

## 상업용 질산화 박테리아의 성장특성과 활성슬러지 공정에서의 적용 방법에 따른 연구

### A Study on the Growth Characteristics of Commercially Developed Nitrifying Bacteria and its Application to Activated Sludge Process

황규대\* · 이봉희

Gyu-Dae Whang\* · Bong-Hee Lee

경희대학교 환경공학과

(2006년 4월 24일 논문 접수: 2006년 8월 8일 최종 수정논문 채택)

#### Abstract

The growth characteristics of Commercially Developed Nitrifying Bacteria (CDNB) were studied in laboratory-scale. CDNB, a pure, artificially isolated bacterium, was cultivated to produce Cultivated Nitrifying Bacterium Group (CNBG). The average ammonia removal rate of CDNB was 0.0234g  $\text{NH}_4^+\text{-N/g MLSS/hr}$ . CNBG was produced in the batch reactor and Specific Nitrification Rate (SNR) was determined at 0.0107g  $\text{NH}_4^+\text{-N/g MLSS/hr}$ . The SNR of CNBG was lower than the SNR of CDNB because the diverse and multi-cultured microbial growth took place during cultivation. The effect of the temperatures and the mixing ratios of sewage and culture solution on the SNR of CNBG was studied. The SNR of CNBG, 0.0107g  $\text{NH}_4^+\text{-N/g MLSS/hr}$  at 27°C, decreased to 0.0048g  $\text{NH}_4^+\text{-N/g MLSS/hr}$  at 15°C, and temperature coefficient ( $\theta$ ) was calculated to be 1.07. With the varied sewage mixing ratios, the SNR of CNBG remained unchanged. Activated sludge reactors maintaining an MLSS of 2,000mg/L at HRT of 4 h were operated under conditions in which dosage of Concentrated CNBG Solution (CCNBGS, 10,000mg MLSS/L) and application method of CNBG were varied. The reactor with 20mL of CCNBGS took shorter time to oxidize  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  reaching 1mg/L than the reactor with 5mL of CCNBGS showing that higher dosages were associated with greater mass removal of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ . However, the total removal was not great. In terms of different methods of CNBG application, reactor seeded with 20mL of CCNBGS took 3days to reach 1mg/L of effluent ammonia concentration while reactor dosed with 20% (v/v) CNBG implanted media took 2days. Both the control reactor and the reactor dosed with 20% (v/v) media only did not reach 1mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$  after operating 18days. The reactor with CNBG implanted media had the highest  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal rate because of maintaining high concentration of Nitrifying Oxidizing Bacteria (NOM), and is regarded as an appropriate method for the activated sludge process.

**Key words:** Nitrifying bacteria, Nitrification, Fluidized bed, SNR

**주제어:** 질산화 세균, 질산화, 유동상 담체, 비질산화율

\*Corresponding author Tel: +82-31-201-2431 Fax: +82-31-201-4589, E-mail: gdwhang@khu.ac.kr (Whang, G.D.)

## 1. 서 론

우리나라의 하수종말처리장은 2003년 말 현재 242 개소가 가동되고 있으며(환경부, 2003), 대부분이 BOD와 SS를 제거하는 2차 처리공정을 이용하고 있어 무기영양염류의 제거는 미생물의 세포합성(동화작용)에 사용되는 양만으로 이루어져 제거효율이 저조하여 고도처리 시설로의 개조가 요구되는 실정이다. 특히 무기영양염류 중 질소성분은 2차 처리만으로 완전히 제거되지 않고 강이나 호소로 유입될 경우 암모니아에 의한 어류독성, 수중의 용존산소 결핍, 부영양화 등을 야기 시킨다.

질소성분을 제거하는 방법으로는 처리비용이 높은 물리·화학적 처리 방법보다는 생물학적 처리방법이 주로 사용되고 있다. 생물학적 처리 방법으로는 질소성분을 미생물 동화작용(Anabolism)을 이용하는 방법과 질산화 세균에 의해 암모니아성 질소를 아질산성 질소(Nitrite)로 산화시키고 다시 질산성 질소(Nitrate)로 산화시키는 질산화 과정을 거쳐 탈질 세균에 의해 환원되어 아질산 가스 또는 질소가스로 대기 중으로 방출시키는 질산화·탈질법이 있다(Paul and Clark, 1989).

Painter 등 (1970)은 질산화 세균의 성장수율(Y)은 0.06g VSS/g N, 최대 비성장률( $\mu_{max}$ ;  $d^{-1}$ )은 0.46~1.86(30°C)로 처리 공정 내 존재하는 종속영양 미생물의 생성률과 성장률 보다 매우 낮다고 보고하였다. 또한 질산화 세균은 유기물의 농도가 높을 경우 공간경쟁과 산소경쟁에서 종속영양세균(Heterotropic bacteria)에게 뒤져 우점화 되지 못하는 것으로 알려져 있다(Focht and Verstraete, 1997).

질산화 세균은 한번 저해를 받게 되면 암모니아 산화능력을 회복하는데 많은 시간이 필요할 뿐만 아니라 온도변화에 매우 민감한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 겨울철 수온의 저하로 인해 질산화 세균의 성장에 영향을 받기 때문에 질산화 세균의 암모니아성 질소 산화능력을 증가시키기 위해서는 충분한 SRT(Solid Retention Time)를 유지해 주어야 한다.

EPA Manual (1993)에서는 하수처리장에서 질산화 반응을 유도하기 위해서는 SRT를 7일 이상으로 유지할 것을 권고하고 있다. 질산화 세균의 성장을 위해

SRT를 길게 유지할 경우 슬러지 농도증가에 따라 포기조의 산소 소비율이 높아지고 침전조의 고형물부하 증가로 인하여 침전조의 수표면적을 증가 시켜야 한다. 또한 질산화 세균과 유입수내 암모니아성 질소의 접촉시간을 증가시키기 위해 HRT를 길게 유지하기 위해서는 반응조의 부피가 커지는 단점이 생기게 된다. 근래 들어 활성 슬러지 공정에서 생물학적으로 암모니아성 질소 산화율을 높이기 위한 방법으로 질산화 세균을 분리·배양하여 처리 공정 내 투여하는 방법들이 개발되어지고 있다(서, 1998).

본 연구에서는 질산화 효율이 낮거나 질산화 반응에 저해가 야기된 시설에서 질산화 효율을 짧은 기간에 높이기 위하여 적용될 수 있는 상업용 질산화 세균(Commercially Developed Nitrifying Bacteria, CDNБ)의 성장특성을 관찰하고 배양된 질산화 세균(Cultivated Nitrifying Bacterium Group, CNBG)을 일반 활성슬러지 공정에 적용하여 배양된 질산화 세균군의 적용성에 대해 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 회분식 반응조

상업용 질산화 세균을 배양, 배양된 질산화 세균군의 온도변화와 하수혼합비율에 따른 비질산화율을 안정하기 위해 유효 용적이 7L인 원통형 반응기를 사용하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 상업용 질산화 세균 제조사가 제시한 최적의 성장조건을 유지하기 위하여 반응기 하단부에는 질산화 과정에 소비되는 산소를 공급하기 위해 산기석을 설치하였으며 유량계를 사용하여 DO 농도가 7mg/L가 되게 포기량을 조절하였

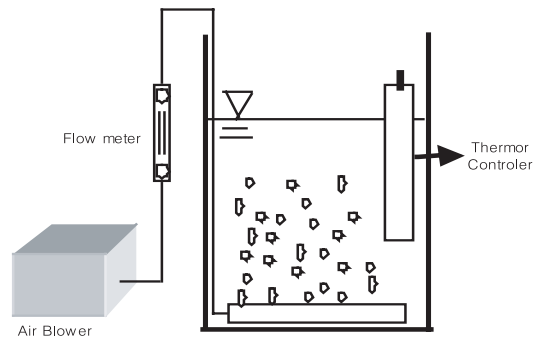


Fig. 1. Schematic diagram of an aerobic reactor for CDNБ growth.

다. pH는 1N NaOH와 1N의 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하여 8.0 ± 0.5로 유지시켰으며, 질산화 세균이 성장하기 위한 최적 온도를 유지하기 위해 온도조절장치를 반응기 상부에 설치하여 27 ± 1.0°C로 일정하게 유지시켰다.

2.1.1 상업용 질산화 세균의 배양 실험

상업용 질산화 세균의 배양 시 성장 특성을 알아보기 위해 유효용량이 7L인 회분식 반응조에 수돗물 5L를 채운 후 상업적 목적으로 생산된 *Nitrosomonas* sp.가 농축된 용액 100mL와 *Nitrobacter* sp.가 농축된 용액 100mL를 반응조에 투입하고 미생물의 성장에 필요한 에너지원으로써 *Nitrosomonas* sp.와 *Nitrobacter* sp.의 특성에 맞게 제작된 용액 #1 100mL, 용액 #2 100mL, *Nitrosomonas* sp.와 *Nitrobacter* sp.의 성장에 공통적으로 필요한 영양분을 공급하기 위해 제조된 흰색 분말 25g을 함께 투입하여 약 2주간 배양하였다. 배양기간 동안 매일 동일한 시간에 샘플을 채취하여 질산화 세균이 포함된 미생물의 농도와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도를 측정하여 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도 감소에 따른 질산화 세균의 증가율을 산정하였다.

배양된 질산화 세균군의 비질산화율을 산정하기 위해 배양 반응조 내에 NH<sub>4</sub>Cl로 초기 암모니아 농도를 약 67mg/L가 되게 한 뒤 시간에 따른 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도변화를 측정하였다. 반응조의 운전조건은 상업용 질산화 세균의 배양 운전조건과 동일하게 수행되었다.

2.1.2 운전온도 및 하수성상 변화의 영향

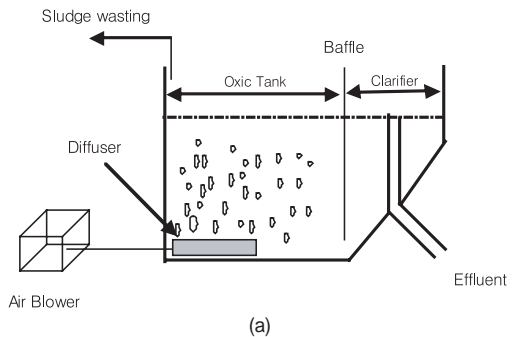
운전온도가 배양된 질산화 세균군의 비질산화율에 미치는 영향을 알아보기 위해 회분식 배양 반응조의 온도를 27°C 에서 각각 20°C, 15°C로 변화시켜 온도 변화에 따른 배양된 질산화 세균군의 비질산화율을 산정하였다.

하수 혼합비율이 배양된 질산화 세균군에 미치는 영향을 알아보기와 경기도 S시 환경사업소 내 최초 침전지의 월류수와 배양조에서 고액 분리된 상등수의 비율을 각각 9 : 1, 8 : 2, 7 : 3, 5 : 5로 혼합하여 4 개의 회분식 반응조에 각각 1L용량으로 채운 뒤 고액 분리된 질산화 세균군 농축액(MLSS 농도 약 10,000mg/L)을 각각의 반응조에 10mL씩 투입하여 반응조 내 질산화 세균의 농도가 약 100mg/L가 되도록 하였다.

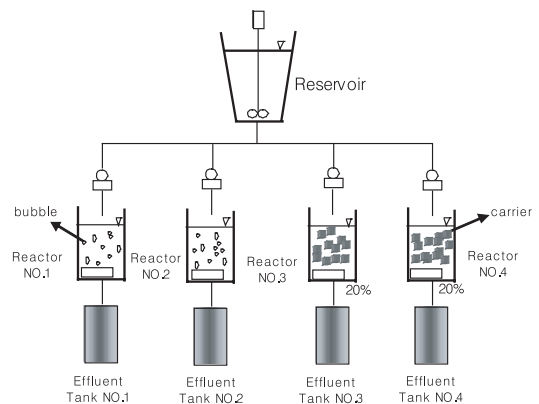
이때 NH<sub>4</sub>Cl을 이용하여 각각의 회분식 반응조에 초기 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도를 약 32mg/L가 되게 조정하였다.

2.2. 연속식 반응조

배양된 질산화 세균군 농축액 주입량에 따른 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 제거율과 적용 방법에 따른 효율성을 비교하기 위하여 포기조 용량이 5L, 침전지 용량이 2L인 아크릴 재질의 연속식 반응조를 운전하였다. 포기조와 침전지는 Baffle에 의해 분리되고 포기조 하부에 설치된 산기석으로 공기를 주입하여 형성된 유동으로 침전지에 침전된 슬러지의 내부순환이 이루어지게 하였으며 Fig. 2에 나타내었다. HRT를 4시간으로 운전하였으며, 온도는 20°C, DO 농도는 3~4mg/L, pH는 7.5 ± 1.0로 각각 유지되었다. 실험에 사용된 담체는 폴리우레탄(Polyurethane) 재질로 공극율 95%이



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Activated sludge reactor profile (b) Flowchart of the modified activated sludge processes.

Table 1. Operating conditions of two sets of four parallel reactors varied dosages of CCNBGS

|   | Set 1     |     |      |      | Set 2   |     |      |      |
|---|-----------|-----|------|------|---|-----|------|------|
|   | R1        | R2  | R3   | R4   | R1  | R2  | R3   | R4   |
| pH                                      |           |     |      |      | 7.5 ± 1   |     |      |      |
| DO                                      |           |     |      |      | 3~4mg/L   |     |      |      |
| Temperature                             |           |     |      |      | 20°C  |     |      |      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N loading |           |     |      |      | 0.167kgNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/m <sup>3</sup> · day |     |      |      |
| MLSS                                    | 2,000mg/L |     |      |      | 3,000mg/L   |     |      |      |
| CCNBGS                                  | -         | 5mL | 10mL | 20mL | -   | 5mL | 10mL | 20mL |

고 한 변의 길이가 10~20mm인 정육면체 형상으로 미생물이 부착이 용이하고 미생물에게 유기물과 용존 산소가 효과적으로 전달 될 수 있도록 되어 있다. 식종슬러지(Seed sludge)로 처리수의 NO<sub>2</sub>-N이나 NO<sub>3</sub>-N의 농도가 매우 낮게 유지되어 질산화 반응이 뚜렷하게 나타나지 않는 하수처리장의 반송 슬러지 (MLSS 농도 약 9,000mg/L)를 이용하였으며, 슬러지를 식종하기 전 증류수를 사용하여 3번 세척하여 수돗물과 혼합하여 이용하였다.

#### 2.2.1 배양된 질산화 세균군 농축액 주입량에 따른 영향

배양된 질산화 세균군 농축액의 주입량에 따른 질산화 효율을 추정하기 위하여 총 4개의 연속식 반응조를 운전하였으며 각 반응조의 운전조건을 **Table 1**에 나타내었다. 4개의 연속식 반응조에 MLSS 농도가 약 2000mg/L가 되도록 슬러지를 식종한 뒤 배양된 질산화 세균군 농축액 (Concentrated CNBG Solution, CCNBGS: 10,000mg MLSS/L)을 대조 반

응조 #1을 제외한 반응조 #2, #3, #4에 각각 약 5mL, 10mL, 20mL씩 투여하여 시간에 따른 유출수의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도 변화를 관찰한 뒤 완전한 질산화 반응에 소요되는 시간을 파악하였다. 또한 연속식 반응조 내의 슬러지 농도 변화에 따른 차이점을 관찰하기 위해 동일한 운전조건에서 MLSS 농도를 3000mg/L로 증가시켜 운전하였다.

#### 2.2.2 배양된 질산화 세균군 효용성 비교 실험

배양된 질산화 세균군의 적용방법에 따른 효용성을 알아보기 위하여 총 4개의 반응조에 활성슬러지(약 2,000mg MLSS/L)를 식종한 후, 반응조 #1을 제외한 반응조 #2에는 질산화 세균군 농축액을 20mL 투여하였으며 반응조 #3에는 유동상 담체를 20% 충전하였고 반응조 #4에는 배양된 질산화 세균군이 부착된 담체를 20% 충전하였으며, 각 반응조의 운전 조건을 **Table 2**에 나타내었다.

반응조 운전기간 동안의 유입수의 TSS 농도는 130~160mg/L의 범위로 평균 142mg/L로 나타났으

Table 2. Operating conditions of four activated sludge reactors dosed with different applications

|             | R1 | R2          | R3                 | R4                                   |           |
|-------------|----|-------------|--------------------|--------------------------------------|-----------|
| pH          |    |             |                    |                                      | 7.5 ± 1   |
| Temperature |    |             |                    |                                      | 20°C      |
| DO          |    |             |                    |                                      | 3~4mg/L   |
| HRT         |    |             |                    |                                      | 4hours    |
| SRT         |    |             |                    |                                      | 10days    |
| MLSS        |    |             |                    |                                      | 2,000mg/L |
| Application | -  | CCNBGS 20mL | 20% (v/v)<br>Media | 20% (v/v)<br>CNBG implanted<br>Media |           |

**Table 3.** Characteristics of municipal wastewater

| Item (Unit)                     | Concentration (mg/L) | Mean (mg/L) |
|---------------------------------|----------------------|-------------|
| pH                              | 7.2~7.7              | 7.4         |
| Alkalinity                      | 150~250              | 185         |
| TSS                             | 130~160              | 142         |
| TCOD <sub>cr</sub>              | 242~301              | 275         |
| SCOD <sub>cr</sub>              | 64~105               | 88          |
| TBOD <sub>5</sub>               | 180~200              | 190         |
| TKN                             | 26.4~32.1            | 30.4        |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | 22.4~28.1            | 25          |
| NO <sub>2</sub> -N              | 0~0.05               | 0.03        |
| NO <sub>3</sub> -N              | 0~0.2                | 0.1         |

며 TCOD<sub>cr</sub>의 농도는 242~301mg/L 범위로 평균 275mg/L로 나타났다. 유입수의 TSS 농도가 유기물 농도에 미치는 영향을 COD<sub>cr</sub>량으로 계산한 결과 1.3g COD<sub>cr</sub>/g TSS로 높게 나타나 입자성 물질 대부분이 COD<sub>cr</sub>을 유발하는 물질로 나타났다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 22.4~28.1mg/L의 범위로 평균 26.4mg/L로 나타났으며, TKN 농도는 26.4~32.1mg/L의 범위로 평균 30.4mg/L로 나타났다. 김 등 (1993), 김 (2004), 전 등 (2004)이 운전한 활성슬러지 공정의 유입수 COD/TKN 비인 3.9~4.9와는 다른 9.16으로 나타났는데, 이는 유입수를 채취한 하수처리장이 분리식 관거로 정비된 지역의 하수가 유입되고 또한 간헐적으로 음식물 쓰레기 처리장 침출수가 유입되어 유기물의 비율이 증가되어 나타난 결과로 사료되며, 유입수 성상을 Table 3에 나타내었다.

2. 3. 분석방법

시료의 성상 분석을 하기 위하여 pH, DO, MLSS, Ammonia, Nitrite, Nitrate은 환경공정오염시험법과 Standard Methods에 나타난 방법을 이용하여 측정하였으며, 각 실험 항목에 대한 측정 방법을 Table 4에 나타내었다.

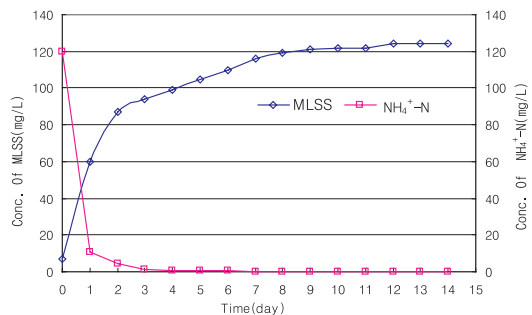
**Table 4.** Items and methods for sample analysis

| 분석항목                            | 분석방법  |
|---------------------------------|---|
| DO                              | Standard Methods(Membrane electrode method) |
| pH                              | 수질오염공정시험법(이온전극법)                            |
| NO <sub>2</sub> -N              | 수질오염공정시험법(흡광광도법, 디아조화법)                     |
| NO <sub>3</sub> -N              | 수질오염공정시험법(흡광광도법, 부루신법)                      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | Nessler methods(HACH)                       |

3. 실험결과 및 고찰

3. 1. 상업용 세균의 배양

상업용 질산화 세균의 성장특성을 알아보기 위해 27°C에서 질산화 세균이 포함된 상업용 농축액을 배양하였다. 질소원으로 사용된 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 배양 초기에 약 120mg/L에서 24시간 후 약 11mg/L로 급격히 감소하였다. 이후 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 서서히 감소하여 3일후에 약 1.4mg/L로 약 99%의 감소율을 나타내었으며 4일후에는 약 0.7mg/L로 감소되어 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 배양 4일 만에 완전히 산화되어 질산화 세균의 성장에 필요한 에너지원으로 활용되었음을 알 수 있었으며, 2주간 배양된 질산화 세균이 포함된 미생물의 농도와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 초기에 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 감소율이 높게 나타나는 이유는 배양액 중에 질산화 세균의 비율이 높고 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도가 고농도로 유지되었을 뿐만 아니라 질산화 세균이 성장하는데 최적 조건이 유지되었기 때문으로



**Fig. 3.** NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and MLSS concentration-time profiles in an aerobic batch reactor for CDNB growth.

사료된다.

질산화 세균이 포함된 상업용 농축액의 배양기간 동안 미생물의 농도는 초기 7mg/L에서 2일 후 87mg/L로 급격히 증가한 후 이 후 완만한 추세로 증가하여 8일 후 119mg/L로 증가하였다. 이 후 미생물의 농도는 아주 느린 속도로 증가하여 14일 후에는 124mg/L로 증가하여 전체 증가의 약 80%가 초기에 일어나는 것으로 나타났다. 박 등 (1998)은  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 을 10mg/L첨가한 배지에서 28°C의 온도로 AOB (Ammonia Oxidation Bacteria)를 배양한 결과 암모니아 산화세균은 배양 초기부터 빠른 증식속도와 동시에 암모니아 산화속도를 나타내었다고 보고하여 본 연구의 결과와 동일한 결과를 나타내었다.

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 초기 120mg/L에서 1일후 11mg/L로 급격히 감소하였으며, 이후에도 암모니아의 급격한 감소가 없음에도 불구하고 MLSS는 꾸준히 증가하였다. 이는 초기 기질농도에 의해 결정된 비성장계수가 기질이 제거될 때 까지 일정하게 유지되었기 때문으로 사료된다. 또한  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 완전히 제거된 4일 이후에도 미생물의 농도가 완만하게 증가되었는데 이는 질산화 세균뿐만 아니라 질산화 세균이 성장 혹은 자산화 과정에서 생성되는 유기물을 이용하는 종속영양 세균까지 생성되었기 때문으로 사료된다.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도가 120mg/L에서 0.7mg/L로 완전히 산화된 14일 동안에 MLSS 농도는 7mg/L에서 124mg/L로 증가되어 배양중인 질산화 세균 미생물에 의해 산화된  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 평균 제거율은 질산화 세균 평균 농도 53mg/L를 이용할 경우 약 0.0234mg  $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg MLSS}/\text{hr}$ 로 나타났다. 배양기간 동안  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  제거량과 증가된 MLSS 량으로 반응조내 미생물의 성장수율(Y)을 산출한 결과 0.980mg  $\text{MLSS}/\text{mg NH}_4^+\text{-N}$ 로 나타나 Painter 등 (1970)의 연구에서 보고된 0.06mg  $\text{VSS}/\text{mg NH}_4^+\text{-N}$ 보다 매우 높았으며, 이러한 차이는 배양된 질산화 세균에는 질산화 세균만 존재하는 것이 아니라 미생물 농축액의 특성, 투여된 Medium의 성상 등에 따라 질산화 세균 뿐만 아니라 여러 종류의 미생물이 배양기간에 접종되어 성장하였기 때문으로 사료된다. 운전 종료 후 MLVSS의 농도는 약 95mg/L로 MLVSS/MLSS의 비율은 약 0.77로 나타나 일반 활성슬러지의 MLVSS/MLSS비와 비슷하였다.

### 3. 2. 배양된 질산화 세균군의 비질산화율

배양된 질산화 세균군이 활성도를 유지하는지 여부를 파악하기 위해 배양액의 초기  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도를 67mg/L가 되도록 조정 한 뒤 회분식 반응조를 운전하였다. 운전초기 약 67mg/L 이었던  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 운전 48시간 후에 약 1.4mg/L로 나타나 약 98%의 제거율을 나타내는 것으로 관찰되었으며 Fig. 4에 나타내었다. 이때 배양된 질산화 세균군의 MLSS 농도는 124mg/L에서 132mg/L로 증가하였다. 비질산화율은 평균 MLSS 농도인 128mg/L을 사용하여 산정한 결과, 0.0107g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{g MLSS}/\text{hr}$ 로 나타나 보고된 일반 활성슬러지의 SNR값인 0.00133~0.00604g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{g MLSS}/\text{hr}$ 과 Randall 등 (1991)이 제시한 BNR공정에서의 SNR값인 0.0015~0.0072g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{g MLSS}/\text{hr}$ 의 값과 Jetten 등 (1996)이 제시한 유동상 담체반응기에서 0.0021~0.011g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{g MLSS}/\text{hr}$ 의 값을 비교했을 때 월등히 높은 SNR값을 나타내었다. 이는 MLSS 농도로 나타낸 배양된 질산화 세균군에는 질산화 세균이 높은 비율로 존재하고 있을 뿐만 아니라 반응조 온도를  $27 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 유지하고 pH를 질산화 세균의 성장에 최적인  $8.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였기 때문으로 사료된다. 산정된 비질산화율 값인 0.0107g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{g MLSS}/\text{hr}$ 는 배양중인 질산화 세균군의 비질산화율인 0.0234g  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{g MLSS}/\text{hr}$ 보다 낮게 나타났으며, 배양된 질산화 세균군의 성장수율(Y)을 산출한 결과 0.122mg  $\text{MLSS}/\text{mg NH}_4^+\text{-N}$ 로 나타나 상업용 세균의 배양기간 동안의 성장수율보다 낮게 나타났다. 이는 상업용 질산화 세균 배양액에 포함되었던 질산화 세균 성장에 필요한 여러 가지 영양물질이 소진되어 질산화 세균의 성장

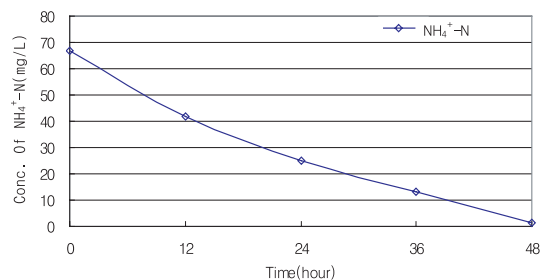


Fig. 4.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration-time profile in an aerobic batch reactor for CNBG activity.

이 충분이 이루어지지 못하였고 배양된 질산화 세균 군 MLSS 농도 중에는 질산화 세균뿐만 아니라 증속 영양미생물의 비율도 증가되었기 때문으로 사료된다.

### 3.3. 온도와 하수 성상에 따른 비질산화율

온도 변화가 배양된 질산화 세균이 포함된 미생물의 비질산화율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 운전온도를 27°C에서 각각 20°C, 15°C로 변화시켜 회분식 반응조를 운전하였다. 초기  $NH_4^+-N$  농도를 약 67mg/L가 되도록  $NH_4Cl$ 을 적정량 투여하였다.

반응기내 수온을 20°C로 낮췄을 때  $NH_4^+-N$ 의 농도는 운전 72시간 만에 0.7mg/L로 감소되어 27°C로 운전된 경우에 비하여 24시간이 더 소요되었다. 이때 평균 MLSS 농도인 135mg/L를 이용하여 계산된 비질산화율은 0.0067g  $NH_4^+-N$ /g MLSS/hr로 나타나 비질산화율이 현저히 감소되는 것으로 나타났다. 15°C로 운전된 경우  $NH_4^+-N$ 를 모두 산화 시키는데 소요된 시간은 98시간으로 측정되었다. 이때 평균 MLSS 농도 140mg/L를 이용하여 계산된 비질산화율은 0.0048g  $NH_4^+-N$ /g MLSS/hr로 산출되었고 배양된 질산화 세균군은 보고된 것과 같이 온도변화에 따라 민감한 활성도 변화를 나타내었다. 온도보정계수( $\theta$ ) 값을 계산한 결과 약 1.07로 산정되었으며, 온도가 다른 조건에서 시간에 따른 암모니아 농도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

하수와 배양액 상등수의 혼합비율을 9:1, 8:2, 7:3, 5:5로 다르게 하여 반응조를 운전한 결과 초기  $NH_4^+-N$ 의 농도는 32mg/L이었으며  $NH_4^+-N$ 의 농도가 약 1.7mg/L로 감소하는데 소요되는 시간은 하수의 혼합비율이 높은 반응조 #1이 52시간, 반응조 #2가 52시간, 반응조 #3이 54시간, 반응조 #4는 58시간으로 나타나 혼합비율이 낮아질수록 소요되는 시간은 증가하는 것으로 나타났으나 그 증가폭은 매우 작은 것으로 나타났으며, 하수만을 주입한 반응조 #5에서는 60시간까지  $NH_4^+-N$ 의 농도가 1.7mg/L 이하로 감소하지 않았으며, 하수와 배양액 상등수의 혼합비율이 다른 조건에서 시간에 따른 암모니아 농도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 운전기간 중 측정된 MLSS 농도의 평균값을 이용하여 비질산화율을 측정 한 결과 0.0052~0.0057g  $NH_4^+-N$ /g MLSS/hr 범위의 값으로 나타났으며 하수의 혼합비율이 높을수록 높은

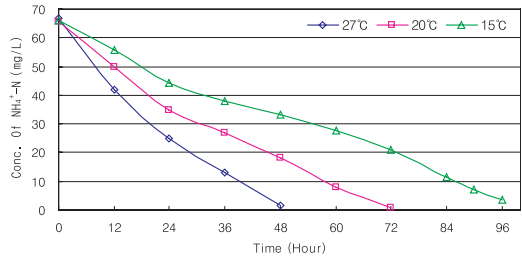


Fig. 5.  $NH_4^+-N$  concentration-time profiles in terms of varied temperatures.

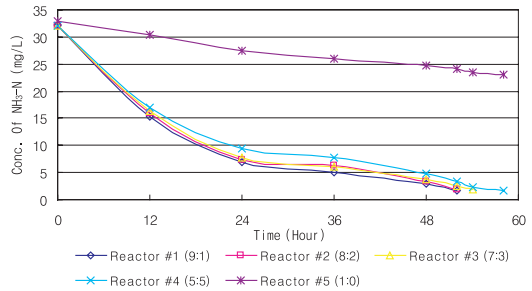
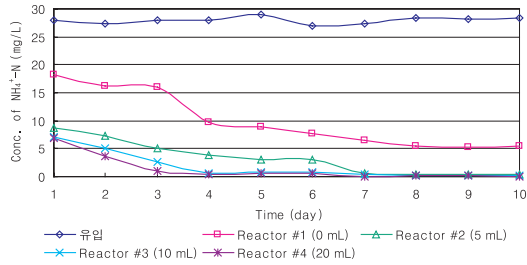


Fig. 6.  $NH_4^+-N$  concentration-time profiles in terms of varied ratios of sewage (S) and culture solution (CS); the parentheses above reactors are the volume based ratios of sewage and culture solution (S:CS).

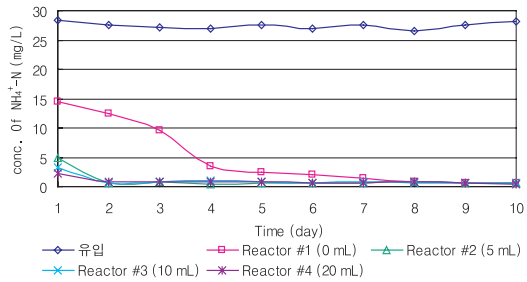
비질산화율을 나타내었으나 하수의 혼합비율이 비질산화에 미치는 영향은 미미하였다. 배양된 질산화 세균군은 하수의 혼합변화에 대하여 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타나 배양된 질산화 세균군을 처리장 생물 반응조에 직접 투여하여도 동일한 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

### 3.4. 질산화 세균군 농축액의 주입량에 따른 $NH_4^+-N$ 제거

배양된 질산화 세균군의 투여량에 따른  $NH_4^+-N$  제거율을 조사하기 위하여 반응조의 MLSS 농도가 각각 2,000mg/L, 3,000mg/L로 유지된 반응조에 배양된 질산화 세균군 농축액을 5mL, 10mL, 20mL로 주입하여 운전한 각각의 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 슬러지의 MLSS 농도를 2,000mg/L로 유지한 경우 유입수  $NH_4^+-N$ 의 평균 농도는 27.9mg/L이었으며 유출수  $NH_4^+-N$  농도가 1mg/L 이하로 감소되는데 소요된 기간은 각각 7일, 4일, 3일로 나타났다. 농축



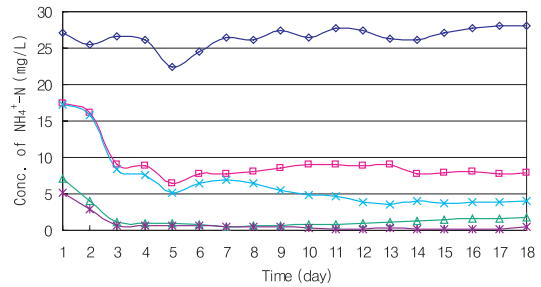
**Fig. 7.**  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration-time profiles in activated sludge reactors maintained an MLSS of 2,000 mg/L; the parenthesis is the dosage of CCNBGS (Concentrated CNBG Solution, 10,000 mg MLSS/L).



**Fig. 8.**  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration-time profiles in activated sludge reactors maintained an MLSS of 3,000mg/L; the parenthesis is the dosage of CCNBGS (Concentrated CNBG Solution, 10,000 mg MLSS/L).

액이 주입되지 않은 반응조는 10일이 지나도 유출수  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도가 5.4mg/L 이하로 감소되지 않았다. 이 기간 동안 주입된 농축액의 양에 따른 일일 평균  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  제거량은 주입량이 5mL일 경우 240mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ , 10mL일 경우 265mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ , 20mL일 경우 290mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ 로 나타나 농축액 주입량이 증가 할수록  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  제거량도 증가하는 것으로 나타났으나 주입량에 따른 증가량 변화는 크지 않았다.

반응조의 MLSS 농도를 3,000mg/L으로 유지한 경우 유입수  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 평균 농도는 27.4mg/L이었으며 유출수  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도가 1mg/L 이하로 감소되는 기간은 모두 1일로 나타났으며 농축액 투입량에 따른 효과는 그리 크지 않은 것으로 관찰되었다. 농축액이 투입되지 않은 반응조는 7일 후에 유출수의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도가 1mg/L 이하로 감소되었다. 이 기간 동안 주입된 질산화 세균군 농축액의 양에 따른 일일 평균  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  제거량은 주입량이 5mL일 경우 300mg



**Fig. 9.**  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration-time profiles of influent and effluent of each reactor; the parentheses represent a method of CNBG applications.

$\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ , 10mL일 경우 340mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ , 20mL일 경우 355mg  $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ 로 나타나 농축액 주입량이 증가 할수록  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  제거량도 증가하는 것으로 나타났으나 주입량에 따른 증가량 변화는 크지 않았다. MLSS 농도를 3,000mg/L로 유지한 경우 MLSS 농도를 2,000mg/L로 유지한 경우 보다 유출수 암모니아 농도를 1mg/L 이하로 감소시키는데 소요되는 기간이 매우 짧게 나타났고 암모니아 제거량도 높게 나타났는데 이는 질산화 반응을 나타내지 않았던 슬러지에 질산화 세균의 성장에 최적인 조건을 형성 시켜 줌으로써 질산화 세균의 성장과 활성이 유도되었고, 종 슬러지의 농도가 높을수록 슬러지 내 질산화 세균의 양이 상대적으로 높아 질산화 효율에 차이가 있는 것으로 사료된다.

### 3.5. 배양된 질산화 세균군의 적용방법에 따른 효용성

배양된 질산화 세균군의 적용방법에 따른 효용성을 알아보기 위하여 활성슬러지 농도를 2,000mg MLSS/L로 조정된 4개의 연속식 반응조에 반응조 #1을 제외한 반응조 #2에 질산화 세균군 농축액 20mL 투입하였으며, 반응조 #3은 유동상 담체를 20% 충전하였고, 반응조 #4에는 배양된 질산화 세균군이 부착된 담체를 20% 충전하여 연속식 반응조를 운전하였으며, 유입수와 유출수의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 유입수  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 평균 농도는 26.4mg/L이었으며 반응조 #1과 반응조 #3은 운전



종료일 까지 유출수의  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  농도가  $1\text{mg/L}$  이하로 감소하지 않았다. 반응조 #2의 경우 3일이 소요되었고 제거량은 일일 평균  $277\text{mg NH}_4^+-\text{N/d}$ 로 나타났고, 반응조 #4의 경우 2일이 소요되었고 제거량은 일일 평균  $294\text{mg NH}_4^+-\text{N/d}$ 로 나타났다. 반응조 #4의  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  제거율이 가장 높았는데 이는 담체에  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  산화율이 높은 배양 질산화 세균군이 부착되어 반응조내 질산화 세균을 용이하게 유지할 수 있었기 때문으로 사료된다. 따라서 제안된 반응조에서 단기간에 질산화 효율을 향상시킬 때 배양된 질산화 세균군을 담체에 부착시켜 생물반응조에 투입하는 것이 가장 효율적인 것으로 사료되나 효율성은 장기간 동안의 현장규모 시설의 운전 자료를 통해 검증되어야 하겠다.

#### 4. 결 론

활성슬러지 공정에서 질산화 효율을 단기간에 높이기 위하여 활용될 수 있는 상업용 질산화 세균의 성장특성과 적용방법에 따른 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 질산화 세균이 포함된 상업용 미생물 농축액의 미생물량 증가와  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  제거는 운전 초기에 급격히 일어나는 특성을 나타내었으며  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 의 평균 제거율은  $0.0234\text{g NH}_4^+-\text{N/g MLSS/hr}$ 로 매우 높게 나타났다. 그러나 배양된 질산화 세균군의 비질산화율은  $0.0107\text{g NH}_4^+-\text{N/g MLSS/hr}$ 로 나타나 상업용 농축액의 미생물 비질산화율 보다 낮게 나타났는데 이는 일차 배양 과정에서 전체 미생물량 중 질산화 세균의 비율이 낮아졌기 때문으로 사료된다.
- 온도와 하수성상이 배양된 질산화 세균군의 비질산화율에 미치는 영향을 조사한 결과 온도를  $27^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ 로 변화시켰을 때 비질산화율은 각각  $0.0107$ ,  $0.0067$ ,  $0.0048\text{g NH}_4^+-\text{N/g MLSS/hr}$ 로 나타나 배양된 질산화 세균군의 비질산화율은 온도변화에 민감한 반응을 보이는 것으로 사료되며, 위 범위 내에서 온도보정계수는  $1.07$ 로 산정되었다. 또한 하수와 배양액의 혼합비율을 각각  $9:1$ ,  $8:2$ ,  $7:3$ ,  $5:5$ 로 변화 하였을 시 비질산화율은  $0.0057$ ,  $0.0057$ ,  $0.0055$ ,

$0.0052\text{g NH}_4^+-\text{N/g MLSS/hr}$ 로 나타나 하수성상이 비질산화율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다.

- 배양된 질산화 세균군의 투입량에 따른  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  제거율을 조사하기 위하여 MLSS 농도를  $2,000\text{mg/L}$ 와  $3,000\text{mg/L}$ 로 유지한 5L 반응조에 농도가 약  $10,000\text{mg/L}$ 인 농축액  $5\text{mL}$ ,  $10\text{mL}$ ,  $20\text{mL}$  주입한 결과 유출수의  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  농도를  $1\text{mg/L}$  이하로 감소시키기 위해 소요되는 기간은 주입량에 따라 각각 7일, 4일, 3일로 나타나 농축액 주입량에 따라 소요되는 기간이 단축되는 것을 알 수 있었다. 또한 MLSS 농도를  $3,000\text{mg/L}$ 로 유지한 경우 주입량에 따른 효과는 크게 나타나지 않았다. 한편 농축액 주입량이 증가 할수록  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  제거량도 증가하는 것으로 나타났으나 주입량에 따른 증가량 변화는 관찰되지 않았다.

- 배양된 질산화 세균군의 적용방법에 따른 효율성을 조사하기 위해 HRT와 MLSS 농도가 각각 4시간, 약  $2,000\text{mg/L}$ 로 유지한 4개의 활성 슬러지 반응조에 반응조 #1을 제외한 반응조 #2에는 질산화 세균군 농축액(CCNBGS,  $10,000\text{mg/L}$ )를  $20\text{mL}$ , 반응조 #3에는 유동상 담체를 20% 충전하였으며, 반응조 #4에는 배양된 질산화 세균군이 부착된 담체를 20% 충전하여 운전하였다. 반응조 #1과 반응조 #3은 운전 종료일까지 유출수의  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  농도가  $1\text{mg/L}$  이하로 감소하지 않았으며, 반응조 #2의 경우 유출수 암모니아 농도가  $1\text{mg/L}$  이하로 나타나는데 소요된 기간은 3일로 나타났으며 일일 평균 암모니아 제거량은  $358\text{mg NH}_4^+-\text{N/d}$ 로 나타났다. 반응조 #4의 경우 유출수  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  농도가  $1\text{mg/L}$  이하로 감소되는데 소요된 기간은 2일로 나타났으며 일일 평균 암모니아 제거량은  $365\text{mg NH}_4^+-\text{N/d}$ 로 나타났다. 따라서 질산화 효율이 낮거나 질산화 반응에 저해가 발생한 처리 공정내에서 짧은 기간 내에 질산화 반응을 유도하기 위해서는 배양된 질산화 세균군을 담체에 부착시켜 생물 반응조에 투입하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났으나 효율성은 장기간의 현장규모시설의 운전자료를 통해 검증되어야 하겠다.

## 참고문헌

1. 김복현, 정윤진, 조종복, 황규대 (1993) 1차 침전지가 없는 활성슬러지 공정의 동력학 계수 및 슬러지 생산량에 관한연구, *한국물환경학회지*, **9**(4), pp. 208-215.
2. 김종철 (2004) 활성슬러지 공정에서 유입수의 성장변화가 질산화 미생물 분포에 미치는 영향, 경희대학교.
3. 박지현, 이명숙 (1998) 암모니아 산화세균의 분리와 그 특성, *한국수산학회지*, **31**(5), pp. 760-766.
4. 서근학, 김병진, 조문철, 조진구, 김용하, 김성구 (1998) 고정화된 질화 세균군에 의한 암모니아성 질소제거, *한국생물공학회지*, **13**(3), pp. 238-132.
5. 전향배, 박상민, 박노백 (2004) 질산화 반응에 미치는 SRT 및 HRT의 영향, *건설기술연구원 논문집*, **23**(1), pp. 239-248.
6. 환경부 (2003) *하수도 통계*, pp. 3, 대양인쇄, 과천.
7. Focht, D.D. and W. Verstraete (1997) Biological ecology of nitrification and denitrification, *Adv. Microbiol. Ecol.*, **1**, pp. 135-214.
8. Jetten, M.S.M., M. Strous, E. Van Gerven, P. Zheng, J.G. Kuenen (1996) Verwijdering van ammonia uit slibgistingswater met behulp van het ammoxprocs, *STOWA raport*, **96**(21), STOWA Utrecht, The Netherlands.
9. Painter, H.A. (1970) A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganism, *Water Research*, **4**(6) pp. 393-450.
10. Paul, EA. and F.E. Clark (1989) Transformation of nitrogen between the organic and inorganic phase and to nitrate in soil microbiology and biochemistry, *Academic press*, pp. 131-146, California.
11. Randall, C.W., J.L. Barnard and H.D. Stensel (1992) Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal, *Water Quality Management Library*, **5**, pp. 85-95.
12. U.S. Environmental Protection Agency (1993) Manual nitrogen control, *EPA*, **625**(R-93/010), pp. 211-247.