

# 알칼리도 제어에 의한 SBR 반응조에서의 부분아질산화 Partial Nitritation in an SBR Reactor by Alkalinity Control

이 창 규  
Chang-Kyu Lee

한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 환경연구실  
Construction Environmental Research Division, Water Resources &  
Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

(2013년 4월 11일 접수, 2013년 4월 26일 채택)

**Abstract :** In this study, major parameter of partial nitritation was investigated for the stable operation. In order to establish partial nitritation system, prevailing parameters such as temperature, BA (bicarbonate alkalinity) and pH were evaluated. As a result, it is inferred that appropriate bicarbonate alkalinity ratio ( $\text{mg NaHCO}_3 \cdot \text{L}^{-1} / \text{mg Inf. NH}_4^+ \cdot \text{N} \cdot \text{L}^{-1}$ ) drives stable 50% partial nitritation at 32°C and ambient temperature, respectively. Alkalinity ratio was proposed as new strategy for 50% partial nitritation without pH control in both temperature regimes. Because of the results, it was added amount of BA required only for 50% nitritation to inhibit nitration. The effluent  $\text{NO}_2^- \cdot \text{N} / \text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  ratio reached almost 100% when initial bicarbonate alkalinity ratios ( $\text{mg NaHCO}_3 \cdot \text{L}^{-1} / \text{mg Inf. NH}_4^+ \cdot \text{N} \cdot \text{L}^{-1}$ ) were 6.8 (R1) and 6.7 (R2), respectively. Polymerase chain reaction and denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE) results demonstrated that AOB was the dominant nitrifying bacteria and NOB was negligible after adopting process control.

**Key Words :** Partial Nitritation, ANAMMOX, AOB, NOB, Alkalinity

**요약 :** 혐기성 암모늄 산화공정 전처리로써 적절한  $\text{NO}_2^- \cdot \text{N} / \text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  반응비율에 맞는 유출수를 생성하기 위한 연구실 규모의 연속 회분식 반응기 시스템을 적용하였다. 부분아질산화 적용에 있어서 운전인자들을 이용하여 AOB를 활성화하고, 동시에 NOB를 억제하는 다양한 전략이 있다. 하지만 적용된 인자들은 명확히 정의되지 않고 아질산 축적에 있어서 극복할 점이 있다. 본 연구의 목적은 부분아질산화의 주 인자를 조사하여 안정적인 공정을 구축하는데 있다. 부분아질산화 시스템을 구축하기 위하여 우선적인 인자인 온도, 중탄산알칼리도, pH를 평가하고자 한다. 실험의 결과로써 알맞은 알칼리도 비가 35°C와 상온 두가지 온도범위에 안정적인 50% 부분아질산화가 이루어졌다. 이는 질산화시 필요한 알칼리도를 50% 아질산화에 맞추어 주입하여 질산화과정을 억제하는 것이다. 알칼리도 비는 pH 조절없이 50% 부분아질산화의 전략으로 제안한다. 유출수의  $\text{NO}_2^- \cdot \text{N} / \text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  비가 거의 100%에 다다랐을 때 중탄산알칼리도는 각각 6.8, 6.7이 되었다. PCR-DGGE의 미생물 분석 결과 암모늄산화균이 지배적인 질산화균임을 알 수 있었으며 NOB는 억제되어 활성을 잃은 것으로 사료된다.

**주제어 :** 부분아질산화, 혐기성 암모늄 산화, 암모늄산화균, 아질산산화균, 알칼리도

## 1. 서론

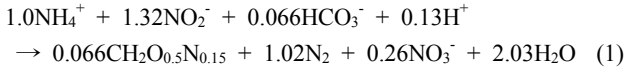
최근 인구증가, 도시화 및 산업화에 따라 고농도의 질소와 인이 포함된 하폐수가 다양한 형태로 과도하게 강이나 호수로 유입되면서 수질이 악화되어 부영양화를 초래하게 된다. 또한 환경에 대한 인식이 고조되어 하수처리장 방류수 수질기준도 1일 50 m<sup>3</sup> 이상 하수처리용량의 공공하수처리시설에서 총질소(TN) 20 mg/L 이하로 낮아져 더욱 엄격하게 관리되고 있어 하수처리에서 질소, 인 처리의 중요성이 대두되고 있다.<sup>1)</sup>

하·폐수 공정 내의 생물학적 질소제거는 물리·화학적 공정에 비해 높은 효율과 경제성을 갖추어 보편적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 축산농가나 매립지에서 다량의 고농도 암모니아성 질소가 하수처리장으로 유입되어 2차 생물학적 질소처리공정에서 처리하여야 하는 질소의 농도가 20% 증가하여 처리비용이 증가한다.<sup>2)</sup> 축산폐수와 같은 고농

도의 암모니아성 질소 유입수를 처리하기 위해 최근 혐기성 암모늄 산화(ANAMMOX, ANaerobic AMMonium OXidation) 균을 이용한 공정이 각광받고 있다. ANAMMOX균은 기존 질산화-탈질공정과 달리 자가영양생물로 탈질시 필요한 유기물이 요구되지 않으며 유기물의 경우 ANAMMOX균을 억제시키는 역할을 한다. 또한 암모니아성 질소와 아질산성 질소를 기질로 하여 질소를 제거하기 때문에 폭기공정에 소요되는 운영비용을 50%를 절감할 수 있는 큰 장점이 있다.<sup>3)</sup> ANAMMOX는 혐기성 및 독립영양 조건에서 식 (1)과 같이 암모니아성 질소뿐만 아니라 아질산성 질소를 기질로 동시에 소모하여 N<sub>2</sub> 가스로 탈질시키기 때문에 유입수의 암모니아성 질소를 약 50%만을 산화시켜 아질산성 질소로 전환시켜야 한다. 이때 관여하는 암모늄산화균(AOB, Ammonium Oxidation Bacteria)과 아질산산화균(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>·N 대비 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>·N 기질농도를 1 : 1 비율로 생성해서 공급해야 하고 이러한 전처리 과정을 부분

† Corresponding author E-mail: changkyu@kict.re.kr Tel: 031-910-0507 Fax: 031-910-0291

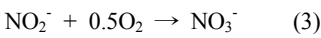
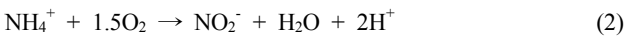
아질산화(PN, Partial Nitritation)이라고 한다.<sup>4,5)</sup>



AOB와 NOB는 일종의 편리공생으로 AOB가 암모니아성 질소를 아질산성 질소로 산화시키면 즉시 NOB가 질산성 질소로 산화시키기 때문에 생물학적 환경조건이 비슷하여 동시에 AOB의 활성화와 NOB의 억제시키는 것에 어려움이 있다.<sup>6-8)</sup>

AOB와 NOB를 적절히 제어하여 아질산화를 유도하기 위한 주요 운전조건을 연구된 문헌고찰 결과 온도, pH, HRT, DO, COD, FA (Free Ammonia), FNA (Free Nitrous Acid), 중탄산알칼리도, hydroxylamine 등이 영향을 미치는 것으로 확인되었다.<sup>9,10)</sup>  $\text{NH}_4^+$ -N를  $\text{NO}_2^-$ -N로 100% 산화시킨 후 2배로 희석하여 1:1의 비율을 맞추어 PN/ANAMMOX 공정 유입수로 적용할 수 있지만 알칼리도, FA, FNA 등의 영향이 증대되기 때문에 PN/ANAMMOX 결합공정에 적합하지 않고 에너지적인 면에 있어서도 50%의 아질산성 질소를 축적하여 후속공정 ANAMMOX의 반응비율을 맞추는 방법이 더욱 적절하다고 판단된다.<sup>11)</sup>

AOB는 호기성 및 독립영양 조건에서 식 (2)과 같이 1.5 mol의  $\text{O}_2$ 를 소모하여  $\text{NO}_2^-$ 와  $\text{H}^+$ 를 생산하는 산화공정이며 NOB는 식(3)과 같이 산화된 암모늄을 질산성 질소로 산화시킨다. 부분아질산화 반응을 고농도 축산폐수에 적용했을 시 pH가 지속적으로 감소되며 식 (4)~(5)에 따라 FA와 FNA는 각각 급격히 감소, 증가되어 질산화균이 FA와 FNA의 억제를 받아 활성이 저하된다. FA, FNA 영향인자에 대한 여러 연구결과는 조금씩 상이한 결과를 보이고 있지만 AOB는 pH 7 이상, FA 10 mg/L 이상일 때 억제를 받고, NOB는 pH 7 이하, FNA 0.2 mg/L 이상의 낮은 농도에서부터 활성을 저해 받는다고 보고되었다.<sup>12-14)</sup> 온도 조건에 있어서는 AOB는 중온성 세균이며 0.3 mg/L의 낮은 DO 범위에서 활성을 보이며, NOB는 호냉성 세균으로 저온에서도 증식이 가능하며 AOB보다 높은 1.1 mg- $\text{O}_2$ /L의 농도에서 활성을 보인다.<sup>15)</sup>



$$[\text{NH}_3\text{-N}]_{\text{free}} = [\text{TAN}][10^{\text{pH}}]/[\text{K}_a/\text{K}_w] + 10^{\text{pH}} \quad (4)$$

$$\text{K}_a\text{K}_w = \exp[6334/(273 + t)]$$

TAN = Total ammoniacal nitrogen  
 = ammonium + free ammonia

$\text{K}_a$  = Ionization constant for ammonium  
 (e.g.,  $\text{K}_a$  at 20°C =  $10^{-9.24}$ )

$\text{K}_w$  = Ionization constant for water  
 (e.g.,  $\text{K}_w$  at 20°C =  $0.69 \cdot 10^{-14}$ )

t = temperature in °C

$$[\text{HNO}_2\text{-N}]_{\text{free}} = [\text{NO}_2^-\text{-N}]/\text{K}_n[10^{\text{pH}}] \quad (5)$$

$$\text{K}_n = \exp[-2300/(273 + t)]$$

$\text{K}_n$  = Ionization constant for nitrous acid  
 (e.g.,  $\text{K}_n$  at 20°C =  $10^{-3.4}$ ).

본 연구에서는 알칼리도를 이용하여 질산화균인 AOB, NOB의 제어를 통해 ANAMMOX 공정에 적합한  $\text{NO}_2^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 농도비를 운전조건을 도출하는데 목적이 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 부분아질산화 유입기질

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 으로 질소 기질농도를 조절하였고 기본 배지는 Feng<sup>16)</sup>의 조성을 변용하여 Table 1과 같이 조성하였다. 미량 원소 용액은 제조하여 4°C의 냉장고에 보관하여 합성 폐수 제조시 1 mL/L씩 투입하였다. 암모니아 농도는 450 mg  $\text{NH}_4^+$ -N/L에서 1,650 mg  $\text{NH}_4^+$ -N/L까지 농도를 증가시키면서 진행하였고 유기 기질은 첨가하지 않았다.

### 2.2. 연속회분식반응기

SBR(연속 회분식 반응조)은 Fig. 1과 같이 아크릴 재질의 부피 400 mL(높이 240 mm, 지름 180 mm)로 제작되었고 온도, pH, 알칼리도 영향을 보기 위해 두 개의 반응조를 운전하였다. D시 200 mL의 2차 반응활성슬러지를 식중하였고 200 mL의 암모니아를 포함한 합성폐수를 주입하였다.

암모니아 질소 농도를 최대 1.65 kg-N/ $\text{m}^3$ /day까지 질소 부하율을 적용하였다. 중속영양세균의 과잉성과 암모니아 산화균의 wash-out을 방지하기 위해 기질은 6시간 간격으로 10분

Table 1. Composition of synthetic wastewater containing 1,000 mg N- $\text{NH}_4^+$ /L

Compound	Concentration (mg/L)
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4,714
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	90
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	150
$\text{NaHCO}_3$	6,000
Trace solution	1 mL/L
$\text{EDTAH}_2\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50,000
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2,200
$\text{CaCl}_2$	5,540
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5,060
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5,000
$(\text{NH}_4)_6\text{Mg}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1,100
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1,570
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1,900
KOH	to pH 6

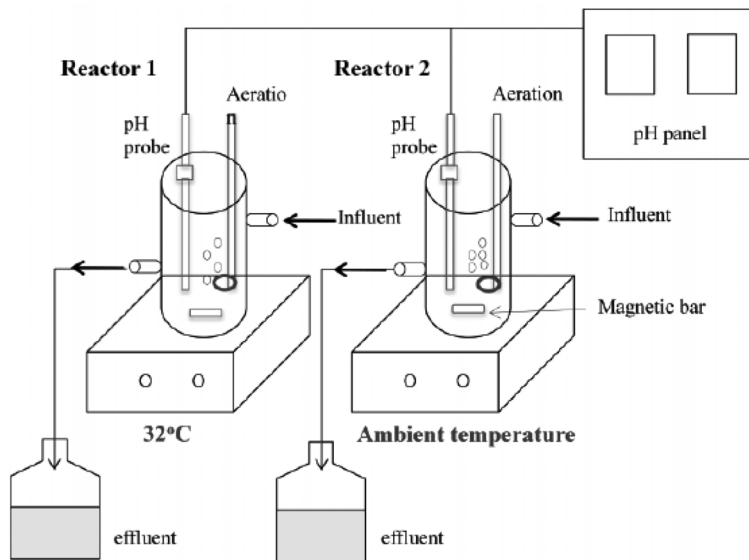


Fig. 1. Schematic diagram of SBR reactor for the partial nitritation process.

간 fill-and-draw 방식의 회분식으로 주입하였다. 마그네틱 바를 이용하여 100 rpm의 속도로 교반하였으며 pH는 별도의 조절없이 알칼리도를  $\text{NaHCO}_3$ 의 양으로 조절하여 운전하였다.

배양기의 운전온도는  $32 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 조건과 상온조건(AT, Ambient Temperature)으로 온도 영향을 평가하였다.

### 2.3. 미생물 분석-PCR-DGGE

미생물 중 분석을 위해 DNA는 두 반응기의 슬러지 샘플을 각각 채취하여 Ultraclean Soil DNA Kit (Cat# 12800-50; Mo Bio Laboratory Inc., USA)에 투입후 제조사의 설명서 따라 DNA를 추출하였다. 정제된 16 S rDNA는 PCR (polymerase chain reaction) 기기를 사용하여 증폭시켰다. 프라이머로 EUB 357f ( $5'$ -CCTACGGGAGGCAGCAG- $3'$ )를 사용하였고 GCclamp ( $5'$ -CGCCCCGCGCGCCCCGCGCCCCGGCCGCCCGCCCCGCCCC- $3'$ )가 포함되었다. PCR 증폭 조건은 automated thermal cycler (MWG-Bio TECH, Germany)의 프로토콜을 이용하여 pre-heating ( $94^\circ\text{C}$ , 4분), denaturing ( $95^\circ\text{C}$ , 20초), annealing ( $55^\circ\text{C}$ , 40초), extension ( $72^\circ\text{C}$ , 60초), final extension ( $72^\circ\text{C}$ , 8분)이었고, denatureing, annealing, extension 과정을 30회 반복하였다. 증폭산물은 100 V에서 1 X TAE 용액에서 20분간 전기영동하였다. DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis)은 제조사의 설명서에 따라 Decode Universal Mutation Detection System (BioRad, USA)을 사용하였다. PCR로 증폭된 샘플은 polyacrylamide gel (7.5%)에 주입되어  $60^\circ\text{C}$ 의 1 X TAE buffer 용액에서 70V로 480분 동안 전기영동하였다. UV transilluminator를 이용하여 각 밴드를 추출후 DNA purification을 진행하였다. 최종적으로 Solgent Inc. (Korea)에 송부하여 BLAST 프로그램으로 GeneBank 데이터베이스를 이용하여 샘플의 염기서열을 분석하였다.<sup>17)</sup>

### 2.4. 분석방법

암모니아성 질소 농도는 Standard Method<sup>18)</sup>에 기술된 방법으로 분석하였고 아질산성 질소와 질산성 질소 분석을 위해 ion chromatography (Dionex 120, USA)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 암모늄 질산화 특성

질소 부하 영향에 따른 질소 제거 추이를 Fig. 2~3에 나타내었다.  $458 \text{ mg-NH}_4^+\text{-N/L}$ 의 초기 암모니아 농도로 합성 폐수를 제조해  $32^\circ\text{C}$  (R1) and AT (R2)에 주입하였다. 아질산성 질소는 중온반응조인 R1에서 유입수 투입 후 바로 생성되었다. 상온 반응조인 R2는 start-up 후 일주일부터 아질산성 질소가 생성되기 시작되었다. 실험이 진행되면서 아질산성 질소의 축적이 비슷한 경향을 보였으며 실험을  $1,650 \text{ mg-NH}_4^+\text{-N/L}$ 까지 암모니아의 농도를 증가시키면서 진행하였다.

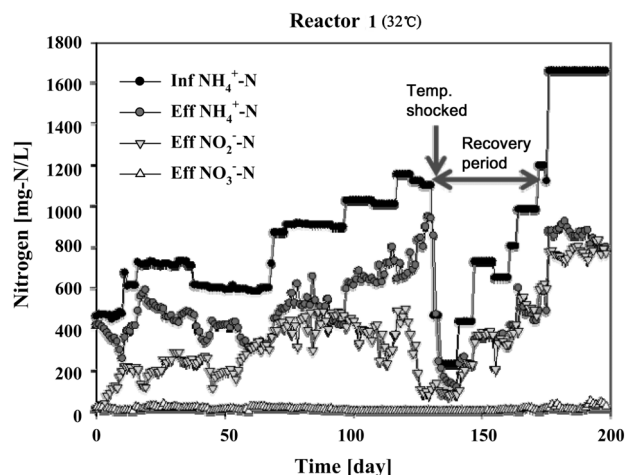


Fig. 2. Partial nitrification performance in R1.

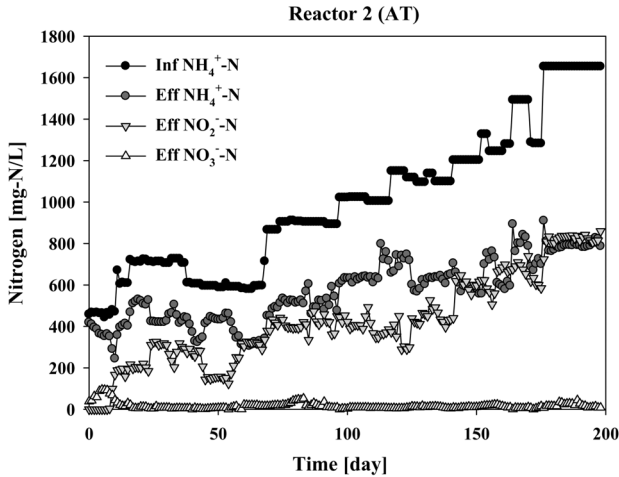


Fig. 3. Partial nitrification performance in R2.

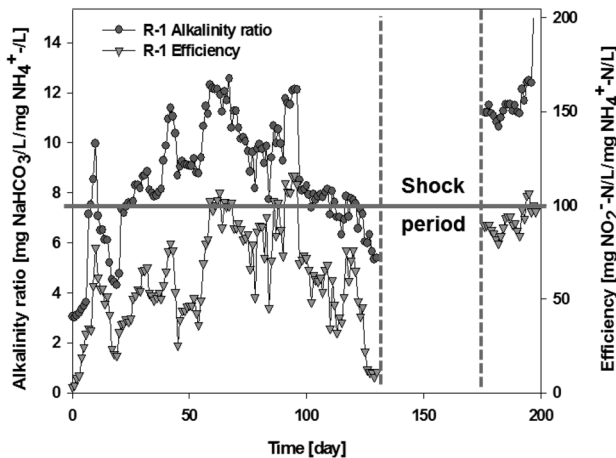


Fig. 4. Alkalinity ratio (mg NaHCO<sub>3</sub>/L/mg eff. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/L) with nitrification efficiency in R1.

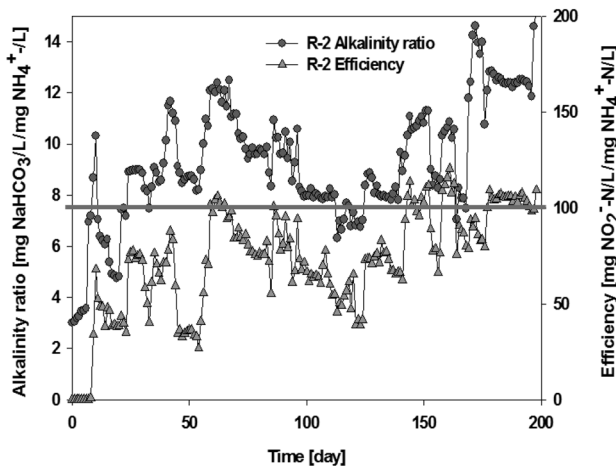


Fig. 5. Alkalinity ratio (mg NaHCO<sub>3</sub>/L/mg eff. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/L) with nitrification efficiency in R2.

초기 단계의 운전 기간(58일까지)에 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도비는 두 반응기에서 약 0.46으로 유사하게 나왔으며 이는 AOB의 활성반응이 활발하게 나타나지 않았다고 사료된다. 실험 결과 질산성 질소가 최대 29 mg/L을 넘지 않았고 이는 NOB

활성이 감소하였다고 판단할 수 있다. 아질산 축적률(NAR, Nitrite Accumulation Rate = effluent NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N \* 100%)은 운전을 시작한 첫 주를 제외하고 항상 90% 이상을 유지하였다. 유출수 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비가 100%에 도달하면 질소 부하율(NLR, Nitrogen Loading Rate)을 증가시켰다.<sup>19)</sup> 아질산 축적률은 운전 시작일부터 58일까지 평균 각각 98.5, 97.2%로 높게 나타냈다. 58일 이후 기간에서는 HRT를 24시간으로 고정하여 1,650 mg-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/L까지 증가시켰다. 운전 124일째 온도 센서의 고장으로 R1의 반응기온도가 40℃까지 상승하여 미생물이 쇼크 상태가 되었으며 약 2주 후 141일째부터 정상적으로 돌아와 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비가 각각 95, 98%를 나타냈었다. 100%의 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비와 낮은 질산성 질소의 농도는 후속공정 ANAMMOX의 이상적인 기질 조건이다.

Fig. 4, 5는 전체 부분아질산화 공정에서 알칼리도에 따른 아질산화 효율을 나타내었는데 유입수의 고농도의 암모늄이 질산화되어 중탄산 유입량 대비 유출수 암모늄 비가 12일 때 효율이 높은 것을 알 수 있다. 안정적인 부분아질산화가 진행될 때 유입수의 암모늄 농도가 질산화에 의해 암모늄 농도가 50% 감소하여 중탄산 유입량 대비 유입수 암모늄 비보다 2배 증가하였다. 하지만 이는 같은 수치로 판단할 수 있으며 부분아질산화-아나모кс 공정을 실 적용할 경우 유입수의 암모늄 농도와 알칼리도를 측정하여 적절하게 유입수 암모늄 대비 알칼리도를 유지하여 운전한다면 안정적인 공정 운영을 할 수 있을 것이라고 기대된다.

### 3.2. BA (bicarbonate alkalinity)에 따른 아질산화 영향

58일 후 초기 BA/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비를 약 2.7에서 5.4로 증가시켰으며 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 반응비율은 약 0.9까지 상승하여 안정적인 기질조건을 나타내었다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 부하농도를 1.0~1.2 kg-N/m<sup>3</sup>/d까지 증가시키고 BA의 투입량을 유지한 결과 암모늄 질산화율이 급격히 저하되었으며 이는 암모니아성 질소의 질산화에 필요한 BA 농도가 부족한 것으로 판단된 R1에서 온도센서의 오작동으로 온도가 40℃까지 상승하였으며, 그에 따른 미생물에 heat-shock 발생으로 질소부하를 200 mg-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/L로 감소시켜 운전하였다. BA 농도를 높여 R1 (32℃), R2 (AT)에서 각 BA/Inf NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N를 6.5로 운전한 결과 Oxidized NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/ Inf. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비가 0.48, 0.49로 적절하게 유출수가 생산됐다.

Fig. 6에 암모니아성 질소의 알칼리도에 따른 질산화율과 pH의 관계를 나타내었다. 유입기질의 BA (bicarbonate alkalinity)가 50%의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N를 산화하는데 소모되는 알칼리도보다 적을 경우 pH가 급격하게 저하되어 유출수 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비가 감소하는 것을 알 수 있다.<sup>20,21)</sup> NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 질산화율은 반응조 pH 변화를 보면 관련이 큰 것을 알 수 있다. 초기 유입수의 pH가 6시간 주기마다 pH 8에서 pH 6까지 급격히 떨어지거나 pH 7.5에서 pH 5.0까지도 큰 폭으로 떨어졌다. 이는 질산화에 있어 BA가 우선적으로 소모되고

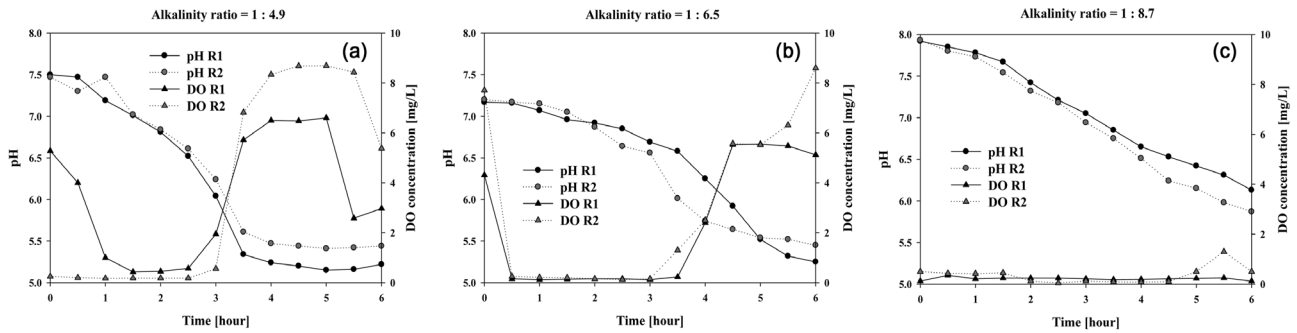


Fig. 6. Track experiments at different alkalinity ratios ((a) 1 : 4.9, (b) 1 : 6.5, (c) 1 : 8.7).

Table 2. Alkalinity ratio as operational strategy for 50% partial nitrification

Temperature (°C)	Alkalinity ratio (mg NaHCO <sub>3</sub> ·L <sup>-1</sup> /mg Inf. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N·L <sup>-1</sup> )	Oxidation ratio (Oxidized NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ Inf. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)	Effluent NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ratio
32	3.1	21.0	22.9
	4.6	35.1	52.5
	5.6	41.1	74.0
	6.8	48.4	101.2
AT	3.1	23.5	19.5
	4.6	44.4	70.5
	6.7	49.3	99.0

고농도 암모니아 질소의 질산화 과정에서 발생한 많은 양의 H<sup>+</sup>가 배출되어 pH가 급격히 떨어진 것으로 판단된다.

BA/Inf. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N를 8.7로 6.5 이상에서 운전하였을 경우 BA가 pH 완충역할을 하여 한 주기가 완료되는 시점까지 질산화가 일어났다(Fig. 6(c)). BA/Inf NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 적정비라고 판단되는 6.5 이하인 4.9에서는 질산화가 일찍 완료되어 pH가 5.5에서 유지되는 것을 볼 수 있었으며 질산화 반응이 멈추면 DO가 상승하는 것을 관찰하였다(Fig. 6(a)). BA/Inf. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비가 4.9일 때와 8.7일 때 유출수 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 경우 R1에서는 각각 0.88, 1.60이었으며 R2에서는 각각 0.67, 1.10이었다(Table 2).

### 3.3. 온도에 따른 아질산화 영향

부분아질산화가 실험이 진행되면서 두 반응조의 색깔을 변화하는 것을 관찰하였다. R1의 슬러지 색깔은 식종한 슬러지의 색깔인 어두운 갈색에서 밝은 갈색으로 변화하였으며 R2은 옅은 분홍색의 색깔을 띄었다. AT 조건에서는 다른 질산화 그룹이 성장했을 것으로 추정되어 PCR-DGGE를 진행하였다. 그 결과 Fig. 7과 같은 이미지를 얻었다. gel의 A, B 밴드가 같은 것을 확인하고 모든 밴드의 DNA를 추출하여 DNA 분석을 실시하였다. DNA 분석 결과 R1, R2의 A 밴드에서 공통적으로 AOB인 *Nitrosomonas sp.*를 식별하였고 NOB와 관련된 균은 발견하지 못했다. 슬러지 색깔의 변화는 나머지 미생물에 의한 것으로 판단된다(Table 3).

32°C AT

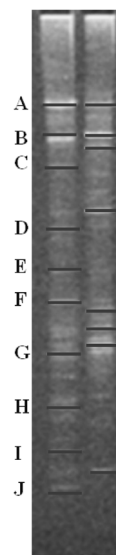


Fig. 7. DGGE image at different temperature regime.

Table 3. Affiliation of DGGE fragments determined by their 16 S rDNA and isolated microorganisms

Band	Affiliation	Similarity (%)	Sample (°C)
A	<i>Nitrosomonas sp.</i>	95%	35, AT
B	<i>Uncultured Flexibacter sp.</i>	96%	35, AT
C	<i>Uncultured Acidithiobacillus sp.</i>	81%	35
D	<i>Uncultured Helicobacter sp.</i>	81%	35
E	<i>Methylovorus sp.</i>	95%	35
F	<i>Deinococcus sp.</i>	92%	35
G	<i>Pseudoxanthomonas sp.</i>	94%	35
H	<i>Deinococcus sp.</i>	90%	35
I	<i>Uncultured Crocinitomix sp.</i>	95%	35
J	<i>Uncultured Acidobacterium sp.</i>	96%	35
K	<i>Empedobacter sp.</i>	97%	AT
L	<i>Segetibacter sp.</i>	99%	AT
M	<i>Rhodanobacter sp.</i>	97%	AT
N	<i>Burkholderia sp.</i>	93%	AT
O	<i>Rhodanobacter sp.</i>	93%	AT
P	<i>Uncultured Crocinitomix sp.</i>	97%	AT

#### 4. 결론

부분아질산화 반응기는 약 200일 동안 고농도의 합성 암모니아 폐수를 적용하여 운전되었다. 본 연구의 결과를 통해 SBR 생물반응기는 상온과 중온 조건에서 ANAMMOX 공정에 적합한 50%로 부분아질산화 처리되는 것을 보여준다. 미생물 군집에 있어서 PCR-DGGE를 통해 *Nitrosomonas sp.*의 AOB 군집을 식별하였으며 NOB는 활성이 억제되어 유출시 wash-out되어 발견되지 않을 것을 사료된다. 이는 1.65 kg-N/m<sup>3</sup>/day의 고농도 질소부하까지 아질산 축적률이 각각 98, 97.3%의 높은 수치를 유지한 이유라고 할 수 있다. 안정화된 부분아질산화 운전 기간에서 유출수의 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N비는 평균 1.00 ± 0.19이었으며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N는 12.2 mg/L로 낮은 농도를 유지되었다. 낮은 DO를 유지하기 위해 공기주입은 유량을 최소화하여 운전되어 0.5 mg-O<sub>2</sub>/L 이하로 유지하였다.

적정한 중탄산알칼리도의 유입수를 주입하는 것은 안정적으로 부분아질산화를 운전하기 위해 가장 중요한 요소이다. 그러므로 하수 암모니아 농도에 맞게 중탄산을 하수 유입 초기에 투여하는 것이 필요하다고 판단된다. 장기 운전결과 최적 중탄산알칼리도는 암모니아 농도대비 중탄산 주입량으로 약 6.8로 산정되었다. 질산화 추적 실험에서는 암모늄 질산화에 의해 중탄산이 대부분 소모되었을 경우 pH가 급격히 저하됨에 따라 AOB의 활성이 억제되어 한 주기 중간에 반응속도 급격히 감소되는 것을 발견하였다. 한 주기내에서 중탄산알칼리도를 과량 주입한 경우 질산화가 한 주기 6시간내에 지속적으로 일어나 질산화 축적율이 과도하게 높아지게 되었다. 적정한 알칼리도가 산정하여 공정 적용될 경우 반응 시간, pH, 유출수 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 비까지 pH 조절없이 후단 ANAMMOX 공정에 적합하게 될 것으로 판단된다. 또한 부분아질산화 공정은 고농도의 DO와 높은 온도가 아닌 환경조건에서도 적용할 수 있다고 사료된다.

#### 사사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업((12주요-임무) 마이크로그리드 물 재이용 기술 개발(2차)(2012-0016-1-1))의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

#### 참고문헌

1. Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, D. H., Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse, 4th Ed. McGraw-Hill, New York(2003).
2. Kazuichi, I., Saxhiko, Y., Tatsuo, S., Yuhei, I. and Satoshi, T, "Nitrification of landfill leachate using immobilized nitrifying bacteria at low temperatures," *Biochem. Eng. J.*, **37**, 49~55

- (2007).
3. Kartal, B., van Niftrik, L., Rattray, J., van de Vossenberg, J. L., Schmid, M. C., Sinnighe Damst, J., Jetten, M. S. and Strous, M., "Candidatus 'Brocadia fulgida': an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium," *FEMS Microbiol. Ecol.*, **63**(1), 46~55(2008).
4. van Dongen, L. G. J. M., Jetten, M. S. M. and van Loosdrecht, M. C. M., The combined Sharon/Anammox process, STOWA Report, IWA Publishing London, UK(2001).
5. Ganigué, R., López, H., Balaguer, M. D. and Colprim, J., "Partial ammonium oxidation to nitrite of high ammonium content urban landfill leachates," *Water Res.*, **41**, 3317~3326 (2007).
6. van de Graaf, A. A., de Bruijn, P., Robertson, L. A., Jetten, M. S. M. and Kuenen, J. G., "Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor," *Microbiol.*, **142**(8), 2187~2196(1996).
7. Ahn, Y. H. and Choi, H. C., "Corrigendum to Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration," *Proc. Biochem.*, **41**, 1945~1950(2006).
8. Hwang, I.-S. and Min, K.-S., "Partial nitrification of wastewater with strong N for anaerobic nitrogen removal," *Tans. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **28**, 414~420(2006).
9. Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S. and Srinath, E. G., "Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **48**(5), 835~852 (1976).
10. Kim, J. H., Guo, X. J. and Park, H. S., "Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation," *Proc. Biochem.*, **43**, 154~160(2008).
11. Hellinga, C., Schellen, A. A. J. C., Mulder, J. W., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen J. J., "The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonia-rich wastewater," *Water Sci. Technol.*, **37**, 135~142 (1998).
12. van de Graaf, A. A., de Bruijn, P., Robertson, L. A., Jetten, M. S. M. and Kuenen, J. G., "Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor," *Microbiol.*, **142**(8), 2187~2196(1996).
13. Strous, M., van Gerven, Z. P., Kuenen, J. G. and Jetten, M. S. M., "Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in different reactor configurations," *Water Res.*, **31**, 1955~1962(1997).
14. Strous, M., Kuenen, J. G. and Jetten, M. S. M., "Key physiology of anaerobic ammonium oxidation," *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 3248~3250(1999).
15. Isaka, K., Yoshie, S., Suimino, T., Inamori, Y. and Tsuneda, S., "Nitrification of landfill leachate using immobilized nitrifying bacteria at low temperatures," *Biochem. Eng. J.*, **37**, 49~55(2007).
16. Feng, Y.-J., Tseng, S.-K., Hsia, T.-H., Ho, C.-M. and Chou, W.-P., "Partial nitrification of ammonium-rich wastewater as

- pretreatment for anaerobic ammonium oxidation (Anammox) using membrane aeration bioreactor," *J. Biosci. Bioeng.*, **104**, 182~187(2007).
17. Bae, H. and Jung, J.-Y., "Qualitative and Quantitative Analysis of Microbial Community Structure in the Sequencing Batch Reactor for Enriching ANAMMOX Consortium," *Tans. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**, 919~926(2009).
  18. APHA, WEF and ASCE, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Eds., Washington DC, USA(1998).
  19. Aslan, S., Miller, L. and Dahab, M., "Ammonium oxidation via nitrite accumulation under limited oxygen concentration in sequencing batch reactors," *Bioresour. Technol.*, **100**, 659~664(2009).
  20. Wett, B. and Rauch, W., "The role of inorganic carbon limitation in biological nitrogen removal of extremely ammonia concentrated wastewater," *Water Res.*, **37**(5), 1100~1110 (2003).
  21. Guisasola, A., Petzet, S., Baeza, J.A., Carrera, J. and Lafuente, J., "Inorganic carbon limitations on nitrification: experimental assessment and modeling," *Water Res.*, **41**, 277~286 (2007).