

ORIGINAL ARTICLE

가용화장치 및 가스정제 설비에 의한 슬러지 소화 효율 향상에 관한 연구

장성호 · 이병인 · 이용대 · 김한수^{1)*} · 조한진²⁾ · 류재용³⁾ · 김상우⁴⁾

부산대학교 바이오환경에너지학과, ¹⁾부산대학교 식품공학과, ²⁾서울디지털대학교, ³⁾한국원자력연구원 공업환경연구부, ⁴⁾국립수산과학원 동해수산연구소

A Study on the Improvement of Sludge Digestion Efficiency by Solubilization Equipment and Gas Purification System

Seong-Ho Jang, Pyong-In Yi, Yong-Dea Lee, Han-Soo Kim^{1)*}, Han-Jin Cho²⁾,
Jae-Young Ryu³⁾, Sang-Woo Kim⁴⁾

Department of Bioenvironmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

¹⁾*Department of Food Science & Technology, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea*

²⁾*Seoul Digital University, Seoul 121-040, Korea*

³⁾*Division for Industrial & Environmental Research, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongseup 508-185, Korea*

⁴⁾*East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangneung 210-861, Korea*

Abstract

The purpose of this study was to improve low digestibility in anaerobic digestion facility of the sewage treatment plant. To perform this research, sludge digestion and digestion gas purification facilities in sewage treatment plant was applied. In the result of this study, it was very effective for sludge reduction from the improvement of digestive efficiency. In addition, it was confirmed that high purity CH₄ (methane) was produced. This results can be useful as basic data to improve the low digestibility in anaerobic digestion processes.

Key words : Sludge digestion, Anaerobic, Solubilization equipment, Gas purification equipment

1. 서론

하수처리 과정에서 발생된 슬러지는 하·폐수에 포함되어 있는 입자상, 콜로이드 및 용존상의 오염물질 제거 시 발생하는 고히상의 2차 환경오염물질로써 (Choi 등, 2009), 하·폐수의 처리방법에 따라 생산량

과 성상이 달라지고 그 처리에 막대한 비용이 소요된다(Kim 과 Lee, 2008; Lee, 2011). 완전한 하·폐수 처리는 유입수의 오염물질을 제거하여 깨끗한 배출수를 만드는 것은 물론 처리 시 발생하는 슬러지를 안전하게 최종 처분하는 것까지 포함된다. 일반적으로 하·폐수 처리공정에서 생성되는 슬러지는 처리공정 및

Received 15 January, 2014; Revised 18 February, 2014;

Accepted 11 March, 2014

*Corresponding author : Han-Soo Kim, Department of Food Science & Technology, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea
Phone: +82-55-350-5351
E-mail: kimhs777@pusan.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.

운전방법에 따라 다르나 보통 액체 혹은 반고형 액체(semisolid liquid)로서 중량비로 0.25~12%의 고형물을 함유한다. 일반적인 슬러지 처리는 농축, 안정화, 개량, 탈수, 연소 및 산화 그리고 최종처분 등의 공정을 거치며, 슬러지 성상이나 조업조건 등에 따라서 여러 가지 공정으로 조합하여 슬러지 처리가 행해지고 있다(Jung, 2002).

하수슬러지는 처리방법에 따라 재활용, 육상매립, 소각, 해양투기 및 연료화로 구분 할 수 있으며, 97년 이전에는 관리의 편이성과 저렴한 비용 등의 이유로 발생된 슬러지의 70% 이상이 육상매립에 의존하였으나 '97년 폐기물관리법의 개정 이후 유기성오니의 직매립이 금지됨에 따라 해양투기에 의한 처리가 증가하였으나, 최근 런던협약에 의해 하수슬러지의 해양투기에 규제가 강화되어 2012년부터 하수슬러지 및 가축분뇨의 해양배출이 전면 금지되고 있을 뿐만 아니라 폐기물관리법에 의해 2013년부터 일정용량 이상의 하수처리장에서 발생하는 슬러지의 직매립이 금지되어 하수슬러지의 감량화 및 소화조 효율개선 방안이 주목받고 있다(Kim 과 Lee, 2008).

2011년 말을 기준으로 전국에 가동 중인 505개소의 하수처리장에서 연간 3,095,948 ton의 슬러지가 발생하고 있으며, 이 중 해양투기에 의한 처리가 1,010,322 ton/year (%)으로 가장 많으며, 다음으로 재활용 802,318 ton/year (%), 소각 687,868 ton/year (%) 그리고 육상매립 351,262 ton/year (%), 연료화 223,277 ton/year (%)로 나타났다(Metcalf & Eddy, Inc, 1993). 하수슬러지의 적정처리를 위해서는 발생원에서의 감량화가 경제적인 측면에서 중요한 인자로 작용하고 있으며, 슬러지 발생량의 원천적 감량을 위한 방안으로 일정규모 이상 하수처리시설을 대상으로 기존 소화조를 개량하여 효율을 높이거나 신규 소화조 설치를 통하여 슬러지 감량화를 추진하고 있으며, 소화조에 음식물 및 분뇨 등의 연계처리도 병행하여 소화가스 발생량을 증가시킴으로써 가스 발전 등을 통해 하수처리장에서 사용하는 에너지 소비량을 줄이는 방향으로 관련 연구가 진행되고 있다(Ministry of environment, 2012; Korea Environment Corporation, 2004, 2009; Woo, 2010).

이에 본 연구에서는 하수종말처리장에 설치되어

실제 운영되고 있는 기존 혐기성 소화시설에 가용화 및 가스정제 설비의 적용에 의한 혐기성 소화효율 개선과 소화가스 품질향상에 대하여 연구하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 하수처리장 내 혐기성 소화시설의 소화 효율을 개선하기 위하여 기존 혐기성 소화조의 가용화 설비 및 소화가스 정제설비의 설치 등을 통하여 소화 효율개선 및 생산된 소화가스의 활용방안에 대한 연구를 수행하여 실제 혐기성 소화 설비를 운전하는 현장에 적용할 수 있는 방안을 마련하였다.

2.1. 연구대상시설

본 연구의 대상시설은 하수처리장 내 혐기성 소화시설을 이용하였으며, 하수처리장에서 발생하는 생, 잉여슬러지와 분뇨를 혼합시켜 중력 농축 후 증온 혐기성 소화방법으로 운영되고 있으며, 소화조는 혐기성 2단 소화로서 드래프트 튜브 교반 형식의 소화가스 재순환 방식으로 교반을 하고, 증기를 주입하는 직접 가온방식으로 운영하고 있으며, 농축효율의 저하로 소화조 유입슬러지의 농도가 낮아 소화효율은 30% 정도로 설계치 50%에 미치지 못하고 있다. 혐기성 소화조의 주요시설 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Facilities digester specifications

Item	Facility
Form	Mesophilic anaerobic 2 Step digestion
Specifications	∅ 18.6 m × 11.0 mH × 2
Volume	11,956 m ³
Heating method	Direct heating(direct injection of water vapor in the tank)
Agitated manner	Gas stirring

본 연구 대상시설 하수처리장은 설계하수량을 일 평균 61,000 m³/day, 일최대 75,000 m³/day로 건설되었으나 처리 지역 내 인구의 증가, 하수도 보급율의 증가 등의 원인으로 2006년 현재 일평균 77,030 m³/day, 일 최대 96,948 m³/day의 발생 하수를 처리하고 있으며, 발생량은 Table 2에서 보는바와 같이 설계치의

Table 2. Status of sludge generation

	Item	Unit	Design criteria	Max.	Min.	
Raw sludge	Production amount	m ³ /d	131.3	753	357	
	Moisture	%	97.0	99.5	98.02	
	Solids	TS	%	3.0	4.70	1.98
		VS	%/TS	-	75.00	57.32
Excess sludge	Production amount	m ³ /d	587.0	1,718	971	
	Moisture	%	99.0	99.6	99.30	
	Solids	TS	%	1.0	4.30	0.70
		VS	%/TS	-	82.00	51.84

2~3배를 상회하고 있으며, 이에 따라 설계 슬러지 발생량을 기준으로 건설된 농축조의 용량이 작아 체류 시간이 적게 되어 농축효율 및 소화효율이 낮은 실정이다. 물론 현재 이 과정에서 발생하는 탈수cake는 전량 시멘트 원료로 재활용되고 있으나, 처리단가가 높으며, 2012년부터 해양투기가 금지되었으므로 발생 슬러지의 양을 원천 저감할 수 있는 소화조 효율 개선이 필요한 실정이다.

2.2. 연구방법

소화조 효율 개선을 위하여 기존의 혐기성소화조에 Fig. 1과 2와 같이 슬러지 가용화설비와 소화가스 정제설비를 설치하였으며, 슬러지 가용화설비는 농축 잉여슬러지 저류조의 슬러지가 슬러지 이송펌프에 의해 초음파 반응조로 이송되어 초음파 반응조가 만수

위에 이르면 반응조 내부에 설치된 초음파 진동자에 의해 초음파가 조사되며, 슬러지와 초음파의 접촉 기회를 증대하기 위해 교반기에 의해 균일 교반이 이루어지도록 하였다.

혐기성 소화공정을 거쳐 발생된 소화가스는 바이오가스로서 사용하는 방법과 정제(upgrading) 공정을 거쳐 고농도의 메탄으로서 사용할 수 있다. 따라서 소화조 효율 개선을 통해 증가 발생된 소화가스 대체에너지원으로 활용하고자 소화가스 공정을 적용하여 소화가스를 고농도의 메탄으로 생산, 차량연료로 이용이 가능하도록 하였다. 소화가스 정제설비는 소화가스 중 CO₂ 성분을 제거하여 CH₄의 순도를 높이는 방법이다. 가스압축기로 압축된 가스는 9 bar 조건으로 흡수탑 상부에서 공정수가 흘러내리면서 CO₂를 흡수되면서 CH₄이 정제된다. 이 때 순환수의 온도가 7℃

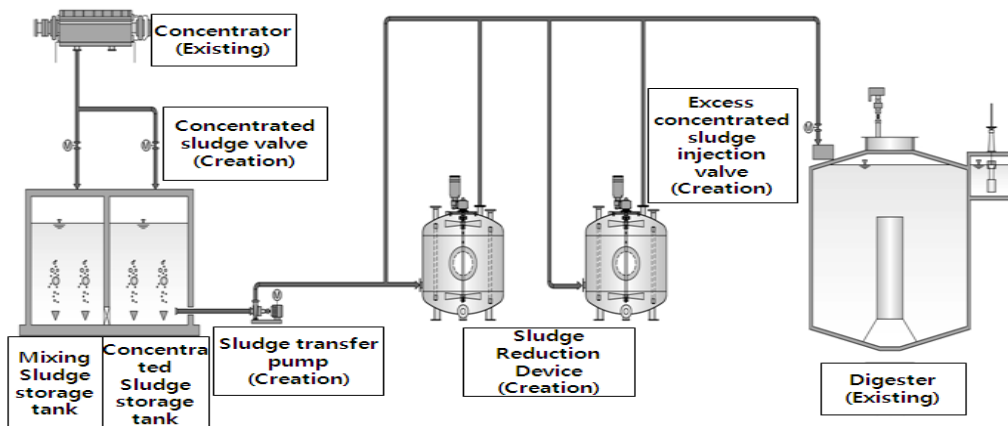


Fig. 1. Process plant sludge solubilization.

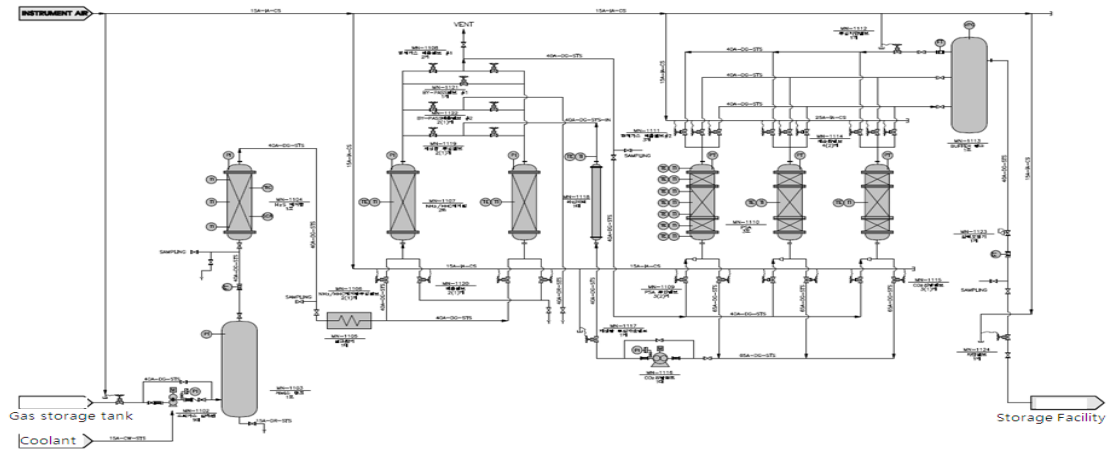


Fig. 2. Schematic digester gas purification equipment.

이하로 낮아야 정제효율이 높아지는데 순환수의 온도를 감소시키기 위해서 칠러냉각기를 이용한 냉각수가 열교환 되면서 냉각시킨다. CO₂를 흡수한 공정수는 일부 녹아있는 CH₄을 회수하기 위해서 flash vessel로 보내 4 bar로 감압시켜 CH₄를 분리한다.

화 설비는 물리적으로 세포벽을 세포벽을 파괴, 분해 시킴으로써 유기물질을 용출시켜 미생물이 성장에 이용하는 물질의 농도를 높이기 위한 것이다. 유기물질이 용출되었는지 확인하는 방법으로 SCODcr 실험방법이 있으며, 슬러지의 전·후단을 검사한 후 후단의 SCODcr가 증가하면 초음파 파쇄로 인해 유기물질이 용출되는 것을 알 수 있다. SCODcr 값이 소화조에서 높을수록 발생하는 가스량이 많고, 빠르게 분해되어 소화조에서 체류시간이 증가하므로 소화효율이 증가하게 된다. 1주일간 초음파 가용화 설비 전·후단의

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 가용화 설비 운전 결과

슬러지의 감량화를 목적으로 설치된 초음파 가용

Table 3. Results of SCODcr concentration for sludge solubilization efficiency analysis

Index	SCOD _{Cr} before solubilization	SCOD _{Cr} after solubilization	Increased SCOD _{Cr}	Increased SCOD _{Cr} (Average)	Remark		
1day	1th	1,310	2,170	860	Inflow 2.5 m ³ /hr (60 m ³ /d)		
	2th	930	1,990			1,060	
2day	1th	1,990	2,900	910		978	
	2th	1,360	3,110				1,750
3day	1th	1,390	2,660	1,270			Inflow 3.1 m ³ /hr (74.4 m ³ /d)
	2th	1,850	2,760				
4day	1th	2,070	2,920	850			
	2th	2,490	3,270		780		
5day	1th	1,850	3,340	1,490			
	2th	1,910	3,110		1,200		
6day	1th	2,240	3,200	960			
	2th	2,320	3,170		850		
7day	1th	1,860	2,800	940			
	2th	1,860	2,710		850		
	3th	2,060	2,750		690		
	4th	1,800	2,750		950		

Table 4. Results before and after the change in pH sludge solubilization

Index		pH before solubilization	pH after solubilization	pH change	Remarks
1day	1th	6.79	6.42	0.37	Inflow 2.5m ³ /hr (60m ³ /d)
	2th	6.61	6.40	0.21	
2day	1th	6.61	6.30	0.31	
	2th	6.54	6.39	0.15	
3day	1th	6.46	6.27	0.19	
	2th	6.40	6.30	0.1	
4day	1th	6.47	6.27	0.2	
	2th	6.44	6.35	0.09	
5day	1th	6.70	6.42	0.28	Inflow 3.1m ³ /hr (74.4m ³ /d)
	2th	6.56	6.33	0.23	
6day	1th	6.60	6.33	0.27	
	2th	6.51	6.37	0.14	
7day	1th	6.52	6.42	0.1	
	2th	6.59	6.36	0.23	
	3th	6.45	6.35	0.1	
	4th	6.51	6.32	0.19	

SCODcr과 pH 변화를 분석한 결과를 Table 3과 4에 나타내었다.

SCODcr의 증가폭은 일정하지 않지만 슬러지 유량 증가전의 농도가 유량 증가 후의 농도보다 높은 값을 보이고 있으며, 슬러지 가용 후가 가용 전보다 2배 이상 증가하는 것으로 보이며, 슬러지 유량 증가함에 따라 체류시간의 부족으로 일부 감소 하는 듯이 보이지만 유량 대비 부하량으로 계산하면 큰 변화는 없는 것으로 보였다. 가용 전 슬러지의 pH보다 가용 후 슬러지의 pH가 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 초음파 가용화 과정을 거치면서 세포내부의 유기물질이 용출되면서 pH를 감소시키는 것으로 보였다. 원심농축기로 농축된 슬러지로부터 초음파 가용화 후까지의 pH 변화를 보면, 농축된 잉여 슬러지는 pH 6.8~7.0 정도로 잉여슬러지의 pH와 거의 비슷하였다. 슬러지 저류조에 머물면서 슬러지가 일부 유기산화 되고 초음파 가용 전은 pH 6.5~6.7 정도, 초음파 가용 후는 pH 6.3~6.5 정도로 감소되는 과정을 보였다.

3.2. 슬러지 감량 효율 분석 결과

슬러지 감량 효율을 분석하기 위하여 초음파 가용화 설비 가동 전·후 의 TS (total solids) 와 VS (volatile solids)를 분석, 비교하여 슬러지 감량 성능을 실험하

였다. 슬러지 감량률은 유입 슬러지 중 유기물이 액화 및 가스화 하여 감소하는 비율을 나타내며, 실험 결과 슬러지 가용화 설비 가동 전 단계는 소화조에서 잉여 농축 슬러지의 분해가 힘들지만 감량률이 45% 이상 나타났으며, 슬러지 가용화 설비 가동 후 단계에서는 잉여농축 슬러지의 세포가 분해되었기 때문에 전 단계보다 감량 효율이 55% 정도로 높게 나왔다.

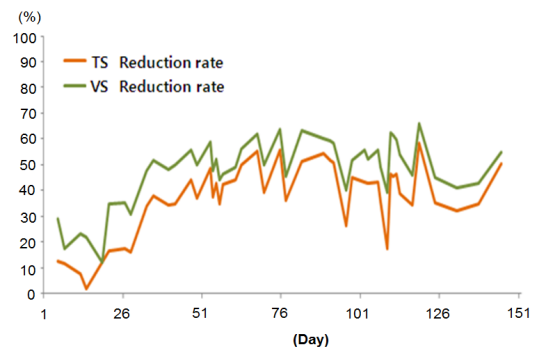


Fig. 3. Trends of sludge reduction rate.

3.3. 소화가스 발생 및 정제효율 분석

연구기간 중 O₂의 농도는 0.1~0.2% 정도 검출되었으며, CH₄의 농도는 40~50%, CO₂는 25~30% 정도

검출되었다. 스킴이 발생되고 안정화가 반복되면서 가스조성비는 점차 감소하였으며, O₂의 검출이 가장 큰 문제를 야기 하였는데, O₂ 농도가 혐기성 분해와 메탄농도 증가를 방해하기 때문이다. O₂ 검출의 여러 가지 원인 중 가장 큰 원인은 순환슬러지 순환 시 투입구에 음압이 생겨 공기가 같이 유입되고, 이 원인으로 혐기성 분해 저하, 가스조성 비율 중 메탄농도 감소 및 질소성분이 검출되는 문제가 발생되어 공기가 유입될 부분은 모두 밀폐 처리하고, 가스안전기로 공기가 유입되지 않도록 압력을 조절하여 운전하였으며, 슬러지 투입 및 인발도 규칙적으로 하여 안전기를 통하여 공기가 유입되지 않도록 조치하였다. H₂S는 운전 초반에는 낮은 농도가 검출되었는데, 이는 공기의 유입과 관계가 있는 것으로 보인다. 공기 유입을 차단하면서 산소와 반응이 적어지면서 H₂S의 농도가 증가하였고, 탈황설비를 거치더라도 발생하는 농도가 크게 때문에 개선공사 이전의 농도가 탈황제거 농도가 나오지 않는 것으로 보인다. 소화조 안정화 결과 가스 농도는 CH₄ 54%이상, CO₂ 32~33%이상, O₂ 농도 0%로 검출되었다. 현장에서 측정하는 기기의 오차 및 보정의 문제가 있지만 소화조 가스 조성 비율은 양호한 상태로, 앞서 소화조의 운전 조건만 유지한다면 가스 조성 비율은 큰 변화를 보이지 않고 유지될 것으로 판단된다. 연구 기간 중 소화가스발생량과 조성비는 Fig. 4 및 5와 같다.

소화가스 정제 설비의 목적은 발생된 소화가스를 정제하여 고순도의 CH₄으로 만들어 차량연료화 하여

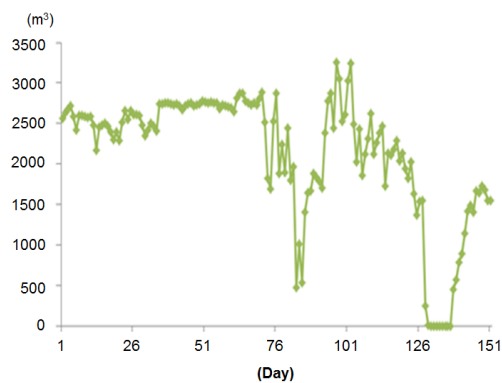


Fig. 4. Amounts of digestion gas production.

친환경에너지 사용 및 운영비 절감에 목적이 있다. 소화가스의 정제 전·후의 평균적인 농도와 상세 분석 결과는 Table 5 및 6과 같다. 운전결과 정제효율을 높이기 위해서 유입되는 가스의 성분이 CH₄ 55% 이상, CO₂ 30% 이상으로 높아야 하며, 정제설비의 압력 및 온도 유지가 중요하므로 소화조의 소화효율을 높여야 한다.

Table 5. Before and after of digester gas purification

Index	Before purification	After purification
CH ₄ Concentrations	55~65%	94~96%
CO ₂ Concentrations	30~35%	0%
Etc	Less than 1,000ppm	ND

Table 6. Digester gas and refining gas composition analysis

Index	CH ₄ (VOL%)	CO ₂ (VOL%)	H ₂ S (ppm)	O ₂ (VOL%)	NH ₃ (ppm)
Inlet (Digestion)	65.84	30.1	980	ND	0.022
Outlet (Purification)	95.56	0.2	ND	ND	0.008

4. 결론

본 연구에서는 기존의 하수종말처리시설에 슬러지 가용화 설비 및 소화가스 정제시설의 적용 등 하수슬러지 혐기성소화 공정 개선을 통한 하수슬러지 혐기

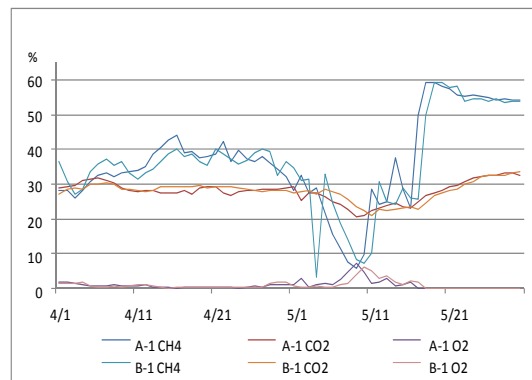


Fig. 5. Ratio of digester gas composition.

성소화 시설의 소화효율 개선에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 슬러지 가용화 전후의 SCOD의 증가폭은 일정하지 않지만 슬러지 유량 증가전의 농도가 유량 증가 후의 농도보다 높은 값을 보이고 있으며, 슬러지 가용 후가 가용 전보다 2배 이상 증가하는 것으로 보이며, 가용 전 슬러지의 pH보다 가용 후 슬러지의 pH가 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 초음파 가용화 과정을 거치면서 세포내부의 유기물질이 용출되면서 pH를 감소시키는 것으로 보였다.

2. 소화가스의 성분은 안정화된 경우 CH₄ 55%, CO₂ 30% 이상 유지하고 있으며 O₂는 0%로 나타났다. 발생한 소화가스를 정제할 때 유입되는 CH₄ 농도가 60% 이상인 경우 안정적인 정제농도를 보였으며, 65% 이상인 경우에는 97% 이상의 고순도 CH₄이 정제되는 결과를 얻었다. 55%에서도 95%정도의 정제농도가 검출되지만 안정적인 운전을 위해서는 소화조에서 발생하는 CH₄농도가 60% 이상 유지하는 것이 좋다는 결과를 얻었다.

3. 슬러지 가용화 설비 및 Gas정제설비를 적용할 경우 혐기성 소화 효율이 향상되어 슬러지 감량화에 효과적이고, 고순도 CH₄이 정제되는 결과를 확인할 수 있었으며, 향후 혐기성 소화공정의 효율 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Choi, I. S., Jung, H. S., Han, I. S., 2009, Study on sludge reduction by sludge solubilization and change of operation conditions of sewage treatment process, J. Korean Soc. Env. Eng., 31, 1113-1122.
- Jung, G. H., 2002, Study on the pretreatment conditions for the improvement of sludge dehydration efficiency : Focused on the ECP (exocellular polymers), MS. Dissertation, Kyung Hee University, Seoul, Korea.
- Kim, B. S., 2011, Evaluation of biogas yield on the solubilization at different pretreatment, MS. Dissertation, Pusan National University, Pusan, Korea.
- Kim, D. J., Kim, H. Y., 2010, Sludge solubilization by pretreatment and its effect on methane production and sludge reduction in anaerobic digestion, J. Korean Soc. Env. Eng., 14, 103-109.
- Kim, H. S., 2012, The study of pretreatment method for digestion efficiency improvement in sewage sludge, Seoul National University of Science and Technology, Ph.D. Dissertation, Seoul, Korea
- Kim, K. S., Lee, S. M., 2008, Management strategy for the prohibition of ocean dumping of sewage sludge in 2011, Seoul studies, 9, 3-21.
- Korea Environment Corporation, 2009, Waste to energy Report, vol.1, Seoul, Korea.
- Korea Environment Corporation, 2004, Efficient processing method of sewage sludge, Seoul, Korea.
- Lee, K. Y., 2011, Improvement of digestion tank efficiency and feasibility study on biomass gas use, Gyeonggi Research Institute 2011-2012, Suwon, Korea.
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F., 1991, Wastewater engineering : treatment, disposal, and reuse, 3rd ed., McGraw-Hill, USA, 813-834.
- Ministry of environment, 2012, Sewage Statistics 2011, Seoul, Korea.
- Nam, T. S., 2010, A study on phosphorus control in sludge solubilization system, MS. Dissertation, Young Nam University, Gyeongsan, Korea.
- Park, I. G., 2011, Ultrasonic and alkaline pretreatments of sewage sludge for enhancing anaerobic digestion, MS. Dissertation, Suwon University, Suwon, Korea.
- Park, W. J., Ahn, J. H., 2011, Effects of microwave pretreatment on mesophilic anaerobic digestion for mixture of primary and secondary sludges compared with thermal pretreatment, Env. Eng. Res., 16, 103-109.
- Woo, M. H., 2010, A study on the sludge reduction and biogas production through a two-phase anaerobic digestion process, MS. Dissertation, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea.