

무산소-산소 공정에서 양론적 질소제거 연구

이 병 대[†]

위덕대학교 보건학부

(2005년 3월 28일 접수, 2005년 11월 26일 채택)

Stoichiometric Study for Nitrogen Removal in Anoxic-oxic Process

Byung-Dae Lee[†]

Division of Health, Uiduk University

ABSTRACT : Optimal sludge recycling ratio for maximum total nitrogen (TN) removal efficiency was calculated stoichiometrically using nitrification and denitrification reaction with given influent water qualities in anoxic-oxic process which was one of the popular nitrogen removal system. The water quality items for stoichiometric calculation were ammonia, nitrite, nitrate, alkalinity, COD, and dissolved oxygen which could affect nitrification and denitrification. Optimal sludge recycling ratio for maximum TN removal efficiency was expressed by those five influent water qualities. TN concentration calculated stoichiometrically had kept good relationship with reported TN concentration in each tank and final effluent. In addition, it was possible to expect the TN concentration in final effluent by stoichiometric calculation within ± 5.0 mg/L.

Key Words : Nitrification, Denitrification, Stoichiometric Calculation, Maximum Nitrogen Removal, Optimal Sludge Recycling Ratio

요약 : 대표적인 질소제거 시스템인 무산소-산소공정을 대상으로 주어진 유입수 수질 조건에서 최대의 질소제거를 위한 최적의 슬러지 반송비를 질화/탈질 반응식을 이용하여 양론적으로 계산하였다. 양론적 계산에 고려된 수질 항목은 질화/탈질에 영향을 미치는 암모니아성 질소, 질산성질소, 알칼리도, COD, 용존산소로 설정하였다. 최대의 질소제거를 위한 최적의 슬러지 반송비를 앞의 5가지 유입수 항목으로 나타내었다. 양론적 계산에 의한 각 공정의 유출수와 최종 유출수 중의 TN농도가 실제 보고된 하·폐수 처리장의 TN 농도와 잘 일치 하였다. 또한 양론적 계산에 의해 실제 처리장 최종 유출수 중의 TN농도를 ± 5.0 mg/L 내에서 예측 가능하였다.

주제어 : 질화, 탈질, 양론적 계산, 최대 질소제거, 최적 슬러지 반송비

1. 서론

질소제거를 위한 대표적인 처리공정으로 무산소-산소 공정 또는 이를 조합한 공정이 개발되고 있다. 무산소-산소 공정은 1977년 개발된 이래 지속적으로 수정 되었고 실제 하·폐수처리장에 도입 되고 있다.¹⁾ 이러한 무산소-산소공정의 장점으로 시스템구성이 간단하고 기존의 하·폐수처리장에서 대규모 공정 변형 없이 도입이 가능하다는 것이다. 무산소-산소 공정에서의 질소제거 거동은 잘 알려져 있고,^{2,3)} 중요한 수질변수로 용존산소, 암모니아성 질소, 질산성질소, 알칼리도, COD 등을 들 수 있다. 이러한 수질항목은 실제 처리장에서 측정하고 있는 수질데이터이다. 최근에 무산소-산소 공정에서 질소제거를 위한 최적의 반송비와 유입수 조건을 도출 할 필요성이 대두되고 있다.⁴⁾ Fujii⁵⁾에 의해 하·폐수처리장에서 양론적인 질소제거를 해석하려는 시도가 있었고 박⁶⁾에 의해 step-feed process에서 최적 유입수 분배 조건을 양

론적으로 검토하였다. 그러나 이러한 기존의 양론적 연구에서는 최대의 TN제거율을 얻기 위한 최적의 슬러지 반송비 그리고 이러한 양론적 결과를 실제 다양한 하·폐수처리장의 결과와 비교하는 등의 검증을 실시하지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 무산소-산소 공정에서 암모니아성 질소, 질산성 질소, 알칼리도, COD, 용존산소를 유입수 수질변수로 고려하여 주어진 유입수 조건에서 최대의 질소제거를 위한 최적의 반송비를 양론적으로 도출하고 그 결과를 여러 문헌으로부터 발췌한 실제 무산소-산소 공정의 운전결과와 비교하여 본 양론적 해석 결과의 검증을 실시하였다.

2. 양론적 해석 방법

2.1. 양론적 질소제거 해석을 위한 가정 및 계산 방법

Fig. 1에 전형적인 무산소-산소 공정을 나타내었고 각 위치에서의 변수도 나타내었다. 또한 본 연구에서는 양론적 해석의 단순화를 위해 아래와 같은 가정을 도입하였다.

1. 알칼리도는 미생물에 의해 섭취되지도 생산되지도 않는다.

[†] Corresponding author
E-mail: bdlee@uu.ac.kr
Tel: 054-760-1702

Fax: 054-760-1609

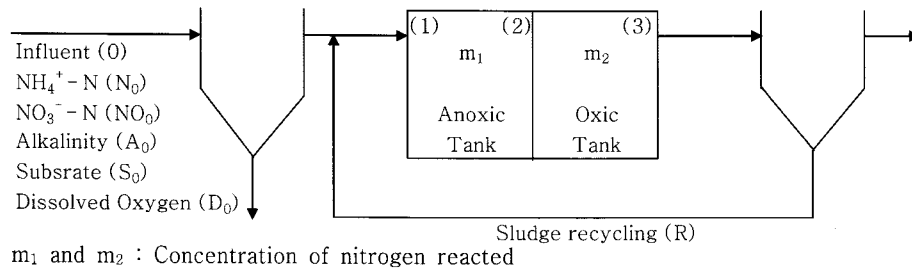


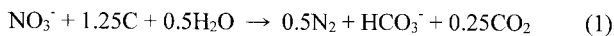
Fig. 1. System configuration of anoxic-oxic process.

2. 각 반응조에서의 고형물 체류시간은 반응이 충분히 일어날 정도로 길다.
3. 암모니아성질소는 무산소조를 반응 없이 통과하고, 질산성질소는 산소조를 반응 없이 통과한다.
4. 유입수 중의 유기질소는 무산소조 유입 전에 암모니아성질소와 질산성질소 형태로 전환되고 총질소는 암모니아성질소와 질산성질소의 합으로 계산한다.
5. 질산성질소는 오직 암모니아성질소로 부터만 생성 된다.
6. 유기물은 산소조에서 호기성 박테리아에 의해 완전히 소비된다.

한편 모든 양론계산은 Mathsoft사의 Mathcad ver. 10을 사용하였다.

2.2. 유입수 수질을 단순화 한 무차원 α, β변수 도입

무산소반응조와 산소반응조에서의 탈질 및 질산화 과정의 양론식은 다음과 같다.



위 식 (1)에서 1 mol의 질산성질소가 1.25 mol의 탄소와 반응하는 것을 알 수 있다. 여기서 탄소는 COD(COD_C)으로 나타내고 기질을 의미한다. 그리고 2.86 mg의 탄소가 완전한 탈질을 위해 필요하고 1 mg의 질산성질소가 탈질되면 3.57 mg의 알칼리도가 발생한다. 그리고 7.14 mg의 알칼리도가 1 mg의 암모니아성질소를 질산화 시키는데 필요하다.

여기서 이러한 유입수변수를 1 또는 2로 단순화 하기위해 유입수의 암모니아성 질소농도를 기준으로 하는 다음 두 무차원 변수(a, b)를 도입한다.

$$a = 0.28 \frac{\text{Influent alkalinity}(\text{mg CaCO}_3/\text{l})}{\text{Influent NH}_4^+ - \text{N}(\text{mg N}/\text{l})}$$

$$b = 0.35 \frac{\text{Influent substrate}(\text{mg COD}/\text{l})}{\text{Influent NH}_4^+ - \text{N}(\text{mg N}/\text{l})}$$

위 식이 가지는 의미는 질산화반응이 완전히 일어나기 위

해서는 $a \geq 2(7.14 \times 0.28)$ 이고, 탈질반응이 완전히 일어나기 위해서는 $b \geq 1(2.86 \times 0.35)$ 이어야 한다는 것을 나타내고 있다. 그러나 위의 a와 b는 미생물에 의한 질소 섭취량을 고려하지 않아서 몇 가지 상수(y, u 그리고 Γ)를 a, b에 첨가하여 미생물에 의한 질소 섭취량을 고려한 무차원 α, β변수를 도입하였다.

$$\alpha = \frac{0.28 \times A + O - y \times u \times B/\Gamma}{N + O - y \times u \times B/\Gamma}$$

$$\beta = \frac{0.35 \times (1 - y) \times B/\Gamma}{N + O - y \times u \times B/\Gamma}$$

$$\text{TN}' = \text{TN} - y \times u \times B/\Gamma$$

여기서, N = NH₄⁺-N(mg/L), A = alkalinity(mgCaCO₃/L), O = Organic N(mg/L), B = BOD₅(mg/L), u = N/COD ratio in biomass(= 0.6 gN/gCOD⁷), Γ : BOD/COD ratio, α = modified a value, β = modified b value, y = biomass yield coefficient(= 0.5 gBiomass/gCOD⁷), TN' = modified influent total nitrogen

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응조 각 위치에서의 수질항목별 농도

Fig. 1의 괄호 안 숫자는 각 수질 측정 지점을 나타내고 있다. 예를 들면 (3)은 산소조를 통과 직전의 위치를 나타내고 양론적 계산의 편의를 위해 방류수 수질로 간주하여 계산하였다. Table 1에 각 위치에서는 수질 기호를 정리 하였다.

위의 Table 1의 각 위치의 수질을 유입수질(α, β), R, m₁, m₂로 나타내면 Table 2처럼 나타낼 수 있다.

Table 1. Symbols used for items at four positions

Items	Influent (0)	Mixture of influent and recycling (1)	After anoxic tank (2)	After oxic tank (3)
DO	D ₀ = 0	D ₁	D ₂	D ₃ = D
Substrate	S ₀ = β	S ₁	S ₂	S ₃
NH ₄ ⁺ -N	N ₀ = 1	N ₁	N ₂	N ₃
NO ₃ ⁻ -N	NO ₀ = 0	NO ₁	NO ₂	NO ₃
Alkalinity	A ₀ = α	A ₁	A ₂	A ₃

Table 2. Expression of items in each position by α , β , R , m_1 , and m_2

Items	Influent (0)	Mixture of influent and recycling (1)	After anoxic tank (2)	After oxic tank (3)
DO	$D_0 = 0$	$D_1 = R \cdot D / (1+R)$	$D_2 = 0$	$D_3 = D$
Substrate	$S_0 = \beta$	$S_1 = \beta / (1+R)$	$S_2 = [(\beta - D \cdot R) / (1+R)] - m_1$	$S_3 = 0$
$NH_4^+ - N$	$N_0 = 1$	$N_1 = 1 - R \cdot m_2$	$N_2 = N_1$	$N_3 = 1 - (R+1) \cdot m_2$
$NO_3^- - N$	$NO_0 = 0$	$NO_1 = (m_2 - m_1) \cdot R$	$NO_2 = R \cdot m_2 - (R+1) \cdot m_1$	$NO_3 = (R+1) \cdot (m_2 - m_1)$
Alkalinity	$A_0 = \alpha$	$A_1 = \alpha + (m_1 - 2m_2) \cdot R$	$A_2 = \alpha + (1+R) \cdot m_1 - 2m_2 \cdot R$	$A_3 = \alpha + (1+R) \cdot m_1 - 2(R+1)m_2$

3.2. 무산소조 및 산소조에서 탈질 및 질화 반응성 고려

일반적으로 탈질이 잘 일어나기 위해서는 기질이 충분히 공급되어야 하고, 질화가 잘 일어나기 위해서는 충분한 알칼리도가 존재하여야 한다. 그러므로 무산소-산소 공정에서 탈질 및 질화 반응이 잘 진행되거나 진행되지 않는 경우를 예상할 수 있다. 이러한 경우의 수(2²)를 고려하면 Table 3처럼 나타낼 수 있다.

이러한 각각의 경우의 수에 대한 최종 유출수 중의 각 수질 항목을 Table 4에 나타내었다. 예를 들어 완전한 탈질과 질산화가 진행되는 Table 3의 case 1과 Table 2를 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N_3 = 0 \rightarrow 1 - (R+1) \cdot m_2 = 0 \tag{3}$$

$$NO_2 = 0 \rightarrow R \cdot m_2 - (R+1) \cdot m_1 = 0 \tag{4}$$

위 식 (3)과 (4)로부터 구한 m_1 과 m_2 를 Table 2에 대입하면 Table 4가 얻어 진다.

3.3. 유입수질 및 순환비에 따른 zone분석

유입수질이 Table 3에서 서술한 것처럼 4가지 경우에 있어서 탈질과 질화에 중요한 유입수질인 α 와 β 를 순환비(R)와의 상관관계를 Table 5에 나타내었다.

예를 들어 완전한 탈질과 질산화가 진행되는 Table 3의 case 1과 Table 2를 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

Table 3. Case analysis

Case	Anoxic tank	Oxic tank	Influent conditions
1	DN	N	Substrate and alkalinity are enough
2	DN	IN	Substrate enough and alkalinity are not enough
3	IDN	N	Substrate not enough and alkalinity are enough
4	IDN	IN	Substrate and alkalinity are not enough

DN: Complete denitrification; N: Complete nitrification; IDN: Incomplete denitrification; IN: Incomplete nitrification

Table 4. Summary of all cases in anoxic-oxic process

	Items	Case 1	Case 2	Case 3*	Case 4**
Nitrogen reacted (mg/L)	m_1	$R / (1+R)^2$	$(\alpha \cdot R) / [(1+R) \cdot (R+2)]$	$(\beta - D \cdot R) / (1+R)$	$(\beta - D \cdot R) / (1+R)$
	m_2	$1 / (1+R)$	$\alpha / (2+R)$	$1 / (1+R)$	$(\alpha + \beta - D \cdot R) / [2(1+R)]$
Process effluent	DO (mgO ₂ /L)	D	D	D	D
	Substrate (mgCOD/L)	0	0	0	0
	$NH_4^+ - N$ (mgN/L)	0	$1 - [\alpha \cdot (R+1) / (R+2)]$	0	$(2+D \cdot R - \alpha - \beta) / 2$
	$NO_3^- - N$ (mgN/L)	$1 / (1+R)$	$\alpha / (2+R)$	$1 - \beta + D \cdot R$	$(\alpha + D \cdot R - \beta) / 2$
	Alkalinity (mgCaCO ₃ /L)	$\alpha - [(2+R) / (1+R)]$	0	$\alpha + \beta - D \cdot R - 2$	0
	TN (mgN/L)	$1 / (1+R)$	$1 - [(\alpha \cdot R) / (R+2)]$	$1 - \beta + D \cdot R$	$1 + D \cdot R - \beta$
Removal efficiency	TN (%)	$(100R) / (1+R)$	$(100\alpha \cdot R) / (R+2)$	$100(\beta - D \cdot R)$	$100(\beta - D \cdot R)$

* β should be greater than $D \cdot R$ otherwise TN removal efficiency become zero.

** β and $\alpha + \beta$ should be greater than $D \cdot R$ otherwise TN removal efficiency become zero.

$$A_3 > 0 \rightarrow \alpha + (R+1) \cdot m_1 - 2(R+1) \cdot m_2 > 0 \tag{5}$$

$$S_2 > 0 \rightarrow (\beta - D \cdot R) / (1+R) - m_1 > 0 \tag{6}$$

앞의 식 (3)과 (4)로부터 구한 m_1 과 m_2 를 식 (5)과 (6)에 대입하면 Table 5가 얻어 진다.

여기서 4가지 경우의 유입조건에 있어서 R값을 0에서 40까지 증가시킬 경우의 α 와 β 를 Fig. 2(a)와 같이 나타낼 수 있고 Fig. 2(b)와 같이 단순화 시킬 수 있다. 즉 R값을 0에서 40까지 증가시키면 세 영역(zone)이 발생하는 것을 알 수 있다. Zone 1의 경우 R값이 작을 경우에는 case 1에 해당하고 R값을 증가시키면 case 3에서 case 4로 옮겨 간다는 것을 알 수 있다. 그러므로 각 zone에서 일어날 수 있는 탈질 및 질화 반응 정도를 정리 하면 Table 6과 같이 나타낼 수 있다.

3.4. 유입수질 및 순환비에 따른 zone분석

Table 6으로부터 각 zone에서 변화하는 해당 case를 고려하면, zone 1의 R값이 $[(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta + \beta^2)^{0.5} + \beta - D - 1] /$

Table 5. Influent conditions in anoxic-oxic process

Influent	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Substrate	$\beta > R / (1+R) + D \cdot R$	$\beta > (\alpha \cdot R) / (2+R) + D \cdot R$	$\beta < R / (1+R) + D \cdot R$	$\beta < (\alpha \cdot R) / (2+R) + D \cdot R$
Alkalinity	$\alpha > (2+R) / (1+R)$	$\alpha < (2+R) / (1+R)$	$\alpha > 2 + D \cdot R - \beta$	$\alpha < 2 + D \cdot R - \beta$

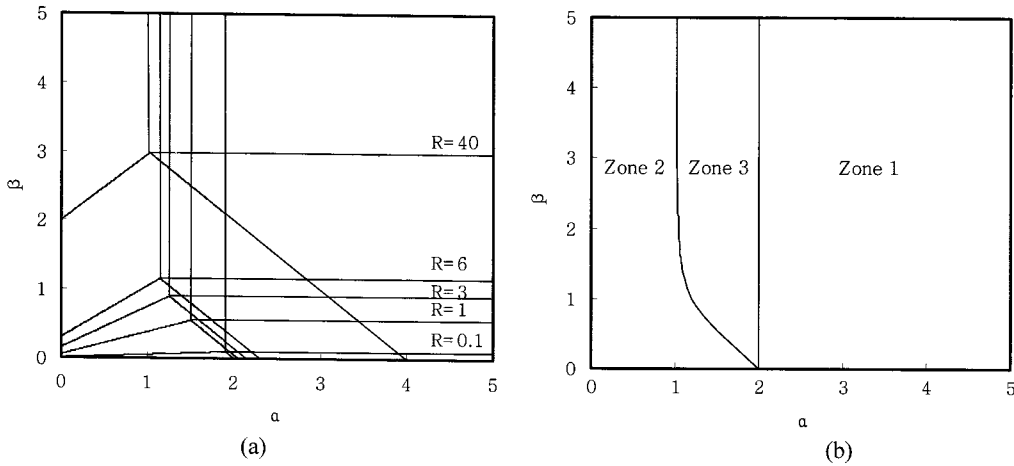


Fig. 1. System configuration of anoxic-oxic process.

2D가 될 때 까지 TN 제거율은 $100/(R+1)$ 식을 따르며 증가하고 최대 TN제거율은 $100[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/[D+\beta-1+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]$ 에 접근한다. 그러나 R값이 $[(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}+\beta-D-1]/2D$ 보다 큰 경우에는 TN제거율은 $100(\beta-D \cdot R)$ 식을 따라 감소한다. 그 이유로 무산소조에서의 용존 산소로 인한 탈질 저해 반응이 일어나기 때문이다. Zone 2에서 TN 제거율은 R값이 $[\beta-\alpha-2D+(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]/2$ 가 될 때 까지 $100\alpha \cdot R/(R+1)$ 식을 따르며 증가하고 최대 TN제거율은 $100[\alpha-\beta+2D-(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]/[\alpha-\beta-2D-(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]$ 에 접근한다. 그러나 TN제거율은 R값이 $[\beta-\alpha-2D+(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]/2$ 보다 큰 경우에는 무산소조에서 기질의 부족과 산소조에서 알칼리도 부족 때문에 $100(\beta-D \cdot R)$ 식을 따라 감소한다. Zone 3에서 TN 제거율은 R값이 $[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/2D$ 가 될 때 까지 $100\alpha \cdot R/(R+2)$ 와 $100R/(1+R)$ 식을 따르며 증가하고 최대 TN제거율은 $100[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/$

$[D+\beta-1+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]$ 에 접근한다. 그러나 TN 제거율은 R값이 $[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/2D$ 보다 큰 경우에는 무산소조에서 기질 부족 때문에 $100(\beta-D \cdot R)$ 식을 따라 감소한다. 이상의 각 zone에서 최대 TN제거율을 얻기 위한 최적의 R값을 정리 하면 Table 7과 같이 나타낼 수 있다.

위의 Table 7에서 각 zone에서의 최대 TN제거율을 얻기 위한 R 값과 그때의 TN제거율을 α 와 β 를 이용해서 나타내면 Fig. 3과 Fig. 4로 나타낼 수 있다.

예를 들어 어떤 하·폐수 처리장 유입수가 $\alpha=3, \beta=1$ (즉, zone 1에 해당)인 경우, Fig. 3으로부터 슬러지 반송량(R값)을 6(유입수의 6배)으로 하면 Fig. 4로부터 최대 TN제거율인 80%를 얻을 수 있다는 것을 나타내고 있다.

Table 6. Possible reaction and occurring cases in each zone

Zone	Denitrification	Nitrification	Occurring cases
1	DN→IDN→IDN	N→N→IN	case 1→case 3→case 4
2	DN→IDN	IN→IN	case 2→case 4
3	DN→DN→IDN	IN→N→IN	case 2→case 1→case 4

Table 7. Summary of minimum R value for maximum total nitrogen removal efficiency

Zone	Minimum R value for maximum total nitrogen removal efficiency	Maximum total nitrogen removal efficiency (%)
1	$[(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}+\beta-D-1]/2D$	$100[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/[D+\beta-1+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]$
2	$[\beta-\alpha-2D+(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]/2$	$100[\alpha-\beta+2D-(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]/[\alpha-\beta-2D-(\alpha^2-2\alpha \cdot \beta+4\alpha \cdot D+\beta^2+4D \cdot \beta+4D^2)^{0.5}]$
3	$[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/2D$	$100[\beta-1-D+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]/[D+\beta-1+(1+2D-2\beta+D^2+2D \cdot \beta+\beta^2)^{0.5}]$

3.5. 실제 처리장 수질자료를 이용한 양론적 계산 결과의 검증

지금까지의 양론적 계산 결과로부터 예측한 각 공정 및 최종 유출수 중의 TN농도를 검증 하기위해 TN 수질이 정리되어 있는 일본의 하·폐수 처리장 수질자료를 이용하였다. 검증 결과를 Table 8에 나타내었다.

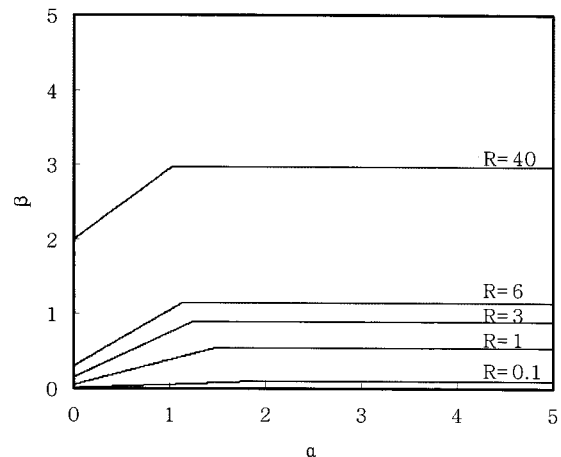


Fig. 3. Minimum R values required for maximum TN removal efficiency.

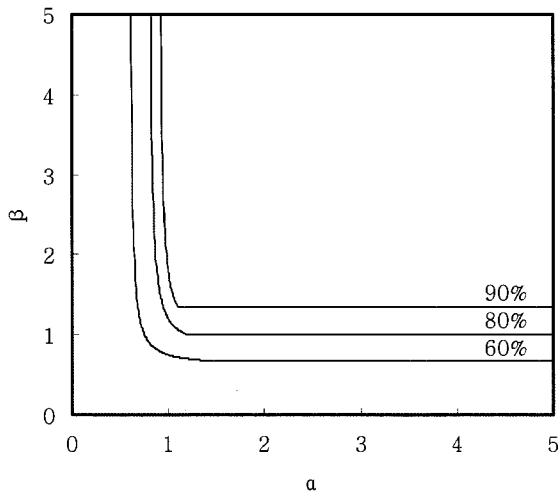


Fig. 4. Stoichiometric maximum total nitrogen removal efficiency.

Table 8. Comparison of reported and stoichiometric TN concentration in each positions

Plant	TN concentration in each positions			Total nitrogen removal efficiency (%)	Reference		
	Influent	after anoxic tank	after oxic tank				
1	Rep.*	57.8	5.7	4.9	91.5	8)	
	Sto.**	-	8.8	8.8			84.8
2	Rep.	58.4	17.9	19.4	66.8		
	Sto.	-	17.0	17.0	71.0		
3	Rep.	61.6	4.1	4.1	93.3		9)
	Sto.	-	4.0	4.0	93.5		
4	Rep.	79.4	7.5	3.7	95.3	10)	
	Sto.	-	8.0	8.0	90.0		
5	Rep.	60.8	10.7	9.3	84.7	10)	
	Sto.	-	7.1	7.1	88.3		

* Reported TN concentration, ** Stoichiometric TN concentration

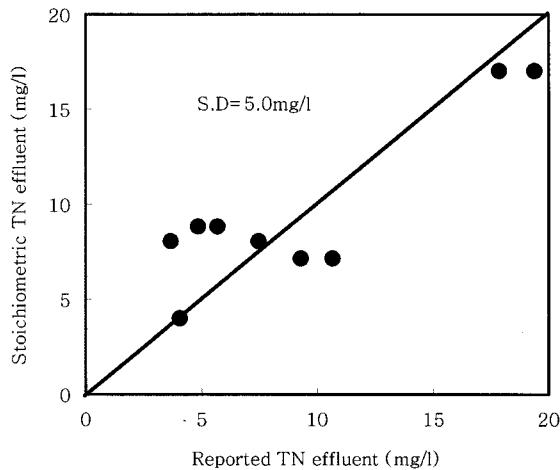


Fig. 5. Comparison of stoichiometric and reported TN effluent in each positions.

Table 8에서 잘 나타나 있듯이 보고된 하수처리장의 무산소조 및 산소조 유출수 중의 TN농도가 양론적 TN 결과치와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 그리고 양론계산으로부터 구한 유출수 중의 TN 농도를 실제 처리장 유출수 농도와 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 양론적 계산에 의해 실제 하·폐수 처리장 유출수 중의 TN농도를 ± 5.0 mg/L 내에서 예측 가능함을 나타내었다.

4. 결론

무산소-산소 공정에서의 질소제거 메커니즘을 양론적으로 해석 한 결과 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) 질화 및 탈질에 중요한 영향을 미치는 5가지 수질인자를 미생물에 의한 질소 섭취량까지 고려한 무차원 변수(α 와 β) 도입으로 양론계산을 단순화 시키는 것이 가능 하였다.
- 2) 주어진 유입수의 조건에서 얻을 수 있는 최대의 TN제거를 위한 최적의 슬러지 반송비와 그때의 최대 TN제거율을 양론적으로 제시 하였다.
- 3) 양론적 계산에 의한 각 공정의 유출수와 최종 유출수 중의 TN농도가 실제 보고된 하·폐수 처리장의 TN 농도와 잘 일치 하였다. 또한 양론적 계산에 의해 실제 처리장의 최종 유출수 중의 TN농도를 ± 5.0 mg/L 내에서 예측 가능함 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Horan, N. J., Lowe, P., and Stentiford E. I., Nutrient Removal from Wastewater, Technomic, Lancaster(1994).
2. Bachelor, B., "Kinetic analysis of alternative configuration for single-sludge nitrification/denitrification," *Water Poll. Cont. Fed.*, **54**, 1492~1504(1982).
3. U.S. EPA, Manual-Nitrogen Control,U.S. EPA, Washington(1993).
4. 김광수, 이상은, 안정희, "생물학적 질소제거를 위한 적정 내부반송비," *대한환경공학회지*, **25**, 211~216(2003).
5. Fujii, S. and Boonyarat, F., "The 2nd Ku-Kaist-Ntu tri-lateral seminar/workshop on environmental & sanitary engineering," Kaist Seoul, 219~222(1993).
6. 박영규, 이철희, 이병대, "내부순환을 포함한 anoxic-oxic-anoxic-oxic공정에서 질소제거를 위한 이론적 고찰," *대한환경공학회지*, **17**, 873~885(1995).
7. Fujii, S. and Somiya, I., "Simulation of nitrogen balance in large-scale domestic sewage treatment plant including the sludge treatment process," Proceeding of third Kyoto-Kaist joint seminar/workshop on civil engineering, Kaist Seoul, 803~806(1990).
8. Sakai, Y., Hikami, H., and Kawata, Y., "Step-feed and

- anoxic oxic activated sludge process,” 27th Annual Conference of Japan Sewage Work Association, Fukuoka, 381~383(1990).
9. Hattori, T., Nakayama, S., and Watazu, H., “Promotion of nitrogen removal by change of operational conditions in the dual recycling method,” 28th Annual Conference of Japan Sewage Work Association, Fukuoka, 499~501(1991).
 10. Hiroshi, I., Esumi, H., Ishihara, J., and Wakuri, H., “Some problems of denitrification-dephosphorus operation in full-scale plant,” 27th Annual Conference of Japan Sewage Work Association, Fukuoka, 529~531(1990).