

## 개량형 단상 혐기성 소화공정에서의 혼합슬러지를 이용한 바이오가스 생산효율 증대방안 연구

정종철<sup>1\*</sup>, 정진도<sup>2</sup>, 김산<sup>1</sup>

<sup>1</sup>호서대학교 기후변화융합기술학과, <sup>2</sup>호서대학교 환경공학과

### A Study on Increasing the Efficiency of Biogas Production using Mixed Sludge in an Improved Single-Phase Anaerobic Digestion Process

Jong-Cheal Jung<sup>1\*</sup>, Jin-Do Chung<sup>2</sup>, San Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Fusion Technology for Climate Change, Hoseo University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Hoseo University

**요약** 본 연구는 유기성폐기물의 혼합슬러지를 개량형 단상 혐기성 소화공정에서 각각의 혼합비율에 따른 바이오가스 생산효율 향상에 관한 연구로, 연구에 사용된 유기성폐기물의 종류는 하수 슬러지, 음폐수 및 가축분뇨이다. BMP test를 통해 잠재적 메탄발생량을 확인한 결과 단일시료의 경우 가축분뇨가 1.55m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS로 가장 높게 평가되었고, 혼합시료(생슬러지, 음폐수, 가축분뇨)의 경우는 각각의 비율을 50% : 30% : 20%로 하였을 때 0.43m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS로 가장 높게 나타났다. 반면 실증플랜트에서 혼합슬러지 최적 혼합비율은 생슬러지(68.5) : 음폐수(18.0) : 가축분뇨(13.5)로 나타나 BMP test와 다소 상이한 결과를 보였다. 이는 혼합슬러지 성상변화와 체류시간 등 소화조 운전조건 변화에 기인한 결과로 판단되며, 단상 혐기성 소화조의 바이오가스 생산량이 2,514m<sup>3</sup>/d, 메탄함량 62.8%로 조사되어 설계능력인 바이오가스 생산량 2,319m<sup>3</sup>/d 기준으로 볼 때 최대성능을 발휘하는 것으로 평가되었다. 아울러 본 연구를 통해 혐기성 소화방식에 있어 소화조의 안정적인 운영과 소화효율 측면에서 고효율 방식인 2상 소화방식을 도입하는 것이 유리하나 기존의 단상 소화방식에 있어서도 소화효율 개선 및 성능향상이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

**Abstract** In this study, we attempted to improve the biogas production efficiency by varying the mixing ratio of the mixed sludge of organic wastes in the improved single-phase anaerobic digestion process. The types of organic waste used in this study were raw sewage sludge, food wastewater leachate and livestock excretions. The biomethane potential was determined through the BMP test. The results showed that the biomethane potential of the livestock excretions was the highest at 1.55 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, and that the highest value of the composite sample, containing primary sludge, food waste leachate and livestock excretions at proportions of 50%, 30% and 20% respectively) was 0.43 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS. On the other hand, the optimal mixture ratio of composite sludge in the demonstration plant was 68.5 (raw sludge) : 18.0 (food waste leachate) : 13.5 (livestock excretions), which was a somewhat different result from that obtained in the BMP test. This difference was attributed to the changes in the composite sludge properties and digester operating conditions, such as the retention time. The amount of biogas produced in the single-phase anaerobic digestion process was 2,514m<sup>3</sup>/d with a methane content of 62.8%. Considering the value of 2,319m<sup>3</sup>/d of biogas produced as its design capacity, it was considered that this process demonstrated the maximum capacity. Also, through this study, it was shown that, in the case of the anaerobic digestion process, the two-phase digestion process is better in terms of its stable tank operation and high efficiency, whereas the existing single-phase digestion process allows for the improvement of the digestion efficiency and performance.

**Keywords** : Biogas production, Food wastewater, BMP test, Organic wastes, Single-Phase Anaerobic Digestion

\*Corresponding Author : Jong-Cheal Jung(Hoseo University)

Tel: +82-10-9411-2204 email: jjch6374@naver.com

Received March 24, 2016

Revised (1st May 11, 2016, 2nd May 18, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

국내 생활폐기물 발생량은 지속적인 증가 추세에 있으나 폐기물처리 제반여건이 여의치 못한 실정이다. 이에 국가 폐기물 관리정책에 있어서도 폐기물 발생 저감 방안 확보와 발생폐기물의 재생 및 자원으로 전환하는 방식을 적극적으로 추진하고 있으며 그 일환으로 하수처리시설의 슬러지 발생 저감 및 재활용시설, 음식물 폐기물자원화시설 건립 등 다각적인 폐기물 자원화시설 확충 방안을 모색하고 있다.

또한 폐기물 자원화 뿐 만 아니라 자원화를 통한 신재생에너지 창출방안도 더불어 추진하고 있으며, 그 중 하수슬러지를 이용한 신재생에너지 생산방안은 기존 하수처리공정에 혐기성 소화방식을 도입하여 바이오가스를 생산하고, 생산된 바이오 가스는 전력으로 에너지화 함으로써 처리공정상의 폐 슬러지를 이용한 에너지 생산과 발생폐기물의 저감 효과를 동시에 거둘 수 있는 사업으로 대두되고 있다.

본 연구에서는 기존의 하수처리시설에 설치되어 운영 중인 혐기성 소화시설을 개량한 바이오가스 생산 및 에너지화 시설인 실증플랜트에서 바이오가스 생산효율 분석을 통해 최적 운전인자 및 영향인자와의 상관관계를 파악하여 바이오가스 생산효율을 향상 시키고자 하였다.

특히, 개량형 단상 혐기성 소화공정에서의 소화효율과 관련하여 주요 소화기질로 사용하는 하수슬러지 외의 유기성 폐기물인 음식물 폐기물과 가축분뇨를 혼합한 혼합슬러지(하수생슬러지+음폐수+가축분뇨)를 투입하였을 경우 소화효율 및 바이오가스 생산에 미치는 영향을 분석해 보고 유기성 폐기물의 적정 혼합 비율을 산출하여 바이오가스 생산효율 향상 및 슬러지 감량화의 증대 방안을 모색해 보고자 하였다.

### 1.2 이론적 배경

혐기성 소화는 용존산소가 없는 상태에서 혐기성균을 이용하여 분해 가능한 유기물을 분해시켜 유기물의 액화, 가스화의 단계적 생화학반응을 거쳐 최종적으로 메탄( $CH_4$ )과 이산화탄소( $CO_2$ )로 분해되는 과정이라 정의할 수 있으며 일명 “메탄발효”라고도 한다 [1].

혐기성 소화공정은 기본적으로 산생성 단계와 메탄생성 단계의 2단계로 구분되며 각 단계에 작용하는 미생물

은 생리적 특성 및 영양 요구 성이 매우 다르므로 외부의 환경조건에 따라 소화효율에 영향을 줄 수 있다 [2]. 또한 호기성 소화에 비해 기질의 5~15%만이 미생물로 변환되기 때문에 폐 슬러지 처리비용이 적고 동력비 및 유지관리비가 적게 들어 고농도의 유기성 폐기물 처리에 유리하나 혐기성 소화미생물의 성장속도가 느려 긴 체류시간이 요구됨에 따라 반응조의 크기가 커지는 문제점도 있다 [3]. 혐기성 소화공정은 반응단계에 따라 전통적인 단상 소화방식과 2상 고율 소화방식으로 구분할 수 있으며, 단상 소화방식은 하나의 반응조에서 산생성과 메탄생성이 동시에 일어나므로 각 단계를 최적의 상태로 유지하기가 곤란하며 외부에서 유입되는 기질의 특성에 따라 민감하게 반응한다. 또한 발효 속도가 늦어 메탄생성과정이 울속 되기 때문에 반응조는 대형화되고, 반응조내 온도유지와 혼합을 빠르게 하기 위한 가온 및 교반장치가 필요하며, 분뇨, 도시 하수슬러지, 가축분뇨 처리에 응용 사례가 많고 메탄의 함유량은 일반적으로 60~70% 범위를 보여주고 있다 [4]. 반면 2상 고율 소화방식은 각 단계에서 적합한 환경조건을 유지하기가 용이하며 메탄반응조의 loading rate(over load)을 적절히 조절할 수 있으므로 pH의 급격한 하강이나 유기산 축적으로 인한 메탄발효의 저해를 방지할 수 있다 [5]. 최근에는 하수처리장에서 발생하는 슬러지를 감량화 할 목적으로 사용하고 있으며, 발생되어진 메탄가스는 가스엔진을 사용하여 전기를 생산함으로써 처리장 동력의 일부분을 대체하는 효과도 거둘 수 있다.

유기성 폐기물처리는 매립, 소각, 토양개량제, 퇴비화 및 사료화 등으로 처리되고 있으나 유기성 폐기물의 특성상 부패와 악취로 인한 환경문제 대두 및 매립연한에 따른 신규 매립지 확보의 난이성, 해양배출 금지 등에 따른 법적제한으로 최근에는 폐기물자원의 재이용 및 대체에너지 전환으로의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 가축분뇨 및 음식물 폐기물의 경우 고농도의 생분해성 유기물로 구성되어 있어 혐기성 소화공정을 이용한 자원화 방안이 적극적으로 모색되고 있다. 현재 음식물 폐기물은 대부분 재활용(퇴비 및 사료화)으로 처리되고 있으나 염분 및 이물질 함유에 따른 품질저하와 수요처 부족으로 재활용 되는 음식물 폐기물의 일부를 에너지화로 전환하도록 하였으며, 바이오가스화 시설의 효율성을 높이기 위해 하수슬러지, 가축분뇨를 병합처리 하도록 하였다 [6].

2013년 에너지화 대상 유기성폐기물의 가용물량은 약 785만톤으로 예측되며, 가용물량의 약 28%에 해당하는 218만톤/년을 에너지화 하여 발전용, 산업용의 연료로 공급하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 음식물 바이오가스화 시설 11개소(1,788톤/일), 음폐수 바이오가스화 시설 9개소(1,860톤/일), 하수슬러지 고품화 연료 시설 3개소(2,770톤/일), 병합 바이오가스시설 6개소(1,140톤/일)를 추가 확충하여 시설설치 완료시점에서는 가용물량의 33%를 에너지화 하도록 하였다 [7].

유기성 폐기물의 혐기성 소화는 고농도의 유기물처리가 가능하며 호기성 처리에 비해 슬러지발생량이 적고, 소화과정에서 발생하는 메탄가스를 소화조 온도 유지를 위한 재이용으로 동력비 절감 및 발전설비를 이용한 잉여가스의 에너지 전환 등 경제적인 장점을 가지고 있다 [8].

## 2. 연구방법 및 내용

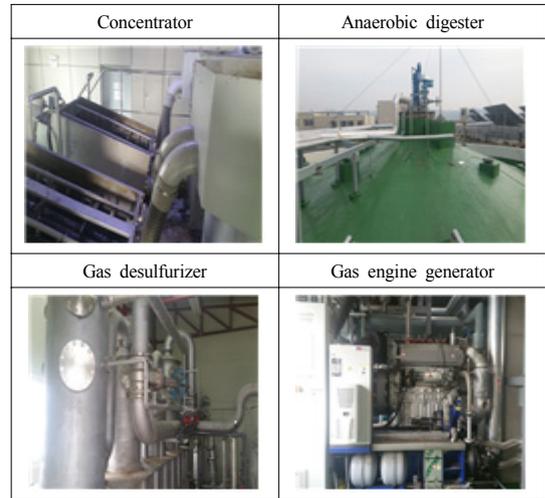
본 연구를 수행하기 위해 아산소재 하수처리시설 (72,000m<sup>3</sup>/일)에 에너지자립화 시범사업으로 설치된 일일 바이오가스 생산량이 2,319m<sup>3</sup> 인 개량형 단상 혐기성 소화설비를 대상으로 운전조건 및 영향인자를 분석하였으며, 특히 하수 생 슬러지 외에 유기성 폐기물인 음폐수, 가축분뇨를 병행 투입하여 최적의 운전조건을 도출하고 이들 혼합슬러지의 투입 비에 따라 바이오가스 생산량 뿐 아니라 메탄수율 및 투입 VS(휘발성고형물, volatile solid)비율 대비 슬러지 감량화율을 조사대상으로 구분하여 진행하였다.

### 2.1 연구대상 실증플랜트 시설현황

본 연구를 수행하기 위한 시설 및 처리공정 개요는 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

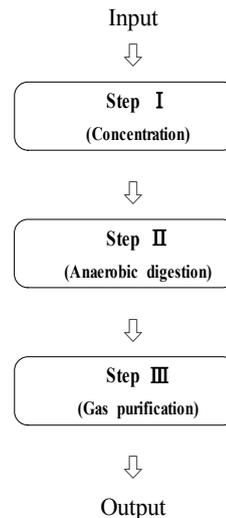
**Table 1.** The facility for an object of study.

Plants	Specification	Quantity
Anaerobic digester (One-phase)	• Gas production : 2,319m <sup>3</sup> /d • CH <sub>4</sub> content : 60% • VS reduction : 45%	2
Concentrator	• Moisture content : 94%	2
Gas desulfurizer	• H <sub>2</sub> S removal ratio : 98%	2



**Fig. 1.** The main anaerobic digestion plants in this study.

### 2.2 연구대상 실증플랜트 처리공정



**Fig. 2.** The stages of anaerobic digestion process in study.

연구대상인 바이오가스 생산설비의 전반적인 주요공정은 Fig. 2에 제시한 것처럼 3단계로 구분되며 Step I 단계에서 하수처리과정에서 발생한 1차 생 슬러지가 슬러지 농축설비에 의해 농축된다. 농축된 생 슬러지는 단상 혐기성 소화조로 분배 유입되어 Step II 단계에서 일정 기간 동안 체류하면서 소화과정을 거치게 된다. 생 슬러지 외의 혼합슬러지는 Step I 단계와 II 단계 중간지점에 설치된 혼합슬러지 저류조에 투입되며 교반에 의한 완전 혼합 상태에서 소화조로 유입된다. 최종적으로 Step III 단

계에서는 소화과정에서 발생된 바이오가스를 가스 정제 설비를 거쳐 실록산 및 황화수소(H<sub>2</sub>S)를 제거한 후 메탄 가스만을 분리·정제한다. 분리된 메탄가스는 가스 열병합 발전설비에 의해 에너지화 한다.

### 2.3 연구내용 및 분석방법

연구대상 시설인 단상 혐기성 소화조는 하수 생 슬러지(raw sewage sludge)를 대상기질로 사용하여 바이오 가스 생산 및 에너지화 하는 방식으로 계획되었으며 초기 운전을 위하여 식종을 실시하였다. 식종슬러지는 혐기성 소화미생물을 식종원(seed)으로 인근지역의 소화조 잉여슬러지를 식종하였으며 소화대상기질로 우선 생 슬러지만을 투입하여 소화조의 미생물 활성화 및 안정화를 유도하였다. 이후 생 슬러지와 음폐수, 가축분뇨 등의 외부폐수를 혼합한 혼합슬러지를 대상기질로 바이오가스 생산과 메탄수율을 분석하는 방식으로 진행하였다.

#### 2.3.1 소화조 운전조건 분석

단상 혐기성 소화조는 2기로 설치되어 있으며 각각의 반응기 중앙부에 교반설비가 설치되어 있어 기계식 교반에 의한 물질 순환방식인 중온소화방식으로 구성되어 있다.

본 연구기간 동안 소화조의 운전조건에 따른 소화가스 발생량을 알아보기 위해 일정시간대별로 소화조내의 혼합액을 시료로 채취하여 pH, 온도를 분석하였으며, 소화온도는 소화조의 상(H), 중(M), 하(L)로 구분하여 측정하였다.

#### 2.3.2 혼합슬러지의 최적 혼합비율 분석

소화조 투입슬러지는 혼합슬러지(하수생슬러지+음폐수+가축분뇨)를 각각의 조합에 따라 슬러지 최적 혼합비율을 분석하여 혼합비율에 따른 바이오가스 생산효율에 대한 영향 및 상관관계 등을 알아보기 위하여 먼저 BMP(Biochemical Methane Potential) test를 실시하여 현장 적용여부를 검토하였다.

잠재 메탄발생량 실험인 BMP test는 일반적으로 serum bottle을 이용하여 bottle 내부에 분해과정에 필요한 혐기성 미생물 및 영양물질을 주입하고, 온도, pH 등 최적의 조건을 유지해 주면서 가스 발생량과 조성을 파악하는 실험이다 [9]. 실험에 사용되는 모든 초차 기구는 가압멸균기를 이용하여 멸균하여 사용하였으며 슬러

지의 혼합비율에 따른 효율분석을 위해 시료비율을 조절하여 혐기성소화의 최적조건을 유지하면서 실험을 진행하였다. 실험조건에 필요한 pH 조절은 0.1 N NaOH, 0.1 N HCl을 이용하였고, 온도유지는 중탕기를 이용하여 35℃로 유지하여 주었으며 BMP test 영양배지 조성은 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Compounds of nutrient media for BMP test.

Compound		Concentration(g/L)
Phosphate buffer	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.27
	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.35
Mineral salts	NH <sub>4</sub> Cl	0.53
	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.075
	MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.1
	FeCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.02
Trace metals	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.0005
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.00005
	ZnCl <sub>2</sub>	0.00005
	CuCl <sub>2</sub>	0.00003
	NaMoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.00001
	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.0005
	NiCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.00005
Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	0.00005	

가스 발생량은 정기적으로 측정하였으며, 가스발생량이 많은 초기에는 시간단위로 측정하다가 가스 발생량이 점차 감소하여 측정주기를 길게 하였다. 발생량을 측정하기 전에 serum bottle을 흔들어서 액체에 녹아있는 가스가 모두 상부공간으로 배출될 수 있도록 하였다. 측정방법은 Fig 3에 나타난 것처럼 실리콘 마개에 3-way stopcock을 부착한 glass syringe를 꽂아 가스량을 측정 한 후 GC용 syringe를 이용하여 0.5mL를 채취하고 TCD가 장착된 GC를 이용하여 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>의 농도를 분석하였다.

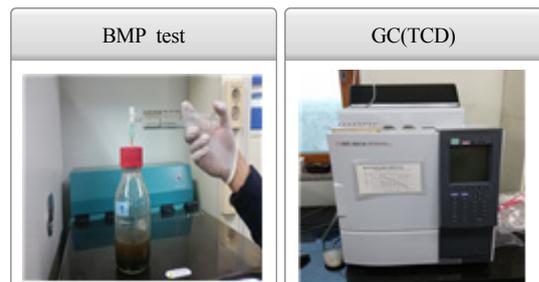


Fig. 3. Analysis of gas production by BMP test.

검광선은 표준가스를 활용하여 작성하였으며 GC의 분석조건은 Table 3에 나타내었다.

**Table 3.** Analytical condition of GC-TCD.

Parameter	Condition
GC	GC-2014 (Shimazu, Japan)
Column	Capillary column (DB, 0.53-mm diameter, 30-m length, J&W Scientific)
Detector	TCD (flame ionization detector)
Carrier gas	Helium gas, 20 mL/min
Injector temp.	150°C
Detector temp.	200°C
Oven temp.	50°C

메탄가스 발생량은 투입된 시료의 휘발성고형물(VS) 대비 발생하는 메탄가스의 양을 산출하여 mLCH<sub>4</sub>/gVS 로 표시하는 것이 일반적이며 메탄가스 발생량은 각 단계별로 배출된 가스의 양과 bottle 상부 공간(head space)에 남아있는 소화가스의 메탄농도 변화를 모두 고려해야 한다. 따라서 측정기간 동안의 메탄가스 발생량 V<sub>CH<sub>4</sub></sub>은 아래 식(1)에서와 같은 물질 수지식을 이용하여 bottle 상단부에 존재하는 메탄의 양을 보정하였다.

$$V_{CH_4}(35^\circ C) = M_1(V_1 + V_0) - M_0 V_0 \quad (1)$$

V<sub>CH<sub>4</sub></sub> : Produced methane volume(mL)

M<sub>1</sub> : Methane content(%) at sampling time

M<sub>0</sub> : Methane content(%) at previous sampling time

V<sub>1</sub> : Biogas volume measured by syringe(mL)

V<sub>0</sub> : Gas phase volume of the reactor(mL)

위의 식(1)에 의해서 계산된 메탄발생량은 아래 식(2)을 이용하여 STP(0°C, 1atm)상태로 전환시킨 뒤 누적 메탄발생량을 계산하였다. 여기서 serum bottle 상부 공간에 남아있는 소화가스는 수증기로 포화되어 있다고 가정할 수 있으므로 건조상태의 가스발생량을 구하기 위하여 37°C에서의 포화수증기압 42.2mmHg를 제외한 후 환산하였다.

$$V_{CH_4}(STP) = V_{CH_4}(37^\circ C) \frac{273}{273+37} \times \frac{760-42.2}{760} \quad (2)$$

### 2.3.3 소화조 유입슬러지 성상 및 소화효율 분석

단상 혐기성 소화방식에서 기질에 따른 소화가스 발생량 효율을 분석해 보기 위해 소화조 유입슬러지의 종류를 하수 생 슬러지, 음폐수, 가축분뇨로 다중화 하여 각각의 조합에 따른 혼합슬러지의 성상을 분석하였다. 소화대상기질로 사용한 생 슬러지는 하수처리시설의 1차 침전지에서 발생한 생 슬러지를 기계식 농축을 통해 농축슬러지 상태로 소화조로 투입하였고 슬러지의 성상 분석 및 소화효율 분석을 위해 총고형물(TS, total solid) 농도, 휘발성고형물(VS, volatile solid)농도, 농축 전/후 TS 및 VS농도 비교분석을 통한 농축효율 분석 등을 진행하였다. 또한 혼합슬러지는 하수 생 슬러지 외에 음식물 폐기물에서 1차 불순물 및 찌꺼기를 걸러낸 음폐수(음식물폐액 또는 탈리액)를 차량으로 운반하여 적정수량을 선정, 투입하였으며 가축분뇨는 인근 가축분뇨처리시설로 반입된 폐수를 조대 협잡물 및 토사성분을 제거한 가축분뇨와 수 처리시설을 거친 가축분뇨처리수를 혼합한 혼합액을 사용하였다. 혼합슬러지 투입은 소화대상기질별 잠재적 메탄발생량 예측과 그에 따른 최적의 혼합비율을 알아보기 위해 실시한 BMP test 결과분석을 통해 소화조 유입슬러지의 혼합비율 및 투입량을 우선적으로 고려하여 진행하였으며, 혼합슬러지의 TS농도 및 운전기간동안의 농도변화와 TS 대비 직접적인 소화기질로 사용되는 VS농도의 함량변화를 비교분석하여 유입슬러지의 부하에 따른 소화효율, VS 감량변화에 따른 바이오가스 생산량 및 메탄수율에 미치는 영향 등을 조사 분석 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

개량형 단상 혐기성 소화조의 운전결과 분석은 약 4개월간의 운전기간 동안 수집된 분석 자료를 토대로 하였으며 본 연구에서는 소화대상기질(생 슬러지, 음폐수, 가축분뇨)의 적용기간 및 기질특성에 따른 소화조 운전조건을 고려하여 2단계로 구분하여 분석하였다.

첫째, 생 슬러지를 단일 소화기질로 실시한 실험단계를 대조군으로 control mode 운전단계로 명칭하였다. 이는 생 슬러지와 혼합슬러지(생 슬러지+음폐수+가축분뇨)를 각각 소화기질로 이용할 경우 바이오가스 생산량과 메탄발생 효율을 비교분석해 보기 위한 목적이었다.

둘째, 혼합슬러지를 소화기질로 실시한 실험단계는 Test mode 운전단계로 명칭하였다. Test mode 운전단계는 소화조 운전조건에 따라 3단계로 세분화 하였으며 Test I(대상기질 적응기간), Test II(소화조 안정화 기간), Test III(소화조 정상운영 기간)으로 구분하여 분석해 보고자 하였다.

### 3.1 소화조 운전조건

혐기성 소화의 주요 영향인자로는 온도를 들 수 있으며 중온(mesophilic)소화의 최적온도는 30~37℃로 알려져 있다 [10]. 또한 혐기성 소화조 내에 메탄균이 활성화 되어 메탄발생량이 최대로 되는 적정 pH는 7.0~7.5 범위이며 소화과정에서의 pH 변화는 반응조내의 휘발성 유기산과 알칼리도의 상호관계에 의해 발생된다. 소화조의 적정운전을 위해서는 pH는 항상 일정하게 유지되어야 하며 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N)와 암모늄 이온(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 농도에 따른 알칼리도(alkalinity)의 균형을 유지하기 위해서는 외부에서 산을 가하여 적정 pH를 조절하여야 한다. 그외 체류시간, C/N비, 유기산 축적, 독성 물질 등에 의해서도 영향을 받는 것으로 보고되고 있다 [11].

운전기간 동안 소화조의 온도는 가온설비를 통해 37±0.8~0.2의 범위 내에서 유지되도록 하였으며, pH 조절은 별도의 중화제 투입 없이 혼합슬러지의 가축분뇨 투입량을 조절하여 알칼리도를 보충해 주는 방식으로 진행하여 pH 7.0~7.5 범위를 유지하였다.

### 3.2 혼합비율 BMP test

소화대상 기질의 잠재적 메탄발생량을 알아보기 위해 실시한 BMP test 결과 단일시료인 경우 각각의 생 슬러지, 음폐수, 가축분뇨에 대한 바이오가스 생산 및 메탄수율은 가축분뇨가 바이오가스 발생량 1.55m<sup>3</sup>/kgVS, CH<sub>4</sub> 0.8m<sup>3</sup>/kgVS로 가장 높은 수준으로 나타났으며 혼합시료의 경우 혼합비율에 따라 다소 차이는 있었으나 생 슬러지 : 음폐수 : 가축분뇨 를 50 : 30 : 20의 비율로 혼합한 시료가 바이오가스 발생량 0.79m<sup>3</sup>/kgVS, CH<sub>4</sub> 0.43m<sup>3</sup>/kgVS로 가장 높게 나타나 최적 혼합비로 평가되었다. 슬러지 감량율에 있어서는 단일시료의 경우 가축분뇨가 39%, 혼합시료의 경우 생 슬러지 : 음폐수 : 가축분뇨를 30 : 50 : 20의 비율로 혼합한 시료가 84%로 가장 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과를 토대로 소화기질 사용에 있어 생 슬러지 단독 소화방식 보다 생 슬러지 외에 음폐수, 가축분뇨 등의 외부폐수를 혼합한 복합 소화방식이 효율적인 것으로 평가되었다.

Table 4는 단일 및 혼합시료의 혼합비율에 대한 BMP test 결과를 나타내었다.

### 3.3 소화조 유입슬러지 성상분석

연구기간 동안의 소화조 유입슬러지는 하수처리시설 1차 침전지에서 발생한 생 슬러지를 기계식 농축과정을 거쳐 TS농도 6~8%, VS농도 5~8%인 농축 생 슬러지를 투입하였다. Table 5에 제시한 외부폐수 적용기간 (Test mode 운전단계)에서 생 슬러지 외의 혼합슬러지

Table 4. Biogas production characteristics of substrate according to mixing ratio used in BMP test.

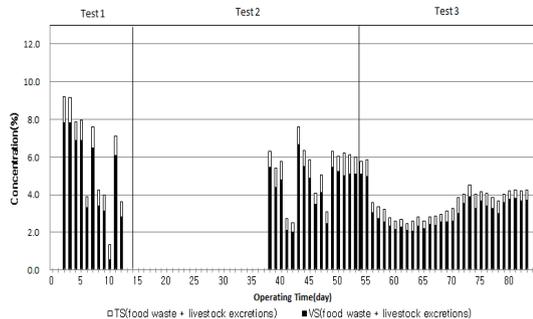
Substrates	Mixing ratio	VS load (kgVS)	Biogas production (m <sup>3</sup> /kg VS)	CH <sub>4</sub> yield (m <sup>3</sup> /kg VS)	CH <sub>4</sub> content (%)	VS reduction (%)
Raw sewage sludge		0.0025	0.52	0.27	62.0	62
Food wastewater		0.0063	0.14	0.07	55.0	56
Livestock excretion		0.0009	1.55	0.80	61.0	39
Raw sewage sludge + Food wastewater	50 : 50	0.0044	0.38	0.14	61.4	70
Raw sewage sludge + Livestock excretion	50 : 50	0.0017	0.67	0.29	62.4	50
Raw sewage sludge + Food wastewater	50 : 30 : 20	0.0033	0.79	0.43	64.3	76
Raw sewage sludge + Food wastewater	30 : 50 : 20	0.0041	0.68	0.35	61.5	84
Food wastewater + Livestock excretion	40 : 40 : 20	0.0037	0.76	0.40	62.3	78
Livestock excretion	60 : 20 : 20	0.0029	0.68	0.34	58.5	74

(음폐수+가축분뇨)는 TS농도 3.6~6.0%, VS농도 3.1~5.0%이었으며 TS 대비 VS함량율은 79.6~84.5%로 조사되었다. Table 5는 Test mode 운전단계에서 투입된 혼합슬러지의 평균 고형물농도를 나타내었다.

Fig. 4에서 제시한 것처럼 혼합슬러지 적용기간동안 유입슬러지의 고형물농도 변화를 살펴보면 변동폭이 크게 나타남을 알 수 있었으며, 이는 외부로부터 반입되는 음폐수 및 가축분뇨의 폐수성상, 반입전처리(음식물 수거 및 분리, 혐잡물 처리 등)과정에 따라 변동이 심하게 나타나는 것으로 분석되었다.

**Table 5.** Characteristics of mixed sludge in periods of test mode operation.

Item	Mixed sludge (food wastewater + livestock excretions)		
	TS(%)	VS(%)	VS/TS(%)
Test I	6.0	5.0	79.6
Test II	5.3	4.5	83.6
Test III	3.6	3.1	84.5



**Fig. 4.** The TS & VS concentration variation of mixed sludge during the Test mode operation.

### 3.4 실증플랜트 현장적용 슬러지 투입비율

운전초기 소화대상 슬러지의 기질과 혼합비에 따른 BMP test 결과를 고려하여 현장 적용한 슬러지 투입비율은 Table 6과 같이 평균 생 슬러지 68.5%, 음폐수 18.0%, 가축분뇨 13.5%로 나타나 BMP test 결과와는 다소 상이한 결과를 보였다. 이는 Lab test로 실시한 BMP test 와 실질적인 현장 플랜트에서의 운전조건 및 소화미생물의 분포 및 활성도, 혼합슬러지의 성상변화 등 다양한 영향인자로 인한 결과로 판단된다.

**Table 6.** Inflow ratio of various sludges used substrate in anaerobic digestion.

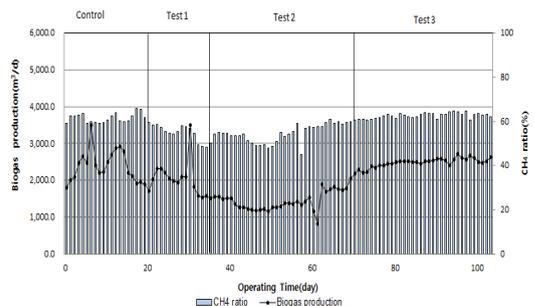
Item	Raw sewage sludge	Food wastewater	Livestock excretions
Inflow (m <sup>3</sup> /d)	73.7	19.3	14.5
Ratio (%)	68.5	18.0	13.5

### 3.5 바이오가스 생산량 및 메탄수율 분석

본 연구에서 생 슬러지 및 혼합슬러지를 대상으로 혐기성 소화공정에서의 바이오가스 생산량 과 메탄수율을 살펴보면 Table 7에 제시한 것처럼 생 슬러지를 단일기질로 적용한 Control mode 운전단계에서 평균 2,380m<sup>3</sup>/d, CH<sub>4</sub> 수율 61.5%를 보였으며 혼합슬러지를 적용한 Test mode 운전단계에서는 1,520~2,514m<sup>3</sup>/d, CH<sub>4</sub> 수율 54.9~62.8% 범위로 나타났다. 이는 혼합슬러지를 적용한 Test mode 운전단계의 경우 운전초기 소화기질의 성상변화로 인한 소화미생물의 적응부족 및 급격한 부하변동으로 Test I, II 단계에서 소화효율이 일시적으로 감소하는 경향을 보여 소화조의 부하 조절을 통해 안정화율을 도모하였다. 이후 운전기간이 경과함에 따라 소화효율도 점차 증가하였으며 Test III 단계에서는 평균 바이오가스 생산량이 2,514m<sup>3</sup>/d, CH<sub>4</sub> 수율 62.8%로 연구대상 시설의 가스 생산 능력인 2,319m<sup>3</sup>/d, CH<sub>4</sub> 수율 60%를 만족하는 수준으로 조사되었다. Fig. 5는 연구기간동안 바이오가스 생산량 및 메탄수율의 변동추이를 나타내었다.

**Table 7.** Comparison of overall system performance data obtained in study period.

Item	Control	Test		
		I	II	III
Biogas production (m <sup>3</sup> /d)	2,380	2,082	1,520	2,514
Biogas yield (m <sup>3</sup> /kgVS)	0.60	0.44	0.28	0.53
CH <sub>4</sub> content (%)	61.5	55.6	54.9	62.8



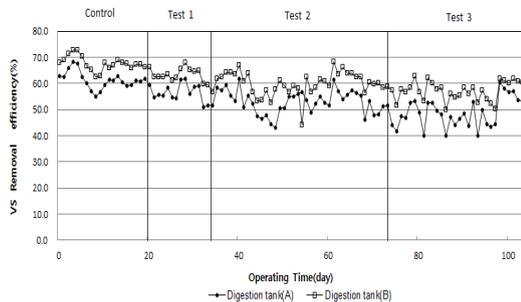
**Fig. 5.** CH<sub>4</sub> content variation of biogas production in operating time.

### 3.6 슬러지 감량을 분석

연구 대상 시설의 혐기성 소화공정에서 슬러지 감량은 Table 8에서와 같이 소화기질로 생 슬러지 단독으로 운전한 Control mode 운전단계에서 61.1%로 나타난 반면 혼합슬러지를 사용한 적용기간인 Test mode 운전단계에서는 48.4~56.6%로 Control mode 운전단계에 비해 낮은 효율을 보였다. 이는 Test mode 운전기간 동안 혼합슬러지(음폐수, 가축분뇨)의 성상변화, 소화조의 유입 부하량 및 운전조건에 따라 다소 차이가 발생할 수 있을 것으로 사료되며, 특히 본 연구 대상 시설이 단상 혐기성 소화설비로 단계별 소화반응(유기물가수분해→산생성→메탄생성)에 필요한 체류시간의 부족과 그에 따른 다양한 소화 미생물군의 기질 대응성 부족으로 기인한 결과로 판단된다. 따라서 안정적인 슬러지 감량율을 확보하기 위해서는 단상 혐기성 소화공정에서의 충분한 체류시간 확보방안이 필요할 것으로 사료된다. Fig. 6는 연구 대상 시설 각각의 혐기성소화조 VS 제거효율을 나타낸 것이다.

**Table 8.** Reduction of VS according to VS loads in anaerobic digestion.

Item	Control	Test			
		I	II	III	
Flowrate of sludge (m <sup>3</sup> /d)	68.4	84.3	109.2	107.5	
VS loading rate (kg/d)	3,968	4,701	5,482	4,750	
VS (mg/L)	Influent	58,017	55,771	50,206	44,190
	Effluent	22,482	24,051	23,533	22,690
VS reduction (%)	61.1	56.6	52.8	48.4	



**Fig. 6.** VS removal efficiency variation from anaerobic digesters(A,B).

### 4. 결론

본 연구는 기존 혐기성 소화설비를 개량한 단상 혐기성 소화조에 생 슬러지 외에 음폐수와 가축분뇨를 혼합한 혼합슬러지를 소화기질로 이용하여 바이오가스 생산효율과 메탄수율의 향상 및 슬러지 감량화의 증대방안을 모색해 보고자 하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단상 혐기성 소화조에 생 슬러지, 음폐수, 가축분뇨를 소화기질로 이용할 경우 단일시료 또는 각각의 혼합비율에 따른 복합시료의 잠재적 메탄발생량을 알아보기 위한 BMP test 결과 단일시료 보다 복합시료의 경우가 전반적으로 메탄발생량이 높게 나타났다. 또한 시료별 BMP test의 메탄발생량 분석 결과는 단일시료의 경우 가축분뇨가 잠재적 메탄발생량이 가장 높게 나타났고, 복합시료의 경우는 혼합슬러지의 종류 및 혼합비율에 따라 다소 차이는 있으나 생 슬러지+음폐수+가축분뇨의 세가지 슬러지를 혼합한 시료에서 메탄발생량이 많은 것으로 나타났으며, 혼합비율에 있어서는 생 슬러지(50) : 음폐수(30) : 가축분뇨(20)의 경우가 메탄발생량 0.43m<sup>3</sup>/kg VS로 가장 최적의 혼합비율로 조사되었다. 각 시료별 BMP test 결과를 분석해 보면 바이오가스 생산량 대비 메탄수율은 55~64.3%로 나타나 바이오가스에 함유된 메탄함량 변화는 그리 크지 않으나 VS 기준 슬러지 감량율에 있어서는 단일시료 감량율 39~62% 보다 복합시료의 경우 74~84%로 높게 나타났다. 이와 같은 결과로 비추어 볼 때 단일기질을 대상으로 한 소화방식 보다 복합 기질을 이용하는 측면이 메탄발생량 증가에 효과적일 것으로 평가되었으며, 복합 기질을 소화대상으로 이용할 경우 혼합비율 또한 중요한 영향인자인 것으로 판단되었다.
2. 바이오가스 생산량 및 메탄수율은 생 슬러지 단독으로 사용할 경우 일일 바이오가스 생산량이 평균 2,380m<sup>3</sup>/d, 메탄수율 61.5%로 나타났으며, 혼합슬러지를 소화기질로 사용하였을 경우는 바이오가스 생산량 평균 1,520~2,514m<sup>3</sup>/d, 메탄수율 54.9~62.8%로 조사되었다. 이는 본 연구대상 시설인 개량형 단상 혐기성 소화조의 설계능력(바이오가스

생산량 2,319m<sup>3</sup>/d)기준으로 볼 때 최대성능을 발휘하는 것으로 평가되었다.

3. 단상 혐기성 소화조에서 유입슬러지 VS부하와 가스발생과의 상관관계를 살펴보면 혼합슬러지를 기질로 사용하여 안정적인 소화효율을 유지하는 VS부하는 1.5kgVS/m<sup>3</sup>·d로 조사되었으며, 단위 가스발생량은 0.53m<sup>3</sup>/kgVS<sub>added</sub>, 메탄수율은 62.8%로 나타났다. 또한 실증플랜트 현장적용 실험에서 혼합슬러지의 최적 혼합비율은 BMP test에서 나타난 결과와는 다소 상이한 생 슬러지 : 음폐수 : 가축분뇨 = 68.5 : 18.0 : 13.5로 조사되었으며, 슬러지 감량 율에 있어서도 생 슬러지 단독 운전단계에서는 61.1%, 혼합슬러지 운전단계에서는 48.4~56.6%로 생 슬러지 운전 기간이 보다 높은 감량화율을 보였다. 이는 실험기간 동안 투입된 혼합슬러지의 성장변화 및 그에 따른 생분해도, 소화조 체류시간 등 운전조건에 기인한 결과로 판단된다.

아울러 본 연구를 통해 혐기성 소화방식에 있어 소화조의 안정적인 운영과 소화효율 측면에서는 고효율 방식인 2상 소화방식을 도입하는 것이 유리하겠으나, 기존의 단상 소화방식에 있어서도 개량을 통한 소화효율 개선 및 성능향상이 충분히 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 바이오가스 생산 및 메탄 회수율 증대방안으로는 단일기질을 소화기질로 이용하는 것보다 유기물함량이 풍부한 음폐수, 가축분뇨, 분뇨 등을 적절한 비율로 혼합한 혼합기질을 이용하는 것이 보다 효과적인 것으로 판단되며, 유기성 폐자원을 활용하는 측면에서 경제적, 친환경적 파급효과도 상당부분 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] Angelidaki I. and Ahring B. K., "Anaerobic digestion of manure at different ammonia loads : effect of temperature", *Water Research*, Vol. 28, 727-731, 1994. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90153-8](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(94)90153-8)
- [2] Gerardi M. H., "The microbiology of anaerobic digesters", *Wily-Interscience*, 99-103, 2003.
- [3] Odeegard H., "Treatment of anaerobically pretreated effluents", *Proc. 5th International Symp. On Anaerobic Digestion*, 225-230, 1988.
- [4] Kim, N.C, Yoo, K.Y., Ahn, J.W., Kim, Y.J., Heo, K., Jung, Y.G., Bae, J.G., " Principles and applications of biogas production technology by anaerobic digestion", *J.*

of KOWREA, Vol. 10(1), 7-23, 2002.

- [5] Demirer, G.N, Chen, S., "Two-Phase anaerobic digestion of unscreened dairy mamure", *Process Biochem.*, Vol. 40, 3542-3549, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.062>
- [6] Ministry of Environment, "Environmental Assessment and Activation Plan of Renewable Energy", *Korea Environment Institute*, 2010.
- [7] Ministry of Environment, "Comprehensive research on Waste-to-Energy measures", *Korea Environment Institute*, 2008.
- [8] Jules B. van Lier, Katja C. F., Alfons J. M. S., Everly C. M., Gatzel L., "Start-up of a thermophilic upflow anaerobic sludge bed(UASB) reactor with mesophilic granular sludge", *Applied Microbiology Biotechnology*, Vol. 37, 130-135, 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00174217>
- [9] Owen, W.F., Stuckey, D.C., Healy, J.B., Young, L.Y., McCarty, P.L., "Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity", *Water Res.*, Vol. 13, 485-492, 1979. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90043-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(79)90043-5)
- [10] Stainer R. Y., Adelberg E. A. and Ingraham J. L., *The Microbial World 4th ed.*, 705-706, Prentice Hall Inc. New Jersey, 1976.
- [11] Pfeffer J. T., "Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse", *Biotech. and Bioeng.*, Vol. 16, 771, 1974.

## 정 종 철(Jong-Cheal jung)

[정회원]



- 1982년 5월 ~ 2014년 6월 : 충남도 공무원(기술서기관퇴직)
- 1999년 3월 ~ 2001년 2월 : 대전대학교 대학원 토목환경학과(공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 대학원 기후변화융합기술학과 재학(박사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 충남녹색환경지원센터 사무국장

<관심분야>

환경공학, 수질, 기후변화

정진도(JIn-Do Chung)

[정회원]



- 1985년 2월 : 충남대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 1990년 2월 : 충남대학교 대학원 열유체공학과(공학박사)
- 1996년 9월 : Kanazawa Univ. 환경공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

환경공학

---

김산(San Kim)

[정회원]



- 1992년 2월 : 강원대학교 환경학과 (이학석사)
- 1998년 2월 : 강원대학교 환경학과 (이학박사수료)
- 2004년 2월 : 호서대학교 환경공학과 (공학박사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 환경바이오연구센터 교수

<관심분야>

환경, 대기