

## SBR을 이용한 암모니아 폐수의 질산화 및 슬러지 그레놀화 특성 연구

한동우, 이수철, 윤정이<sup>1</sup>, 김혜영<sup>1</sup>, 김동진<sup>1,\*</sup>  
 (주)에코비전, <sup>1</sup>한림대학교 환경생명공학과  
 (dongjin@hallym.ac.kr\*)

## Characteristics of nitrification and sludge granulation of ammonia wastewater in an SBR

Dong-Woo Han, Soo-Chul Lee, Joung-Yee Yoon<sup>1</sup>, Hae-Young Kim<sup>1</sup>, Dong-Jin Kim<sup>1,\*</sup>  
 Eco-Vision Ltd., <sup>1</sup>Dept. of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University  
 (dongjin@hallym.ac.kr\*)

## 서론

하·폐수의 고도처리 시 질산화 미생물의 중요성은 상당히 큰데 비해 이의 안정적 확보 및 유지 관리 등에는 많은 문제점들이 지적되고 있다. 현재 고도처리시설의 질소처리효율이 낮게 나타나는 이유는 무엇보다도 질산화 미생물에 대한 전문 지식 및 운전기술의 부족에 기인한 바가 크다고 하겠다. 과거에 단순히 유기물을 제거하는 활성슬러지법과는 달리 고도처리공정에서는 생물학적 질산화와 탈질, 생물학적 인의 흡수 및 방출에 관여하는 다양한 미생물군(群)으로 구성되어 있으며 생물반응기의 운전조건도 용존산소나 산화환원전위(oxidation reduction potential)에 따라 호기성, 준혐기성, 혐기성 등의 다양한 운전 조건과 더불어 침전조 슬러지 반송 외에 내부반송 흐름이 다양하게 존재하고 있어 과거의 활성슬러지법과는 비교가 안 될 정도로 복잡한 시스템이다.

질산화 미생물은 독립영양 미생물로서 성장속도가 매우 느리고 독성물질에 매우 취약하여 자주 wash-out 되거나 활성이 낮아지는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 또한 질산화 성능을 향상시키는 방법으로 다량의 질산화 미생물을 유지하는 그레놀화 방법이 많은 관심을 모으고 있다. 비교적 고농도의 기질과 용존산소 농도, 짧은 수리학적 체류시간과 침전시간을 유지하여 침전성이 낮은 개체를 반응기에서 배제하는 방식으로 침전성이 높은 그레놀 형성 미생물을 선택적으로 배양하는 것이다.

본 연구에서는 암모니아성 질소를 함유하는 폐액을 이용하여 질산화 미생물을 다량 함유하는 호기성 질산화 미생물의 그레놀화 과정에서 분자생물학적 기법을 통해 미생물들의 군집구조 분석, 활성도, 물리화학적 특성을 연구하여 질산화 미생물 그레놀의 형성 메커니즘을 규명하고 보다 안정적인 처리 및 다량의 질산화 미생물 그레놀을 생산하기 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

## 실험

질산화 미생물의 그레놀 형성 및 질산화 특성을 알아보기 위하여 air-lift 타입의 그레놀화 연속회분식 생물반응기(Granulation Sequencing Batch Reactor: GGBR)를 제작 운전하였다. 연속회분식 생물반응기는 아크릴 소재의 원형관으로 제작되었으며 반응기의 높이는 115 cm, 상부 직경은 10 cm, 하부 직경은 8 cm, 내부 원형관 직경은 4 cm로 총 유효 부피가 3.8 L이며, 이때 그레놀 형성의 주요인자인 H/D ratio(height to diameter ratio)는 14.3로 하였다. 실험장치는 반응기 내부에 공기 주입을 위한 블로와, 유입펌프, 자동 배출을 위한 솔레노이드 밸브, 질산화 시 pH 저하를 방지하기 위한 약품 주입펌프 및 pH controller를 구성하였다. 일정한 온도를 유지시키기 위해 온도 컨트롤러를 설치하여 동절기에도 반응기 온도를 20℃ 이상 유지시켜 주었다. 미생물들의 침전속도에 따른 강제적 분리를 위하여 유출수의 배출은 반응기의 중간 지점에서 이루어지도록 하였

다. 그러므로 유입 폐수량은 반응기 전체 유효부피의 1/2인 2.0 L가 한 사이클 동안 반응기 내로 유입되어진다. 미생물 접종은 하수종말처리장 폭기조 슬러지를 전처리 과정을 거친 후 초기 반응기 내 미생물 농도가 3,000 mg/L가 되도록 접종하였다. 연속회분식 생물반응기의 운전은 고농도 암모니아성 폐수를 반응기에 유입하는 유입단계, 고농도 암모니아성 폐수를 폭기시켜 질산화 시키고 이와 동시에 질산화 미생물 그레놀을 형성하는 폭기단계, 상등수와 미생물의 고액분리 및 침전성이 양호한 그레놀 및 그레놀 형성이 안되거나 침전성이 불량한 미생물의 분리를 위한 침전단계, 침전성이 불량한 슬러지를 반응기 밖으로 강제적으로 배출하여 질산화 미생물의 그레놀만 반응기에 보유하고 새로운 고농도 암모니아성 질소를 처리하기 위한 유출 단계로 나뉘어 진다.

### 결과 및 토론

Fig. 1에 유입 암모니아성 질소 600mg/L에서 수리학적 체류시간을 12시간으로 증가시켜 운전한 GSTR의 반응기 내 질소제거 특성을 나타내었다. 초기 유입 암모니아가 기존의 폐수와 혼합되어 300mg/L을 보였으며 300분 이내에 대부분 아질산성 질소를 거쳐 질산성 질소로 산화되었다. 이는 유입 암모니아성 질소 농도를 400mg/L에서 600mg/L로 올린 후 30일 이후의 결과로 점차로 질산화 미생물들이 고농도 암모니아성 질소를 함유한 폐수에 적응하여 짧은 반응 시간에도 완전한 질산화를 보인 것으로 판단된다. 또한 암모니아 산화균에 의해 암모니아성 질소가 산화됨에 따라 free 암모니아에 대한 아질산 산화균의 저해가 감소되어 아질산성 질소가 질산성 질소로 쉽게 산화되었다.

유입 암모니아성 질소 농도를 1,000 mg/L로 증가시켜 수리학적 체류시간은 12시간으로 부하량은 2.0 kg-N/m<sup>3</sup>/d으로 유지하였다(data not shown). 초기 고농도 암모니아성 질소의 유입으로 질산화 미생물에 저해를 일으키는 free 암모니아의 농도는 12.0 mg/L 이상을 보여 폭기 시간 210분까지 아질산성 질소가 질산성 질소로 산화되는데 저해를 받았으나 점차 암모니아성 질소의 농도가 감소됨에 따라 아질산 산화균의 활성의 증가하여 대부분 산화되었다. 하지만 유입 농도가 높아 폭기 시간 340에 암모니아성 질소가 8 mg/L가 검출되었으나 99.2% 이상의 높은 질산화 효율을 보였다. 그러므로 고농도 암모니아성 질소를 완전히 질산화 시키기 위해서는 폭기 시간을 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 유입 암모니아성 질소 농도 600 및 1,000mg/L에서 초기 free 암모니아에 의한 아질산 산화균의 저해가 관찰되었으나 점차로 높은 free 암모니아 농도에서도 아질산 산화균이 활성이 증대됨을 알 수 있었다. 이는 질산화 미생물들이 그레놀 형태로 성장하여 외부의 독성 충격에 대한 완충 능력이 향상되었음을 의미하며, 이로 인해 아질산 산화균의 개체 수 또한 증가되었기 때문인 것으로 사료된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 하수처리장 폭기조 미생물들을 연속회분식 생물반응기를 이용하여 고농도 암모니아성 질소를 처리하는데 약 60일 정도의 안정화 기간이 소요되고 그 이후 2.0 kg-N/m<sup>3</sup>/d의 높은 부하에서도 98% 이상의 질산화율을 달성하였다.

연속회분식 질산화 미생물 그레놀화 반응기의 150일 운전 후 생성된 질산화 미생물 그레놀의 전자현미경 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 질산화 미생물의 그레놀의 크기는 무작위로 30개의 샘플을 조사한 결과 1,000~3,000  $\mu\text{m}$ 이며 평균 1,800  $\mu\text{m}$ 를 나타내었다. 그레놀 내부에는 0.5~1.5  $\mu\text{m}$ 의 간균 또는 구균 형태의 질산화 미생물들이 매우 조밀하게 분포하고 있다. 이는 기존 유기물 제거를 위한 호기성 그레놀의 크기가 평균 2,500  $\mu\text{m}$ 를 나타낸 Beun (2000)등의 연구결과에 비해서는 작은 크기로서 무기성 암모니아를 제거하는 질산화 미생물들의 성장 속도가 늦고 더욱 단단하게 그레놀화되어 있기 때문으로 판단된다.

연속회분 질산화 그레놀 반응기 운전 150일 후 respirometer에 접종 시킨 후 암모니아 산화균(AOB)균과 아질산 산화균(NOB)의 활성을 조사하였다. 암모니아 산화균의 비

활성도는 분석 결과 250 mg-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g-AOB·h, 아질산 산화균은 761 mg-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/g NOB·h를 나타내 아질산 산화균의 활성도가 더 큰 것으로 조사되었다.

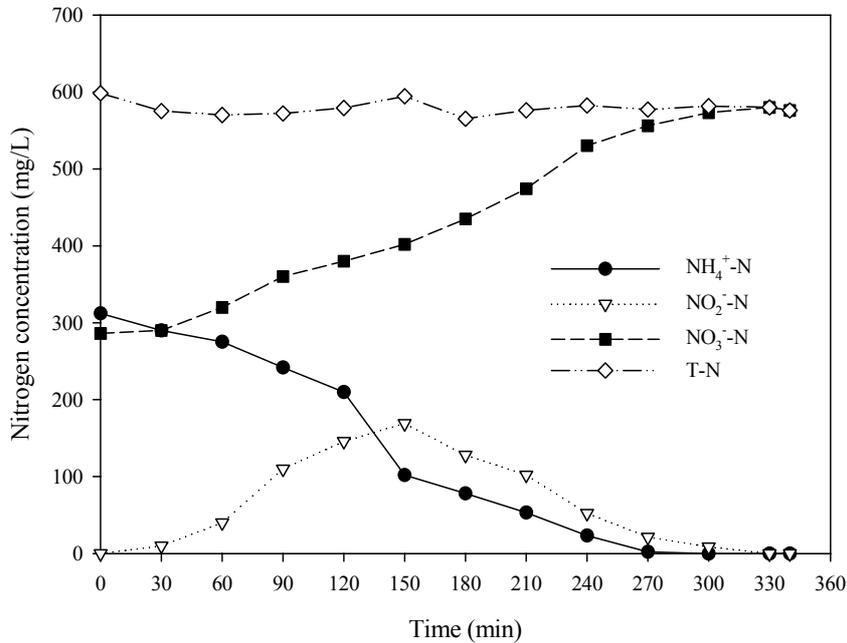


Fig. 1. 유입 암모니아성 질소 600 mg/L에서의 GSBR 내 질산화 특성

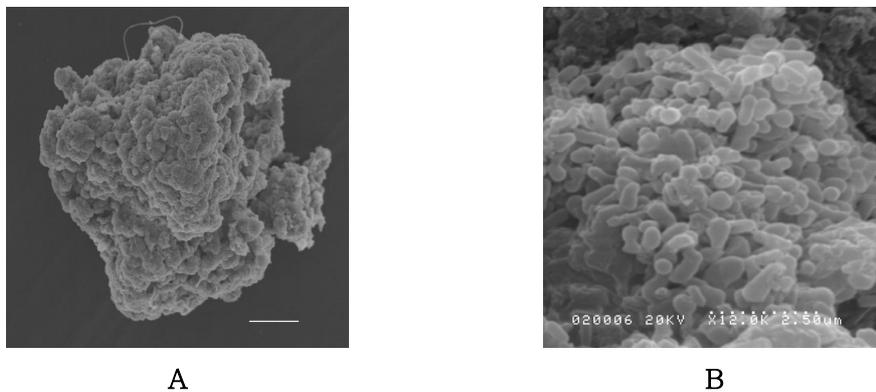


Fig. 2. GSBR에서 생산된 질산화 미생물 그레놀의 전자현미경 사진. (bar = 500 μm)

GSBR 운전 150일 경과 후 그레놀을 샘플링하여 FISH/CLSM으로 그레놀 내 암모니아 산화균으로 *Nitrosomonas* spp.와 *Nitrosospira* spp., 아질산 산화균으로 *Nitrobacter* spp.와 genus *Nitrospira*의 분포를 알아보았다. 일반적으로 전체 미생물을 나타내는 eubacteria(EUB338)과 암모니아 산화균 중 *Nitrosomonas* spp.(prob Nsm156), *Nitrosospira* spp.(NSV443), *Nitrobacter* spp.와 genus *Nitrospira*에 각각 특이적으로 형광 labeling된 probe를 *in situ* hybridization하여 실험하였다.

미생물들의 정량 분석은 image analyzer로 얻어진 각각의 미생물들의 정량 데이터로

서 질산화 미생물 그레놀 내 *Nitrosomonas* spp.는 전체 미생물 중 평균 30.96%, *Nitrosospira* spp.는 평균 8.45%를 차지하여 암모니아 산화균은 약 40% 차지하고 있으며 *Nitrobacter* spp.는 평균 11.92%, genus *Nitrospira*는 1.16%를 차지하여 전체 미생물 중 아질산 산화균의 분포는 13.08%를 보였다. 이와 같은 미생물들의 정량화 데이터는 95%의 신뢰구간 안에 평균이 표준오차 범위 안에 속하며, 정량분석 결과 각 미생물의 분포를 알아 볼 수 있었다.

GSBR 운전 150일 후 반응기 내 암모니아 산화균 및 아질산 산화균의 농도를 FISH/CLSM 이미지 정량화 데이터와 MLVSS를 이용하여 조사하였다. 암모니아 산화균인 *Nitrosomonas* spp. 및 *Nitrosospira* spp.의 농도는 각각  $2.42 \times 10^9$  cells/ml과  $5.86 \times 10^8$  cells/ml이었다. 또한 아질산 산화균인 *Nitrobacter* spp. 및 genus *Nitrospira*의 농도는 각각  $7.18 \times 10^8$  cells/ml와  $1.06 \times 10^8$  cells/ml로 나타났으며 이때 반응기내 MLVSS 농도는 4,200 mg/L이었다.

GSBR에서 선택적으로 배양된 그레놀의 침강성을 알아보기 위해 SVI를 측정하였다. 일반적으로 SVI 값이 50~150 일 때 침강성이 양호하며, 200 이상이면 슬러지 벌킹이 발생하여 최종 침전조에서 미생물들이 처리수와 함께 방류되어 환경에 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 질산화 미생물의 그레놀화를 위한 실험실 규모 GSBR 미생물과 강원도 C시 하수종말처리장 내 폭기조 미생물의 SVI 값을 비교한 결과 GSBR 미생물들의 SVI 값은 35~75 사이의 값을 보였으며 평균값은 55를 나타내었다. 반면 같은 기간 하수종말처리장 폭기조 미생물의 경우 145~210을 보여 평균 190의 SVI 값을 나타내어 그레놀의 우수한 침강성을 확인할 수 있었다.

## 결론

고농도 암모니아를 함유한 폐수를 이용한 질산화 미생물의 그레놀화는 주정폐수, 반도체 폐수등과 같은 산업폐수와 축산·분뇨폐수, 음식물 쓰레기 폐수, 매립지 침출수 등에 적용 시 다량의 고농도 질산화 미생물 그레놀을 확보함과 동시에 고농도 암모니아성 폐수의 오염부하를 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 하수고도처리 시설의 반류수를 이용할 경우 반류수에 의한 부하변동을 최소화함과 동시에 고도처리 시설의 주 처리 반응조인 질산화조 내 외부 환경요인에 민감한 고농도 질산화 미생물을 다량 보유함으로써 안정적인 폐수처리 및 침강성 향상으로 인한 슬러지 팽화문제를 해결할 수 있어 항상 안정적인 방류수 수질을 확보함과 동시에 온도 저하 및 독성물질 유입에 의해 미처리된 처리수가 방류되는 것을 방지할 수 있어 환경개선효과에도 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

## 감사

본 연구는 중소기업청의 산학협력실 지원 사업으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Beun, J. J., van Loosdrecht, M.C.M., Hendriks, A. (2000) "Aerobic granulation". *Water Sci. Technol.*, 41: 41-48.
2. Kim, D.J. and Seo, D.W. (2006) "Selective enrichment and granulation of ammonia oxidizers in a sequencing batch airlift reactor", *Process Biochemistry*, 41: 1055-1062.
3. Liu, Y., Tay, J.H. (2004) "State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment", *Biotechnology Advances*, 22: 533-563.