

ORIGINAL ARTICLE

고농도 염분함유 폐수가 호기성 그래놀 슬러지의 미생물 활성도에 미치는 영향

김현구¹⁾ · 안대희^{1,2)*}

¹⁾주식회사 블루뱅크, ²⁾명지대학교 환경에너지공학과

Effects on Microbial Activity of Aerobic Granular Sludge (AGS) in High-Salinity Wastewater

Hyun-Gu Kim¹⁾, Dae-Hee Ahn^{1,2)*}

¹⁾BlueBank Co., Ltd., Business incubator center, Myongji University, Yongin 17058, Korea

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

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effect of high-salinity wastewater on the microbial activity of Aerobic Granule Sludge (AGS). Laboratory-scale experiments were performed using a sequencing batch reactor, and the Chemical Oxygen Demand (COD), nitrogen removal efficiency, sludge precipitability, and microbial activity were evaluated under various salinity injection. The COD removal efficiency was found to decrease gradually to 3.0% salinity injection, and it tended to recover slightly from 4.0%. The specific nitrification rate was 0.043 - 0.139 mg NH₄⁺-N/mg MLVSS·day. The specific denitrification rate was 0.069 - 0.108 mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·day. The sludge volume index (SVI₃₀) ultimately decreased to 46 mL/g. The specific oxygen uptake rate decreased from an initial value 120.3 to a final value 70.7 mg O₂/g MLVSS·hr. Therefore, salinity injection affects the activity of AGS, causing degradation of the COD and nitrogen removal efficiency. It can be used as an indicator to objectively determine the effect of salinity on microbial activity.

Key words : Aerobic granular sludge, Sequencing batch reactor, Salinity, Nitrogen, Specific oxygen uptake rate

1. 서론

고농도 염분이 함유된 폐수는 화학, 제약, 식품 가공, 석유 정제 및 해안 지역의 양식업과 같은 다양한 산업에서 광범위하게 발생하며 BOD, COD, TSS 및 총질소 등의 오염원을 함유하고 있다(Chowdhury et al., 2010; Corsino et al., 2016). 현재 염분 폐수의 처분에 사용되

는 물리적 및 화학적 기술의 처리 방법은 흡착법, 막 분리법, 이온 교환법 또는 전기 투석법 등이 있다(Fan et al., 2011; Muthukumaran and Baskaran, 2013). 이러한 물리·화학적 방법은 성능은 뛰어나지만 고비용, 2차 오염(화학물질) 등과 같은 문제를 유발하며 특정 오염원 제거를 위한 조건만을 적용하여야 하는 한계가 있다(He et al., 2017). 반면 생물학적 처리는 우수한 처리효율과

Received 5 June, 2019; Revised 27 June, 2019;

Accepted 28 June, 2019

*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.

경제적인 장점이 있어 많은 연구자들에 의해 다양한 연구가 진행되어 왔다(Jo, 2017; Kim, 2017; Tan et al., 2019). 그러나 고농도 염분은 삼투압 현상으로 인하여 생물학적 처리에 사용되는 미생물의 원형질 분리, 활성도 저하를 유발하며 이로 인한 낮은 오염원 제거효율을 수반하게 된다(Campos et al., 2002). Jo(2017)는 염분 농도가 황 탈질 효율에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였으며, 활성슬러지를 이용한 Cl^- 농도에 따른 회분식 실험 결과, 유입 질소농도 30.0 mg/L, 염분 농도 7,000 mg Cl^-/L 이하에서는 탈질효율의 영향은 크지 않으나, 9,000 mg Cl^-/L 이상에서는 저해가 발생하는 것으로 보고하고 있으며, Kim(2017)의 Biofilter system을 이용한 염분 폐수의 질산화에 미치는 영향에서는 염분 농도 2,000~55,000 mg NaCl/L 범위에서는 질산화에 영향을 미치지 않으며, 염분 농도 80,000 mg NaCl/L 에서는 질산화율이 11.4%로 낮아져 질산화에 상당한 영향이 있는 것으로 보고하고 있다.

한편, 호기성 그레놀 슬러지는 일반 활성슬러지 대비 콤팩트한 구조, 우수한 침강 성능 및 높은 독성 저항성으로 인해 염분 폐수 처리에 적용 가능한 효율적인 생물학적 처리의 접근법으로 보고되고 있다(Wang et al., 2015; He et al., 2017; Cai et al., 2018). 주로 국외에서 수행된 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 염분 함유 폐수 처리 연구내용을 살펴보면 다양한 염분 주입 조건을 바탕으로 염분 폐수 처리의 효율성을 분석하고 있으며, 오염원 제거효율, 그레놀 형성특성 및 미생물 군집분석에 관한 연구가 주를 이루고 있다(Winkler et al., 2012; Wang et al., 2015). 또한 다양한 연구자들이 앞선 활성슬러지를 이용한 연구와 마찬가지로 생물학적 처리의 염분 한계 농도를 주장하고 이에 따른 원인을 미생물 활성도 저하로 보고하고 있다(Wang et al., 2017; Corsino et al., 2019). 그러나 대부분의 연구에서 주장하는 미생물 활성도 저하에 관한 정량적인 평가는 전무한 실정이며 염분 폐수의 효율적인 처리를 위한 미생물 활성도의 지표 설정 및 수립할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 연속회분식 공정을 이용하여 다양한 염분 조건에 대한 호기성 그레놀 슬러지의 미생물 활성도에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하고자 하였으며, 미생물 활성도의 간접적인 지표로 사용되는 비산소소비율(Specific Oxygen Uptake Rate, SOUR)을 이용하여 조건별 염분 농도에

따른 활성도 변화를 평가하였다. 또한 조건별 호기성 그레놀 슬러지의 유기물, 질소 제거효율 및 슬러지 침강성 평가를 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 염분함유 폐수 성상 및 실험재료

실험에 사용된 염분 폐수는 NaCl (SAMCHUN Chemical, Korea)을 이용하였으며 Cl^- 기준 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0%의 합성폐수를 제조하여 염분 주입조건을 설정하였다. 각 조건별 운전기간은 1개월씩 운전을 실시하였으며 점진적으로 염분을 증가시켜 짧은 운전기간 및 급격한 충격부하에 따른 미생물에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다(Wang et al., 2017). 유입수의 유기물, 암모니아성 질소 및 알칼리도는 각각 250, 25 및 200 mg/L로 고정하였으며 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, NH_4Cl , NaHCO_3 (SAMCHUN Chemical, Korea)를 사용하여 전체 실험기간 동안 동일하게 유지하였다. 호기성 그레놀 슬러지는 실험실 규모의 반응기에서 자체 배양한 0.2 mm 이상의 슬러지를 선별하여(80 mesh/0.2 mm STS Sieve) 사용하였다.

2.2. 실험장치 및 운전조건

실험에 사용된 연속회분식 반응기는 유효용적 5 L의 이크릴 재질의 반응기를 사용하였으며 원수 유입 및 처리수 유출을 위한 포트를 설치하였다(Fig. 1). 단계별 운전시간은 유입, 포기, 무산소, 침전, 유출 및 휴지 단계에서 각각 10 min, 270 min, 150 min, 10 min, 10 min 및 30 min이었다. 반응조의 1 cycle 운전시간은 8 hr이며 반응조 유입수 체적 대 유효 체적의 비율인 교환율(Volume Exchange Rate, VER)은 50%이었다. 전체 운전시간의 제어 및 각 기기 장비의 자동운전구현은 PLC (Programmable Logic Controller) 제어 프로그램을 사용하였다.

실험 절차는 염분 주입조건에 따른 유기물, 질소 제거 효율을 평가하기 위해 염분 주입량을 0에서 3.0%까지 증가시키며 실험을 실시하였다. 초기 반응조 내 MLSS, MLVSS는 각각 3,280, 2,930 mg/L였으며, 각 조건별 질산화, 탈질 반응의 비교를 위해 조건별 포기, 무산소 반응기간 동안 30 min 간격으로 시료를 채취하여 암모니아성 질소의 산화율과 질산성 질소의 환원율을 MLVSS 농도로 표준화한 비질산화율(Specific Nitrification

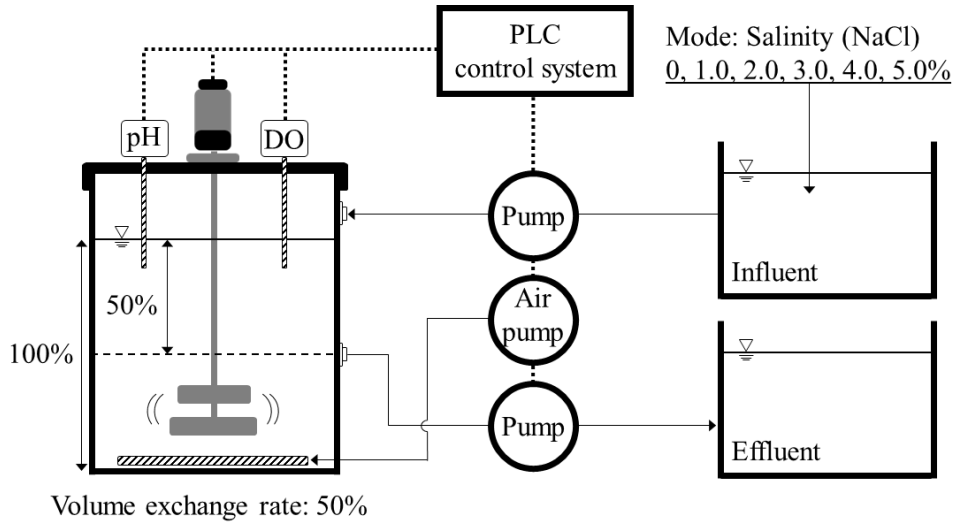


Fig. 1. Schematic diagram of lab. scale reactor.

Table 1. Experimental conditions of lab. scale reactor

Vol. (L)	Flow (L/day)	Cycles/day	pH	DO (mg/L)	HRT (hrs)	SRT (days)	Temp. (°C)
5	7.5	3	7.0~7.5	1.0~2.0 (Oxic)	16	20~25	23±2

Operation time for 1 cycle (min): Fill(10)→Oxic(270)→Anoxic(300)→Settle(10)→Draw(10)→Idle(30)
 Salinity (Cl⁻) injection (%): 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0, Volume exchange rate: 50%

Rate, SNR), 비탈질율(Specific Denitrification Rate, SDNR)을 도출하였다. 실험실 규모 연속회분식 반응기의 운전조건을 Table 1에 나타냈다.

2.3. 수질분석 및 미생물 활성도

시료의 유기물 (Chemical Oxygen Demand, COD), 암모니아성 질소(NH₄⁺-N), 아질산성 질소(NO₂--N) 및 질산성 질소(NO₃-N)는 흡광광도계(DR-4000, Hach, USA)를 이용하여 분석하였으며, 고형물은 MLSS와 MLVSS를 분석하였다. 또한 염분 주입 농도에 따른 호기성 그래놀 슬러지의 침전 특성(Sludge Volume Index, SVI₃₀)을 분석하였으며, 각 염분 주입 조건별 반응 종료 시점에서 슬러지를 채취하여 분석하였다. 모든 실험 절차는 Standard methods (APHA, 2008)를 기준으로 분석하였다.

염분 주입조건에 따른 미생물의 활성도 분석은 각 조

건별 반응이 종료된 반응조 내의 호기성 그래놀 슬러지를 채취(30 mL)하였으며 9 mg/L 이상의 용존산소(Dissolved Oxygen, DO) 농도로 폭기된 유입원수(50 mL)와 혼합한 후, 시간에 따른 산소소비량을 측정하여(DO meter, YSI-550A, USA) 단위 미생물에 대한 비산소소소비율(SOUR)을 정량화하였다(Kim, 2007; Joo et al., 2010; Zhang et al., 2018)

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거효율

Fig. 2에는 조건별 염분 주입농도에 따른 COD 제거 효율을 나타냈다. 분석결과 염분 주입농도 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0%에서 COD 평균 제거효율은 각각 98.4, 95.5, 90.2, 87.8, 91.9 및 92.6%로 나타났다. 염분 주입 농도가 3.0%까지 증가함에 따라 제거효율은 점차 감소

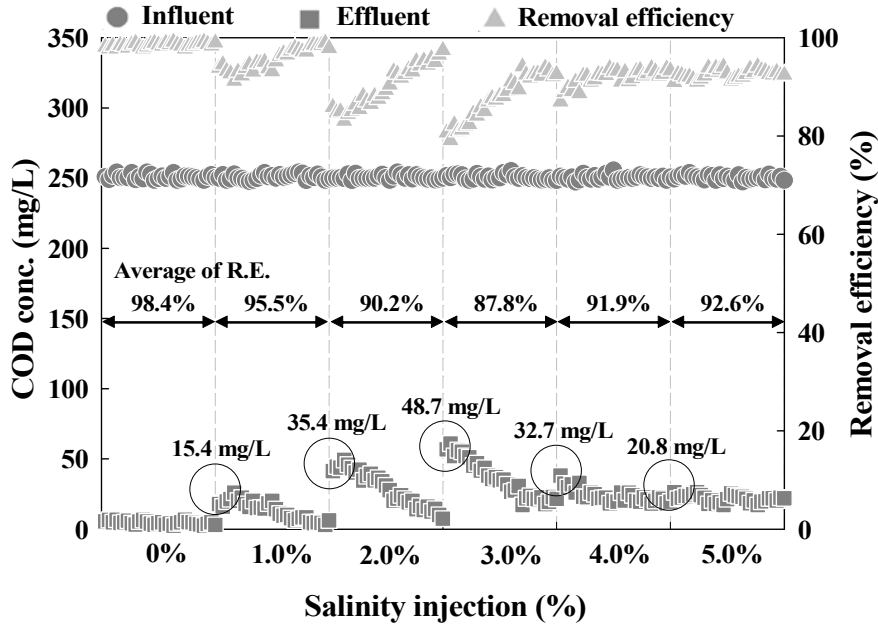


Fig. 2. Results of COD concentration with salinity injection.

하는 경향을 나타냈으며 이는 점진적으로 증가된 염분이 호기성 그레놀 슬러지의 미생물 신진대사에 저해작용을 하기 때문인 것으로 판단된다(Yogalakshmi and Joseph, 2010; Zhao et al., 2016). 또한 4.0%와 5.0%에서는 COD 제거효율이 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 1.0%에서 5.0%까지의 운전 초기 처리수의 농도는 각각 15.4, 35.4, 48.7, 32.7 및 20.8 mg/L로 나타났으며 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 4.0%부터는 운전 초기의 처리수 농도가 2.0%, 3.0%의 초기 처리수 농도에 비해 다소 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 장기간 공정 운영에 따라 점진적으로 증가된 염분에 미생물이 순응 및 적응하였기 때문인 것으로 판단되며(Wang et al., 2017), 염분에 적응한 미생물로 인하여 염분 농도가 높아져도 정상상태의 평균 제거효율까지 회복되는데 소요되는 기간이 점차적으로 단축됨을 확인할 수 있었다.

축산폐수 처리에 관한 연구를 수행한 Othman et al.(2013)은 고부하 조건(유입수 COD: 3,600 mg/L)에서 호기성 그레놀 슬러지의 COD 제거효율을 관찰하였으며, 전체 운전기간 동안 70%의 제거효율을 도출함과 동시에 미생물 적응 기간의 중요성을 강조하고 있다. 또

한 Taheri et al.(2012)은 장기간 (269일) SBR 공정을 이용하여 염분 농도(NaCl)를 0.2%에서 1.0%까지 증가시키며 호기성 그레놀 슬러지의 COD 제거효율을 관찰하였으며, 전체 운전기간 동안 90% 이상의 제거효율을 달성했다. 또한 염분 증가에 대한 안정적인 COD 제거효율의 원인을 염분에 적응된 미생물의 유기물 제거 메커니즘의 결과로 설명하고 있으며 본 연구와 유사한 경향을 나타내고 있었다.

3.2. 질소 제거효율

Fig. 3에는 조건별 염분 주입농도에 따른 암모니아성 질소, 아질산성 질소 및 질산성 질소의 거동을 나타냈다. 전체 운전기간 동안 염분 주입농도 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0%에서 암모니아성 질소의 평균 제거효율은 각각 98.9, 72.1, 52.3, 54.1, 63.7 및 70.1%로 나타났다. 분석 결과, 암모니아성 질소의 평균 제거효율은 염분 주입농도가 증가함에 따라 3.0%까지 급격한 저하를 나타냈으나, 4.0%의 염분 주입농도부터 점차적으로 회복되는 경향을 나타냈으며, 이는 앞선 유기물 제거 결과와 마찬가지로 미생물 순응에 따라 점차적으로 회복됨을 확인할 수 있었다. 특히, 염분 주입농도가 증가함에 따라 암모니아성

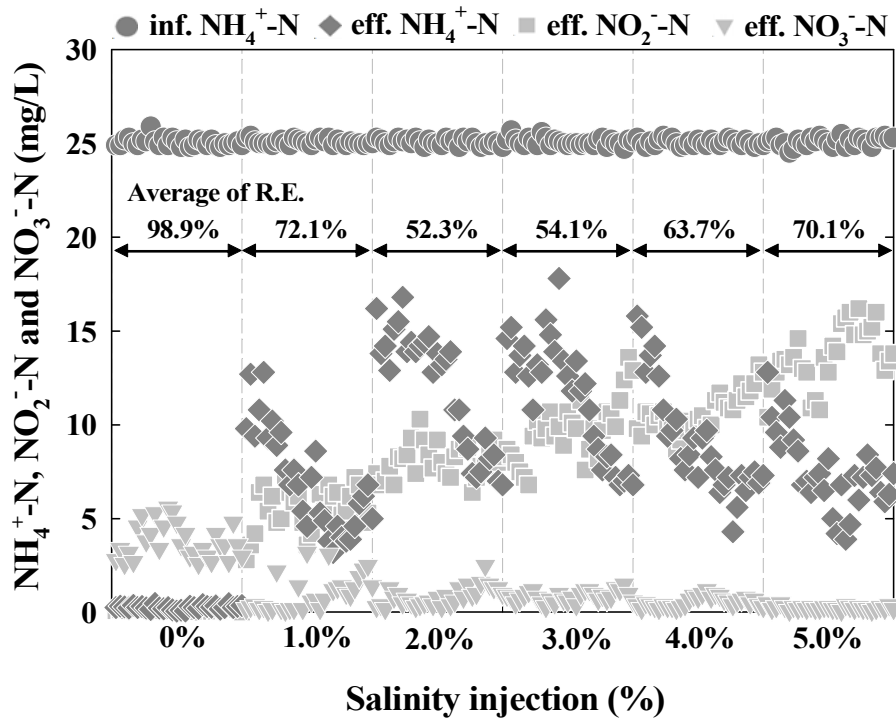


Fig. 3. Results of nitrogen compounds concentration with salinity injection.

질소가 산화된 아질산성 질소가 점차적으로 축적되어 운전중료 시점에서 약 13.8 mg/L까지 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며(Ramaswami et al., 2019), 질산성 질소는 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다. 이러한 결과는 염분 농도를 5%까지 증가시키며 암모니아성 질소의 부분 질산화의 연구를 수행한 Wan et al.(2014)의 결과와 유사한 경향을 나타냈으며 암모니아성 질소 산화 미생물(Ammonia Oxidizing Bacteria, AOB)에 비하여 아질산성 질소 산화 미생물(Nitrite Oxidizing Bacteria, NOB)이 염분에 의한 영향을 더욱 많이 받기 때문인 것으로 판단된다(Choi, 2011). 또한, 폐수 내 Cl⁻ 농도가 질산화 과정에서 저해작용을 발생시켜 아질산성 질소를 축적시킨다는 Cui et al.(2006)의 결과와도 유사한 것으로 나타났다.

Fig. 4에는 조건별 염분 주입농도에 따른 SNR, SDNR 값을 나타냈다. 분석결과 염분 주입농도가 증가함에 따라 SNR 값은 평균 0.139에서 0.043 mg NH₄⁺-N/mg MLVSS·d로 감소하였으며 SDNR 값 또한 평균 0.108

mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·d에서 0.069 mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·d까지 감소하는 경향을 나타냈다. 이에 따라 SNR 값은 초기 대비 약 69.1%가 감소한 것으로 나타났으며 SDNR 값은 약 36.1%가 감소한 것으로 나타나 SDNR 값에 비하여 SNR 값의 감소폭이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 Kinyage et al.(2019)은 재순환 양식 바이오필터 시스템을 이용하여 급격한 염분 변화에 따른 암모니아성 질소의 제거율을 분석하였다. 연구결과, 염분이 0%에서 35%로 증가함에 따라 암모니아성 질소 제거는 거의 이루어지지 않으며 아질산성 질소의 제거 또한 나타나지 않았다고 보고하고 있다. Kim(2005)은 위판장 폐수처리를 위해 SBR 공정을 이용하였으며 슬러지 체류시간을 20일로 설정하여 단계별 염분 주입농도에 따른 질산화 효율을 분석하였다. 분석결과 2%의 염분농도에서 질산화 효율이 76.2%까지 저하되는 것으로 보고하고 있다. 또한 SBR 공정을 이용하여 염분과 C/N(Carbon/Nitrogen) 비가 오염물질 제거에 미치는 영향을 연구한 Moon et al.(2002)의 연구에 의하면 염분

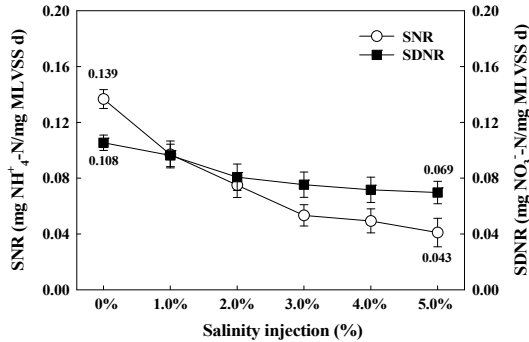


Fig. 4. Results of SNR and SDNR value with salinity injection.

주입농도를 3,000 mg NaCl/L에서 10,000 mg NaCl/L 까지 증가시킨 결과, 암모니아성 질소의 제거효율은 초기에 급격한 저하를 나타내나 일정 기간의 운전 기간이 경과한 후에는 제거효율이 회복되어 안정화되는 경향을 나타내며, 특히 질산화 미생물의 영향이 탈질 미생물에 비하여 더욱 큰 것으로 보고하고 있어 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다.

3.3. MLSS, MLVSS 및 SVI₃₀

Fig. 5에는 조건별 MLSS, MLVSS의 거동과 SVI₃₀을 나타냈다. 본 연구의 운전초기 MLSS, MLVSS 농도는 각각 3,280, 2,930 mg/L였으며 염분 주입농도가 증가함에 따라 MLSS, MLVSS 농도는 3.0%의 주입농도까지는 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈으며 4.0%에서 5.0%까지는 다시 상승하여 운전종료 시점에서 3,770, 3,460 mg/L까지 증가하여 초기 대비 490, 530 mg/L가 증가한 결과를 나타냈다. Ou et al.(2018)은 염분 주입조건에 따른 호기성 그래놀 슬러지의 형성 특성과 미생물 균집분석에 관한 연구를 수행하였으며 초기 3.0%의 주입농도까지는 염분에 의한 폐수 밀도 증가와 관련하여 플록 슬러지의 유출 현상이 발생하여 MLSS, MLVSS 농도가 다소 감소하는 것을 관찰하였으며 4.0% 이상의 주입농도부터는 염분에 순응한 미생물에 의하여 MLSS, MLVSS가 증가하는 경향을 나타낸다고 보고하고 있다. 본 연구에서 나타난 결과 또한 3.0%의 주입농도까지는 처리수 내 존재하는 배출된 슬러지를 다소 관

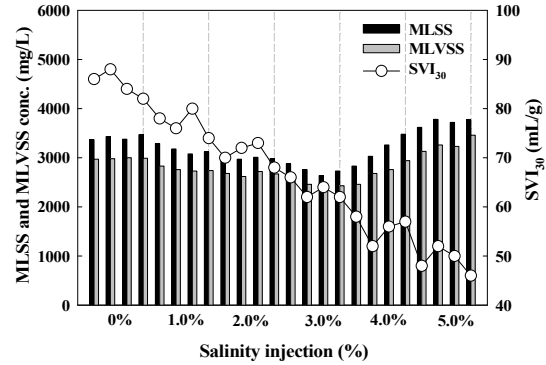


Fig. 5. Results of MLSS, MLVSS and SVI₃₀ with salinity injection.

찰할 수 있었으며, 4.0%부터는 거의 관찰되지 않았다. 따라서, 4.0%의 주입농도부터 염분에 순응된 호기성 그래놀 슬러지의 안정적인 유지가 이루어졌다는 것으로 유추할 수 있었으며, 앞선 연구와 유사한 경향을 나타내고 있었다. 또한 MLSS, MLVSS의 증가 경향은 유입수 내 존재하는 Na⁺ 이온이 호기성 그래놀 슬러지의 안정적인 유지를 통하여 미생물 표면 체외 고분자물질에 흡착되었기 때문인 것으로 판단된다.

염분 주입조건에 따른 SVI₃₀의 경우, 3.0%의 주입농도까지 MLSS, MLVSS가 감소하고 플록 슬러지의 유출에 따라 침전성이 불량할 것으로 예상됐으나, 염분 주입농도가 증가됨에 따라 초기 86 mL/g에서 운전종료 시, 46 mL/g까지 선형적으로 낮아져 침전성이 점차 양호해지는 결과를 나타냈다. 이는 SBR 공정을 이용하여 염분 주입조건에 따른 슬러지 침강성을 평가한 Chen et al.(2018)의 결과와도 매우 유사한 결과를 나타냈으며, Bassin et al.(2012)은 염분이 0에서 20 g/L까지 증가할 경우, SVI₃₀ 값은 110에서 60 mL/g까지 감소한다고 보고하고 있다. 이러한 염분 주입조건에 따른 침전성 향상 결과는 슬러지 플록이 염분이 존재할 경우, 더욱 조밀해지며 플록 간 거리가 가까워졌기 때문인 것으로 사료된다(Moussa et al., 2006; He et al., 2017).

3.4. 미생물 활성도

Fig. 6에는 조건별 미생물 활성도(SOUR) 분석결과를 나타냈다. 분석결과, 염분 주입농도 0, 1.0, 2.0, 3.0,

4.0 및 5.0%에서의 평균 SOUR 값은 각각 120.3, 98.7, 87.4, 78.7, 75.3 및 70.7 mg O₂/g MLVSS·hr로 나타났다. 따라서 염분을 주입하지 않을 경우, 가장 높은 SOUR 값을 나타냈으며 주입농도가 증가함에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 이에 따라, 염분 주입농도와 SOUR과의 상관관계를 분석한 결과, $F(x)=140.18 - 49.2219x+8.5619x^2$ 의 2차 함수($R^2=0.8339$) 형태를 나타냈다. 그러나, 3.0%의 주입농도까지는 SOUR 감소폭이 다소 큰 것으로 확인되었으나 4.0%부터는 감소폭이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞서 유기물, 질소 제거효율의 분석결과와 마찬가지로 4.0%의 주입농도부터 호기성 그레놀 슬러지가 염분에 순응하여 미생물 활성도 감소폭이 다소 낮게 유지된 것으로 판단된다. 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 RO (Reverse Osmosis) 농축수의 생물학적 처리를 연구한 Kim et al.(2016)은 TDS (Total Dissolved Solids)를 6,000 mg/L까지 증가시키며 미생물 활성도 변화를 평가하였으며, 초기 TDS 미주입시 108.5 mg O₂/g MLVSS·hr의 SOUR 값은 6,000 mg/L의 TDS 주입농도에서 28.6 mg O₂/g MLVSS·hr까지 낮아진다고 보고하고 있다. 그러나 TDS의 구성성분을 K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺로 다양하게 구성하고 Cl⁻의 농도가 다소 낮아(최대 2,400 mg/L) 본 연구와의 정량적인 비교는 다소 어렵지만, 다양한 이온 성분들에 기인한 미생물 활성도 저하가 발생된다는 결과를 통하여 본 연구와 유사한 경향을 나타내고 있었다. 또한 Kim and Kang(2012)은 고농도 염분 폐수에 의한 미생물 활성도 저해영향을 평가하였으며, 최

대 19,469 mg Cl/L에서의 SOUR 값은 2.7 mg O₂/g MLVSS·hr까지 낮아진다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 SOUR 분석값을 통하여 앞서 분석한 유기물, 질소 제거효율 저하 원인의 간접적인 설명이 가능하며 염분이 미생물 활성도에 미치는 영향을 객관적으로 판단할 수 있는 지표로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 염분 주입조건에 따라 도출된 SNR, SDNR 및 SOUR 값을 이용할 경우, 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 고농도 염분폐수의 생물학적 처리를 위한 공법 설계 인자로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결론

고농도 염분 함유 폐수가 호기성 그레놀 슬러지의 미생물 활성도에 미치는 영향 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 3.0%의 염분 주입농도까지 유기물 제거효율은 98.4%에서 87.8%까지 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈으며 이는 점진적으로 증가된 염분이 호기성 그레놀 슬러지의 미생물 신진대사에 저해작용을 하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 4.0%의 주입농도부터는 제거효율이 회복되어 5.0%의 염분 주입농도에서 92.6%를 나타냈으며 이러한 결과는 장기간 공정 운영에 따라 점진적으로 증가된 염분에 미생물이 순응 및 적응하였기 때문인 것으로 사료된다.

2) 염분 주입농도에 따라 도출된 호기성 그레놀 슬러지의 SNR, SDNR 값은 각각 0.043~0.139 mg NH₄⁺-N/mg MLVSS·d, 0.069~0.108 NO₃⁻-N/mg MLVSS·d의 범위로 나타났으며 SDNR에 비하여 SNR의 감소폭이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 염분이 질산화 미생물에 미치는 영향이 탈질 미생물에 비하여 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

3) MLSS, MLVSS 농도는 3.0%의 염분 주입농도까지 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 4.0%의 주입농도부터 증가하여 운전종료 시점에서 각각 3,770, 3,460 mg/L까지 상승하였다. 이는 염분에 순응된 호기성 그레놀 슬러지의 안정적인 유지가 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한 SVI₃₀ 값은 염분 주입농도 증가와 함께 점차적으로 감소하였으며 초기 86 mL/g에서 최종적으로 46 mL/g을 나타내 매우 양호한 침전성을 확인할

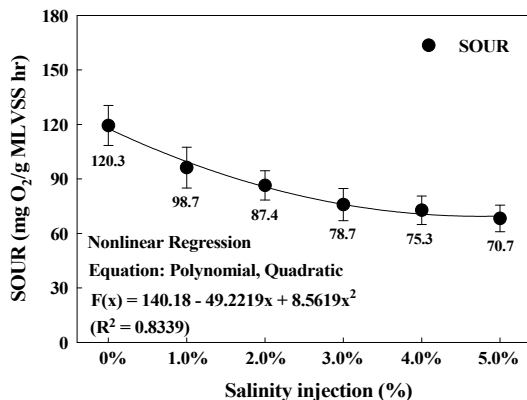


Fig. 6. Results of SOUR value with salinity injection.

수 있었다.

4) SOUR 분석결과, 염분 주입농도가 증가함에 따라 초기 120.3 mg O₂/g MLVSS·hr에서 최종적으로 70.7 mg O₂/g MLVSS·hr까지 감소하였다. 따라서 염분 주입은 호기성 그레놀 슬러지의 활성도에 영향을 미쳐 유기물, 질소 제거효율 저하에 원인이 되며 염분이 미생물 활성도에 미치는 영향을 객관적으로 판단할 수 있는 지표로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

5) 본 연구에서는 고농도 염분함유 폐수가 호기성 그레놀 슬러지의 미생물 활성도에 미치는 영향을 평가하기 위해 합성폐수를 이용하여 연구를 진행하였으며, 향후 실제 고염분 폐수를 이용한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 도출된 SNR, SDNR 및 SOUR 값을 이용할 경우, 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 고농도 염분폐수의 생물학적 처리를 위한 공법 설계인자로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임 (과제번호: 2016002190006)

REFERENCES

- 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., Kleerebezem, R., Muyzer, G., Rosado, A. S., van Loosdrecht, M. C., Dezotti, M., 2012, Effect of different salt adaptation strategies on the microbial diversity, activity, and settling of nitrifying sludge in sequencing batch reactors, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 93, 1281-1294.
- Cai, W., Jin, M., Zhao, Z., Lei, Z., Zhang, Z., Adachi, Y., Lee, D. J., 2018, Influence of ferrous iron dosing strategy on aerobic granulation of activated sludge and bioavailability of phosphorus accumulated in granules, *Bioresour. Technol. Rep.*, 2, 7-14.
- Campos, J. L., Mosquera-Corral, A., Sánchez, M., Méndez, R., Lema, J. M., 2002, Nitrification in saline wastewater with high ammonia concentration in an activated sludge unit, *Water Res.*, 36, 2555-2560.
- Chen, Y., He, H., Liu, H., Li, H., Zeng, G., Xia, X., Yang, C., 2018, Effect of salinity on removal performance and activated sludge characteristics in sequencing batch reactors, *Bioresour. Technol.*, 249, 890-899.
- Choi, Y. B., 2011, Effects of salt concentration on the biological treatment of seafood wastewater, Ph. D. Dissertation, Kangwon University, Chuncheon.
- Chowdhury, P., Viraraghavan, T., Srinivasan, A., 2010, Biological treatment processes for fish processing wastewater-A review, *Bioresour. Technol.*, 101, 439-449.
- Corsino, S. F., Capodici, M., Morici, C., Torregrossa, M., 2016, Simultaneous nitrification-denitrification for the treatment of high-strength nitrogen in hypersaline wastewater by aerobic granular sludge, *Water Res.*, 88, 329-336.
- Corsino, S. F., Capodici, M., Pippo, F. D., Tandoi, V., Torregrossa, M., 2019, Comparison between kinetics of autochthonous marine bacteria in activated sludge and granular sludge systems at different salinity and SRTs, *Water Res.*, 148, 425-437.
- Cui, Y. W., Peng, Y. Z., Peng, X. Q., Ye, L., 2006, Achieving biological nitrogen removal via nitrite by salt inhibition, *Water Sci. Technol.*, 53(6), 115-122.
- Fan, J., Zhang, J., Zhang, C., Ren, L., Shi, Q., 2011, Adsorption of 2,4,6-trichlorophenol from aqueous solution onto activated carbon derived from *loosestrife*, *Desalination*, 267, 139-146.
- He, H., Chen, Y., Li, X., Cheng, Y., Yang, C., Zeng, G., 2017, Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes: A review, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 119, 520-527.
- He, Q., Zhang, W., Zhang, S., Zou, Z., Wang, H., 2017, Performance and microbial population dynamics during stable operation and reactivation after extended idle conditions in an aerobic granular sequencing batch reactor, *Bioresour. Technol.*, 238, 116-121.
- Jo, Y. N., 2017, Effect of salt concentration on the sulfur denitrification efficiency, Master Dissertation, Kangwon University, Chuncheon.
- Joo, H. J., Kim, S. C., Lee, K. H., 2010, Applicability study of reactor design in sewage treatment plant using specific oxygen uptake rate, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 26(1), 140-147.
- Kim, H. G., Ahn, D. H., Cho, E. H., Kim, H. Y., Ye, H. Y., Mun, J. S., 2016, A Study on the biological treatment

- of RO concentrate using aerobic granular sludge, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(2), 79-86.
- Kim, K. Y., 2017, Influence on nitrification of salinity wastewater in biofilter system, Master Dissertation, Andong University, Andong.
- Kim, S. C., 2007, A Study on the SOUR with temperature and SRT variation for designing the aerator in biological wastewater treatment process, Ph. D. Dissertation, Kyonggi University, Suwon.
- Kim, S. J., 2005, A Study on the treatment of organic and nitrogen in the saline wastewater using SBR, Master Dissertation, Ulsan University, Ulsan.
- Kim, Y. K., Kang, S. H., 2012, Evaluation of the effect of high salinity RO concentrate on the microbial acclimation/cultivation characteristics in biological wastewater treatment process, *J. Environ. Impact Assess.*, 21(5), 707-713.
- Kinyage, J. P. H., Pedersen, P. B., Pedersen, L. F., 2019, Effects of abrupt salinity increase on nitrification processes in a freshwater moving bed biofilter, *Aquac. Eng.*, 84, 91-98.
- Moon, B. H., Yoon, C. H., Seo, G. T., Kim, S. S., 2002, Effects of C/N ratio and salt concentration on pollutant removal in SBR, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 24(2), 251-260.
- Moussa, M. S., Sumanasekera, D. U., Ibrahim, S. H., Lubberding, H. J., Hooijmans, C. M., Gijzen, H. J., van Loosdrecht, M. C., 2006, Long term effects of salt on activity, population structure and floc characteristics in enriched bacterial cultures of nitrifiers, *Water Res.*, 40, 1377-1388.
- Muthukumar, S., Baskaran, K., 2013, Organic and nutrient reduction in a fish processing facility-A case study, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 85, 563-570.
- Othman, I., Anuar, A. N., Ujang, Z., Rosman, N. H., Harun, H., Chelliapan, S., 2013, Livestock wastewater treatment using aerobic granular sludge, *Bioresour. Technol.*, 133, 630-634.
- Ramaswami, S., Uddin, F. M. J., Behrendt, J., Otterpohl, R., 2019, High-rate nitrification of saline wastewaters using fixed-bed reactors, *J. Environ. Manag.*, 243, 444-452.
- Taheri, E., Hajian, M. H. K., Amin, M. M., Nikaeen, M., Hassanzadeh, A., 2012, Treatment of saline wastewater by a sequencing batch reactor with emphasis on aerobic granule formation, *Bioresour. Technol.*, 111, 21-26.
- Tan, X., Acquah, I., Liu, H., Li, W., Tan, S., 2019, A Critical review on saline wastewater treatment by membrane bioreactor (MBR) from a microbial perspective, *Chemosphere*, 220, 1150-1162.
- Wan, C., Yang, X., Lee, D. J., Liu, X., Sun, S., Chen, C., 2014, Partial nitrification of wastewaters with high NaCl concentrations by aerobic granules in continuous-flow reactor, *Bioresour. Technol.*, 152, 1-6.
- Wang, Z., Gao, M., She, Z., Wang, S., Jin, C., Zhao, Y., Yang, S., Guo, L., 2015, Effects of salinity on performance, extracellular polymeric substances and microbial community of an aerobic granular sequencing batch reactor, *Sep. Purif. Technol.*, 144, 223-231.
- Wang, Z., van Loosdrecht, M. C. M., Saikaly, P. E., 2017, Gradual adaptation to salt and dissolved oxygen: Strategies to minimize adverse effect of salinity on aerobic granular sludge, *Water Res.*, 124, 702-712.
- Winkler, M. K. H., Bassin, J. P., Kleerebezem, R., van der Lans, R. G. J. M., 2012, Temperature and salt effects on settling velocity in granular sludge technology, *Water Res.*, 46, 5445-5451.
- Yogalakshmi, K. N., Joseph, K., 2010, Effect of transient sodium chloride shock loads on the performance of submerged membrane bioreactor, *Bioresour. Technol.* 101(18), 7054-7061.
- Zhang, W., Xiao, B., Li, Y., Liu, Y., Guo, X., 2018, Effects of return sludge alkaline treatment on sludge reduction in laboratory-scale anaerobic-anoxic-oxic process, *J. Biotechnol.*, 285, 1-5.
- Zhao, Y., Park, H. D., Park, J. H., Zhang, F., Chen, C., Li, X., Zhao, D., Zhao, F., 2016, Effect of different salinity adaptation on the performance and microbial community in a sequencing batch reactor, *Bioresour. Technol.* 216, 808 - 816.

- 김현구, 주식회사 블루뱅크 연구소장
hgkim@bluebank.kr
- 안대희, 명지대학교 환경에너지공학과 교수
dhahn@mju.ac.kr