

전처리 가용화 공정이 잉여슬러지 혐기성 소화효율에 미치는 영향

유호식[†], 안세영

경기대학교 환경에너지공학과

The Effect of Solubilization Pretreatment Process on Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge

Ho-Sik Yoo[†], Seyoung Ahn

Department of Environmental and Energy Eng., Kyonggi University

(Received: Jul. 12, 2016 / Revised: Aug. 3, 2016 / Accepted: Aug. 8, 2016)

ABSTRACT: COD properties of waste activated sludge (WAS) were investigated for various solubilization rate of mechanical pretreatment method in anaerobic digestion process. Inert COD was 37.0% of total COD in untreated WAS. Particulate biodegradable COD was converted to soluble biodegradables and particulate unbiodegradables as solubilization was processed. Particulate unbiodegradable portion of COD in WAS can be increased as particulate biodegradable portion is decreased in case of relatively long SRT of biological treatment. Thus, COD properties of WAS should be investigated in case of relatively low particulate biodegradable COD, because of possible low effect of solubilization, COD removal rate in anaerobic digester was enhanced as much as 2.1% and 15.1% for solubilization rate 5% and 35% due to pretreatment, respectively. COD removal rate was increased from 25% to 40%, and methane gas generation was increased from 607 m³/d to 907 m³/d as particulate COD of WAS was solubilized to 35% in pretreatment facilities.

Keywords: Pretreatment, Solubilization, Waste activated sludge (WAS), Methane gas generation

초 록: 하수처리장에서 배출되는 잉여슬러지 감량율을 증가시키기 위해 사용된 전처리 가용화시설에서, 가용화율에 따른 COD 성상변화를 살펴보았다. 대상하수처리장의 농축 잉여슬러지에 포함되어 있는 난분해성 COD는 총 COD의 37.0% 이었다. 전처리 가용화시설에서 배출되는 잉여슬러지의 COD 세부성상 변화를 살펴보면 가용화율(5%, 10%, 20%, 30%, 35%)의 증가에 따라 고형성 생분해성 COD는 점차적인 감소를 보이고 있으며 이로 인한 용존성 생분해성 COD와 고형성 난분해성 COD가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 잉여슬러지를 가용화하기 위하여 물리적 전처리시설을 적용할 때 생물학적 2차처리시설의 SRT가 상대적으로 길게 운영되면 잉여슬러지의 고형성 난분해성 COD의 함유율이 높고 상대적으로 고형성 생분해성 COD 농도가 낮게 된다. 고형성 생분해성 COD가 상대적으로 낮은 잉여슬러지의 경우 전처리 시설에 의한 가용화의 효과가 당초 예상보다 낮아질 수 있으므로, 가용화하여 혐기성 소화 할 경우 잉여슬러지에 대한 COD 성상 조사가 요구된다. 가용화율 5%에서 혐기성소화조에서의 COD 제거율은 2.1% 증가하였고, 가용화율 35%에서는 COD 제거율이 15.1% 증가되었다. 전처리 시설에서 잉여슬러지 고형성 COD를 35% 가용화하였을 때 혐기성소화조에서의 COD 제거율은 25%에서 40%로 향상되었고 메탄가스발생량은 607 m³/일에서 907 m³/일로 증가하는 것으로 나타났다.

[†] Corresponding Author (e-mail: hsyoo@kgu.ac.kr)

주제어: 전처리, 가용화, 잉여슬러지, 메탄가스발생량

1. 서론

최근 유기성 폐기물 자원화의 일환으로 하수처리장 소화조 효율 개선사업이 활발히 진행되고 있다. 소화조 효율 개선사업은 잉여슬러지를 가용화하여 슬러지 감량과 가스량 증대를 이루고자 하는 것이다. 하수처리장 2차처리시설인 생물학적 처리공정에서 배출되는 잉여슬러지 유기성분 함유량은 대체로 65~80%에 이른다.¹⁾ 생물학적 2차처리시설에서 배출되는 잉여슬러지 유기물 세부항목은 ASM (activated sludge model) No.1에서 미생물, 미생물 세포쇄설물, 고형성 난분해성 유기물, 고형성 생분해성 유기물, 용존성 난분해성 유기물, 용존성 생분해성 유기물로 구분할 수 있다.²⁾

잉여슬러지는 난분해성 물질의 축적과 사멸에 의한 세포쇄설물(cell debris)에 의해 상당량의 난분해성 유기물을 포함하고 있다. 난분해성 VSS는 혐기성소화공정에서 용존성 유기물로의 가수분해가 잘 이루어지지 않기 때문에 슬러지 감량을 저하시키는 원인이 된다. 초음파나 파쇄와 같은 전처리 시설에 의한 잉여슬러지 가용화는 미생물의 세포막을 파괴하는 기능이 있으므로 가수분해 효율을 높여줄 수는 있으나 잉여슬러지에 포함되어 있는 난분해성 유기물을 가수분해하기는 어렵다. 따라서 잉여슬러지의 난분해성 유기물이 혐기성소화공정에서 슬러지 감량과 가스발생량에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

처리장 효율 개선에 대한 시뮬레이션은 문헌³⁾에서 쉽게 찾아볼 수 있으며, 국내에서도 하수처리장 적용사례가 많이 있다.^{4,5,6,7)} 본 연구는 ASM (Activated Sludge Model)을 기반으로 하수처리장 생물학적 2차처리시설에서 배출되는 잉여슬러지의 유기물 성상에 따라 전처리 가용화시설에서의 슬러지 성상 변화와 후단 혐기성소화 공정에서의 슬러지 감량을 분석하여 전처리 가용화가 잉여슬러지 소화공정에 미치는 영향을 조사하는 것이 목적이다.

2. 실험재료 및 방법

잉여슬러지 가용화 효과를 분석하기 위하여 수학적 모델을 이용한 GPS-X(Hydrolmantis, Inc)에 의한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.⁸⁾ 이 소프트웨어는 다른 연구에서도 활용된 바 있다.^{9,10)} 가용화 및 혐기성 소화 공정을 분석하기 위하여 소프트웨어 제조사가 제공하는 Mantisad가 적용되었으며 생물학적 2차처리시설에서 전처리 가용화 및 혐기성 소화공정으로 유입되는 잉여슬러지는 ASM No. 1(Activated Sludge Model No. 1) 기반인 Mantis 모델이 사용되었다. Mantisad는 ASM 모델과 하수오염물질 체계인 C, N, P의 세부항목이 호환되어 잉여슬러지의 혐기성소화 효율의 분석이 용이하다.

잉여슬러지 가용화 및 슬러지 감량 분석은 3단계로 구분하여 실시하였다. 첫 단계로 대상하수처리장의 처리시설 전과정을 모델링 후 시뮬레이션하여 2차처리시설 최종침전지에서 배출되는 잉여슬러지량과 세부 성상을 도출하였다. 대상하수처리장 생물학적 2차처리시설은 MLE 공정으로 모델링하였고, MLE 공정에서 발생하는 잉여슬러지는 기계식 농축기에서 농축된다. 농축기의 슬러지 회수율은 90%로 설정하였고 기계식 농축기에서 배출되는 농축슬러지는 전처리 가용화시설로 유입된다 [Fig. 1]. Fig. 1은 유입수-최초침전지-MLE-최종침전지-여과기-방류의 순서이며 하단은 농축기, 소화조, 탈수기 등으로 구성되었다.

두 번째 단계로 생물학적 2차처리시설에서 배출되는 잉여슬러지는 농축 후 전처리 가용화 시설에 유입시켜 잉여슬러지의 COD와 VSS의 성상 변화를 조사하였다. 전처리 가용화시설에서 고형성 COD의 가용화를 분석하기 위하여 혐기성소화모델에서 분해(disintegration)와 가수분해(hydrolysis) 모델을 적용하였다.

세 번째로 전처리 가용화시설에서 유출되는 가용화 잉여슬러지의 혐기성 소화과정을 모델링하여 슬러지 감량율과 세부 COD 성상변화를 분석하였다.

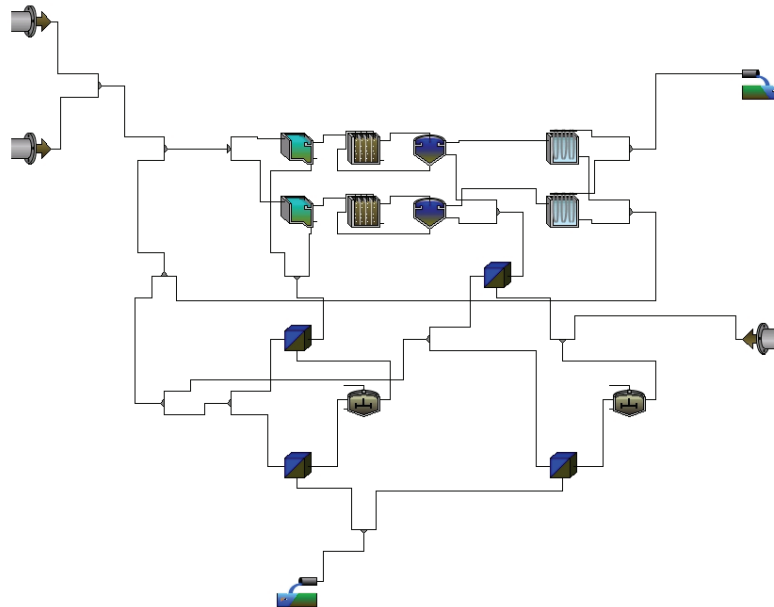


Fig. 1. Whole process modeling of wastewater treatment plant.

혐기성 소화공정 모델은 분해(disintegration), 가수분해(hydrolysis), 산발효(acidification), 아세트화(Acetogenesis), 메탄화(methanogenesis)을 적용하였다 [Fig. 2]. 혐기성소화공정에서의 휘발성슬러지 감량에 따른 COD 정상변화를 조사하였다.

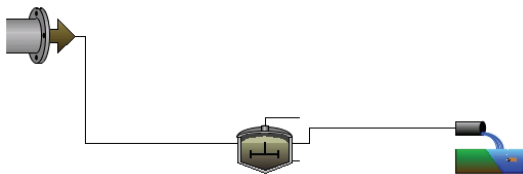


Fig. 2. Anaerobic digestion process modeling.

생물학적 2차처리시설에서 유출되는 잉여슬러지량은 734.6m³/일이며 농축기를 거쳐 전처리 가용화 시설로 유입되는 농축 잉여슬러지량은 151.9m³/일로 나타났다. 농축 잉여슬러지의 세부성상은 [Table 1]과 같다. Table 1의 자료는 국내A하수처리장의 연평균치이다. 농축 잉여슬러지의 VSS/TSS 비율은 75.2%이고 VSS(volatil suspended solids)를 나타내는 Total COD는 44,539 mg/L이며 이중 고형성 COD는 44,497 mg/L, 용존성 COD는 42 mg/L이다.

가용화 시설에서 유출되는 혐기성소화조 체류시간

은 20일로 설정하였고 중온(35℃) 단단 혐기성소화공정을 사용하였다. 혐기성소화공정을 시뮬레이션하기 위한 Mantisad 모델 계수는 GPS-X Default 수치를 적용하였다. Mantisad 모델은 혐기성소화공정의 반응과정인 고형물 분해 (disintegration), 가수분해 (Hydrolysis) 그리고 혐기성 소화균의 성장에 관한 kinetic parameters를 가지며 [Table 2]에서 볼 수 있다.

전처리 가용화 시설에서 잉여슬러지 가용화율은 고형성 COD가 용해성 COD로 전환되는 것을 의미하며 식 (1)로 표시할 수 있다. 전처리시설에서 잉여슬러지 가용화율 5%, 10%, 20%, 30%, 그리고 35%에서 잉여슬러지 정상변화와 혐기성 소화효율을 조사하였다.

$$Solubilization\ Rate = \frac{Soluble_s - Soluble_{so}}{Total_o - Soluble_{so}} \times 100\% \quad (1)$$

- 여기서, Solubilization Rate : 가용화율 (%)
- Total_o: 유입 Total COD (mg/L)
- Soluble_{so} : 유입 용존성 COD (mg/L)
- Soluble_s : 유출 용존성 COD (mg/L)

Table 1. Quality of Waste Activated Sludge

Division	Unit	Concentration
soluble inert organic material (Si)	mgCOD/L	38.8
readily biodegradable substrate (Ss)	mgCOD/L	3.0
volatile fatty acids (Sa)	mgCOD/L	0.0
particulate inert organic material (Xi)	mgCOD/L	7,193.9
slowly biodegradable substrate (Xs)	mgCOD/L	554.8
active heterotrophic biomass (Xh)	mgCOD/L	23,558.9
active autotrophic biomass (Xa)	mgCOD/L	3,947.1
unbiodegradable particulates from cell decay (Xu)	mgCOD/L	9,242.3
Total COD	mgCOD/L	44,538.8
biodegradable COD	mgCOD/L	28,063.8
non-biodegradable COD	mgCOD/L	16,475.0
XCOD	mgCOD/L	44,497.1
SCOD	mgCOD/L	41.7
BOD	mgO ₂ /L	18,522.1
XBOD	mgO ₂ /L	18,520.2
SBOD	mgO ₂ /L	1.9
TSS	mg/L	40,000.0
VSS	mg/L	30,065.6

Table 2. Mantisad Kinetic Model Coefficients

Division	Model coefficient	Unit	Value
Disintegration	rate of disintegration	day ⁻¹	0.5
Hydrolysis	hydrolysis rate of readily biodegradable particulate material	day ⁻¹	10.0
	hydrolysis rate of readily biodegradable soluble material	day ⁻¹	10.0
Growth Kinetics	readily biodegradable biomass growth rate	day ⁻¹	30.0
	half sat. for readily biodegradable material uptake	mgCOD/L	500.0
	slowly biodegradable biomass growth rate	day ⁻¹	6.0
	half sat. for slowly biodegradable material uptake	mgCOD/L	400.0
	acetate degraders growth rate	day ⁻¹	8.0
	half sat. for acetate uptake	mgCOD/L	150
	hydrogen degraders growth rate	day ⁻¹	35.0
	half sat. for hydrogen uptake	mgCOD/L	0.007
	biomass decay rate	day ⁻¹	0.02

3. 결과 및 고찰

3.1. 잉여슬러지 성상 분석

하수처리장에서 배출되는 잉여슬러지 감량율을 증가시키기 위해 사용된 전처리 가용화시설에서, COD 가용화율에 따른 COD 성상변화를 살펴보았

다. [Table 1]에 나타난 바와 같이 농축 잉여슬러지 TCOD는 44,539 mg/L이며 생분해성 COD (Ss+Xs) 농도는 558 mg/L로 총 COD의 1.3%이나 미생물에 의한 COD(Xh+Xa)는 27,506 mg/L로 61.8%를 차지한다. 미생물의 가용화에서 고려해야 할 부분은 가용화된 미생물의 92%는 용존성 생분해성 COD로

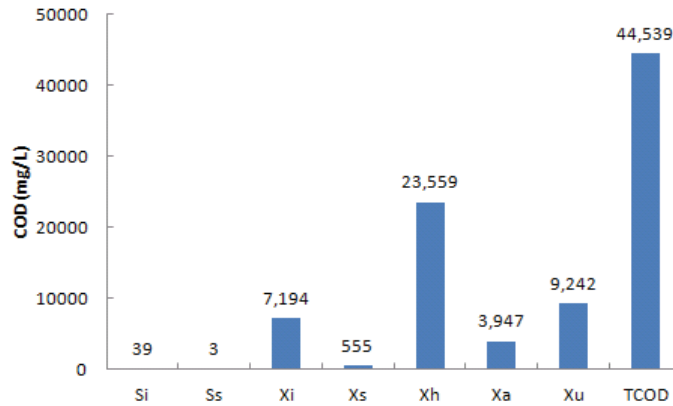


Fig. 3. Quality of thickened WAS COD.

(Si: soluble inert COD, Ss: readily biodeg. COD, Xi: particulate inert COD, Xs: slowly biodeg. COD, Xh: active heterotrophs, Xa: active autotrophs, Xu: unbiodeg. particulates from cell decay)

전환되나, 대략 8% 정도는 세포쇄설물로서 고행성 난분해성 COD로 남는다. 농축 잉여슬러지에 포함되어 있는 난분해성 COD(Si+Xi+Xu)는 28,064 mg/L로 총 COD의 37.0%이다 [Fig. 3].

농축 잉여슬러지의 성상을 조금 더 분석하면 고행성 생분해성 COD(Xs)는 555 mg/L이며 2차처리 시설인 MLE공정에서 생성된 종속영양미생물(heterotrophs)과 독립영양미생물(autotrophs)에 의한 COD(Xh+Xa)는 27,506 mg/L이다. 고행성 난분해성 COD(Xi)는 7,194 mg/L이며 2차처리 시설에서 사멸로부터 생성된 세포쇄설물에 의한 COD(Xu)는 9,242 mg/L로 산출된다. 농축 잉여슬러지에 포함되어 있는 용존성 생분해성 COD(Ss)는 모델링 결과 3.0 mg/L로 나타나고 있으며 용존성 난분해성 COD(Si)는 38.8 mg/L이다. 실제 하수처리장에서 채취된 농축잉여슬러지의 세부성상은 관로 운송과 저류조에서의 성상변화에 의해 모델링 결과와의 차이가 있을 수 있으나 본 연구에서는 모델링 결과 수치를 토대로 분석하였다.

3.2. 가용화율이 잉여슬러지 성상에 미치는 영향

전처리 가용화시설에서 배출되는 잉여슬러지 COD 세부성상변화를 살펴보면 가용화율 (5%, 10%, 20%, 30%, 35%)의 증가에 따라 COD의 변화를 보여준다 [Fig. 4]. 농축 잉여슬러지가 가용화 되면 고행성

생분해성 COD(Xs)는 가용화 정도에 따라 용존성 생분해성 COD로 전환되며, 미생물 역시 가용화 정도에 따라 세포막 파열에 의해 용존성 생분해성 COD(Ss)와 난분해성 고행성 COD (Xi)로 변환된다. 모델링 상에서 전처리 가용화시설에서 유출되는 미생물은 고행성 생분해성 COD(Xi), 고행성 난분해성 COD(Xs), 용존성 생분해성 COD(Ss)로 전환된다. 따라서 가용화된 고행성 생분해성 COD는 가용화율이 증가함에 따라 점차적인 감소를 보이고 있으며 이로 인한 용존성 생분해성 COD(Ss)가 증가하고, 또한 고행성 난분해성 COD(Xi)가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다 [Fig. 4].

잉여슬러지에 포함되어 있는 미생물은 고행성 생분해성 COD(Xs)와 고행성 난분해성 COD(Xi)의 혼합체이다. 미생물 가용화에 의해 발생하는 세포분쇄물은 고행성 난분해성 COD(Xi)를 높이는 원인이 된다. 잉여슬러지에 상대적으로 많은 미생물 세포막이 물리화학적 방법에 의해 파괴됨으로써 혐기성 소화조로 유입되는 잉여슬러지의 용존성 생분해성 COD 농도의 증가는 혐기성소화공정 단계인 분해(disintegration)와 가수분해(hydrolysis) 속도를 증가시키는 요인으로 작용한다.

잉여슬러지를 가용화하기 위하여 물리적 전처리 시설을 적용할 때 생물학적 2차처리시설의 SRT가 상대적으로 길게 운영되면 잉여슬러지의 고행성 난분해성 COD의 함유율이 높고 상대적으로 고행성

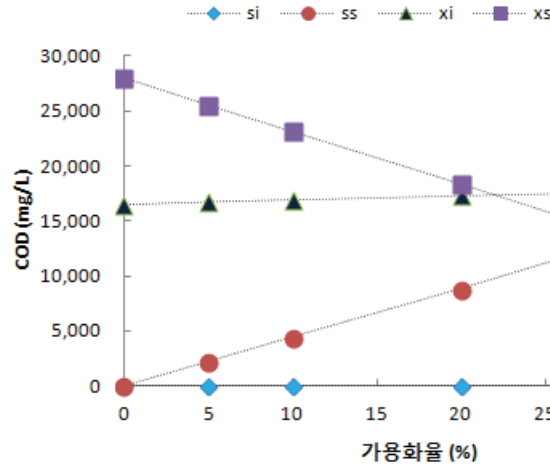


Fig. 4. COD quality change on solubilization rate of pretreatment facility.

생분해성 COD 농도가 낮게 된다. 고형성 생분해성 COD가 상대적으로 낮은 잉여슬러지의 경우 전처리 시설에 의한 가용화의 효과가 당초 예상보다 낮아질 수 있으므로 가용화하여 혐기성소화할 경우 잉여슬러지에 대한 COD 성상 조사가 요구된다.

3.3. 혐기성 소화효율 변화

전처리시설에서의 가용화율에 따른 혐기성 소화

조에서 COD 제거량과 제거율을 조사하였다 [Fig. 5]. 가용화하지 않은 잉여슬러지 유입시 혐기성소화조에서의 COD 제거량 1,664 kg/일, COD 제거율 25%를 기준으로 설정하였다. 가용화율 5%에서 COD 제거율은 2.1% 증가하였고, 가용화율이 증가함에 따라 비례하여 증가하고 있다. 잉여슬러지 가용화율 35%에서는 혐기성소화조에서의 COD 제거율이 15.1% 증가되었다 [Table 3].

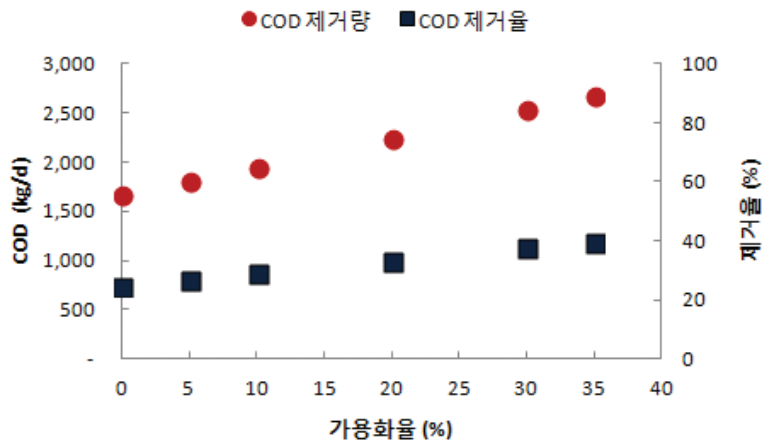


Fig. 5. COD removal effect on solubilization rate of WAS.

Table 3. COD Removal Effect on Solubilization Rate of Pretreatment Facility

Division	Unit	Solubilization Rate (%)						Note
		0	5	10	20	30	35	
COD Removal	kg/d	1,664	1,806	1,952	2,242	2,544	2,685	
COD R. Rate	%	24.6	26.7	28.9	33.1	37.6	39.7	

Table 4. Methane Gas Generation on Solubilization Rate of Pretreatment Facility

Division	Unit	Solubilization Rate (%)						Note
		0	5	10	20	30	35	
Calcul. (2,3)	m ³ /d	604	646	690	776	865	907	CH ₄ Standard
Modeling	m ³ /d	692	755	815	940	1,060	1,109	CH ₄ Standard

가용화에 의한 COD 제거율 향상 요인은 잉여슬러지를 초음파 또는 파쇄와 같은 인위적 방법에 의해 전처리하여줌으로써 혐기성소화공정에서 생화학적인 반응인 고형성 생분해성 COD의 분해(disintegration)와 가수분해(hydrolysis)에 소요되는 시간을 감소시킨 효과에 기인한다고 볼 수 있다. 가용화에 의해 잉여슬러지 고형성 생분해성 COD가 용존성 생분해성 COD로 변환되거나 혐기성소화조에서 변환되기 쉬운 상태로 전처리되었기 때문인 것으로 분석된다.

가용화에 의해 COD 제거량이 증가되면 메탄발효 공정에서의 가스발생량을 증대시킨다. 가용화율 35%에서 혐기성소화조에서의 메탄발생량(V_{CH₄})은 식 (2)에서 산출한다.³⁾

$$V_{CH_4} = (0.4)[(S_o - S)(Q)/(1000 g/kg) - 1.42 P_x] \quad (2)$$

- 여기서, V_{CH₄} : 메탄생산량 (m³/일)
- 0.4 : 35°C에서 생분해성 COD 1kg에 의해 생산되는 메탄발생량의 이론적 전환수치
- S_o : 유입 COD 농도 (mg/L)
- S : 유출 COD 농도 (mg/L)
- Q : 유입슬러지량 (m³/일)
- P_x : 세포생성량 (kd/일)

혐기성소화균의 생성량은 식 (3)에 의해 산출할 수 있으며 식 (3)의 미생물 생산량은 식 (2)의 메탄가스 생성량 산출식에 적용한다.³⁾

$$P_x = \frac{YQ(S_o - S) \times (1000 g/kg)^{-1}}{1 + k_d(SRT)} \quad (3)$$

- 여기서, Y : 세포생산물 (gVSS/g 생분해성 COD)
- k_d : 미생물 사멸율 (d⁻¹)
- SRT : 고형물 체류시간 (일)

식 (2)와 (3)을 이용하여 가용화율에 따른 메탄가스 생산량은 산출한 결과는 [Table 4]에서 볼 수 있다. 전처리시설을 사용하지 않을 경우 잉여슬러지 고형성 COD 제거율이 25%일 때 메탄가스 발생량은 604 m³/일로 산출되었으며 메탄가스 발생량 모델링 결과는 이보다 높은 692 m³/일 나타난다. 가용화율 35%에서 혐기성소화조의 메탄가스 발생량은 907 m³/일이며 모델링 결과는 1,109 m³/일로 산출된다.

잉여슬러지 가용화는 혐기성소화 단계에서 분해(disintegration) 및 가수분해(hydrolysis) 효과를 향상시켜 미생물과 같은 고형성 생분해성 COD를 용존성 생분해성 COD로 빠르게 전환시킴으로써 잉여슬러지 감량율과 메탄가스 발생량을 증가시켜준다. 전처리시설이 없을 경우에 비해 전처리 시설에서 잉여슬러지 고형성 COD를 35% 가용화하였을 때 COD 제거율은 25%에서 40%로 증가하고 메탄가스발생량은 607 m³/일에서 907 m³/일로 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

하수처리장에서 배출되는 잉여슬러지 감량율을 증가시키기 위해 사용된 전처리 가용화시설에서, COD 가용화율에 따른 COD 성장변화를 살펴보았다. 농축 잉여슬러지의 생분해성 COD 농도는 총 COD의 63%이며 이중 미생물에 의한 COD는 98%를 차지하였다. 미생물의 가용화에서 고려해야 할 부분은 가용화된 미생물의 92%는 용존성 생분해성 COD로 전환되나, 대략 8% 정도는 세포배설물로서 고형성 난분해성 COD로 남는다. 농축 잉여슬러지에 포함되어 있는 난분해성 COD는 총 COD의 37.0% 이었다.

전처리 가용화시설에서 배출되는 잉여슬러지 COD

세부성상변화를 살펴보면 가용화율 (5%, 10%, 20%, 30%, 35%)의 증가에 따라 COD의 변화를 보여주었다. 가용화된 고형성 생분해성 COD는 가용화율이 증가함에 따라 점차적인 감소를 보이고 있으며 이로 인한 용존성 생분해성 COD(Ss)가 증가하고, 또한 고형성 난분해성 COD(Xi)가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

잉여슬러지를 가용화하기 위하여 물리적 전처리 시설을 적용할 때 생물학적 2차처리시설의 SRT가 상대적으로 길게 운영되면 잉여슬러지의 고형성 난분해성 COD의 함유율이 높고 상대적으로 고형성 생분해성 COD 농도가 낮게 된다. 고형성 생분해성 COD가 상대적으로 낮은 잉여슬러지의 경우 전처리 시설에 의한 가용화의 효과와 혐기성소화효율이 당초 예상보다 낮아질 수 있으므로 가용화하여 혐기성소화할 경우 잉여슬러지에 대한 COD 성상 조사가 요구된다.

전처리시설에서의 가용화율에 따른 혐기성 소화조에서 COD 제거량과 제거율을 조사하였다. 가용화율 5%에서 COD 제거율은 2.1% 증가하였고, 가용화율 35%에서는 COD 제거율이 15.1% 증가되었다.

전처리시설이 없을 경우에 비해 전처리 시설에서 잉여슬러지 고형성 COD를 35% 가용화하였을 때 COD 제거율은 25%에서 40%로 증가하고 메탄가스 발생량은 607 m³/일에서 907 m³/일로 증가하는 것으로 나타났다.

References

- [하수도시설기준, 환경부 (2011)] Sewerage Facility Standards, Ministry of environment (2011).
- Activated Sludge Model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Report, No.1, IAWPRC, London, ISSN: 10100707X, Henze, M., Grady, C.P.L., Gujer, W., Marais, G. v. R and Matsuo, T, (1987).
- Metcalf & Eddy/Aecom Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery, McGraw-Hill, NY, USA, pp. 742-751(2014).
- [황은주, 이창근, 이병현, "하수처리장에서 ASM3와 ADM1의 통합모델의 적용," 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집, 일산, pp. F-102-F-103(2007).] EnuJu Hwang, ChangGeun Lee, ByungHun Lee "Application of the integrated model of ASM3 and ADM1 in Wastewater Treatment Plant," Korean Society of Water&Wastewater · Korean Society on Water Environment, Proceedings of 2007 KSWW & kSWE Fall Meeting, ilsan, pp. F-102-F-103(2007).
- [안세영, 김정주, "중량하수처리장 활성슬러지 공정 컴퓨터 모델링," 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, 부산, pp. 358-361(2004).] SeYeong An, JeongJoo Kim, "Computer Modeling of Activated Sludge Process in Jungnang Municipal Wastewater Treatment Plant," Korean Society of Environmental Engineers, Proceedings of 2004 KSEE Spring Meeting, Busan, pp. 358-361(2004).
- [백병천, 진현진, "컴퓨터 모델을 이용한 석유화학폐수 처리공정 설계 연구," 한국도시환경학회지, 8(1), 29-36 (2008).] Byeong-Cheon Paik · Hyun-Jin Jin, "A Study on The Design of Petrochemical Wastewater Treatment Process by Computer Simulation," Journal of Korea Society of Urban Environment Korea Society of Urban Environment, 8(1), 29-36(2008).
- [정창화 심유섭 김태형 박철휘, "GPS-X 시뮬레이션을 이용한 2단탈질 공정에서 외부탄소원 적용성 평가," 상하수도학회지, 18(1), 37-48(2004).] ChangHwa Jeong, YuSeob Sim, TaeHyeong Kim, CheolHwi Park "Evaluation of External Carbon Source on the 2 stage Denitrification Process by Simulation of GPS-X," Journal of Korea Society of Urban Environment Korean Society of Water&Wastewater, 18(1), 37-48(2004).
- "Hydromantis", <http://www.hydromantis.com/GPS-X.html>, (June, 2015)
- [정창화 심유섭 김태형 박철휘, "GPS-X 시뮬레이션을 이용한 2단탈질 공정에서 외부탄소원 적용성 평가," 상하수도학회지, 18(1), 37-48(2004).] ChangHwa Jeong, YuSeob Sim, TaeHyeong Kim, CheolHwi Park "Evaluation of External Carbon Source on the 2 stage Denitrification Process by Simulation of GPS-X," Journal of Korea Society of Urban Environment Korean Society of Water&Wastewater, 18(1), 37-48(2004).

10. [안세영, "하수처리장 에너지자립화사업에서 혐기성소화공정으로부터 용출되는 용존성질소($\text{NH}_3\text{-N}$)의 처리 필요성 연구", *유기물 자원화*, 22(3), 68-75(2014).] SeYong An, "The Study of the Need to Remove Soluble nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) Generated from Anaerobic digester Retrofitted in Municipal Wastewater Treatment Plants", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 22(3), 68-75(2014).