

파일럿 규모의 공기 유동 연속회분반응기에서 고농도 질소제거 및 슬러지 그레놀화 특성 연구

이수철[†], 김동진*

한림대학교 환경생명공학과·에너지환경연구소
200-702 강원 춘천시 옥천동 1
[†](주)에코비전
200-883 강원 춘천시 동내면 거두단지 1길 33

(2012년 10월 12일 접수; 2012년 11월 12일 수정본 접수; 2012년 11월 13일 채택)

A Study on High Strength Nitrogen Wastewater Treatment and Sludge Granulation Characteristics in a Pilot-scale Air-lift Sequencing Batch Reactor

Soochul Lee[†], and Dong-Jin Kim*

Department of Environmental Sciences and Biotechnology & Institute of Energy and Environment,
Hallym University
1 Okchon-dong, Chuncheon-si, Gangwon 200-702, Korea
[†]Ecovision Ltd.
33 Geodoodanji 1-gil, Dongnae-myeon, Chuncheon-si, Gangwon 200-883, Korea

(Received for review October 12, 2012; Revision received November 12, 2012; Accepted November 13, 2012)

요 약

폐수로부터 안정적이며 경제적으로 질소 성분을 제거하기 위하여 선택적 질산화와 슬러지 그레놀화를 파일럿 규모의 공기 유동 연속회분반응기(sequencing batch reactor, SBR)에서 수행하였다. 연속회분반응기 유입 암모니아 부하가 1.0 kg NH₄⁺-N/m³·d까지는 거의 100%에 가까운 높은 질산화율을 보였고, 1.0-2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d에서는 거의 90%, 2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d 이상에서는 질산화율이 90% 아래로 떨어짐을 확인할 수 있었다. 암모니아 저해와 용존산소 제한에 의한 아질산 산화균의 선택적 저해는 폐수 질산화에서 아질산 축적을 유도할 수 있다. 본 실험에서 연속회분반응기의 pH를 8.0 이상으로 그리고 용존산소를 1.5 mg/L 이하로 유지했을 때 모두 0.95 이상의 아질산 비율을 얻었다. 또한 공기 유동 연속회분반응기의 침전시간을 5분으로 짧게 유지하여 침전성이 좋지 않은 슬러지를 반응기에서 배제하고 침전성이 좋은 슬러지를 선택적으로 배양하였다. 그 결과 슬러지 침전성이 향상되면서 그레놀 형성이 촉진되었으며 슬러지 침강계수(sludge volume index, SVI)는 60일 이후부터 75 이하로 안정되게 유지되었다.

주제어 : 질산화, 선택적 질산화, 아질산 축적, 그레놀화, 연속회분반응기

Abstract : Selective nitrification and granulation have been carried out in a pilot scale air-lift sequencing batch reactor (SBR) for stable and economical nitrogen removal from wastewater. The SBR showed about 100% nitrification efficiency up to 1.0 kg NH₄⁺-N/m³·d, about 90% efficiency at 1.0-2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d, and it was less than 90% when the load was higher than 2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d. Nitrite accumulation was induced by selective inhibition of nitrite oxidizing bacteria by free ammonia inhibition and dissolved oxygen limitation. For the purpose, high nitrite ratio (> 0.95) was obtained by keeping the pH higher than 8.0 and dissolved oxygen lower than 1.5 mg/L. In addition, sludge granulation was achieved by keeping reactor settling time to 5 minutes to wash out poor settling sludge and to promote the growth of granulation sludge. The operation accelerated sludge granulation and the sludge volume index (SVI) decreased and stably maintained to less than 75 in 60 days.

Keywords : Nitrification, Selective nitrification, Nitrite accumulation, Granulation, Sequencing batch reactor

1. 서 론

폐수에서 생물학적 방법으로 질소를 제거할 때 암모니아를

아질산까지 산화하여 바로 탈질하면 아질산을 질산으로 산화할 때 필요한 포기 에너지와 질산을 아질산으로 탈질하는데 필요한 전자공여체가 필요없어 운전비를 절감하는 장점이 있다. 따라서 폐수의 암모니아를 아질산으로 산화하는 선택적 질산화에 대한 연구가 활발히 진행되었다[1-3]. 폐수의 질산화에서 아질산 축적이 일어나는 주요 원인으로는 암모니아

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dongjin@hallym.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2012.18.4.398

(NH₃)와 낮은 용존산소가 알려져 있고 이들이 아질산 산화균(nitrite oxidizing bacteria)을 선택적으로 저해하기 때문으로 알려져 있다[4,5]. 암모니아 농도를 결정짓는 인자로는 각각의 NH₄⁺-N 농도와 pH가 중요한 역할을 한다[1,6]. 연속회분반응기(sequencing batch reactor, SRB)는 기질과 생성물의 농도가 일정하게 유지되는 완전혼합 연속흐름 반응기와는 달리 회분반응기의 특성을 가지고 있어 초기에는 기질 농도가 높게 유지되고 pH를 높이면 암모니아 농도를 더욱 높게 유지할 수 있어 아질산 산화균 저해에 효과적이다[7]. Turk et al.[8]에 따르면 22.1 mg NH₃-N/L에서 아질산 산화균이 저해된다고 하였다.

질산화 과정에서 용존산소가 2.0 mg O₂/L 이하로 유지되면 질산화가 제한된다[9,10]. 특히 암모니아 산화균은 산소에 대한 K_s값이 0.3 mg O₂/L인데 반해 아질산 산화균의 K_s값은 1.1 mg O₂/L로 산소에 대한 친화도(affinity)가 상대적으로 더 낮아 산소의 제한적 공급에 의해 아질산 산화균의 성장을 선택적으로 배제할 수 있다[2,3]. Garrido et al.[2]의 실험에 의하면 용존산소 1.5 mg O₂/L에서 암모니아성 질소의 질산화 효율과 아질산성 질소의 축적이 가장 높은 것으로 보고되었다.

슬러지의 침전성은 폐수처리 효율 결정에 있어 대단히 중요하다. 슬러지 침전성 향상을 위해 슬러지를 그레놀로 전환하는 기술에 대한 연구가 진행되었으며 본 연구에서는 질산화 슬러지의 그레놀화를 위해 연속회분반응기 공정을 도입하였다. 일반적인 연속회분반응기 공정은 유입-포기-침전-유출의 단계로 구성되며 슬러지 침전시간은 슬러지를 그레놀화 하는데 중요한 인자가 된다. 침전성이 좋은 슬러지를 선택적으로 배양하고 침전성이 좋지 않은 슬러지를 유실(washout)시키는 방법으로 지속적인 운전을 하면 침전성이 좋은 슬러지를 연속회분반응기에 선택적으로 배양할 수 있다. Qin et al.[11]의 침전시간과 질산화 슬러지의 그레놀에 관한 연구를 보면 실험조건 중 가장 침전시간이 짧은 조건에서 슬러지의 그레놀화가 성공적이었다고 보고하고 있다.

이에 본 연구에서는 바이오산업공단에서 발생하는 고농도의 암모니아 함유 발효 폐수의 효과적이고 경제적인 처리를

위하여 파일럿 규모의 공기 유동 연속회분반응기를 이용하여 선택적 질산화 및 슬러지의 그레놀 형성을 유도하는 방법을 검토하였다.

2. 실험

고농도 질소 함유 폐수를 이용하여 질산화 미생물의 그레놀화 및 이에 의한 선택적 질산화를 알아보기 위하여 C시에 위치한 산업폐수처리장에 파일럿 규모의 연속회분반응기를 제작하여 운전하였다. 파일럿 반응기는 부식 및 내구성을 고려하여 스테인레스 재질로 제작하였으며 높이 4 m, 상부(head) 직경 1.2 m, 주 반응기 직경 0.86 m, 공기 유동을 위한 내부 순환관 직경 0.6 m로 유효 반응기 부피 2 m³였다. 실험장치는 공기 공급을 위한 송풍기(blower), 유입수 공급 펌프, 거품 방지를 위한 소포 펌프, 자동 배출을 위한 솔레노이드 밸브, pH 조절을 위한 산, 알칼리 저장 탱크 및 약품 주입 펌프, pH 제어기, 그리고 반응기 온도 유지를 위한 가열기 등으로 구성되었다. 또한 상향류식 공기 유동 칼럼 하부에 설치된 원형 산기관 노즐(지름 3 mm)을 통해 공기가 주입되도록 하였다. 산기관은 내부 순환관 안쪽에 설치하여 전체적으로 내분 순환관 사이로 환형의 공기 및 액체의 흐름을 가지도록 하였다. 반응기 내 슬러지 및 그레놀의 인출을 위해 하부에 배출용 배관을 설치하였다.

미생물 슬러지의 침전속도에 따른 선택적 분리를 위하여 유출수의 배출은 반응기의 중간 높이 지점에서 이루어지도록 하였다. 유입 폐수량은 반응기 전체 유효부피의 1/2인 1.0 m³가 반응기 내로 유입된다. 연속회분반응기의 한 주기는 4시간에서 12시간으로 유입수의 암모니아 농도와 부하에 따라 조절되었으며, 유입(10분), 포기(215~695분), 침전(5분), 배출(10분)로 구성되었다. 실험에 사용한 슬러지는 C시 하수종말처리장 포기조 슬러지를 초기 반응기 내 부유고형물 농도가 3,000 mg/L가 되도록 점종하여 사용하였다.

폐수의 성상은 산업단지 입주기업의 작업 상황에 따라 심하게 변화하여 일정하지 않았으며 BOD₅는 100~3,200 mg/L,

Table 1. Operational conditions of the air-lift sequencing batch reactor for wastewater nitrification and sludge granulation. Selective nitrification for nitrite accumulation was carried out during periods B and F by adjusting pH and DO

Period	Operation day (days)	SBR cycle (min)				HRT (h)	pH	DO (mg/L)	Objective
		Fill	Aeration	Settle	Decant				
A	1-93	10	335	5	10	12	5.3-8.0	> 3.0	C.N.
B	93-135	10	335	5	10	12	> 8.0	> 3.0	S.N. by pH
C	135-187	10	335	5	10	12	6.8-8.4	> 3.0	C.N.
D	187-231	10	695	5	10	24	7.2-8.8	> 3.0	C.N.
E	231-282	10	335	5	10	12	6.8-8.2	> 3.0	C.N.
F	282-310	10	335	5	10	12	7.4-8.1	< 1.5	S.N. by DO
G	310-321	10	335	5	10	12	7.0-8.2	> 3.0	C.N.
H	321-337	10	215	5	10	8	6.6-7.7	> 3.0	C.N.

C.N. : complete nitrification, S.N. : selective nitrification

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 50~2,160 mg/L 범위였다. 연속회분반응기에 유입되는 BOD_5 와 암모니아성 질소 부하는 각각 0.2~5.0 kg $\text{BOD}_5/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 와 0.1~4.5 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 범위에서 운전되었다.

연속회분반응기는 폐수를 반응기에 유입하는 유입단계, 호기조건에서 폐수를 질산화하고 동시에 슬러지 그레놀을 형성하는 포기단계, 처리수와 슬러지의 고액분리와 슬러지 그레놀의 침전속도에 따른 선택적 분리를 위한 침전단계, 침전성이 불량한 슬러지를 반응기 밖으로 강제적으로 배출하여 침강성이 좋은 슬러지 그레놀만을 반응기에 보유하기 위한 유출단계로 나뉜다. 연속회분반응기 운전은 총 11개월간 지속되었으며 자세한 운전조건은 Table 1과 같다. 운전기간 동안 폐수의 수리학적 체류시간, 용존산소, pH 등을 조절하여 부하변동 및 환경변화에 따른 질산화 효율과 아질산을 축적하는 선택적 질산화 특성, 슬러지 그레놀의 형성과 이의 침전성을 조사하였다.

본 연구에서 수질 분석을 위해 15 mL의 시료를 채취하여 20 mL 초자에 1~2분간 정지한 후 상등액을 0.45 μm 와 0.2 μm 공극의 필터를 이용하여 여과한 후 실험하였다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 Nesslerization 방법을 사용하여 425 nm에서 자외선 분광광도계(UV-1601, Shimadzu)로 측정하였다. $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 이온크로마토그래피(DX 500, Dionex)로 측정하였다. 또한 반응기 내 용존산소(Model 235D, Istek), 온도, pH (Model 720P, Istek) 등은 연속적으로 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 공기 유동 연속회분반응기에서의 질산화

Figure 1은 연속회분반응기 운전 기간 동안 유입 암모니아성 질소의 부하에 따른 질산화 효율을 나타내었다. 모두 337일간 진행된 실험 중 A, B, C, E, F, G기간 동안 연속회분반응기 운전주기는 6시간(수리학적 체류시간 12시간)으로, D는 12시간(수리학적 체류시간 24시간), H는 4시간(수리학적 체류시간 8시간)으로 각각 운전되었다. 그리고 B와 F기간에는 각각 pH와 용존산소를 조절하여 아질산이 축적되는 선택적 질산

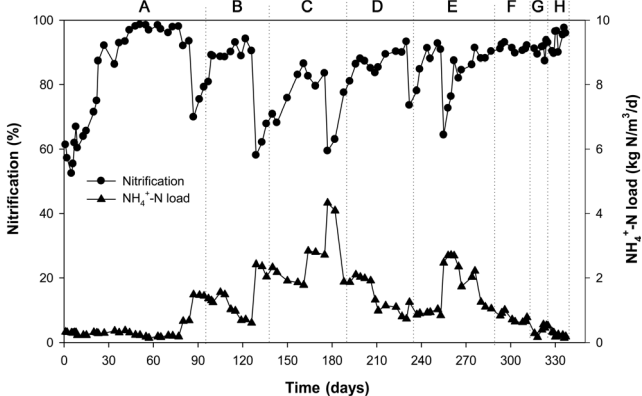


Figure 1. Time course of wastewater nitrification in a pilot scale air-lift sequencing batch reactor with various ammonium loads.

화를 수행하였고, B와 F를 제외하고는 암모니아가 질산성 질소까지 산화되는 완전 질산화 실험을 수행하였다. 실험이 진행되는 전 기간 동안 BOD_5 제거율은 95% 이상 유지되어 처리수의 수질은 50 mg/L 이하로 항상 유지되었다. BOD_5 처리 특성은 본 연구와 큰 연관이 없는 관계로 본문에서 더 이상의 별도 설명을 하지 않았다.

A기간(1~93일) 동안 유입 암모니아성 질소의 평균 부하량은 0.37 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 를 나타내었으며 연속회분반응기 운전 초기 짧은 침전시간으로 인해 점종 미생물들이 일부 유실되고 그레놀화가 제대로 되지 않아 질산화 효율이 52%까지 감소하였으나 7일 이후 서서히 안정화를 거쳐 48일 이후에는 98% 이상의 안정된 질산화 효율을 보였다. 그러나 75일 이후 암모니아성 질소 부하가 1.8 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 로 급격히 증가하면서 질산화 효율이 75% 수준으로 감소하였다가 이후 다시 증가하여 90% 정도의 질산화 효율을 보였다.

B기간(93~135일)은 유입 암모니아성 질소의 평균 부하가 1.3 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 이었으며 선택적 질산화 특성을 알아보기 위해 유입수의 pH를 8.0 이상으로 높게 유지하였다. 질산화 효율이 90% 정도에서 안정된 질산화 효율을 보였다. 128일경 유입 암모니아 부하가 갑자기 2.4 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 으로 증가하자 질산화 효율이 60% 이하로 떨어졌다 다시 증가하는 현상을 보였다. 이는 질산화 미생물이 갑자기 증가된 암모니아 부하에 충격을 받아 일시적으로 처리 성능이 떨어진 것으로 보인다. 선택적 질산화 결과는 뒤의 Figure 3에서 자세히 설명하였다.

C기간(135~187일)은 pH를 다시 중성으로 유지하여 완전한 질산화가 일어나도록 하였다. 이 구간에서 유입 암모니아성 질소의 농도 변화 폭이 가장 커서 2,163 mg/L까지 증가하였다. 암모니아성 질소 부하는 2.0~4.5 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 이었으며 (평균 부하량 2.6 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$) 질산화 효율은 부하 변동에 따라 60%에서 85%까지 범위에서(평균 질산화 효율은 76%) 변화하였다. 앞서서와 같이 유입 암모니아 부하가 갑자기 증가

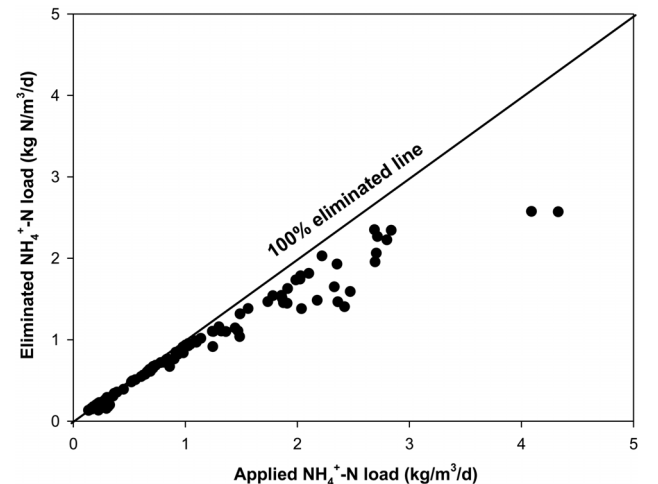


Figure 2. Applied and eliminated ammonium load in the pilot scale air-lift sequencing batch reactor.

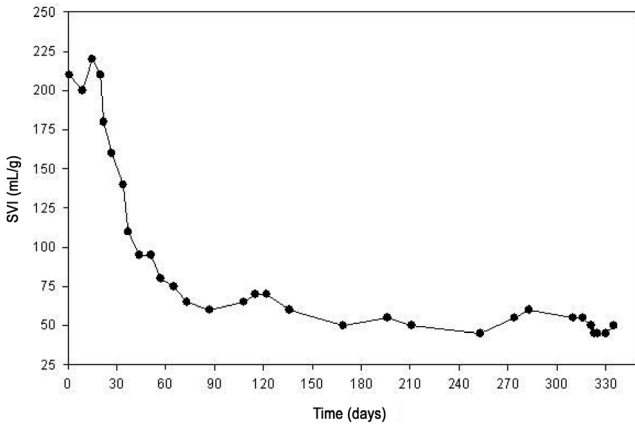


Figure 3. Time profiles of SVI in the pilot scale air-lift sequencing batch reactor.

하면 질산화 효율이 감소함을 확인할 수 있다.

D기간(187~231일)에서는 C구간에서의 높은 암모니아성 질소농도 및 부하를 고려하여 수리학적 체류시간을 24시간(연속회분반응기의 포기시간 695분)으로 증가시켜 운전한 결과 평균 부하율 1.5 kg NH₄⁺-N/m³·d에서 평균 질산화 효율이 86~90%까지 높게 유지되었다. 따라서 유입수의 암모니아 농도가 높더라도 연속회분반응기의 수리학적 체류시간을 길게 하여 암모니아 부하를 낮추면 높은 질산화 효율을 얻을 수 있었다.

E기간(231~281일)에는 초기 유입 암모니아성 질소의 농도가 500 mg/L 이하로 유입되어 연속회분반응기의 수리학적 체류시간을 다시 12시간으로 줄여 운전하였다. 이때의 암모니아성 질소의 유입부하는 1.0 kg NH₄⁺-N/m³·d였고 질산화율은 90% 이상 유지되었다. 그러나 E 구간 운전 23일 후에 유입수의 암모니아성 질소 농도가 갑자기 1,200 mg/L 이상으로 높게 유입되어 유입 암모니아 부하가 2.8 kg NH₄⁺-N/m³·d로 상승하자 질산화 효율은 60%대까지 떨어졌다가 유입 부하가 다소 낮아지면서 질산화율은 다시 90%대로 복귀하였다.

F기간(282~310일)에는 연속회분반응기의 용존산소 농도(1.5 mg/L 이하)를 낮게 유지하여 용존산소 제한에 의한 선택적 질산화를 유도하고자 운전하였다. 0.8~1.0 kg NH₄⁺-N/m³·d

의 부하에서 평균 질산화 효율이 91% 수준에서 안정되게 유지되었다.

G기간(310~321일)은 유입 암모니아성 질소의 평균 농도가 202 mg/L, 암모니아성 질소 부하는 0.4 kg NH₄⁺-N/m³·d로 상대적으로 낮게 유입되었으나 동절기 외기온도의 영향으로 반응기의 평균온도가 16 °C 정도로 낮아짐에 따라 질산화 효율은 평균 91%이었다.

H기간(321~337일)에는 유입 암모니아성 질소의 평균 농도가 100 mg/L 수준으로 매우 낮게 유입됨에 따라 수리학적 체류시간을 8시간으로 줄여 운전하였다. 그 결과 평균 부하량은 0.3 kg NH₄⁺-N/m³·d이었으며 이때 평균 질산화 효율은 93%를 보였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 유입 암모니아성 질소의 농도 범위 및 부하량의 변동폭이 큰 산업폐수(발효폐액)의 질산화 시 본 반응기는 매우 효과적이었으며 높은 처리 효율을 보였다.

Figure 2는 전체 운전기간 동안의 유입 암모니아성 질소 부하에 대한 질산화된 암모니아성 질소 부하의 관계를 보여준다. 그래프의 사선은 100% 질산화 효율을 나타낸다. 유입 암모니아 부하가 1.0 kg NH₄⁺-N/m³·d까지는 거의 100%에 가까운 높은 질산화율을 보이고, 그 이후 1.0~2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d에서는 거의 90% 정도의 질산화율을 보인다. 2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d 이상에서는 기울기가 감소하여 질산화율이 90% 아래로 떨어짐을 확인할 수 있다.

3.2. 공기 유동 연속 회분반응기에서의 슬러지 그레놀 형성

파일럿 규모의 연속회분반응기 운전기간 동안 슬러지의 그레놀 형성과 침전성을 확인하기 위해 슬러지 침강계수(sludge volume index, SVI) 측정 결과를 Figure 3에 나타내었다. 연속회분반응기 초기에 접종한 하수처리장 포기조 슬러지 SVI 값은 200 이상을 보였으나 60일 이후부터는 75 이하의 값을 보여 침전성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 유입수의 높은 pH에서 운전된 기간 B의 108일에서 122일까지 SVI가 상승한 이유는 높은 암모니아 농도에 의해 그레놀화가 저해받았기 때문으로 판단된다. Yang et al.[12]에 의하면 호기적 그레놀화에 있어 암모니아의 농도가 23.5 mg/L 이상일 경우 그레놀화를 저해한다고 보고하였다. 즉 높은 암모니아 농도는 미생물

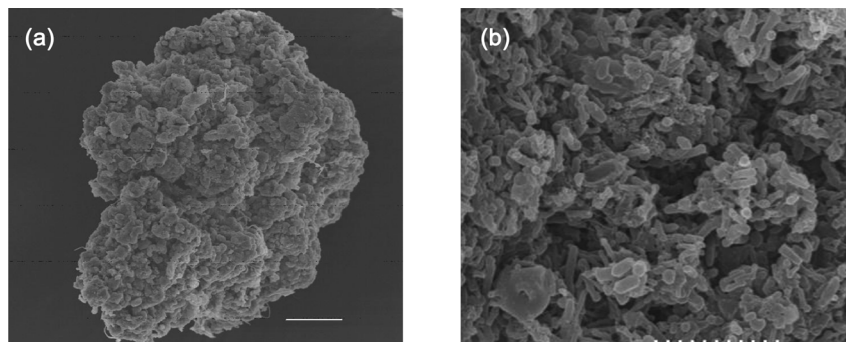


Figure 4. Scanning electron microscopy of the granules in the pilot scale air-lift sequencing batch reactor ((a) Granule, scale bar = 300 μm, (b) Microorganisms in the sludge granule).

표면 고분자의 친수성을 현저히 감소시키고 미생물끼리 가교 역할을 할 수 있도록 도와주는 고분자당류(polysaccharides)의 분비가 억제되기 때문이다. 또한 기간 F의 283일에서 310일까지 SVI가 약간 상승한 것은 낮은 용존산소 농도에서 반응기를 운전하여 그레놀 내 미생물들이 저해를 받았기 때문이다.

파일럿 규모의 질산화 미생물 그레놀화 반응기를 통해 생산된 그레놀의 형태 및 그레놀 내부에 존재하는 미생물들의 모습을 Figure 4에 나타내었다. Figure 4(a) 및 4(b)는 반응기에서 채취한 연속회분반응기 슬러지 그레놀의 주사전자현미경(scanning electron microscope, Hitachi S-2500) 사진이다. 연속회분반응기 내 슬러지 그레놀의 크기는 평균 2,000 μm 정도였으며 형태학적으로는 구형 또는 타원형이었다. 그레놀 내부 미생물들은 구균 또는 간균 형태의 질산화 미생물과 형태학적으로 비슷한 미생물들이 조밀하게 분포하였다(Figure 4(b)). 이상에서 살펴본 바와 같이 공기 유동 연속회분반응기는 고농도 질소함유 폐수를 이용하여 부유 성장하던 슬러지를 그레놀로 전환하였다. 그레놀은 평균 2,000 μm 크기를 가지는 원형 또는 타원형의 단단한 구조로 이루어졌으며 그레놀이 안정화된 이후 SVI가 45~55 범위로 침전성이 우수하고 2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d의 유입 부하에서도 90% 이상의 질산화 효율을 얻을 수 있었다.

3.3. 공기 유동 연속회분반응기에서의 선택적 질산화: 아질산 축적

앞의 Figure 1의 파일럿 규모의 공기 유동 연속회분반응기의 B, F 운전기간은 각각 pH와 용존산소를 조정하여 아질산을 축적하는 선택적 질산화를 실험하였다. 암모니아가 아질산으로 산화되면서 질산으로의 산화를 억제하는 것은 암모니아 산화균과 아질산 산화균의 암모니아 저해 차이[8]와 용존

산소에 대한 기질친화도의 차이를 이용한 것이다[2,3].

Figure 5에서 보듯이 pH를 8 이상으로 유지한 B기간 동안 암모니아 농도는 최대 104.2 mg/L의 값을 보여 문헌에 알려진 아질산 산화균에 저해를 미치는 암모니아 농도에 비해 상당히 높은 값을 나타냈다[8]. 이로 인해 암모니아성 질소가 아질산성 질소까지만 질산화되는 선택적 질산화가 일어난 것으로 보이며, 유출수 중의 아질산성 질소의 비(nitrite ratio: [NO₂⁻-N]/([NO₂⁻-N]+[NO₃⁻-N]))는 0.97까지 높아졌다. 이는 Yoon and Kim[13]이 실험실 규모의 연속회분반응기에서 얻은 것과 같은 아질산 비율이며 거의 97%의 암모니아성 질소가 질산성 질소가 아닌 아질산성 질소로만 산화되었음을 의미하며 pH 조절에 의해 선택적 질산화가 성공적으로 진행되었음을 확인할 수 있다.

Figure 6은 연속회분반응기의 용존산소를 1.5 mg/L 이하로 유지한 F기간에서의 질산화 및 선택적 질산화(아질산 축적) 특성을 보여주고 있다. 약 15일 경과 후 유출수 중의 아질산성 질소의 비가 0.95 이상을 나타내어 pH에 의한 선택적 질산화와 마찬가지로 90% 이상의 우수한 선택적 질산화율을 나타내었다. 다만 용존산소가 낮게 유지되어 높은 암모니아성 질소 부하에서는 높은 질산화율을 기대하기 어려운 단점이 있다. 이 기간 동안 암모니아 농도가 5~10 mg/L 범위에서 운전되어 암모니아 저해에 의한 영향도 있었을 것으로 사료된다.

4. 결론

파일럿 규모의 공기 유동 연속회분반응기에서 폐수의 질산화를 수행하였다. 연속회분반응기 유입 암모니아 부하가 1.0 kg NH₄⁺-N/m³·d까지는 거의 100%에 가까운 높은 질산화율을 보였고, 1.0~2.0 kg NH₄⁺-N/m³·d에서는 거의 90%, 2.0 kg NH₄⁺-

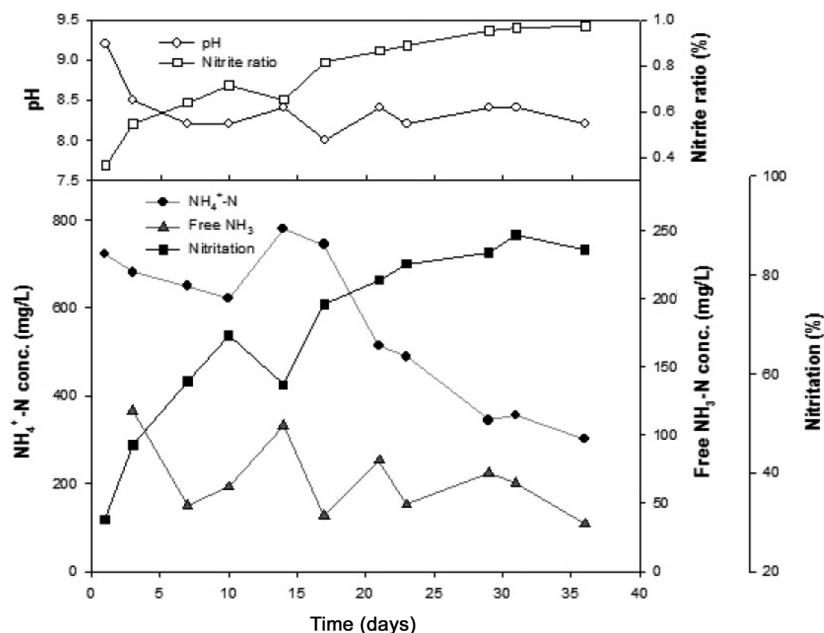


Figure 5. Selective nitrification of the sequencing batch reactor by keeping pH > 8.0 during the operation of 93-128 days.

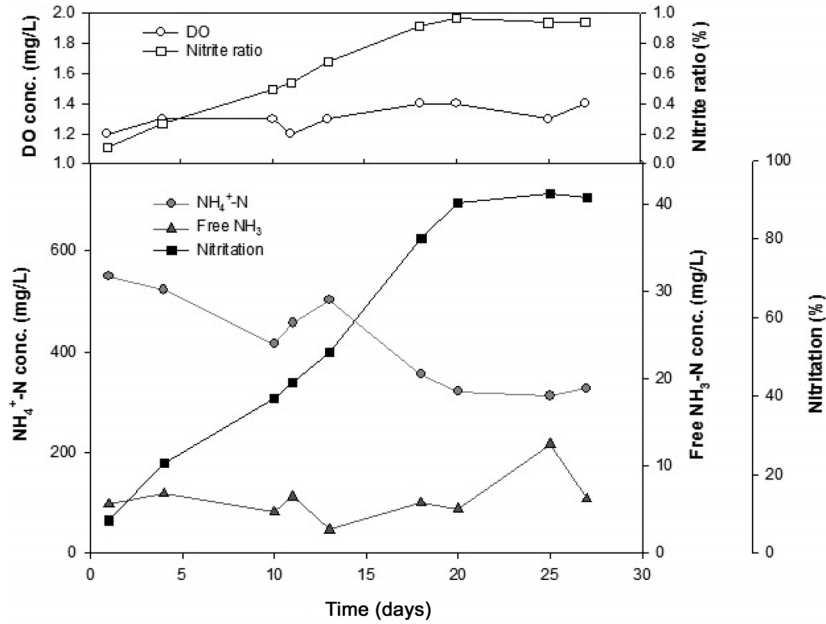


Figure 6. Selective nitrification of the sequencing batch reactor by keeping dissolved oxygen less than 1.5 mg/L during the operation of 282-310 days.

$N/m^3 \cdot d$ 이상에서는 질산화율이 90% 아래로 떨어짐을 확인할 수 있다. 아질산 축적을 위한 선택적 질산화를 얻기 위해 연속회분반응기의 pH를 8.0 이상으로 그리고 용존산소를 1.5 mg/L 이하로 유지했을 때 모두 0.95 이상의 아질산 비율을 얻었다. 침전시간을 5분으로 짧게 유지한 결과 슬러지 침전성이 향상되면서 그레놀 형성이 되었으며 SVI는 60일 이후부터 75 이하로 안정되게 유지되었다.

참고문헌

- Abeling, U., and Seyfried, C. F., "Anaerobic-aerobic Treatment of High Strength Ammonium Wastewater Nitrogen Removal Using Nitrite," *Water Sci. Technol.*, **26**, 1007-1015 (1992).
- Garrido, J. M., Van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J., "Influence of Dissolved Oxygen Concentration on Nitrite Accumulation in a Biofilm Airlift Suspension Reactor," *Biotechnol. Bioeng.*, **53**(2), 168-178 (1997).
- Kuai, L., and Verstraete, W., "Ammonium Removal by the Oxygen-limited Autotrophic Nitrification Denitrification System," *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**(11), 4500-4506 (1998).
- Anthonisen, A., Loehr, R., Prakasam, T., and Srinath, E., "Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid," *J. Water Pollut. Cont. Fed.*, **48**, 835-852 (1976).
- Yoo, H., Ahn, K., Lee, H., Lee, K., Kwak, Y., and Song, K., "Nitrogen Removal from Synthetic Wastewater by Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND) via Nitrite in an Intermittently-aerated Reactor," *Water Res.*, **33**(1), 145-154 (1999).
- Villaverde, S., Garcia-Encina, P. A., and Fdz-Polanco, F., "Influence of pH over Nitrifying Biofilm Activity in Submerged Biofilters," *Water Res.*, **31**(5), 1180-1186 (1997).
- Kim, D. J., and Seo, D. W., "Selective Enrichment and Granulation of Ammonia Oxidizers in a Sequencing Batch Airlift Reactor," *Proc. Biochem.*, **41**(5), 1055-1062 (2006).
- Turk, O., and Mavinic, D. S., "Stability of Nitrite Build-up in an Activated Sludge System," *J. Water Pollut. Cont. Fed.*, **61**, 1440-1448 (1989).
- Goreau, T. J., Kaplan, W. A., Wofsy, S. C., McElroy, M. B., Valois, F. W., and Watson, S. W., "Production of NO_2^- and N_2O by Nitrifying Bacteria at Reduced Concentrations of Oxygen," *Appl. Environ. Microbiol.*, **40**, 526-532 (1980).
- Princic, A., Manhe, I., Megusar, F., Paul, E. A., and Tiedje, J. M., "Effects of pH and Oxygen and Ammonium Concentration on the Community Structure of Nitrifying Bacteria from Wastewater," *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**, 3584-3590 (1998).
- Qin, L., Tay, J. H., and Liu, Y., "Selection Pressure is a Driving Force of Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactors," *Proc. Biochem.*, **39**, 579-584 (2004).
- Yang, S. F., Tay, J. H., and Liu, Y., "Inhibition of Free Ammonia to the Formation of Aerobic Granules," *Biochem. Eng. J.*, **17**, 41-48 (2004).
- Yoon, H. J., and Kim, D. J., "Nitrite Accumulation Characteristics of High Strength Ammonia Wastewater in an Autotrophic Nitrifying Bioreactor," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **78**, 377-383 (2003).