

암모늄 이온 및 질산화균의 초기 농도가 질산화에 미치는 영향

Effects of Initial Concentration of Ammonium Ion and Active Nitrifiers on Nitrification

김정훈* · 김영주** · 박홍석***

Kim, Jung Hoon · Kim, Young Ju · Park, Hung Suck

Abstract

The effect of initial concentration of ammonium ion (N_0) and active nitrifiers (X_0) on nitrification was examined by continuous monitoring of the ammonium removal rate. The concentration of the active nitrifiers in the culture sludge, measured by the oxygen uptake rate (OUR), was found to be 42.8% of the culture sludge. Experiments were carried out under different ratios of N_0/X_0 , viz., 0.025 to 0.493. The results from this study show that the oxidation rate was similar under the same N_0/X_0 ratio despite different initial concentration of ammonium ion (N_0) and active nitrifiers (X_0). Moreover, the Contois kinetic expression which includes biomass concentration, was found to describe the mechanism behind nitrification process. The ammonium oxidation rate (q_{Nmax}) and half saturation constant per unit activated nitrifiers (K_N') were theoretically determined using the Contois expression. These values were found to be 4.32 gN/gVSS/day and 0.013 gN/gVSS respectively.

Keywords : nitrification, active nitrifiers, oxygen uptake rate, contois equation

요 지

본 연구는 생물학적 질산화 공정에서 암모늄 이온과 활성을 가진 질산화균의 초기 농도가 질산화에 미치는 영향을 확인하고, 이에 따른 동역학식을 제시하고자 하였다. 먼저 실험에 이용된 슬러지의 질산화균 농도는 미생물 호흡률 실험으로 측정하였는데, 배양된 슬러지 중 42.8%가 활성을 가진 질산화균으로 나타났다. 암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도를 달리하여 N_0/X_0 비가 0.025~0.493의 조건에서 질산화 실험을 실시하였으며, 이를 통해 암모늄 이온과 질산화균의 농도가 상이하더라도 N_0/X_0 비가 동일할 경우 암모늄 산화율이 동일함을 확인하였다. 또한 N_0/X_0 비와 비기질이용율의 관계는 Contois 형태의 관계식으로 표현되었으며, 최대 비암모늄산화율(q_{Nmax})은 4.32 gN/gVSS/day, 반 포화속도 상수(K_N')는 0.013 gN/gVSS인 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 질산화, 활성 질산화균, 산소이용율, Contois 식

1. 서 론

수계 내 질소 물질은 호소 및 하천 부영양화의 주요 원인이 되며 용존산소를 소비하고 수생 생물에 대한 직접적인 독성저해를 일으키는 등 환경문제의 주요 원인 물질로 알려져 있다. 이로 인해 질소물질에 대한 배출기준은 점차 엄격해져 왔으며, 국내의 경우 수질환경보전법에 의거 1996년 1월 1일부터 방류수수질기준에 질소 항목이 추가되었고, 2001년의 하수도법시행규칙에 의거하여 지역별 및 시기별 수질기준이 강화되었다. 현재 총질소의 방류수 수질기준은 특정 지역 20 mg/L, 기타지역 60 mg/L이며, 2013년 1월 1일부터는 기타지역 또한 특정지역 기준인 20 mg/L로 강화될 계획이다(환경부, 2003).

수계 내 질소 처리는 물리화학적 공정과 생물학적 공정으로 나뉘며, 이 중 생물학적 질소 처리는 미생물의 세포합성과 관련된 동화 및 이화작용을 이용한 것으로, 호기 조건하의 질산화 과정과 혐기 조건하의 탈질화 과정으로 구분된다(U.S. EPA, 1993). 이러한 생물학적 질소 처리공정은 생물학적 유기물 제거 공정에 비해 복잡하고, 처리비용 또한 상대적으로 높아서, 최근 경제성 제고 측면에서 다양한 처리 방안들이 연구되었다.

경제적이며 효과적인 처리 기술의 발전은 생물학적 질소 처리공정의 처리 대상을 하수 내 저농도 질소에서 산업 및 축산폐수 등의 고농도 질소로 확대시켰고, 이에 따라 고 부하 유입조건에서의 효과적인 처리에 대한 많은 연구가 수행되었다. 하지만 한동준 등(1998)은 생물학적 처리공정에서

*정회원 · 울산대학교 청정자원순환연구센터 연구교수(E-mail : kingtoe@ulsan.ac.kr)
**전남대학교 생물환경화학학과 연구교수(E-mail : youngju40@hanmail.net)
***정회원 · 교신저자 · 울산대학교 건설환경공학부 교수(E-mail : parkhs@ulsan.ac.kr)

고농도 암모늄 이온 유입시 질산화 속도가 감소되는 결과를 확인하였고, Cooper 등(1990)은 모래 유동상을 이용한 질산화 공정에서 부하조건의 증가에 따라 질산화 효율의 급격한 감소를 확인하여, 고농도의 암모늄 이온이 생물학적 질산화에 저해를 미치는 것으로 보고하였다.

그러나 Gupta 등(1996)은 TKN(total kjeldahl nitrogen) 농도가 1,016~1,062 mg/L인 혼합폐수에 대해 비교적 긴 2 일간의 수리학적 체류시간(HRT)으로 운전하여 안정적인 질산화가 가능하다고 하였다. 또한 Ruiz 등(2003)은 3.3 kgN/m³/day의 고부하 조건에서도 고농도의 질산화균을 이용하여 안정적인 처리가 가능하다고 하였고, 최인철 등(2000)은 활성탄 유동상 공법을 이용하여 고농도 질소처리에서 초기 질산화 저해를 확인하였으나 추후 미생물 농도의 증가로 효과적인 질산화가 가능함을 확인하였다.

이상의 연구결과들은 고농도로 유입되는 암모늄이 생물학적 질산화 공정에 심각한 저해를 미칠 수 있으나, 긴 수리학적 체류시간을 통한 유입 부하의 완화와 고농도 질산화균의 순응 등을 통해 해결 가능함을 보여주고 있다. 본 연구에서는 생물학적 질산화 공정의 저해원인을 체계적으로 규명하고자 암모늄 이온과 질산화균 농도 조건 별 질산화 경향을 조사하였다. 이를 통해 고농도 질소폐수의 처리를 위한 암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도가 질산화에 미치는 영향을 파악하였으며, 암모늄 이온 농도와 질산화균의 농도비를 이용한 기질이용 속도식을 제안하고 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 질산화균 배양 및 활성균 농도 추정

실험에 이용된 질산화균은 하수처리장 농축조 슬러지를 유효용적 8 L의 분리막 생물반응기(membrane bioreactor: MBR)에 식종한 후, 유기 탄소원이 배제된 고농도 암모늄 이온 배지로 1.5 kgN/m³/day의 고 부하 조건에서 1년 이상 배양되었다.

질산화균 배양에 이용된 합성기질은 적절한 질소원과 그에 따른 알카리도 물질 그리고 미량의 금속물질을 증류수에 주입하여 조제하였다. 질소원인 염화암모늄(NH₄Cl)의 농도는 조건에 따라 달리하여 조제하였고, 질소원을 제외한 나머지 성상은 표 1과 같다.

슬러지 중 활성 질산화균 농도를 확인하기 위해 미생물 호흡측정 장치를 이용하였으며, 호흡측정 장치는 용존산소 측정 장치가 각각 부착된 폭기 반응기와 무폭기 반응기로 구성되었다. 반응기의 운전은 폭기 반응조의 슬러지 일부를 무폭기 반응기에 연속적으로 유입시킨 후 반응조 간의 용존

표 1. 질산화균 배양을 위한 합성기질 성상

components	concentration
CaCl ₂	7 mg/L
FeCl ₃	1 mg/L
KCl	7 mg/L
KH ₂ PO ₄	11 mg/L
MgSO ₄	5 mg/L
NaH ₂ PO ₄	29 mg/L
NaHCO ₃ (as CaCO ₃)	7.2 g/g NH ₄ ⁺ -N
NH ₄ Cl	-

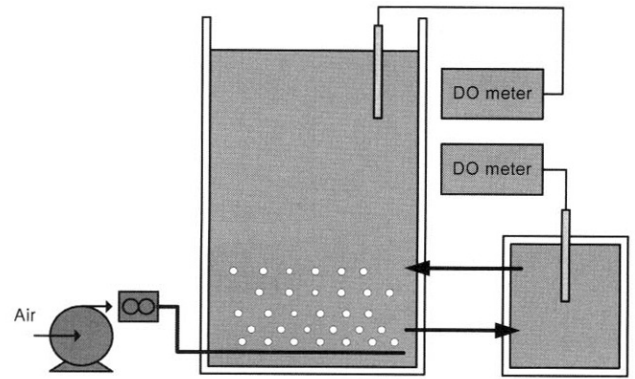


그림 1. 미생물 호흡측정용 반응기

산소(DO, dissolved oxygen) 차이를 통해 무폭기 반응기 내 체류시간 동안의 산소 소모량을 측정하였다. 미생물 호흡 측정용 반응기의 개략도는 그림 1과 같다.

배양슬러지 중 활성 질산화균의 농도는 Ubisi 등(1998)이 제시한 산소 소모율 측정 방법을 통해 슬러지 내 VSS 중 활성 미생물 농도를 추정하는 방법을 이용하여 확인하였다.

일반적으로 생물학적 질산화 과정에서 제거된 질소(ΔN)는 산화에 의해 소모된 양(ΔO_2)과 세포합성에 의해 소모된 양(ΔX)으로 나타낼 수 있다. 특히 질산화균(nitrifier)에 의해 암모니아 이온(NH₄⁺) 1 gN이 질산 이온으로 완전히 산화되는 데는 4.57 gO₂의 산소가 필요하며(EPA, 1993), Henze M. 등(2000)이 제시한 ASM(activated sludge model) No.1에서는 이를 질산화균의 세포 생산계수(Y_A)와 결합하여 산소소모율을 $(4.57 - Y_A)/Y_A$ 의 형태로 나타내고 있다.

따라서 이러한 생물학적 질산화 과정에서의 산소 소모와 질소 산화 및 세포 성장간의 관계를 식 (1)과 같이 정리할 수 있으며, 이를 질산화균의 비성장율(μ_A)과 사멸률(b_A) 및 산소 이용률(OUR, oxygen uptake rate)과의 관계식인 식 (2) 및 (3)으로 전개할 수 있다.

$$S_N + [(4.57 - Y_A)S_O] \rightarrow Y_A \cdot X \quad (1)$$

S_N : 암모늄 이온 농도(mgN/L)

S_O : 용존산소 농도(mgO₂/L)

Y_A : 세포 생산계수(mgVSS/mgN)

X : 질산화균 농도(mgVSS/L)

$$\frac{r_N}{Y_A} = \frac{r_O}{4.57 - Y_A} = \frac{r_X}{1} \quad (2)$$

r_N : 암모늄 이온 소모율

r_O : 용존산소 호흡률

r_X : 질산화균 성장률

$$\ln OUR = \ln \left[\frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \cdot \mu_A \cdot X(0) \right] + (\mu_A - b_A) \cdot t \quad (3)$$

OUR: 미생물 산소이용률(mgO₂/mgVSS/day)

μ_A : 질산화균 비성장률(1/day)

b_A : 질산화균 사멸률(1/day)

t : 시간(day)

식 (3)에서 $\ln OUR$ 을 Y축으로 하고 t 를 X축으로 하여 초기 활성 미생물 농도를 구할 수 있으며, 기울기와 Y 절편을 통해 초기 미생물 농도 $X(0)$ 를 구할 수 있다(신항식

등(a), 2001; 신항식 등(b), 2001).

슬러지 중 활성 질산화균 농도를 추정하기 위한 실험에서 초기 암모늄 이온과 배양된 슬러지 농도는 각각 295 mgN/L, 530 mgVSS/L였다. 30°C, pH 8.3인 조건에서 시간별 질산화 추이를 확인하였으며, 동시에 암모늄 산화에 따른 미생물의 호흡률(OUR)도 측정하였다. 미생물에 의한 호흡률은 시간 경과에 따라 각 시간별 폭기조와 무폭기조 간의 용존 산소 차이 및 무폭기조에서의 체류시간을 고려하여 mgO₂/L/hr의 값으로 산정하였다.

2.2 실험용 반응기 및 실험조건

질산화균과 암모늄 이온의 초기 농도가 질산화에 미치는 영향은 질산화균과 암모늄 이온의 초기 농도를 달리한 회분식 실험을 통해 확인하였다. 회분식 질산화 반응기는 그림 2와 같으며, 유효용적은 1L이고 DO농도는 충분한 폭기를 통해 5 mgO₂/L 이상이 되게 유지시켰다. pH는 NaHCO₃를 투입하여 8.3±0.1을 유지하였으며, 반응기 내 온도는 질산화를 촉진시키기 위해서 30°C로 유지시켰다.

암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도비(N₀/X₀)에 따른 실험은 표 2와 같이 암모늄 이온을 125 mgN/L와 250 mgN/L로 고정하고 질산화균 농도를 달리한 실험과 질산화균 농도를 1,000 mgVSS/L와 2,000 mgVSS/L로 고정하고 암모늄 이온 농도를 달리한 실험으로 나누어 실시하였다.

2.3 분석방법

수질 정상 분석은 시료의 일정량을 분취하여 실시하였으며, 암모늄 이온은 Spectrophotometer(HACH, DR-2000),

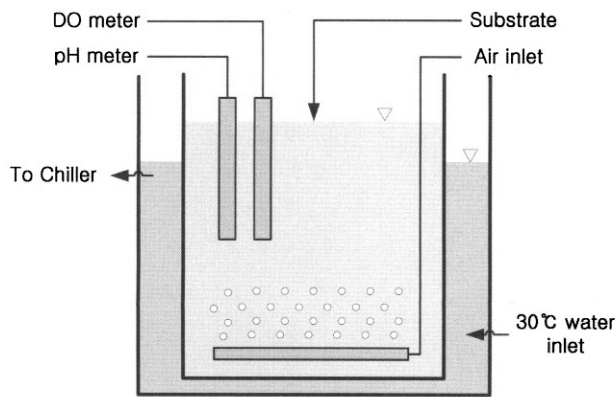


그림 2. 질산화 실험용 회분식 반응기

표 2. 암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도별 질산화 실험조건

		NH ₄ ⁺ & nitrifiers concentration (mgN/L or mgVSS/L)				
A125	NH ₄ ⁺	124	125	126	122	-
	nitrifier	1,000	500	400	250	-
A250	NH ₄ ⁺	255	255	255	247	-
	nitrifier	3,000	2,000	1,000	500	-
N1000	NH ₄ ⁺	27	52	98	199	295
	nitrifier	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N2000	NH ₄ ⁺	50	101	202	404	589
	nitrifier	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000

아질산 및 질산 이온은 Ion chromatograph(DIONEX, DX-80)를 이용하여 분석하였다. 알카리도와 미생물 농도 분석은 Standard methods(APHA, 1998)에 의거하여 분석하였다. 반응기 내 pH는 pH meter(ORION, 420A)를 사용하였으며, 온도 및 DO는 DO meter(ISTEK, 815PDC)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 호흡률을 이용한 배양 슬러지 중 활성 질산화균 농도 측정

배양된 슬러지 내 활성 질산화균 농도를 추정하기 위한 호흡률 실험 결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서와 같이 질산화 초기 30분 동안 OUR은 72 mgO₂/L/hr까지 급격히 상승하였으며, 암모늄 이온이 전량 소모되는 시점인 12시간까지 서서히 증가하여 116 mgO₂/L/hr까지 도달하였다. 이후 OUR은 26 mgO₂/L/hr까지 급격히 하락하였으며, 다시 아질산 이온이 전량 소모되는 22시간까지 서서히 증가하여 34 mgO₂/L/hr에 도달한 후 감소하는 전형적인 질산화균의 OUR 추이를 보였다(Henze M. 등, 2000).

상기결과와 암모늄 이온의 아질산 이온 또는 질산 이온으로의 산화 추이를 고려하여 12시간 이전까지를 암모늄산화균에 의한 호흡률로 하고 12시간 이후부터 21시간까지를 아질산산화균에 의한 호흡률로 구분하였으며, 이러한 호흡률 결과를 질산화 추이와 비교하여 결과의 적절성을 검토하였다.

생물학적 질산화 공정에서 암모늄산화균의 단위 질소 당 산소요구량을 3.4 gO₂/gN으로 했을 때 초기 295 mgN/L의 암모늄 이온을 산화시키기 위해서는 1,003 mgO₂/L의 용존산소가 필요하며, 아질산산화균의 단위 질소 당 산소요구량을 1.1 gO₂/gN으로 했을 때 325 mgO₂/L의 용존산소가 필요한 것으로 예상된다.

이러한 이론적 산소요구량과 실제 호흡률 결과를 비교하기 위해, 호흡률 결과에 의한 산소소모량을 계산하였다. 호흡률 결과에 따른 산소소모량은 Math Works Inc.에서 제공되는 상용수치 해석 프로그램인 MATLAB(ver. 6.5)을 이용하였으며, 시간별 호흡률 결과를 그대로 이용하기 위해 사다리꼴 적분공식(trapezoidal rule)을 이용하였다.

계산결과 각각 951 mgO₂와 304 mgO₂가 소모된 것으로

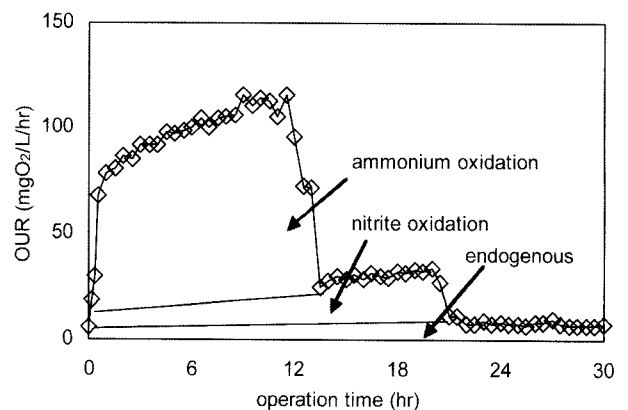


그림 3. 생물학적 질산화에 따른 시간별 호흡률 추이

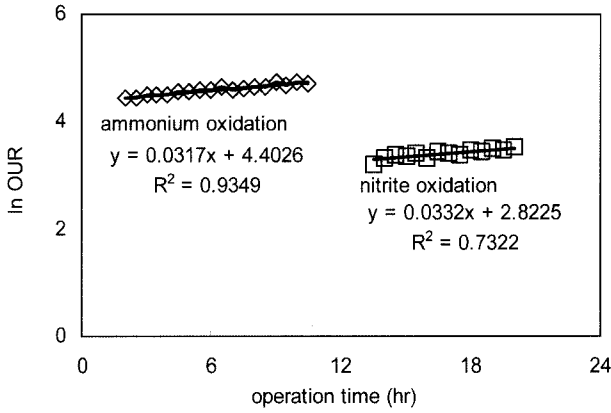


그림 4. 초기 미생물 농도 산정을 위한 호흡률 변환

산정되었으며 이론적 소모량과 비교할 때 각각 5.2%와 6.5% 정도의 오차를 보이는 것으로 나타나 질산화추이에 따른 호흡률 자료는 신뢰할만한 수준인 것으로 판단된다.

초기 미생물 농도의 산정을 위해 시간별 호흡률 결과에 대해 자연로그를 취한 값으로 변환하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

그림 4와 같이 정리된 자료를 통해 각각의 기울기와 y 절편을 구할 수 있으며, 이를 식 (4)에 대입하여 배양된 슬러지 내 활성을 가진 암모늄산화균과 아질산산화균의 농도를 구하여, 그 결과를 표 3에 정리하였다(신항식 등(b), 2001). 활성 질산화균 농도 산정에 사용된 Y_A 및 b_A 값은 Rittmann B.E. 등(2001)이 제시한 값을 이용하였다.

$$X_A(0) = \frac{e^{y-\text{intercept}}}{\frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \cdot (\text{slope} + b_A)} \quad (4)$$

y-intercept : y 절편

slope : 기울기

이와같이 계산된 암모늄산화균은 189.3 mgVSS/L로 전체 530 mgVSS/L의 35.8% 였으며, 아질산산화균은 37.3 mgVSS/L로 전체 VSS의 7.0%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 전체 배양된 미생물 중 활성을 가진 질산화균은 전체 VSS의 42.8%를 차지하며, 활성을 가진 질산화균 중 84%는 암모늄산화균이며, 16%는 아질산산화균인 것으로 추정되었다. 특히 이러한 수치는 신항식 등(b)(2001)이 하수를 처리하는 SBR 공정 내 VSS의 3.6%만이 활성을 가진 질산화균이라고 보고한 결과와 비교해 볼 때, 사용된 질산화균이 고농도로 잘 배양되었음을 보여주었다.

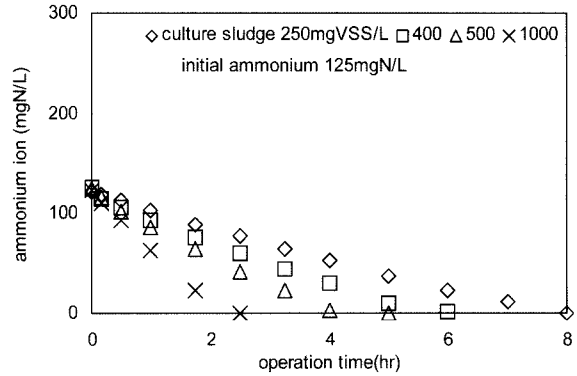
상기 결과는 McCarty P.L.(1964)이 추정된 총 질산화균 중 암모늄산화균과 아질산산화균의 분포비가 각각 77.5%와 22.5% 정도일 것이라는 예상과 다소 차이를 보였으며, 이는 질산화균 배양 조건이 30°C로써 암모늄산화균의 활성이 아질산산화균의 활성에 비해 높은 조건이었기 때문인 것으로 판단된다(원성연, 1999).

표 3. 배양된 슬러지 내 활성 질산화균 농도 산정

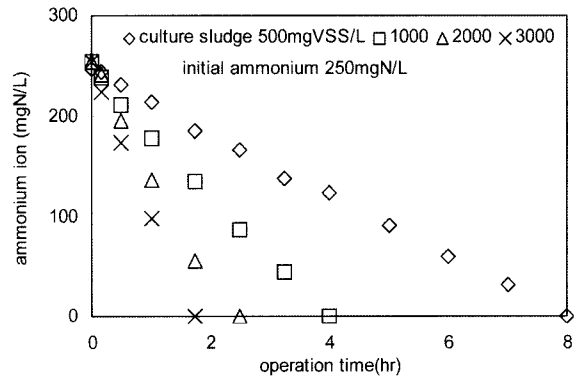
Nitrifier species	slope	y-intercept	Y_A	b_A	X
Ammonium oxidizer	0.0317	4.4026	0.33	0.045	189.3
Nitrite oxidizer	0.0332	2.8225	0.33	0.045	37.3

3.2 질산화 슬러지 농도별 질산화 추이

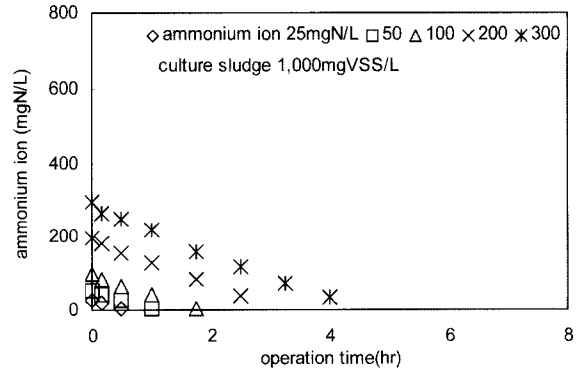
질산화균 농도가 질산화에 미치는 영향을 파악하고자, 초기 암모늄 이온 및 질산화 슬러지 농도를 달리한 조건에서 질산화 추이를 확인하였다. 질산화 실험은 30°C, pH 8.3의 조건에서 초기 암모늄 이온 농도를 125 mgN/L와 250 mgN/L로 고정하고 배양된 질산화 슬러지 농도를 달리한 실험



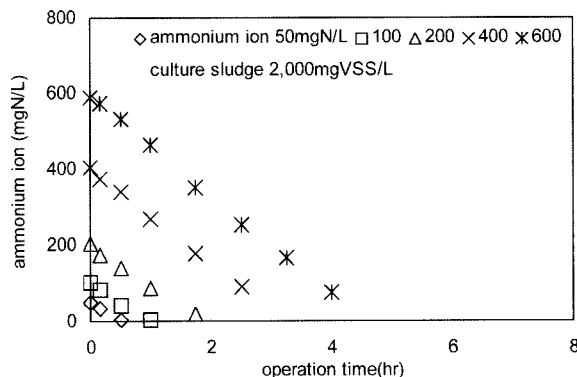
(a) 초기 암모늄 이온 농도 125mgN/L인 조건



(b) 초기 암모늄 이온 농도 250mgN/L인 조건



(c) 초기 배양 미생물 농도 1,000mgVSS/L인 조건



(d) 초기 배양 미생물 농도 2,000mgVSS/L인 조건

그림 5. 배양된 슬러지 초기 농도와 암모늄 이온 농도별 질산화 추이

험과 초기 질산화 슬러지 농도를 1,000 mgVSS/L과 2,000 mgVSS/L로 고정하고 암모늄 이온 농도를 달리한 실험으로 질산화 추이를 조사하였다. 그림 5(a), (b), (c), (d)는 질산화 슬러지 농도와 암모늄 이온 농도별 암모늄 이온 제거 추이를 나타낸 것이다.

실험결과를 살펴보면, 초기 암모늄 이온 농도를 125 mgN/L과 250 mgN/L로 고정하고 질산화 슬러지 농도를 달리한 조건에서는 질산화 슬러지 농도 증가에 따라 암모늄 이온 제거속도 또한 빨라짐을 확인할 수 있었다. 반면 초기 질산화 슬러지 농도를 1,000 mgVSS/L과 2,000 mgVSS/L로 고정하고 암모늄 이온 농도를 달리한 조건에서는 질소농도의 높고 낮음에 상관없이 질산화 슬러지 농도에 따라 기울기가 동일하여 암모늄 이온 제거속도가 유사함을 확인할 수 있었다.

상기 결과들을 정리하여 암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도비 N_0/X_0 가 동일한 조건에서의 질산화 경향을 비교하여 보았다. 그림 6은 여러 질산화 실험 조건 중 초기 암모늄 이온과 배양된 미생물 농도 비(N_0/X_0)가 0.1인 두 가지 조건과 0.3인 두 가지 조건에 대해 초기 미생물 농도 당 암모늄 이온 제거 추이를 비교하여 나타낸 것이다.

초기 암모늄 이온과 미생물 농도 비(N_0/X_0)가 동일한 두 조건의 실험결과를 비교해보면, 초기 암모늄 이온 100 mgN/L과 배양된 미생물 1,000 mgVSS/L인 조건에서 암모늄산화균에 의한 산화율(비기질이용율, q_N)은 1.27 gN/gVSS/day이며, 초기 암모늄 이온 200 mgN/L과 배양된 미생물 2,000 mgVSS/L인 조건에서는 1.26 gN/gVSS/day인 것으로 나타났다. 또한 초기 암모늄 이온 300 mgN/L과 배양된 미생물 1,000 mgVSS/L 인 조건에서 1.58 gN/gVSS/day이며, 초기 암모늄 이온 600 mgN/L과 배양된 미생물 2,000 mgVSS/L 인 조건에서는 1.54 gN/gVSS/day인 것으로 나타났다.

상기 농도비 조건별 질산화 추이 결과에 대해 농도비가 동일한 두 실험결과 간의 상관계수를 검토하였으며, 그 결과 0.1인 두 조건 간의 상관계수는 99.99%이며, 0.3인 조건 간은 99.79%인 것으로 확인되었다. 특히 초기 암모늄 이온 농도가 300 mgN/L과 600 mgN/L인 실험조건에서 Anthonisen 등(1976)이 제시한 식을 통해 FA(free ammonia) 농도를 산정해 보면, 상기 조건은 암모늄산화균의 활성을 저해한다고

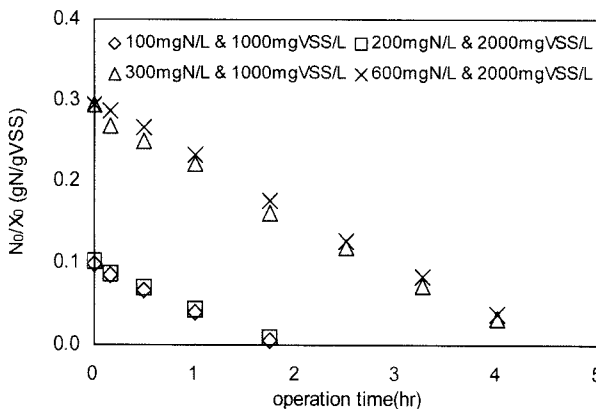


그림 6. 암모늄 이온과 배양된 슬러지의 초기 농도비 별 질산화 추이

알려진 10~150 mgFA/L 범위에 속하는 42.8 mgFA/L와 85.6 mgFA/L임에도 불구하고 비기질 이용율에 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

이 결과는 암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도가 상이하더라도 농도 비(N_0/X_0)가 동일한 두 조건에서는 단위 시간 동안 처리되는 질소량은 질산화균 농도에 비례함을 보여주는 것이다.

3.3 N_0/X_0 비를 이용한 기질이용 속도식 개발

일반적으로 미생물의 비성장속도와 기질 농도간의 관계는 Monod 식의 형태로 나타나지만, 높은 미생물 농도 조건에서 기질제한 성장은 식 (5)와 같이 Contois 식(Contois D.E., 1959)으로 표현될 수 있다. 이 식에서 비성장속도에 비기질 이용율을 대입하고 양변에 미생물 농도로 나누면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\mu = \mu_{Nmax} \frac{N}{K_N X + N} \quad (5)$$

μ_N : 비성장속도 (1/day)

μ_{Nmax} : 최대 비성장속도 (1/day)

X : 미생물 농도 (mgVSS/L)

K_N : 반 포화속도 상수 (mgN/L)

N : 기질 농도 (mgN/L)

$$q_N = q_{Nmax} \frac{N_0/X_0}{K'_N + N_0/X_0} \quad (6)$$

q_N : 비기질이용율 (1/day)

q_{Nmax} : 최대 비기질이용율 (1/day)

K'_N : 수정 반 포화속도 상수 (mgN/mgVSS)

N_0/X_0 : 초기 기질과 미생물 농도 비 (mgN/mgVSS)

N_0/X_0 과 비기질이용율간의 관계식인 식 (6)을 직선식인 식 (7)의 형태로 나타내어 기울기 K'_N/q_{Nmax} 와 y 절편 $1/q_{Nmax}$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{q_N} = \frac{K'_N}{q_{Nmax}} \cdot \frac{1}{N_0/X_0} + \frac{1}{q_{Nmax}} \quad (7)$$

N_0/X_0 과 비암모늄산화율을 직선식 (7)에 대입하여 그래프로 그리면 그림 7과 같으며, 직선식의 R^2 가 0.89로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 그림의 기울기와 y 절편을 이용한 결과, q_{Nmax} 는 4.32 gN/gVSS/day, K'_N 는 0.013 gN/

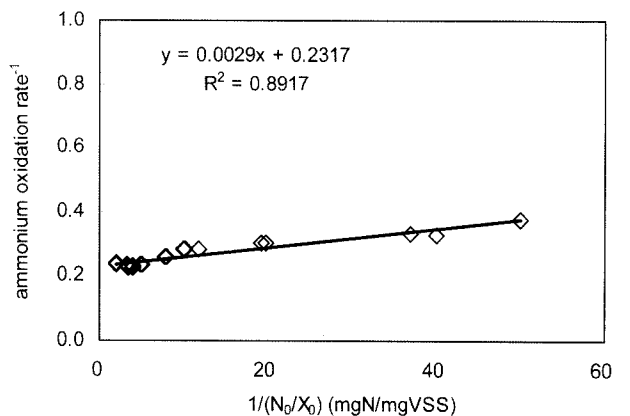


그림 7. N_0/X_0 조건별 비기질이용율을 이용한 K'_N 와 q_{Nmax} 산정

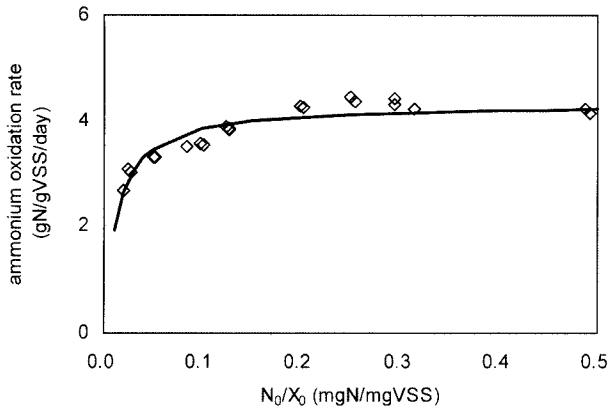


그림 8. N_0/X_0 조건별 비기질이용율 모사

gVSS으로 산정되었다.

산정된 최대 비기질이용율(q_{Nmax})과 단위 미생물 당 반 포화속도 상수(K_N' , K_N/X_0)를 식 (6)에 대입해 초기 암모늄 이온과 암모늄산화균의 농도비에 따른 비기질이용율 곡선을 구하고, 이를 실제 데이터와 비교한 것이 그림 8이다.

그림에서와 같이 N_0/X_0 비에 대한 비암모늄산화율 실험결과와 모사된 추이가 유사하여, 고농도 질소를 질산화 시키기 위하여 고농도 질산화 슬러지를 이용하는 질산화 공정은 높은 미생물 농도조건에서 기질제한 성장을 모사하는 Contois 식으로 표현될 수 있음을 확인할 수 있었다.

이 결과를 통해 저농도 암모늄 이온 농도가 유입되는 조건에서도 질산화 미생물 농도가 낮은 조건에서는 질산화가 진행되지 않을 수 있으며, 본 연구에서와 같이 고농도 암모늄 이온 농도가 유입되는 조건에서도 질산화 슬러지의 농도를 높임으로서 저해없이 질산화가 잘 진행되는 현상을 이해할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 생물학적 질산화 공정에서 암모늄 이온과 활성을 가진 질산화균의 초기 농도가 질산화에 미치는 영향을 확인하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 호흡률을 이용하여 실험에 사용된 질산화 슬러지 농도를 추정하였으며, 그 결과 VSS의 42.8%가 활성 질산화균이었고 활성 질산화균 중 84%가 암모늄산화균, 16%가 아질산산화균으로 나타났다.
2. 암모늄 이온과 질산화균의 초기 농도를 달리한 다양한 N_0/X_0 비에 대해 질산화 실험을 실시하여 N_0/X_0 비가 동일할 경우 비암모늄산화율이 동일하며, N_0/X_0 와 비암모늄산화율간의 관계는 수정 Contois 식의 형태로 표현될 수 있음을 확인하였다.
3. 배양된 질산화균의 VSS 내 활성 암모늄 산화균 분포율 35.7%를 이용하여 수정 Contois 식으로 나타낼 경우, 최대 비암모늄산화율(q_{Nmax})은 4.32 gN/gVSS/day이며 단위 암모늄산화균 당 반 포화속도 상수 (K_N')는 0.013 gN/gVSS인 것으로 나타났다.
4. 고농도 암모늄 이온 농도가 유입되는 조건에서 활성 질산화

균과의 농도비(N_0/X_0)가 본 연구에서 실시된 0.5 이하로 유지될 경우 저해없이 질산화가 진행될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2004년 울산대학교 교내연구과제(2004-0157) 연구비 지원에 의해 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

신항식, 정형석, 남세용(a)(2001) 호흡률 측정법을 이용한 슬러지 내 활성미생물 분율 측정, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제21권 제2-B호, pp. 165-170.

신항식, 정형석, 남세용(b)(2001) 호흡률 측정법을 이용한 생물학적 질산화 과정의 모니터링과 시뮬레이션, **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제23권 제7호, pp. 1177-1184.

원성연(1999) **질산화반응에 미치는 환경인자의 영향**, 박사학위논문, 충북대학교 대학원.

최인철, 박수영, 이관용, 배재호, 조광명(2000) 암모니아 부하가 활성탄 유동상에서의 질산화 및 아질산 축적에 미치는 영향, **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제22권 제1호, pp. 53-60.

한동준, 강성환, 임재명(1998) 고농도 암모니아성 폐수의 질산화 과정에서 아질산염 축적의 영향인자, **대한위생학회지**, 대한위생학회, 제13권 제2호, pp. 128-138.

환경부, 수질보전국(2003) **폐수종말처리시설 방류수수질기준 단계적 강화**.

Anthonisen, A.C., Loehr, R.C., Prakasam, T.B.S., and Srinath, E.G. (1976) Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid, *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, Vol. 48, pp. 835-852.

APHA (1998) *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*, 20th ed., American Public Health Association, New York.

Contois, D.E. (1959) Kinetics of bacterial growth: relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures, *J. Gen. Microbiol.*, Vol. 21, pp. 40-50.

Cooper, P.F. and Williams, S.C. (1990) High rate nitrification in a biological fluidized bed, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 22(1/2), pp. 431-442.

Gupta, S.K. and Sharma, R. (1996) Biological oxidation of high strength nitrogenous wastewater, *Wat. Res.*, Vol. 30(3), pp. 593-600.

Henze, M., Grady, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.v.R., and Matsuo, T. (2000) *Activated sludge model No. 1*, IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment, pp. 5-25.

McCarty, P.L. (1964) Thermodynamics of biological synthesis and growth, *Proceedings of the 11th Int. Conf. on Water Poll. Res.*, Tokyo, Japan, pp. 169-199.

Rittmann, B.E. and McCarty P.L. (2001) *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, McGraw-Hill.

Ruiz, G., Jeison, D., and Chamy, R. (2003) Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration, *Wat. Res.*, Vol. 37, pp. 1371-1377.

Ubsi, M.F., Jood, T.W., Wentzel, M.C., and Ekama, G.A. (1997) Activated sludge mixed liquor heterotrophic active biomass. *Water SA.*, Vol. 23(3), pp. 239-247.

U.S. EPA (1993) *Manual of nitrogen control*, EPA/625/R-93/010, Washington DC, USA.

(접수일: 2006.2.28/심사일: 2006.5.16/심사완료일: 2006.5.16)