호기성 그레놀 슬러지를 이용한 연속 회분식 하수고도처리 공정의 Pilot Plant 운전특성

The Operation Characteristics of Advanced Sewage Treatment Process Using Aerobic Granular Sludge in Pilot Plant

모우종 · 김한용 · 최한나[†]

Woojong Mo · Hanyong Kim · Hanna Choi[†]

태영건설 기술연구팀

R&D Team, Taeyoung E&C

(Received December 18, 2018; Revised January 28, 2019; Accepted January 28, 2019)

Abstract : In this study, a pilot plant with a capacity of 225 m³/d was installed and operated at the S sewage treatment plant in Gyeonggi-do to assess the operational characteristics of the Aerobic Granular Sludge - Sequencing Batch Reactor (AGS-SBR) Process. During the pilot plant operation, F/M ratio was in the range of 0.02 to 0.24 (COD_{Mn} Kg/MLVSS Kg) and the average removal efficiency of BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N and T-P was 98.2%, 89.5%, 93.6%, 64.6%, and 93.5%, respectively. In winter, nitrogen was reliably removed at influent sewage temperatures below 11°C, but treatment efficiency tended to decrease at MLVSS concentrations below 2,000 mg/L and below C/N ratio 2. As operating period elapsed, it was observed that AGS was getting bigger and SVI was improved. As a result of microbial community analysis, it was confirmed that nitrification and denitrification microorganisms exist as well as heterotrophic microorganisms. The AGS-SBR operation results showed that the annual sludge disposal cost was reduced by 54.9% and the power consumption was reduced by 34.7% compared to the domestic SBR type sewage treatment plant with a processing capacity of 1,000 m³/day or less.

Key Words : Aerobic Granular Sludge (AGS), Sequencing Batch Reactor (SBR), Advanced Wastewater Treatment, Sludge Reduction

요약 : 본 연구에서는 호기성 그레놀 슬러지가 적용된 연속 회분식 하수고도처리 공정(AGS-SBR)의 운전 특성을 평가하고자 처리용량 225 m³/day의 Pilot plant를 경기도 S시 하수처리장에 설치하여 운영하였다. Pilot plant 운전기간 동안 F/M비 (COD_{Mn} Kg/MLVSS Kg)는 0.02~0.24 범위였으며, BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 제거효율은 각각 98.2%, 89.5%, 93.6%, 64.6%, 93.5%로 나타났다. 하수 수온이 11°C 이하로 유입된 동절기에 질소제거효율이 저하되지 않았으나, MLVSS 농도 2,000 mg/L 이하, C/N비 2 이하에서 처리효율이 저하되는 경향을 보였다. 운전기간이 경과하면서 호기성 그레놀 슬러지가 조밀해지고 커지는 것이 관측되었으며 폭기조내 MLSS중 AGS 비율이 증가하고 SVI가 향상되었다. AGS의 미생물군집 분석 결과, 유기물 산화 미생물을 비롯하여 질산화 및 탈질에 관여하는 미생물이 다량 존재하는 것으로 확인되었다. 또한, 처리용량 1,000 m³/day 이하의 국내 SBR 계열 하수처리장과 비교시, 연간 슬러지 처리비용은 54.9%, 전력소비량은 34.7% 절감된 것으로 나타났다.

주제어 : 호기성 그레놀 슬러지, 연속 회분식 반응조, 하수고도처리, 슬러지 감량화

1. 서론

기존 생물학적 하수고도처리에 이용되고 있는 Biological nutrient reactor (BNR), Membrane bio-reactor (MBR), A₂O 등의 공법은 막대한 양의 폐슬러지 발생, 약품 사용량 등 운영상의 어려움과 넓은 설치부지, 다양한 기계장치 필요 등의 초기 설치비용이 큰 문제점을 갖고 있다. 또한 질산화를 일으키는 미생물의 활성은 온도에 민감하여 수온이 11°C 이하로 내려가는 겨울철에 방류수의 높은 암모니아 농도가 부영양화 및 녹조 문제를 일으키며,¹⁾ F/M비 조절의 어려움과 C/N비 불균형에 의한 처리효율 저하로 방류수질 기준을 충족시키기 어려워 메탄올 등과 같은 외부탄소원 주입이 필요한 실정이다.²⁾ 더욱이, 정부의 지속가능한 물순환 체계 구축의 일환으로 공공하수처리장 운영에 관한 규제 심화가 예상되며 2021년부터 2030년까지 방류수질기준 중 생물학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand, BOD)을

기존 10 mg/L에서 4.5~7 mg/L, T-N의 경우 20 mg/L에서 10 mg/L로 방류수질기준을 강화할 예정이다.³⁾

소규모 하수처리장의 경우 다양한 유입수 성상에 효과적 대치가 어려워 방류수질기준을 만족하지 못하고 있으며 실제 유입되는 원수의 농도가 계획수질의 절반도 미치지 못하는 저농도로 유입되어 정상적인 가동이 어려운 실정이다.^{4,5)}

이처럼 기존 생물학적 고도처리공법은 유입 수질 및 수온의 변화에 민감하여 방류수역의 부영양화를 초래하고 복잡한 처리공정으로 숙련된 운영자가 요구되기 때문에 노후된 하수처리장의 개선이 용이하고 유입 수질 변동에 강한 하수고도처리 공법의 개발이 필요하다.

호기성 그레놀 슬러지는 호기성 조건에서 미생물 자가 고정화 방식을 통해 형성된 미생물 군집체로서 다양한 생물학적 기능을 가진 수백 종의 미생물들을 포함하고 있다. 슬러지 표면에는 유기물을 산화시키는 종속영양 미생물이 분

[†] Corresponding author E-mail: hnchoi@taeyoung.com Tel: 02-2090-6673 Fax: 02-2090-6674

포하고 질산화에 관여하는 독립영양 미생물이 그 아래층에 분포하고 있으며 탈질에 관여하는 혐기성 미생물이 가장 내부에 분포하여 유기물 산화 및 질소 제거가 하나의 반응조 내에서 가능한 것으로 보고되고 있다.^{6,7)} 또한, 침전성이 우수하여 공정시간 단축 및 콤팩트한 플랜트의 설계가 가능한 장점이 있다.⁸⁾

호기성 그레놀 슬러지는 재래식 활성슬러지 보다 밀도가 크고 조밀하며 강한 미생물적 구조로 반응조 내에 높은 미생물량을 갖고 고부하의 충격에도 견딜 수 있는 능력을 갖고 있다.⁹⁾ 또한, 그레놀 형태로 미생물을 배양하면 아질산성 질소를 질산성 질소로 산화시키는 Nitritation 과정을 생략한 선택적 질산화를 통해 암모니아 산화균을 우점종으로 하는 그레놀을 배양하고 질산화 단계 중 폭기에 필요한 산소의 약 25%를 줄일 수 있으며 탈질 단계에서 요구되는 전자공여체의 약 40%를 줄일 수 있다.¹⁰⁾

기존의 호기성 그레놀 슬러지에 관한 연구가 대부분 10~20 L의 Lab-Scale 규모로 수행된데 반해, 본 연구에서는 Scale-up을 통해 호기성 그레놀 슬러지가 적용된 연속 회분식 하수고도처리 공정의 파일럿 플랜트 운전 특성을 평가하여 국내 하수 처리를 위한 적용 가능성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. Pilot plant

본 연구는 경기도 S시에 위치한 공공하수처리시설에 시설용량 225 m³/d의 AGS-SBR (Aerobic Granular Sludge-Sequencing Batch Reactor) Pilot plant를 설치하여 운영하였다. 유입수는 하수처리장의 1차 침전지 후단에서 이송하였고, 운전기간은 2017년 2월 6일부터 7월 28일로 동절기를 포함하여 6개월간 운전하였다. AGS-SBR 공정도는 Fig. 1과 같다.

AGS-SBR 공정은 드럼스크린, 유량조정조, AGS-SBR 생물반응조, 다기능 처리조, 방류수조로 구성하였다. 생물반

Table 1. Specification of equipment

Item	Specification	Material
Equalization Basin	2,400 mm W × 2,400 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/FRP lining
AGS-SBR	2,400 mm W × 7,000 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/FRP lining
Multi-function Basin	3,600 mm W × 3,600 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/FRP lining
Discharge Basin	3,600 mm W × 1,500 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/FRP lining
Drum screen	#16 mesh, 1.15 kW	STS304
AGS separator	1,200 mm, #0.2 mm, 2.2 kW	GC200/EPOXY

응조로 유입되는 협잡물을 분리하기 위해 드럼스크린을 설치하였고, 균등조는 유입수의 균등한 공급을 위해 체류시간 4 hr으로 제작하였다. 다기능처리조는 체류시간 0.5 hr으로 운전되었고, 생물반응조에서 유출된 고형물 및 응집제(PAC, 17%) 주입을 통한 잔류 인의 제거를 위해 설치하였다. 주요 설비 제원은 Table 1과 같다.

2.2. 유입수 성상

본 연구에 사용된 유입수의 성상은 Table 2와 같다. 운전 기간 동안 유입수의 오염물질 농도는 BOD 42.0~324.0 mg/L, COD_{Mn} 19.3~250.0 mg/L, COD_{Cr} 64.6~727.3 mg/L, SS 24.0~

Table 2. Characteristics of influent

	Average	Max.	Min.
BOD (mg/L)	119.7	324.0	42.0
COD _{Mn} (mg/L)	124.7	250.0	19.3
COD _{Cr} (mg/L)	258.6	727.3	64.6
SS (mg/L)	106.4	380.0	24.0
T-N (mg/L)	38.5	55.3	15.6
T-P (mg/L)	4.005	9.874	1.800
Temperature (°C)	19.0	26.7	10.7

Fig. 1. Schematic diagram of AGS-SBR.

380.0 mg/L, T-N 15.6~55.3 mg/L, T-P 1.800~9.874 mg/L이었고, 유입수의 수온은 10.7~26.7℃로 나타났다.

2.3. 운전조건

유기물 부하에 따른 운전특성을 관찰하고자 유입유량을 총 3단계로 나누어 1단계 150 m³/d, 2단계 188 m³/d, 3단계 225 m³/d로 조절하였다. 공정별 운전시간은 HRT 8시간 기준 유입 60분, 폭기 120분, 침전 및 유출 60분으로 운전하였고 수질분석을 통해 유입 및 폭기 시간을 조절하였다. 운전조건은 Table 3과 같다.

2.4. 호기성 그래놀 슬러지(AGS)

본 시설에 사용된 호기성 그래놀 슬러지(AGS)는 충청북도 소재의 AGS 제조공장에서 생산하였다. AGS는 SBR공정 형태의 운전을 통해 제조되었으며 AGS의 상태를 관찰하며 반응조를 운영하였다. 반응조에 유기물, 영양염류 및 미네랄을 주입하고 폭기 시간, 용존산소 농도, pH를 조절하며 AGS를 생산 및 배양하였으며 선별기를 통해 0.2 mm 이하의 슬러지는 별도의 저류조에 이송하였다. 크기에 따른 AGS 형태는 Fig. 2와 같다.

2.5. 분석항목 및 방법

AGS-SBR 공정의 처리능을 확인하기 위해 유입수 및 처리수의 생물학적 산소요량(Biological Oxygen Demand, BOD),

화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 부유물질(Suspended Solid, SS), 총질소(T-N), 총인(T-P) 농도를 수질오염공정시험법 기준으로 측정하였고 호기성 그래놀 슬러지의 특성을 평가하기 위해 MLSS (Mixed Liquid Suspended Solid), MLVSS (Mixed Liquid Volatile Suspended Solid), SVI (Sludge Volume Index), 광학현미경, 미생물 군집 분석을 수행하였다.

미생물 군집 분석은 미생물 군집에서 DNA를 직접 추출하고 복제하여 미생물의 유전자를 분석하는 Metagenome 실험을 통해 확인하였다. Sample에서 DNA 추출(PowerMax[®] Soil DNA Isolation Kit) 후 Fluorescence-based quantification 기법을 이용하여 고품질의 데이터(Pass 기준: 농도 1.0 ng/μL)를 확보하고 PCR (Nextra XT index kit) 진행 후 Sequencing (Illumina MiSeq[®] System) 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 및 영양염류 처리효율

유입수 및 처리수의 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P 농도와 처리효율은 Fig. 3과 같다. 유입수질은 유기물의 경우, BOD 31.5~324.0 mg/L(평균 120.0), COD_{Mn} 19.3~250.0 mg/L(평균 124.7), SS 24.0~380.0 mg/L(평균 106.4)이었고 영양염류의 경우, T-N 15.5~55.3 mg/L(평균 38.5), T-P 1.800~9.874 mg/L(평균 4.005)이었다. 처리수질은 유기물질의 경우, BOD 1.0~2.9 mg/L(평균 1.4), COD_{Mn} 4.6~19.5 mg/L(평균 11.4), SS N.D~12.0 mg/L(평균 6.2)이었고 영양염류의 경우, T-N 7.4~17.0 mg/L(평균 13.2), T-P 0.021~0.990 mg/L(평균 0.229)이었으며 처리효율은 유기물의 경우, BOD 98.2%, COD_{Mn} 89.5%, SS 93.6%, 영양염류의 경우, T-N 64.6%, T-P 93.5%로 나타났다.

처리수의 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N 농도는 I지역 방류수질 기준을 안정적으로 만족하였다. 처리수 T-P 농도는 0.021~0.99 mg/L로 변화폭이 컸지만 다기능처리조에서 약품주입량 조절을 통해 안정적인 인 제거가 가능할 것으로 판단된다.

Table 3. Operating condition of AGS-SBR

	Step 1	Step 2	Step 3
Influent flow (m ³ /day)	150	188	225
HRT (hr)	12	10	8
Organic loading (kg COD _{Mn} /day)	19.0	23.4	27.6
Operating period (day)	30	60	180
Operating cycle (Cycle/day)	4	5	6
Exchange percentage (%)	50	50	50
PAC 17% dosage (kg/m ³)	0.065	0.065	0.065

Fig. 2. Feature of AGS according to size.

Fig. 3. Concentration of influent, effluent and removal efficiency of BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P.

3.2. F/M비에 따른 처리효율 및 MLSS 특성

F/M비(Kg COD_{Mn}/Kg MLVSS) 변화에 따른 COD_{Mn}, SS, T-N, T-P 처리효율은 Fig. 4와 같다. 운전기간 동안 F/M비는 0.02~0.24(평균 0.12)이었고 오염물질별 처리효율은 COD_{Mn} 53.9~95.7%(평균 89.5), SS 82.8~100%(평균 93.6), T-N 45.3~80.7%(평균 64.6), T-P 81.9~99.5%(평균 93.5)이었다.

SS와 T-P는 F/M비에 관계없이 평균 처리효율이 각각 93.6%, 93.5%로 높은 처리효율을 나타냈다. COD_{Mn}의 평균 처리효율은 89.5%로 높았으나 F/M비가 0.05 이하로 낮아지면 80% 이하의 처리효율을 나타냈다. T-N의 경우 F/M비에 관계없이 방류수질 기준 20 mg/L 이하로 안정적으로 처리되었으나 F/M비가 0.05 이하로 낮아지면 처리효율이 저하되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 유기물 부하 변화가

Fig. 4. Removal efficiency of COD_{Mn}, SS, T-N, T-P according to F/M ratio (Kg COD/Kg MLVSS).

Fig. 5. Variation of MLSS, MLVSS concentration and AGS/MLSS ratio according to F/M ratio (Kg COD_{Mn}/Kg MLVSS).

질소제거 미생물의 성장에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 또한 호기성 그레놀 입자 형성에 따른 입자의 밀도, 비중, 물리적 강도 등과 같은 물리적인 특징은 유기물 부하율에 상당히 의존한다고 알려져 있다.¹¹⁾

F/M비에 따른 MLSS 농도와 MLVSS 농도 그리고 AGS/MLSS 비율 변화는 Fig. 5와 같다. MLSS 농도는 1,880~4,600 mg/L(평균 3,213)이었고 MLVSS 농도는 1,740~3,260 mg/L(평균 2,699)이었으며 AGS/MLSS비는 0.80~0.97(평균 0.88)이었다.

F/M비 0.02~0.24 범위에서 MLSS 농도는 2,500~3,500 mg/L, MLVSS 농도는 2,000~3,000 mg/L로 유지되었다. F/M비 0.1 이하에서 영양불균형에 의한 미생물 농도 감소로 MLVSS 농도가 2,000 mg/L 이하로 낮아지며 불안정한 모습을 보였고 AGS/MLSS 비율이 F/M비 0.05 이하에서 80% 이하로 감소한 것으로 보아 유기물 및 T-N 처리효율의 저하는 낮은 F/M비로 인한 AGS 해체에 기인된 것으로 판단된다.

3.3. C/N비 따른 질소 제거

C/N비(COD_{Mn} Kg/T-N mg/L)에 따른 COD_{Mn}, T-N처리효율 변화는 Fig. 6과 같다. C/N비는 1.0~6.0(평균 3.14)이었고, COD_{Mn} 처리효율은 63.9~95.7%(평균 89.5)이었으며 T-N 처리효율은 45.3~80.7%(평균 64.6)이었다. COD_{Mn}은 C/N비 변화에 큰 영향을 받지 않으며 안정적인 처리효율을 보였으

Fig. 6. Removal efficiency of T-N and COD_{Mn} according to C/N ratio.

Fig. 7. T-N concentration of influent and effluent according to influent temperature.

나 T-N의 경우 C/N비 2 이하에서 처리효율이 저하되는 경향을 보였고 이러한 결과는 유입수의 유기물 농도 감소로 탈질 과정에서 필요한 전자공여체의 부족 때문인 것으로 판단된다.

3.4. 수온 변화에 따른 질소 제거

유입수 온도에 따른 유입수 T-N 농도와 유출수 T-N 농도 변화는 Fig. 7과 같다. 유입수의 온도는 평균 19.0°C이었고 최고 26.7°C, 최저 10.7°C이었다. 유입수 T-N 농도는 15.5~55.3 mg/L(평균 38.5)이었고, 유출수 T-N 농도는 7.4~17.0 mg/L(평균 13.2)이었다.

겨울철 유입수 온도가 10°C까지 낮아져도 유출수 T-N 농도가 방류수질 기준 20 mg/L 이하를 안정적으로 유지하였고 수온에 의한 질소제거 영향은 미미하였다.

11°C 이하의 하수처리시 질산화 미생물인 Nitrosomonas가 탈질 미생물인 Nitrobactor보다 활성에너지가 5.1배 높아 반응시 필요한 에너지가 높기 때문에 낮은 온도에서 질산화 어려운 것으로 보고되었으나¹²⁾ AGS는 낮은 온도에서도 안정적인 대사율과 ESP에 의한 세포 보호로 질산화균의 활성이 저해되지 않은 것으로 판단된다.

3.5. 호기성 그레놀 슬러지(AGS)

3.5.1. 침전성

호기성 그레놀 슬러지 농도와 SVI 변화는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8. Variation of AGS concentration and SVI.

호기성 그레놀 슬러지 농도는 1,617~3,910 mg/L(평균 2,815) 이었고 SVI는 49~117 mL/g(평균 75)이었다.

호기성 그레놀 슬러지는 일반 활성슬러지에 비해 침전성이 매우 우수하고 AGS 농도와 SVI는 반비례 관계를 가지며 SVI는 AGS-SBR 공정의 특성을 나타내는 운영인자로 사용 될 수 있을 것으로 사료된다.

3.5.2. 호기성 그레놀 슬러지(AGS) 형태

광학현미경을 사용하여 호기성 그레놀 슬러지의 형태를 40배율로 관찰한 결과는 Fig. 9와 같다. 운전기간이 경과함에 따라 슬러지의 형태가 구의 모양을 띠며 조밀하고 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

연속 회분식 장치를 이용한 호기성 입상화를 시도한 연구에서 최종 형성된 호기성 입자는 주로 막대형태의 박테리아로 구성되어 있으며 매끈하고 둥글며 조밀한 형태를 지닌다고 보고되었고 미생물 군집체는 생물입상화 특성이 우수하며 Extracellular Polysaccharide Substance (EPS) 물질을 다량으로 형성하며 EPS 물질들의 가교작용을 통하여 입상화가 진행되는 것으로 알려져 있다.^{9,13)}

3.5.3. 미생물 군집 분석

Pilot plant 호기성 그레놀 슬러지(AGS)와 S시 하수처리장 활성슬러지(AS)의 미생물 군집을 비교하였으며 각각의 미생물 군집분석 결과는 Fig. 10과 같다.

Fig. 9. Feature of AGS according to the operating period elapsed.

Fig. 10. Microbial community analysis of AGS (Aerobic granular sludge) and AS (Activated sludge).

Table 4. Sludge disposal expenses

Inflow (m ³ /d)	Production of waste sludge (m ³ /d)	Solid concentration of waste sludge (mg/L)	Production of dewatered sludge (kg/d)	Expense of sludge disposal per wastewater (won/m ³)
195	1.50	7,674	67.6 (water content 83%)	26

Table 5. Power consumption

Inflow (m ³ /d)	Average daily power consumption (kWh)	Average power consumption per wastewater (kWh/m ³)
195	151.4	0.79

전체 미생물 중 질산화에 관여하는 미생물인 Nitrosomonadales의 비율은 개체 수 기준 AGS 0.54%, AS 0.23%로 AGS가 2.3배 높았고, DPAO (Denitrifying Phosphorus Accumulating)로 탈질 미생물 중 하나인 Thauera의 비율은 AGS 0.126%, AS 0.05%로 AGS가 2.5배 높은 것으로 나타났다.

3.6. 경제성

3.6.1. 슬러지 발생량

운전기간 동안 슬러지 발생량 및 처리비용을 산정하였고 결과는 Table 4와 같다. 평균 하수처리량 195 m³/d일 때 잉여슬러지 발생량은 1.5 m³/d이었고, 고형물 농도는 7,674 mg/L으로 탈수슬러지 발생량은 67.6 kg/d(함수율 83%)이며, 슬러지 처리비용 76,470원/ton을 적용했을 때 하수 1 m³ 당 슬러지 처리비용은 26원으로 나타났다.

국내 SBR 계열 시설용량 1,000 m³/d 이하 하수처리장의 슬러지 처리비용은 하수 1 m³ 당 57.6원으로 보고되었으며¹⁴⁾ AGS-SBR 공정에서 약 54.9% 절감되었다.

3.6.2. 전력소비량

Pilot plant 전력사용량은 현장에 설치된 적산전력량계를 통해 확인하였고 운전기간 동안 전력소비량은 Table 5와 같다. 일일 전력소비량은 평균 151.4 kWh/d이었고, 하수 1 m³ 당 전력소비량은 0.79 kWh/m³로 산정되었다.

국내 SBR 계열 시설용량 1,000 m³/d 이하 하수처리장의 전력소비량은 하수 1 m³ 당 1.21 kWh로 보고되었으며¹⁴⁾ AGS-SBR 공정에서 약 34.7% 절감되었다.

4. 결 론

호기성 그레놀 슬러지를 이용한 하수고도처리 AGS-SBR 공정의 Pilot plant 운전특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 처리수 평균 농도는 각각 1.4 mg/L, 11.4 mg/L, 6.2 mg/L, 13.2 mg/L, 0.229 mg/L로 T-P를 제외하고 모두 I지역 방류수질 기준을 안정적으로

만족하였다.

2) F/M비 0.05~0.25 (Kg COD_{Mn}/Kg MLVSS)에서 안정적인 처리가 가능하였고 COD_{Mn}, T-N의 경우 F/M비 0.05 이하에서 처리효율이 저하되는 경향이 나타났다.

3) C/N비(COD_{Mn} Kg/T-N mg/L) 2 이하에서 T-N 처리효율이 저하되는 경향을 보였으나 방류수질 기준을 만족하였다.

4) 겨울철 11℃ 이하의 낮은 유입수 온도에서도 유출수 T-N 농도가 방류수질 기준 20 mg/L 이하를 안정적으로 유지하였고 수온에 의한 질소제거 영향은 미미하였다.

5) 운전기간이 경과하면서 호기성 그레놀 슬러지가 커지고 둥글며 조밀한 형태로 변화하는 것을 확인하였고 미생물군집 분석 결과, 전체 미생물 중 질산화 및 탈질에 관여하는 미생물의 비율은 호기성 그레놀 슬러지가 활성슬러지에 비해 각각 2.3배, 2.5배 높은 것으로 나타났다.

6) 평균 SVI는 75 mL/g으로 일반 활성슬러지에 비해 우수한 것으로 나타났다.

7) 운영결과, 잉여슬러지 발생량 및 전력소비량 감소를 확인하였으며 하수처리장의 에너지 자립률을 증가시킬 수 있는 대안이 될 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업(과제번호 2016002190005)”에서 수행되었습니다.

KSEE

References

- Blais, J. F., Tyagi, R. D. and Auclair, J. C., “Bioleaching of metals from sewage sludge: effects of temperature,” *Water Res.*, **27**(1), 111~120(1993).
- Lee, H. O., Kim, J. Y., Choi, J. W. and Hyeon, G. S., “A study on High-rate BNR process for fluctuating influent loadings and sludge reduction,” *J. Korean Soc. Water Sci. and Technol.*, **17**(4), 67~75(2009).
- Ministry of Environment (MOE) Republic of Korea, The Sewage Law(2016).
- Park, M. G., Chang, Y. S., Heo, Y. R. and Lee, E. S., “Pre-reduction effects of nitrate in return sludge on biological nutrient removal for the low strength domestic wastewater,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **23**(9), 1461~1467(2001).
- An, I. S., Jung, P. J., Won, C. H. and Jo, S. Y., “A case study on the efficiency improvement of municipal sewage plant

- treating a low concentration influent," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **19**(6), 607~613(2003).
6. Yae, J. B., Ryu, J. H., Hong, S. W., Kim, H. G. and Ahn, D. H., "Applicability of the SBR process using aerobic granular sludge (AGS) in municipal wastewater treatment," *J. Environ. Sci. Eng.*, **27**(4), 233~240(2018).
7. Gao, D., Liu, L., Liang, H. and Wu, W. M., "Aerobic granular sludge: Characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment," *Crit Rev. Biotechnol.*, **31**(2), 137~152(2011).
8. De Bruin, L. M. M., De Kreuk, M. K., Van der Roest, H. F. R., Uijterlinde, C. and Van Loosdrecht, M. C. M., "Aerobic granular sludge technology: An alternative to activated sludge," *Water Sci. Technol.*, **49**(11-12), 1~7(2004).
9. Tay, J. H., Liu, Q. S. and Liu, Y., "The effect of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **57**, 227~233(2001).
10. Seo, D. W., Kim, S. H. and Kim, D. J., "A study on selective nitrification and granulation in sequencing batch reactor (SBR)," *Theories and Applicat. Chem. Eng.*, **10**(2), 1254~1257(2004).
11. Lee, B. S. and Choi, S. W., "Formation and characteristics of granular sludge using aerobic granular reactor," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(12), 1135~1142(2009).
12. Kim, K. Y., Lee, S. I. and Weon, S. Y., "Effects of temperature and toxicant (Cu) on nitrification of activated sludge," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **25**(12), 1578~1583(2003).
13. Yang, S. F., Tay, J. H. and Liu, Y., "Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules," *J. Environ. Eng.*, **131**(1), 86~92(2005).
14. Ministry of Environment (MOE) Republic of Korea, Analysis for operation of public sewage treatment plant(2015).