Journal of Environmental Science International
28(8); 669~676; August 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.8.669

ORIGINAL ARTICLE

HRT 변경에 따른 호기성 그래뉼 슬러지의 오염원 제거효율에 미치는 영향

김현구[1)] · 안대희[1,2)*]

[1)]주식회사 블루뱅크, [2)]명지대학교 환경에너지공학과

Effects of Different Hydraulic Retention Times on Contaminant Removal Efficiency Using Aerobic Granular Sludge

Hyun-Gu Kim[1)], 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 effects of different Hydraulic Retention Times (HRTs) on the contaminant removal efficiency using Aerobic Granular Sludge (AGS). A laboratory-scale experiment was performed using a sequencing batch reactor, and the Chemical Oxygen Demand (COD), nitrogen, orthophosphate removal efficiency, AGS/MLSS ratio, and precipitability in accordance with the HRT were evaluated. As a result, the COD removal efficiency was not significantly different with the reduction in HRT, and at a HRT of 6 h, the removal rate was slightly increased owing to the increase in organic loading rate. The nitrogen removal efficiency was improved by injection of influent division at a HRT of 6 h. As the HRT decreased, the MLSS and AGS tended to increase, and the sludge volume index finally decreased to 50 mL/g. In addition, the size of the AGS gradually increased to about 1.0 mm. Therefore, the control of HRT provides favorable conditions for the stable formation of AGS, and is expected to improve the contaminant removal efficiency with the selection of a proper operation strategy.

Key words : Aerobic granular sludge, Sequencing batch reactor, Hydraulic retention time, Nitrogen, Mixed liquor suspended solids

1. 서 론

호기성 그래뉼 슬러지는 규칙적이고 컴팩트한 구조적 특징을 나타내고 있으며(de Bruin et al., 2004), 우수한 침전성(Khan et al., 2013), 높은 바이오매스 유지(Tay et al., 2001) 및 충격 부하에 견딜 수 있는 장점(Yang et al., 2008)을 보유하고 있어 다양한 하·폐수 처리를 위한 연구가 광범위하게 보고되고 있다. 이러한 호기성 그래뉼 슬러지의 형성과 유지에는 연속회분식 반응조의 사용이 유리하며(Morgenroth et al., 1997) 운전조건, 기질

Received 10 June, 2019; **Revised** 28 June, 2019;
Accepted 1 July, 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.

Table 1. Characteristics of the influent

Parameters	Influent			
	Min.	Max.	Average	Standard deviation
pH	6.6	7.5	7.1	0.2
Alkalinity (mg/L)	152.0	350.0	185.4	25.4
COD_{Cr} (mg/L)	160.0	334.0	264.0	24.0
T-N (mg/L)	27.0	50.0	38.6	3.7
NH_4^+-N (mg/L)	16.0	36.7	26.2	4.6
PO_4^{3-}-P (mg/L)	2.5	8.0	3.8	0.7

부하율, 폭기강도, 침전시간 및 수리학적 체류시간 (Hydraulic Retention Time, HRT) 등의 변수에 의해 영향을 받을 수 있다(Rosman et al., 2014). 이에 많은 연구자들이 다양한 변수 조절을 통하여 호기성 그래뉼 슬러지의 형성조건 및 안정적인 유지를 위한 연구를 수행하였다(Li et al., 2017; Tan et al., 2019).

기존 연구에 의하면 반응조의 오염원 제거효율 최적화를 위하여 적절한 HRT를 유지하고 제어하여야 한다는 연구결과가 있다(Fang and Yu, 2000; Fang and Yu, 2001). HRT는 생물학적 처리 시, 미생물이 유입되는 기질과 오염원에 직접적으로 접촉하는 수리학적 조건으로써, Beun et al.(1999)은 짧은 HRT가 호기성 그래뉼 슬러지의 유지에 도움이 된다고 보고하고 있다. 또한 Pan et al.(2004)은 HRT를 1~24시간으로 조절하며 호기성 그래뉼 슬러지의 오염원 제거효율, 형성 특성에 관한 연구를 수행하였으며 마찬가지로 짧은 HRT가 유리함을 주장하고 있다. 그러나 기존 연구의 경우, 유입수 변수 고정을 위하여 제조된 합성폐수를 이용한 연구가 대부분이며 실제 하수를 이용한 호기성 그래뉼 슬러지 관련 연구는 매우 미흡한 실정이다.

Yae et al.(2018)의 호기성 그래뉼 슬러지를 이용한 하수처리에 관한 연구에서는 유입 하수 성상을 분석한 후, 합성폐수를 제조하여 연구를 진행하였으며 하수처리 공정 내 호기성 그래뉼 슬러지를 적용하기 위하여 실제 하수를 이용한 연구의 필요성을 강조하고 있다. 또한 Kim et al.(2016)은 호기성 그래뉼 슬러지를 이용한 RO (Reverse Osmosis) 농축수의 생물학적 처리에 관한 연구를 수행하였으며, 마찬가지로 실제 폐수를 이용한 연구를 수행할 필요가 있음을 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 호기성 그래뉼 슬러지가 적용된 연속회분식 반응조를 이용하여 실제 하수를 채취하여 유입수로 주입하였으며, HRT 변경에 따른 호기성 그래뉼 슬러지의 오염원 제거효율에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 또한 조건별 유기물, 질소 제거효율을 분석하였으며 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids), AGS/MLSS 비율 및 호기성 그래뉼 슬러지의 침강성과 물리 강도 등의 평가를 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 하수 성상 및 실험재료

실험에 사용된 실제 하수는 경기도 용인시 기흥구에 위치한 기흥레스피아 분배조에서 직접 채수하여 사용하였으며 채수된 원수는 실험 전 고형물 성분을 제거한 후 사용하였다. 기존 연구에 의하면 유입수 C/N (Carbon/Nitrogen) 비가 5 이하일 경우, 호기성 그래뉼 슬러지의 안정성에 불리한 영향을 미친다고 보고되고 있으며(Liu et al., 2003, Liu et al., 2007), 실험에 사용된 하수의 경우, 전체 운전기간 동안의 평균 C/N 비가 6.8로 나타나 실험에 적합한 하수로 판단되었다. 호기성 그래뉼 슬러지는 실험실 규모의 반응기에서 자체 배양한 0.2 mm 이상 크기의 슬러지를 선별하여(80 mesh/0.2 mm STS Sieve) 사용하였으며 전체 운전기간 동안의 유입수 성상을 Table 1에 나타냈다.

2.2. 실험장치 및 운전조건

실험은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 유효용적 5 L의 아크릴 재질의 반응기를 사용하였다. 원수 유입은 반응조 하단 포트를 통하여 유입시켰으며, 처리수는 교환율 (Volume Exchange Rate, VER) 50%를 적용하기 위하여

Fig. 1. Photograph of the lab. scale reactor.

반응조 중간 포트를 통하여 유출시켰다. 연속회분식 반응조의 운전조건은 각각 4, 6 및 8 cycle로 구분하였으며, 이에 따른 HRT는 각각 12, 8 및 6시간으로 점차적으로 감소하는 것으로 설정하였다(Beun et al., 1999; Pan et al., 2004). 또한 8 cycle 운전시에는 질소 제거효율 증대를 위한 분할주입을 실시하기 위해 1차 유입 후, 포기반응 75분 시점에 2차 유입이 되도록 설정하였다. 단계별 운전시간은 유입&반응(10분), 포기(150~330분), 침전(10분) 및 유출(10분)으로 설정하였다. 전체 운전기간 동안의 수온은 23.8±1.3℃, 포기반응 동안의 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)는 1.0~2.0 mg/L로 유지되었다. 고형물 체류시간(Solid Retention Time, SRT)은 20일로 유지하였다. 전체 운전기간 동안의 기기 장비 자동운전은 PLC (Programmable Logic Controller) 제어 프로그램을 사용하였으며 실험실 규모 연속회분식 반응조의 운전조건을 Table 2에 나타냈다.

2.3. 수질분석 및 현미경 관찰

시료의 유기물(Chemical Oxygen Demand, COD)과 질소(NH_4^+-N, NO_3^--N, T-N), 오르토인산염(PO_4^{3-}-P) 성분은 흡광광도계(DR-4000, Hach, USA)를 이용하여 분석하였으며, 고형물은 MLSS와 MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids)를 분석하였다. 또한 HRT 변경에 따른 SVI_{30} (Sludge Volume Index) 값을 분석하여 호기성 그래뉼 슬러지의 침전 특성을 평가하였다. AGS/MLSS 비율의 경우, 슬러지 채취 후, 0.2 mm 이상 크기와 이하 크기의 슬러지를 선별(80 mesh/0.2 mm STS sieve) 및 분석하여 산정하였다. 모든 실험 절차는 standard methods (APHA, 2008)를 기준으로 분석하였다. 또한 호기성 그래뉼 슬러지의 견고함과 강도를 평가하기 위해 운전종료 후의 슬러지를 채취하였으며 120 rpm의 교반기로 회전하여 유체 내 물리적인 힘을 가하였다. 이때 시간(초기, 60분 및 120분)에 따른 호기성 그래뉼 슬러지를 크기별로 구분하고 건조중량으로 각각의 분율(%)을 계산하여 슬러지 해체현상이 발생하는지 평가하였다. 호기성 그래뉼 슬러지의 외형 변화 및 표면 특성은 광학현미경(CX-31, Olympus, Japan)을 이용하였으며 채취된 슬러지를 0.17 mm 두께의 커버 글라스(cover glass)로 덮어 40배율에서 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거효율

Fig. 2에는 조건별 HRT 변경에 따른 유기물 거동을 나타냈다. 분석결과 HRT 12, 8 및 6시간에서 유기물 평균 제거효율은 각각 87.4, 87.7 및 93.2%로 나타났다. 12시간과 8시간의 HRT에서의 유기물 제거효율은 HRT 감소에도 불구하고 유의미한 결과를 나타내지 않았으나,

Table 2. Experimental conditions of the lab. scale reactor

Phase	Operation periods (days)	Cycle time (hrs)	HRT* (hrs)	Aeration (min)
Ⅰ(4 cycle)	1-26	6	12	330
Ⅱ(6 cycle)	27-52	4	8	210
Ⅲ(8 cycle)	53-77	3	6	150

*HRT: Hydraulic Retention Time

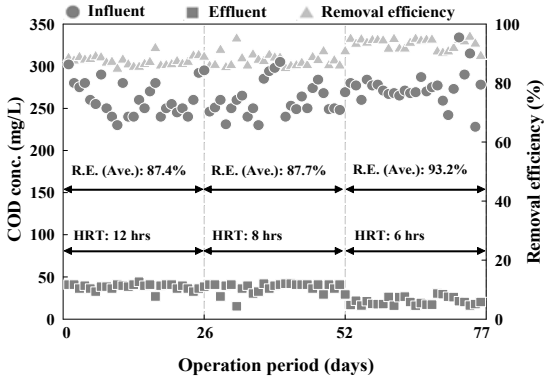

Fig. 2. Profile of COD concentration at different HRT.

6시간의 HRT에서는 다소 상승하는 경향을 나타냈다. 6시간의 HRT에서의 제거효율 상승은 반응시간 감소로 인하여 증가된 유기물 부하율에 의해 호기성 그래뉼 슬러지의 유기물 제거 효과가 다소 향상된 것으로 판단된다. 호기성 그래뉼 슬러지는 유기물 부하가 높을수록 안정성과 제거능력이 향상되는 것으로 보고되고 있으며(Wang et al., 2019) 본 연구 또한 유사한 결과를 나타냈다. 또한 6시간 HRT에서의 분할주입 실시로 인하여 호기성 그래뉼 슬러지의 질소 제거 시 탈질에 필요한 탄소원으로 유기물을 이용하여 제거효율이 다소 향상된 것으로 판단된다.

연속회분식 공정에서의 오염원 제거 성능은 유기물 부하에 의해 영향을 받는 사실이 알려져 있다(Mohan et al., 2007). Muda et al.(2011)은 호기성 그래뉼 슬러지가 적용된 연속회분식 공정을 이용하여 HRT를 6시간에서 24시간까지 증가시키는 조건으로 섬유(textile) 산업 폐수 처리에 관한 연구를 수행하였으며 유기물 부하율이 증가함에 따라 유기물 제거효율 또한 상승하는 결과를 도출하였다. Rosman et al.(2014)는 HRT를 24, 12 및 6시간으로 감소시키는 조건으로 연구를 수행하였으며, 유기물 부하율이 증가함에 따라 유기물 제거효율 또한 증가한다는 결과를 보고하고 있다. 또한 유기물 제거효율 증가의 원인을 증가한 MLSS와 이에 따른 미생물의 활성도가 증가하였기 때문인 것으로 분석하고 있다. 본 연구 또한 후술할 MLSS 분석 내용을 살펴보면 HRT 6시간에서 MLSS 및 호기성 그래뉼 슬러지의 농도가 점차적으로 상승하는 것으로 나타났으며, 앞선 연구와 유사한 경향을 나타냈다.

3.2. 질소 및 오르토인산염 제거효율

Fig. 3, 4에는 조건별 HRT 변경에 따른 암모니아성 질소와 총질소의 거동을 나타냈다. 암모니아성 질소의 경우, HRT 12, 8 및 6시간에서 유기물 평균 제거효율은 각각 96.4, 96.1 및 97.2%로 도출됐으며 우수한 처리효율을 나타냈다. 그러나 총질소의 경우, 각각 48.5, 47.0 및 60.1%로 나타났다. 총질소의 제거 경향을 살펴보면 HRT 12, 8시간에 비하여 6시간일 경우, 전체 운전기간 동안 추가적인 무산소(anoxic) 반응조건이 없는데도 불구하고 다소 상승하는 경향을 나타냈으며 운전기간 동안의 처리수는 국내 방류수 수질기준 20 mg/L 이하를 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 첫째, 유입수 분할주입에 의한 유입기간 동안의 질산성 질소의

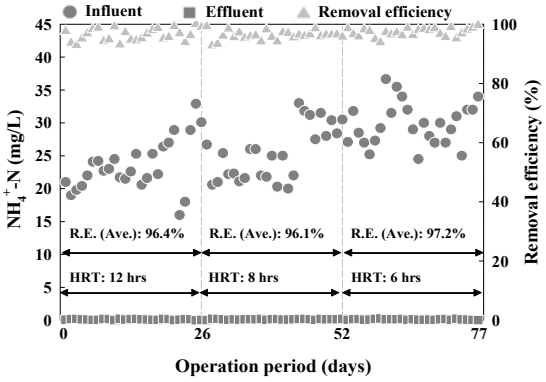

Fig. 3. Profile of NH_4^+-N concentration at different HRT.

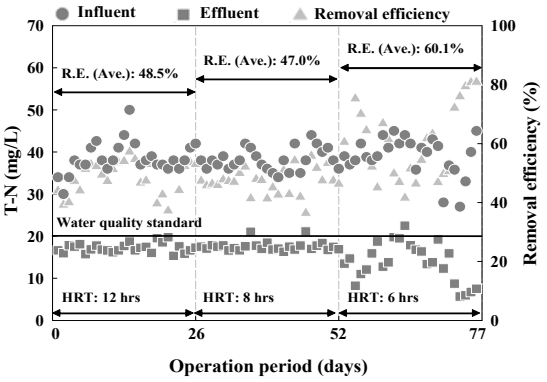

Fig. 4. Profile of T-N concentration at different HRT.

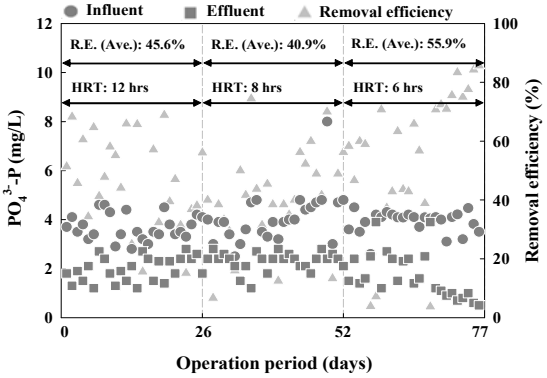

Fig. 5. Profile of PO_4^{3-}-P concentration at different HRT.

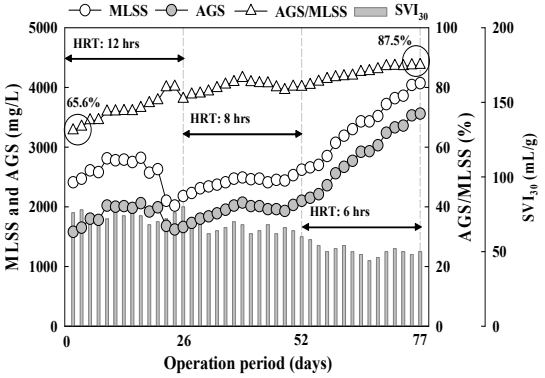

Fig. 6. Results of MLSS, AGS concentration, AGS/MLSS and SVI_{30} value at different HRT.

탈질율 상승과 둘째, AGS/MLSS 비율 및 AGS 크기 증가(내부 무산소 layer)에 의한 동시 질산화 탈질 반응의 두 가지 원인으로 추론할 수 있다(Zeng et al., 2003; de Kreuk et al., 2005). 따라서 향후 호기성 그래뉼 슬러지 기반 하수처리공정 운영 시, 질소 제거효율 상승을 위하여 분할주입에 의한 운영전략을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5에는 조건별 HRT 변경에 따른 오르토인산염의 거동을 나타냈다. 분석결과 HRT 12, 8 및 6시간에서 오르토인산염 평균 제거효율은 각각 45.6, 40.9 및 55.9%로 나타났다. SRT를 일정하게 유지하였음에도 HRT 6시간에서의 오르토인산염의 제거효율 상승은 질소 제거와 마찬가지로 AGS/MLSS 비율이 상승함에 따라 호기성 그래뉼 슬러지 내부(내부 혐기 layer)의 인 축적 미생물(Phosphorus Accumulating Organism, PAO)의 비율이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다(Bassin et al., 2011; Winkler et al., 2011; Cetin et al., 2018). 또한 오르토인산염 제거는 향후 호기성 그래뉼 슬러지 기반 하수처리공정 운영 시, 응집제를 사용하여 제거효율을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. MLSS 및 물리적 특성

Fig. 6에는 조건별 MLSS 및 AGS 농도, AGS/MLSS 비율의 거동과 SVI_{30}을 나타냈다. 본 연구의 운전초기 MLSS, AGS 농도는 각각 2,410, 1,580 mg/L였으며 AGS/MLSS 비율은 65.6%를 나타냈다. HRT가 감소함에 따라 MLSS와 AGS의 농도는 점차적으로 상승하였으며, 최종적으로 각각 4,070, 3,560 mg/L까지 증가하여, AGS/MLSS 비율은 87.5%까지 상승하였다. 이러한 결과는 HRT가 감소함에 따라 미생물에 미치는 영양물질 부하량이 증가하여 MLSS와 AGS가 증가한 것으로 판단되며 짧은 HRT를 유지할수록 호기성 그래뉼 슬러지 형성에 유리하다는 기존 연구결과와도 유사한 경향을 나타냈다(Beun et al., 1999; Pan et al., 2004; Li et al., 2017).

SVI_{30}의 경우, 운전이 지속됨에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 초기 76 mL/g의 슬러지 침전성은 향상되어 운전종료 시, 50 mL/g를 나타냈다. 이는 운전이 지속될수록 호기성 그래뉼 슬러지의 비율이 높아지고 크기가 커짐에 따라 슬러지 비중이 증가하였기 때문인 것으로 판단되며, 전체 운전기간 동안 짧은 침전시간(10분)을 유지함으로써 침전성이 다소 불량한 슬러지를 지속적으로 배출한 결과로 설명이 가능하다(Su et al., 2013; Szabó et al., 2016; de Sousa Rollemberg et al., 2018).

Fig. 7에는 호기성 그래뉼 슬러지의 견고함과 강도 평가를 위한 교반 실험 후의 건조중량 비율을 크기별로 구분한 결과이다. 분석결과, 초기 건조중량의 경우, 0.6 이상, 0.4~0.6, 0.2~0.4 및 0.2 mm 이하가 각각 52.8, 24.8, 19.0 및 3.4%로 나타났다. 교반 120분 후 호기성 그래뉼 슬러지의 해체현상이 발생하여 0.2 mm 이하 크기의 비율이 다소 증가될 것으로 예상됐으나 분석결과 0.2 mm 이하의 건조중량 비율이 0, 60 및 120분에서 각각

3.4, 0.8 및 0.4%로 나타나 교반에 의한 호기성 그래뉼 슬러지 해체현상과 안정성에는 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다. 그러나 향후 scale-up을 통한 호기성 그래뉼 슬러지 기반 파일롯 플랜트(pilot plant) 또는 테스트 베드(test bed) 공정 운영시에는 현장에 적합한 슬러지의 안정성을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

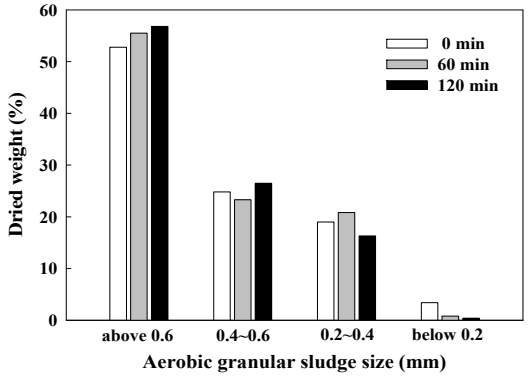

Fig. 7. Results of dried weight percentage of AGS with stirring strength.

3.4. 광학현미경 관찰

Fig. 8에는 조건별 광학현미경을 이용한 호기성 그래뉼 슬러지의 관찰결과를 나타냈다. 운전시작 시의 슬러지는 약 0.2 mm 크기를 유지하였으며 HRT가 감소함에 따라 점차적으로 크기가 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며 운전종료 시점에는 AGS/MLSS 비율 증가와 함께 약 1.0 mm 크기까지 증가하는 것으로 나타났다. 슬러지는 표면에 미세한 털 모양이 관찰되었으며, 이러한 털 모양은 사상균으로도 볼 수 있으나, 슬러지의 입자가 커지기 위해 필요한 가교역할을 한 것으로 판단된다(Liu et al., 2014; Hamza et al., 2018). 또한 슬러지 크기 증가의 원인은 앞서 기술한 AGS/MLSS 비율 증가에 의해 호기성 그래뉼 슬러지가 안정적으로 형성되었기 때문인 것으로 판단되며, 점진적으로 감소된 HRT는 호기성 그래뉼 슬러지 형성에 유리한 조건임을 확인할 수 있었다 (Beun et al., 1999; Pan et al., 2004; Li et al., 2017).

4. 결 론

HRT 변경에 따른 호기성 그래뉼 슬러지의 오염원 제거효율에 미치는 영향 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) HRT 감소에 따라 유기물 제거효율의 유의미한 차이는 나타나지 않았으나, HRT 12, 8 및 6시간에서의 제거효율은 각각 87.4, 87.7 및 93.2%로 나타났다. HRT 6시간에서의 제거효율 상승은 유기물 부하율 증가에 의한 호기성 그래뉼 슬러지의 유기물 제거능력 또한 동시에 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.

2) 질소 제거효율의 경우, 암모니아성 질소는 전체 운전기간 동안 평균 95% 이상의 안정적인 제거효율을 나타냈으며 총질소는 HRT 12, 8 및 6시간에서 각각 48.5, 47.0 및 60.1%로 나타났다. HRT 6시간에서의 제거효율 상승은 유입수 분할주입에 의한 질산성 질소의 탈질율 상승과 AGS/MLSS 비율 및 크기 증가에 의한 동시

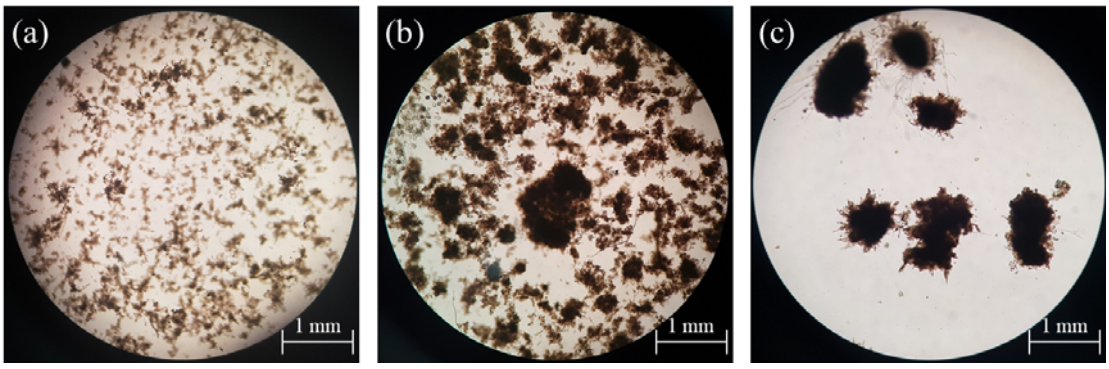

Fig. 8. Morphology observation of AGS at different HRT, ((a) 12 hrs; (b) 8 hrs; (c) 6 hrs, (40 magnification by optical microscope)).

질산화 탈질 반응에 의한 것으로 판단된다.

3) MLSS, AGS 농도는 HRT가 감소함에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 운전종료 시점에서 각각 4,070, 3,560 mg/L까지 증가하였다. 이에 따라 AGS/MLSS 비율은 초기 65.6%에서 87.5%까지 상승함으로 인하여 앞서 오염원 제거효율 증가 원인의 설명이 가능할 것으로 판단된다. 또한 SVI_{30} 값은 AGS 농도 증가와 함께 점차적으로 감소하였으며 초기 76 mL/g에서 최종적으로 50 mL/g을 나타내 안정적인 침전성을 확인하였다.

4) 광학현미경 관찰결과, HRT가 감소함에 따라 점차적으로 크기가 증가하여 초기 약 0.2 mm 크기의 슬러지가 운전종료 시점에서 약 1.0 mm까지 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며 이는 미생물 간의 가교역할 증가와 AGS/MLSS 비율 증가에 의해 호기성 그래뉼 슬러지가 안정적으로 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

5) 본 연구에서는 호기성 그래뉼 슬러지의 오염원 제거효율에 미치는 영향을 평가하기 위해 실제 하수를 이용하여 연구를 진행하였으며, 향후 HRT 세분화를 통한 연구(6시간 이하 및 12시간 이상), scale-up을 통한 호기성 그래뉼 슬러지 기반 파일롯 플랜트(pilot plant) 또는 테스트 베드(test bed) 공정 운영을 위한 설계인자 도출, 그래뉼 안정성 실험 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

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., Pronk, M., Muyzer, G., Kleerebezem, R., Dezotti, M., van Loosdrecht, M. C. M., 2011, Effect of elevated salt concentrations on the aerobic granular sludge process: Linking microbial activity with microbial community structure, Appl. Environ. Microbiol., 77, 7942-7953.

Beun, J. J., Hendriks, A., van Loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., Heijnen, J. J., 1999, Aerobic granulation in a sequencing batch reactor, Water Res., 33, 2283-2290.

Cetin, E., Karakas, E., Dulekgurgen, E., Ovez, S., Kolukirik, M., Yilmaz, G., 2018, Effects of high -concentration influent suspended solids on aerobic granulation in pilot-scale sequencing batch reactors treating real domestic wastewater, Water Res., 131, 74-89.

De Bruin, L. M. M., de Kreuk, M. K., van der Roest, H. F. R., Uijterlinde, C., van Loosdrecht, M. C. M., 2004, Aerobic granular sludge technology: An alternative to activated sludge?, Water Sci. Technol., 49, 1-7.

De Kreuk, M. K., Heijnen, J. J., van Loosdrecht, M. C. M., 2005, Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge, Biotechnol. Bioeng., 90, 761-769.

De Sousa Rollemberg, S. L., Barros, A. R. M., Firmino, P. I. M., dos Santos, A. B., 2018, Aerobic granular sludge: Cultivation parameters and removal mechanisms, Bioresour. Technol., 270, 678-688.

Fang, H. H. P., Yu, H. Q., 2000, Effect of HRT on mesophilic acidogenesis of dairy wastewater, J. Environ. Eng., 126, 1145-1148.

Fang, H. H. P., Yu, H. Q., 2001, Acidification of lactose in wastewater, J. Environ. Eng., 127, 825-831.

Hamza, R. A., Sheng, Z., Iorhemem, O. T., Zaghloul, M. S., Tay, J. H., 2018, Impact of food-to-microorganisms ratio on the stability of aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater, Water Res., 147, 287-298.

Khan, M. Z., Mondal, P. K., Sabr, S., 2013, Aerobic granulation for wastewater bioremediation: A review, Can. J. Chem. Eng., 91, 1045-1058.

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, 79-86.

Li, X., Luo, J., Guo, G., Mackey, H. R., Hao, T., Chen, G., 2017, Seawater-based wastewater accelerates development of aerobic granular sludge: A Laboratory proof-of-concept, Water Res., 115, 210-219.

Liu, Y., Liu, Z., Wang, F., Chen, Y., Kuschk, P., Wang, X., 2014, Regulation of aerobic granular sludge

reformulation after granular sludge broken: Effect of Poly Aluminum Chloride (PAC), Bioresour. Technol., 158, 201-208.

Liu, Y., Yang, S. F., Tay, J. H., 2003, Elemental compositions and characteristics of aerobic granules cultivated at different substrate N/C ratios, Appl. Microbiol. Biotechnol., 61, 556-561.

Liu, Y. Q., Moy, B. Y. P., Tay, J. H., 2007, COD removal and nitrification of low-strength domestic wastewater in aerobic granular sludge sequencing batch reactors, Enzyme Microb. Technol., 42, 23-28.

Mohan, S. V., Rao, N. C., Sarma, P. N., 2007, Simulated acid azo dye (acid black 210) wastewater treatment by periodic discontinuous batch mode operation under anoxic - aerobic-anoxic microenvironment conditions, Ecol. Eng., 3, 242-250.

Morgenroth, E., Sherden, T., van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., Wilderer, P. A., 1997, Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor, Water Res., 31, 3191-3140.

Muda, K., Aris, A., Salim, M. R., Ibrahim, Z., van Loosdrecht, M. C. M., Ahmad, A., Nawahwi, M. Z., 2011, The effect of hydraulic retention time on granular sludge biomass in treating textile wastewater, Water Res., 45, 4711-4721.

Pan, S., Tay, J. H., He, Y. X., Tay, S. T. L., 2004, The effect of hydraulic retention time on the stability of aerobically grown microbial granules, Lett. Appl. Microbiol., 38, 158-163.

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.

Su, K. Z., Ni, B. J., Yu, H. Q., 2013, Modeling and optimization of granulation process of activated sludge in sequencing batch reactors, Biotechnol. Bioeng., 110, 1312 - 1322.

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.

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.

Tay, J. H., Liu, Q. S., Liu, Y., 2001, Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor, J. Appl. Microbiol., 91, 68-75.

Wang, X., Chen, Z., Shen, J., Zhao, X., Kang, J., 2019, Impact of carbon to nitrogen ratio on the performance of aerobic granular reactor and microbial population dynamics during aerobic sludge granulation, Bioresour. Technol., 271, 258-265.

Winkler, M. K. H., Bassin, J. P., Kleerebezem, R., de Bruin, L. M. M., van den Brand, T. P. H., van Loosdrecht, M. C. M., 2011, Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO - GAO competition at high temperatures, Water Res., 45, 3291-3299.

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.

Yang, S. F., Li, X. Y., Yu, H. Q., 2008, Formation and characterisation of fungal and bacterial granules under different feeding alkalinity and pH conditions, Process Biochem., 43, 8-14.

Zeng, R. J., Lemaire, R., Yuan, Z., Keller, J., 2003, Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor, Biotechnol. Bioeng., 84, 170-178.

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