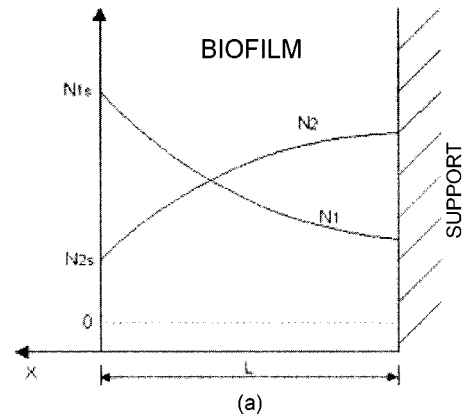


Fig. 1. Nitrate and nitrite profiles inside the biofilm[7]; (a) biofilm fully penetrated by both species, (b) biofilm fully penetrated by nitrite and partially penetrated by nitrate, (c) biofilm partially penetrated by both species.

$$f_1 = 0 \quad \text{at } x = x^* \quad (6b)$$

$$\frac{df_1}{dx} = 0 \quad \text{at } x = x^* \quad (6c)$$

$$f_2 = \frac{N_{2s}}{N_{1s}} \quad \text{at } x = 1 \quad (7a)$$

$$f_2 = f_2^* \quad \text{at } x = x^* \quad (7b)$$

$$\left( \frac{df_2}{dx} \right)_{x^*} = \left( \frac{df_2}{dx} \right)_{x^*} \quad \text{at } x = x^* \quad (7c)$$

$$f_2 = 0 \quad \text{at } x = x' \quad (7d)$$

$$\frac{df_2}{dx} = 0 \quad \text{at } x = x' \quad (7e)$$

여기서,  $x^*$ 와  $x'$ 은 질산과 아질산의 침투깊이를 각각 나타낸다. Boaventura와 Rodrigues[7]는 식 (7b) 및 (7c)와 다른 경계조건을,  $df_2/dx=0$  at  $x=x^*$ , 사용하였다.

생물막 내 질산성질소 농도분포는 식 (1), (6b) 및 (6c)로부터 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다:

$$f_1 = \frac{\Phi_1^2}{2}(x-x^*)^2 \quad \text{for } 1 > x > x^* \quad (8a)$$

$$f_1 = 0 \quad \text{for } x^* > x > 0 \quad (8b)$$

질산침투깊이  $x^*$ 는 식 (8a)와 (6a)로부터 식 (9)와 같이 표현된다:

$$x^* = 1 - \frac{\sqrt{2}}{\Phi_1} \quad (9)$$

아질산성질소의 생물막 내 농도분포는 식 (2)와 (7)로부터 식 (10)으로 나타낼 수 있다:

$$f_2 = \frac{N_{2s}}{N_{1s}} - \frac{\delta\Phi_1^2}{2s} \{1 - s - 2x' + 2sx^* - 2(sx^* - x')x + (s-1)x^2\} \quad \text{for } 1 > x > x^* \quad (10a)$$

$$f_2 = \frac{N_{2s}}{N_{1s}} - \frac{\delta\Phi_1^2}{2s} \{1 - 2x' - s(1 - x^*)^2 + 2x'x - x^2\} \quad \text{for } x^* > x > x' \quad (10b)$$

$$f_2 = 0 \quad \text{for } x' > x > 0 \quad (10c)$$

아질산의 침투깊이를 나타내는  $x'$ 는 식 (10b)와 (9)로부터 식 (11)과 같이 표현할 수 있다:

$$x' = 1 - \frac{\sqrt{2}}{\Phi_1} \left[ s \left\{ 1 + \frac{1}{\delta} \frac{N_{2s}}{N_{1s}} \right\} \right] \quad (11)$$

생물막 내에서 질산과 아질산 모두 부분적으로 침투되는 조건( $x' > 0$ ), 질산은 부분적으로 아질산은 완전히 침투되는 조건( $x^* > 0$ 과  $x' < 0$ ) 및 질산과 아질산 모두 완전히 침투되는 조건( $x^* > 0$ )은 식 (12a), (12b) 및 (12c)로 각각 표현된다:

$$\Phi_1 > \sqrt{2 \frac{k_1}{k_2} \left( 1 + \frac{D_2 N_{2s}}{D_1 N_{1s}} \right)} \quad (12a)$$

$$\sqrt{2} < \Phi_1 < \sqrt{2 \frac{k_1}{k_2} \left( 1 + \frac{D_2 N_{2s}}{D_1 N_{1s}} \right)} \quad (12b)$$

$$\Phi_1 < \sqrt{2} \quad (12c)$$

질산 및 아질산이 모두 생물막 표면에서부터 생물막과 담체의 경계면까지 완전히 침투되는 경우의 질산성질소 및 아질산성질소 농도분포는 식 (8)과 (10)에서 질산 및 아질산의 침투깊이를 각각 나타내는  $x^*$ 와  $x'$ 을 모두 영으로 놓고, 질산은 부분적으로 침투된 반면 아질산은 완전히 침투되는 경우는 아질산의 침투깊이를 나타내는  $x'$ 을 영으로 놓고 각각 구할 수 있다.

## 2-2. 반응기 모델

유동층 생물막 반응기의 생물입자 혼합은 무시하고 액상은 플러그흐름 또는 완전혼합을 가정한다.

### 2-2-1. 플러그 흐름 모델

#### 2-2-1-1. 질산성질소 농도분포

질산성질소에 대한 반응기 액상 물질수지식은 생물입자 주위에 형성되는 액막에서의 물질전달에 대한 저항을 고려하여 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다:

$$u \frac{dN_{1b}}{dz} + a_p k_{s1} (N_{1b} - N_{1s}) = 0 \quad (13)$$

여기서,  $N_{1b}$ 는 질산성질소의 반응기 내 액상 농도를,  $N_{1s}$ 는 생물입자 표면에서의 질산성질소 농도를,  $z$ 는 반응기 탑저로부터의 거리,  $u$ 는 액상 공탑유속,  $a_p$ 는 반응기 단위부피 당 생물입자 표면적, 그리고  $k_{s1}$ 는 질산성질소의 생물입자 주위 액-고 물질전달계수를 각각 나타낸다.

질산이온이 생물막 내에 완전히 침투한 영역에서,  $\Phi_1 < \sqrt{2}$  생물입자 표면으로의 질산성질소 플럭스를 생물막 내 질산성질소 농도분포로부터 구하여;

$$k_{s1} (N_{1b} - N_{1s}) = k_1 L \quad (14)$$

식 (13)에 대입하여 적분하면, 반응기 축 방향 질산성질소 농도분포를 나타내는 식 (15)를 얻을 수 있다:

$$N_{1b} = N_{1b}^0 - \frac{a_p k_1 L}{u} z \quad \text{for } 0 < z < z_I \quad (15)$$

여기서,  $N_{1b}^0$ 는 유입수의 질산성질소 농도를 나타낸다.  $z_I$ 는 질산이 생물막을 완전히 침투하는 반응기 영역을 나타내며,  $\Phi_1 = \sqrt{2}$ 의 조건과 식 (15)로부터 (16)과 같이 나타낼 수 있다:

$$z_I = \frac{u}{a_p k_1 L} \left( N_{1b}^0 - \frac{k_1 L}{k_{s1}} - \frac{k_1 L^2}{2D_1} \right) \quad (16)$$

$z_I$ 에서의 질산성질소 농도  $N_{1b}^I$ 는 식 (16)을 (15)에 대입하여 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다:

$$N_{1b}^I = \frac{k_1 L^2}{2D_1} + \frac{k_1 L}{k_{s1}} \quad (17)$$

질산이온이 생물막 내에 부분적으로 침투한 영역에서,  $\Phi_1 > \sqrt{2}$ , 반응기 내 액상으로부터 생물입자 표면으로의 질산성질소 플럭스는 생물입자 표면에서의 생물막 물질확산속도를 가지고 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$k_{s1} (N_{1b} - N_{1s}) = \sqrt{2D_1 k_1} N_{1s}^{0.5} \quad (18)$$

생물입자 표면에서의 질산성질소 농도  $N_{1s}$ 를 식 (18)로부터 액상농도  $N_{1b}$ 의 함수로 나타낸 후;

$$N_{1s} = N_{1b} + \frac{D_1 k_1}{k_{s1}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 + \frac{2k_{s1}^2}{D_1 k_1} N_{1b}} \right] \quad (19)$$

질산성질소의 액상 물질수지에 관한 식 (13)에 대입하여 적분하면, 반응기 축 방향 질산성질소 농도분포에 관한 식 (20)을 얻을 수 있다:

$$-\sqrt{1 + \frac{2k_{s1}^2}{D_1 k_1} N_{1b}} + \sqrt{1 + \frac{2k_{s1}^2}{D_1 k_1} N_{1b}^I} - \ln \frac{1 - \sqrt{1 + \frac{2k_{s1}^2}{D_1 k_1} N_{1b}}}{1 - \sqrt{1 + \frac{2k_{s1}^2}{D_1 k_1} N_{1b}^I}} = \frac{a_p k_{s1}}{u} (z - z_I) \quad (20)$$

#### 2-2-1-2. 아질산성질소 농도분포

아질산성질소의 액상 물질수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$u \frac{dN_{2b}}{dz} + a_p k_{s2} (N_{2b} - N_{2s}) = 0 \quad (21)$$

여기서,  $N_{2b}$ 는 아질산성질소의 액상농도,  $N_{2s}$ 는 생물입자 표면에서의 아질산성질소 농도,  $k_{s2}$ 는 생물입자 주위 액막에서의 아질산성질소 액-고 물질전달계수를 각각 나타낸다.

생물막 내에 질산과 아질산이 모두 완전히 침투한 영역에서, 아질산성질소의 생물입자 표면으로의 플럭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$k_{s2} (N_{2b} - N_{2s}) = -(k_1 - k_2) \cdot L \quad (22)$$

식 (22)를 (21)에 대입하여 적분하면 아질산성질소의 반응기 축 방향 농도분포에 관한 식 (23)을 얻을 수 있다:

$$N_{2b} = N_{2b}^0 + \frac{a_p (k_1 - k_2) L}{u} z \quad \text{for } 0 < z < z_l \quad (23)$$

여기서,  $N_{2b}^0$ 는 유입수의 아질산성질소 농도를 나타낸다.

생물막 내에서 질산은 부분적으로 침투하고 아질산은 완전히 침투한 반응기영역에서, 아질산성질소의 생물입자 표면으로의 플럭스는 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다:

$$k_{s2} (N_{2b} - N_{2s}) = -\sqrt{2D_1 k_1 N_{1s}} + k_2 L \quad (24)$$

생물막 내에서 질산과 아질산 모두가 부분적으로 침투한 반응기영역에서, 생물입자 표면으로의 아질산성질소 플럭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$k_{s2} (N_{2b} - N_{2s}) = -\sqrt{2k_1 D_1 N_{1s}} + \sqrt{2k_2 (D_1 N_{1s} + D_2 N_{2s})} \quad (25)$$

식 (25)를 생물입자 표면에서의 아질산성질소 농도  $N_{2s}$ 에 관하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다:

$$N_{2s} = N_{2b} + \frac{\sqrt{2k_1 D_1}}{k_{s2}} N_{1s}^{0.5} + \frac{k_2 D_2}{k_{s2}^2} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{2k_2^2}{k_2 D_2} \left( N_{2b} + \frac{D_1}{D_2} N_{1s} + \frac{\sqrt{2k_1 D_1}}{k_{s2}} N_{1s}^{0.5} + \frac{k_2 D_2}{2k_{s2}^2} \right)} \right\} \quad (26)$$

식 (24)와 (26)에서의 생물입자 표면에서 질산성질소농도  $N_{1s}$ 는 식 (19)와 (20)으로부터 산출할 수 있다. 아질산성질소의 반응기 축 방향 농도분포는 식 (21)에 식 (24) 또는 식 (26)을 대입한 후 수치해석적 방법인 Runge-Kutta-Fehlberg 방법을 적용하여 구할 수 있다[9].

### 2-2-2. 완전혼합 모델

유동층 생물막 반응기의 액상 완전혼합을 가정하고 액-고 물질전달을 고려하면, 반응기 유출수의 질산성질소 및 아질산성질소 농도는 식 (27)과 (28)로 각각 나타낼 수 있다:

$$N_{1b} = N_1^0 - \frac{V_R a_p}{Q} k_{s1} (N_{1b} - N_{1s}) \quad (27)$$

$$N_{2b} = N_2^0 - \frac{V_R a_p}{Q} k_{s2} (N_{2b} - N_{2s}) \quad (28)$$

여기서, 생물입자 표면에서의 질산성질소 및 아질산성질소 농도  $N_{1s}$  및  $N_{2s}$ 는 생물막 모델을 이용하여 구한다.

반응기 내 질산성질소 농도가 높아서 질산 및 아질산 모두가 생물막 내에 완전히 침투할 경우,  $\Phi_1 < \sqrt{2}$ , 식 (14)와 (22)로 표현되는 생물입자 표면에서의 질산성질소와 아질산성질소 플럭스를 식 (27)과 (28)에 각각 대입하면 식 (29)와 (30)을 얻을 수 있다:

$$N_{1b} = N_1^0 - k_1 L \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) \quad (29)$$

$$N_{2b} = N_2^0 + (k_1 - k_2) L \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) \quad (30)$$

식 (14)와 (29)를 이용하면  $\Phi_1 < \sqrt{2}$ 의 질산 생물막 완전침투 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$N_1^0 > k_1 L \left( \frac{L}{2D_1} + \frac{a_p V_R}{Q} + \frac{1}{k_{s1}} \right) \quad (31)$$

반응기 내 질산성질소 농도가  $\sqrt{2} < \Phi_1 < \sqrt{2(k_1/k_2)\{1 + (D_2 N_{2s})/(D_1 N_{1s})\}}$ 의 조건을 만족시키는 비교적 낮은 값을 보일 때, 생물막 내에 질산은 부분적으로 침투하고 아질산은 완전히 침투된다. 식 (19)로 표현되는 생물입자 표면에서의 질산성질소 농도를 식 (27)에 대입하여 반응기 내 질산성질소 농도를 구하면 식 (32)와 같이 나타낼 수 있다:

$$N_{1b} = b - \sqrt{b^2 - c} \quad (32a)$$

여기서,

$$b = N_1^0 + \left( \frac{D_1 k_1}{k_{s1}} \right) \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) \left\{ 1 + k_{s1} \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) \right\} \quad (32b)$$

$$c = \left\{ N_1^0 + 2 \left( \frac{D_1 k_1}{k_{s1}} \right) \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) \right\} N_1^0 \quad (32c)$$

식 (24)로 표현되는 생물입자 표면에서의 아질산성질소 플럭스를 식 (28)에 대입하면 반응기 내 아질산성질소 농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$N_{2b} = N_2^0 + (\sqrt{2D_1 k_1 N_{1s}} - k_2 L) \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) \quad (33)$$

여기서, 생물입자 표면에서의 질산성질소 농도  $N_{1s}$ 는 식 (19)와 (32)로부터 구할 수 있다. 생물입자 표면에서의 아질산성질소 농도  $N_{2s}$ 는 식 (24)와 (33)으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$N_{2s} = N_2^0 + (\sqrt{2D_1 k_1 N_{1s}} - k_2 L) \left\{ \left( \frac{a_p V_R}{Q} \right) + \frac{1}{k_{s2}} \right\} \quad (34)$$

반응기 내 질산성질소 농도가  $\Phi_1 < \sqrt{2(k_1/k_2)\{1 + (D_2 N_{2s})/(D_1 N_{1s})\}}$ 의 조건을 만족시키는 낮은 값을 보일 때, 질산 및 아질산 모두가 생물막 내에 부분적으로 침투된다. 반응기 내 질산성질소농도는 식 (32)와 같이 표현된다. 생물입자 표면에서의 아질산성질소 농도에 관한 식 (26)을 아질산성질소의 물질수지에 관한 식 (28)에 대입하면, 반응기 내 아질산성질소 농도  $N_{2b}$ 는 다음과 같이 표현된다:

$$N_{2b} = \left( a + \frac{b}{2} \right) - \sqrt{b \left( a + \frac{b}{4} + c \right)} \quad (35a)$$

여기서,

$$a = N_2^0 + \left( \sqrt{2k_1 D_1 N_{1s}} + \frac{k_2 D_2}{k_{s2}} \right) \left( \frac{V_R a_p}{Q} \right) \quad (35b)$$

$$b = 2k_2 D_2 \left( \frac{V_R a_p}{Q} \right)^2 \quad (35c)$$

$$c = \frac{D_1}{D_2} N_{1s} + \frac{\sqrt{2k_1 D_1 N_{1s}}}{k_{s2}} + \frac{k_2 D_2}{2k_{s2}^2} \quad (35d)$$

### 2-3. 생물입자 유동화 특성

유동층 생물막 반응기 내의 균체농도, 반응기 단위부피 당 생물입자 표면적 및 생물입자 주위에 형성되는 액막에서의 액-고 물질전달계수를

산출하기 위하여 생물입자 체류량을 계산하여야 한다.

액-고 유동층 반응기에서의 반응기 단위부피 당 생물입자의 표면적  $a_p$ 는 생물입자의 체류량  $\varepsilon_s$ 과 직경  $d_p$ 의 비로 계산된다:

$$a_p = 6 \cdot \frac{\varepsilon_s}{d_p} \quad (36)$$

생물입자 체류량은 액상 체류량  $\varepsilon_L$ 로부터 산출할 수 있다:

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_L \quad (37)$$

균일입자 액-고 유동층에서 액상 체류량은 Richardson-Zaki 상관식을 이용하여 액상유속  $u$  및 입자의 종말침강속도  $u_t$ 로부터 계산할 수 있다:

$$u/u_t = \varepsilon_L^n \quad (38)$$

$$n = (4.4 + 18d_p/D_C) \text{Re}_t^{-0.1} \quad \text{for } 1 < \text{Re}_t < 200 \quad (39)$$

여기서,

$$\log(u_t/u_t) = -d_p/D_C \quad (40)$$

$$\text{Re}_t = u_t d_p \rho_L / \mu_L \quad (41)$$

종말침강속도는 항력계수  $C_D$ 로부터 계산할 수 있다:

$$u_t = \left( \frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{\rho_p - \rho_L}{\rho_L} d_p \right)^{1/2} \quad (42)$$

생물입자의 항력계수는 식 (43)에 의해 산출된다[10]:

$$C_D = 17.1 \text{Re}_t^{-0.47} \quad (43)$$

항력계수로부터 종말침강속도를 계산하기 위해서 생물입자 젖은 밀도  $\rho_p$ 를 산출하여야 한다[식 (42)]. 생물입자의 젖은 밀도는 생물막 젖은 밀도로부터 계산할 수 있다. 생물막 젖은 밀도는 생물막을 구성하는 균체의 종류와 생물막 반응기의 운전조건에 따라 영향을 받을 것으로 추측할 수 있다. 1,000-1,140 kg/m<sup>3</sup>의 생물막 젖은 밀도 값이 보고되었다[10-12]. 본 연구에서는 1,020 kg/m<sup>3</sup>의 생물막 젖은 밀도 값과 식 (43)을 사용하여 생물입자의 종말침강속도를 산출하였다.

## 2-4. 유동입자와 액체 사이의 물질전달계수 $k_s$

액-고 물질전달계수  $k_s$ 는 식 (44)를 이용하여 산출할 수 있다[13]:

$$\left( \frac{k_s d_p}{D} \right) = 2 + 0.59 \left( \frac{\varepsilon^{1/3} d_p^{4/3} \rho_L}{\mu_L} \right)^{0.57} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D} \right)^{1/3} \quad (44)$$

여기서, 유동층에서의 액체 단위질량 당 에너지 소모속도  $\varepsilon$ 을 포함하는 specific power group  $(\varepsilon^{1/3} d_p^{4/3} \rho_L / \mu_L)$ 은 식 (45)와 같이 계산한다:

$$\left( \frac{\varepsilon^{1/3} d_p^{4/3} \rho_L}{\mu_L} \right) = \left( \frac{C_D}{2} \right)^{1/3} \left( \frac{u_t d_p \rho_L}{\mu_L} \right)^{2/3} \left( \frac{u d_p \rho_L}{\mu_L} \right)^{1/3} \quad (45)$$

## 3. 수치모사

모래 및 활성탄입자를 생물입자 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기를 폐수의 탈질화에 적용할 때, 유입수의 질산성질소농도 및 유량과 생물막두께의 변화가 질산성질소 및 아질산성질소 제거에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 생물입자의 유동화 특성, 생물막 모델, 액상-생물입자 간의 물질전달 및 반응기 액상의 혼합특성을 함께 고려하여 수치모사 방법을 사용하였다. 수치모사에 적용한 반응기 특성 및 운전조건을 Table 1에 정리하였다.

**Table 1. Reactor characteristics and operating conditions<sup>(a)</sup>**

Reactor diameter; 5 cm
Reactor height; 200 cm
Support media
Sand
Diameter; 0.455 mm
Density; 2.61 g/cm <sup>3</sup>
Activated carbon
Diameter; 1.274 mm
Dry density; 1.34 g/cm <sup>3</sup>
Wet density; 1.51 g/cm <sup>3</sup>
Liquid flow rate
1.458 m <sup>3</sup> /d for sand
0.99 m <sup>3</sup> /d for activated carbon
Effective diffusivity of nitrate and nitrite in biofilm <sup>(b)</sup>
0.090 mm <sup>2</sup> /min
Kinetic constants in biofilm <sup>(b)</sup>
$k_1$ ; 82.4 mg-N/L of biofilm min
$k_2$ ; 31.7 mg-N/L of biofilm min

(a) unless stated otherwise in the text.

(b) Boaventura and Rodrigues[7]

### 3-1. 생물막 유효물질확산계수의 영향

생물막 유효물질확산계수는 생물막 기공의 부피분율 및 굴곡인자 등의 영향을 받는다[14, 15]. 이들 생물막 특성 및 유효물질확산계수는 반응기 운전특성에 의해 영향을 받으며 건조중량과 젖은 밀도의 비로 나타내지는 생물막 밀도의 함수로 나타낼 수 있다[16, 17].

Fig. 2a는 기질의 생물막 내 유효물질확산계수가 모래담체 유동층 생물막 반응기에서의 액상 축 방향 질산성질소 및 아질산성질소 농도분포에 미치는 영향을 나타낸다. 반응기 액상 플러그 흐름을 가정하였고, 액-고 물질전달계수는 무시하였다. 적용한 생물막 두께는 100  $\mu\text{m}$ 이다. 생물막 두께가 유입수의 질산성질소 농도에 비해 얇아서,  $L < \sqrt{2D_1 N_{1s}^0 / k_1}$ , 질산이 생물막에서 완전히 침투하는 영역이 나타난다. 유효물질확산계수가 감소함에 따라 기질이 생물막 내에서 완전히 침투하는 영역에서 부분적으로 침투하는 영역으로의 전이가 반응기 내 낮은 높이에서 일찍 일어난다[식 (16)]. 유효물질확산계수가 0.09 mm<sup>2</sup>/min일 때 기질의 완전침투에서 부분침투로의 전이는 질산의 경우 반응기 높이 73 cm에서 일어나고, 아질산의 경우는 반응기 높이 209 cm에서 일어난다. 0.009 mm<sup>2</sup>/min의 낮은 유효물질확산계수의 경우, 질산은 반응기 입구부터 생물막 내에 부분적으로 침투되고 아질산은 반응기 높이 92 cm에서 완전침투에서 부분침투로 전이된다.

질산이 생물막 내에 완전히 침투한 영역에서는 질산성질소 및 아질산성질소의 축 방향 농도분포는 유효물질확산계수에 영향을 받지 않고 생물막으로 존재하는 균체량  $a_p L$ 에 선형적으로 영향을 받는다[식 (15), (23)]. 반응기 높이가 증가함에 따라 질산성질소의 액상농도가 감소하여 질산이 생물막 내에서 부분적으로 침투하기 시작하면 아질산의 생성속도가 감소하여 아질산성질소의 액상농도는 최대치를 나타낸 후 감소한다. 아질산성질소 농도의 최대치  $N_{2s}^{max}$ 는 생물막 내 질산의 유효물질확산계수가 감소함에 따라 다음과 같이 높은 반응기 높이  $z_{2s}^{max}$ 에서 나타나고;

$$z_{2s}^{max} = \frac{u}{k_1 a_p L} \left[ N_{1s}^0 + \left( 1 - 2 \frac{k_2}{k_1} \right) \frac{k_1 L^2}{2D_1} \right] \quad (46)$$

감소하는 경향을 나타낸다:

$$N_{2s}^{max} = N_{2s}^0 + \frac{k_1 - k_2}{k_1} \left( N_{1s}^0 - \frac{k_2 L^2}{2D_1} \right) \quad (47)$$

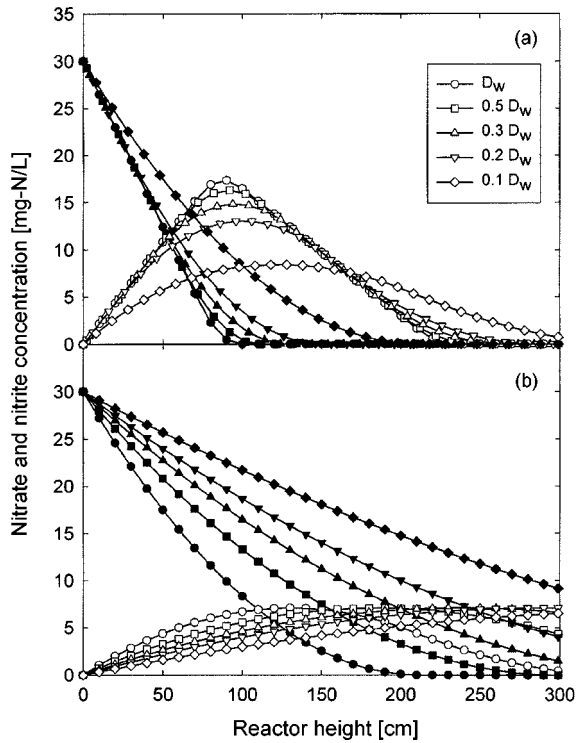


Fig. 2. Influences of the effective diffusivity on the nitrate(close symbols) and nitrite(open symbols) concentration profiles along the height of the FBBRs with (a) sand as support media, the biofilm thickness of 100  $\mu\text{m}$ , and the flow rate of 1.458  $\text{m}^3/\text{d}$ ; and (b) activated carbons as support media, the biofilm thickness of 400  $\mu\text{m}$ , and the flow rate of 1.458  $\text{m}^3/\text{d}$ .

질산의 생물막 부분침투로의 전이로 인한 반응기 단위부피 당 질산성 질소 제거속도의 감소는 아질산성질소의 생성속도를 감소시킨다. 반면에 아질산은 생물막을 완전히 침투하여 아질산성질소의 생물막 내 제거속도는 일정한 값을 유지하여 아질산성질소의 액상농도는 최대치를 보인다. 반응기 높이가 계속 증가함에 따라 질산의 생물막 부분침투 영역을 지난 후 질산성질소의 액상농도는 영의 값을 보인 후에도 아질산성질소의 액상농도는 여전히 높은 값을 보여 아질산이 생물막 내에서 완전히 침투하는 영역이 나타난다. 이 영역에서의 아질산성질소 액상농도는 다음과 같이 생물막 유효물질확산계수의 영향을 다시 받지 않고 반응기 높이가 증가함에 따라 생물막 균체량  $a_p L$ 에 비례하여 감소한다:

$$N_{2s} = N_{2s}^0 + N_{1s}^0 - \frac{k_2 a_p L}{u} z \quad (48)$$

Fig. 2b는 활성탄입자를 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기에서 생물막 내 유효물질확산계수가 액상 축 방향 질산성질소 및 아질산성질소 농도분포에 미치는 영향을 나타낸다. 생물막 두께는 400  $\mu\text{m}$ 이다. 생물막 두께가 유입수 질산성질소 농도에 비해 두꺼워 대부분의 경우 반응기 입구부터 질산이 생물막 내에서 부분적으로 침투한다,  $L > \sqrt{2D_1 N_{1s}^0 / k_1}$ . 주어진 반응기 높이에서 질산성질소 농도는 생물막 내 유효물질확산계수  $D_1$ 이 감소함에 따라 증가한다:

$$N_{1s} = \left[ \sqrt{N_{1s}^0} - \frac{a_p \sqrt{2D_1 k_1}}{2u} z \right]^2 \quad (49)$$

질산성질소 농도분포는 직접적으로 생물막 두께에는 무관하고 생물막 입자 표면적의 크기  $a_p$ 에 영향을 받는다. 질산과 아질산의 생물막 내 유효확산계수가 서로 같고,  $D_1 = D_2 = D$ , 유입수에 아질산이 존재하지 않는

다면, 아질산의 생물막 완전침투영역에서 부분침투영역으로의 전이위치  $z_{II}$ 와 아질산 부분침투영역에서의 아질산성질소 액상 농도  $N_{2s}$ 는 다음과 같이 각각 계산된다:

$$z_{II} = \frac{u}{k_2 a_p L} \left( N_{1s}^0 - \frac{k_2 L^2}{2D} \right) \quad (50)$$

$$N_{2s} = \frac{a_p \sqrt{2Dk_1}}{u} \left( \sqrt{N_{1s}^0} - \frac{k_2 L}{\sqrt{2Dk_1}} - \frac{a_p \sqrt{2Dk_1}}{4u} z \right) z \quad (51)$$

Fig. 2a에 나타난 100  $\mu\text{m}$  두께의 생물막을 지닌 모래담체 유동층 생물막 반응기에서의 결과와 비교할 때, 반응기 높이의 증가에 따른 질산성질소 농도의 감소가 완만하고 유효물질확산계수의 영향이 큼을 알 수 있다. 반응기 단위부피 당 질산성질소 감소속도는 질산이 생물막을 완전히 침투한 경우 생물막으로 존재하는 균체량  $a_p L$ 에 비례하고, 질산이 생물막을 부분적으로 침투한 경우 반응기 단위부피 당 질산성질소 감소속도는 생물입자 표면적  $a_p$ 에 비례한다. 아질산성질소의 축 방향 농도분포의 변화는 Fig. 2a에 나타난 모래담체 유동층 생물막 반응기의 경우와 상당히 다르다. 반응기 높이의 증가에 따른 아질산성질소 농도의 증가율 또는 감소율이 작고, 최대 아질산성질소 농도도 크게 작음을 알 수 있다. 증가율이 작은 이유는 생물막 내 질산성질소의 제거에 따른 아질산성질소의 생성률 감소와 두꺼운 생물막 내에서의 아질산성질소의 질산성질소 제거에 대한 상대적 제거율의 증가를 생각할 수 있다.

### 3-2. 생물입자 주위 액막 물질전달저항의 영향

Fig. 3a는 모래담체 유동층 반응기에서 생물막 두께 150  $\mu\text{m}$ 일 때 액-고 물질전달이 질산성 및 아질산성질소의 축 방향 농도분포에 미치는

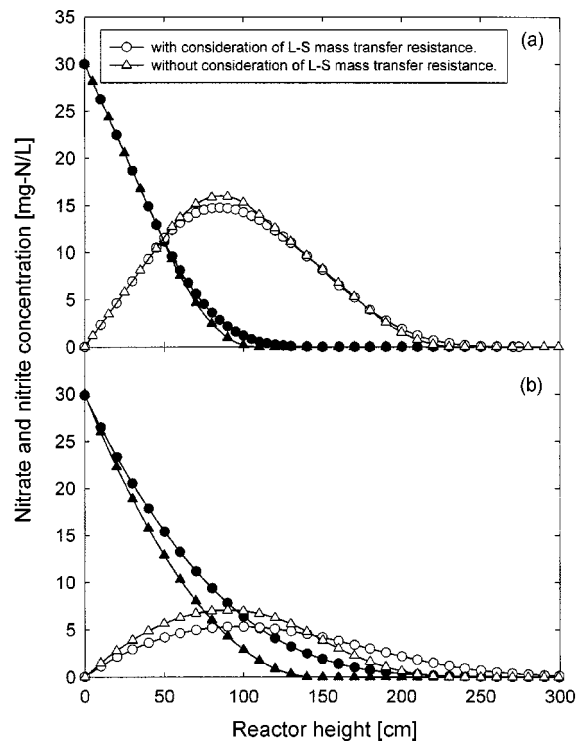


Fig. 3. Influences of the liquid-bioparticle mass transfer on the nitrate (close symbols) and nitrite(open symbols) concentration profiles along the height of the FBBRs with (a) sand as support media, the biofilm thickness of 150  $\mu\text{m}$ , and the flow rate of 1.458  $\text{m}^3/\text{d}$ ; and (b) activated carbon as support media, the biofilm thickness of 500  $\mu\text{m}$ , and the flow rate of 0.99  $\text{m}^3/\text{d}$ .

영향을 나타낸다. 질산이 생물막을 완전히 침투하는 영역에서는 식 (15)와 (23)이 나타내는 바와 같이 액-고 물질전달계수  $k_s$ 는 질산성 및 아질산성질소의 축 방향 농도분포에 어떠한 영향도 미치지 않는다. 그러나 액-고 물질전달은 질산의 완전침투 영역에서 부분침투 영역으로의 전이 위치  $z_1$ 에 영향을 미친다[식 (16)]. 생물입자 표면에서의 질산성질소 농도는 생물입자 주위에 형성되는 액막에서의 물질전달 저항 때문에 반응기 내 액상 농도보다 낮은 값을 나타낸다. 동일한 운전조건하의 액-고 물질전달을 고려하지 않을 경우보다  $u/(a_p k_{s1})$  만큼 낮은 위치에서 질산의 생물막 내 부분침투 영역이 시작된다. 질산의 부분침투 영역에서는 생물막 내 기질소모속도는 기질의 생물막 침투깊이에 영향을 받기 때문에 생물입자 표면에서의 기질농도에 영향을 받는다. 따라서 생물입자 표면에서 낮은 질산성질소 농도를 유발하는 생물입자 주위 액막에서의 액-고 물질전달저항은 생물막 내의 낮은 질산성질소 소모속도를 나타내게 한다.

질산이 생물막 내에 부분적으로 침투하는 영역에서는 반응기 내 아질산성질소 농도분포도 액막에서의 물질전달저항에 영향을 받는다. 액막에서의 물질전달저항으로 인한 낮은 생물막 내 질산성질소의 제거속도는 아질산성질소의 낮은 생성속도를 보인다. 따라서 액-고 물질전달을 고려하지 않을 경우와 비교하여 최대값 부근에서 아질산성질소의 낮은 액상농도를 설명할 수 있다. 150 cm 이상의 반응기 높이에서는 거의 같은 아질산성질소 농도분포를 나타내었다. 이 영역에서의 질산성질소 농도는 두 경우 영 또는 영에 가까운 값을 나타내어 질산성질소의 생물막 내 제거속도는 더 이상 액상 아질산성질소 농도에 영향을 미치지 않는다. 따라서 생물막 내 아질산성질소의 제거속도만이 액상 아질산성질소 농도에 영향을 미치게 된다. 이때 나타난 액상 아질산성질소 농도는 100  $\mu\text{m}$ 의 생물막 두께에 비하여 높은 값을 보이므로 생물막이 아질산에 의해 완전히 침투된다. 따라서 두 경우 모두 생물막 내의 아질산성질소 제거속도 및 액상에서의 아질산성질소 농도의 높이 증가에 따른 감소율은 생물입자 표면에서의 농도 값에 영향을 받지 않아 액-고 물질전달에 영향을 받지 않음을 유추할 수 있다.

Fig. 3b는 활성탄입자를 담체로 사용한 생물막 두께가 500  $\mu\text{m}$ 인 유동층 반응기에서의 액-고 물질전달의 영향을 보여준다. 모래 담체와 150  $\mu\text{m}$ 의 생물막 두께를 사용한 Fig. 3a의 경우와 비교할 때 질산성 및 아질산성질소의 액상 축 방향 농도분포에 미친 액-고 물질전달의 영향이 크다. 모래담체 유동층 반응기의 경우보다 생물막이 기질에 의해 부분적으로 침투된 영역의 범위가 넓고, 액-고 물질전달계수  $k_s$ 와 반응기 단위부피당 생물입자 표면적  $a_p$ 의 곱으로 표현되는 반응기 단위부피당 액-고 물질전달계수  $k_s a_p$ 가 작은 값을 보인다. 생물막의 두께가 유입수 질산성질소 농도에 비하여 두껍기 때문에 반응기 입구부터 생물막이 질산에 의하여 부분적으로 침투하는 영역이 나타난다. 따라서 반응기 입구부터 액-고 물질전달이 농도분포에 영향을 미침을 알 수 있다. 질산성질소 농도의 반응기 높이 증가에 따른 낮은 평균 감소율과 아질산성질소의 낮은 최대농도를 나타낸다. 낮은 질산성 및 아질산성질소 농도를 보이는 반응기 높이 약 150 cm 이상의 출구 부근에서 액-고 물질전달이 아질산성질소의 감소율에 영향을 미침을 보여준다. 이 영역에서 나타나는 낮은 액상 질산성 및 아질산성질소 농도 때문에 생물막은 아질산에 의해 부분적으로 침투되므로 생물막 내 아질산성질소 제거속도는 생물입자 표면에서의 농도에 영향을 받는다. 따라서 생물입자 주위 액막에서의 액-고 물질전달에 대한 저항은 낮은 생물막 내 아질산성질소 제거속도와 반응기 높이 증가에 따른 낮은 액상 아질산성질소의 감소율을 보여 높은 아질산성질소 농도 값을 보인다.

### 3.3. 액상혼합도의 영향

Fig. 4a는 100  $\mu\text{m}$ 의 생물막 두께를 보이는 모래담체 유동층 반응기에서의 액상 혼합도가 유출수의 질산성 및 아질산성 질소농도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수 질산성 질소농도는 50 mg-N/L로 생물입자의

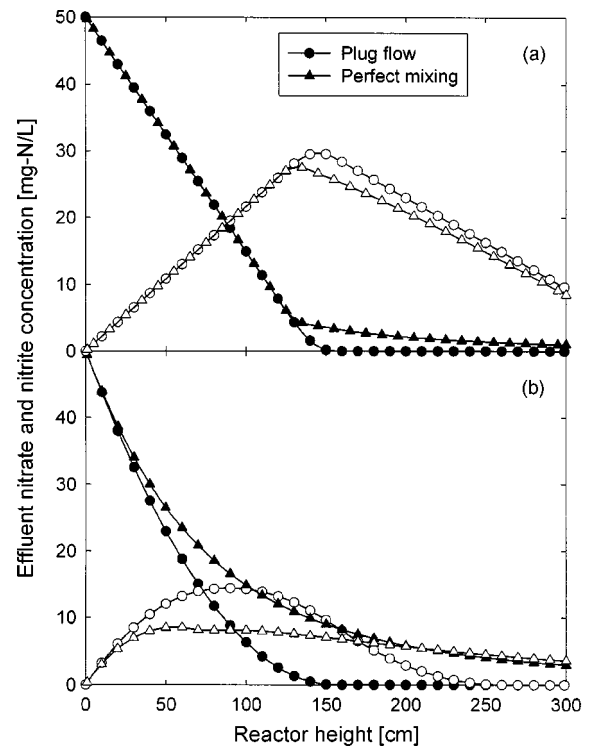


Fig. 4. Effects of the liquid phase mixing on the nitrate(close symbols) and nitrite(open symbols) concentrations of the effluents out of the FBBRs with (a) sand as support media, the biofilm thickness of 100  $\mu\text{m}$ , and the flow rate of 1.458  $\text{m}^3/\text{d}$ ; and (b) activated carbon as support media, the biofilm thickness of 400  $\mu\text{m}$ , and the flow rate of 0.99  $\text{m}^3/\text{d}$ .

생물막 두께에 비해 질산 부하율이 높은 값을 적용하였다. 질산 및 아질산 환원반응의 반응차수를 영차로 가정하였기 때문에 질산이 생물막 내에 완전히 침투하는 반응기 높이, 129 cm, 영역에서는 유출수의 질산 및 아질산성 질소농도는 액상의 혼합도에 영향을 받지 않는다. 반응기 높이가 130 cm 이상일 때 액상의 완전혼합도는 플러그 액상흐름의 경우보다 낮은 질산성질소 제거속도 즉 아질산성질소 생성속도를 유발하여 유출수의 질산성질소 농도는 높은 값을 아질산성질소 농도는 낮은 값을 보인다. 아질산은 질산이 생물막 내에 부분적으로 침투하는 경우도 생물막을 완전히 침투하여 생물막 내 아질산성질소 제거속도는 일정한 값을 보인 경우이다.

Fig. 4b는 400  $\mu\text{m}$ 의 생물막 두께를 보이는 활성탄입자를 담체로 사용한 유동층 반응기에서의 액상 혼합도가 유출수의 질산성 및 아질산성 질소 농도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수의 질산성질소 농도는 50 mg-N/L로 생물막 두께에 비해 반응기 질산성질소 부하율은 비교적 낮은 값이므로 반응기 유입수의 조건에서 생물막은 질산에 의해 부분적으로 침투된다. 따라서 반응기 크기 즉 높이가 증가함에 따라 처음부터 액상 혼합은 유출수의 질산성 및 아질산성 질소농도에 영향을 미치며 각각 증가 및 감소시킨다.

### 3.4. 유입수 질산성질소농도의 영향

Fig. 5a는 모래담체 유동층 생물막 반응기에서 유입수의 질산성질소 농도가 반응기 단위부피당 질산성 및 아질산성질소의 평균 제거속도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수 유량은 1.458  $\text{m}^3/\text{d}$ 이고 생물막 두께는 200  $\mu\text{m}$ 이다. 유입수의 질산성질소 농도가 증가함에 따라 질산성 질소 및 아질산성질소의 평균 제거속도는 증가하다 아질산성질소 제거

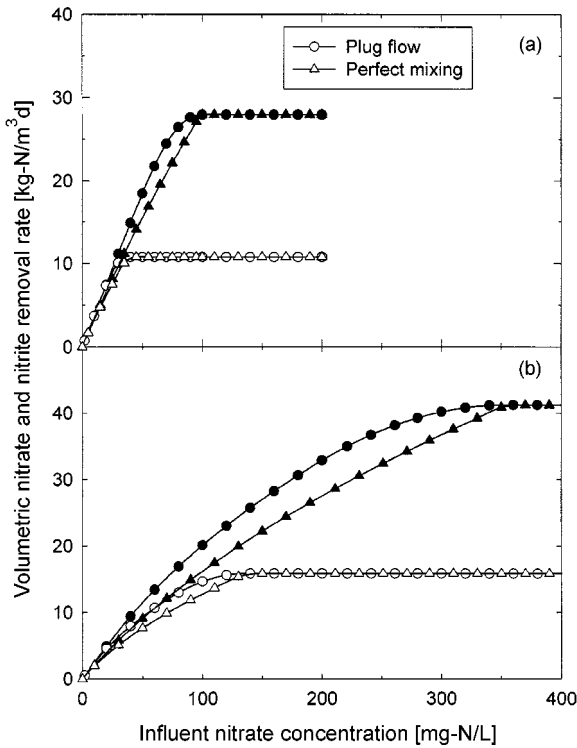


Fig. 5. Effects of the influent nitrate concentration on the volumetric nitrate(close symbols) and nitrite removal rate(open symbols) in the FBBRs with the height of 200 cm, (a) sand as support media and the biofilm thickness of 200  $\mu\text{m}$  at the flow rate of 1.458  $\text{m}^3/\text{d}$ ; and (b) activated carbon as support media and the biofilm thickness of 600  $\mu\text{m}$  at the flow rate of 0.99  $\text{m}^3/\text{d}$ .

속도가 38  $\text{mg-N/L}$  이상의 유입수 질산성질소 농도에서 11.0  $\text{kg-N/m}^3\text{d}$ 의 일정한 값을 먼저 보인 후 98.0  $\text{mg-N/L}$  이상의 유입수 질산성질소 농도에서 질산성질소 제거속도가 28  $\text{kg-N/m}^3\text{d}$ 의 일정한 값을 보인다. 반응기 내 모든 생물막이 질산 및 아질산에 의해 각각 완전히 침투될 때 질산성질소 및 아질산성질소 평균 제거속도는 일정한 값을 보이며 액상 혼합도에 영향을 받지 않는다.

Fig. 5b는 활성탄입자를 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기에서 유입수의 질산성질소 농도가 반응기 단위부피 당 질산성 및 아질산성질소의 평균 제거속도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수 유량은 0.99  $\text{m}^3/\text{d}$ 이고 생물막 두께는 600  $\mu\text{m}$ 이다. 유입수의 질산성질소 농도가 증가함에 따라 질산성질소 및 아질산성질소의 평균 제거속도는 증가하다 아질산성질소 제거속도가 137  $\text{mg-N/L}$  이상의 유입수 질산성질소농도에서 15.9  $\text{kg-N/m}^3\text{d}$ 의 일정한 값을 먼저 보인 후 355  $\text{mg-N/L}$  이상의 유입수 질산성질소 농도에서 질산성질소 제거속도가 41.2  $\text{kg-N/m}^3\text{d}$ 의 일정한 값을 보인다. Fig. 5a의 모래담체 유동층 생물막의 경우와 비교할 때, 활성탄을 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기는 생물막으로 존재하는 균체농도가 34.8  $\text{kg/m}^3$ 의 값으로 모래담체 경우의 23.6  $\text{kg/m}^3$ 에 비해 높아 질산성질소 및 아질산성질소의 최대 제거속도는 높은 값을 보이는 반면에 579  $\text{m}^2/\text{m}^3$ 의 반응기 단위부피 당 생물입자 표면적은 모래담체 경우의 1178  $\text{m}^2/\text{m}^3$ 에 비해 낮은 값을 나타내기 때문에 유입수의 질산성질소농도의 증가에 따른 기질 제거속도의 증가율은 낮은 값을 보인다.

### 3-5. 유입수 유량의 영향

Fig. 6a는 모래담체 유동층 생물막 반응기에서 유입수 유량이 반응기 단위부피 당 질산성 및 아질산성질소의 평균 제거속도에 미치는 영향

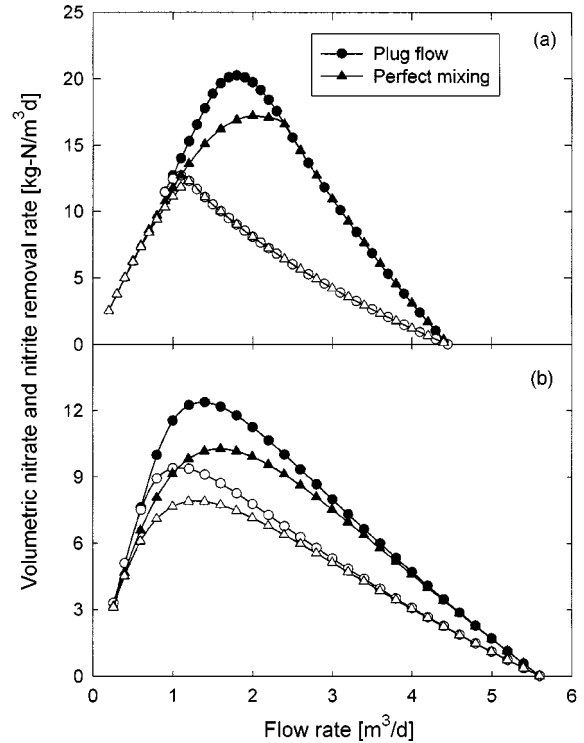


Fig. 6. Effects of the influent flow rate on the volumetric nitrate(close symbols) and nitrite removal rate(open symbols) in the FBBRs with the height of 200 cm, (a) sand as support media and the biofilm thickness of 200  $\mu\text{m}$  at the influent nitrate concentration of 50  $\text{mg-N/L}$ ; (b) activated carbon as support media and the biofilm thickness of 600  $\mu\text{m}$  at the influent nitrate concentration of 50  $\text{mg-N/L}$ .

을 나타낸다. 유입수 질산성질소농도는 50  $\text{mg-N/L}$ 이고 생물막 두께는 200  $\mu\text{m}$ 이다. 유입수 유량이 증가함에 따라 질산성 및 아질산성질소의 평균 제거속도는 증가하다 아질산성질소 제거속도가 먼저 최대치를 보인 후 감소하고 질산성질소 제거속도가 최대치를 보인 후 감소한다. 유량이 증가함에 따라 액-고 물질전달계수는 증가하고 반응기 내 생물입자 체류량 및 반응기 단위부피 당 표면적은 감소한다. 낮은 기질농도를 나타내는 저 유속 범위에서 기질은 반응기 내 대부분의 생물막에서 부분적으로 침투되어 반응속도는 생물입자 표면적의 크기에 의해 결정된다. 유량이 증가함에 따라 생물입자 표면적이 감소함에도 불구하고 낮은 유속 범위에서 질산성질소 및 아질산성질소 제거속도가 증가하는 것은 반응기 부하율이 반응기의 처리한계 내의 값을 유지하기 때문이다. 높은 유속범위에서는 반응기 내 질산성 및 아질산성질소 농도가 생물막 두께에 비하여 높은 값을 나타내기 때문에 반응기 내 모든 생물막이 기질에 의하여 완전히 침투된다. 따라서 유량이 증가함에 따라 생물입자 체류량 및 생물막으로 존재하는 균체량이 감소하여 반응기 단위부피 당 질산성질소 및 아질산성질소의 평균 제거속도는 감소하고 액상 혼합도가 질소 제거속도에 영향을 미치지 못 한다.

Fig. 6b는 활성탄입자를 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기에서 유입수 유량이 질산성 및 아질산성질소의 반응기 단위부피 당 평균 제거속도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수 질산성질소 농도는 50  $\text{mg-N/L}$ 이고 생물막 두께는 모래담체 반응기의 경우보다 두꺼운 600  $\mu\text{m}$ 이다. 유량의 전체범위에서 반응기 내 모든 생물막이 질산에 의해 부분적으로 침투된다. 유입수 유량이 증가함에 따라 질산성질소 및 아질산성질소의 평균 제거속도는 증가하다 먼저 아질산성질소 제거속도가 최대치



를 보인 후 감소하고 질산성질소 제거속도가 최대치를 보인 후 감소한다. Fig. 6a의 모래담체 반응기에서 유량이 증가함에 따라 생물막으로 존재하는 균체량이 감소하기 때문에 기질 제거속도는 최고치를 보인 후 감소하는 반면에, 활성탄입자를 담체로 사용하는 반응기의 경우 유량이 증가함에 따라 반응기 내 생물입자 표면적이 감소하기 때문에 기질 제거속도는 최고치를 보인 후 감소한다. 생물막이 기질에 의해 부분적으로 침투되기 때문에 반응기 평균 기질제거속도는 전체 유량범위 내에서 역상 혼합도에 의해 영향을 받는다.

### 3-6. 생물막 두께 변화의 영향

Fig. 7a는 모래담체 유동층 생물막 반응기에서 생물막 두께 변화가 반응기 질산성 및 아질산성질소의 평균 제거속도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수의 질산성질소농도는 50 mg-N/L, 유량은 1.458 m<sup>3</sup>/d이다. 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막으로 존재하는 균체농도는 증가하여 170  $\mu$ m의 생물막 두께에서 23.7 kg/m<sup>3</sup>의 최대값을 보인 후 약간 감소한다. 반면에 반응기 단위부피 당 생물입자 표면적은 생물막 두께가 증가함에 따라 처음부터 계속 감소하는 경향을 보인다. 주어진 유입수 유량 및 질산성질소 농도에서, 즉 반응기 부하율에서, 반응기 단위부피 당 질산성 및 아질산성질소 평균 제거속도는 낮은 범위의 생물막 두께에서 반응기 내 생물막으로 존재하는 균체량이 부하율에 비해 낮은 값을 보이기 때문에 생물막 두께가 증가함에 따라 증가한다. 약 40  $\mu$ m까지 생물막 두께는 반응기 액상 질산성 및 아질산성질소 농도에 비해 낮은 값을 나타내므로 반응기 내 모든 생물막은 질산 및 아질산에 의해 완전히 침투된다. 44  $\mu$ m의 생물막 두께에서 반응기 유출수 질산성질소 농도는 1.6 mg-N/L의 값을 아질산성질소 농도는 30 mg-N/L의 값을 나타내어 생물막은 질산에 의해서 먼저 부분적으로 침투되기 시작하는 반면에 아질산에 의해서는 계속 완전히 침투된다. 액상 플러그 흐름 가정하에 생물막 두께가 44  $\mu$ m 이상으로 증가하면 생물막이 질산에 의해 완전히 침투되는 반응기 영역은 감소하고 부분적으로 침투되는 영역은 증가한다. 생물막 두께가 증가함에 따라 질산에 의해 생물막이 완전히 침투되는 영역의 부피 분율은 감소하나 그 영역에서의 반응기 단위부피 당 질산성질소 제거속도는 증가하여 생물막으로 존재하는 균체농도가 최대치를 보이는 170  $\mu$ m의 생물막 두께까지 질산성질소의 반응기 전체 평균 제거속도 및 제거효율은 18.6 kg-N/m<sup>3</sup>d 및 99.9%의 일정한 값을 각각 나타낸 후 생물막 두께 증가에 따른 부분침투 영역의 증가 및 생물입자 비표면적의 감소로 인하여 감소하는 경향을 보인다. 액상의 완전혼합을 가정하면, 반응기 유출수의 조건에서 생물막이 부분적으로 침투되기 시작하는 생물막 두께 44  $\mu$ m 이상에서 생물막 두께가 증가함에 따라 반응기 단위부피 당 생물입자 표면적 및 평균 질산성질소 제거속도와 제거효율은 계속 감소한다. 반면에 생물막은 액상 질산성질소 농도가 17.5 mg-N/L의 값을 나타내고 아질산성질소 농도는 6.76 mg-N/L의 값을 나타내는 생물막 두께가 339  $\mu$ m에 도달할 때까지 아질산에 의해 완전히 침투된다. 액상 플러그 흐름을 가정하여도, 생물막 두께 339  $\mu$ m에서 액상 질산성 및 아질산성질소 농도는 9.57 mg-N/L 및 14.7 mg-N/L의 값을 각각 나타내어 생물막은 아질산에 의해 완전히 침투된다.

Fig. 7b는 유입수의 질산성질소 농도가 100 mg-N/L, 유입수의 유량은 Fig. 7a의 경우와 같은 1.458 m<sup>3</sup>/d인 모래담체 유동층 생물막 반응기에서 생물막 두께 변화의 질산성 및 아질산성질소의 반응기 평균 제거속도에 미치는 영향을 나타낸다. Fig. 7a의 경우와 비교할 때, 같은 유입수 유량을 적용하여 생물막 두께의 변화에 따른 생물입자의 체류량 및 비표면적과 균체농도의 변화는 같다. 반면에 유입수의 질산성질소 농도가 높아 유출수의 질산성 및 아질산성질소 농도가 각각 25.0 및 46.2 mg-N/L의 값을 보이는 생물막 두께가 207  $\mu$ m까지 질산에 의해 반응기 내 모든 생물막이 완전히 침투된다. 따라서 생물막 두께가 증가함에 따라 반응기 내 균체농도가 최대치를 보이는 생물막 두께 170  $\mu$ m에서 반응

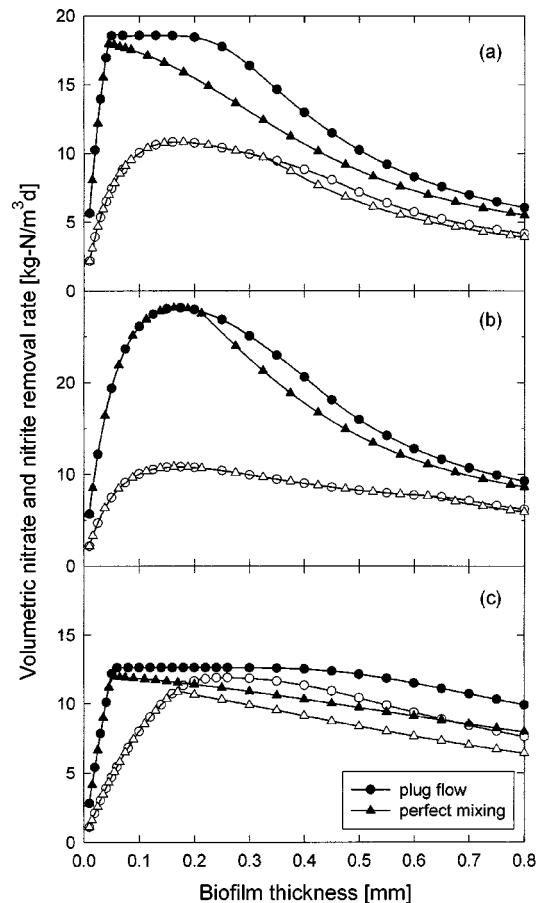


Fig. 7. Effects of the biofilm thickness on the volumetric nitrate (close symbols) and nitrite removal rate (open symbols) in the FBBRs with the height of 200 cm, (a) sand as support media at the influent nitrate concentration of 50 mg-N/L and the flow rate of 1.458 m<sup>3</sup>/d; (b) sand as support media at the influent nitrate concentration of 100 mg-N/L and the flow rate of 1.458 m<sup>3</sup>/d; (c) activated carbon as support media at the influent nitrate concentration of 50 mg-N/L and the flow rate of 0.99 m<sup>3</sup>/d.

기 평균 질산성질소 제거속도 및 제거효율은 각각 28.2 kg-N/m<sup>3</sup>d 및 75.8%의 최대치를 보인 후 감소한다. 유입수의 질산성질소 농도를 증가 시킴에 따라 질산성질소의 최대 제거속도는 증가하나 최대 제거효율은 감소한다. 질산성질소의 반응기 최대 제거속도는 50 mg-N/L의 유입수 질산성질소 농도를 적용한 Fig. 7a의 경우는 반응기 부하율에 의해 결정된 반면에 100 mg-N/L의 유입수 질산성질소 농도를 적용한 Fig. 7b의 경우는 반응기의 최대 처리능력 즉 균체량에 의해 결정된다.

Fig. 7c는 활성탄입자를 담체로 사용한 유동층 생물막 반응기에서 생물막 두께 변화가 질산성 및 아질산성질소의 반응기 평균 제거속도에 미치는 영향을 나타낸다. 유입수 질산성질소농도는 50 mg-N/L이고, 유량은 0.99 m<sup>3</sup>/d이다. 생물막 두께가 증가함에 따라 생물막으로 존재하는 균체농도는 증가하여 생물막 두께 400  $\mu$ m에서 약 33 kg/m<sup>3</sup>의 값을 보인 후 거의 일정한 값을 유지한다. 반면에 반응기 단위부피 당 생물입자 표면적은 생물막 두께가 증가함에 따라 처음부터 계속 감소하는 경향을 보인다. 같은 유입수 질산성질소 농도를 적용한 Fig. 7a의 경우와 비교할 때, 낮은 유입수 유량을 사용하였기 때문에 반응기 부하율은 낮은 값을 나타낸 반면에 반응기 최대 기질제거속도를 결정하는 최대 균체농도는 높은 값을 보인다. Fig. 7a의 경우와 같이 질산성질소의 최대 제거속도는 반응기 부하율에 의해 결정된다. 액상 플러그 흐름을 가

정할 때, 질산성질소의 최대 제거속도는 Fig. 7a의  $18.6 \text{ kg-N/m}^3\text{d}$  보다 유입수 유량의 비만큼 낮은  $12.6 \text{ kg-N/m}^3\text{d}$ 의 값을 보인 반면에 아질산성질소의 최대제거속도는 Fig. 7a의  $10.8 \text{ kg-N/m}^3\text{d}$  보다 약간 큰  $11.9 \text{ kg-N/m}^3\text{d}$ 의 값을 보인다. 약  $230 \mu\text{m}$ 의 생물막 두께에서 나타나는 아질산성질소의 최대 제거속도가 질산성질소의 최대 제거속도와 거의 같은 값을 나타내므로 유입되는 질산성질소가 거의 모두 질소 분자로 제거된다. 액상의 완전혼합을 가정할 때, Fig. 7a에 비해 상당히 얇은  $165 \mu\text{m}$ 의 두께에서 생물막이 아질산에 의해 부분적으로 침투되기 시작한다.

#### 4. 결 론

유동층 생물막 반응기에서의 탈질화 반응에 대한 영차 반응속도론을 가정한 수치모사 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다:

- (1) 얇은 생물막이 형성되는 모래담체 유동층 생물막 반응기에서 생물막은 질산과 아질산에 의해 완전히 침투된다.
- (2) 활성화된 입자를 담체로 사용하는 유동층 생물막 반응기에서 형성되는 두꺼운 생물막은 질산과 아질산에 의해 부분적으로 침투된다.
- (3) 기질에 의해 완전 침투되는 생물막을 갖는 반응기의 성능은 균체 농도에 의해 결정되고, 부분적으로 침투되는 생물막을 갖는 반응기의 성능은 생물입자의 반응기 단위부피 당 표면적에 의해 결정된다.
- (4) 생물막 내 유효물질확산계수, 액-고 물질전달계수 및 반응기 액상 혼합도 등의 영향은 두꺼운 생물막이 형성되는 활성화된 유동층 생물막 반응기에서 크게 나타난다.
- (5) 주어진 유입수 유량 및 생물막 두께에서 유입수 질산성질소농도가 증가함에 따라 질산성질소 및 아질산성질소의 반응기 단위부피 당 평균 제거속도는 증가하다 일정한 값을 보인다.
- (6) 주어진 유입수 질산성질소 농도 및 생물막 두께에서 유입수 유량이 증가함에 따라 질산성질소 및 아질산성질소의 반응기 단위부피 당 평균 제거속도는 증가하다 최대치를 보인 후 감소한다.
- (7) 주어진 유입수 질산성질소 농도 및 유량에서 생물막 두께가 증가함에 따라 질산성질소 및 아질산성질소의 반응기 단위부피 당 평균 제거속도는 증가하다 최대치를 보인 후 감소한다.

#### 감 사

본 연구는 1997년도 건국대학교 학술진흥연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 사용기호

$a_p$	: volumetric surface area of the bioparticles
$C_D$	: drag coefficient
$D$	: effective diffusivity
$D_C$	: column diameter
$D_w$	: molecular diffusivity in water, $0.096 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min}$
$d_p$	: bioparticle diameter
$f$	: dimensionless concentration, $N/N_{1s}$
$g$	: gravitational acceleration
$k$	: reaction rate constant
$k_s$	: liquid-solid mass transfer coefficient
$L$	: biofilm thickness
$N$	: concentration
$N^0$	: influent concentration
$N^I$	: concentration at $z_I$

$N_2^{max}$	: maximal nitrite concentration at $z_{2,max}$
$n$	: Richardson-Zaki index
$Q$	: influent flow rate
$Re_i$	: Reynolds number, $u_i d_p \rho_L / \mu_L$
$s$	: the ratio of the reaction rate constant of $k_1$ to $k_2$ , $k_1/k_2$
$u$	: superficial liquid velocity
$u_i$	: particle settling velocity defined by Eq. (40)
$u_t$	: terminal settling velocity of a particle
$V_R$	: reactor volume
$X$	: distance from the biofilm/media interface
$x$	: dimensionless distance from the biofilm/media interface, $x/L$
$x^*$	: dimensionless distance from the biofilm/media interface at which the nitrite concentration of zero occurs in the biofilm
$x'$	: dimensionless distance from the biofilm/media interface at which the nitrite concentration of zero occurs in the biofilm
$z$	: distance from the reactor inlet
$z_I$	: distance from the reactor inlet at which nitrate is fully penetrated in the biofilm
$z_{II}$	: distance from the reactor inlet at which nitrite starts to penetrate the biofilm partially
$z_{2,max}$	: distance from the reactor inlet at which the nitrite concentration in the reactor is maximal

#### 그리스 문자

$\epsilon$	: energy dissipation rate per unit mass of liquid
$\epsilon_L$	: liquid holdup
$\epsilon_s$	: bioparticle holdup
$\delta$	: ratio of molecular diffusivity $D_1$ to $D_2$ , $D_1/D_2$
$\mu_L$	: liquid viscosity
$\rho_L$	: liquid density
$\rho_p$	: bioparticle density
$\Phi_1$	: $L \sqrt{\frac{k_1}{D_1 N_{1s}}}$

#### 하첨자

1	: nitrate
2	: nitrite
b	: bulk
L	: liquid-phase
s	: bioparticle surface

#### 참고문헌

1. Painter, H. A.: *Wat. Res.*, **4**, 393(1970).
2. Shieh, W. K., Mulcahy, L. and LaMotta, E. J.: *Enzyme Microb. Technol.*, **4**, 269(1982).
3. Kim, D.-S. and Song, S.-K.: *Chem. Ind. Technol.*, **13**, 35(1995).
4. Jeris, J. S., Owens, R. W., Hickey, R. and Flood, F.: *J. WPCF*, **49**, 816(1977).
5. Walker, J. F. Jr., Hancher, C. W., Genung, R. K., Patton, B. D. and Kowalchuk, M.: *Biotechnol. Bioeng.*, **11**, 416(1981).
6. Shin, S. H., Suh, I.-S. and Chang, I. Y.: *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **3**, 1049(1997).
7. Boaventura, R. A. and Rodrigues A. E.: *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 2715(1988).
8. Coelho, I., Boaventura, R. and Rodrigues, A.: *Biotechnol. Bioeng.*,

- 40**, 625(1992).
9. Atkinson, L. V., Harley P. J. and Hudson, J. D.: "Numerical Methods with Fortran 77: a Practical Introduction," Addison-Wesley, Wokingham(1989).
10. Hermanowicz, S. W. and Ganczarczyk, J. J.: *Biotechnol. Bioeng.*, **25**, 1321(1983).
11. Tsezos, M. and Benedek, A.: *Wat. Res.*, **14**, 689(1980).
12. Ngian, K.-F. and Martin, W. R.: *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 1843(1980).
13. Kikuchi, K.-I., Sugawara, T. and Ohashi, H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 426(1983).
14. Monbouquette, H. G., Sayles, G. D. and Ollis, D. F.: *Biotechnol. Bioeng.*, **35**, 609(1990).
15. Libicki, S. B., Salmon, P. M. and Robertson, C. R.: *Biotechnol. Bioeng.*, **32**, 68(1988).
16. Fan, L.-S., Leyva-Ramos, R., Wisecarver, K. D. and Zehner, B. J.: *Biotechnol. Bioeng.*, **35**, 279(1990).
17. Kim, D.-S., An, K.-H., Suh, M.-G., Park, T.-J. and Song, S.-K.: *HWAHAK KONGHAK*, **29**, 448(1991).