

ORIGINAL ARTICLE

## 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 연속 회분식 공정의 도시하수처리에 대한 적용

예재빈<sup>1)</sup> · 류재훈<sup>1)</sup> · 홍성완<sup>1)</sup> · 김현구<sup>2)</sup> · 안대희<sup>1,2)\*</sup>

<sup>1)</sup>명지대학교 환경에너지공학과 일반대학원, <sup>2)</sup>주식회사 블루뱅크

### Applicability of the SBR Process Using Aerobic Granular Sludge (AGS) in Municipal Wastewater Treatment

Jae-Bin Yae<sup>1)</sup>, Jae-Hoon Ryu<sup>1)</sup>, Seong-Wan Hong<sup>1)</sup>, Hyun-Gu Kim<sup>2)</sup>, Dae-Hee Ahn<sup>1,2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering and Energy, Graduate School Myongji University, Yongin 17058, Korea

<sup>2)</sup>BlueBank Co., Ltd., Yongin 17058, Korea

#### Abstract

The purpose of this study was to confirm the applicability of aerobic granular sludge (AGS) in the advanced sewage treatment process. Simulated influent was used in the operation of a laboratory scale reactor. The operation time of one cycle was 4 h and the reactor was operated for six cycles per day. The volume exchange ratio was 50%. The influent was injected in divisions of 25% to increase the removal efficiency of nitrogen in every cycle. As a result, the removal efficiencies of COD<sub>Cr</sub> and TN in this reactor were 98.2% and 76.7% respectively. During the operation period, the AGS/MLVSS concentration ratio increased from 70.0% to 86.7%, and the average SVI<sub>30</sub> was 67 mL/g. The SNR and SDNR were 0.073–0.161 kg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/kg MLVSS/day and 0.071–0.196 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/kg MLVSS/day respectively. These values were higher or similar to those reported in other studies. The operation time of the process using AGS is shorter than that of the conventional activated sludge process. Hence, this process can replace the activated sludge process.

**Key words** : Aerobic granular sludge, Sequencing batch reactor, Advanced sewage treatment, SNR, SDNR

#### 1. 서론

호기성 그레놀 슬러지(Aerobic Granular Sludge, AGS)에 관한 연구는 연속회분식 반응조(Sequencing Batch Reactor, SBR)를 이용하여 1990년대 후반부터 이루어졌다(Wirtz and Dague, 1996; Morgenroth et al., 1997; Beun et al., 1999). 최근까지 호기성 그레놀

슬러지를 이용한 Pilot 규모의 연구(Liu et al., 2010; Isanta et al., 2012; Morales et al., 2013; Wei et al., 2014), Full 규모의 연구 및 실증화 연구가(Giesen et al., 2013; Li et al., 2014; Pronk et al., 2015) 수행되어 왔다. 호기성 그레놀 슬러지는 호기성 조건에서 미생물 자가 고정화를 통해 형성된 미생물 군집체이며, 다양한 생물학적 기능을 가진 수백 종의 미생물들을

Received 5 January, 2018; Revised 7 March, 2018;

Accepted 9 March, 2018

\*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.

포함한다. 또한 높은 미생물 농도를 유지할 수 있고, 침전성이 우수하여 공정시간 단축 및 컴팩트한 플랜트의 설계가 가능한 장점이 있다(De Bruin et al., 2004).

국내 방류수 수질기준의 변천사에 대해 살펴보면, 90년대 이전에는 유입하수의 농도가 낮아 하수처리장에서 BOD 및 SS와 같은 유기물질 제거 중심의 처리 공정을 사용하였다. 그러나 급속한 도시화 및 인구 증가로 인해 다량의 영양염류가 방류수역으로 유입되어 하천의 부영양화가 심각해지면서, 질소 규제가 강화되었다. 이후 부영양화 및 조류발생 억제제의 중요성이 높아지면서, 환경부에서는 한강본류 단위유역의 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 중 BOD의 수질 기준을 2021년 1월 1일부터 2030년 12월 31일까지 10 mg/L에서 4.5~7 mg/L으로 강화할 것을 제정하였고(MOE, 2016), 방류수 수질기준 중 T-N 항목을 20 mg/L에서 10 mg/L로 강화할 예정이다. 그러나 현재 전국 공공하수처리시설에 적용되는 여러 공정들의 방류수 T-N 농도는 평균 9.8 mg/L으로(MOE, 2014), 방류수 수질기준 강화에 대응할 수 있는 하수고도처리 공법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연속회분식 공정에서 호기성 그레놀 슬러지의 하수처리에 관한 연구를 수행하였고, 호기성 그레놀 슬러지가 방류수 수질기준 강화에 대응할 수 있는 하수고도처리 공법으로서의 적용성을 평가하기 위해 먼저 Batch test를 통해 운전조건을 설정하였고, 호기성 그레놀 슬러지의 동역학적 인자를 도출하였다. 그리고 연속회분식 반응기를 이용하여 호기성 그레놀 슬러지의 영양물질 제거효율 및 침전성 변화 등을 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

호기성 그레놀 슬러지가 주입된 실험실 규모의 연

속회분식 반응조를 이용하여 다음과 같은 차례대로 운전하였다. 첫째, Batch test를 통해서 운전조건을 결정하였고, 이후 Lab. test 1을 실시하여, 호기성 그레놀 슬러지의 동역학 인자 값을 도출하여 다른 연구에서 도출된 결과들과 비교하였다. 둘째, Lab. test 2를 통해 연속회분식 공정을 이용한 호기성 그레놀 슬러지의 유기물 및 질소 제거효율을 평가하였다. 셋째, 운전기간 동안 호기성 그레놀 슬러지의 농도 및 비율 변화를 관찰하였다. 넷째, 운전기간 동안 호기성 그레놀 슬러지의 침전성 측정 및 평가를 실시하였다.

### 2.1. 하수 성상 및 실험재료

경기도 용인시에 위치한 기흥 레스피아의 분배소에서 채수한 하수의 성상을 분석한 후, 실험을 위한 원수의 성상을 결정하였으며 Table 1에 나타내었다. 이후 인공하수를 제조하여 유입수로 사용하였고, Table 2에 나타내었다. 실험에 사용된 호기성 그레놀 슬러지의 경우, Pilot 규모에서 배양된 0.1~0.2 mm 크기의 슬러지를 채취하여 사용하였고, 반응조 내의 초기 MLVSS 농도는 2,550 mg/L이었다.

### 2.2. 동역학 인자 도출방법

호기성 그레놀 슬러지의 운전 조건과 동역학 인자 값을 구하기 위해 2017년 6월 19일부터 2017년 6월 30일까지 Lab. test 1을 실시하였다. 초기 반응조 내 MLVSS의 농도는 2,500 mg/L이었고, 교환율은 50%이었다. 유입수는 인공하수를 이용하였고, 각 영양물질의 물질거동을 통해 무산소 조건과 포기 조건의 반응 시간을 결정하였다. 이후 각 영양물질의 물질거동에서 시간별 영양물질 농도를 측정하였고, 비질산화속도(Specific Nitrification Rate, SNR)와 비질탈질속도(Specific Denitrification Rate, SDNR)를 다음의 식 (1), (2)를 이용하여 도출하였다.

Table 1. Characteristics of sewage

	COD <sub>Cr</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	T-N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	pH	Alk	SS
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L
Average	320	29	38	3.5	7.27	200	90
STD*	4.6	0.9	0.9	0.7	0.3	16.6	26.1

\* STD : Standard deviation

**Table 2.** Composition of synthetic sewage

Name	Stock solution	g/L
Organic source	Glucose (320 mg COD/L)	0.3
Ammonium source	NH <sub>4</sub> Cl (38 mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/L)	0.145
Alkalinity source	NaHCO <sub>3</sub> (200 mg CaCO <sub>3</sub> /L)	0.336
Inorganic salt	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	15 (1 mL/L)
	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	10 (5 mL/L)
	CaCl <sub>2</sub>	3.75 (1 mL/L)
	FeSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.25 (1 mL/L)
	MnSO <sub>4</sub> ·(4-5)H <sub>2</sub> O	7.68 (1 mL/L)
Trace mineral solution		(2 mL/L)

$$SNR = \frac{(NH_4^+ - N)_I - (NH_4^+ - N)_E}{X \times T_1} \quad (1)$$

여기서,

SNR = 비질산화 속도(kg N/kg MLVSS·day)

(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)<sub>I</sub> = 초기 암모니아성 질소 농도(mg/L)

(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)<sub>E</sub> = 후기 암모니아성 질소 농도(mg/L)

X = 반응조 내 MLVSS 농도(mg/L)

T<sub>1</sub> = 포기 조건 반응 시간(hr)

$$SDNR = \frac{(NO_3^- - N)_I - (NO_3^- - N)_E}{X \times T_2} \quad (2)$$

여기서,

SDNR = 비탈질 속도(kg N/kg MLVSS·day)

(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)<sub>I</sub> = 초기 질산성 질소 농도(mg/L)

(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)<sub>E</sub> = 후기 질산성 질소 농도(mg/L)

X = 반응조 내 MLVSS 농도(mg/L)

T<sub>2</sub> = 무산소 조건 반응 시간(hr)

### 2.3. 실험장치 및 운전조건

아크릴 재질의 유효 용량 5 L의 반응조를 제작하였으며, 원수 유입 및 처리수 유출을 위해 한쪽 벽면에 포트를 설치하였다. 실험에 사용된 장치의 형태는 Fig. 1에 나타냈다. 공정별 시간은 Batch test를 통해 결정하였고, 동역학인자 도출을 위해 설정한 Lab. test 1의 공정별 시간은 유입 및 무산소 공정, 포기 공정, 침전 공정, 유출 공정 각각에서 60 min, 120 min, 10 min, 50 min 이었다. 동역학인자 도출 이후 Lab. test 2에서는 효율적인 질소 제거를 위해 원수를 분할 주입

하였다. Lab. test 1 및 Lab. test 2의 공정별 시간을 Table 3에 나타내었다. 1 cycle 운전시간은 4 hr이었고, 교환율은 50%이었다. 실험에 사용된 전체 운전시간을 제어하기 위해 PLC (Programmable Logic Controller) 제어 프로그램을 사용하였다.



**Fig. 1.** Lab. scale SBR reactor.

### 2.4. 수질분석 및 현미경 관찰

질소 분석은 분광광도계(MECASYS, OPTIZEN POP QX)를 이용하여 측정하였다. 동역학 인자 도출 이후 영양물질 제거효율을 관찰하기 위하여, 처리수의 수질분석을 주 2회 실시하였다. 반응조 MLVSS 및 호기성 그래놀 슬러지 농도는 Gravimetric method에 의거하여 주 1회 측정하였다(APHA, 1998). 그리고

**Table 3.** Experimental conditions of this study

Time (min)	30	60	90	120	150	180	210	240
Lab. test 1 (1 cycle)	Fill&mix		Aeration				S*	Draw
Lab. test 2 (1 cycle)	Fill&mix	Aeration		Fill&mix	Aeration		S	Draw

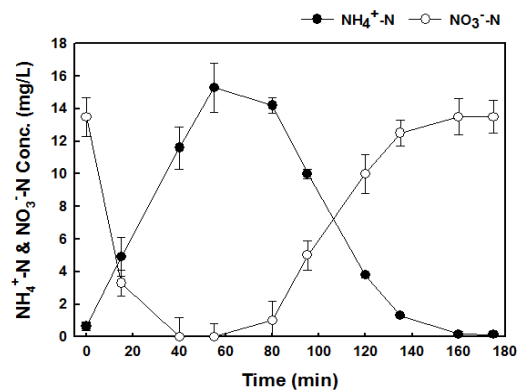
※ S : Settling time (10 min)

Graduate cylinder를 이용해 SV<sub>30</sub>, SVI<sub>30</sub> 값을 구하여 호기성 그레놀 슬러지의 침전성 변화를 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 동역학 인자 도출

본 연구에서는 결정된 Lab. test 1의 운전조건에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 물질거동을 확인하였고, 평균값을 Fig 2을 통해 나타내었다. 그리고 2.2의 식 (1), (2)를 통해 도출된 호기성 그레놀 슬러지의 SNR 값은 0.073 kg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/kg MLVSS/day, SDNR 값은 0.071 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/kg MLVSS/day이었으며, 순간 최대 SNR 값은 0.161 kg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/kg MLVSS/day, 순간 최대 SDNR 값은 0.196 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/kg MLVSS/day로 나타났다. 본 연구의 결과의 확인을 위해 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 SNR과 SDNR 값과 일반 활성 슬러지를 이용한 다른 연구들의 SNR과 SDNR 값을 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다.



**Fig. 2.** Kinetic study of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N.

#### 3.2. 영양물질 제거효율

동역학 인자 도출 이후 Lab. test 2를 실시하였고, Fig. 3을 통해서 2017년 7월 3일부터 2017년 8월 24일까지 COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, T-N의 원수, 처리수 농도와 제거효율을 나타내었다. 호기성 그레놀 슬러지의 표면에는 유기물을 산화시키는 중속영양 미생물이 분포

**Table 4.** Comparison of reported kinetics (SNR, SDNR)

Author	SNR (kg N/kg MLVSS·day)	SDNR (kg N/kg MLVSS·day)	Process
This study	0.07~0.16	0.07~0.20	AGS & SBR
Chiu et al., 2007	0.01~0.04	-	SBR
Baeze et al., 2004	0.03~0.05	-	A <sup>2</sup> /O
Randall et al., 1992	0.03~0.05	-	BNR
Kim et al., 2013	-	0.01~0.09	MLE & SBR
Kujawa and Klapwijk, 1999	-	0.02~0.14	AS
Henze, 1989	-	0.07~0.14	AS
Kim et al., 2016	-	0.12~0.21	AGS & SBR
Lee, 2010	0.02~0.08	0.07~0.35	A <sup>2</sup> /O
Kim and Joo, 2012	0.04~0.07	0.10~0.29	SBR

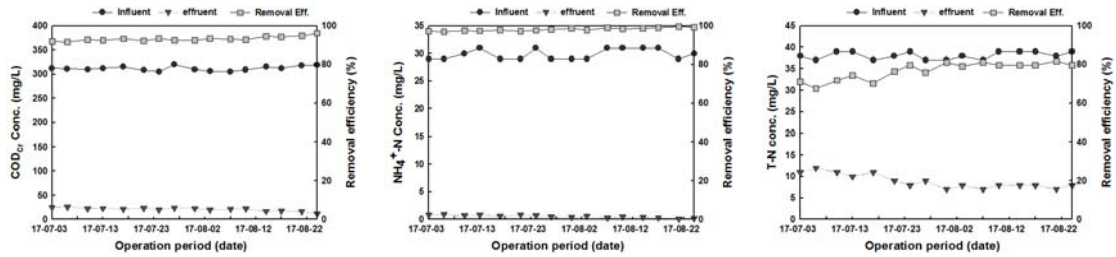


Fig. 3. COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and T-N concentration of influent, effluent and removal efficiency during operation time.

하고 있고, 질산화에 관여하는 독립영양 미생물이 그 아래층에 분포하고 있으며, 탈질에 관여하는 혐기성 미생물이 가장 내부에 분포하고 있다(Fig. 4). 이에 따라 유기물 산화, 질소 제거가 하나의 반응조 내에서 가능한 것으로 보고되고 있다(Gao et al., 2011).

본 연구에서 유입수의 COD<sub>Cr</sub> 농도는 305~320 mg/L으로 평균 311.7 mg/L이었다. 처리수의 COD<sub>Cr</sub> 농도는 12~26 mg/L으로 평균 20.9 mg/L이었고, 평균 제거효율은 93.3%로 나타났다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 제거 효율은 유입수 농도(29~31 mg/L: 평균 29.88 mg/L)와 처리수 농도(0.1~0.9 mg/L: 평균 0.54 mg/L)를 비교하면 98.2%로 확인되었으며, 또한 T-N의 제거효율은 유입농도(37~39 mg/L: 평균 38.13 mg/L)와 처리수 농도(7~12 mg/L: 평균 8.88 mg/L)의

비교에서 76.7%로, 확인된 결과로부터 하나의 반응조 내에서 유기물 산화 및 질소 제거가 동시에 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 호기성 그레놀 슬러지 및 MLVSS 농도가 증가함에 따라 탈질 효율이 증가한다는 결과를 얻을 수 있었다.

3.3. 호기성 그레놀 슬러지의 농도 및 비율 변화

본 연구의 MLVSS 및 호기성 그레놀 슬러지의 초기농도는 각각, 2,550 mg/L 및 1,800 mg/L이었고, 초기 호기성 그레놀 슬러지의 농도는 전체 MLVSS 농도의 약 70% 비율을 차지하였다. 운전기간 동안 MLVSS 및 호기성 그레놀 슬러지의 농도 변화를 Fig. 5를 통해 나타내었다. 운전기간 동안 MLVSS는 2,550 mg/L에서 2,900 mg/L으로 약 350 mg/L 증가하였고, 호기성 그레놀 슬러지는 1,800 mg/L에서 2,500 mg/L

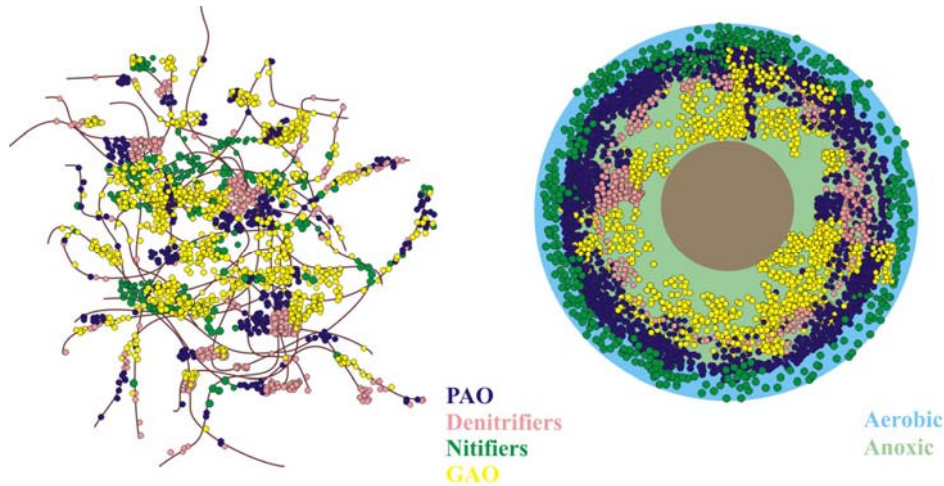


Fig. 4. The schematic diagram of microbial community (Left : activated sludge, Right : Aerobic granular sludge) (Royal Haskoning, 2016).

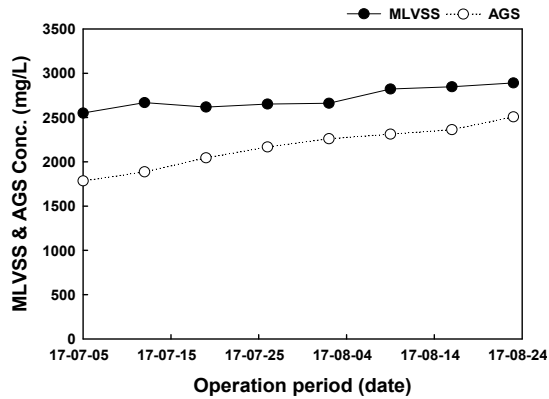


Fig. 5. MLVSS and AGS concentration profiles during operation time.

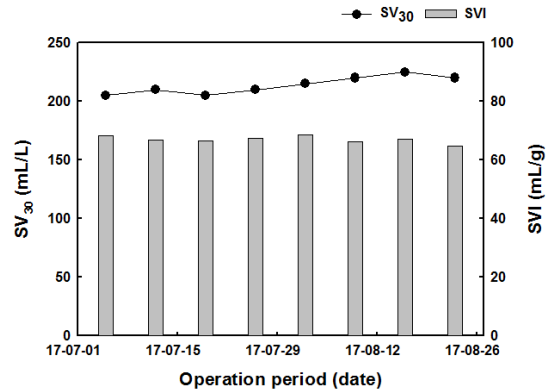


Fig. 6. SV<sub>30</sub> and SVI<sub>30</sub> profiles during operation time.

으로 약 700 mg/L 증가하여, 전체 MLVSS 농도에서 호기성 그레놀 슬러지의 비율이 70.0%에서 86.8%까지 증가하였다. 이는 짧은 침전시간(10 min)으로 인해 침전성이 낮은 슬러지들이 유출되는 반면, 침전성이 좋은 호기성 그레놀 슬러지는 반응조 내에 유지되었기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 침전성이 좋은 호기성 그레놀 슬러지가 반응조 내에서 선택적으로 성장함에 따라 호기성 그레놀 슬러지의 비율이 증가한 것으로 예상된다. 이러한 결과는 4 set의 반응조 침전 시간을 각각 5, 10, 15, 20분으로 설정하고, 다른 조건들(4 h/cycle, 유입 및 유출 공정 시간 각각 5 min)은 동일하게 하여 SBR 운영을 실시한 Qin(2004) 등의 연구결과인 침전시간이 짧을수록 반응조 내의 전체 MLVSS 농도에서 호기성 그레놀 슬러지가 차지하는 비율이 높아진다고 보고한 결과와 일치하는 경향을 보이고 있다.

### 3.4. 호기성 그레놀 슬러지의 침전성 변화

호기성 그레놀 슬러지의 침전특성을 살펴보기 위하여 슬러지 부피 지수(Sludge Volume Index, SVI)를 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 슬러지는 혐기-호기의 교호조건에서 침전성이 우수한 것으로 알려져 있고(Janczukowicz et al., 2001), 반응조 내 슬러지의 SVI<sub>30</sub> 값이  $80 \leq SVI_{30} \leq 120$ 의 범위 일 때 유출수의 탁도 및 SS 농도가 낮게 유지되는 것으로 밝혀져 있다(David et al., 1993). Lee(2009) 등의 연구에서는 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에

형성된 입상형태의 슬러지를 연속회분식 반응기에 주입하여 이때 SVI 값은 62~65 mL/g임을 밝히고 있다(Lee et al., 2009). 본 연구에서는 응집제를 사용하지 않고 생성된 호기성 그레놀 슬러지를 반응조에 주입하여 운전한 결과, SV<sub>30</sub> 값은 증가하는 경향을 보였지만, 반응조 내의 MLVSS는 증가하였기 때문에 SVI<sub>30</sub> 값은 감소하는 경향을 보였다. 운전기간 동안 SVI<sub>30</sub> 값은 65~69 mL/g의 범위로 나타났고, 평균 67 mL/g으로 우수한 침전성을 보였다.

## 4. 결론

하수고도처리 공법으로 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 공정의 적용성을 평가하기 위해 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 도출된 호기성 그레놀 슬러지의 SNR 값은 0.073~0.161 kg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/kg MLVSS/day 이고, SDNR 값은 0.071~0.196 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/kg MLVSS/day으로, 일반 활성 슬러지를 이용한 다른 연구들의 SNR과 SDNR 값에 비해 높거나 유사한 값을 나타내었으며, 도출된 인자 값은 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 하수처리 공정 설계인자로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 호기성 그레놀 슬러지를 주입한 연속회분식 공정에서 운전기간 동안 COD<sub>C</sub>의 평균 제거효율은 93.3%이었고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 평균 제거효율은 98.2%이었다. T-N의 평균 제거효율은 76.7%으로 나타났다.



운전기간 동안 처리수 T-N의 농도가 감소하는 현상은 호기성 그레놀 슬러지 및 MLVSS 농도의 증가에 따른 영향으로 판단된다.

3) 운전기간 동안 반응조 MLVSS는 약 350 mg/L 증가하였고, 호기성 그레놀 슬러지는 약 700 mg/L 증가하였다. 결과적으로 하수처리에 사용된 호기성 그레놀 슬러지의 비율은 70.0%에서 86.7%까지 증가하여, 반응조 내에서 높은 비율을 유지할 수 있었다.

4) 본 연구에서 운전기간 동안 호기성 그레놀 슬러지의 SVI<sub>30</sub> 값은 평균 67 mL/g으로 일반적인 활성슬러지의 SVI<sub>30</sub> 값(50 ≤ SVI<sub>30</sub> ≤ 150)에 비해 낮게 나타났다. 이에 따라 연속회분식 공정에 주입된 호기성 그레놀 슬러지는 일반적인 활성슬러지에 비해 침전성이 우수한 것으로 판단된다.

5) 본 연구에서는 수질기준 강화에 대응할 수 있는 하수고도처리 공법으로 호기성 그레놀 슬러지를 이용한 연속회분식 공정의 적용가능성을 확인하였으며, 향후 실제 하수를 이용한 영양물질 처리효율 평가, 수온변화에 따른 영양물질 처리효율 평가 및 생물학적 처리로 인하여 발생하는 잉여 슬러지의 효과적인 제어 방법에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

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

### REFERENCE

- American Public Health Association, 1998, Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed, American Public Health Association, Washington, DC, USA, Method 2-54.
- Baeza, J. A., Gabriel, D., Lafunte, J., 2004, Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A<sup>2</sup>O)wastewater treatment plant (WWTP), *Process Biochem.*, 39(11), 1615-1624.
- Beun, J. J., Hendriks, A., Van loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., Heifnen, J. J., 1999, Aerobic granulation in a sequencing batch reactor, *Water Res.*, 33(10), 2283-2290.
- 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(11-12), 1-7.
- Gao, D., Liu, L., Liang, H., Wu, W. M., 2011, Aerobic granular sludge: Characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment, *Crit Rev. Biotechnol.*, 31(2), 137-152.
- Giesen, A., de Bruin, L. M. M., Niermans, R. P., Van der Roest, H. F., 2013, Advancements in the application of aerobic granular biomass technology for sustainable treatment of wastewater, *Water Pract. Technol.*, 8(1), 47-54.
- Henze, M., 1989, The influence of raw wastewater biomass on activated sludge oxygen respiration rates and denitrification rates, *Water Sci. Technol.*, 21(6-7), 603-607.
- Isanta, E., Suarez-Ojeda, M. E., Val del Río, A., Morales, N., Perez, J., Carrera, J., 2012, Long term operation of a granular sequencing batch reactor at pilot scale treating a low-strength wastewater, *Chem. Eng. J.*, 198-199, 163-170.
- Janczukowicz, W., Szewczyk, M., Krzemieniewski, M., Pesta, J., 2001, Settling properties of activated sludge from a Sequencing Batch Reactor (SBR), *Pol. J. Environ. Stud.*, 10(1), 15-20.
- Jenkins, D., Richard, M. G., Daigger, G. T., 1993, Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming, 2nd ed, Lewos Publishers, New York, USA, 11-12.
- Kujawa, K., Klapwijk, B., 1999, A Method to estimate denitrification potential for predenitrification system using NUR batch test, *Water Res.*, 33(10), 2291-2300.
- Kim, I. W., Joo, H. J., 2012, A Study on application of SBR process for RO retentate treatment, *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 34(2), 79-85.
- Kim, I. W., 2013, Characteristics of biological treatment for RO retentate of low saline water, Ph. D. Dissertation, Dongguk University, Seoul.
- 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, *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 38(2), 79-86.
- Lee, B. S., Choi, S. W., 2009, Formation and characteristics of aerobic granular sludge using

- polymer in sequencing batch reactor, *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 31(12), 1143-1150.
- Lee, K. H., 2010, The study of optimum plan and operational characteristic for the field application of A<sup>2</sup>/O process in the high-way service area, Ph. D. Dissertation, Kyonggi University, Suwon.
- Li, J., Ding, L. B., Cai, A., Huang, G. X., Horn, H., 2014, Aerobic sludge granulation in a full-scale sequencing batch reactor, *BioMed Res. Int.*, (Article ID 268789), 1-12.
- Liu, Y. Q., Moy, B., Kong, Y. H., Tay, J. H., 2010, Formation, physical characteristics and microbial community structure of aerobic granules in a pilot-scale sequencing batch reactor for real wastewater treatment, *Enzyme Microb. Technol.*, 46(6), 520-525.
- Ministry of Environment (MOE), 2014, The average of sewage.
- Ministry of Environment (MOE), 2016, The Sewage Law.
- Morales, N., Figueroa, M., Fra-Vazquez, A., Val Del Río, A., Campos, J. L., Mosquera-Corral, A., Mendez, R., 2013, Operation of an aerobic granular pilot scale SBR plant to treat swine slurry, *Process Biochem.*, 48(8), 1216-1221.
- Morgenroth, E., Sherdeni, T., Van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., Wilderer, P. A., 1997, Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor, *Water Res.*, 31(12), 3191-3194.
- Pronk, M., de Kreuk, M. K., de Bruin, B., Kamminga, P., Kleerebezem, R., van Loosdrecht, M. C. M., 2015, Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment, *Water Res.*, 84(1), 207-217.
- Qin, L., Liu, Y., Tay, J. H., 2004, Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor, *Biochem. Eng. J.*, 21(1), 47-52.
- Randall, C. W., Barnard, J. L., Stensel, H. D., 1992, Design and retrofit fo wastewater treatment plants for biological nutrient removal. *Water Quality Management Library*, 5, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA.
- Royal Haskoning DHV., 2016, The basis of the Nereda wastewater treatment technology: Aerobic granular sludge with excellent settling properties.
- Wei, D., Si, W., Zhang, Y., Qiao, Z., Yao, Z., Zhao, W., Zhao, J., Chen, G., Wei, Q., Du, B., 2012, Aerobic granulation and nitrogen removal with the effluent of internal circulation reactor in start-up of a pilot-scale sequencing batch reactor, *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 35(9), 1489-1496.
- Wirtz, R. A., Dague, R. R., 1996, Enhancement of granulation and start-up in the anaerobic sequencing batch reactor, *Water Environ. Res.*, 68(5), 883-892.