Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 39, No. 5, pp. 390-395 (September, 2023)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2023.39.5.390

단축질소제거 공정을 이용한 가축분뇨의 적정 처리조건 연구

강진영[a,†] · 장영호[b] · 정병환[c] · 김연진[d] · 김용호[e]

경기도보건환경연구원 물환경연구부

Optimal Operation Condition of Livestock Wastewater Treatment Using Shortcut Biological Nitrogen Removal Process

Jin-Young Kang[a,†] · Young-Ho Jang[b] · Byeong-Hwan Jeong[c] · Yeon-Jin Kim[d] · Yong-Ho Kim[e]

Department of Water Environmental Research, Gyeonggi-do Institute of Health and Environment

(Received 30 June 2023, Revised 19 August 2023, Accepted 25 August 2023)

Abstract

The feasibility of applying the shortcut nitrogen removal process to treat livestock wastewater on individual farms was examined, and appropriate operating parameters were established. As a result,, it was determined that the nitrification reaction was carried out under 550 mg/L of ammonium nitrogen concentration, but it was less effective under conditions of high ammonia concentration. Consequently, it was confirmed that a partial injection of inflow water was necessary to minimize the effects of ammonia toxicity. Following the sequential batch reactor (SBR) operation results, it was difficult to achieve the effluent quality standard without an external carbon source. Also, selection of the appropriate hydraulic retention time was critical for the optimal SBR operation. Following the livestock farm application, with external carbon source injecting, the total nitrogen concentration in the effluent was 85.1 mg/L. This result revealed that the standard could be accomplished through a single treatment on individual livestock farms. The ratio of nitrite nitrogen to ammonia nitrogen in the effluent was verified to be suitable for implementing the anammox process with a 10 days of hydraulic retention time. This study demonstrated the potential applicability of process in the future. However, in order to apply to livestock farms, managing variations in wastewater load across individual farms and addressing reduced nitrogen oxidation efficiency during the winter season are crucial.

Key words : Anammox, Eutrophication, Livestock wastewater, Nitrification, Nitritation

[a] Corresponding author, 연구사(Researcher), kjy08300@gg.go.kr, https://orcid.org/0000-0003-3265-7712
[b] 연구관(Senior researcher), jh0424@gg.go.kr, https://orcid.org/0000-0001-9689-590X
[c] 연구사(Researcher), of1mm@gg.go.kr, https://orcid.org/0009-0007-7656-8945
[d] 연구사(Researcher), yj20005@gg.go.kr, https://orcid.org/0009-0005-4473-6858
[e] 공무직(Research assistant), tndnjstka@gg.go.kr, https://orcid.org/0009-0005-2864-8532

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

팔당호를 비롯한 공공수역에서 발생하는 부영양화 문제는 상수원 및 친수구역으로서의 공공수역 관리 측면에 있어서 가장 중요한 사항 중 하나이다. 과거 환경부 자료에 따르면 실제로 전체 오폐수 발생량 중 가축분뇨의 발생량이 차지하는 비중은 약 1% 정도에 불과하지만(ME, 2012), 높은 질소 및 인 농도로 인해 영양염류 발생부하량은 전체 부하량 중 약 37%를 차지하고 있다(Kim, 2018). 실제 2022년도 경기도보건환경연구원의 분석결과에 의하면 가축분뇨 정화처리시설의 방류수 수질기준 초과율은 27.3%(양돈폐수 한정 34.9%)로, 같은 기간 개인하수의 초과율 13.8%에 비해 상당히 높은 수준임을 확인할 수 있다(가축분뇨 초과시료 평균 생화학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD) 4,736.9 mg/L, 총질소(Total Nitrogen, T-N) 556.4 mg/L).

일반적으로 많은 하수처리시설에서는 운영비용을 최소화하기 위해 생물학적 처리를 바탕으로 운영하고 있으나 일부 고농도 유기폐수의 경우 수중 독성물질에 의해 미생물 활성이 저해되어 생물학적 공법을 이용한 처리가 매우 까다롭다는 문제가 있다. 일반적으로 질소의 경우 처리되지 않은 하폐수 중에서 대부분 암모니아 형태로 존재하는데, 가축분뇨와 같은 고농도 질소폐수의 경우 암모니아 독성에 의한 미생물의 활성 억제로 인해 희석이나 화학적 전처리 없이 일반적인 생물학적 처리공법으로 처리하기에는 많은 어려움이 따르는 것으로 알려져 있다(Liu et al., 2019). 이러한 문제 때문에 대부분의 가축분뇨의 경우 퇴비화 및 액비화 등의 자원화 과정을 통해 질소와 인을 재이용하고 있지만(ME, 2020), 이는 자원순환 관점에서는 바람직할 수 있으나 자칫 무분별한 비료 살포로 인한 비점오염원으로 작용할 수 있다는 문제가 있어 수질관리 측면에서의 우려가 공존한다(Jang et al., 2015). 실제로 Gruber and Galloway (2008)의 연구에 따르면 비료로 고정된 질소의 약 50%는 육지를 통해 최종적으로 수생태계로 이송된다고 알려져 있으며, 이에 따라 개별 축사의 자가처리에 대한 필요성이 더욱 커지고 있는 실정이다. 환경부 통계에 따르면 가축분뇨의 발생량은 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있으며(Fig. 1) 특히 발생 축사에 처리시설을 설치하여 직접 정화처리 후 방류하는 자가처리량의 경우 지난 10년간 약 130% 가량 증가한 것으로 보고되고 있다(ME, 2020).

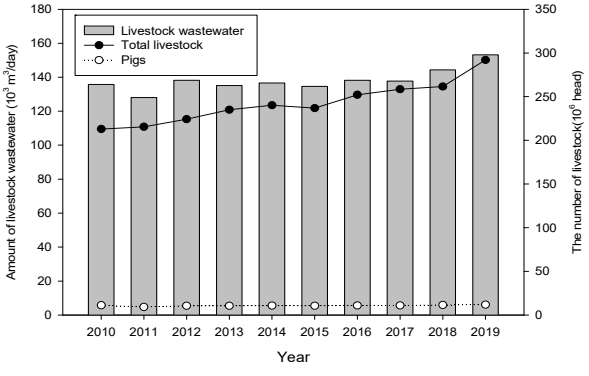

Fig. 1. Amount of livestock wastewater and livestock head count in Korea.

전통적인 생물학적 질소 제거 방법으로는 암모니아 산화 미생물(Ammonia oxidizing bacteria, AOB) 및 아질산성 질소 산화 미생물(Nitrite oxidizing bacteria, NOB)을 이용한 질산화-탈질(Nitrification-Dinitrification) 공정이 주로 적용되어 왔으나, 최근의 하수처리 공정은 이러한 전통적인 질산화-탈질 공정에 필요한 에너지 및 유기탄소원 공급을 최소화하기 위해 다양한 질소제거 공정이 국내외에서 연구되고 있는 추세이다(Capodaglio et al., 2016; Hellinga et al., 1998). 자료(WERF, 2014)에 따르면 단축질소제거 공정으로 분류되는 부분질산화-부분탈질(Nitritation-Dinitritation) 및 아나목스(Anammox) 공정의 경우 기존 질산화-탈질 공정에 소요되는 에너지 소모량을 각각 25%, 60% 이상 절감 가능하다고 알려져 에너지 절약형 차세대 질소제거 공법 중 하나로 분류되고 있다. 본 연구는 이러한 단축질소제거 공정 중 부분질산화-부분탈질 공정을 활용하여 개별 축사에서 발생한 가축분뇨의 자체 정화처리시 방류수 수질기준 달성 여부를 확인하고 현장 적용 가능성을 검토하였다. 또한 다양한 운전 조건에서 처리수의 조성 변화를 관찰하여 가축분뇨 처리수의 아나목스 공정 연계 가능성을 확인하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1 대상선정 및 분석방법

본 연구에서는 경기도 내 A 가축분뇨 공공처리장의 유입수를 이용하여 실험을 진행하였으며, 1차 침전을 거친 유입수를 원수로 사용하여 부유물질에 의한 영향을 최소화하고자 하였다. 대상 항목으로는 가축분뇨 중 고농도 암모니아를 포함한 질소 농도의 변화를 관찰하기 위해 화학적 산소요구량(Chemical oxigen demand, COD), 총질소(T-N), 아질산성 질소(NO_2^--N), 질산성 질소(NO_3^--N), 암모니아성 질소(NH_4^+-N) 및 알칼리도에 대해 수질오염 공정시험기준에 따라 분석하였다. pH는 Thermo scientific 사의 pH meter (Orion star A211)을 이용하여 측정하였으며 다항목측정기(YSI Pro20 Lab/6600 V2)를 이용하여 수온, DO, 전기전도도 등을 관찰하였다.

2.2 FA/FNA에 의한 질산화 반응 영향 검토

가축분뇨 중 암모니아(Free ammonia, FA) 독성에 의한 질산화 미생물의 활성 저해 정도를 확인하기 위해 회분식 반응기를 이용하여 다양한 초기 암모니아 농도 조건에서 질산화 반응을 진행하여 질소 성분의 거동 변화를 관찰하였다. 추가로 질산화 반응이 진행됨에 따라 축적되는 아질산성 질소에 의한 Free nitrous acid (FNA) 독성 역시 질산화 미생물의 활성에 영향을 줄 수 있는 인자인 만큼 호기조건에서 유입수를 분할 주입하며 아질산성 질소의 농도 변화 및 이로 인한 질산화 반응의 저해 여부를 파악하였다. 실험은 가축분뇨 공공처리장 유입수를 실험 조건에 맞게 희석하여 각각의 초기 암모니아 조건을 설정하였으며, 1 L beaker를 이용한 회분식

(Batch) 반응기로 상온 조건 하에서 반응조 내 미생물 농도는 약 4,500 mg MLSS/L 수준으로 유지하며 진행하였다. 또한 해당 조건에서 FNA에 의한 독성 영향을 확인하기 위해 기존 문헌자료(Anthonisen et al., 1976)를 참고하여 실험이 진행된 온도, pH, 암모니아성 질소 및 아질산성 질소 농도 조건에서 FA 및 FNA의 영향을 검토하였다.

2.3 연속회분식 반응조 운전 및 현장 적용

기초실험 결과를 바탕으로 연속회분식반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)를 제작 및 운전하여 체류시간에 따른 가축분뇨 내 질소 거동을 관찰하였다. 실험에 사용된 연속회분식 반응기는 직경(D) 130 mm, 높이(H) 1,040 mm 의 원통형 아크릴 반응기로 반응기의 유효용량은 약 7 L이며 PLC 제어부를 통해 각각의 운전모드 별 운전시간을 제어하였다(Fig. 2). 반응기 하단에 설치된 세라믹 디퓨저를 통해 공기를 공급하고 상단에 교반기를 설치하여 반응조 내 원활한 교반과 산소 공급이 이루어지도록 설계하였다. 반응조는 실제 개별 가축농가 적용을 고려하여 별도의 온도 조절장치 없이 상온 조건에서 운영하였으며 원활한 질산화가 이루어지도록 반응조 내 미생물 농도는 약 4,500～5,000 mg MLSS/L 수준으로 유지하였고, 유기물 산화에 의한 용존산소 소비로 질산화 반응이 억제될 수 있다는 기존 연구결과(Lee and Yim, 2008)를 참고하여 높은 유기물 농도 조건에서도 질산화 반응이 일어날 수 있도록 포기 시 반응조 DO 농도는 3 mg/L 이상으로 유지되도록 운영하여 포기 시 질산화 반응에 필요한 산소가 충분히 공급될 수 있도록 하였다. 유입된 원수가 반응기 내부에서 머무는 수리학적 체류시간(Hydraulic retention time, HRT)은 유입수 성상분석 결과 및 기초실험 결과를 바탕으로 5～10일 범위에서 운전하였으며 슬러지 체류시간(Sludge retention time, SRT)은 각각 운전조건별 HRT와 비슷하게 운영될 수 있도록 관리하였다. 이후 개별 축사에서의 단독 정화처리 가능성을 검토하기 위해 연속회분식 반응기 운전 결과를 실제 가축분뇨 정화처리시설에 적용하여 운전하면서 처리수의 수질변화를 관찰하였다. 현장 적용 시 부분탈질반응 효율을 높이고자 마지막 원수 유입 시점에 에탄올을 외부탄소원으로 사용하여 원수와 함께 주입하였으며, 기존 연구자료(Park et al., 2020)를 참고하여 원수 중 질소 1 g/L 당 3.7 g COD/L 이상으로 유지될 수 있도록 운영함으로써 탈질반응이 원활히 진행될 수 있도록 하였다.

3. Results and Discussion

3.1 가축분뇨 발생특성

본 연구에 사용된 가축분뇨의 성상분석 결과는 Table 1과 같다. 기존 연구결과(Lee and Yim, 2008)를 고려하면 높은 농도의 COD 유입으로 인한 질산화 반응의 억제가 예상 가능하였으나, 일정 농도 이상에서의 유입 유기물 농도 변화는 암모니아 제거율 및 아질산화율에 큰 영향을 미치지 않는다는 Gil and Im (2011)의 연구 결과와 실제 현장 적용을 고려하여 본 실험은 별도의 유기물 제거 없이 진행하였다.

3.2 FA/FNA에 의한 질산화 반응 영향 검토 결과

초기 암모니아 농도에 따른 질산화 반응의 저해여부를 확인하기 위해 다양한 암모니아 농도 조건에서 연속 포기하며 처리수의 조성 변화를 관찰하였다. 각 반응조의 포기 시간은 24시간 이상으로 유입된 암모니아가 충분히 질산화될 수 있도록 장시간 포기하였으며, 포기 전후 암모니아성 질소, 아질산성 질소 및 질산성 질소 농도, pH 등을 측정하여 유입된 질소의 거동을 관찰하며 질산화 반응의 진행 수준을 확인하였다(Fig. 3). 실험 결과 낮은 암모니아성 질소 농도 조건(550 mg NH_4^+-N/L 이하)에서는 포기 후 처리수의 아질산성 질소 및 질산성 질소 농도의 증가와 pH 감소 등의 변화를 관찰할 수 있었으며, 실험 결과로 미루어 볼 때 질산화 반응이 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 반면 고농도 암모니아 조건에서는 포기 전후 아질산성 질소 및 질산성 질소의 농도 변화가 거의 일어나지 않아 질산화 반응이 진행되지 않은 것으로 관찰되어 기존 연구에서(Liu et al., 2019) 밝혀

Table 1. Characteristics of livestock wastewater

Parameters	Values
pH	8.16 ± 0.34
TCOD(mg/L)	4,426.3 ± 134.8
T-N(mg/L)	1,887.9 ± 305.2
NH_4^+-N(mg/L)	1,829.4 ± 335.8
Alkalinity (mg/L)	9,029.0 ± 1,140.4

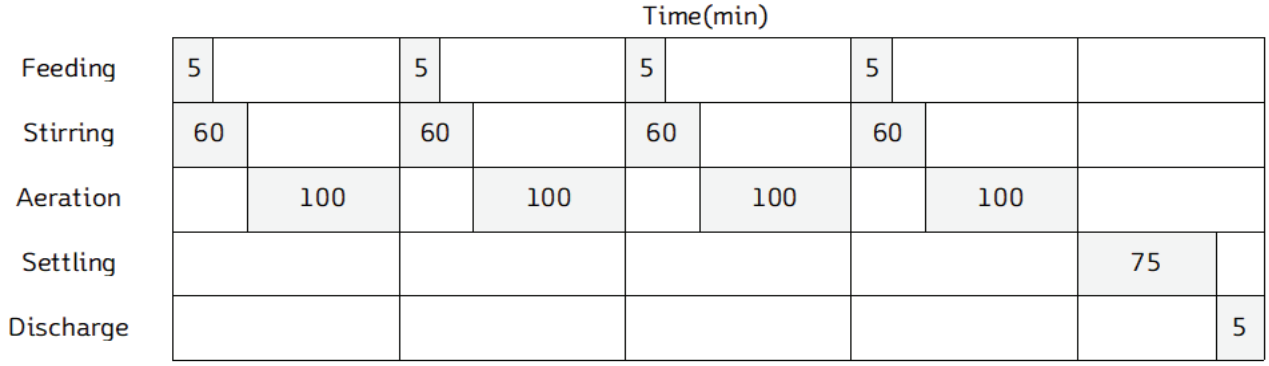

Fig. 2. Schedule of the operation stages in each cycle of sequencing batch reactor.

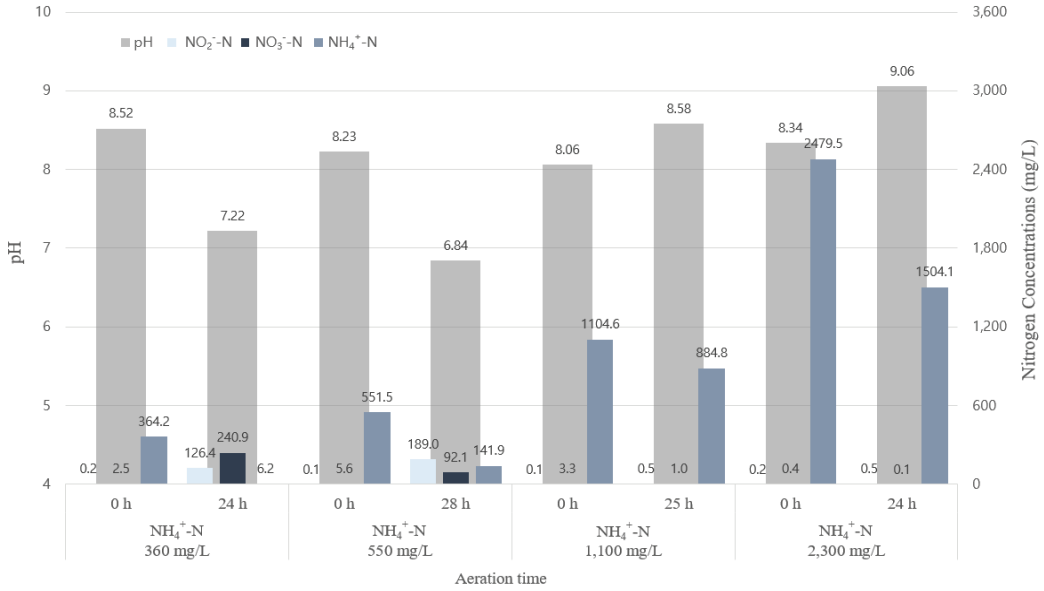

Fig. 3. Changes in nitrogen species concentration and pH with different initial ammonia concentrations under continuous aeration conditions.

진 것과 같이 원수 중 암모니아 농도가 증가함에 따라 FA 독성에 의해 질산화 미생물의 활성이 억제된 것으로 판단하였다. 다만 고농도 암모니아 조건하에서 처리수 중 암모니아성 질소 농도가 일부 감소하고 pH는 증가한 것으로 보아 공기 공급에 의해 수중 암모니아성 질소가 암모니아 가스형태로 탈기되었을 것으로 예상 가능하였다. 이를 통해 고농도 질소폐수인 가축분뇨의 정화처리를 위해서는 유입수 주입방법의 제어를 통해 반응조 내 암모니아 농도의 관리가 필요하다는 것을 확인하였고, 실험 시 최대 암모니아성 질소 농도 조건을 550 mg/L 이하로 유지하도록 유입수를 분할 주입하여 운영하였다.

이후 질산화 반응이 진행됨에 따라 축적되는 FNA에 의한 독성 영향을 파악하기 위해 호기 조건에서 유입수를 반복 주입하며 질산화 반응을 유도하였다. 실험 결과 질산화 반응 유도 시 유입된 질소의 약 60%가량이 아질산성 질소 형태로 축적되고 이때 전체 산화성 질소 농도 중 아질산성 질소 농도의 비율(NO_2^--N/NO_x-N)는 최대 87%까지 증가하는 것을 확인하였다. 실험이 반복됨에 따라 유입수 중 암모니아성 질소 일부가 질산화되지 않은 채 잔류하여 농도가 조금씩 증가하는 경향을 보이나, 아질산성 질소가 질산성 질소로 산화되는 완전 질산화 반응은 충분히 억제되고 있는 것으로 확인되었다. Anthonisen et al. (1976)의 연구 결과와 비교했을 때 아질산성 질소의 축적은 FA 독성에 의한 NOB의 활성 억제 때문으로 예상되며(Fig. 4), 이를 통해 가축분뇨와 같은 고농도 질소 폐수의 경우 완전 질산화 반응이 일어나기 어려운 원수 특성상 기존의 질산화-탈질 공정을 통한 정화처리가 어렵다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 반응조 내 암모니아 농도 관리를 위해 유입수의 간헐 주입 및 운전 모드 변경이 용이한 SBR 반응조를 설계 및 제작하여 실험을 진행하였으며, SBR 운전 결과를 바탕으로 현장 적용을 통해 처

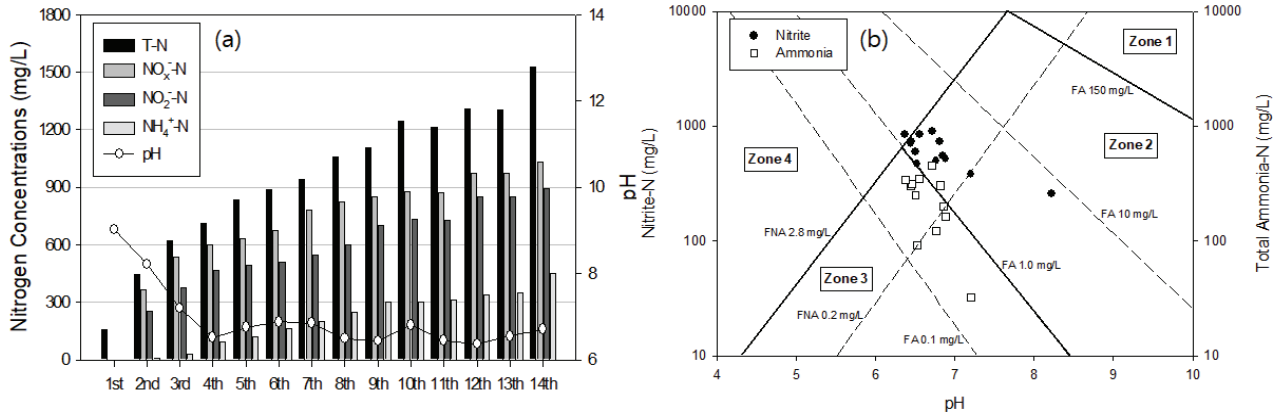

Fig. 4. Variation of nitrogen species accumulation and pH change by repeated livestock wastewater injection(a), Effects of nitrification bacteria by free ammonia and free nitrous acid concentrations(b); Zone 1: free ammonia inhibition to ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria, Zone 2: free ammonia inhibition to nitrite oxidizing bacteria, Zone 3: Complete nitrification, Zone 4: Free nitrous acid inhibition to nitrite oxidizing bacteria.

Table 2. Results of SBR operation with different hydraulic retention times

Parameter	Unit	HRT 10 days		HRT 4.5 days	
		Influent	Effluent	Influent	Effluent
T-N	mg/L	1,695.2 ± 240.8	428.7 ± 109.5	1,870.6 ± 380.2	598.9 ± 50.2
NH_4^+-N		1,620.5 ± 270.2	213.1 ± 55.3	1,774.4 ± 386.6	294.0 ± 52.4
NO_2^--N		5.5 ± 6.6	272.6 ± 56.7	6.0 ± 5.0	142.2 ± 29.7
NO_3^--N		32.8 ± 18.8	49.1 ± 12.3	6.8 ± 2.0	217.0 ± 57.6
NO_2^--N/NH_4^+-N	g/g	-	1.3	-	0.5
T-N removed	%	74.2		68.0	
NIR*	%	83.9		83.4	

* NIR: Nitrification Ratio (Removed NH_4^+-N conc./Influent NH_4^+-N conc.)

리수의 방류수 수질기준 달성여부를 확인하였다.

3.3 SBR 운전 결과 및 현장 적용 결과

기초실험 결과를 바탕으로 SBR 반응기를 제작 및 운전하여 유입수의 반응기 내 체류시간에 따른 처리효율 및 질소 거동 변화를 관찰하였다. 사용된 반응기의 용량 및 가축분뇨 성상 분석 결과에 따라 암모니아(FA) 독성에 의한 질산화 미생물 활성 억제를 예방하기 위한 반응조 최소 체류시간은 4～5일 수준으로 결정하였다. 운전 결과 체류시간에 따라 총질소 제거율, 아질산성 질소 전환율 및 처리수 내 아질산성 질소 대 암모니아성 질소의 농도비 차이를 통해 운전 목적에 맞는 적정 HRT 적용 필요성에 대해 확인할 수 있었으며 각 운전조건에서의 유입수 및 유출수 조성 변화는 Table 2에 정리하였다. 초기 가축분뇨 중 존재하는 암모니아의 제거율은 전체 기간에서 모두 80% 이상 제거되는 것으로 확인되었으나, 반응조 내 체류시간에 따라 질산화/탈질 효율에 영향을 미칠 뿐 아니라 체류시간 제어를 통해 처리수 중 NO_2^--N 및 NO_3^--N 농도를 제어할 수 있다고 알려진 기존 연구결과(Guo et al., 2017)와 같이 체류시간에 따라 처리수 중 잔류하는 아질산성 질소 및 질산성 질소의 농도에 의해 처리수의 총 질소 농도 및 제거율에서 차이를 보였다. 먼저 HRT 10일 조건에서의 총 질소 제거율은 약 74%, 처리수의 총 질소 농도는 약 428.7 mg/L 수준으로 확인되었다. 해당 조건에서 처리수 중 아질산성 질소 농도는 약 273 mg/L 까지 축적되는 것을 확인하였으며 이 때 암모니아성 질소 농도(213.1 mg NH_4^+-N/L)대비 아질산성 질소 농도의 비는 약 1.3으로 아나목스 공정에 필요한 이론적인 농도비인 1.32와 매우 비슷한 수준으로 처리수의 아나목스 공정 연계 가능성이 높을 것으로 판단하였다. 다만 유입수의 낮은 C/N 비로 인해 외부탄소원 주입 없이는 단독 처리를 통한 방류수 수질기준 달성이 다소 어려울 것으로 예상되어, 실제 현장 적용 시에는 별도의 외부탄소원을 주입하며 운전함으로써 방류수 수질기준 달성여부를 확인하였다. 보다 짧은 체류시간 조건(HRT 4.5일)으로 운전하였을 때에는 총 질소 제거율은 약 68%까지 감소하여 처리수의 총 질소 농도는 약 600 mg/L까지 상승하였으며 아질산성 질소 대 암모니아성 질소의 농도비는 약 0.5 수준으로 본 연구에서 목적으로 하는 단독처리 또는 아나목스 공정 연계 모두에 있어서 다소 적합하지 않은 조건으로 판단하였다. SBR 운전기간 중 반응조 내의 FA와 FNA

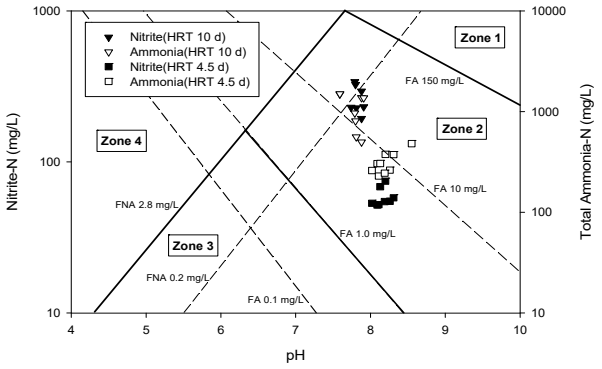

Fig. 5. Estimation of the status of the nitrification bacteria, affected by free ammonia and free nitrous acid concentration during SBR operation.

독성에 의한 질산화 미생물 활성 저해 여부 검토 결과(Fig. 5), 운전 초기 일부 시료를 제외하면 대부분의 운전 조건에서 FA에 의한 NOB 활성이 억제됨으로서 아질산성 질소의 축적이 일어날 수 있었던 것으로 확인되었으며, FA 및 FNA 독성에 의한 AOB의 억제는 발생하지 않은 것으로 보인다.

위 연구결과를 바탕으로 실제 SBR이 설치된 개별 농가에 적정 운전모드를 적용하고, 원활한 탈질반응을 위해 외부탄소원을 주입하며 운전결과를 관찰하였다(Fig. 6). 실제 현장 적용 시 앞선 연구결과에 따라 운전조건을 결정하였으며 유입수 중 암모니아를 전량 처리할 수 있을 정도로 충분한 양의 외부탄소원을 공급하여 운전한 결과 발생한 가축분뇨가 유입되는 첫번째 교반 단계에서 T-N 농도는 최대 140 mg/L

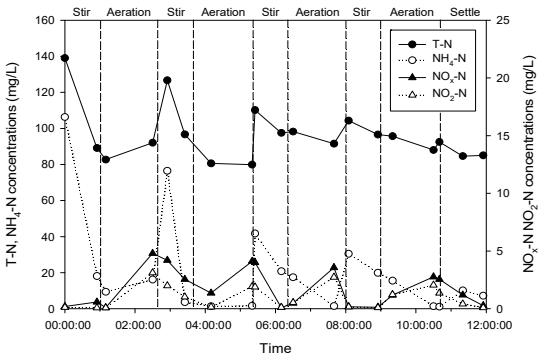

Fig. 6. Variation of the nitrogen species concentrations in full-scale SBR reactor to treat livestock wastewater.

수준으로 확인되었으며 각 운전모드를 거치며 아질산화-아탈질 반응이 진행되어 전체 운전 사이클이 끝난 후 처리수 중 T-N 농도는 약 85 mg/L 정도로 안정적으로 방류되는 것을 확인하였다. 현장 적용 결과 처리시설의 지중화 및 발생 가축분뇨의 직접 유입으로 인해 반응조 내 수온을 상대적으로 더 높게 유지할 수 있었고, 이를 통해 아질산화-아탈질 반응이 더 안정적으로 진행될 수 있었던 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 단축 질소제거공정을 적용하여 가축분뇨 중 질소 제거를 위한 적정 처리조건을 파악하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

1) 가축분뇨를 이용한 기초실험 결과 일정 암모니아 농도조건(550 mg NH_4^+-N/L 이하) 하에서는 질산화 반응이 원활하게 이루어졌으나, 고농도 암모니아 조건(1,100 mg NH_4^+-N/L 이상)에서는 FA 독성에 의해 AOB 및 NOB의 활성 억제로 질산화 반응이 원활하게 진행되지 않는 것을 파악하였다. 이를 통해 가축분뇨 정화처리 시 반응조 내 암모니아 농도 관리에 대한 필요성을 확인하였고 유입수 공급방법 변경을 통해 이를 해결하고자 하였다.

2) 실험결과와 기존 문헌자료를 비교하여 FA 및 FNA에 의한 질산화 미생물 활성 억제여부 검토 결과, 거의 대부분의 실험 조건에서 FA 독성에 의한 NOB 활성 억제에 의한 아질산성 질소의 축적이 확인되었으며, FNA에 의한 NOB 활성 억제는 거의 일어나지 않았을 것으로 판단된다.

3) 실험실 규모 SBR 운전결과 유입수의 체류시간에 따른 처리수의 조성 변화를 확인하여 운전 목적에 맞는 적정 체류시간의 적용이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 방류수 수질기준 달성을 위해서는 추가적인 외부탄소원 주입이 필요하였으며, 이를 고려하여 실제 현장 적용 결과 처리수 중 T-N 농도는 약 85.1 mg/L 수준으로 방류수 수질기준(250 mg T-N/L)을 만족하였다. 또한 체류시간 제어를 통해 가축분뇨 처리수 중 아질산성 질소와 암모니아성 질소의 농도비를 조절함으로써 SBR 처리수의 아나목스 공정 연계 가능성을 확인할 수 있었다.

4) 본 연구결과를 통해 가축분뇨 정화처리시설에서 배출되는 질소 부하량을 저감할 수 있을 뿐만 아니라 시설 운영비용 절감에도 도움이 될 것으로 예상된다. 또한 가축분뇨 처리수의 아나목스 공정 적용 가능성을 확인한 만큼, 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 다만 개별 축사 적용 시에는 처리시설의 환경에 따른 겨울철 수온 저하로 인한 질산화 반응 억제현상 및 축사별 가축분뇨 발생 특성 차이에 따른 부하 변동에 대한 대책 마련 등이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2022-01-03-014).

References

Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., and Srinath, E. G. (1976). Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid, *Journal (Water Pollution Control Federation),* 835-852.

Capodaglio, A. G., Hlavínek, P., and Raboni, M. (2016). Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: State of the art review, *Revista Ambiente and Agua,* 11, 250-267.

Gil, K. I. and Im, J. Y. (2011). Nitritation at various temperature conditions using anaerobic digester supernatant, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation,* 11(3), 237-243. [Korean Literature]

Gruber, N. and Galloway, J. N. (2008). An earth-system perspective of the global nitrogen cycle, *Nature,* 451(7176), 293-296.

Guo, Y., Guo, L., Sun, M., Zhao, Y., Gao, M., and She, Z. (2017). Effects of hydraulic retention time (HRT) on denitrification using waste activated sludge thermal hydrolysis liquid and acidogenic liquid as carbon sources, *Bioresource Technology*, 224, 147-156.

Hellinga, C., Schellen, A. A. J. C., Mulder, J. W., van Loosdrecht, M. V., and Heijnen, J. J. (1998). The sharon process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water, *Water Science and Technology,* 37(9), 135-142.

Jang, T. I., So, H. C., Son, J. G., and Choi, J. G. (2015). Analysis of non-point pollution loads from paddy fields treated liquid manure, *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, 258. [Korean Literature]

Kim, W. (2018). Total assessment for phosphorus input load of public wastewater and livestock manure treatment facilities in Korea, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 32(4), 325-335. [Korean Literature]

Lee, J. and Yim, S. (2008). Nitrification/denitrification rate and classification of output nitrogen according to COD loads in SBR, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(1), 30-35. [Korean Literature]

Liu, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Peng, L., Wand, D., and Ni, B. (2019). The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: A review, *Environment International*, 123, 10-19.

Ministry of Environment (ME). (2012). *Comprehensive measures for the advancement of livestock excreta management*, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME). (2020). S*tatistical data on the occurrence and treatment of livestock manure in 2019*, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Park, S., Jeon, J., and Bae, H. (2020). High-rate denitrifying process based on methanol and characteristics of organic carbon uptake, *Journal of Korean Society on Water Environment,* 36(6), 581-591. [Korean Literature]

Water Environment Research Foundation (WERF). (2014). *Deammonification*, https://www.waterrf.org/sites/default/files/file/2022-09/Deammonification.pdf (accesssed Oct. 2023).