

# 무산소-혐기-호기법에서 유기기질제거와 질산화의 동역학적 해석

채수권<sup>†</sup>

을지대학교 보건환경과학부

## The Kinetic Analysis on Organic Substrate Removal and Nitrification in Anoxic-Anaerobic-Aerobic Process

Chae Soo Kwon<sup>†</sup>

School of Human & Environmental Sciences, Eulji University Sung nam, Korea

(Received 6 September 2007, Accepted 13 September 2007)

### Abstract

Kinetic analysis was important to develop the biological nutrient removal process effectively. In this research, anoxic-anaerobic-aerobic system was operated to investigate kinetic behavior on the nutrient removal reaction. Nitrification and denitrification were important microbiological reactions of nitrogen. The kinetics of organic removal and nitrification reaction have been investigated based on a Monod-type expression involving two growth limiting substrates : TKN for nitrification and COD for organic removal reaction. The kinetic constants and yield coefficients were evaluated for both these reactions. Experiments were conducted to determine the biological kinetic coefficients and the removal efficiencies of COD and TKN at five different MLSS concentrations of 5000, 4200, 3300, 2600, and 1900 mg/L for synthetic wastewater. Mathematical equations were presented to permit complete evaluation of the this system. Kinetic behaviors for the organic removal and nitrification reaction were examined by the determined kinetic coefficient and the assumed operation condition and the predicted model formulae using kinetic approach. The conclusions derived from this experimental research were as follows :

1. Biological kinetic coefficients were  $Y = 0.563$ ,  $k_d = 0.054$  ( $\text{day}^{-1}$ ),  $K_s = 49.16$  ( $\text{mg/L}$ ),  $k = 2.045$  ( $\text{day}^{-1}$ ) for the removal of COD and  $Y_N = 0.024$ ,  $k_{dN} = 0.0063$  ( $\text{day}^{-1}$ ),  $K_{SN} = 3.21$  ( $\text{mg/L}$ ),  $k_N = 31.4$  ( $\text{day}^{-1}$ ) for the removal of TKN respectively.
2. The predicted kinetic model formulae could determine the predicted concentration of the activated sludge and nitrifier, investigate the distribution rate of input carbon and nitrogen in relation to the solid retention time (SRT).

**keywords** : Anoxic-anaerobic-aerobic process, Kinetic coefficients, Nitrification, Organic removal

## 1. 서론

생물학적 질소제거 공법은 질산화조 앞에 탈질조를 설치하여 탈질반응 후 잔존 유기물이 질산화조에서 제거되고 질산화된 용액을 탈질조로 재순환시키는 Ludzack법과 그 방법을 개량한 Barnard법과 Bardenpho법(田中, 1994; Barnard, 1975; Wilson, 1981)등이 있으며, 국내에서는 DNR, STAR process, HBR-II process, BNR 등과 같은 영양염류 제거 공법들이 개발되었다(국가환경기술정보센터, 2000).

표준활성슬러지법에서 NO<sub>3</sub>-N이 존재하면 슬러지 부상에 의해 처리수질이 악화되어 질산화 반응을 기피해 왔다. 그러나 생물학적 질산화-탈질법에서는 질산화 반응이 선행되어야 하고 탈질을 위해 필수조건이 되므로(Huang et al., 1974), 무산소-혐기-호기법에서의 유기기질제거반응과 질산

화반응에 대한 동역학 해석이 필요하다. 무산소-혐기-호기법은 O<sub>2</sub>를 전자 수용체로 하는 질산화반응과 NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N을 전자 수용체로 하는 탈질반응 및 유기물 산화 반응을 수행하는 3종의 미생물이 성장하고 있다(U.S. EPA, 1975).

따라서 본 연구에서는 무산소-혐기-호기법에서 성장하는 유기물 산화균과 질산화균의 증식을 실험적 및 동역학적으로 검토하기 위해, MLSS를 여러가지로 변화시켜 얻은 실험자료를 사용해서 시스템 전체에 대한 유기물 산화 반응과 호기조에서의 질산화 반응을 동역학적으로 해석하였다. 구한 유기물 산화 반응 및 질산화 반응에 대한 반응속도 상수를 사용하여 본 공법의 설계식을 유도하고 유기물 산화와 질산화의 상호관계를 규명하는 동시에 활성 슬러지 중의 질산화균에 대한 거동을 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험방법

유기물 산화와 질산화 반응의 동역학적 해석을 수행하기

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
cswen@eulji.ac.kr

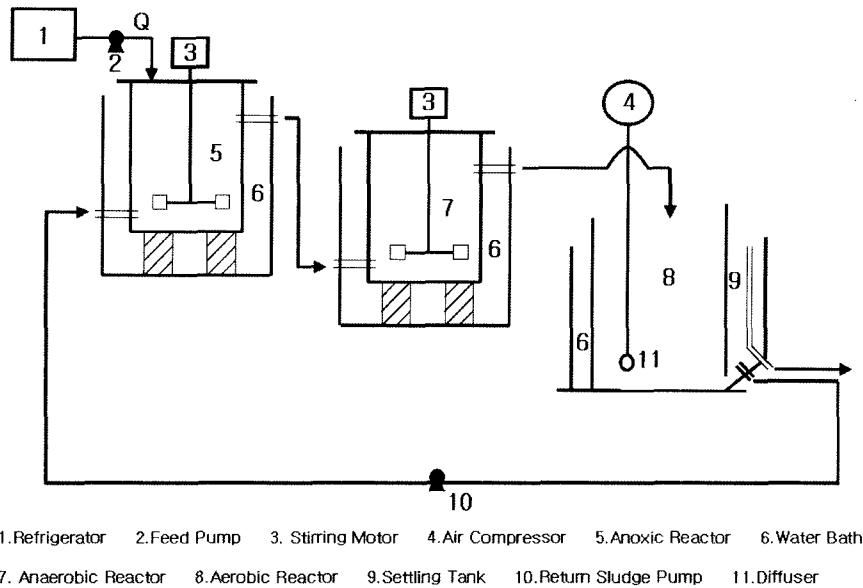


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system.

위해 Fig. 1과 같은 무산소-혐기-호기반응조로 구성된 시스템을 실험실 규모로 제작하였다.

무산소조와 혐기조는 교반모터로 완전 혼합하고 뚜껑을 설치하여 공기의 유입을 차단하고, 호기조는 송풍기에 의해 산소 공급과 완전혼합을 하였다. 반응조의 온도는 20°C로 유지하면서 호기조의 침전지에서 무산소조로 슬러지를 재순환시켰다.

무산소조, 혐기조, 호기조의 각 반응조 부피는 3.19 L, 1.64 L, 10.38 L이며 아크릴로 제작하였다. 합성하수 유입 유량은 30 mL/min이며, 재순환 슬러지 유량은 40 mL/min로 유지하여 시스템 전체의 체류시간이 0.354일로 운전하였다.

합성하수의 조성은 탄소원으로 Glucose 245 mg/L, Milk 250 mg/L, Yeast extract 131 mg/L, Peptone 106 mg/L를 사용하였고, 질소원으로 NH<sub>4</sub>Cl 122.3 mg/L, 인원으로 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 23.8 mg/L, Na(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 5.0 mg/L, pH 완충제로서 NaHCO<sub>3</sub> 250 mg/L 및 소량의 미량원소로 구성된 중강도 하수를 사용하였다.

동역학 해석을 위한 운전조작 변수로서 MLSS를 5000, 4200, 3300, 2600, 1900 mg/L로 각각 변화시켰으며 시료의 채취는 정상상태에 도달한 이후부터 매일 일정한 시간에 운전 조작 변수인 MLSS농도 별로 각각 실시하였으며, 시료 채취 위치는 유입수, 유출수, 무산조, 혐기조 및 호기조에서 채취하였다. 채취한 시료의 분석방법은 Standard Method(APHA et al., 1992)를 사용했으며, 분석 항목은 MLSS, MLVSS, COD, TKN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, pH, DO이었다.

2.2. 시스템 해석

Fig. 2와 같이 무산소-혐기-호기법을 일반 활성슬러지법과 같은 하나의 반응조로 간주한 경계조건에서의 미생물물 질수지는 식 (1)과 같다.

$$V_t \left\{ \frac{dX}{dt} \right\}_V = V_t \left\{ \frac{dX}{dt} \right\} - \{Q_w X_3 + (Q - Q_w) X_c\} \quad (1)$$

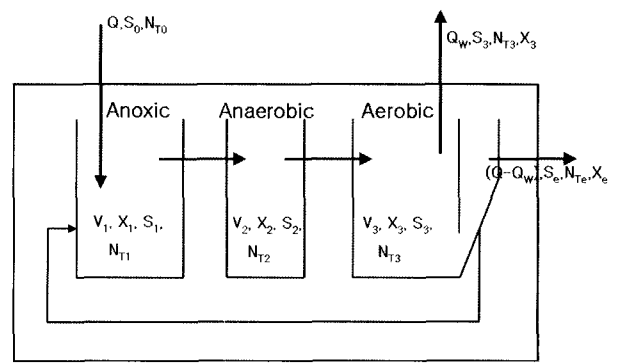


Fig. 2. Schematic diagram of mass balance in system.

여기서 V<sub>t</sub>는 시스템 전체의 부피(L), Q는 유입유량(L/day), Q<sub>w</sub>는 폐기유량(L/day), X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>, X<sub>c</sub>는 무산소조, 혐기조, 호기조, 유출수의 미생물농도 (mg/L), (dX/dt)는 미생물의 증식속도 (mg/L · day), (dX/dt)<sub>v</sub>는 미생물의 변화량 (mg/L · day)이다. 평균 미생물농도가 X이고, 식 (1)의 양변을 V<sub>t</sub> · X로 나누면 식 (2)와 같다.

$$\frac{1}{X} \left\{ \frac{dX}{dt} \right\}_V = \frac{1}{X} \left\{ \frac{dX}{dt} \right\} - \frac{Q_w X_3 + (Q - Q_w) X_c}{V_t X} \quad (2)$$

식 (2)의 우변 2항의 역수는 평균 미생물 체류시간(θ<sub>c</sub>) 혹은 (SRT)로 정의되고 정상상태일 때 (dX/dt)<sub>v</sub>=0이므로 미생물의 증식과 유기물제거와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \cdot \left\{ \frac{1}{X} \cdot \left( \frac{dS}{dt} \right)_r \right\} - k_d = Y \cdot U - k_d \quad (3)$$

여기서 U =  $\frac{1}{X} \cdot (dS/dt)$ ; 미생물에 의한 유기기질 비제거 속도, {mg/mg · day}

$Y$  ; 미생물 성장계수, [mg/mg]

$k_d$  ; 내생호흡율, [1/day]

기질에 대한 물질수지식과 Monod 모델(Metcalf et al., 1979)에 의해 Fig. 2와 같은 시스템은 정상상태일 때 식 (4)와 같이 수식화될 수 있다.

$$U = \frac{S_0 - S_e}{X \cdot \theta} = \frac{k \cdot S_e}{K_s + S_e} \quad (4)$$

여기서  $k$  ; 미생물 단위무게당 최대기질 소비속도 상수, [1/day]

$K_s$  ; 최대 비성장율의 1/2에 해당하는 기 질농도, [mg COD/L]

$\theta$  ; 수리학적 체류시간, [day]

식 (4)를 Lineweaver-Bulk 형으로 재정리하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{1}{U} = \frac{K_s}{k} \left\{ \frac{1}{S_e} \right\} + \frac{1}{k} \quad (5)$$

무산소조와 혐기조에서 유입수의 TKN성분은 재순환비 1.33에 의해 희석되거나 미생물 표면에 흡착된다고 할 수 있어 무산소조나 혐기조는 미생물에 의한 TKN 순제거는 없고, 호기조에서 질산화에 의해 제거된다고 생각할 수 있다. 따라서 Fig. 2와 같은 시스템 전체에 대해 TKN의 물질 수지를 고려할 수 있다. 시스템 전체에 대한 TKN의 물질 수지는 다음과 같다.

$$V_t \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_V = Q(N_{K0} - N_{Ke}) - V_t \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r \quad (6)$$

여기서  $V_t \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_V$  : TKN농도의 변화속도(mg/L · day)

$N_{K0}$  : 유입수의 TKN농도(mg/L)

$N_{Ke}$  : 유출수의 TKN농도(mg/L)

$V_t \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r$  : TKN의 제거속도(mg/L · day)

정상상태일 때  $(dN_K/dt)_V = 0$ 이므로 식 (6)은 다음 식과 같다.

$$\left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r = \frac{Q(N_{K0} - N_{Ke})}{V_t} \quad (7)$$

질산화균은 활성슬러지에 고착되어 있으며 균등 분포로 생각된다. 따라서 활성슬러지 농도( $X$ )와 질산화균의 농도( $X_N$ )의 비를  $\alpha$ 라고 하면 그 비는 아래식으로 표현된다(橋本, 1974; 順藤, 1976).

$$\alpha = \frac{X_N}{X} \quad (8)$$

활성슬러지 중에서 질산화균의 존재 비율( $\alpha$ )는 거의 변화가 없으므로 질산화균에 의한 TKN제거 반응식은 아래 식과 같이 Monod식으로 표시될 수 있다.

$$\frac{1}{X_N} \cdot \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\} = \frac{k_N \cdot N_{Ke}}{K_{SN} + N_{Ke}} \quad (9)$$

여기서  $k_N$  : 질산화균의 단위 무게당 최대 TKN소비속도, (1/day)

$K_{SN}$  : 질산화균의 최대성장비율의 1/2에 해당되는 TKN 농도, (mg/L)

또한 본 연구의 대상시료 중에는  $NH_3-N$  이외의 유기성 질소도 포함되어 있으며, 유기성 질소는 무산소조와 혐기조에서 암모니아화에 의해  $NH_3-N$ 으로 변화되므로 호기조에서 질산화균의 기질은 TKN으로 표시할 수 있다.

질산화 균에 의한 TKN 비제거 속도를  $U_N$ 이라고 하면  $U_N$ 은 다음 식으로 표현된다.

$$U_N = \frac{1}{X_N} \cdot \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r = \frac{k_N \cdot N_{Ke}}{K_{SN} + N_{Ke}} = \frac{Q(N_{K0} - N_{Ke})}{X_N \cdot V_t} \quad (10)$$

식 (10)을 Lineweaver-Bulk형으로 재정리하면 식 (11)과 같다.

$$\frac{1}{U_N} = \frac{K_{SN}}{k_N} \left\{ \frac{1}{N_{Ke}} \right\} + \frac{1}{k_N} \quad (11)$$

질산화균은 활성슬러지에 고착되어 있으므로 잉여슬러지와 함께 시스템에서 폐기된다. 따라서 질산화균의 평균체류시간은 활성슬러지의 평균체류시간( $\theta_c$ )과 같다. 그러므로 질산화균의 증식과 TKN제거와의 관계는 식 (12)와 같다.

$$\frac{1}{\theta_c} = Y_N \cdot \frac{1}{X_N} \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r - k_{dN} \quad (12)$$

식 (8)을 식 (12)에 대입하면 다음 식과 같다.

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Y_N}{\alpha} \cdot \frac{1}{X} \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r - k_{dN} = Y_N U_N - k_{dN} \quad (13)$$

여기서  $\frac{1}{X_N} \left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r$  : 질산화균에 의한 TKN의 비제거 속도(mg/mg · day)

$Y_N$  : 질산화균의 성장계수(mg/mg)

$k_{dN}$  : 질산화균의 내생호흡율(1/day)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 동역학 상수

생물학적 반응속도를 나타내는 Eckenfelder의 1차 반응식과 연속흐름 완전혼합 반응조의 수리학적 개념을 이용한 동역학식에 의해 기질의 동역학 상수를 산정하였다 (Benefield et al., 1980). 본 연구의 무산소-혐기-호기법은 슬러지를 재순환시키기 때문에 각각의 반응조를 하나의 반응계로 보고 MLSS변화 즉, SRT변화에 따른 운전조건과 각각의 SRT값에 대한 정상상태에서의 유기물과 질소의 평균농도 및 제 2.2 장의 시스템 해석의 식들을 사용하여 계산한 변수를 Table 1에 표시하였다.

미생물 성장계수  $Y$ 와 내생호흡계수  $k_d$ 는 식 (3)의  $U$ 와  $(1/\theta_c)$ 의 관계식에 의해 구할 수 있다. Table 1의  $U$ 와  $(1/\theta_c)$ 의 값을 선형회귀분석하여 Fig. 3에 그 관계를 나타냈다.

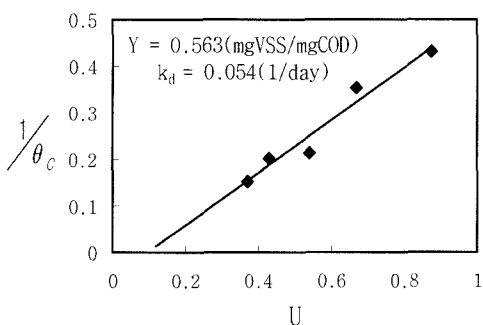
$U$ 와  $(1/\theta_c)$ 의 관계를 구하면 상관계수가 0.954인 직선이 얻어지고 그 직선의 기울기와 절편에 의하여  $Y = 0.563(\text{mg VSS}/\text{mg COD})$ ,  $k_d = 0.054(1/\text{day})$ 을 얻었다.

활성슬러지법의  $Y$ ,  $k_d$ 값은 기질의 종류, 처리온도 등에 의해 달라지지만,  $Y = 0.3 \sim 0.7$ ,  $k_d = 0.04 \sim 0.1(1/\text{day})$ 이라고 많이 보고되었다(Huang et al., 1974; Reeves, 1972; Lawrence et al., 1970). 따라서 합성하수를 무산소-혐기-호기법으로 처리하여 구한  $Y$ ,  $k_d$  값은 일반적인 활성슬러지법의 값들과 큰 차이가 없다. 그러므로  $Y$ ,  $k_d$  값을 고려할 때 일반적인 활성슬러지법과 같은 형태로 취급될 수 있다고 사료되었다.

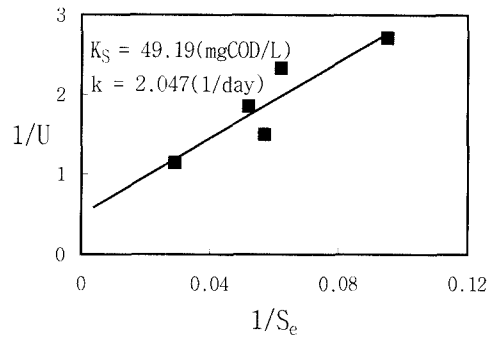
Fig. 2와 같은 시스템의 기질에 대한 물질수지식과 Monod

**Table 1.** Average values for determination of biological kinetic coefficients for synthetic wastewater

Item	MLSS				
	5,000	4,200	3,300	2,600	1,900
SRT (day)	6.53	4.96	4.68	2.83	2.32
1/SRT (1/day)	0.153	0.202	0.214	0.353	0.431
$S_0$ (mg COD/L)	572.2	574.1	573.0	558.3	563.6
$S_c$ (mg COD/L)	10.50	16.03	19.20	17.50	34.80
$U$	0.369	0.429	0.540	0.668	0.874
1/ $U$	2.71	2.331	1.852	1.497	1.144
1/ $S_c$	0.095	0.062	0.052	0.057	0.029
$N_{K0}$ (mg TKN/L)	58.2	59.9	58.4	62.2	58.1
$N_{Kc}$ (mg TKN/L)	1.37	1.57	1.88	4.1	7.0
$U_N$	0.0321	0.0392	0.0484	0.0631	0.0760
1/ $U_N$	31.15	25.49	20.67	15.84	13.16
1/ $N_{Kc}$	0.730	0.637	0.532	0.244	0.143



**Fig. 3.** Determination of  $Y$  and  $k_d$  for synthetic wastewater.



**Fig. 4.** Determination of  $K_s$  and  $k$  for synthetic wastewater.

모델에 의해 구한 정상상태일 때의 식 (4)와 그 식을 Lineweaver-Bulk 형으로 재정리한 식 (5)에 의해 미생물 단위무게당 최대기질 소비속도 상수  $k$ 와 최대비성장율의 1/2에 해당하는 기질농도  $K_s$ 를 결정할 수 있다.

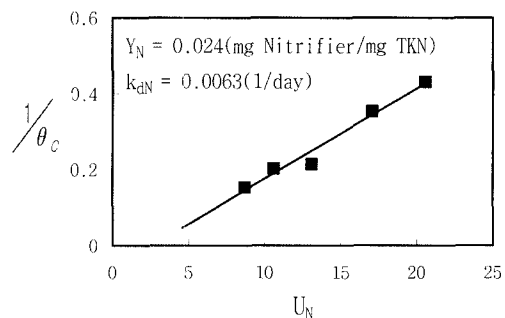
Table 1의 자료를 사용해서  $1/S_c$ 에 대한  $1/U$ 를 표시한 것이 Fig. 4이며 기울기와 절편으로부터  $K_s = 49.16 [\text{mg COD}/\text{L}]$ ,  $k = 2.045 [1/\text{day}]$ 을 구했다.

혐기조건에서 인의 방출은  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 영향을 받는다고 하였으므로 호기조에서 질산화 정도를 살펴보기 위해 질산화 반응에 대한 동역학 상수들을 산정하였다. 무산소조나 혐기조에서는 미생물에 의한  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 순 제거는 없고, 호기조에서 질산화에 의해 제거되므로 시스템 전체에 대한 물질수지식을 고려할 수 있어  $\theta_c$ 를 적용할 수 있다.

활성슬러지 농도와 질산화균의 농도의 비를  $\alpha$ 라고 할 때, 順藤(1976)에 의하면  $\alpha$ 값은 0.00397이라고 하였으며, 稿木(1974)은 0.0035라고 하였다. 이 비율은 서로 비슷하므로 본 연구에서는 이 값들의 평균값을  $\alpha$ 값으로 인용하였다. 따라서  $\alpha = 0.0037$ 을 식 (13)에 대입하여 질산화 반응에 대한 동역학 해석을 실시하였다.

Table 1의 값에 의해 식 (13)의  $U_N$ 과  $1/\theta_c$ 의 관계를 Fig. 5에 나타냈고 그 직선의 기울기와 절편으로부터  $Y_N = 0.024 (\text{mg Nitrifier}/\text{mg TKN})$ ,  $k_{dN} = 0.0063(1/\text{day})$ 을 구했으며, 식 (11)에 의해  $1/N_{Kc}$ 에 대한  $1/U_N$ 을 나타낸 것이 Fig. 6이며 기울기와 절편으로부터  $K_{SN} = 3.21(\text{mgTKN}/\text{L})$ ,  $k_N = 31.4(1/\text{day})$ 를 얻었다.

상기와 같은 방법들에 의해 결정된 동역학 상수들을 Table 2에 정리하였다.



**Fig. 5.** Determination of  $Y_N$  and  $k_{dN}$  for nitrification of synthetic wastewater.

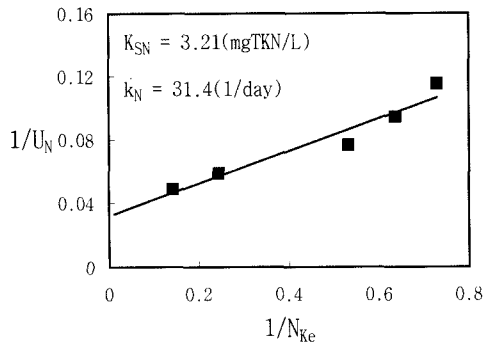


Fig. 6. Determination of  $K_{SN}$  and  $k_N$  for nitrification of synthetic wastewater.

Table 2. Biological kinetic coefficients for synthetic wastewater

Substrate Constant	Unit	Value
Y	mg-VSS/mg·COD	0.563
$k_d$	1/day	0.054
$K_s$	mg COD/L	49.16
k	1/day	2.045
$Y_N$	mg Nitrif./mg TKN	0.024
$k_{dN}$	1/day	0.0063
$K_{SN}$	mg TKN/L	3.21
$k_N$	1/day	31.4

3.2. 동역학적 고찰

유기물 산화와 질산화 반응에 대한 동역학식과 실험적으로 구한 Table 2의 동역학 상수들을 이용하고, 활성오니 운전 조건을 Table 3과 같이 임의로 설정해서 동역학 해석을 수행하였다.

Table 3. Assumed operation condition

Q	43.2 L/day
$V_T$	15.28 L
$\theta$	0.354 day
$S_o$	550 mgCOD/L
$N_{K0}$	60 mgTKN/L
$X_e$	0 mgMLSS/L

유기물 산화 반응에 대한 식 (3), (4)와 질산화반응에 대

한 식 (10), (12)에 의해 Table 4와 같은 동역학적 예측 모델식이 유도되었다.

유출수의 Total-N 농도, ( $N_{Te}$ )와  $\theta_c$ 의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 2에서 Total-N의 물질수지식은 식 (19)와 같다.

$$QN_{T0} = (Q-Q_w) \cdot N_{Te} + W_N \tag{19}$$

$W_N$  : 1일 당 잉여오니로서 시스템에서 폐기된 질소량 (mgN/day)

미생물의 경험분자식을  $C_5H_7O_2N$ 이라고 하면 미생물의 질소 함유율은  $14/113 = 0.124$ 이다. 따라서  $W_N$ 는 식 (20)과 같다.

$$W_N = 0.124 \cdot P_s + Q_w \cdot N_{Te} \tag{20}$$

식 (20)을 식 (19)에 대입해서 정리하면 식 (21)가 된다.

$$Q \cdot N_{T0} = Q \cdot N_{Te} + 0.124 \cdot P_s \tag{21}$$

$$\therefore N_{Te} = N_{T0} - \frac{0.124}{Q} \cdot P_s \tag{22}$$

식 (22)에 식 (16)을 대입하면

$$N_{Te} = N_{T0} - \frac{0.124}{Q} \cdot \frac{V \cdot X}{\theta_c} \tag{23}$$

유입수중에는  $NO_2-N$ ,  $NO_3-N$ 이 없다고 가정하면, 식 (23)은 식 (24)와 같다.

$$N_{Te} = N_{K0} - \frac{0.124}{Q} \cdot \frac{V \cdot X}{\theta_c} \tag{24}$$

질산화균 농도와  $\theta_c$ 와의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

호기조에서 탈질 반응은 없으므로 질산화균에 의한 TKN 제거속도는  $NO_3-N$  생성속도,  $\left\{ \frac{dN_O}{dt} \right\}_P$ 와 같다. 따라서

Table 4. Predicted model formulae using kinetic approach

Effluent COD concentration (mg/L)	$S_e = \frac{K_s \cdot (1 + k_d \cdot \theta_c)}{\theta_c \cdot (Y \cdot k - k_d)}$	(14)
Activated sludge concentration (mg/L)	$X = \frac{Y \cdot (S_o - S_e) \cdot \theta_c}{1 + k_d \cdot \theta_c} \cdot \frac{\theta_c}{\theta}$	(15)
Sludge production rate (gSS/day)	$P_s = \frac{V \cdot Y \cdot (S_o - S_e)}{(1 + k_d \cdot \theta_c) \cdot \theta} = \frac{V \cdot X}{\theta_c} = Q_w \cdot X$	(16)
Effluent TKN concentration (mg/L)	$N_{Ke} = \frac{K_{SN} \cdot (1 + k_{dN} \cdot \theta_c)}{\theta_c \cdot (Y_N \cdot k_N - k_{dN}) - 1}$	(17)
Nitrifier concentration (mg/L)	$X_N = \frac{Y_N \cdot \left( \frac{dN_k}{dt} \right)_r \cdot \theta_c}{1 + k_{dN} \cdot \theta_c}$	(18)

$\left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r = \left\{ \frac{dN_O}{dt} \right\}_p$ 이며, 유입수 중에는  $NO_3-N$ 이 존재 안 하므로 질산화균에 의한  $NO_3-N$ 생성 속도는 식 (25)와 같다.

$$\left\{ \frac{dN_O}{dt} \right\}_p = \frac{Q}{V} \cdot (0 - N_{O_c}) = \frac{Q}{V} N_{O_c} \quad (25)$$

또한  $N_{Tc} = N_{Ke} + N_{O_c}$ 이므로 식 (13)은 아래식과 같이 변형된다.

$$\left\{ \frac{dN_K}{dt} \right\}_r = \frac{Q \cdot (N_{Tc} - N_{Ke})}{V} \quad (26)$$

따라서 식 (26)을 식 (18)에 대입하면 식 (27)과 같이 된다.

$$X_N = \frac{Y_N \cdot (N_{Tc} - N_{Ke}) \cdot \theta_c}{1 + k_{dN} \cdot \theta_c} \quad (27)$$

식 (27)에 식 (24)와 식 (17)을 대입하면  $X_N$ 과  $\theta_c$ 의 관계를 표시할 수 있다.

### 3.2.1. 평균미생물 체류시간 ( $\theta_c$ , 혹은 SRT)와 처리수질 ( $S_e$ , $N_{Ke}$ )의 변동

평균미생물 체류시간 ( $\theta_c$ )와 처리수질 ( $S_e$ ,  $N_{Ke}$ )의 변동을 식 (14)와 (17)에 의해 계산한 후 그 관계를 도시하면 Fig. 7 과 같다. SRT 증가에 따라  $S_e$ ,  $N_{Ke}$ 를 감소하고 유기물산화균과 질산화균이 시스템에서 유출되는 최소 SRT는 유기물산화균은 0.991, 질산화균은 1.51이었다.

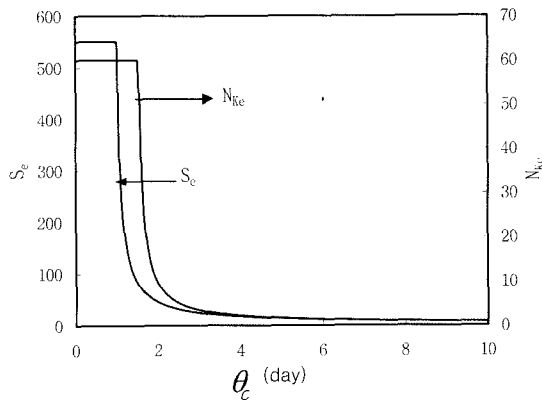


Fig. 7. Relationship between SRT and effluent concentration.

### 3.2.2. SRT와 활성슬러지 농도(X) 및 잉여슬러지 생성속도 ( $P_s$ )와의 관계

Table 2의 동역학상수와 Table 3의 임의 조건을 식 (15)와 (16)에 대입해서 각각의 SRT에 대한 X와  $P_s$ 를 계산하고 이것을 도시하면 Fig. 8과 같다.

활성슬러지농도(X)는 SRT 증가와 함께 증대되지만,  $P_s$ 는 SRT  $\approx$  2~3일에서 최대를 나타내었고, SRT 증가에 따라 감소하였다.

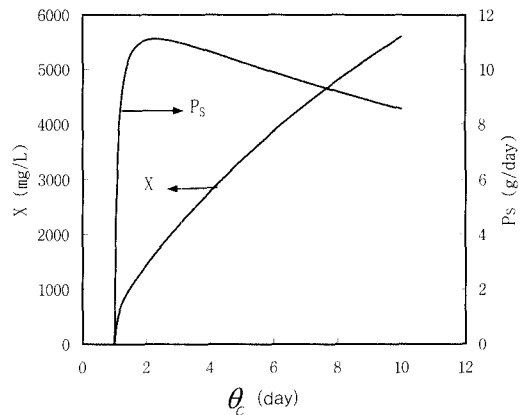


Fig. 8. Plot of SRT vs. bio-mass (X), sludge production rate ( $P_s$ ).

### 3.2.3. 유입 탄소, 질소가 활성오니와 유출수로 분배 거동 되는데 미치는 SRT의 영향

SRT의 변동에 따라 유입폐수 중의 탄소, 질소가 어떤 형태로 구분, 분배 되는지를 검토하였다.

우선 유입탄소의 분배를 살펴보면, 일반적인 유기화합물은  $COD_{cr}$ 법에 의해 약 100% 정도 산화되므로  $COD_{cr}$ 과 TOC 사이에는 아래식이 성립한다.

$$COD_{cr} = 2.67 \cdot (TOC) \quad (28)$$

여기서 활성슬러지의 경험분자식이  $C_5H_7O_2N$ 이라면 1일 당 폐기슬러지로서 폐기되는 TOC량( $W_{TOC}$ )는 아래식으로 환산될 수 있다.

$$W_{TOC} = \frac{60}{113} P_s + \frac{1}{2.67} Q_w \cdot S_e \quad (29)$$

또, 활성슬러지의 호흡에 의해  $CO_2$ 로서 系外로 배출되는 탄소량( $R_{TOC}$ )는 다음과 같다.

$$R_{TOC} = \frac{1}{2.67} [Q \cdot S_o - (Q - Q_w) \cdot S_e] - W_{TOC} \quad (30)$$

식 (29)를 식 (30)에 대입하면

$$R_{TOC} = \frac{Q}{2.67} \cdot (S_o - S_e) - \frac{60}{113} \cdot P_s \quad (31)$$

유출수내의 탄소량( $E_{TOC}$ )는 다음과 같다.

$$E_{TOC} = \frac{1}{2.67} (Q - Q_w) \cdot S_e \quad (32)$$

이상에서, 식 (29)의  $W_{TOC}$ , 식 (31)의  $R_{TOC}$ , 식 (32)의  $E_{TOC}$ 에 식 (14)와 식 (16)을 대입하여 각각의 SRT에 대한 값을 계산하고, 그 분배율을 도시하면 Fig. 9와 같다. 이 그림에 의하면 SRT 5~10일에서 유입 TOC의 약 36~48%

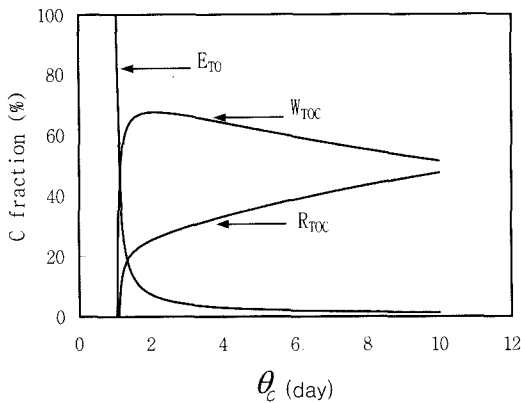


Fig. 9. Plot of SRT vs. Carbon fraction (%).

가 CO<sub>2</sub>로, 51~61%가 잉여오니로 시스템에서 제거되는 것을 알 수 있다.

두번째로, 유입질소의 분배를 살펴보면, 잉여오니 중의 질소량(W<sub>N</sub>)은 식 (22)와 식 (20)에 대입하여 결정한다.

$$W_N = 0.124 \cdot P_S + Q_W \cdot (N_{T0} - \frac{0.124}{Q} \cdot P_S) \quad (33)$$

유출되는 TKN량 (E<sub>Kc</sub>)는 아래식과 같다.

$$E_{Kc} = (Q - Q_W) \cdot N_{Kc} \quad (34)$$

유출수내의 NO<sub>3</sub>-N량 (E<sub>Oe</sub>)는 E<sub>Oe</sub> = (Q - Q<sub>W</sub>) · N<sub>Oe</sub>이며, N<sub>Te</sub> = N<sub>Kc</sub> + N<sub>Oe</sub> 이므로 E<sub>Oe</sub>는 다음식과 같이 변형된다.

$$E_{Oe} = (Q - Q_W) \cdot (N_{Te} - N_{Kc}) \quad (35)$$

이상에서 식 (33)의 W<sub>N</sub>, 식 (34)의 E<sub>Kc</sub>, 식 (35)의 E<sub>Oe</sub>에 식 (16), 식 (17), 식 (22)를 대입하여 각각의 SRT에 대한 각각의 값을 계산하고 그 분배율을 도시하면 Fig. 10과 같다.

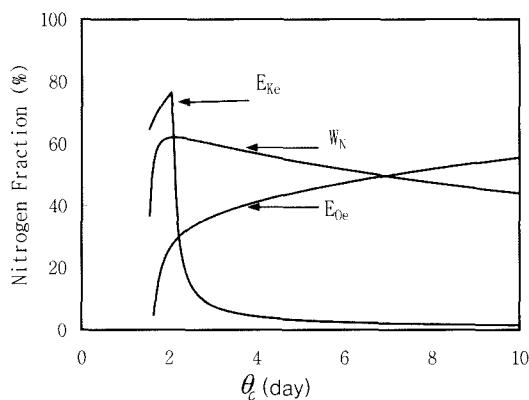


Fig. 10. Plot of SRT vs. Nitrogen fraction (%).

이 그림에 의하면 SRT가 5~10일에서 유입질소의 약 43~52%가 잉여슬러지로 폐기되고, 약 45~55%가 질산화균에 의해 NO<sub>3</sub>-N으로 전환되어 시스템에서 제거된다.

### 3.2.4. COD<sub>α</sub>과 Total-N의 제거율에 미치는 SRT의 영향

COD제거율은 (S<sub>0</sub> - S<sub>e</sub>)/S<sub>0</sub> × 100, Total-N 제거율은 (N<sub>T0</sub> - N<sub>Te</sub>)/N<sub>T0</sub> × 100이므로, 이식들에 식 (14)와 식 (22)를 대입하여, 각각의 SRT에 대한 제거율을 계산하고 도시하면 Fig. 11과 같다.

COD 제거율은 SRT > 2일에서 90% 이상이지만, Total-N의 제거율은 SRT = 2.3일에서 최대 53%이며 SRT 증가에 따라 제거율은 감소하였다.

이것은 탈질반응이 일어나지 않았다면 Total-N은 미생물 증식에 의한 질소 섭취로 제거되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7과 같이 N<sub>Kc</sub>는 SRT 증대에 따라 큰 폭으로 감소하지만 질산화 반응에 의해 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도 증가로 Total-N의 제거율은 높지 않았다.

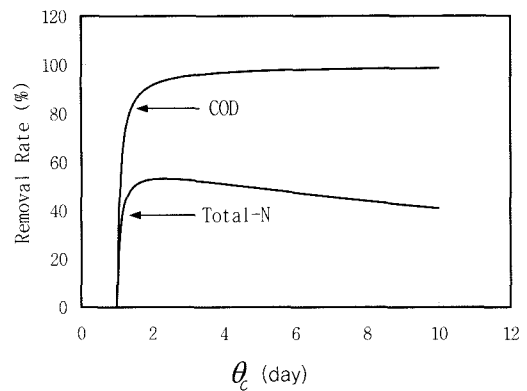


Fig. 11. Plot of SRT vs. removal rate (COD and Total-N).

### 3.2.5. 질산화율(N<sub>Oe</sub>/N<sub>T0</sub>), 유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도와 Total-N비(N<sub>Oe</sub>/N<sub>Te</sub>)에 미치는 SRT의 영향

유출수의 NO<sub>3</sub>-N 농도, (N<sub>Oe</sub>)는 N<sub>Te</sub> - N<sub>Kc</sub>로 표시되므로, (N<sub>Oe</sub>/N<sub>T0</sub>)와 (N<sub>Oe</sub>/N<sub>Te</sub>)는 식 (36), (37)과 같다.

$$\frac{N_{Oe}}{N_{T0}} = \frac{N_{Te} - N_{Kc}}{N_{T0}} \quad (36)$$

$$\frac{N_{Oe}}{N_{Te}} = \frac{N_{Te} - N_{Kc}}{N_{Te}} \quad (37)$$

위 식들에 식 (17), 식 (22)를 대입하여 각각의 SRT에 대한 (N<sub>Oe</sub>/N<sub>T0</sub>), (N<sub>Oe</sub>/N<sub>Te</sub>)를 계산하고 도시하면 Fig. 12와 같다. 그림에서 SRT > 5일이면 질산화율이 48% 이상이며, SRT > 3.5일이면 유출수 Total-N의 90% 이상이 NO<sub>3</sub>-N 형태로 전환되었다.

### 3.2.6. 질산화균 농도 (X<sub>n</sub>)에 미치는 SRT의 영향

식 (27)에 Table 2의 동역학 상수와, 식 (17)의 N<sub>Kc</sub>, 식 (24)의 N<sub>Te</sub>를 대입해서 각각의 SRT에 대한 질산화균 농도 (X<sub>N</sub>)을 계산한다. 동시에 식 (15)에 의해 활성슬러지 농도 (X)도 계산하여 X<sub>N</sub>/X와 SRT와의 관계를 도시하면 Fig. 13과 같다.

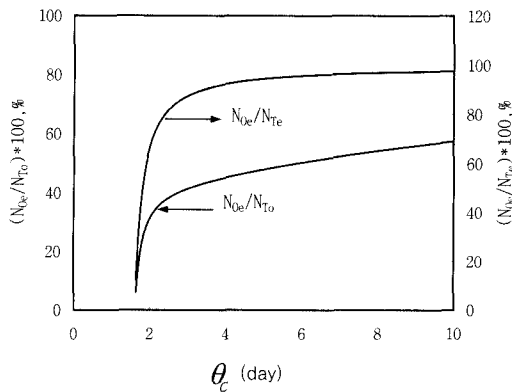


Fig. 12. Plot of SRT vs.  $(N_{0e}/N_{T0})$ ,  $(N_{0e}/N_{Te})$ .

그림으로부터 질산화균이 SRT > 1.65일에서 활성슬러지 중에 존재하는 것을 알 수 있고, SRT = 5일에서 7.2 mg/L, SRT = 10일에서 14.3 mg/L의 질산화균이 활성슬러지 중에 포함되어 있다. 활성슬러지 중의 질산화균의 비율,  $(X_N/X, \%)$ 는 SRT = 3일에서 그 증가율이 완만하고 SRT = 5일에서 0.22%, SRT = 10일에서 0.256%이었다.

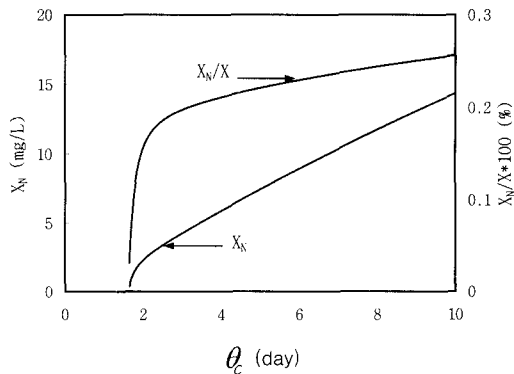


Fig. 13. Plot of SRT vs.  $X_N$ ,  $(X_N/X)$ .

#### 4. 결론

1. 유기물 산화 반응과 질산화반응의 동역학 상수는  $Y = 0.563$ ,  $k_d = 0.054 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ ,  $K_s = 49.16 \text{ (mg/L)}$ ,  $k = 2.045 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ ,  $Y_N = 0.024$ ,  $k_{dN} = 0.0063 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ ,  $K_{sN} = 3.21 \text{ (mg/L)}$ ,  $k_N = 31.4 \text{ (day}^{-1}\text{)}$ 로 나타났다.

2. 결정된 동역학 상수를 이용하고 임의 설정된 운전조건에 의해 SRT 변화에 따른 동역학적 거동을 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 활성슬러지농도( $X$ )는 SRT 증가와 함께 증대되지만, 잉여슬러지생성속도( $P_s$ )는 SRT = 약 2.3일에서 최대를 보인 후 감소하였고, 시스템에서 미생물이 유출되는 SRT는 유기물 산화균이 0.99일, 질산화균이 1.5일이었다.

- 2) SRT의 변동에 따른 탄소, 질소의 분배 거동에 대한 동역학해석을 수행한 결과는 SRT = 5 ~ 10일에서 유입TOC의 36 ~ 48%가  $\text{CO}_2$ 로, 51 ~ 61%가 잉여슬러지로 시스템에서 배제되었다. 유입TKN은 43 ~ 52%가 잉여슬러지로 시스템에서 배제되고 45 ~ 55%가 질산화균의 반응으로  $\text{NO}_3\text{-N}$ 으로 전환되었다.
- 3) SRT 증가에 따른 질산화율과 총질소의 변화율에 대한 결과는 SRT를 5일 이상으로 하면 48% 이상의 질산화가 이루어지고 유출총질소 농도는 SRT를 3.5일 이상에서 90% 이상이  $\text{NO}_3\text{-N}$  형태로 전환되었다.
- 4) 활성슬러지 중의 질산화균의 농도( $X_N$ )은 SRT의 증가에 따라 증가하고, SRT = 5일에서 7.2 mg/L SRT = 10일에서 14.3 mg/L이었다. 활성슬러지 중의 질산화균이 점유하는 비율은 SRT = 5일에서 0.22% SRT = 10일에서 0.256%로 예측되었다.

#### 참고문헌

국가환경기술정보센터, 환경기술정보, 환경관리공단, Sep., pp. 10-17 (2000).

橋本, 活性汚泥 微生物の有機物 除去と消化, 脱窒の反應動力學, 第7回 水處理 研究會講演テキスト, 大阪大學 生産技術 研究會, pp. 33 (1974).

順藤, 廢水處理の生物學, 産業用水調査會, pp. 365 (1976).

田中, 微生物 による 脱窒素脱リン法, 環境管理, **30**(6), pp. 48-60 (1994).

APHA., AWWA. and WPCF., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Ed. (1992).

Barnard, L. J., Biological Nutrient Removal without the Addition of Chemicals, *Water Research*, **9**, pp. 485-490 (1975).

Benfield, L. D. and Randall, C. W., *Biological Process Design for Wastewater Treatment*, Cliffs, N. J., (ed.), Prentice-Hall, Inc., Englewood (1980).

Huang, S. C. and Hopson, E. N., Nitrification Rate in Biological Processes, *Jour. Environmental Engineering Division, A.S.C.E.*, **100**(EE2), pp. 409-422 (1974).

Lawrence, A. W., and McCarty, P. L., Unified Basis for Biological Treatment Design and Operation, *Jour. A.S.C.E., Sanitary Engineering Division*, **96**(3), pp. 757-778 (1970).

Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, McGraw-Hill Inc. (1979).

Reeves, G. T., Nitrogen Removal ; A Literature Review, *Jour. W.P.C.F.*, **44**(10), pp. 1895-1908 (1972).

U.S. EPA, *Process Design Manual for Nitrogen Control*, EPA Technology Transfer (1975).

Wilson, R. W., Design and Cost Comparison of Biological Nitrogen Removal Processes, *Jour. W.P.C.F.*, **53**, pp. 1283-1295 (1981).