

ORIGINAL ARTICLE

호기성 그래놀 슬러지를 이용한 축산폐수의 생물학적 처리에 관한 연구

김현구¹⁾ · 안대희^{1,2)*}

¹⁾주식회사 블루뱅크, ²⁾명지대학교 환경에너지공학과

Biological Treatment of Livestock Wastewater using Aerobic Granular Sludge

Hyun-Gu Kim¹⁾, Dae-Hee Ahn^{1,2)*}

¹⁾BlueBank Co., Ltd., The 2nd engineering building, Myongji University, Yongin 17058, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University, Yongin 17058, Korea

Abstract

In this study, the treatment of livestock wastewater using an aerobic granular sludge based sequencing batch reactor was investigated. The reactor operation was carried out by general injection and split injection methods. The average removal efficiency of organic matter after the adaptation period was 71.5 and 87.4%, respectively. Some untreated organic matter was attributed to recalcitrant organic matter. The average removal efficiency of total nitrogen was 65.6 and 88.4%, respectively. These results indicate that the denitrification reaction by split injection was carried out smoothly. As for the solids, the ratio of aerobic granular sludge/mixed liquor suspended solid can be determined as the main factor of the process operation, and the ratio increased gradually and finally reached 86.0%. Correspondingly, the sludge volume index (SVI) was also improved, reaching 54 mL/g at the end of operation, and it is believed that the application of a short settling time contributed to the improvement of settleability.

Key words : Aerobic granular sludge, Livestock wastewater, Organic matter, Total nitrogen, Sludge volume index

1. 서론

국내 축산업의 규모는 해마다 성장하고 있으나 축산업으로 인한 수질오염, 악취, 토양의 양분과잉 등 환경문제는 사회적인 갈등을 야기하고 있다(Jeong et al., 2022). 일반적으로 축산폐수는 고농도의 유기물, 질소 및 부유물질 등을 함유하고 있으며(Lee and Shoda, 2008), 일부 미처리되어 배출되는 축산폐수는 수계의 수질오염을 가속화시키는 주요 원인이 된다(Wei et al., 2021).

축산폐수의 정화처리는 생물학적 처리를 기반으로 하며 연속회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR) 공법을 비롯한 다양한 공법들이 운영되고 있다(Kim and Lee, 2009). 생물학적 처리는 생물반응조 내 활성슬러지 미생물을 이용하여 운전조건 및 단위공정에 따라 유기물과 영양염류를 제거하는 과정을 진행하게 된다(Chen et al., 2022; Mishra et al., 2023). 그러나 축산폐수는 고농도의 오염원을 함유하고 있기 때문에 과부하로 인한 미생물 활동을 감소시켜 오염원 제거효율을 저하시킬 수 있다(Cho et al., 2016).

Received 14 April, 2023; Revised 26 May, 2023;

Accepted 16 June, 2023

*Corresponding author : Dae-Hee Ahn, Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University, Yongin 17058, Korea
Phone : +82-31-321-5901
E-mail : dhahn@mju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

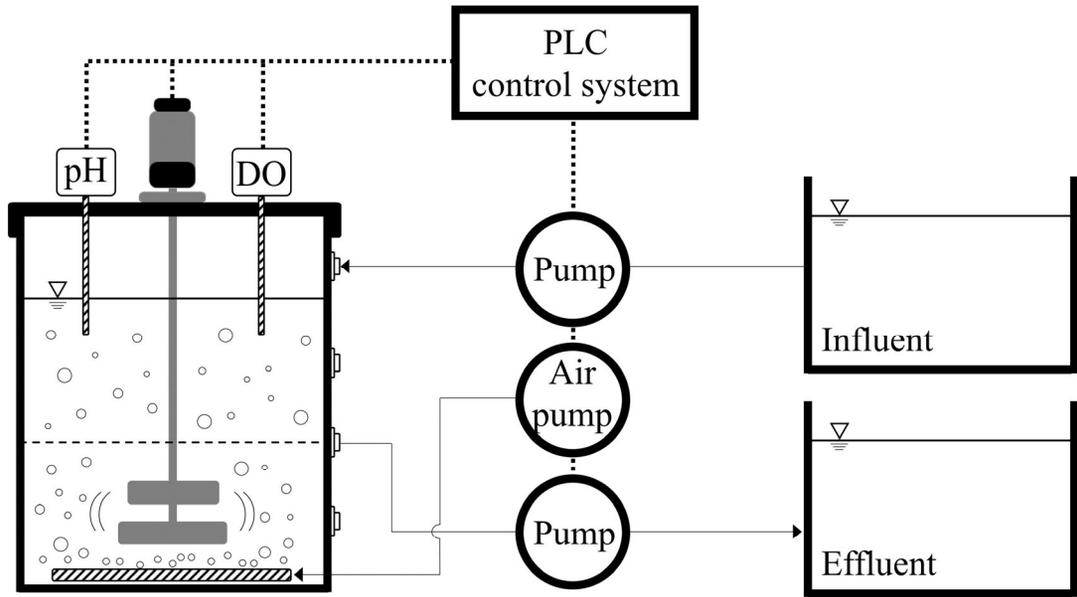


Fig. 1. Schematic diagram of lab. scale reactor.

호기성 그레놀 슬러지(Aerobic Granular Sludge, AGS)는 0.2 mm 이상의 직경을 보유하고 있으며, 높은 대사활동, 충격부하에 강한 저항성, 우수한 오염원 처리효율 및 침전성 등으로 인하여 많은 관심을 받고 있다(Yae et al., 2018; Kim and Ahn, 2019b). 호기성 그레놀 슬러지와 관련된 연구는 그레놀화 메커니즘, 안정성, 미생물 군집 분석 및 오염원 제거 등 광범위하게 진행되어 왔다(Li et al., 2008; Adav et al., 2009). 그러나 많은 연구는 아세테이트(acetate), 글리세롤(glycerol), 글루코스(glucose) 및 수크로스(sucrose)를 유입 기질로 사용하는 합성폐수를 사용하여 수행되었다(Liu et al., 2005; He et al., 2018; dos Santos et al., 2022; Elahinik et al., 2022; Qiu et al., 2022).

국외의 경우, 파일럿 규모의 하수처리(Miyake et al., 2022), 산업 폐수처리(Carrera et al., 2021)에 관한 연구가 보고되고 있으며, 국내에서는 일부 파일럿 규모에서의 하수처리(Yae et al., 2018; Mo et al., 2019)에 관한 연구와 혐기성 소화(Won et al., 2009) 및 실험실 규모의 다양한 연구가 보고되고 있으나(Jo et al., 2021), 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 축산폐수 처리에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본

연구에서는 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 축산폐수의 생물학적 처리에 관한 연구를 수행하였으며, 실제 축산폐수를 사용한 실험실 규모의 연구를 수행하였다. 이에 따라 운전조건에 따른 유기물(Cheical Oxygen Demand, COD), 총질소(Total Nitrogen, TN) 제거 효율과 고형물 성분인 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) AGS의 거동 및 SVI₃₀ (sludge volume index)의 평가를 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 유입수 성상 및 실험재료

실험에 사용된 축산폐수 유입수는 국내 J군 가축분뇨 공공처리시설에서 전체 처리과정 중 고액분리 과정을 거친 생물반응조로 유입되는 폐수를 채수하여 사용하였다. 전체 운전기간 동안 채취된 유입수의 평균 COD는 3,676.8(3,420.0~3,940.0) mg/L, TN은 862.9(838.0~904.0) mg/L로 나타났다. 호기성 그레놀 슬러지는 실험실 규모의 회분식 반응기에서 자체 배양한 0.2 mm 이상 크기의 슬러지를 선별하여(80 mesh/0.2 mm STS sieve) 사용하였으며, 초기 MLSS 및 호기성 그레놀 슬러지(AGS)의 농도는 각각

Table 1. Experimental conditions of lab. scale reactor

Effective volume (L)	Flow (L/d)	Cycles/d	VER (%)	HRT (h)	pH	DO (mg/L)	Temp. (°C)
5	5	2	50	24	7.4~7.8	2.0~3.2	23.7~24.2
Operation mode for 1 cycle (min)							
mode #1: Fill(100)→Oxic(240)→Anoxic(100)→Oxic(240)→Settle(10)→Draw(10)→Idle(20)							
mode #2: Fill(100)→Oxic(240)→Fill&Anoxic(100)→Oxic(240)→Settle(10)→Draw(10)→Idle(20)							

4,580, 3,780 mg/L로 초기 MLSS 농도 중 AGS 농도의 비율(AGS/MLSS)은 82.5%를 나타내고 있었다.

2.2. 실험장치 및 운전조건

실험에 사용된 반응기는 연속회분식 반응기로서, 유효용적 5 L (155 mm × 155 mm × 222 mm)의 아크릴 재질 반응기를 사용하였다(Fig. 1). 유입수 유입과 처리수 유출을 위한 포트는 전면부에 설치하였으며, 정량펌프(GT-150D, Green tech, Korea)를 이용하여 유입과 유출과정을 진행하였다. 반응기 내 원활한 혼합을 위하여 교반기(K61G6NC-SU, GGM, Korea)를 설치하였으며, 포기 반응을 위하여 에어펌프(LP-60A, Kosung valve, Korea)를 통하여 실리콘 호스로 연결된 다공성 디퓨저를 반응기 바닥면 부분에 설치하였다. 전체 운전은 72 d간 수행되었으며, 운전 시작 후 미생물의 축산폐수 적응 기간도 함께 고려하였다. 운전조건은 총 2가지로 구분하였으며, 유입수 일반주입 조건(적용 기간 포함, 운전조건 #1)과 분할주입 조건(운전조건 #2)으로 구분하여 운전을 수행하였다. 운전시작 후 적용 기간에서 운전조건 #1 단계 20 d까지의 유입 원수 조건은 동일하였다. 일반주입 조건에서의 단계별 운전은 유입(100 min), 포기(240 min), 무산소(100 min), 포기(240 min), 침전(10 min), 유출(10 min) 및 휴지(20 min)로 실시하였으며 분할주입 조건에서는 유입, 무산소 단계에서 각각 50%씩 유입수를 주입하였다. 반응조의 1 사이클(cycle) 운전시간은 12 h이며 반응조 유입수 체적 대 유효 체적의 비율인 교환율(Volume Exchange Rate, VER)은 50%로 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)은 24 h으로 설정하였다. 실험에 사용된 전체 기기 장비 및 운전시간의 제어는 PLC (Programmable Logic Controller) 제어 프로그램을 사용하였다. 전체 운전과정에서의 pH는 7.4~7.8, 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)는 2.0~3.2 mg/L, 수온은 23.7~24.2°C의 범위로 유지되

었다. 실험실 규모 반응기의 운전조건을 Table 1에 나타냈다.

2.3. 분석방법

수질분석을 위한 시료의 COD는 reactor digestion method (Hach method 8000), TN은 persulfate digestion method (Hach method 10072)에 준하여 흡광광도계(DR-3900, Hach, USA)를 이용하여 매일 분석하였다. 호기성 그레놀 슬러지와 관련된 분석항목인 MLSS (2540 D. method), SVI₃₀ (2710 D. method)은 standard method를 기준으로 3 d 간격으로 분석하였다(APHA, 2008). 전체 MLSS 중 호기성 그레놀 슬러지의 비율(AGS/MLSS)은 슬러지 채취 후, 0.2 mm 이상 크기와 이하 크기의 슬러지를 선별하여 산정하였다(Kim and Ahn, 2019a).

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거효율

Fig. 2에는 전체 운전기간 동안의 유기물 변화를 나타냈다. 운전시작 후 약 12 d 동안 초기 단계에서의 유기물 제거효율은 다소 낮은 점을 관찰할 수 있으며, 이후 점차적으로 안정화되는 것을 확인할 수 있었다. 적용 기간인 12 d 이후 운전조건 #1에서의 유기물 제거 경향은 운영 기간이 길어짐에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 적용 기간을 제외한 운전조건 #1에서 처리수의 유기물 평균 제거효율은 71.5%로 나타났다. 분할주입을 진행한 운전조건 #2에서의 유기물 제거 경향은 운전조건 #1 대비 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, 운전조건 #1과 마찬가지로 운영 기간이 길어짐에 따라 전반적인 유기물 제거효율은 증가하는 것으로 나타났으며 처리수의 유기물 평균 제거효율은 87.4%로 나타났다. 일반적으로 호기성 그레놀 슬러지 기반 공정의 안정성을 위해서는 공정의 장기간 운영이 필요하다

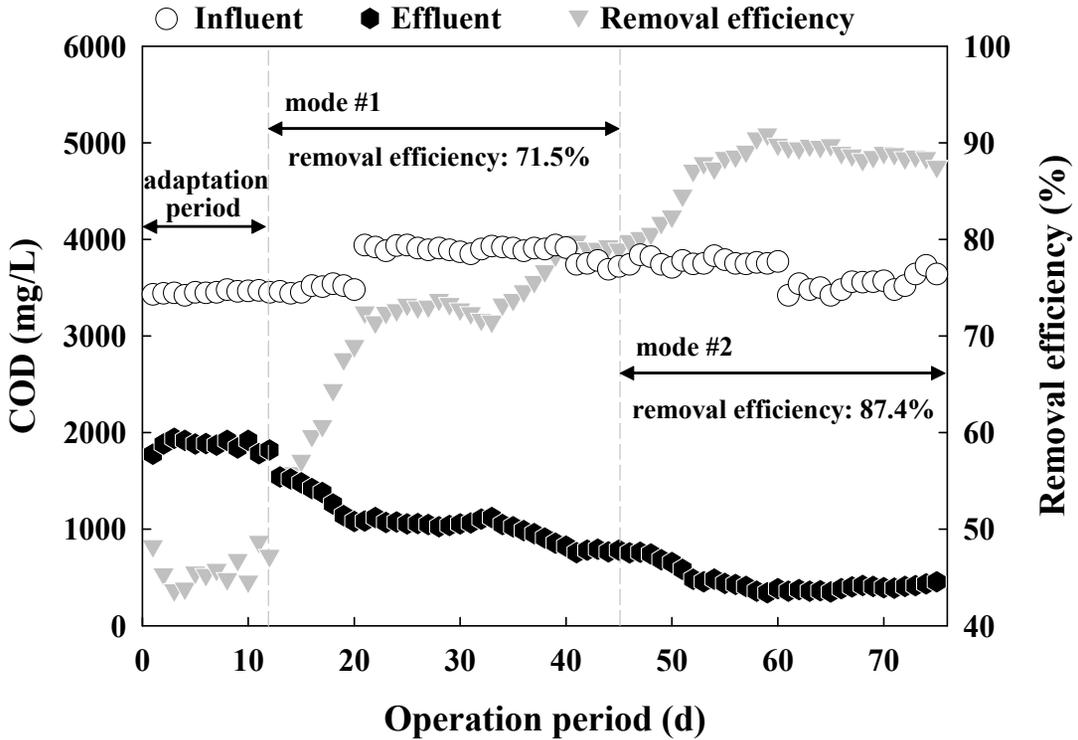


Fig. 2. Results of COD concentration during the operation period.

고 보고되고 있다(Bassin et al., 2019). 일부 연구에서는 유기물 종류에 따른 차이는 있으나 일반적으로 높은 유기물 부하율(8 kg COD/m³ day)에서 호기성 그레놀 슬러지 형성의 안정성을 저하시킨다고 보고하고 있으며(Tay et al., 2004), 본 연구에서는 상대적으로 낮은 유기물 부하율(3.4~3.9 kg COD/m³ day)을 나타내 그레놀 형성이 유지된 것으로 판단된다. Tang et al.(2022)은 혐기성 멤브레인 반응기를 이용하여 축산 폐수 처리에 관한 연구를 수행하였다. 주요 운전인자를 수리학적 체류시간으로 설정하여 20, 15 및 10 d로 변경한 결과, 유기물 제거효율은 80~95%의 범위로 나타났음을 보고하였으며, 짧은 수리학적 체류시간이 유기물 제거효율에 도움이 되는 것으로 보고하고 있다. 본 연구는 운전조건 #1에서 71.5%의 유기물 제거효율이 운전조건 #2에서 87.4%까지 상승하였으며, 수리학적 체류시간은 1 d로 고정하여 운전하였다. 따라서 상대적으로 짧은 수리학적 체류시간 대비 높은 유기물 제거효율을 나타낸 것으로 판단된다. Kim and Ahn(2019a)

은 실제 하수원수 처리를 목적으로 연속회분식 공정을 이용하여 수리학적 체류시간 변경에 따른 호기성 그레놀 슬러지의 오염원 제거효율에 미치는 영향을 평가하였다. 12, 8 및 6 h에서의 유기물 제거효율은 체류시간이 짧아질수록 증가하며 6 h에서의 유기물 제거효율은 93.2%로 보고하고 있다. 따라서, 본 연구에서 결정한 체류시간(1 d) 대비 짧은 체류시간(6 h)에서 유기물 제거효율은 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 판단된다. Rosman et al.(2014)은 고무공장 폐수 처리를 위하여 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 연속회분식 공정을 이용하여 수리학적 체류시간을 24, 12 및 6 h로 감소시키며 연구를 진행하였다. 운전결과 본 연구와 동일한 24 h에서의 유기물 제거효율은 72.8%를 나타내 본 연구의 운전조건 #1에서의 유기물 제거효율과 유사한 효율을 나타냈다. 본 연구에서 유기물의 완벽한 제거가 이루어지지 않은 점은 축산폐수 내 함유된 난분해성 유기물질에 기인한 것으로 판단되며, 이는 물리·화학적 처리공정을 이용한 추가 처리의 필요성을 시사하고 있다.

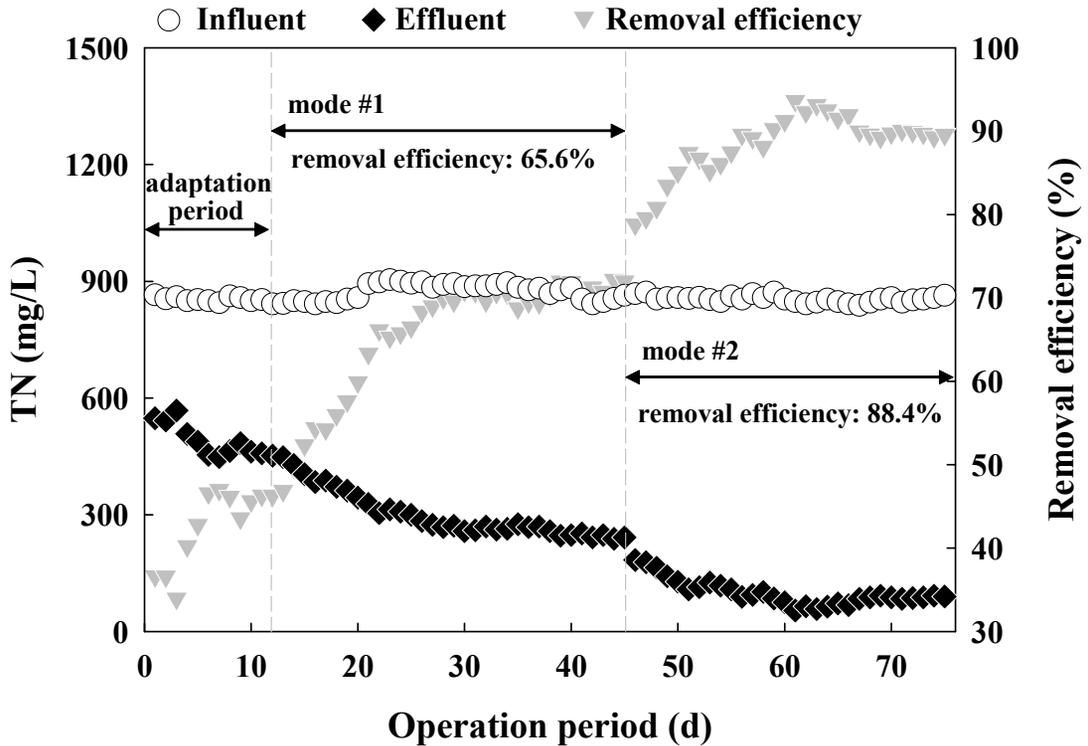


Fig. 3. Results of TN concentration during the operation period.

3.2. 총질소 제거효율

전체 운전기간 동안의 총질소 제거 거동을 Fig. 3에 나타냈다. 유기물과 마찬가지로 초기 안정화 및 적응 기간으로 판단되는 약 12 d 동안의 총질소 제거효율은 매우 낮은 것으로 나타났다. 이후 운전조건 #1에서의 총질소 제거 경향은 운영 기간이 길어짐에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 적응 기간을 제외한 운전조건 #1에서 처리수의 총질소 평균 제거효율은 65.6%로 나타났으며 유기물 제거효율 대비하여 다소 낮은 결과를 나타냈다. 호기성 그레놀 슬러지 기반 공정에서 발견되는 미생물 속(genera)은 *Pseudomonas*, *Devosia*, *Flavobacterium*, *Nitrosospira*, *Nitrospira*, *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Ca. Accumulibacter* 및 *Ca. Competibacter* 등으로 보고되고 있으며(Alves et al., 2022), 유입수 일반 주입 조건에서 나타난 낮은 총질소 제거효율은 *Thiothrix* 및 *Phenylobacterium*과 같은 유기물 제거 미생물이 질소 제거 미생물 대비 우점화되었기 때문인 것으로 판단된다(Liang et al., 2018). 또한, 암모니아

성 질소의 질산화 과정 이후 무산소 조건에서 진행되는 탈질 과정 시 필요한 탄소원이 부족하기 때문에 총질소 제거효율이 낮게 나타난 것으로 판단된다(Kwon et al., 2022). 분할주입을 진행한 운전조건 #2에서의 처리수의 총질소 평균 제거효율은 88.4%로 운전조건 #1 대비하여 다소 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분할주입을 통하여 질산성 질소의 탈질 과정에 필요한 유기물이 일부 공급되어 탈질 반응이 보다 원활히 이루어져 전체적인 총질소 제거효율이 높아진 것으로 해석할 수 있다(Kwon et al., 2021). 유입수 분할주입은 질소 제거효율을 향상시키는데 효과적임을 보고한 Lee et al.(2020)은 SBR 공정의 다단계 유입수 주입 전략을 통하여 단계 유입에서 C/N비(carbon/nitrogen ratio)가 높을수록 높은 질소 제거율을 기대할 수 있는 것으로 보고하고 있으며 분할주입을 통한 질소 제거율이 증가한 본 연구와 유사한 경향을 나타내고 있다. 도시하수 처리를 위하여 호기성 그레놀 슬러지 기반 SBR 공정을 이용한 연구를 수행한 Yae et al.(2018)은 보다 효율적

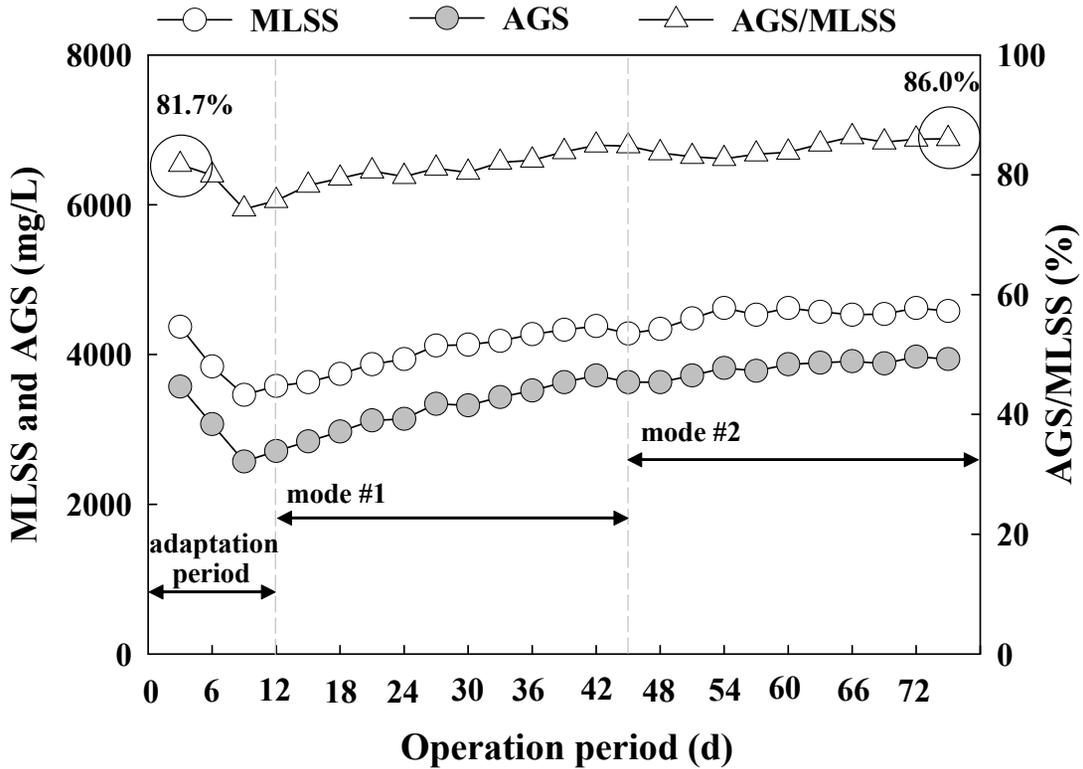


Fig. 4. Results of MLSS, AGS concentration and AGS/MLSS ratio during the operation period.

인 질소 제거를 위하여 유입수 분할주입 운전을 실시하였으며, 76.7%의 총질소 제거효율을 보고하고 있다. 따라서, SBR 공정에서의 유입수 분할주입 방법은 총질소 제거효율 증대를 위한 효율적인 운전전략으로 판단되며, 분할주입 시점 및 시간 등 운전조건 세분화를 통한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

3.3. MLSS 및 AGS

전체 운전기간 동안의 MLSS, AGS의 거동 및 AGS/MLSS 비율 변화를 Fig. 4에 나타냈다. 초기 적응기간 동안의 전체 고형물 거동은 감소하는 경향을 나타냈으며, 운전 시작 시점의 MLSS, AGS의 농도는 각각 4,370, 3,570 mg/L에서 12 d 후 3,580, 2,710 mg/L 까지 감소하였다. 이에 따른 AGS/MLSS 비율은 81.7%에서 12 d 후 75.7%까지 감소하는 경향을 나타냈다. 초기 적응기간 동안의 전체 고형물의 감소하는 경향은 반응기의 침전 및 처리수 유출 단계에서 침전성이 불량한

일부 슬러지가 배출되었기 때문인 것으로 판단된다. 이는 슬러지 침전성(SVI₃₀)에 의한 결과로도 설명이 가능하다. 적응기간 이후 운전조건 #1에서의 전체 고형물 거동은 점차 회복되는 경향을 나타냈으며, 지속적인 증가 경향을 나타냈다. 운전조건 #1 종료 시점에서의 MLSS, AGS의 농도는 각각 4,280, 3,630 mg/L로 나타났으며, AGS/MLSS 비율은 84.8%로 분석되었다. 또한, 운전조건 #2에서의 전체 고형물 거동도 운전조건 #1과 마찬가지로 다소 상승하는 경향을 나타냈으나, 일정 시점(약 9 d 경과 후) 이후 일정 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있었으며, 운전조건 #2 종료 시점에서의 MLSS, AGS의 농도는 각각 4,580, 3,940 mg/L로 나타났다. 전반적으로 초기 적응기간 이후의 전체 고형물 거동은 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었으며, 호기성 그레놀 슬러지의 비율 또한 증가하여 최종적으로 86.0%에 도달하는 것을 관찰할 수 있었다. 혐기성 생물반응조를 이용한 축산폐수 처리에 관한 연구를 수

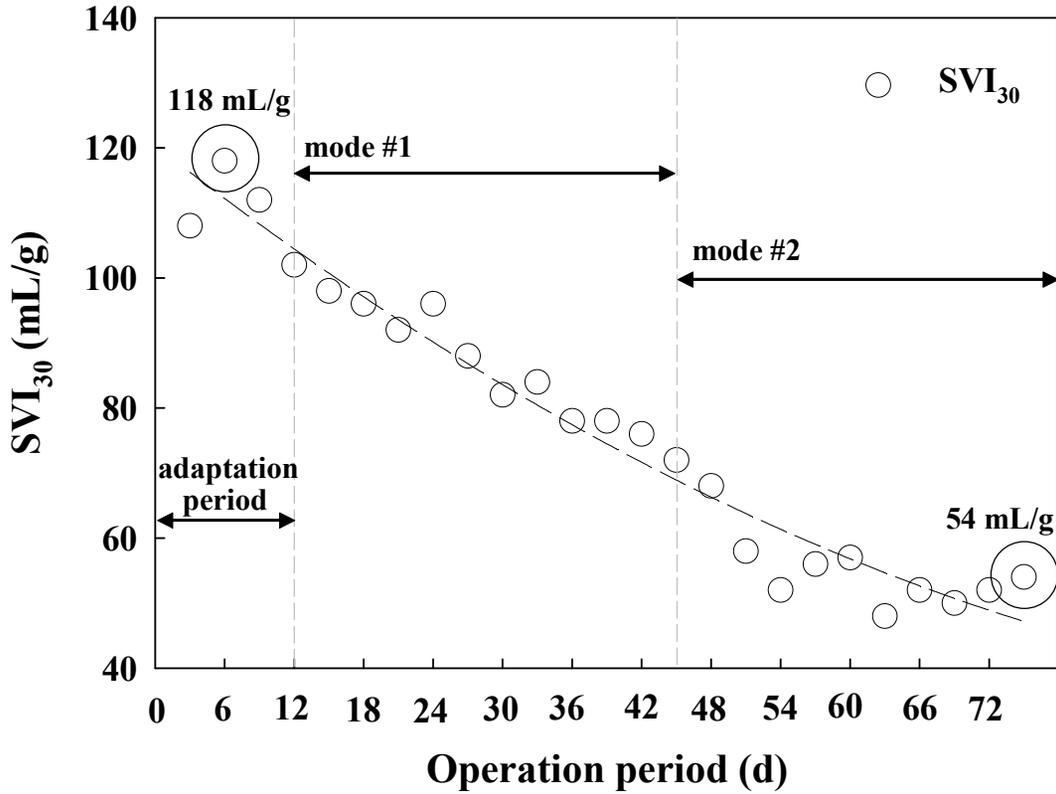


Fig. 5. Results of SVI₃₀ value during the operation period.

행한 Lee and Kim(1999)은 소화슬러지를 이용한 결과, 적응 기간은 약 40 d 정도가 소요되는 것으로 보고하고 있으며 본 연구(12 d) 대비 장기간 소요되는 것으로 나타나 호기성 그레놀 슬러지의 경우, 일반 활성슬러지 대비 고농도 부하에 대한 적응성이 우수한 점을 확인할 수 있었다. Mourão et al.(2021)은 일반 활성슬러지를 이용한 축산폐수 처리 시, 호기성 그레놀 슬러지 형성에 소요되는 기간을 평가한 결과, 운전시작 후 54 d이 소요되었다고 보고하고 있다. Tang et al.(2022)은 3.6 kg COD/m³ day의 유기물 부하율에서 호기성 그레놀 슬러지의 형성이 가속화된다고 보고하였으며, 본 연구에서의 유기물 부하율(3.4~3.9 kg COD/m³ day)이 해당 범위 내로 유지됨에 따라, AGS/MLSS 비율이 전반적으로 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

3.4. 슬러지 침전성 (SVI₃₀)

Fig. 5에는 전체 운전기간 동안의 슬러지 침전성 변화를 나타냈다. 적응 기간 동안의 침전성은 102~118 mL/g의 범위로 변동폭이 큰 것으로 나타났으며, 침전성이 좋지 않은 특성을 나타내고 있었다. 해당 기간 동안 반응기의 침전 및 처리수 유출 단계에서 침전성이 좋지 않은 해당 미생물(미세 플럭)이 배출되는 것을 육안으로 관찰할 수 있었다. 적응 기간 이후 운전조건 #1에서의 슬러지 침전성은 점진적으로 개선되는 경향을 나타냈으며, 종료 시점에서의 침전성은 72 mL/g으로 분석되었다. 운전조건 #2에서의 슬러지 침전성 또한 지속적으로 개선되었으며, 전체 고형물 거동이 일정 시점(약 9 d 경과 후) 이후 일정 수준으로 유지되는 것에 따라 침전성도 큰 변동 없이 유지되었다. 이에 따라 운전조건 #2 종료시점에서의 침전성은 54 mL/g으로 분석되었다. 초기 적응 기간 이후의 슬러지 침전성이 점진적으로 개선되는 것은 고형물 거동에서 분석한 바와 같이, 전체 AGS/MLSS 비율이 증가함에 따라 침전성이 개선

되는 것으로 설명될 수 있다. Miyake et al.(2023)은 호기성 그레놀 슬러지 기반 SBR 공정을 이용한 하수처리 연구를 수행하였으며, 포기 조건 조절에 따라 그레놀 형성에 유리한 조건을 유지할 수 있으며, 그레놀 비율 증가에 따라 슬러지 침전성이 개선된다고 보고하고 있다. 또한, 호기성 그레놀 슬러지 침전성 개선에 도움이 되는 것으로 보고되고 있는 짧은 침전시간 유지를 적용한 운전전략 적용도 침전성 개선에 영향을 미친 것으로 판단된다(Wan et al., 2015; Szabó et al., 2016).

4. 결 론

본 연구에서는 호기성 그레놀 슬러지 기반 SBR 공정을 이용한 축산폐수 처리에 관한 연구를 수행하였으며 유기물, 총질소, 고형물 및 슬러지 침전성을 평가하였다. 유입수 일반주입(운전조건 #1)과 분할주입(운전조건 #2)을 적용한 결과, 적응기간 이후 유기물의 평균 제거효율은 각각 71.5, 87.4%로 나타났다. 일부 미처리된 유기물은 난분해성 유기물에 기인한 것으로 판단된다. 총질소의 평균 제거효율은 각각 65.6, 88.4%로 나타났으며, 분할주입에 따른 탈질 반응이 원활히 이루어진 것으로 판단된다. 고형물은 AGS/MLSS의 비율이 공정 운영의 주요 인자로 결정될 수 있으며, 해당 비율은 점진적으로 증가하여 최종적으로 86.0%를 나타냈다. 이에 따른 슬러지 침전성 또한 개선되어 운전종료 시점에서 54 mL/g을 나타냈으며, 짧은 침전시간 적용이 침전성 개선에 영향을 미친 것으로 판단된다. 향후 연구는 물리·화학적 처리공정을 연계한 난분해성 유기물 제거, 분할주입 조건 세분화를 통한 총질소 제거효율 분석 및 장기간 공정 운영에 따른 미생물 군집분석을 통한 호기성 그레놀 슬러지 특성 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 경기도형 연구자 중심의 R&D지원(과제번호#2022-011)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Adav, S. S., Lee, D. J., Lai, J. Y., 2009, Proteolytic activity in stored aerobic granular sludge and structural integrity, *Bioresour. Technol.*, 100, 68-73.
- Alves, O. I. M., Araújo, J. M., Silva, P. M. J., Magnus, B. S., Gavazza, S., Florencio, L., Kato, M. T., 2022, Formation and stability of aerobic granular sludge in a sequential batch reactor for the simultaneous removal of organic matter and nutrients from low-strength domestic wastewater, *Sci. Total Environ.*, 843, 156988.
- American Public Health Association (APHA), 2008, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, American public health association, Washington D.C., USA.
- Bassin, J. P., Tavares, D. C., Borges, R. C., Dezotti, M., 2019, Development of aerobic granular sludge under tropical climate conditions: the key role of inoculum adaptation under reduced sludge washout for stable granulation, *J. Environ. Manag.*, 230, 168-182.
- Carrera, P., Casero-Díaz, T., Castro-Barros, C. M., Méndez, R., Val del Río, A., Mosquera-Corral, A., 2021, Features of aerobic granular sludge formation treating fluctuating industrial saline wastewater at pilot scale, *J. Environ. Manage.*, 296, 113135.
- Chen, H., Yang, E., Tu, Z., Wang, H., Liu, K., Chen, J., Wu, S., Kong, Z., Hendrik Sanjaya, E., Yang, M., 2022, Dual inner circulation and multi-partition driving single-stage autotrophic nitrogen removal in a bioreactor, *Bioresour. Technol.*, 355, 127261.
- Cho, K. J., Shin, S. G., Lee, J. Y., Koo, T. W., Kim, W., Hwang, S. H., 2016, Nitrification resilience and community dynamics of ammonia-oxidizing bacteria with respect to ammonia loading shock in a nitrification reactor treating steel wastewater, *J. Biosci. Bioeng.*, 122, 196-202.
- dos Santos, A. F., Frutuoso, F. K. A., de Carvalho, C. D. A., Lira, V. N. S. A., Barros, A. R. M., dos Santos, A. B., 2022, Carbon source affects the resource recovery in aerobic granular sludge systems treating wastewater, *Bioresour. Technol.*, 357, 127355.
- Elahinik, A., Haarsma, M., Abbas, B., Pabst, M., Xevgenos, D., van Loosdrecht, M. C. M., Pronk, M., 2022, Glycerol conversion by aerobic granular sludge, *Water Res.*, 227, 119340.
- He, Q., Song, Q., Zhang, S., Zhang, W., Wang, H., 2018, Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources: reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions, *Chem. Eng. J.*, 331, 841-849.

- Jeong, M. K., Lee, Y. G., Choe, J. Y., 2022, Environmental impact of livestock industry: analysis and policy tasks, R929, Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea.
- Jo, G. S., Hong, S. W., Kim, H. G., Zhuliping, Ahn, D. H., 2021, Removal of biological organics in high-salinity wastewater produced from methylcellulose production and subsequent changes in the microbial community, *Environ. Eng. Res.*, 26, 200187.
- Kim, H. G., Ahn, D. H. 2019a, Effects of different hydraulic retention times on contaminant removal efficiency using aerobic granular sludge, *J. Environ. Sci. Int.*, 28, 669-676.
- Kim, H. G., Ahn, D. H., 2019b, Study on the biological denitrification reaction of high-salinity wastewater using an aerobic granular sludge (AGS), *J. Environ. Sci. Int.*, 28, 607-615.
- Kim, Y. J., Lee, S. H., 2009, A study on developing the effective management strategies for unregistered animal feeding operations, 2009-42, Gyeonggi Research Institute, Suwon, Korea.
- Kwon, G. T., Kim, H. G., Ahn, D. H., 2021, Effects of aerobic granular sludge separator on the stability of aerobic granular sludge (AGS), *J. Environ. Sci. Int.*, 30, 1081-1092.
- Kwon, G. T., Kim, H. G., Ahn, D. H., 2022, Optimal operational characteristics of wastewater treatment using hydrocyclone in a sequencing batch reactor process, *J. Environ. Sci. Int.*, 31, 295-309.
- Lee, G. H., Kim, J. S., 1999, Treating swine wastewater by anaerobic bioreactors, *Korean J. Environ. Agric.*, 18, 54-60.
- Lee, H., Shoda, M., 2008, Removal of COD and color from livestock wastewater by the Fenton method, *J. Hazard. Mater.*, 153, 1314-1319.
- Lee, P. E., Lee, D. H., Kim, B. S., Hwang, Y. H., Lee, T. J., 2020, A Study on the improvement of nitrogen & phosphorus removal of a sequencing batch reactor with internal circulation and multi-step addition, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 42, 280-288.
- Li, A. J., Yang, S. F., Li, X. Y., Gu, J. D., 2008, Microbial population dynamics during aerobic sludge granulation at different organic loading rates, *Water Res.*, 42, 3552-3560.
- Liang, Y., Li, D., Su, Q., Zhang, J., 2018, Performances and microbial characteristics of granular sludge for autotrophic nitrogen removal from synthetic and mainstream domestic, *Chem. Eng. J.*, 338, 564-571.
- Liu, L., Wang, Z., Yao, J., Sun, X., Cai, W., 2005, Investigation on the formation and kinetics of glucose-fed aerobic granular sludge, *Enzyme Microb. Technol.*, 36, 712-716.
- Mishra, S., Singh, A. K., Cheng, L., Hussain, A., Maiti, A., 2023, Occurrence of antibiotics in wastewater: Potential ecological risk and removal through anaerobic-aerobic systems, *Environ. Res.*, 226, 115678.
- Miyake, M., Hasebe, Y., Furusawa, K., Shiomi, H., Inoue, D., Ike, M., 2023, Pilot-scale demonstration of aerobic granular sludge augmentation applied to continuous-flow activated sludge process for the treatment of low-strength municipal wastewater, *J. Water Process Eng.*, 51, 103392.
- Mo, W. J., Kim, H. Y., Choi, H. N., 2019, The operation characteristics of advanced sewage treatment process using aerobic granular sludge in pilot plant, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41, 61-68.
- Mourão, J. M. M., de Oliveira, M. G., Almeida, M. K. D. S., dos Santos, A. B., Pereira, E. L., 2021, Post-treatment of swine wastewater using aerobic granular sludge: Granulation, microbiota development, and performance, *Bioresour. Technol. Rep.*, 16, 100862.
- Qiu, B., Liao, G., Wu, C., Dai, C., Bin, L., Gao, X., Zhao, Y., Li, P., Huang, S., Fu, F., Tang, B., 2022, Rapid granulation of aerobic granular sludge and maintaining its stability by combining the effects of multi-ionic matrix and bio-carrier in a continuous-flow membrane bioreactor, *Sci. Total Environ.*, 813, 152644.
- Rosman, N. H., Anuar, A. N., Chelliapan, S., Din, M. F. M., Ujang, Z., 2014, Characteristics and performance of aerobic granular sludge treating rubber wastewater at different hydraulic retention time, *Bioresour. Technol.*, 161, 155-161.
- Szabó, E., Hermansson, M., Modin, O., Persson, F., Wilén, B. M., 2016, Effects of wash-out dynamics on nitrifying bacteria in aerobic granular sludge during start-up at gradually decreased settling time, *Water*, 8, 172.
- Tang, J., Pu, Y., Zeng, T., Hu, Y., Huang, J., Pan, S., Wang, X. C., Li, Y., Abomohra, A. E. F., 2022, Enhanced methane production coupled with livestock wastewater treatment using anaerobic membrane bioreactor: Performance and membrane filtration properties, *Bioresour. Technol.*, 345, 126470.
- Tang, R., Han, X. S., Jin, Y., Yu, J. G., 2022, Do increased organic loading rates accelerate aerobic granulation in hypersaline environment?, *J. Environ. Chem. Eng.*, 10, 108775.

- Tay, J. H., Pan, S., He, Y. X., Tay, S. T. L., 2004, Effect of organic loading rate on aerobic granulation. I: Reactor performance, *J. Environ. Eng.*, 130, 1094-1101.
- Wan, C. L., Lee, D. J., Yang, X., Wang, Y. Y., Wang, X. Z., Liu, X., 2015, Calcium precipitate induced aerobic granulation, *Bioresour. Technol.*, 176, 32-37.
- Wei, H., Hassan, M., Che, Y., Peng, Q., Wang, Q., Su, Y., Xie, B., 2021, Spatio-temporal characteristics and source apportionment of water pollutants in upper reaches of Maotiao River, Southwest of China, from 2003 to 2015, *J. Environ. Inform.*, 37, 93-106.
- Won, C. H., Kwon, J. H., Rim, J. M., 2009, Effect of ammonia nitrogen loading rate on the anaerobic digestion of slurry-typed swine wastewater, *J. of KORRA*, 17, 49-57.
- Yae, J. B., Ryu, J. H., Hong, S. W., Kim, H. G., Ahn, D. H., 2018, Applicability of the SBR Process using aerobic granular sludge (AGS) in municipal wastewater treatment, *J. Environ. Sci. Int.*, 27, 233-240.
-
- Researcher. Hyun-Gu Kim
BlueBank Co., Ltd.
hgkim@bluebank.kr
 - Professor. Dae-Hee Ahn
Department of Environmental Engineering and Energy,
Myongji University
dhahn@mju.ac.kr