

Mainstream ANAMMOX 공정 적용시 암모니아성 질소 대비 아질산성 질소 비율 도출 연구

이다원·이지원·길경익*

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Determination optimal ratio of ammonium to nitrite in application of the ANAMMOX process in the mainstream

Dawon Lee·Jiwon Lee·Kyungik Gil*

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
(Received : 10 February 2021, Revised : 16 February 2021, Accepted : 16 February 2021)

요약

도시화와 산업화로 인해 하수처리장으로 유입되는 하수 내 질소 농도가 증가함에 따라 부영양화 발생, 수생태계에 독성을 미치는 등의 악영향의 정도 또한 증가하고 있다. 고농도의 질소가 포함된 하수를 처리하기 위해 생물학적 질소 제거 공정에 대한 연구가 다방면으로 진행되고 있다. 기존의 생물학적 질소 제거 공정에 있어 산소공급과 외부탄소원 보충에 따른 상당한 비용이 요구된다. 이러한 측면에서 경제적인 개선이 이루어진 고도의 질소 제거 공정이 요구됨에 따라 최근 기존의 질산화-탈질 공정 보다 효율적이고 경제적인 혐기성 암모늄 산화 공정(ANaerobic AMMonium OXidation, ANAMMOX)이 제안되었다. 본 연구에서는 수처리공정에서의 ANAMMOX 공정의 안정성을 확인하고, Mainstream ANAMMOX 공정 구현을 위한 암모니아성 질소(NH_4^+) 대비 아질산성 질소(NO_2^-) 비율을 도출하는데 목적이 있다. 선행연구에서 제시된 기질비율을 바탕으로 산정한 비율을 적용해 실험실 규모의 Mainstream ANAMMOX 반응조를 운전하였다. Initial 구간에서 NH_4^+ 제거효율은 58~86%, 평균 제거효율은 70%였다. Advanced 구간에서 NH_4^+ 제거효율은 94~99%, 평균 제거효율은 95%였다. 연구 결과 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율이 증가함에 따라, Mainstream ANAMMOX 공정의 안정성이 확보되어 NH_4^+ 제거 효율 및 총질소(TN) 제거효율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 결과적으로, 본 연구결과는 이후 수처리공정에서의 ANAMMOX 공정 적용과 공정 안정성 확보에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

핵심용어 : 기질비, 수처리공정, 저농도, 질소, 혐기성 암모늄 산화 공정

Abstract

As the concentration of nitrogen in the sewage flowing into the sewage treatment plant increases due to urbanization and industrialization, the degree of adverse effects such as eutrophication and toxicity to the aquatic ecosystem is also increasing. In order to treat sewage containing high concentration of nitrogen, various studies on the biological nitrogen removal process are being conducted. Existing biological nitrogen removal processes require significant costs for supplying oxygen and supplementing external carbon sources. In this respect, as a high-level nitrogen removal process with economic improvement is required, an anaerobic ammonium oxidation process (ANAMMOX), which is more efficient and economical than the existing nitrification and denitrification processes, has been proposed. The purpose of this study is to confirm the stability of the ANAMMOX process in the water treatment process and to derive the ratio of ammonia nitrogen (NH_4^+) to nitrite nitrogen (NO_2^-) for the implementation of the mainstream ANAMMOX process. A laboratory-scale Mainstream ANAMMOX reactor was operated by applying the ratio calculated based on the substrate ratio suggested in the previous study. In the initial range, the removal efficiency of NH_4^+ was 58~86%, and the average removal efficiency was 70%. In the advanced range, the removal efficiency of NH_4^+ was 94~99%, and the average removal efficiency was 95%. As a result of the study, as the $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ ratio

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail: kgil@seoultech.ac.kr

• Dawon Lee Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea / Master's course(ekdnjs6688@naver.com)
• Jiwon Lee Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea / Ph.D. candidate(abcjeewon@seoultech.ac.kr)
• Kyungik Gil Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea / Professor(kgil@seoultech.ac.kr)

increased, the stability of the mainstream ANAMMOX process was secured, and it was confirmed that the NH_4^+ removal efficiency and the total nitrogen (TN) removal efficiency increased. As a result, the results of this study are expected to be used as basic data in the application of the ANAMMOX process in the mainstream.

Key words : anaerobic ammonium oxidation process, low-concentration, mainstream, nitrogen, substrate ratio

1. 서 론

계속되는 도시화와 산업화 속에서 수계로 유입되는 하·폐수의 양과 하·폐수 내 질소 농도가 증가함에 따라 배출허용기준은 점차 강화되고 있다(Lee and Kim, 2016; Choi et al., 2018; Park and Bae, 2019; Choi et al., 2020). 질소가 수계로 다량 유입되면 부영양화 발생, 수생태계에 독성을 미치는 등의 악영향을 끼치게 된다(Choi et al., 2014). 이에 따라, 질소 농도를 낮은 수준으로 유지하기 위해 질소 제거 공정에 대한 연구가 다방면으로 이뤄지고 있다. 1990년 초부터 학문적으로 연구되기 시작한 생물학적 질소 제거 공정은 현재 보편적으로 사용되고 있는 공정이지만(Choi et al., 2014; Lee and Kim, 2016; Choi et al., 2018) 질산화를 위한 폭기과정에서 상당한 에너지와 비용이 소요된다(Lee et al., 2008; Choi et al., 2014; Lee and Kim, 2016; Park and Rhu, 2017). 또한 탈질화를 위해 추가적으로 외부탄소원을 보충하는 과정에서 비용이 발생하고(Lee et al., 2008; Choi et al., 2014; Lee and Kim, 2016; Park and Rhu, 2017) 이후 발생하는 슬러지에 대한 처리, 온실가스의 부가적 생성(Park and Rhu, 2017) 등 문제점이 대두되고 있다. 이에 따라 하·폐수 처리 고도화 및 성능개선에 대한 많은 연구가 수행되고 있다(Lee and Kim, 2016). 국내 전체 전력소비량의 약 0.5%(16억 kWh)를 차지하는 하수처리장 전력소비량 중 약 40%는 질소 제거 시 요구되는 산소공급에 필요한 전력에 해당한다(MOE, 2010; Lee and Gil, 2017). 하수처리장의 에너지 자립율은 0.8%에 불과하다(MOE, 2010). 따라서 질소 제거와 관련한 연구에 있어서는 높은 에너지 효율을 보이고, 비용 절감이 가능해 경제적인 개선이 이루어진 고도의 질소 제거 공정이 요구되고 있다(Lee and Kim, 2016).

그에 따라, 고농도 질소 제거에 있어 생물학적 질소 제거 공정한 질산화-탈질 공정 보다 산소 및 외부탄소원 요구량이 각각 약 25%, 40% 저감되는 아질산화-아탈질 공정(Gil et al., 2002; Gil, 2006; Im and Gil, 2011; Im and Gil, 2014)이 제안되었다. 아질산성 질소에서의 탈질반응이 질산성 질소에서의 탈질반응보다 1.5배~2.0배 더 빠르고(Gil et al., 2002; Gil, 2006; Im and Gil, 2011), 생물학적 질소 처리 공정에서 발생하는 이산화탄소를 40% 절감(Im and Gil, 2014)할 수 있다는 장점을 가진다. 이전 공정의 아질산화 반응을 활용해 보다 더 효율적이고 경제적인 혐기성 암모늄 산화 공정(ANaerobic AMMonium OXidation, ANAMMOX)이 제안됨에 따라 이에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Park and Bea, 2019; Choi et al., 2020). ANAMMOX 공정은 혐기성 조건 아래 암모니아성 질소와 아질산성 질소를 각각 전자공여체와 전자

수용체로 이용해 질소가스 형태로 산화시키는 것이다(Lee et al., 2008; Choi et al., 2014; Lee and Kim, 2016; Oh, 2016a; Park and Rhu, 2017; Choi et al., 2018; Park and Bea, 2019; Choi et al., 2020). 질산화-탈질 공정에 비해 ANAMMOX 공정은 질소 제거 과정 단축(Lee et al., 2008), 질산화를 위한 폭기과정에서의 산소요구량 감소(Van Loosdrecht et al., 2004; Van Hulle et al., 2010; Okabe et al., 2011; Lee and Kim, 2016; Park and Bae, 2019; Choi et al., 2020), 외부탄소원 불필요(Lee et al., 2008; Okabe et al., 2011; Choi et al., 2014; Lee and Kim, 2016; Park and Bea, 2019), 슬러지 발생량 감소(Choi et al., 2014; Park and Rhu, 2017), 온실가스 배출량 감소(Van Hulle et al., 2010; Park and Rhu, 2017), 에너지 자립율 향상 등 장점을 가진다. 따라서 ANAMMOX 공정은 독립영양미생물에 의한 독립영양 공정임을 알 수 있다(Van Hulle et al., 2010; Lee and Kim, 2016; Oh, 2016a, 2016b; Park and Rhu, 2017).

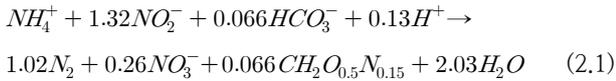
본 연구는 저농도 질소 폐수에 ANAMMOX 공정을 적용해 얻은 반응조 운전 결과를 바탕으로 진행되었다. 기존의 ANAMMOX 연구는 대부분 고농도 질소 폐수를 대상으로 이뤄지고 있으며, 공정의 안정성 또한 다수 확인되었다. 그에 비해 저농도 질소 폐수를 대상으로 한 연구는 아직 시작단계에 머물러 있다는 점에서, 본 연구는 저농도 질소 폐수에서의 ANAMMOX 공정의 안정성을 확인하고 나아가 ANAMMOX 공정의 성능개선을 도모할 수 있는 연구방향을 제시할 수 있다는 의의를 가진다.

결과적으로, 본 연구에서 아질산성 질소(NO_2^-)와 암모니아성 질소(NH_4^+)의 비율에 따른 ANAMMOX 공정의 안정성을 확인하였다. 1.00에서 1.30의 비율을 적용한 ANAMMOX 반응조 운전 결과를 바탕으로 질소 제거효율이 높은 암모니아성 질소(NH_4^+) : 아질산성 질소(NO_2^-) 비율을 도출하여 Mainstream ANAMMOX 공정 구현과 ANAMMOX 공정의 성능개선에 기여하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 구간별 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율

구간별 적용할 암모니아성 질소(NH_4^+)와 아질산성 질소(NO_2^-)의 비율 선정은 선행연구에서 제시된 비율을 참고하여 진행하였다. ANAMMOX 반응의 화학양론식은 식(2.1)과 같으며(Strous et al., 1998), 해당 식에 의해 양론적으로 제시된 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율은 1 : 1.32이다.



하지만 선행연구에서 제시된 비율은 양론적으로 제시된 비율과 차이를 보였다. Table 1은 앞선 선행연구에서 제시된 NH_4^+/NO_2^- 비율을 나타낸다. 이를 바탕으로, 양론적으로 제시된 비율과 선행연구에서 제시된 비율에 대한 ANAMMOX 반응을 확인하고, Mainstream ANAMMOX 공정 적용에 있어 가장 적절한 비율을 파악하기 위해, ANAMMOX 반응조 운전에 있어 전체적으로 1.00에서 1.30의 비율을 적용하였다.

Table 1. NH_4^+/NO_2^- ratio reported in literatures

	$NH_4^+ : NO_2^-$ Ratio
Van der Graaf et al., 1996	1.00 : 1.31
Strous et al., 1997	1.00 : 1.00
Urara Imajo et al., 2004	1.00 : 1.05
Guyen et al., 2004	1.00 : 1.20
Tsushima et al., 2007	1.00 : 1.20
Bea and Jung, 2009	1.00 : 0.82

2.2 연구대상 시료

저농도 질소 폐수를 대상으로 ANAMMOX 공정의 안정성 확보와 동시에 연구를 통해 확인하고자 하는 것을 보다 정확하게 실현하기 위해 본 연구에서는 합성폐수를 이용하여 실험실 규모 반응조를 운전하였다.

총 2개의 구간으로 각각 Initial range(I.R.)와 Advanced range(A.R.)이며, 구간의 목적에 맞게 1.00부터 1.30의 비율 또한 1.00부터 1.14, 1.15부터 1.30으로 나누어 적용하였다.

Initial 구간은 해당 구간 운전을 통해 선행연구에서 제시된 비율에 대한 ANAMMOX 반응의 구현을 확인하기 위해, 1.00부터 1.14 사이의 비율을 적용하였다. Advanced 구간은 Mainstream ANAMMOX 공정 적용에 있어 가장 적절한 비

율을 파악하기 위한 구간이며, 1.15부터 1.30 사이의 비율을 적용하였다.

반응조 운전에 사용된 합성폐수의 구간별 암모니아성 질소 (NH_4^+)와 아질산성 질소(NO_2^-) 농도는 Table 2를 통해 확인할 수 있다. 저농도 질소 폐수를 대상으로 하기 때문에 유입 NH_4^+ 농도를 34~50mg/L 사이로 설정하였다. 구간별로 설정한 NH_4^+/NO_2^- 비율과 앞서 설정한 NH_4^+ 농도를 기반으로 유입 NO_2^- 농도를 조절하였다. 각 구간의 평균 유입 NH_4^+ 농도는 39.7mg/L, 36.1mg/L, 평균 NO_2^- 유입 농도는 43.8mg/L, 42.8mg/L로 나타났다.

2.3 실험실 규모 반응조

ANAMMOX 공정을 구현하기 위해 삼각플라스크와 원통형 아크릴 반응조를 이용하였다. ANAMMOX 반응조는 열선을 이용해 30~35°C의 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 2차 침전지를 제외한 모든 반응조에 교반기를 함께 배치해 완전 혼합 상태를 확보하고, 균일한 수질을 유지하였다. Fig. 1에 본 연구를 위해 구현한 ANAMMOX 반응조의 모식도를 나타냈다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 실험실 규모 ANAMMOX 반응조 운전 결과

Fig. 2는 각각의 비율을 적용한 구간별 실험실 규모 ANAMMOX 반응조 운전 결과를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에는 암모니아성 질소(NH_4^+)와 아질산성 질소(NO_2^-)의 유입농도와 암모니아성 질소(NH_4^+), 아질산성 질소(NO_2^-), 질산성 질소(NO_3^-)의 유출농도를 나타냈으며, Fig. 2(b)에는 총질소(TN)의 유출농도를 나타냈다.

Initial 구간(I.R.) 후반부터 Advanced 구간(A.R.)까지의 운전 결과를 통해 NH_4^+/NO_2^- 비율이 커질수록 안정적으로 질소가 제거되는 것이 확인되었다.

Initial 구간의 경우 NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- 의 유출농도가 각각

Table 2. Influent concentration of ammonium and nitrite by range

Range	NH_4^+/NO_2^- Ratio	Concentration(mg/L)					
		NH_4^+			NO_2^-		
		Range	Average	Median	Range	Average	Median
Initial Range(I.R.)	1.00~1.14	35~40	39.7	40	40~45.8	43.8	44
Advanced Range(A.R.)	1.15~1.30	34~40	36.1	35.5	40.5~46.5	42.8	42.6

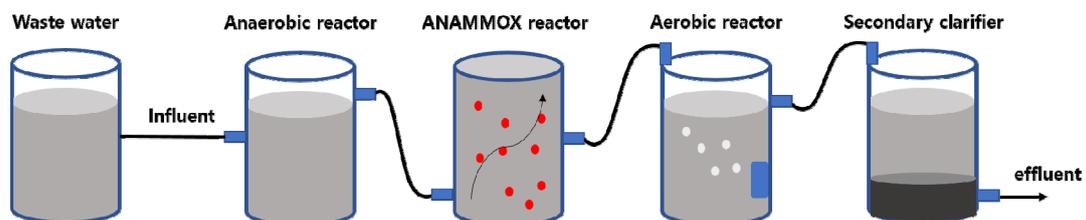


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory scale Mainstream ANAMMOX reactor.

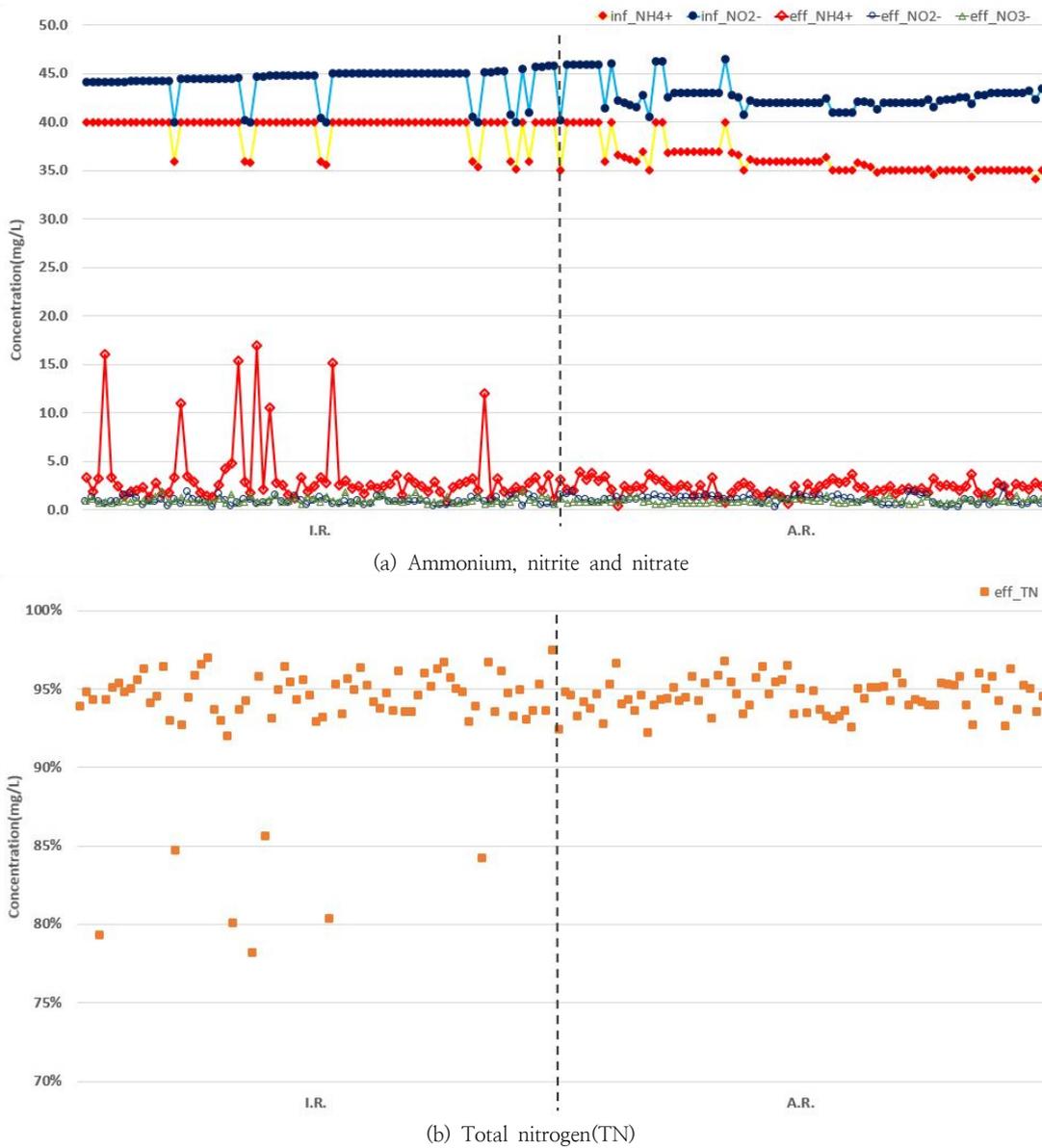


Fig. 2. Operation result of laboratory scale ANAMMOX reactor.

0.9~17mg/L, 0.12~1.8mg/L, 0.48~1.9mg/L였으며, 운전기간 동안의 질소 제거효율이 안정적이지 않았다. 이는 낮은 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율로 인해 ANAMMOX 공정에 필요한 기질이 충분히 공급되지 않은 것으로 판단된다. Advanced 구간의 경우 NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- 의 유출농도가 각각 0.4~3.9mg/L, 0.3~2.3mg/L, 0.55~1.55mg/L였으며, 안정적으로 질소가 제거되는 것을 확인하였다. Initial 구간보다 NH_4^+ 의 유출농도가 낮게 나타나 Advanced 구간에 적용한 비율에서 제거효율이 안정적이고 높아, 공정의 안정성을 확보할 수 있는 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율이 도출될 가능성을 확인하였다.

2개 구간의 총질소 유출농도는 각각 2.17~18.47mg/L, 2.51~6.25mg/L였다. NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- 의 유출농도를 통해 확인된 것과 마찬가지로, Advanced 구간은 안정적으로 질소가 제거되어 저농도 질소 폐수에 대해 ANAMMOX 공정의 안정성이 확보되었음을 알 수 있었다.

전체적으로 Initial 구간보다 Advanced 구간에서의 농도가 낮게 확인되어, Advanced 구간에 적용한 비율을 토대로 제거효율이 안정적이고 높은 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율 도출을 시도해야한다고 판단했다.

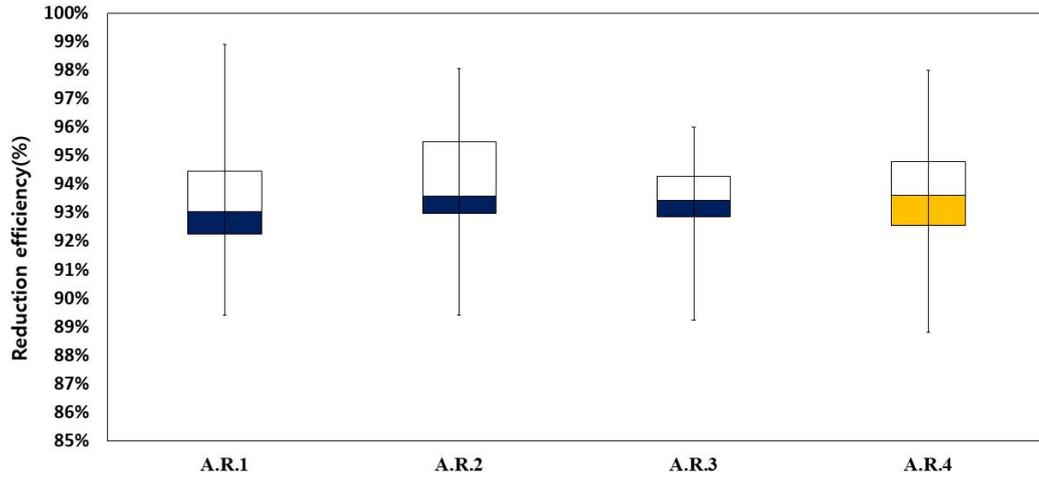
3.2 Mainstream ANAMMOX 공정 적용시 적절한 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율

제거효율이 높고 안정적인 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ 비율 도출을 위해 Advanced 구간에 적용한 비율을 다시 한 번 세부적으로 구분하였다. 총 4개 구간이며, Advanced range 1(A.R.1)~Advanced range 4(A.R.4)로 구성하였다. A.R.1 구간은 1.15부터 1.16 사이의 비율, A.R.2 구간은 1.16부터 1.20 사이의 비율, A.R.3 구간은 1.20부터 1.25 사이의 비율, A.R.4 구간은 1.25부터 1.30 사이의 비율을 적용한 구간이다.

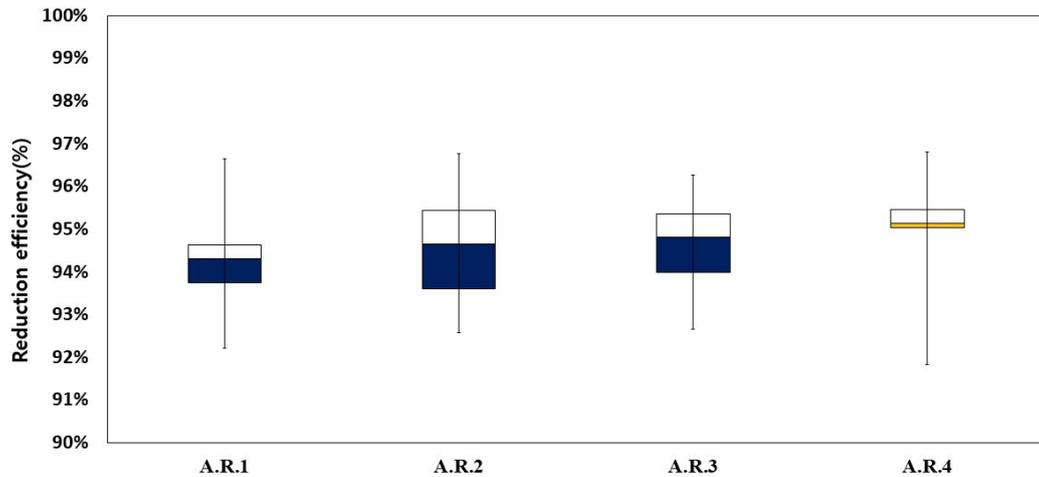
Fig. 3은 A.R.1, A.R.2, A.R.3, A.R.4 각 구간별 NH_4^+ 와 총

Table 3. Influent concentration of ammonium and nitrite by advanced range

Range		NH ₄ ⁺ /NO ₂ ⁻ Ratio	Concentration(mg/L)			
			NH ₄ ⁺		NO ₂ ⁻	
			Range	Median	Range	Median
Advanced Range (A.R.)	A.R.1	1.15~1.16	35~40	40	40.5~46.3	46
	A.R.2	1.16~1.20	34.8~40	36	40.8~46.5	42
	A.R.3	1.20~1.25	34.2~35.2	35	41.6~43.5	42.4
	A.R.4	1.25~1.30	34~35	34.5	42.6~44.5	43.4



(a) Ammonium reduction efficiency



(b) Total nitrogen(TN) reduction efficiency

Fig. 3. Reduction efficiency by range

질소(TN) 제거효율을 비교해 나타내고 있다. A.R.1 구간의 경우, NH₄⁺ 제거효율은 89~99%였으며, 평균 93%의 제거효율을 보였다. Initial 구간보다 향상된 제거효율을 보였으나, 세부적으로 구분한 Advanced 구간 중 가장 낮은 제거효율을 나타냈다. A.R.2 구간의 경우, NH₄⁺ 제거효율은 89~98%로 나타났으며, 평균 94%의 제거효율을 보였다. A.R.3 구간의 경우, Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 NH₄⁺ 제거효율은 A.R.2 구간과 비슷하게 나타났으며, 평균 93%의 제거효율을 보였다. A.R.1 구간보다는 A.R.2, 3 구간에서 공정의 안정성이 확보되었음을 Fig. 3을 통해 알 수 있었다.

A.R.4 구간의 경우, NH₄⁺ 제거효율은 92~97%로 가장 안정적인 제거효율을 보였다. 또한, 평균 95%의 높은 제거효율이 확인되었다. 총질소 제거효율 비교 결과, 평균 제거효율이 전 구간에 대해 94%, 95%, 95%, 95%로 모든 비율에서 비슷한 제거효율을 보였다.

이를 통해, NH₄⁺와 총질소 제거효율 비교를 바탕으로 ANAMMOX 공정 구현과 공정의 안정성 확보가 가능한 NH₄⁺/NO₂⁻ 비율은 안정적이고 높은 제거효율을 보인 비율 1.25~1.30인 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 질소 제거효율이 높고 안정적인 암모니아성 질소(NH₄⁺) : 아질산성 질소(NO₂⁻) 비율을 도출하고자 Mainstream ANAMMOX 반응조를 운전하였으며, 결과는 다음과 같다.

1) 선행연구에서 제시된 비율을 바탕으로 선정된 비율로 운전한 두 구간에 대한 반응조 운전 결과 NH₄⁺/NO₂⁻ 비율이 커질수록 안정적으로 질소가 제거되는 것이 확인되었다.

2) 1.00~1.30의 비율에서 1.15부터 1.30 사이의 비율을 적용한 Advanced 구간에서 안정적으로 질소가 제거되는 것을 확인함으로써 저농도 질소 폐수를 대상으로 하는 수처리공정에 대해 ANAMMOX 공정의 안정성이 확보되었음을 알 수 있었다.

3) NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻의 유출농도 뿐만 아니라 총질소에 있어서도 Initial 구간보다 Advanced 구간에서의 농도가 낮게 확인되어, Advanced 구간에 적용한 비율을 토대로 적절한 NH₄⁺/NO₂⁻ 비율 도출을 시도하였다. 그 결과 총질소 제거효율 비교 결과에서는 4구간 모두에서 비슷한 제거효율이 보였으나, NH₄⁺ 제거효율 비교 결과에서는 A.R.4 구간이 평균 95%의 높은 제거효율과 92~97%의 안정적인 제거효율을 보였다.

4) Mainstream ANAMMOX 공정 운전에 있어 ANAMMOX 공정 구현과 공정의 안정성 확보를 위한 가장 적절한 비율은 A.R.4 구간에 해당하는 비율 1.25~1.30으로 판단된다.

5) 결과적으로 본 연구결과는 이후 수처리공정에서의 ANAMMOX 공정 적용을 위한 Mainstream ANAMMOX 공정 구현과 안정성 확보를 통한 ANAMMOX 공정의 성능개선에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2017R1D1A1B06 035481)

References

Bae, HK, Jung, JY(2009). Qualitative and Quantitative Analysis of Microbial Community Structure in the Sequencing Batch Reactor for Enriching ANAMMOX Consortium, *J of Korean Society Of Environmental Engineers*, 31(10), pp. 919-926. [Korean Literature]

Choi, DH, Bea, HK, Jung, JY, Kim, SH(2014). Comparison of nitrogen removal efficiency on process stability for granular and immobilized anammox bacteria, *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, 28(2), pp. 195-206. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.11001/jksww.2014.28.2.195>]

Choi, DH, Jin, YO, Lee, CW, Jung, JY(2018). Successful start-up of pilot-scale single-stage ANAMMOX reactor through cultivation of ammonia oxidizing and ANAMMOX bacteria, *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, 32(5), pp. 371-379. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.11001/jksww.2018.32.5.371>]

Choi, DH, Yun, WS, Ju, DJ, Jung, JY(2020). Effect of Internal Recycle Ratio on Nitrogen Removal Efficiency in a Three-stage ANAMMOX Process for Treating Reject Water, *J. of Korean Society Of Environmental Engineers*, 42(5), pp. 259-266. [Korean Literature] [DOI <http://doi.org/10.4491/KSEE.2020.42.5.259>]

Gil, KI(2006). Nitrification of Anaerobic Digester Supernatant from Sludge Processing in MWTP, *J of Korean Society on Water Quality*, 22(3), pp. 540-545. [Korean Literature]

Gil, KI, Lee, YH, Choi, ES, Yun, ZW, Ha, JS(2002). Nitrification of Anaerobic Digester Supernatant by Suspended Growth Reactor and Biofilm Reactor, *J of Korean Society Of Environmental Engineers*, 24(8), pp. 1415-1422. [Korean Literature]

Güven, D., van de Pas-Schoonen, Katinka, S., Markus C., Strous, Marc, Jetten, Mike S. M., Sözen, Seval, Orhon, Derin, and Schmidt, Ingo(2004). Implementation of the Anammox Process for Improved Nitrogen Removal, *Environ. Sci. and Heal. PartA*, 39(7), pp. 1729-1738.

Im, JY, Gil, KI(2011). Evaluation of Nitrification of High Strength Ammonia with Variation of SRT and Temperature using Piggery Wastewater, *J of Korean Society on Water Quality*, 27(5), pp. 563-571. [Korean Literature]

Im, JY, Gil, KI(2014). characteristic of foaming in nitrification reactor using anaerobic digester supernatant and livestock wastewater, *J of Wetlands Research*, 16(4), pp. 433-441. [Korean Literature]

Imajo, U., Tokutomi, T., and Furukawa, K.(2004). Granulation of Anammox microorganisms in up-flow reactors, *Water Science and Technology*, 49(5), pp. 155-164.

Jetten, Mike SM, Wagner, Michael, Fuerst, John, Van Loosdrecht, Mark, Kuenen, Gijs and Strous, Marc(2001). Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process, *Current Opinion in Biotechnology*, 12(3), pp. 283-288. [DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00211-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00211-1)]

Lee, SB, Kim, YH(2016). Nitrogen Removal from Wastewater Using Anammox Process, *J. of Korean Society of Water Science and Technology*, 24(5), pp. 71-78. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2016.24.5.71>]

Lee, HH, Kim, IJ, Jung, JY, Kim, JH(2008). Determination of the Optimum NH-3N/NO₂-N Ratio by Anaerobic Batch Test in Anaerobic Ammonium Oxidation Process, *J. of Korean Society Of Environmental Engineers*, 30(7), pp.

- 700–704. [Korean Literature]
- Lee, JW, Gil, KI(2017). Effect of MLSS and Micro-algae on Nitrification based Photosynthetic Oxygen, *J of Wetlands Research*, 19(4), pp. 508–514. [Korean Literature]
- Ministry of Environment(2010). Master plan for energy independence [Korean Literature]
- Oh, SH(2016a). The Tendency of the N Removal by Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria with or without Packed Media in SBR, *J. of Korean Society of Water Science and Technology*, 24(2), pp. 71–79. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2016.24.2.71>]
- Oh, SH(2016b). Nitrogen Removal by Denitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation under Condition Providing Nitrate and Organics in Continuous Flow Reactor, *J. of Korean Society of Water Science and Technology*, 24(5), pp. 95–103. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2016.24.5.95>]
- Okabe, Satoshi, Oshiki, Mamoru, Takahashi, Yoshitaka, Satoh, Hisashi(2011). N₂O emission from a partial nitrification–anammox process and identification of a key biological process of N₂O emission from anammox granules, *water research*, 45(19), pp. 6461–6470. [DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.040>]
- Park, JM, Bea, WK(2019). Enrichment of Indigenous ANAMMOX Bacteria and Analysis on the Microbial Community of Reddish Biofilm in the Outflow Tubing, *J. of Environmental & Thermal Engineering*, 14(2), pp. 1–8. [Korean Literature]
- Park, HK, Rhu, DH(2017). Main-stream Partial Nitrification – Anammox (PN/A) Processes for Energy-efficient Short-cut Nitrogen Removal, *J. of Korean Society on Water Environment*, 34(1), pp. 96–108. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.15681/KSWE.2017.34.1.96>]
- Strous, M., Heijnen, J.J., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M.(1998). The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms, *Appl Microbiol Biotechnol*, 50(5), pp. 589–596.
- Strous, M., van Gerven, E., Kuenen, J.G. and Jetten, M.(1997). Ammonium removal from concentrated waste streams with the Anaerobic Ammonium Oxidation(Anammox) process in different reactor configurations, *Water Res.*, 31(8), pp. 1955–1962.
- Tsushima, I., Ogasawara, Y., Kindaichi, T., Satoh, H., and Okabe, S.(2007). Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing(anammox) biofilm reactors, *Water Res.*, 41(8), pp. 1623–1634.
- Van de Graaf, A. A., de Bruijn, P., Robertson, L. A., Jetten M. S. M., and Kuenen J. G.(1996). Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor, *Microbiology*, 142(8), pp. 2187–2196.
- Van Loosdrecht, M.C.M., Hao, X., Jetten, M.S.M. and Abma, W.(2004). Use of Anammox in urban wastewater treatment, *Water Science and Technology*, 1, pp. 87–94.
- Van Hulle, Stijn W.H., Vandeweyer, Helge J.P., Meesschaert, Boudewijn D., Vanrolleghem, Peter A., Dejans, Pascal, Dumoulin, Ann(2010). Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams, *Reviews in Chemical Engineering Journal*, 162(1), pp. 1–20. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2010.05.037>]