

하수슬러지 Biogas의 신재생에너지화 타당성 연구

강 호[†] · 이혜미 · 조상선 · 박선욱 · 정지현

충남대학교 환경공학과

A Feasibility Study for Renewable Energy from Sewage Sludge Biogas

Ho Kang[†] · Hye Mi Lee · Sang Sun Cho · Sun Uk Park · Ji Hyun Jeong

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University
(Received 10 February 2010, Revised 27 July 2010, Accepted 30 July 2010)

Abstract

This study was carried out not only to evaluate optimal operating condition to increase biogas production, but also to estimate feasibility of renewable energy from anaerobic digester of sewage sludge. Semi-continuous Fed and Mixed Reactors (SCFMRs) were operated in various condition to quantify the reactor variables. The result of SCFMR operation showed that the biogas productivity and total volatile solids (TVS) removal of total solids (TS) 4% reactor at hydraulic retention time (HRT) 20 days with Organic Loading Rate (OLR) of 1.45 kg/m³-d were 0.39 m³/m³-d and 26.7%, respectively which was two times higher than that of TS 2.5% reactor. Consequently the daily biogas production of 20,000 m³ would be possible from the total volume of 52,000 m³ of anaerobic digesters of the municipal wastewater treatment plant in D city. In feasibility study for the Biogas utilization, combined heat and power system (CHP) and CNG gasification were examined. In case of CHP, the withdrawal period of capital cost for gas-engine (GE) and micro gas-turbine (MGT) were 7.7 years and 9.1 years respectively. biogas utilization as Clean Natural Gas (CNG) shows lower capital cost and higher profit than that of CHP system. CNG gasification after biogas purification is likely the best alternative for Biogas utilization which have more economic potential than CHP system. The withdrawal period of capital cost appeared to be 2.3 years.

keywords : Anaerobic digestion, Biogas, Combined heat and power system (CHP), Renewable energy, Sewage sludge

1. 서론

하수처리과정에서 발생하는 하수슬러지는 2007년 말 기준으로 연간 2,744천톤이며 하수 1톤 처리 당 평균 0.045%가 슬러지로 발생되고 있다. 향후 하수슬러지 발생량은 하수처리장의 지속적인 건설과 고도처리 공정의 도입으로 더욱 증가할 것으로 예상되는 가운데, 함유율이 높고 유기물질을 다량 함유한 하수슬러지의 안정적이고 효과적인 처리방안의 마련이 시급한 실정이다. 현재 우리나라는 하수슬러지의 약 68.5%가 해양투기에 의해 처리되고 있으며 약 10.9%가 소각, 18.5%가 재활용, 그리고 2.1%가 매립에 의해 처리되고 있어 해양투기에 대한 의존도가 큰 현실이다 (환경부, 2007).

2008년 환경부가 발표한 “폐자원 및 바이오가스 에너지화”에서는 하수슬러지의 에너지화 대책으로 2012년까지 해양투기중인 하수슬러지의 20% (38만톤/년)를 에너지화 하고 2020년까지는 약 88% (168만톤/년)를 바이오가스화 또는 고형연료화 할 것을 제시하였다. 하수슬러지의 에너지화 추진을 위하여 하수슬러지를 건조시켜(수분10%이하) 화력

발전소의 연료로 사용할 수 있도록 허용하며, 하수슬러지 바이오가스를 자동차 연료 및 도시가스로 직접 이용할 수 있는 제도적 기반을 마련 중에 있다.

더욱이 런던협약에 의해 2012년 이후부터 해양투기가 전면 금지됨에 따라 날로 증가하는 하수슬러지 발생량을 처리하기 위한 대안의 모색이 시급하며 막대한 하수슬러지 처리비용을 줄이기 위해서는 무엇보다 하수슬러지의 원천 감량이 중요하다.

다양한 슬러지 처리방법 중 혐기성소화는 하수슬러지 내 유기물을 안정적으로 분해하고 유기물을 효율적으로 감량하여 폐기물 처리의 목적을 달성하는 동시에 신재생에너지인 Biogas를 생산하는 이점이 있어 전 세계적으로 경제성이 높은 대안으로 평가되고 있다. 또한 세계적인 에너지고갈 및 화석연료의 연소 시 발생하는 CO₂에 의한 지구온난화 문제가 범세계적으로 대두되면서 지구온난화물질 감축 및 신재생에너지 확보가 새롭게 조명되기 시작하였다. 혐기성 소화과정에서 생산되는 Biogas중 약 65%를 차지하는 CH₄는 이산화탄소보다 21배 강력한 온실가스로서 이를 연료원으로 이용할 경우 지구온난화 방지와 CDM(Clean Development Mechanism)사업에도 긍정적인 효과를 가져 올 수 있어 Biogas 발생증대를 위한 혐기성소화조의 효율 개선 및 최적 운전조건 도출이 요구되고 있는 상황이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
hokang@cnu.ac.kr

대부분 국내 하수처리장의 혐기성소화조로 유입되는 슬러지의 TS(%)는 농축조의 성능이 떨어져 2~2.5%의 수준 밖에 미치지 못하며 혐기성 소화 설계기준인 4%에 비해 매우 낮고 유기물부하율 또한 설계기준의 절반에도 못미치는 수준으로서, 이는 결국 소화조의 Hydraulic Retention Time이 짧아져 유기물의 제거효율이 낮은 원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 유입슬러지의 Total Solids(%)를 설계농도로 증가시켜 현재보다 월등한 Biogas 발생량과 유기물 제거율을 얻기 위한 최적 운전 조건을 도출함과 동시에 발생된 Biogas를 이용한 신재생에너지화의 경제성을 검토하여 Bioenergy 수익사업의 타당성을 검토할 수 있는 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연속식 혐기성소화조(SCFMR) 운전

실험에 사용된 대상시료는 D시의 하수처리장에서 발생하는 계통별 슬러지(중력농축 생슬러지, 중력농축 잉여슬러지, 기계농축 잉여슬러지, 분뇨)를 사용하였으며, 각 유입농

도와 소화조건에 따른 유기물제거율, Biogas 발생을 등의 분해양상을 평가하고 실제 플랜트와 비교하기 위하여 Lab Scale SCFMR(Semi-Continuous Fed and Mixed Reactor)을 운전하였다. 각 실험조건에 따른 주입시료의 종류 및 운전 조건을 Table 1에 정리하였다.

먼저 혐기성소화조로 유입되는 계통별 슬러지의 분해양상 평가를 위하여 중력농축한 생슬러지를 단독주입한 Reactor ①, 기계식으로 농축한 잉여슬러지를 단독주입한 Reactor ②, 생슬러지와 잉여슬러지를 1:1로 혼합 후 중력농축한 슬러지를 주입한 Reactor ③, 그리고 생슬러지와 분뇨를 1:1로 혼합후 중력농축한 슬러지를 주입한 Reactor ④를 운전하였으며, 주입슬러지 TS(%)의 설계농도에 따른 운전결과를 평가하기 위하여 현재 운영 TS(%)조건과 유사한 Reactor ⑤, 슬러지의 TS(%)를 설계농도 4%로 주입한 Reactor ⑥을 운전하였다. 또한 전처리에 의한 분해양상 평가를 위하여 생분해도가 낮은 기계농축 잉여슬러지에 오존과 알칼리(0.12 g O₃+NaOH 15 meq)로 전처리하여 주입한 Reactor ⑦을 35±1°C가 유지되는 항온실에 설치하여 중온소화(Mesophilic Digestion) 조건으로 운전하였다. 실험에

Table 1. Operating condition for SCFMR

Feeding conditions for SCFMR	UB* (%)	TS (%)	VS/TS (%)	OLR (kg VS/m ³ -day)	HRT (day)
① Gravity thickened primary sludge	65	2.08	71.15	0.93	15/20
② Mechanically thickened waste activated sludge	31	3.11	69.13	0.76	15/20
③ Gravity thickened the mixed sludge of primary and waste activated sludge (1:1)	46	2.50	48.81	0.81	15/20
④ Gravity thickened the mixed sludge of nightsoil and primary sludge (1:1)	50	1.51	60.93	0.89	15/20
⑤ Mixed sludge of gravity thickened primary sludge and mechanically thickened waste activated sludge (4:1)	-	2.86	58.74	0.88	15/20
⑥ Mixed sludge (TS 4%) of gravity thickened primary sludge and mechanically thickened waste activated sludge (1:2)	-	3.98	72.86	1.45	15/20
⑦ Mechanically thickened sludge with pretreatment	-	2.43	75.31	0.88	15/20

* UB(Ultimate Biodegradability)

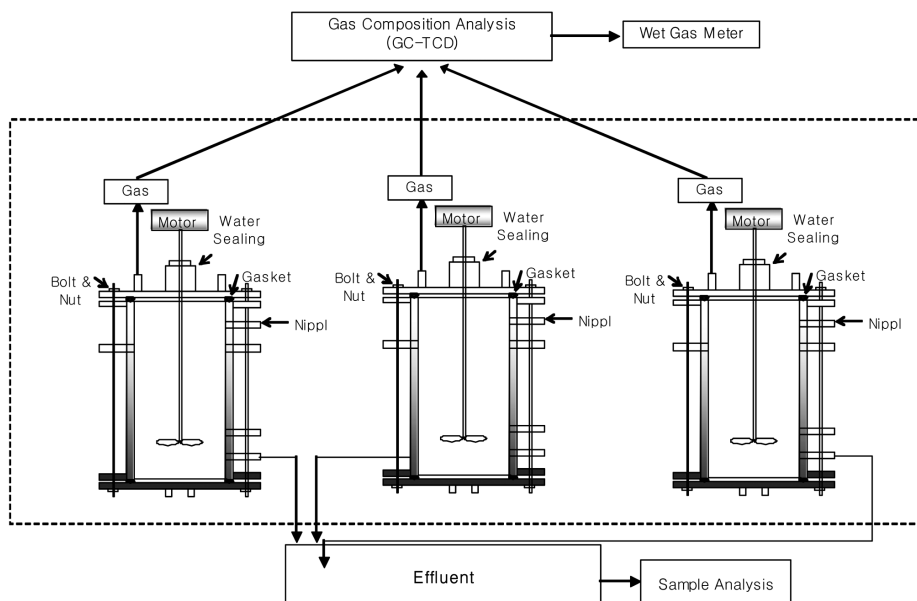


Fig. 1. Schematic diagram of anaerobic sludge digester.

사용된 Lab Scale SCFMR의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

SCFMR은 기계식 교반장치를 부착한 유효용적 20L의 아크릴제 원통형 반응조를 사용하였으며, HRT는 15일과 20일로 나누어 각각 총 90일간 운전하였다. 혼합슬러지를 4%로 농축하기 위하여 원심분리기를 이용하였으며, 균일한 TS(%) 농도를 유지하기 위하여 운전기간 동안 rpm과 원심분리시간을 일괄 적용하였다. HRT, OLR (Organic Loading Rate) 조건에 따른 Biogas 및 Methane 발생량의 평가에는 반응조의 단위부피당 일일 생성된 Biogas의 부피단위($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)를 사용하였다.

2.2. 신재생에너지화 경제성 평가

D시의 하수처리장에서 발생하는 Biogas를 이용하여 신재생에너지화할 경우의 타당성을 조사하기 위하여 경제성 분석을 실시하였으며, Biogas 발생량은 위의 SCFMR 운전결과에 따른 최적 운전조건과 최대 Biogas 발생량을 실 플랜트에 적용하여 산정하였다. Biogas 신재생에너지화 타당성 조사항목은 아래와 같으며, 적용 가능성을 평가하기 위해 Biogas의 조성을 분석하고 실 플랜트와 비교하였다.

- 1) Biogas를 이용한 열병합 발전에의 적용 가능성을 평가하기 위하여 가스엔진(GE, Gas Engine)과 마이크로가스터빈(MGT, Micro Gas-Turbine)을 이용한 투자비용 대 수익비용, 투자비용 회수기간 등을 산정하고 열병합발전시스템의 적용 타당성 및 경제성을 비교·분석하였다. 가스엔진과 마이크로가스터빈의 실질적인 적용가능성 평가를 위하여 각각 HAASE社(독일)의 가스엔진과 Capstone社(미국)의 마이크로가스터빈 사양을 적용하였다.
- 2) 하수슬러지 Biogas를 이용하여 차량용 수송연료(CNG)로 사용할 경우 적용가능성 및 경제성을 평가하기 위하여 현재 공사가 기준의 CNG(Biogas를 이용한 바이오메탄) 가격을 고려한 수익비용을 산정하고 이를 열병합 발전에 의한 신재생에너지화 방법과 비교평가 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SCFMR 운전결과

하수처리장의 계통별 슬러지와 설계농도(TS 4%) 혼합슬러지, 전처리한 잉여슬러지를 대상으로 하여 SCFMR을 운전한 결과는 아래와 같다.

3.1.1. pH 및 Alkalinity

pH와 Alkalinity는 혐기성 소화조 내에서 서로 연관성 있게 작용한다. 때문에 혐기성 소화공정의 안정성 여부를 판단할 수 있는 중요한 공정지표라고 할 수 있다. 하수처리장의 계통별 슬러지, 생슬러지와 잉여슬러지의 4:1 혼합슬러지, 4%로 농축한 혼합슬러지, 전처리한 농축잉여슬러지를 대상으로 운전한 SCFMR의 pH와 Alkalinity의 변화 양상을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 각 반응조 내 pH는 6.7~7.3의 범위에 분포하며, 전처리한 잉여슬러지를 투입한 SCFMR(Reactor ⑦)의 pH가 6.84~7.35로 비

교적 높았다. HRT가 20일에서 15일로 짧아짐에 따라 모든 반응조 pH의 증가추세가 관찰되었으며, 설계농도(TS 4%) 반응조의 경우에는 다소 감소하였다. 이는 높은 유기물부하로 인하여 생분해도가 높은 기질의 활발한 분해가 일어나, 메탄생성과정의 중간단계인 산형성 단계가 활발하게 일어나기 때문이다. 이는 이인주 등(2001)의 연구내용 중 생분해성 유기물부하량이 많을수록 반응조 내 유기휘발산의 농도가 높아져 pH가 감소하는 현상과 일치한다.

Alkalinity 또한 HRT의 감소에 따라 소폭 증가하여 pH와 같은 추세를 나타냄을 확인할 수 있다. 운전 전반에 걸쳐 반응조의 Alkalinity는 약 1,800 mg/L as CaCO_3 에서 높게는 2,700 mg/L as CaCO_3 정도를 유지하였다. 이는 혐기성 소화조의 최적 Alkalinity인 2,000~3,000 mg/L as CaCO_3 에 비해 조금 낮거나 비슷하여, 큰 영향을 미치지 않는 수준이다.

3.1.2. Biogas 조성

SCFMR에서 발생한 Biogas의 CH_4 와 CO_2 의 함량은 각각 평균 66%, 32%였으며, 1~2%의 Trace gas를 포함하였다.

3.1.3. Biogas 및 Methane 발생량

계통별 슬러지의 연속혐기성소화조 운전결과, HRT 20일에서 Reactor ①-중력농축 생슬러지의 Biogas 발생량이 0.22 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 로 가장 높았으며, Reactor ②-생슬러지/분뇨(0.19 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$), Reactor ③-중력농축 생/잉여슬러지(0.16 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$), Reactor ④-중력농축 잉여슬러지(0.09 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$) 순이었다. 전반적으로 생분해도가 높은 생슬러지 및 분뇨가 투입된 반응조 ①, ②의 Biogas 발생률이 높았으며, HRT가 20일에서 15일로 감소함에 따라 모든 반응조에서 Biogas 발생량이 HRT 20일에서 운전하였을 때 보다 25%가량 증가하였다. 계통별 슬러지의 Biogas 및 Methane 발생량을 Fig. 2의 (3), (4)에 나타내었다.

Biogas 발생량 증대를 위하여 설계농도(TS 4%)로 투입한 Reactor ⑥과 전처리한 잉여슬러지를 투입한 Reactor ⑦의 경우, Reactor ⑥의 Biogas 발생량이 HRT 20일에서 0.39 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ (OLR 1.45 kg VS/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}$)로 생슬러지(0.22 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$, OLR 0.93 kg VS/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}$)에 비해 월등하게 높았으며, Reactor ⑦ (전처리한 잉여슬러지)의 경우도 0.35 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ (OLR 0.88 kg VS/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}$)로 설계농도(4%) 반응조에 비해서는 0.04 $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 가 낮았으나, 매우 높은 발생량을 나타냈다. 이는 잉여슬러지를 오존+알칼리로 전처리하였을 때 미생물의 세포벽이 파괴되고, 조대 고형물의 세립화, 세포 내 생분해성 유기물의 용출 등이 일어나 혐기성미생물이 분해하기 쉬운 조건을 조성하기 때문이다.

실험결과와 고찰에 있어 본 연구에서는 반응조의 단위부피당 일일 생성된 Biogas의 부피단위($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)를 주로 사용하였으나, 아래에서는 타 문헌과의 다각적인 Biogas 및 Methane 발생량의 비교분석을 위하여 유기물 부하량에 따른 생성된 Biogas의 부피단위($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$)를 사용하였다. 장은성 등(2007)의 연구에 의하면 TS 농도에 의한

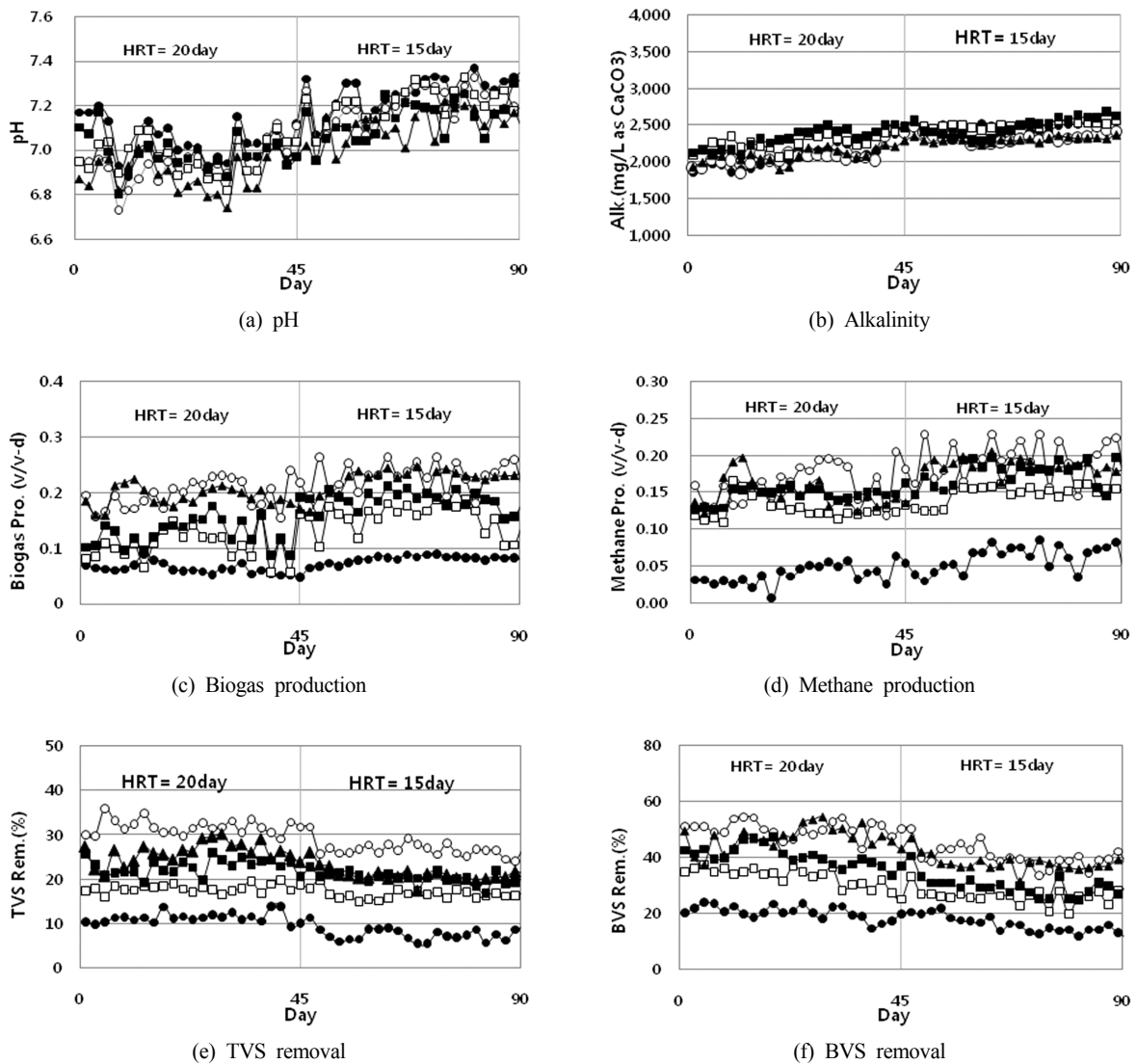


Fig. 2. Results of SCFMR operation for different sewage sludge (● : Thickened primary sludge (PS), ○ : Thickened waste activated sludge (WAS), □ : Thickened PS+WAS 1:1, ■ : Thickened PS+Nightsoil 1:1).

Biogas 발생량 고찰 결과, 음식물류폐기물의 혐기성소화 시 TS농도의 영향을 평가하였을 때 TS 4.5%에서 최대 Biogas 발생량(0.36 m³/kg VS add.-d)을 보고하고 있으며, 이는 본 연구의 설계농도(TS 4%) 반응조 결과인 0.32 m³/kg VS add.-d와 유사하였다.

Biogas 발생량과 마찬가지로 메탄발생량 역시 설계농도의 시료를 주입한 Reactor ⑥의 제거된 유기물 kg당 메탄 생성량이 0.621 m³ CH₄/kg VS-d로 가장 높았다. 이는 송영채 등(2003)의 하수슬러지를 이용한 중온 혐기성소화 결과와 비교할 때 유사한 유기물부하(평균 1.43 kg VS/m³·d)에서의 메탄발생량인 0.46 m³ CH₄/kg VS-d에 비해 월등히 높은 것을 알 수 있다.

TS 4%의 설계농도로 운전한 Reactor ⑥의 Biogas 발생량 (0.39 m³/m³·d)을 실제 D시의 하수처리 플랜트(혐기 소화조 총부피 = 52,000 m³)에 적용하여 볼 때, 혐기성소화조 유입슬러지 TS(%)를 설계농도로 운전할때 약 20,000 m³/day 이상의 Biogas 생산이 가능하다.

3.1.4. 유기물 제거효율

혐기조의 정확한 소화효율을 평가하기 위해 기질 중 생분해 가능한 유기물(BVS)을 기준으로 하여 유기물의 소화효율을 평가하였으며, 각 소화조건에서 발생하는 Biogas 발생량과 Methane 함량을 토대로 TVS 제거효율과 BVS 제거효율을 평가하였다.

계통별 슬러지의 SCFMR 운전결과, HRT 20일에서 Reactor ①-생슬러지의 TVS 제거효율이 31%로 가장 높았으며, Reactor ②-생슬러지/분뇨(23%), Reactor ③-중력농축 생/잉여슬러지(18%), Reactor ④-중력농축 잉여슬러지(11%) 순으로 나타나 생분해도가 높을수록 제거효율이 높았다. 상기 연구결과는 타 문헌에서 보고하고 있는 소화효율과 비교 시 유기물 제거효율이 다소 낮음을 알 수 있는데, 그 이유는 대상 시료의 생분해특성 외에도 제거효율 산정방식의 차이에 있다.

본 연구에서는 혐기성소화를 통해 생성된 Biogas의 발생량 및 조성을 분석하여 VS무게(g)로 환산한 다음 초기 VS무게(g)값과 비교하여 VS제거효율을 산정하나, 여러 타 문

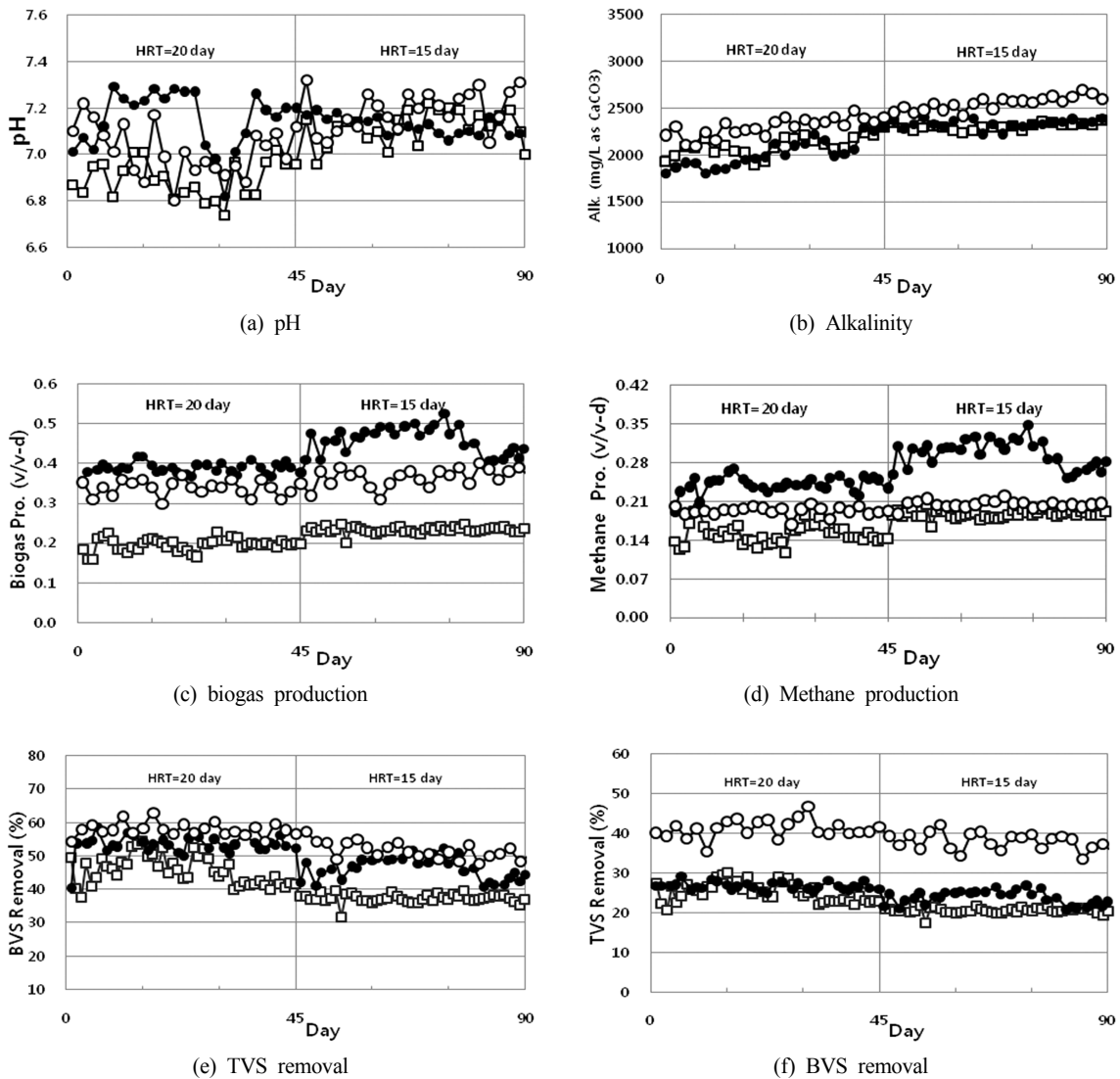


Fig. 3. Results of SCFMR operation for increasement of biogas production (● : 4% Thickened PS+WAS 1:2 (OLR 1.45kg/m³-day), ○ : Pretreated thickened WAS (OLR 0.85kg/m³-day), □ : Thickened PS+WAS 4:1 (OLR 0.88kg/m³-day)).

현에서는 혐기반응조 유입 및 유출시료의 COD 혹은 VS 농도를 기준으로 전체 반응조의 유기물 제거효율을 평가하기 때문이다. HRT에 따른 제거효율을 보면, HRT를 20일에서 15일로 감소시킴에 따라 유기물 제거효율은 전반적으로 감소하는 양상을 보였으며, 대표적으로 Reactor ①-생슬러지의 TVS 제거효율이 31%에서 25%로 약 6%가량 감소하였다. 계통별 슬러지의 TVS(Total Volatile Solids) 및 BVS(Biodegradable Volatile Solids) 제거효율을 Fig. 2의 (5), (6)에 나타내었다.

설계농도(TS 4%)로 주입한 Reactor ⑥의 경우 TVS 제거효율은 약 26%(HRT 20, OLR 1.45 kgVS/m³-day)로 운전 전반에 걸쳐 Reactor ⑤-생/잉여슬러지 4:1 혼합시료(25%)와 유사한 제거율을 나타냈다(Fig. 3). HRT가 20일에서 15일로 감소함에 따라 모든 반응조에서 TVS 제거효율이 약 4~8%가량 소폭 감소하였으며, BVS 제거효율도 비슷한 추세를 보였다. 이것은 유기물부하율의 증가(HRT의 감소)에 따

른 제거효율 감소의 전형적인 변화 양상을 보여주고 있다. 전처리한 기계농축 잉여슬러지를 주입한 Reactor ⑦의 경우, TVS 제거효율이 평균 41%로 가장 높았으며, 이는 전처리에 의하여 미생물의 세포벽이 파괴됨으로써 세포 내 생분해성 물질이 용출되어 혐기성 미생물이 분해하기 쉬운 기질조건을 조성하기 때문이다.

본 연구결과는 이준재(2003)의 초음파를 이용한 전처리(30분) 결과인 TVS 제거율 32%에 비해 월등한 전처리 효율을 보여주고 있으며, Lin 등(1997)의 NaOH (20~40 meq/L) 전처리에 의한 TVS 제거율인 36~45%와 유사하였다.

위의 Lab Scale SCFMR 운전결과를 종합해 보면, 설계농도(TS 4%)의 혼합슬러지를 주입하였을 때, Control에 비해 약 2배 증대하였으며, 혐기성소화조의 Biogas 발생량이 기질분해 측면에서는 생분해도가 낮은 기계농축 잉여슬러지를 전처리함으로써 최종 생분해도를 높이는 방법이 가장 효과적임을 알 수 있다(Table 2).

Table 2. Comparison of results from lab scale SCFMR and Daejeon municipal wastewater treatment plant

Parameter	Wastewater treatment plant in D city	SCFMR (Primary sludge)	Mixed sludge SCFMR (Primary : Thickened wasted activated = 4:1)	TS(4%) SCFMR (Primary : Thickened wasted activated = 1:2)	Thickened wasted activated sludge
HRT (day)	23	20	20	20	20
OLR (kg VS/m ³ · day)	0.8 ~ 0.9	0.9 ~ 1.0	0.8 ~ 0.92	1.4 ~ 1.5	0.80 ~ 0.90
pH	7.0 ~ 7.2	6.8 ~ 7.2	6.8~7.3	6.7 ~ 7.3	6.8 ~ 7.4
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	1,594 ~ 1,958	1,800 ~ 2,400	1,800 ~ 2,300	1,800 ~ 2,500	2,210
Biogas Pro. (m ³ /m ³ -d)	0.34	0.22	0.20	0.39	0.35
Methane Pro. (m ³ /m ³ -d)	0.22	0.16	0.14	0.26	0.20
TVS Removal (%)	30.8	25 ~ 35	25	27	41%
BVS Removal (%)	41 (VS based)	50	46	53	58

일반적으로 혐기성소화는 유기성폐기물을 혐기조건에서 생물학적으로 분해하여 감량화하는 동시에, 유용한 에너지원인 Biogas를 생산하는 것을 목적으로 한다. 하지만 제거 효율을 증진시키기 위해서는 낮은 유기물부하율과 긴 HRT를 필요로 하며 Biogas 생산량 증대를 위해서는 높은 유기물부하율과 짧은 HRT 조건이 유리하므로, 유기물 제거율과 Biogas 발생률은 서로 상반되는 운전조건을 가진다. 그러므로 이를 모두 만족시킬수 있는 적정 운전조건의 도출이 중요하다. 이에 따르면 설계농도(TS 4%)로 슬러지를 주입한 Reactor ⑥의 경우, Biogas 발생량을 약 2배가량 증대시키면서도 유기물 제거효율은 약 4% 감소하는 것에 그쳐 하수슬러지 감량화와 Biogas 신재생에너지화를 모두 충족시키기 위한 적정 운전조건에 부합하다고 판단된다.

3.2. 신재생에너지화 경제성 평가

실제 D시하수처리장의 혐기성소화조 유입슬러지 농도는

2 ~ 2.5% 수준이며 52,500 m³ 실규모의 소화조에서 평균 16,000 m³/day의 Biogas를 생산하고 있다. Lab Scale SCFMR 운전결과, 하수처리장 혐기성소화조에 주입되는 혼합슬러지를 설계농도(TS 4%)로 농축하여 유입슬러지로 하였을 때 Biogas 발생률은 평균 0.39 (m³/m³-d)로, 실제 플랜트에 적용할 경우 16,000 m³/day보다 25% 증가한 약 20,000 m³/day의 Biogas 생산이 가능하다. 이를 이용하여 열병합 분산발전시스템(가스엔진 및 마이크로가스터빈)을 가동할 경우와 정제하여 수송용 연료로 사용할 경우의 창출 가능한 경제적 수익과 산출 내용을 Table 3에 요약하였다.

본 연구의 경제성 평가에 적용한 가스엔진은 HASSE社(독일)의 모델 HET-GBC 1021이며, 전력 및 열 생산효율은 각각 38%, 44%이다. 마이크로 가스터빈은 Capston社(미국)의 모델 MGT C30 Biogas이며, 전력 및 열 생산효율은 각각 26%, 44%이다. 수송연료(CNG)로의 경제성 평가에는 정제시설을 거쳐 생산되는 바이오메탄가스(약 96 ~ 99%)

Table 3. Benefit of combined heat and power system and CNG gasification

Parameter	Unit	GE	MGT	CNG
Biogas productivity	m ³ /day	20,000	20,000	20,000
Methane productivity	%	66	66	66
Energy production	kW/m ³	1,021 kW/420 m ³	30 kW/20 m ³	-
Heating value	kcal/Nm ³	8,560	8,560	-
Energy utilization (electricity+heat)	%	82 (electricity 38, heat 44)	70 (electricity 26, heat 44)	-
Generator operation	%	70	70	-
Electricity production	kWh/year	12,421,670	7,664,693	-
Heat production	kWh/year	13,772,116	12,978,881	-
Gas production	m ³ /day	-	-	13,608
Electricity/Gas price	won/kWh	72.73	72.73	600 (won/m ³)
Heat consumption for process	kWh/year	5,095,683	4,802,186	-
Power consumption for process	kWh/year	7,949,869	4,905,404	-
Total earned (thousand won /year)	Thousand won /year	956,271	795,374	2,350,104
Investment cost	Thousand won	7,344,500	7,250,000	5,500,000
Payback period	year	7.7	9.1	2.3

생산량을 산정한 다음, 바이오메탄의 부피당 판매가격(600 원/m³)을 대입하여 총 기대효과를 도출하였다.

3.2.1. 가스엔진을 이용한 열병합 발전

가스엔진을 이용한 열병합고효율 분산발전의 경우 총 전력생산량은 34,032 kWh/day이며, 전력에 의한 기대효과는 연간 903,428 천원, 열 생산에 의한 기대효과는 연간 1,001,646 천원으로 나타났다. 자체 소비열과 소비전력을 고려할 경우 연간 기대되는 순수익은 956,271 천원/년이며 열병합발전이 소요되는 시설 구입 및 설치 투자비용은 총 7,344,500 천원으로 약 7.7년 후에는 투자비용의 회수가 가능하며 연 956,271 천원의 순수익이 발생한다. 또한 강력한 지구온난화 물질인 CH₄를 방출하는 대신 CO₂의 형태로서 배출함으로써 온난화가스 발생 저감에 의한 추가적인 이익 창출도 가능하리라 판단한다.

3.2.2. 마이크로가스터빈을 이용한 열병합 발전

반면, 마이크로가스터빈을 이용한 열병합고효율 분산발전의 경우 총 전력생산량은 20,999 kWh/day이며, 자체 소비열과 소비전력을 고려할 경우 연간 기대되는 순수익은 795,374 천원/년이다. 열병합발전이 소요되는 시설 구입 및 설치 투자비용은 총 7,250,000 천원으로 약 9.1년 후에는 투자비용 회수가 가능하다.

3.2.3. 차량용 수송연료(CNG)로의 이용

하수슬러지의 혐기성소화로부터 발생하는 Biogas를 정제하여 차량용 수송연료로 이용할 경우, 열병합발전에 비해 적은 시설투자비용이 요구되며 정제시설을 거칠 경우 응축과정을 통해 수송연료로서 바로 이용이 가능하다. 실험을 통해 도출한 Biogas 생산량 20,000 m³/day를 기준으로 바이오메탄가스(96~99%)의 일일 생산량을 산정한 결과 약 12,804 m³/day의 바이오메탄 생산이 가능하며 CNG(바이오메탄가스) 판매가(600원/m³)를 고려한 연간 기대수익은 2,350,104 천원/년이다. 이는 열병합발전에 의한 신재생에너지화보다 연간 기대수익이 약 2.5~3배 높았으며, 투자비용 대 수익비용을 고려한 투자비용 회수기간은 2.3년으로 열병합발전(7.7년, 9.1년)에 비해 매우 짧다. 하수슬러지 Biogas를 이용한 신재생에너지화 경제성은 수송연료(CNG) 에너지화 방안이 가장 높았으며, 유기성폐기물의 혐기성소화로부터 생성된 Biogas는 경유연료에 비해 매연이 거의 없고 배출가스 70%, 질소산화물의 63% 및 소음 50%를 저감할 수 있는 친환경 청정연료이므로, 경제적·환경적으로도 그 가치가 큰 것으로 나타났다.

4. 결 론

- 1) 설계농도(TS 4%)의 혼합슬러지를 주입한 혐기성 소화조의 Biogas 발생량은 0.39 m³/m³-d로서 Control 반응조보다 약 두 배가 증대하였다.
- 2) 전처리한 잉여슬러지를 주입한 혐기성 소화조의 유기물 제거효율이 41%로 가장 높았으며, 유기물 제거효율을 증진시키기 위해서는 전처리에 의한 생분해도 증가가 가장 효과적이었다.
- 3) 실험실 규모 SCFMR 운전결과를 D시의 실 플랜트(소화조 총부피 52,000 m³)에 적용할 경우 발생 가능한 Biogas 양은 20,000 m³/day 이상에 달하며, 가스엔진과 마이크로가스터빈을 이용하여 열병합 분산발전 할 경우의 경제성을 분석해본 결과, 가스엔진과 마이크로가스터빈의 연간 기대수익은 각각 956,271 천원, 795,374 천원이며 투자비용 회수기간은 각각 7.7년, 9.1년으로 가스엔진이 1.4년 짧았다. Biogas를 이용하여 CNG를 생산할 경우 창출 가능한 연간 기대수익은 2,350,104 천원/년으로 투자비용 회수기간은 2.3년으로 산정되었으며, 경제적·환경적 측면에서 부가가치가 큰 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 대전환경기술개발센터의 2008년도 연구개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 송영채, 권상조, 우정희(2003). 하수슬러지의 단상 고온 및 중온 혐기성소화와 중온-고온 공상 혐기성소화공정의 성능비교. *대한환경공학회지*, **25**(6), pp. 739-746.
- 이인주, 공성호, 김승, 김용수(2001). 화학적 개량에 의한 하수슬러지의 탈수성과 결합수 함량에 대한 연구. *Bulletin of Environmental Sciences*, **22**, pp. 8.
- 이준재(2003). 하수슬러지의 혐기성소화 증진을 위한 초음파전처리. 석사학위논문, 충남대학교.
- 장은성, 유승훈, 배재근(2007). 음식물류 폐기물 혐기성 소화에서 TS농도 영향. *유기물자원화*, **15**(2), pp. 118-127.
- 환경부(2007). 하수도통계.
- Lin, J. G., Chang, C. N., and Chang, S. C. (1997). Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge solubilization. *Bioresource Technology*, **63**, pp. 85-90.