

생물막 반응기에서 아질산성 질소의 축적에 미치는 영향인자

황병호 · 황경엽 · 최의소*

한국과학기술연구원 환경공정연구부
*고려대학교 토목환경공학과

(2000년 3월 8일 접수, 2000년 8월 3일 채택)

Parameters Affecting Nitrite Accumulation in Submerged Biofilm Reactor

Byung-Ho Hwang · Kyung-Yub Hwang · Eui-So Choi*

Division of Environment & Process Technology, Korea Institute of Science and Technology
**Department of Civil & Environmental Engineering, Korea University*

ABSTRACT

The objective of this study was to assess parameters affecting nitrite accumulation, which offers advantages in terms of less aeration energy and carbon consumption for denitrification. The influence of the alkalinity to NH_4^+ -N concentration ratio, pH, FA (free ammonia) concentration and temperature on nitrite accumulation was investigated. The experiment was performed with supernatant from dewatering process of anaerobic digested sludge using a submerged biofilm reactor. The influent contains high strength of ammonium nitrogen and the alkalinity was insufficient for complete nitrification. An increased nitrite accumulation was observed with increase in alkalinity to NH_4^+ -N concentration ratio. The increase in alkalinity to NH_4^+ -N concentration ratio has been a major reason for the high pH value and FA concentration in the reactor. It can be considered that selective inhibition of *Nitrobacter* can be causes of nitrite accumulation. The nitrite accumulation increased with increment of temperature at fixed alkalinity to NH_4^+ -N concentration ratio.

Key Words : Biofilm, Biofilter, Nitrite Accumulation, Alkalinity, Nitrification

요약문

질산화에 요구되는 산소량과 탈질소화에 요구되는 탄소원의 양을 감소시킬 수 있는 암모니아성 질소의 아질산성 질소로의 부분적 질산화 반응을 유도하기 위해 생물막 반응기를 이용하여 고농도 암모니아성 질소를 함유하고 있는 혐기성 소화슬러지 탈수여액을 대상으로 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비, pH, FA(free ammonia), 온도변화에 따른 아질산성 질소의 축적현상에 대한 연구를 수행하였다. 실험결과 유입수의 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 증가시키면 유출수의 아질산성 질소의 축적도 증가하였으며, 이는 알칼리도의 농도가 증가함에 따라 반응기내의 pH가 높게 유지됨으로서 FA의 농도가 증가하게 되어 *Nitrobacter*의 성장을 선택적으로 저해시키기 때문인 것으로 판단된다. 일정한 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비 조건에서 온도가 증가할수록 아질산성 질소의 축적도 증가하였다.

주제어 : 생물막, 생물여과, 아질산성 질소 축적, 알칼리도, 질산화

1. 서론

대부분의 하수처리장에 적용되고 있는 활성슬러지 공정은 수처리 계통과 슬러지 처리계통으로 나눌 수 있다. 슬러지 처리계통에서 발생하는 탈리액(농축 상등수, 소화 상등수, 탈수여액)은 유입 하수량에 비하여 유량은 적으나 고농도의 질소·인으로 수처리 계통에 심각한 영향을 주는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 그러나 대부분의 하수처리장에서 탈리액의 반송효과에 대한 적절한 고려없이 처리 시설 내에 하수와 함께 유입시키고 있는 실정이며 장차 질소·인의 규제가 강화될 경우 기존의 활성슬러지 공정은 영양소 제거 공정으로의 개량이 불가피할 것으로 예상된다.

영양소 제거 공정의 도입을 위해서는 하수처리장의 부지를 확장해야 하는 문제가 발생하며, 영양소 제거 공정이 적용될 경우 더욱 많은 양의 질소와 인이 슬러지 처리시설로 다시 유입되어 슬러지 처리과정에서 적절한 처리를 하지 않을 경우에는 하수처리장 시스템의 전반적인 안전성을 확보하기 어렵기 때문에 이러한 고농도의 질소와 인을 함유하고 있으며 비교적 저유량인 탈리액을 분리하여 처리하는 방법도 많은 연구가 진행되고 있다.²⁻⁵⁾

이러한 탈리액을 처리하기 위해서는 반응기의 용적을 최소화하고, 탈리액의 유량 및 수질변동이 심하기 때문에 부하변동에 강하며, 동력비 및 슬러지

발생이 적은 공정이 요구된다. 또한, 질산화 공정에서 만약 암모니아성 질소가 아질산성 질소로만 산화된다면 질산성 질소로의 질산화에 비하여 25%의 산소 소요량을 줄일 수 있고, 탈질과정에서 40%의 외부 탄소원 소요량을 절감시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 아질산성 질소로의 질산화는 FA에 의한 저해, 온도에 따른 *Nitrosomonas* 및 *Nitrobacter*의 성장속도의 차이, 용존산소 농도의 제한 등에 의해 가능하다고 보고되고 있다.⁶⁻¹¹⁾

최근에 아질산화 반응을 이용한 질소제거 공정으로 SHARON 공정이 개발되었으나 부유 성장식으로 비교적 35°C 이상의 높은 온도 조건이 필요한 단점이 있다.¹⁰⁾ 따라서 본 연구에서는 유입 부하변동에 강하고 낮은 수온에서도 안정적인 제거율과 동력비 및 슬러지 발생량이 비교적 적은 생물막 반응기를 이용하여 고농도 암모니아성 질소를 함유하고 있는 혐기성 소화슬러지 탈수여액의 질산화에 관한 실험에서 아질산성 질소의 축적에 미치는 영향인자에 대한 연구를 하였다.

2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 생물여과 공정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 내경 5 cm, 높이 120 cm인 아크릴 원통으로 제작하였으며, 여재의 지지

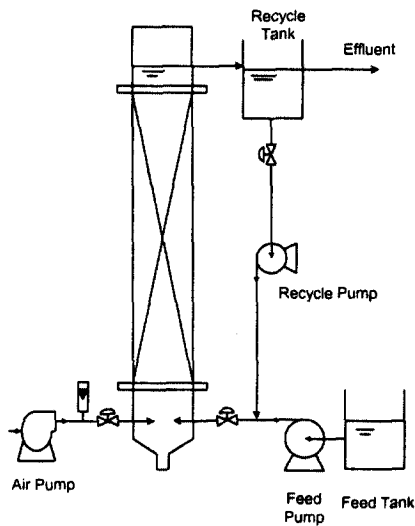


Fig. 1. Schematic diagram of submerged biofilm reactor.

와 유입수의 적절한 분배를 위하여 지름 3 mm의 구멍이 뚫린 평판을 충전층의 상·하부에 설치하였다. 반응기 내부에는 지름 3 cm, 길이 3~5 mm인 실린더형 발포 폴리우레탄 수지를 75 cm 높이로 충전하였다. 장치는 상향류로 운전하였으며, 유입수를 적절히 분배하고 기질 및 용존산소의 전달을 양호하게 하기 위하여 유출수를 순환조에서 선속도 5.0 m³/m²·h로 순환하였다. 공기는 컴프레서와 유량계를 이용하여 반응기의 하부에서 일정량으로 주입하였다. 반응기의 규격 및 충전 매디아의 특성을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 폐수는 J하수처리장의 혐기성 소화슬러지를 벨트프레스 탈수기로 여과한 탈수여액을 사용하였다. 실험기간 동안 사용된 탈수여액의 수질은 질소의 경우 대부분 암모니아성 질소의 형태로 존재하였으며 340~420 mg/L의 범위를 나타내었다. 아질산성 질소 및 질산성 질소의 평균농도는 각각 0.5 mg/L, 4.9 mg/L이었다. 알칼리도의 농도는 평균 1,500 mg/L로 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 약 4.1~4.5 정도로 완전한 질산화를 위해서는 추가적인 알칼리도의 공급이 필요한 것으로 나타났다.

장치의 운전은 탈수여액에 알칼리도를 보충하지 않고, 매디아의 용적을 포함하지 않는 공탐체류시간(EBCT)을 7.1시간으로 운전한 Run 1과 공탐체류

Table 1. The characteristics of packing material and reactor design

Media	
Material	Expanded polyurethane
Shape	Cylindrical
Diameter (mm)	3
Length (mm)	3~5
Reactor	
Total height (cm)	120
Diameter (cm)	5
Depth of media in the reactor (cm)	75
Void fraction	0.33

시간을 5.0시간으로 운전한 Run 2, 탈수여액에 NaHCO₃를 첨가하여 공탐체류시간 5.0시간에서 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 5.4~6.1로 유지한 Run 3과 이론적으로 소요되는 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 7.1이상 유지한 Run 4로 나누어 실험하였다. 각 실험기간 동안 반응기의 운전조건을 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다.

유입 및 유출수의 수질분석은 일정량의 시료를 채취하여 NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, Alkalinity를 Standard Methods¹²⁾에 따라 분석하였다. 반응기 내의 pH의 측정에는 pH메타(ORION, 520A)를 이용하였으며, 온도 및 DO의 측정에는 DO메타(YSI, 58)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입 및 유출수의 질소 농도 변화

생물여과 공정을 이용하여 고농도 암모니아성 질소를 포함하고 있는 혐기성 소화슬러지 탈수여액의 질산화에 관한 실험 결과 유입수 및 유출수의 암모니아성 질소 농도와 유출수의 아질산성 질소 및 질산성 질소 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 유입수에 알칼리도를 첨가하지 않고 공탐체류시간을 7.1시간으로 운전한 Run 1의 경우 유출수의 암모니아성 질소의 농도범위는 161~228 mg/L로 평균 169 mg/L이었다. 유출수의 아질산성 질소의 농도는

Table 2. The experimental conditions at each run

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Duration (d)		25(1~25)	9(26~33)	11(34~44)	29(45~74)
EBCT (h)		7.1	5.0	5.0	5.0
Alkalinity/NH ₄ ⁺ -N		4.1~4.5(4.3±0.1) ^a	4.1~4.4(4.2±0.1)	5.4~6.1(5.8±0.3)	7.2~9.4(8.3±0.2)
Reactor	Temp. (°C)	8.8~24.2(15.6±5.9)	17.5~21.5(19.7±1.4)	16.4~27.5(20.4±3.5)	18.2~28.9(23.8±2.9)
	pH	5.8~8.1(7.1±0.9)	6.7~7.6(7.3±0.3)	7.5~8.2(7.8±0.2)	7.6~8.3(8.0±0.2)
	DO (mg/L)	4.6~6.8(5.8±1.0)	1.5~5.8(3.3±1.3)	0.1~3.7(1.9±1.7)	0.1~5.0(2.6±1.6)

^a : min.~max.(average±std.)

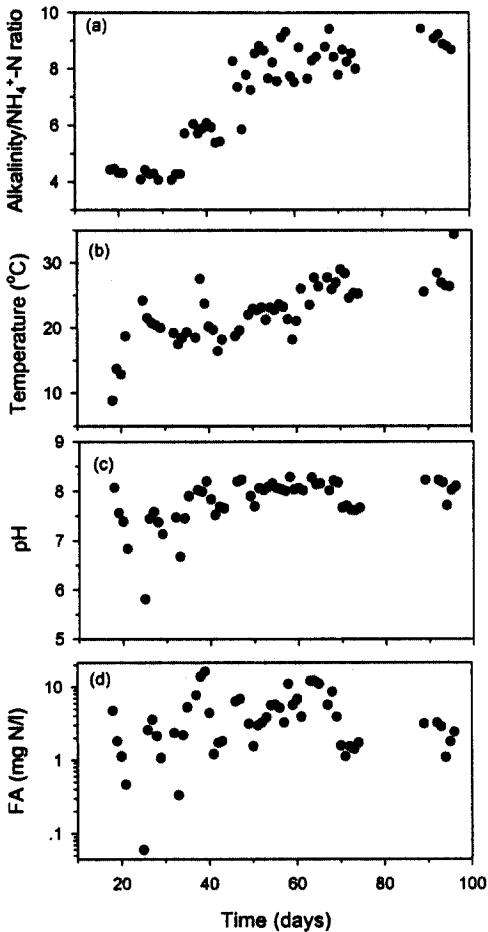


Fig. 2. Variation of alkalinity/NH₄⁺-N ratio (a), temperature (b), pH (c) and FA (d) during experiment.

1~8 mg/L로 낮게 유지되었으며 질산성 질소의 농도는 160~285 mg/L의 범위로 평균 231 mg/L이

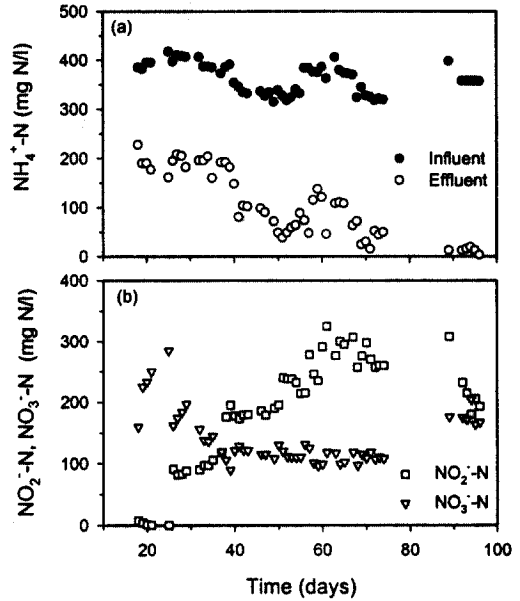


Fig. 3. Variation of NH₄⁺-N (a), NO₂⁻-N and NO₃⁻-N in effluent (b) during experiment.

었다.

유입수에 알칼리도를 공급하지 않고 공탐체류시간을 5.0시간으로 운전한 Run 2의 경우 유출수의 암모니아성 질소의 농도는 약간 증가하여 평균 198 mg/L이었으며 암모니아성 질소의 제거율은 체류시간을 단축시켰음에도 불구하고 약 50%를 유지하였다. 아질산성 질소의 경우 Run 1 실험기간 동안에는 낮게 유지되었지만 공탐체류시간을 5.0시간으로 단축시킨 Run 2의 실험기간 동안에는 급격히 증가하여 평균 90 mg/L를 나타내었다. 질산성 질소의 농도는 점차 감소하였다.

유입수에 NaHCO_3 를 첨가하여 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 5.4~6.1로 유지한 Run 3의 경우 이 기간 동안 유입수의 암모니아성 질소의 농도가 다소 감소하였음에도 불구하고 아질산성 질소의 농도는 증가하여 106~195 mg/L의 범위로 평균 163 mg/L이었다. 암모니아성 질소의 농도는 평균 145 mg/L로 Run 2보다 감소하였고 질산성 질소의 농도는 90~145 mg/L의 범위로 평균 119 mg/L이었다.

유입수에 NaHCO_3 를 첨가하여 이론적으로 소오되는 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 7.1 이상 유지하여 실험한 Run 4의 경우 유출수의 암모니아성 질소의 농도는 15~137 mg/L의 범위를 나타내었으며 평균 70 mg/L이었다. 아질산성 질소의 농도는 179~325 mg/L의 범위로 평균 252 mg/L이었으며 Run 3의 경우보다 다소 증가하였다. 질산성 질소의 농도는 Run 4의 실험기간 동안 96~131 mg/L의 범위로 평균 112 mg/L를 나타내었다.

3.2. 아질산성 질소의 축적

각 실험기간 동안 유출수의 평균 질소농도 구성을 Fig. 4에 나타내었다. 유입수에 알칼리도를 첨가하지 않고 공탐체류시간을 7.1시간으로 운전한 Run 1의 경우 유출수에 아질산성 질소가 거의 존재하지 않았지만 공탐체류시간을 5.0시간으로 단축시킨 Run 2의 경우 약 20%가 아질산성 질소로 축적되었다. 공탐체류시간 5.0시간에서 유입수에 NaHCO_3 를 첨가하여 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 5.4~6.1로 운전한 Run 3의 경우 유출수 중의 아질산성 질소의 농도는 유출수 질소농도의 약 38%를 나타내었으며, 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 7.1 이상 유지한 Run 4의 경우 유출수 질소농도의 약 50% 정도가 아질산성 질소이었다.

3.2.1. 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비 영향

Fig. 5에 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비에 따른 암모니아성 질소의 제거속도와 질산성 질소의 생성속도를 나타내었다. 암모니아성 질소의 제거속도 및 질산성 질소의 생성속도는 각각 *Nitrosomonas* 및 *Nitrobacter*의 성장속도와 관계된다. 알칼

Fig. 4. Configuration of average nitrogen concentration in effluent.

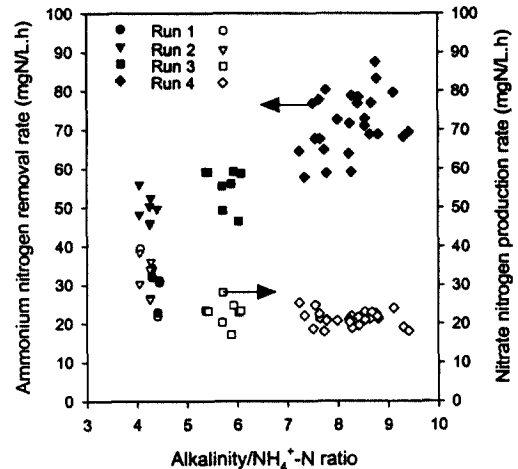


Fig. 5. The effect of alkalinity/ NH_4^+ -N ratio on ammonium nitrogen removal rate and nitrate nitrogen production rate.

리도/암모니아성 질소의 농도비가 증가함에 따라 암모니아성 질소의 제거속도는 증가하는 경향을 나타내었으며, 질산성 질소의 생성속도는 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 증가함에 따라 다소 감소하였으며 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 7 이상에서는 거의 일정하게 유지되었다.

알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 증가함에 따라 아질산성 질소의 축적이 증가되는 것은 질산화 과정에서 대부분의 알칼리도가 *Nitrosomonas*에 의해 소모되며 알칼리도가 충분하지 않은 경우에는 알

칼리도가 제한 인자가 되기 때문에 더 이상의 암모니아성 질소가 제거될 수 없다. 그러나, 알칼리도를 보충하지 않은 Run 1과 Run 2의 실험에서 공탐체류시간을 7.1시간으로 운전한 Run 1의 경우 아질산성 질소가 거의 축적되지 않았으나 공탐체류시간을 5.0시간으로 운전한 Run 2의 경우 약 20%가 축적된 것으로 보아 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 직접적인 아질산성 질소의 축적원인은 아닌 것으로 판단된다.

3.2.2. 온도 영향

Fig. 6에는 반응기 온도에 따른 암모니아성 질소의 제거속도 및 질산성 질소의 생성속도를 나타내었다. 암모니아성 질소의 제거속도는 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비에 관계없이 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 질산성 질소의 생성속도는 알칼리도를 공급하지 않은 Run 1, 2의 실험기간 동안에는 온도가 증가함에 따라 질산성 질소의 생성속도도 증가하는 경향을 나타내었으나 알칼리도를 공급한 Run 3, 4의 실험기간 동안에는 온도가 증가함에도 불구하고 어느 정도 일정하게 유지되었다. 이는 어떤 저해물질에 의해 *Nitrobacter*의 성장이 저해를 받고 있기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.3. pH 및 FA 영향

FA와 FNA(free nitrous acid)의 경우 일정 농도 이상에서 질산화 미생물에 저해를 일으키는 것으로 알려져 있으며 아질산성 질소의 축적은 주로 높은 pH에서 높은 FA농도에 의해 *Nitrobacter*만이 저해 영향을 받게 되어 아질산성 질소가 축적된다고 보고되고 있다.

물에 용해된 암모니아는 FA와 암모늄이온(NH₄⁺)으로 다음 식(1)과 같이 평형을 이루며 존재하고, pH 및 온도가 높아질수록 FA의 비율은 증가한다. FA농도는 총 암모니아성 질소농도, 온도, pH, 암모니아 평형식의 이온화 상수에 의하여 다음 식 (2)와 같이 계산된다⁶⁾.

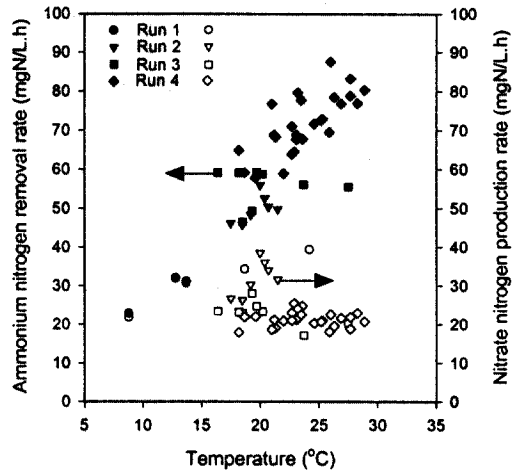


Fig. 6. The effect of temperature on ammonium nitrogen removal rate and nitrate nitrogen production rate.

$$FA, \text{ mg/L} = \frac{17}{14} \cdot \frac{NH_4^+ - N \cdot 10^{pH}}{\frac{K_b}{K_w} + 10^{pH}} \quad (2)$$

여기서, K_b : 암모니아 평형식의 이온화 상수
 K_w : 물의 이온화 상수

$$\frac{K_b}{K_w} = e^{\left(\frac{-6.344}{273+T}\right)} \quad (3)$$

여기서, T : 온도(°C)

FNA의 농도는 아질산성 질소의 농도, pH 및 아질산염 평형식의 이온화 상수 K_a 에 의하여 다음 식 (4)와 같이 계산된다.

$$FNA, \text{ mg/L} = \frac{46}{14} \cdot \frac{(NO_2 - N)}{(K_a) \cdot 10^{pH}} \quad (4)$$

$$K_a = e^{\left(\frac{-2.300}{273+T}\right)} \quad (5)$$

여기서, NO_2-N : 아질산성 질소 농도
 K_a : 아질산염 평형식의 이온화 상수
 T : 온도(°C)

Fig. 7에는 반응조의 pH 변화에 따른 각 실험에서의 암모니아성 질소의 제거속도와 질산성 질소의 생성속도를 나타내었다. NaHCO₃를 첨가하지 않고

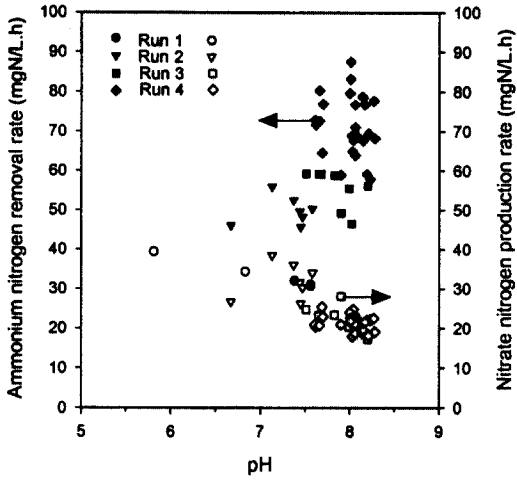


Fig. 7. The effect of pH on ammonium nitrogen removal rate and nitrate nitrogen production rate.

공탐체류시간을 7.1시간으로 운전한 Run 1 기간 동안 반응기내의 pH는 최저 5.8 정도까지 저하되었으며, Run 2 기간 동안 반응기내의 pH는 6.7~7.6 정도의 범위를 나타내었다. 유입수의 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 5.4~6.1 정도로 유지한 Run 3의 경우 반응기내의 pH는 7.5~8.2 정도로 유지되었으며, 이론적으로 소요되는 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비를 7 이상으로 유지한 Run 4의 경우 반응기내의 pH는 7.6~8.3 정도로 유지되었다. 그림에 나타낸 것과 같이 pH가 증가함에 따라 암모니아성 질소의 제거속도는 증가하는 경향을 나타내었으며, 질산성 질소의 생성속도는 pH가 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

Fig. 8에는 반응조의 FA 농도에 따른 각 실험조건에서의 암모니아성 질소의 제거속도와 질산성 질소의 생성속도를 나타내었다. 전체 실험기간 동안 FA의 농도는 0.1~16 mg/L의 범위를 나타내었다. 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 증가함에 따라 반응기의 pH가 높게 유지되고, FA의 농도도 증가하게 되어 FA에 의한 영향은 pH의 영향과 비슷한 경향을 나타내었다. Anthonisen 등⁶⁾에 의하면 FA에 의한 *Nitrosomonas*의 저해농도는 10~150 mg/L이고, FA농도가 0.1~10 mg/L 정도에서는 *Nitrobacter*에만 저해현상을 일으켜 아질산성 질소 축적의 요인이 된다고 한다. 전체 실험기간 동안 유

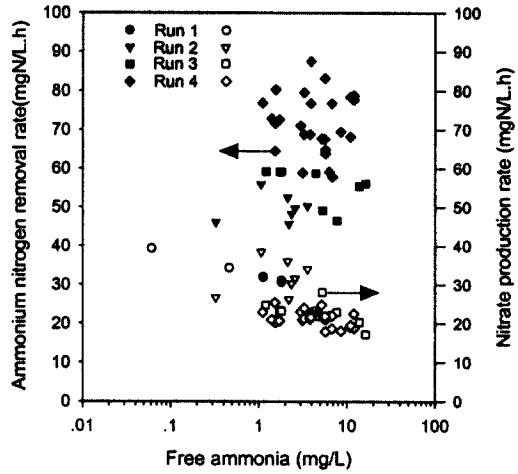


Fig. 8. The effect of free ammonia concentration on ammonium nitrogen removal rate and nitrate nitrogen production rate.

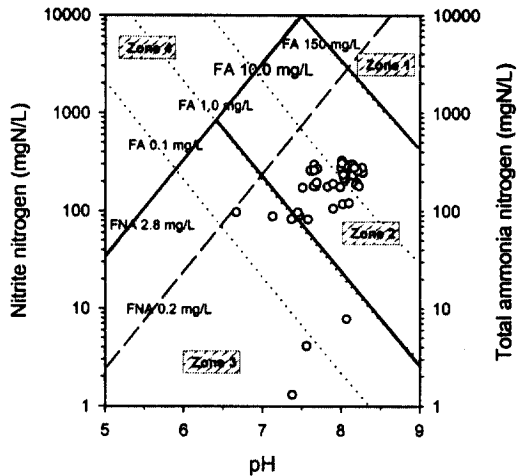


Fig. 9. Inhibition of *Nitrobacter* and *Nitrosomonas* by free ammonia(FA) and free nitrous acid(FNA).

출수의 아질산성 질소의 농도는 Fig. 9에 나타난 것과 같이 대부분 Zone 2에서 축적되었다. FA 농도가 높은 Zone 1에서는 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter* 모두에게 영향을 주어 질산화가 일어나지 않으며, Zone 2에서는 *Nitrobacter*에게만 영향을 주어 아질산성 질소의 축적이 진행되고, FA와 FNA의 농도가 모두 낮은 Zone 3에서는 *Nitrosomonas* 및 *Nitrobacter*가 저해를 받지 않아 완전한 질산화가

일어나며, FA농도는 낮으나 FNA의 농도가 높은 Zone 4에서는 *Nitrobacter*와 *Nitrosomonas*가 영향을 받아 질산화가 저해된다고 한다.⁶⁾

한편, Turk 등⁷⁾의 연구 결과에 따르면 *Nitrobacter*의 경우 어느 정도 운전기간이 지나게 되면 FA농도에 순응하게 되어 더 이상 아질산성 질소의 축적이 일어나지 않게 된다고 하였으며, 미생물을 순응시키지 않은 경우에는 FA의 농도가 3.5 mg/L 일 때 저해를 받았지만 순응을 시킨 경우에는 FA의 농도가 40 mg/L일 경우에도 저해를 받지 않았다고 보고한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 FA의 농도 0.1~16 mg/L의 범위에서 지속적인 아질산성 질소의 축적이 진행되었다.

이상의 실험결과에서 미생물의 농도를 고려하지 않았지만 아질산성 질소의 축적은 유입수의 알칼리도/암모니아성 질소의 비, 온도, pH, FA농도 등에 크게 영향을 받았으며 안정적인 아질산성 질소의 축적을 위해서는 유입수의 알칼리도/암모니아성 질소의 비를 7 이상으로 유지하여 반응기의 pH를 7.5 이상 유지시키고, FA의 농도를 약 1 mg/L 이상 유지시키는 조건이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상의 생물여과 공정을 이용한 고농도 암모니아성 질소를 포함하고 있는 혐기성 소화슬러지 탈수여액의 질산화에 관한 실험에서 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 4.3에서 8.3으로 증가함에 따라 아질산성 질소의 축적도 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비가 증가함에 따라 *Nitrosomonas*의 성장속도는 증가하고, 반응기내의 pH가 높게 유지됨으로서 FA의 농도도 증가하게 되어 *Nitrobacter*의 성장을 부분적으로 저해시키기 때문에 아질산성 질소의 축적이 증가된 것으로 판단된다. 알칼리도/암모니아성 질소의 농도비 7 이상에서는 반응기의 온도가 증가할수록 아질산성 질소의 축적도 증가하는 경향을 나타내었다. 고농도의 암모니아성 질소를 포함하고 있는 탈수여액을 생물여과 공정으로 처리할 경우, 안정적인 아질산성 질소의 축적을 위해서는 유입수의 알칼리

도/암모니아성 질소의 농도비를 7 이상으로 유지하여 반응기의 pH를 7.5 이상 유지시키고, FA의 농도를 약 1 mg/L 이상 유지시키는 조건이 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국과학기술원 맑은 물 연구센터, 기존하수처리시설의 문제점 및 개선방안 연구(1996).
2. Mossakowska, A., Teinius, L. G., and Hultman, B., "Nitrification Reactions in Treatment of Supernatant from Dewatering of Digested Sludge," *Water Environment Research*, **69**(6), 1128~1133 (1997).
3. Siegrist, H., "Nitrogen Removal from Digester Supernatant-Comparison of Chemical and Biological Method," *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1-2), 399~406(1996).
4. Ghyoot, W., Vandaele, S., and Verstraete, W., "Nitrogen Removal from Sludge Reject Water with A Membrane-Assisted Bioreactor," *Wat. Res.*, **33**(1), 23 ~32(1999).
5. Pitman, A. R., Deacon, S. L., and Alexander, W. V., "The Thickening and Treatment of Sewage Sludges to Minimize Phosphorus Release," *Wat. Res.*, **25**(10), 1285 ~1294(1991).
6. Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., and Srinath, E. G., "Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid," *J.WPCF.*, **48**, 835~852(1976).
7. Turk, O. and Mavinic, D. S., "Maintaining Nitrite Build Up in a System Acclimated to Free Ammonia," *Wat. Res.*, **23**, 1383~1388(1989).
8. Abelling, U. and Seyfried, C. F., "Anaerobic-Aerobic Treatment of High Strength Ammonium Wastewater-Nitrogen Removal Via Nitrite," *Wat. Sci. Tech.*, **26**, 1007~1015(1992).

9. Randall, C. W. and Buth, D., "Nitrite Build-up in Activated Sludge Resulting from Combined Temperature and Toxic Effects," *J.WPCF.*, **56**, 1045~1049(1984).
10. Hellinga, C., Schellen, A. A. J. C., Mulder, J. W., van Loosdrecht, M. C. M., and Heijen, J. J., "The SHARON Process: An Innovative Method For Nitrogen Removal From Ammonium-Rich Wastewater," *Wat. Sci. Tech.*, **37**(9), 135~142(1998).
11. Hanaki, K., Wantawin, C., and Ohgaki, S., "Nitrification at Low Levels of DO With and Without Organic Loading in a Suspended-Growth Reactor," *Wat. Res.*, **24**, 297~302(1990).
12. APHA, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Ed.(1995).