

호기성 그래놀 슬러지를 이용한 하수고도처리기술(AGS-SBR)

최한나^{a,†} · 모우종^b

(주)태영건설 기술연구팀

Advanced Wastewater Treatment Process Using Aerobic Granular Sludge (AGS-SBR)

Han Na Choi^{a,†} · Woo Jong Mo^b

R&D Team, Taeyoung E&C

(Received 11 November 2020, Revised 31 December 2020, Accepted 4 January 2021)

Abstract

Aerobic granular sludge (AGS) can be classified as a type of self-immobilized microbial aggregates measuring more than 0.2 mm. It offers the option to simultaneously remove COD, N, and P that occur in different zones inside a granule. Also, AGS is characterized by high precipitability, treatability with high organic loading, and high tolerance to low temperature. In this study, a sequencing batch reactor inoculated with AGS (AGS-SBR) is a new advanced wastewater treatment process that was proven to grow AGS with integrated nutrient removal and low C/N ratio. A pilot plant, AGS-SBR with a capacity of 225 m³/d was installed at an S sewage treatment plant in Gyeonggi-do. The results of the operation showed that the water quality of the effluent indicated that the value of BOD₅ was 1.5 mg/L, COD_{Mn} was 11.4 mg/L, SS was 6.2 mg/L, T-N was 13.2 mg/L, and T-P was 0.197 mg/L, and all of these values reliably satisfied an effluent standard (I Area). In winter, the T-N treatment efficiency at a lower temperature of less than 11 °C also showed reliability to meet the effluent standard of the I Area (20 mg/L or less). Analysis of microbial community in AGS showed a higher preponderance of beneficial microorganisms involved in denitrification and phosphorus accumulation compared with activated sludge. The power consumption and sludge disposal cost were reduced by 34.7% and 54.9%, respectively, compared to the domestic SBR type sewage treatment plant with a processing capacity of 1,000 m³/d or less.

Key words : Advanced wastewater treatment, Aerobic granular sludge(AGS), Energy saving, Sequencing batch reactor(SBR)

^{a,†} Corresponding author, 선임사원(Senior Researcher), hnchoi@taeyoung.com, <https://orcid.org/0000-0002-0641-383X>

^b 선임사원(Senior Researcher), mwj84@taeyoung.com, <https://orcid.org/0000-0001-7135-9318>

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.

1. Introduction

산업 발전과 도시화에 따른 물 사용량 증가로 질소, 인 등 영양염류의 하천 유입량이 급격하게 증가하여 수질악화 및 부영양화 현상이 심각해지고 있다. 이러한 환경오염을 방지하기 위해 공공하수처리시설 방류수질 기준이 강화되고, 체계적인 물 환경관리를 위한 총유기탄소(TOC)수질총량제가 도입될 예정이다. 기존 생물학적 하수고도처리는 A2/O와 같은 연속식 공법이 대부분이었으나 생물반응조의 낮은 고형물 농도와 넓은 설치부지 그리고 고액분리 어려움으로 막(membrane)을 이용한 Membrane bioreactor (MBR) 공법의 적용이 증가하고 있다. MBR 공법은 활성슬러지 공법과 막여과 공법이 결합된 것으로 설치부지가 작고 생물반응조의 고형물 농도를 활성슬러지 공법 보다 3~4배 높게 유지할 수 있으나 막 교체에 따른 운영비 상승, 높은 에너지 소비량, 산소 전달을 저하 등 여전히 문제점이 해결되지 못하고 있다 (Trusell et al., 2015). SBR (Sequencing bioreactor) 공법은 회분식의 단순하고 집약적인 하수처리 공법으로 유입, 반응(호기, 무산소, 혐기), 침전, 유출 공정이 순차적으로 일어난다. SBR 공법은 처리시간을 유동적으로 운전할 수 있기 때문에 운전조건이 변하더라도 목표하는 수질을 만족할 수 있다. 또한, SBR 반응조 크기는 활성슬러지 공법의 생물반응조 보다 크지만 실제로 모든 처리공정이 하나의 반응조에서 일어나기 때문에 처리시설의 전체 부지는 적게 소요된다. Aerobic granular sludge (AGS)를 이용한 하수처리는 유럽에서 상용화된 기술로 유기물, 질소, 인 제거가 동시에 가능하

고 우수한 침전성을 이용하여 에너지를 절감할 수 있는 하수처리기술로 알려져 있다(De Bruin et al., 2004).

슬러지 입상화를 위해 활성탄, 철, 갈슘 등 무기물을 투입하였으나 입상 슬러지 형성에 6개월의 시간이 요구되었고(El-Mamouni et al., 1998), 고분자 응집제를 이용한 경우 일정시간 후 플록(Floc)이 해체되었다(Lee and Choi, 2009). 국외에서는 Garmerwolde (100,000 m³/d, Netherlands), Epe (35,000 m³/d, Netherlands), Ryki (5,000 m³/d, Poland) 등 AGS를 이용한 하수처리기술이 중·대규모 시설에 적용되어 운영되고 있으며 국내에서는 실험실 규모의 연구가 활발하게 진행되었으나 유럽과 달리 국내 하수의 낮은 C/N비, 계절에 따른 유입부하 변동 등의 AGS를 이용한 하수처리기술의 국내 상용화에 한계가 있었고 AGS를 이용한 하수처리기술의 Scale-up을 위한 실증화 연구가 요구되었다. 본 연구팀은 국내 최초로 AGS를 이용한 하수처리기술 상용화에 성공하였으며 AGS-SBR은 유기물, 질소, 인 제거가 동시에 가능하고 빠른 반응시간과 우수한 침전성으로 동일 시설용량 대비 많은 양의 하수처리가 가능하여 설치부지 및 공사비 절감이 가능하고, AGS의 높은 미생물 함유량으로 잉여슬러지 발생량을 절감할 수 있는 친환경 하수고도처리기술이다.

2. Materials and Methods

2.1 Pilot plant

본 연구는 S시 공공하수처리시설에 시설용량 225 m³/d의 AGS-SBR pilot plant를 설치하여 진행하였다. 유입수는 하수

Table 1. Specification of equipment

Item	Specification	Material
Equalization tank	2,400 mm W × 2,400 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/Fiber reinforced plastic(FRT) lining
AGS-SBR	2,400 mm W × 7,000 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/FRP lining
Multi-function tank	3,600 mm W × 3,600 mm L × 5,000 mm H (4,500 mm He)	Steel/FRP lining
Discharge tank	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

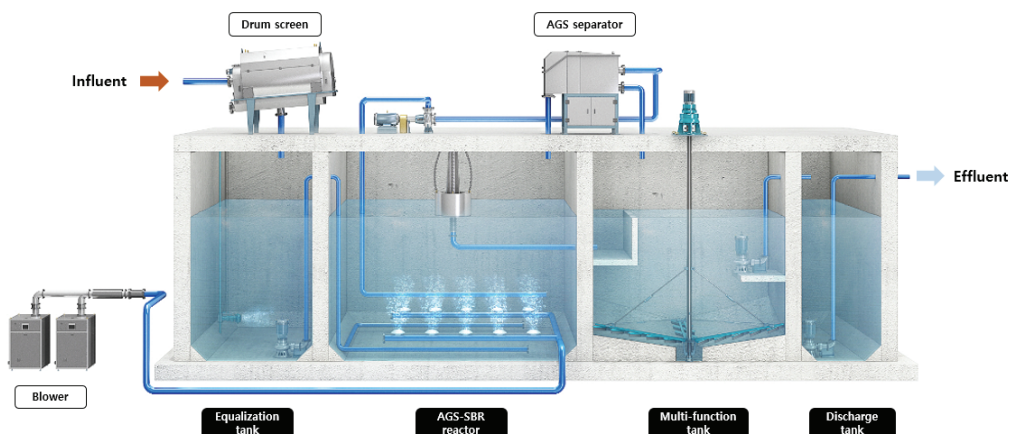


Fig. 1. Schematic diagram of AGS-SBR.

Table 2. Characteristics of the influent

	Total	Summer season	Winter season
BOD ₅ (mg/L)	119.7 ± 66.9(42.0~324.0)	93.1 ± 40.2(42.0~168.0)	175.8 ± 76.7(55.0~324.0)
COD _{Mn} (mg/L)	124.7 ± 48.4(19.3~250.0)	123.4 ± 54.5(19.3~206.0)	127.0 ± 35.1(58.0~250.0)
SS(mg/L)	106.4 ± 59.6(24.0~380.0)	85.1 ± 36.7(24.0~189.0)	144.0 ± 72.2(68.0~380.0)
T-N(mg/L)	38.5 ± 7.7(15.6~55.3)	36.6 ± 8.3(15.6~50.0)	42.0 ± 4.8(30.2~55.3)
T-P(mg/L)	4.005 ± 1.447(1.800~9.874)	4.070 ± 1.223(1.920~7.200)	3.890 ± 1.767(1.800~9.874)
Temperature(°C)	19.2 ± 5.5(10.7~26.7)	23.0 ± 3.2(14.8~26.7)	11.7 ± 0.8(10.7~12.3)
COD _{Mn} /N	1.88(1.10~2.97)	1.68(1.10~2.24)	2.26(1.78~2.97)

처리장의 1차 침전지 후단에서 이용하였고 운전기간은 2017년 2월 6일~7월 28일(총 145일)이었다. Pilot plant 공정도를 Fig. 1에 나타냈다. Pilot plant의 주요설비 사양을 Table 1에 나타냈다. 구성은 드럼스크린, 유량조정조, SBR 생물반응조, 다기능처리조, 방류수조로 이루어져 있다. 드럼스크린은 반응조로 유입되는 협잡물을 거르기 위해 설치되었고, 유량조정조는 유입수의 균등한 공급을 위해 체류시간 4 hr 기준으로 제작되었다. 다기능처리조는 체류시간 0.5 hr로 운전되었고, 생물반응조에서 유출된 고형물 및 17% Poly aluminium chloride (PAC)주입을 통한 잔류 인의 제거를 위해 설치되었다.

2.2 유입수 성상

본 연구에 사용된 유입수의 성상을 Table 2에 나타냈다. 운전기간 동안 유입수의 오염물질 농도는 BOD₅ 42.0~324.0 mg/L(평균 119.7 mg/L), COD_{Mn} 19.3~250.0 mg/L(평균 124.7 mg/L), SS 24.0~380.0 mg/L(평균 106.4 mg/L), T-N 15.6~55.3 mg/L(평균 35.5 mg/L), T-P 1.800~9.874 mg/L(평균 4.005 mg/L)이었다. Pilot plant가 설치된 현장의 합류식 관거 적용에 따른 부하변동 폭이 매우 크게 나타났으며 동절기 유기물 부하가 여름철 보다 높게 나타났다. 전체 운전기간 동안 유입수의 평균 수온은 19.2°C 이었고 동절기 유입수의 평균 수온은 11.7°C, 최저 수온은 10.7°C 이었다.

2.3 Pilot plant 운전조건

Hydraulic retention time (HRT)에 따른 운전조건을 총 3단계로 나누어 1 단계 HRT 12시간, 2 단계 HRT 10시간, 3 단계 HRT 8시간으로 조절하여 운전하였다. 공정별 운전시간은 HRT 8시간 기준으로 유입 60분, 폭기 120분, 침전/유출 60분이었고 운전조건 및 처리수질에 따라 유입 및 폭기 시간을 증감하였다. 운전조건을 Table 3에 나타냈다.

Table 3. Operating conditions of the pilot plant

	Step 1	Step 2	Step 3
Influent flow(m ³ /day)	150	188	225
HRT(hr)	12	10	8
Operating cycle(Cycle/day)	4	5	6
Exchange percentage(%)	50	50	50
Aeration time(hr)	4	3	2
Operation period(d)	53	30	89

2.4 분석항목 및 방법

유입수 및 처리수의 생물학적 산소요구량(Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 부유물질(Suspended solid, SS), 총질소(T-N), 총인(T-P) 농도를 수질오염공정시험법 기준으로 측정하였다. 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. Results and Discussion

3.1 Treatment efficiency

운전기간동안 Pilot plant 유출수의 농도 및 처리효율을 Table 4에 나타냈다. 오염물질별 유출수의 농도 및 처리효율은 BOD₅ 1.0~4.6 mg/L(평균 1.5 mg/L), 처리효율 98.3%, COD_{Mn} 4.6~19.5 mg/L(평균 11.4 mg/L), 처리효율 89.5%, SS N.D~12.0 mg/L(평균 6.2 mg/L), 처리효율 93.6%, T-N 7.4~17.0 mg/L(평균 13.2 mg/L), 처리효율 64.6%, T-P 0.021~0.540 mg/L(평균 0.197 mg/L), 처리효율 94.4%로 나타났다. 긴 SRT 운영에 따른 낮은 잉여슬러지 발생량으로 인해 응집·침전을 통해 추가적인 인(T-P) 제거를 유도하였고 일반적인 연속회분식활성슬러지법의 설계기준 HRT는 12~24 hr(고부하형)으로 알려져 있으나 본 기술은 짧은 HRT 8~12 hr에서도 모든 항목에 대하여 I 지역 방류수질기준을 안정적으로 만족하였다.

3.2 Effects of F/M ratio

F/M비(kg COD_{Mn}/kg MLSS)에 따른 COD_{Mn}, SS, T-N, T-P 처리효율을 Fig. 2에 나타냈다. 운전기간동안 오염물질별 평균 처리효율은 COD_{Mn} 89.5%, SS 93.6%, T-N 64.6%, T-P 94.4%로 나타났다. SS와 T-P는 생물반응조 후단에 적절한 응집제 주입으로 F/M비 변화에 상관없이 안정적인 처리효율을 나타냈으나 COD_{Mn}, T-N의 경우, 0.05이하의 낮은 F/M비에서 처리성능이 저하되어 처리효율은 각각 75%, 45%까지 낮아졌으며 이러한 결과는 낮은 유기물 부하가 AGS 성장에

Table 4. Characteristics of the effluent

	Total		Summer season(5~7월)		Winter season(2~4월)	
	Conc.(mg/L)	Removal eff.(%)	Conc.(mg/L)	Removal eff.(%)	Conc.(mg/L)	Removal eff.(%)
BOD ₅	1.5 ± 0.7(1.0~4.6)	98.3	1.4 ± 0.5(0.1~2.9)	98.0	1.7 ± 1.1(1.0~4.6)	98.8
COD _{Mn}	11.4 ± 3.6(4.6~19.5)	89.5	10.4 ± 3.7(4.6~19.5)	90.9	13.3 ± 2.5(7.4~17.0)	89.1
SS	6.2 ± 2.9(N.D~12.0)	93.6	5.9 ± 3.0(N.D~10)	93.2	6.8 ± 2.7(N.D~12.0)	94.5
T-N	13.2 ± 2.0(7.4~17.0)	64.6	13.0 ± 1.9(7.4~16.6)	63.2	13.7 ± 2.0(9.4~17.0)	67.1
T-P	0.197 ± 0.109 (0.021~0.054)	94.4	0.178 ± 0.101 (0.021~0.540)	95.4	0.234 ± 0.113 (0.038~0.480)	93.5
Temperature(℃)	19.2 ± 5.5(10.7~26.7)		23.0 ± 3.2(14.8~26.7)		11.7 ± 0.8(10.7~12.3)	

부정적인 영향을 미치기 때문이다. 호기성 그래놀 입자 형성에 따른 입자의 밀도, 비중, 물리적 강도 등과 같은 물리적인 특징은 유기물 부하율에 상당히 의존하며(Lee and Choi, 2009), 유기물 부하가 증가함에 따라 슬러지의 크기가 초기 0.2 mm에서 1.0 mm까지 증가하였고 AGS가 안정적으로 형성되어 침전성과 처리효율이 향상되었다(Kim and Ahn, 2019). 또한, Extracellular polymeric substance(EPS) 증가는 박테리아 접착과 부착을 유도하여 입상화를 촉진한다(Tay et al., 2001).

국내 하수처리장 유입수의 오염물질별 농도(ME, 2016)와 연속회분식법의 설계제원(Korea construction standard center, 2017)을 각각 Table 5와 Table 6에 나타냈다. AGS-SBR의 경우 0.2 이상의 높은 F/M비에서 안정적인 처리가 가능하기 때문에 동일 시설용량 대비 많은 양의 하수처리가 가능하고 설치 부지를 절감할 수 있다.

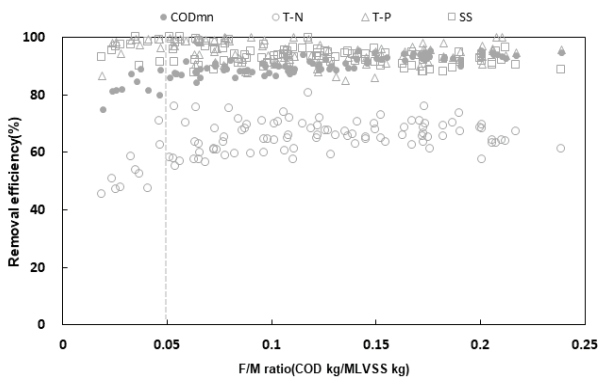


Fig. 2. Removal efficiency of COD_{Mn}, SS, T-N, and T-P according to the F/M ratio (kg COD/kg MLSS).

Table 5. Characteristics of the influent for the domestic sewage treatment plant

Item	Influent	
	Pilot plant	Domestic sewage treatment plant
BOD ₅ (mg/L)	134.8	70.1
COD _{Mn} (mg/L)	69.7	49.8
SS (mg/L)	67.1	73.6
T-N (mg/L)	30.4	27.2
T-P (mg/L)	5.09	3.45

Table 6. Characteristics of the influent for the domestic sewage treatment plant

Item	Specification	
	High loading type	Low loading type
HRT(hr)	12~24	24~48
F/M비(kg BOD/kg MLSS)	0.2~0.4	0.03~0.05
MLSS(mg/L)	1,500~2,000	3,000~4,000
Exchange ratio(1/m)	1/2~1/4	1/3~1/6
Cycle(number/d)	3~4	2~3
Oxygen conc.(mg/L)	1.4~1.7	1.8~2.2

3.3 Characteristics of nitrogen removal

3.3.1 Organic and nitrogen removal according to HRT

HRT 변화에 따른 COD_{Mn}, T-N 처리효율 변화를 Fig. 3, Fig. 4에 각각 나타냈다. HRT를 12시간, 10시간, 8시간으로 변화시켜 운전한 결과, Pilot plant 유출수의 COD_{Mn} 농도는 방류수질기준 20 mg/L 이하로 안정적으로 처리되었고 COD_{Mn} 처리효율은 각각 89.1%, 89.4%, 90.0%로 나타나 HRT변화에 따른 변화가 거의 없었다. T-N의 경우, 운전기간 동안 방류수질기준 20 mg/L 이하로 매우 안정적으로 처리되었다. HRT 12시간, 10시간, 8시간 일 때 처리효율이 각각 66.8%, 66.6%, 60.6%로 나타났으며 HRT 8시간으로 변경 후 처리효율이 낮아진 것으로 보이나 이는 유입부하 감소로 인한 영향으로 확인되었다. AGS는 밀도가 크고 조밀하며 높은 미생물량을 갖고 고부하의 충격에도 견딜 수 있는 특징을 가지며,

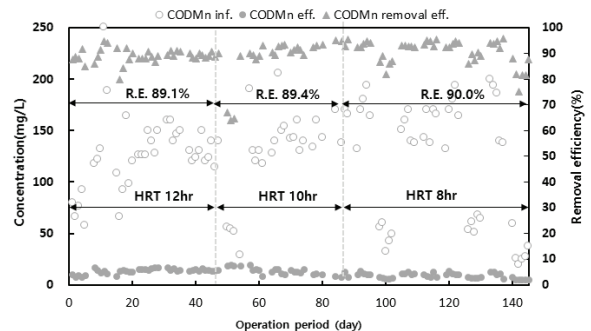


Fig. 3. Concentration of the influent and effluent, and removal efficiency of COD_{Mn} according to HRT.

이로 인해 짧은 체류시간에서도 안정적인 처리가 가능하였다(Tay et al., 2001).

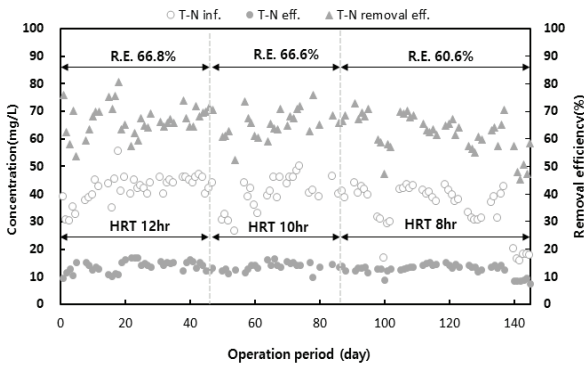


Fig. 4. Concentration of the influent and effluent, and removal efficiency of T-N according to HRT.

3.3.2 Nitrogen removal according to temperature

유입수 온도에 따른 T-N NH₃-N농도 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 겨울철 유입수 온도는 평균 11.7°C(10.7~12.3°C)이었고 겨울철 제외 기간의 유입수 온도는 평균 23.0°C(14.8~26.7°C)이었다. 겨울철 유출수의 T-N농도는 평균 13.7 mg/L(9.4~17.0 mg/L), NH₃-N농도는 평균 0.9 mg/L(0.1~4.5 mg/L)이었고 겨울철을 제외한 기간의 유출수 T-N농도는 평균 13.0 mg/L(7.4~16.6 mg/L), NH₃-N 농도는 평균 0.3 mg/L(0.1~0.6 mg/L)로 나타나 겨울철 유출수의 NH₃-N농도가 다소 증가하였으나 저온에 의한 질산화 미생물의 활성 저해는 나타나지 않았다. 겨울철 11°C 이하의 낮은 수온에서 유출수의 NH₃-N농도가 다소 증가하였으나 저수온에 의한 질산화 저해는 나타나지 않았고 유출수 T-N 농도가 방류수질 기준 20 mg/L 이하를 안정적으로 유지하였다. 11°C 이하의 하수처리시 질산화 미생물이 탈질 미생물보다 활성에너지가 5.1배 높아 반응시 필요한 에너지가 높기 때문에 낮은 온도에서 질산화가 어려운 것으로 보고되었으나, AGS는 조밀하고 강한 미생물 구조와 EPS에 의한 세포 보호로 저 수온에서도 안정적인 대사율과 질산화균의 활성이 저해되지 않은 것으로 판단된다(Mo et al., 2019).

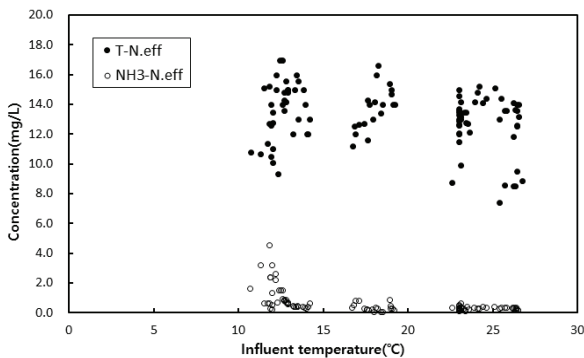


Fig. 5. T-N and NH₃-N concentration of effluent with influent temperature.

3.3.3 Fate of ammonium and nitrate according to reaction period

1 Cycle(4 hr) 동안 반응시간 경과에 따른 NH₃-N, NO₃-N, SCOD_{Cr} 농도 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 반응시간이 약 80분 경과했을 때 SCOD_{Cr} 감소가 둔화되고 NH₃-N 감소가 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 중속영양미생물과 독립영양미생물의 서로 다른 증식속도에 기인된 것으로 증식속도가 빠른 중속영양미생물에 의한 유기물 섭취와 저장이 먼저 일어나고 이후에 독립영양미생물에 의해 질산화반응이 일어난다(Van Loosdrecht et al., 1995). 최종적으로 제거된 NH₃-N보다 생성된 NO₃-N 현저하게 적은 것으로 보아 호기성 그래놀 슬러지 내부의 산소농도 구배에 의해 호기공정에서 슬러지 내부에서 질산화와 탈질 반응이 동시에 일어나는 것으로 판단된다.

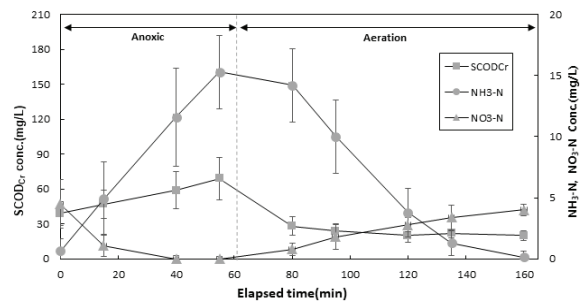


Fig. 6. NH₃-N, NO₃-N, and SCOD_{Cr} concentration with elapsed time for the bio-reactor.

3.4 Aerobic granular sludge (AGS)

3.4.1 Removal efficiency according to AGS concentration

운전기간 동안 AGS 농도에 따른 SVI₃₀과 유출수 T-N농도의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. AGS 농도는 평균 2,600 mg/L, SVI₃₀은 평균 75 mL/g이었고 활성슬러지법의 경우 통상적으로 SVI₃₀ 100~150 mL/g일 때 침전성이 양호하며 활성슬러지법 대비 우수한 침전성을 보였다.

유출수 T-N 농도는 I 지역 방류수질기준 20 mg/L 이하를 유지하여 낮은 AGS 농도에서도 안정적인 처리가 가능하였다.

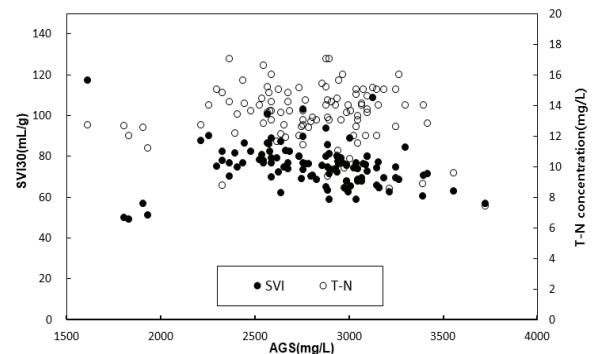


Fig. 7. Relationship among AGS fraction, organic matter, and nitrogen removal efficiency.

3.4.2 Morphology of AGS

광학현미경을 통해 Pilot plant 운전경과에 따른 호기성 그레놀 슬러지의 형태 변화를 관찰하였고 현미경 사진을 Fig. 8에 나타냈다(Mo et al., 2019) 운전기간이 경과함에 따라 미세 플록이 감소하고 둥근 형태의 슬러지가 증가하며 크기가 점점 커지는 것을 확인 할 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 EPS 물질을 다량으로 형성하며 EPS 물질들의 가교작용을 통하여 입상화가 진행되는 것으로 알려져 있다(Yang et al., 2005).

3.4.3 Microbial community structure

*Beta-proteobacteria*는 하수처리공정에서 탈질 및 인 축적에 관여하는 미생물 강(Class)으로 *Burkholderiales*, *Neisseriales*,

Nitrosomonadales, *Rhodocyclales* 4 가지 계열의 미생물 목(Order)으로 세분화된다. *Nitrosomonadales*는 암모니아 산화에 관여하는 미생물 계열이고 *Burkholderiales*, *Rhodocyclales*은 혐기성 미생물 계열로 탈질 및 인 축적에 관여하는 것으로 알려져 있다(Boden et al., 2017). 호기성 그레놀 슬러지와 활성슬러지의 미생물 군집 분석 결과를 Table 6에 나타냈다. 암모니아 산화 미생물 *Nitrosomonadales*에 대하여 전체 bacteria 기준 개체수 비율은 AGS가 0.54%, Activated sludge (AS) 0.23%로 약 2.3배 높았고, *Beta-proteobacteria* 기준 개체수 비율은 AGS가 3.3%, AS 1.00%로 약 3.3배 높았다. 인 축적 미생물 *Candidatus accumulibacter phosphatis*에 대하여 전체 bacteria 기준 개체수 비율은 AGS가 1.8%, AS 1.2%로 약 1.5배 높았고, *Beta-proteobacteria* 기준 개체수 비율은 AGS가 12.0%, AS 5.0%로 약 2.4배 높았다. AGS에서 탈질 및 인 축적에 관여하는 bacteria의 비율이 AS 보다 높게 나타났다으며 특히, *Beta-proteobacteria* 기준 개체수 비율은 전

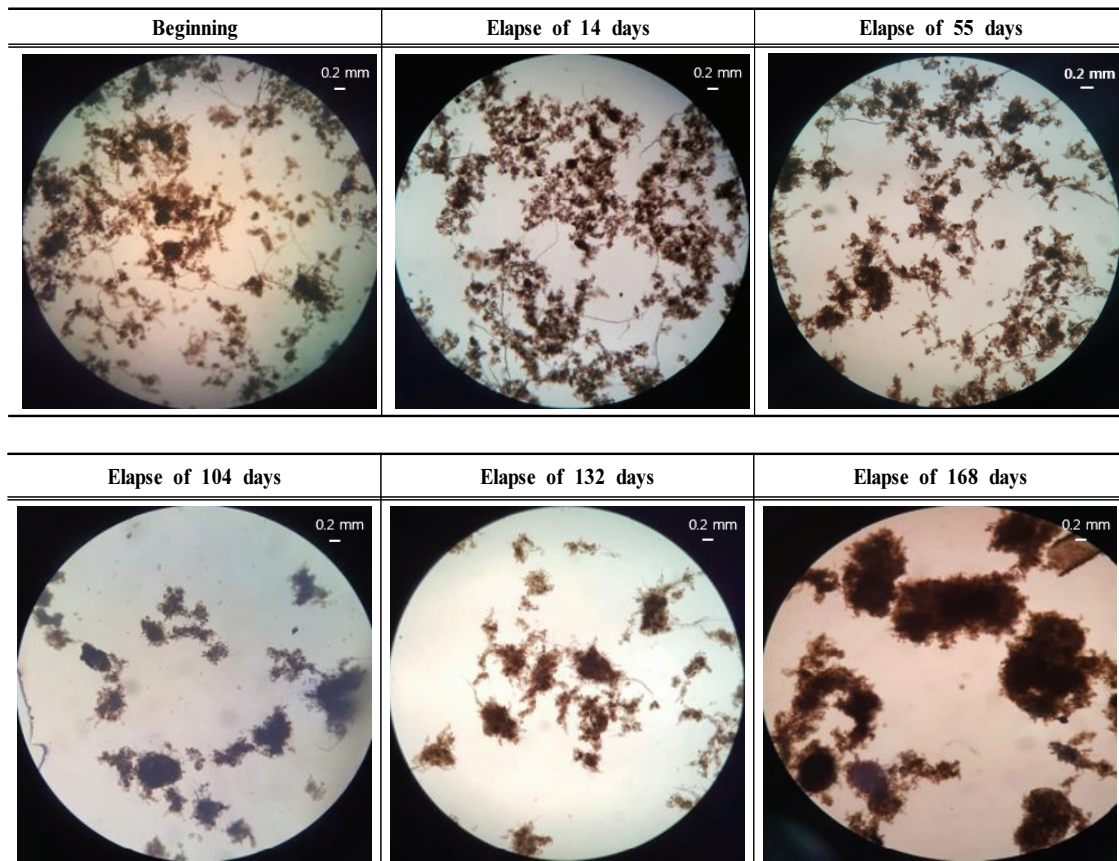


Fig. 8. Feature of AGS according to the elapsed operating period.

Table 6. Microbial community analysis of Aerobic granular sludge and Activated sludge

Microorganism		Aerobic granular sludge (AGS)		Activated sludge (AS)	
		All bacteria	Beta-proteobacteria	All bacteria	Beta-proteobacteria
Nitrosomonadales		0.54%	3.30%	0.23%	1.00%
Rhodocyclales	<i>Candidatus accumulibacter phosphatis</i>	1.8%	12.0%	1.2%	5.0%
	<i>Thauera</i>	0.126%	0.240%	0.050%	0.190%

체 bacteria 기준 보다 높게 나타나 하수처리에 유용한 미생물이 우점화 된 것을 알 수 있다.

3.5 Economical evaluation of the AGS-SBR process

3.5.1 Electricity

운전기간 동안 Pilot plant의 일일 전력소비량을 현장에 설치된 직산전력량계를 통해 확인하였다. AGS-SBR공정의 일일 전력소비량은 평균 151.4 kWh/d이었고 하수 1 m³ 당 전력소비량은 0.78 kWh/m³로 산정되었다. 국내 SBR계열 시설 용량 1,000 m³/d 이하 하수처리장의 전력소비량은 하수 1 m³ 당 1.21 kWh/m³로 보고되었으며, AGS-SBR공정에서 약 34.7% 절감되었다(ME, 2015).

Table 7. Power consumption

Inflow(m ³ /d)	Average daily power consumption (kWh)	Average power consumption per wastewater (kwh/m ³)
195	151.4	0.78

3.5.2 Excessive sludge production

운전기간 동안 평균 하수처리량은 195 m³/d, 잉여슬러지 발생량 1.5 m³/d, 고형물 농도 7,674 mg/L이었다. 탈수 Cake 발생량은 67.6 kg/d(함수율 83%)이며, 슬러지 처리 비용 76,470 원/ton 적용했을 때, 하수 1 m³ 당 슬러지 처리비용은 26원으로 산정된다. 국내 SBR계열 시설용량 1,000 m³/d 이하 하수처리장의 슬러지 처리비용은 하수 1 m³ 당 57.6원으로 보고되었으며 AGS-SBR공정에서 약 54.9% 절감되었다(ME, 2015).

Table 8. Sludge disposal expenses

Inflow(m ³ /d)	Production of waste sludge(m ³ /d)	Production of dewater sludge(kg/d)	Expenses of sludge disposal(won/m ³)
195	1.5	67.6	26

4. Conclusion

호기성 그래놀 슬러지를 이용한 하수고도처리기술(AGS-SBR)의 pilot plant(225 m³/d) 운영을 통한 AGS-SBR의 특성은 다음과 같다.

1) Pilot plant 유출수의 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 평균 농도는 각각 1.4 mg/L, 11.4 mg/L, 6.2 mg/L, 13.2 mg/L, 0.197 mg/L로 I 지역 방류수질기준을 모두 만족하였고 부하 변동에도 안정적인 처리효율을 나타냈다.

2) 짧은 체류시간(HRT 8시간)에서도 AGS의 조밀하고 높은 미생물 농도로 인해 안정적인 처리가 가능하고 동일 시설 용량 대비 많은 양의 하수처리가 가능하여 설치부지 및 공사

비를 절감할 수 있다.

3) F/M비(kg COD/kg MLSS) 0.2 이상의 고부하 운전이 가능하고 2,500~3,500 mg/L의 비교적 낮은 MLSS 농도에서도 안정적인 처리가 가능하다.

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

5) 미생물 군집 분석 결과, 호기성 그래놀 슬러지에서 탈질 및 인 축적에 관여하는 bacteria의 비율이 활성슬러지 보다 높게 나타나 하수처리에 유용한 미생물이 우점화 되었다.

6) 국내 SBR계열 1,000 m³/d 이하 하수처리시설과 비교한 결과, 전력소비량과 슬러지 처리비용이 각각 34.7%, 54.9% 절감되는 등 AGS-SBR은 고효율 저에너지 하수고도처리기술이다.

Acknowledgement

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

References

Boden, R., Hutt, L. P., and Rae, A. W. (2017). Reclassification of *Thiobacillus aquaesulis* (Wood & Kelly, 1995) as *Annwoodia aquaesulis* gen. nov., comb. nov., transfer of *Thiobacillus* (Beijerinck, 1904) from the Hydrogenophilales to the Nitrosomonadales, proposal of Hydrogenophilalia class. nov. within the ‘Proteobacteria’, and four new families within the orders Nitrosomonadales and Rhodocyclales, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 67(5), 1191-1205.

De Bruin, L. M. M., De Kreuk, M. K., Van der Roest, H. F. R., Uijterlinde, C., and Van Loosdrecht, M. C. M. (2004). Aerobic granular sludge technology: An alternative to activated sludge, *Water Science and Technology*, 49, 11-12.

El-Mamouni, R., Leduc, R., and Guiot, S. R. (1998). Influence of synthetic and natural polymers on the anaerobic granulation process, *Water Science and Technology*, 38, 341-347

Kim, H. G. and Ahn, D. H. (2019). Effects of different hydraulic retention times on contaminant removal efficiency using aerobic granular sludge, *Journal of Environmental Science*, 28(8), 669-676.[Koran Literature]

Korea construction standard center. (2017). *Drainage design standard*, Korea construction standard center. [Koran Literature]

Lee, B. S. and Choi, S. W. (2019). Formation and characteristics of aerobic granular sludge using polymer in sequencing batch reactor, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*

- 31(12), 1143-1150. [Koran Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Republic of Korea, Analysis for operation of public sewage treatment plant*, Ministry of Environment. [Koran Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016). *Republic of Korea, Analysis for operation of public sewage treatment plant*, Ministry of Environment. [Koran Literature]
- Mo, W. J., Kim, H. Y., and Choi, H. N. (2019). The operation characteristics of advanced sewage treatment process using aerobic granular sludge in Pilot plant, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 41(2), 61-68. [Koran Literature]
- Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y. (2001). The effect of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57, 227-233.
- Trussell, R. S., Adham, S., Trussell, R. R. (2005). Process limits of municipal wastewater treatment with the submerged membrane bioreactor, *Journal of Environmental Engineering*, 131(3), 410-416.
- Van Loosdrecht, M. C. M., Eikelboom, D. H., Gjaltema, A., Mulder, A., Tjihuis, L., and Heijnen, J. J. (1995). Biofilm structures, *Water Science and Technology*, 32(8), 35-43.
- Yang, S. F., Tay, J. H., and Liu, Y. (2005). Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules, *Journal of Environmental Engineering*, 131(1), 86-92.