



[2016-12-BM-011]

# 음식류 폐기물을 이용한 간헐주입 연속혼합 혐기성 소화조의 성능인자 평가

이준표<sup>1)</sup> · 강 호<sup>1)</sup> · 정지현<sup>1)</sup> · 이관영<sup>1)</sup> · 현재혁<sup>1)\*</sup>

## Evaluation of the Performance Parameters with a Semi-Continuously Fed and Mixed Anaerobic Reactor using Food Waste

Joonpyo Lee<sup>1)</sup> · Ho Kang<sup>1)</sup> · Jihyun Jeong<sup>1)</sup> · Kwanyoung Lee<sup>1)</sup> · Jaehyuk Hyun<sup>1)\*</sup>

Received 28 November 2016 Revised 12 December 2016 Accepted 13 December 2016

**ABSTRACT** A semi-continuously fed and mixed reactor (SCFMR) was tested with food waste as a substrate. Biogas and methane production, and the total volatile solids (TVS) removal was investigated by changing the operating parameters, such as input total solid (TS) concentration and/or retention time (HRT) in the reactor. With the test of the input TS 10% and 30 days HRT 0.35 Nm<sup>3</sup> methane was produced from 1 kg TVS removal. In the case of input TS 15% and 40 days HRT, 0.34 Nm<sup>3</sup> methane per kilogram TVS was produced. the removal of TVS calculated from biogas production and TS input were 65.7% and 62.9%, respectively. The reactor was estimated to be operated in an over-loaded condition. Hence, the HRT should have been increased for the optimal operation. In conclusion, the operation parameters of SCFMR with food waste was proposed by experiments, and the data could be used for the basic design of a pilot or commercial biogas plant for food waste treatment.

**Key words** Food waste(음식물류 폐기물), Anaerobic digestion(혐기성 소화), Biogas(바이오가스), Hydraulic retention time(수리학적 체류시간), TVS removal efficiency(유기물 제거효율)

### Nomenclature

HRT : hydraulic retention time, d  
 OLR : organic loading rate, kgVS/m<sup>3</sup>d  
 SCFMR: semi-continuously fed and mixed reactor

### 1. 서론

우리나라에서 발생하는 음식물류 폐기물은 일평균 13,697

톤이 발생하고 있으며, 이중 96.5%에 해당하는 13,218톤이 남은 음식물류 폐기물로 분리 배출되고 있다.<sup>[1]</sup> 남은 음식물류 폐기물 중 0.9%만이 매립되고 97.2%는 퇴비, 사료, 에너지 등으로 재활용되고 있으나,<sup>[2]</sup> 재활용을 위한 퇴비, 사료 등은 최종제품의 품질저하로 재활용에 어려움을 겪고 있다.<sup>[3]</sup> 음식물류 폐기물의 바이오가스화 처리량은 286천 톤/년이며, 음폐수는 1,541천톤으로 분석되고 있다.<sup>[4]</sup> 남은 음식물류 폐기물의 발생량을 기준으로 보면 음식물류 폐기물과 음폐수의 바이오가스화 처리율은 37.85%로 매우 높게 산출된다. 하지만, 음식물류 폐기물은 탈수과정과 바이오가스화 시설 내에서 원활한 이송을 위해 물을 첨가하여 고형물 농도를 낮추는 시설이 많아 실제 바이오가스화

1) Department of Environmental Engineering, Chungnam National University E-mail: jayhh@cnu.ac.kr  
 Tel: +82-42-821-6673 Fax: +82-42-822-5610

처리율은 이 보다 낮을 것으로 예상된다.

Kang<sup>[5-6]</sup>의 음식물류 폐기물 최종 생분해도 82.7~87.7%를 바탕으로 음식물류 폐기물의 바이오가스 생산량을 산출하면 1,690,000~1,792,000Nm<sup>3</sup>/d이며, 이를 에너지량으로 환산하면 평균 354,000TOE/년의 막대한 양으로 재활용에 어려움을 겪고 있는 퇴비, 사료화<sup>[3]</sup> 보다는 에너지화가 필요하다.

우리나라 음식물류 폐기물 등의 혐기성 소화기술은 DRANCO 기술이 도입된 건식 소화와 산발효와 메탄발효가 분리된 2상 소화방식이 적용되고 있다. 건식 소화기술은 소화조 내 고형물 농도를 15% 이상의 고농도로 유지하며 바이오가스를 생산하는 기술로서 우리나라 음식물류 폐기물 처리시설의 경우 투입 고형물 농도를 25~30%로 하고 있으며, 소화조 내 고형물 농도는 18% 내외를 유지하고 있다.<sup>[7]</sup> 2상 혐기성 소화는 산발효조 투입 고형물 농도는 20% 내외이며, 소화조의 고형물 농도는 3~5% 내외에서 운전되고 있다.<sup>[8]</sup> 2상 혐기성 소화방식은 일부 시설에서 소화조 유출수를 산발효조로 재순환하여 Alkalinity를 공급함으로써 VFAs 생성을 촉진하고 있으나, 대부분은 음식물류 폐기물의 가용화 속도가 빨라 재순환을 하지 않고 운전하고 있다. 그러나 소화조 유출수를 순환하는 2상 혐기성 소화시스템은 VFAs 농도가 17,500~21,500mg/L<sup>[9]</sup>로 높는데 반해 소화조 유출수를 순환하지 않는 시스템은 4,000mg/L<sup>[10]</sup> 이하가 대부분으로 음식물류 폐기물의 배출, 수거 및 이송 과정에서 생성되는 VFAs 농도가 2,920~4,380mg/L인 점을 감안하면 산발효조에서의 효과가 미미하다.

우리나라에 보급된 혐기성 소화 방식은 소화조의 고형물 농도 5% 이하인 습식 소화방식이 대부분이며, 15% 이상인 건식 소화방식도 일부 시설에서 운영 중에 있다. 소화조 내의 고형물 농도 5~10%의 소화방식은 아직까지 상용시설이 전무하다.

본 연구에서는 유럽에서 유기성 폐기물로부터 신재생에너지인 바이오가스를 생산하는데 가장 많이 사용하고 있는 간헐 주입 연속혼합 혐기성 소화조(Semi-Continuously Fed and Mixed Reactor, SCFMR)를 이용하여 산발효를 행하지 않은 음식물류 폐기물의 소화조 투입 고형물 농도(10%와 15%) 및 체류시간에 따른 바이오가스 발생량과 TVS 제거율 및 소화조 운전인자의 특성을 파악함으로써 SCFMR

운전 시 소화특성, TVS 제거효율, 바이오가스 생산량, pH, TVFAs, Alkalinity 등을 평가하는데 목적이 있으며, 이를 통하여 Pilot 및 상용규모 플랜트의 설계 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험재료 및 분석방법

음식물류 폐기물은 월 2~3회씩 대전광역시 제2자원화 시설의 파쇄 후 탈수시설로 이송되는 구간에서 채취하였으며, 돌, 뼈, 조개껍질, 포도송이줄기, 씨앗 등의 이물질 제거 후 mixer로 간 다음 고형물 농도 10%와 15%로 조절하여 사용하였다. 음식물류 폐기물의 TS, VS, VSS/TSS, pH, Alkalinity, TCOD<sub>Cr</sub>, SCOD<sub>Cr</sub>, TKN, NH<sub>4</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P는 Standard Method(APHA, 2012)에 준하여 분석하였으며, TVFA의 경우 Gas Chromatograph(Agilent HP G1530A, U.S.A)로 분석을 실시하여 아세트산(Acetic Acid, C<sub>2</sub>)으로 환산하여 평가하였다. 원소조성의 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N), 황(S)은 Element Analyzer (FLASH 2000 series, Thermo Scientific, U.S.A)와 Element Analyzer(FlashEA 1112, Thermo Finnigan, Italia)를 이용하여 분석하였다.

### 2.2 실험장치 및 방법

#### 2.2.1 SCFMR 설계 및 운전방법

SCFMR(Semi-Continuously Fed and Mixed Reactor) 실험장치는 Fig. 1과 같이 소화조의 유효용적은 40L이며,

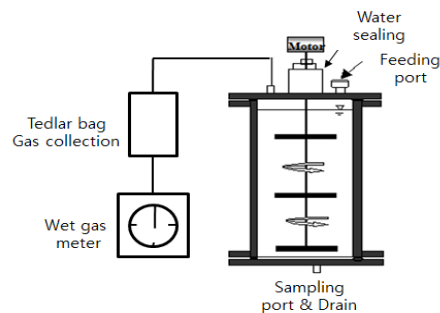


Fig. 1. Schematic diagram of semi-continuously fed and mixed reactor

스테인리스 재질로 2set를 제작하였다. 소화조의 온도는 중온 영역인 35°C를 유지하기 위하여 Water jacket을 설치하고 Water circulator를 이용하였다. 혐기성 소화균과 원활한 혼합을 위하여 소화조 내부에 기계식 교반기를 설치하여 약 60rpm으로 운전하였다. 소화조에서 발생하는 바이오가스는 Teflon 재질의 Gas bag으로 포집하여 습식 가스메타를 이용하여 발생량을 측정하였다.

혐기성 소화균은 대전광역시 하수처리장의 소화조에서 취하여 이물질 제거한 다음 사용하였으며, 실험 시작 전 혐기성 조건을 유지시키기 위하여 질소가스로 소화조 내부를 Purging 하였다. 음식물류 폐기물은 소화조의 상부로 투입하였으며, 유출수는 소화조 하부에서 유출하여 분석용 시료로 사용하였다. 고형물 농도 10%(R1)와 15%(R2)로 조절된 음식물류 폐기물을 각각 조금씩 소화조에 투입하여 적응기간을 거친 다음 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)을 점차 짧게 유지하며 실험을 진행하였다.

### 2.2.2 건조 바이오가스 발생량

바이오가스 발생량은 Wet gas meter를 이용하여 측정하지만, 소화조의 온도가 35°C 이므로 수증기를 포함하고 있으며, 온도에 따른 부피 팽창을 조정하기 위해 이를 다시 표준상태(0°C, 1atm, STP)로 환산하였다. 가스발생 시의 온도는 35°C 이지만, 가스 측정 시의 온도는 실내 기온으로 25°C 내외에서 이루어졌으며, 25°C에서 수증기압을 고려한 물농도로 환산하여 건조가스 발생량을 구하면,

$$\left(\frac{1lb}{694.3ft^3}\right) \times \left(\frac{453.6g}{lb}\right) \times \left(\frac{ft^3}{28.22L}\right) = 0.0232 \frac{g}{L} \quad (1)$$

이상기체법칙  $PV = nRT$ 에서  $P$ 는 1 atm이라 가정할 때,  $V = nRT$ 이다. 여기서 Fractional water vapor volume 을 구하면,

$$V = 0.0232 \frac{g}{L} \times \frac{1 mol}{18g} \times \left(0.0825 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot ^\circ K}\right) \times (273 + t) = 0.0317 \frac{L H_2O}{L gas} \quad (2)$$

따라서, Dry biogas volume fraction은 다음과 같이

구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Dry\ gas\ volume\ fraction &= 1 - 0.0317 \\ &= 0.9683 \cdot L(wet\ gas) \end{aligned} \quad (3)$$

온도팽창(25°C)을 고려한 표준상태에서 바이오가스의 부피( $V_0$ )는 아래와 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} V_0 &= Dry\ biogas\ fraction(0.9683) \times \left(\frac{273}{273 + t}\right) \\ &\times L_{wet\ gas} = 0.8871 \cdot L_{wet\ gas} \end{aligned} \quad (4)$$

### 2.2.3 TVS 제거효율

음식물류 폐기물 SCFMR 실험의 유기물 제거효율 평가는 음식물류 폐기물 초기시료와 소화조 유출수의 TS나 TVS 또는 COD를 측정하여 제거효율을 나타내지 않고, 실험 기간 동안의 바이오가스 생산량을 토대로 TVS 제거효율을 평가하였다. 혐기성 소화에서는 분해된 유기물이 바이오가스로 발생하므로 발생한 건조 바이오가스의 양으로부터 유기물(TVS, Total Volatile Solid) 제거율을 구할 수 있다. 대부분의 바이오가스 중에 들어있는 1% 미만의 Trace gas를 제외하면 바이오가스가  $CH_4$ 와  $CO_2$  gas의 무게와 동일하다고 가정할 수 있으므로 제거된 유기물의 무게(Biomass Removed, BMR)는 식 (5)와 같다.

$$\text{제거된 유기물의 무게} = CH_4 \text{ 무게} + CO_2 \text{ 무게} \quad (5)$$

표준상태(0°C, 1atm)에서 건조 바이오가스( $V_0$ )는 이상기체와 같이 행동한다고 가정하면, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며,<sup>[11~13]</sup>

$$\begin{aligned} \text{제거된 유기물의 무게}(g)(BMR) \\ &= \frac{V_0}{22.413} \times (16 \times CH_4/100) + (44 \times CO_2/100) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $CH_4$  &  $CO_2$  : Normalized  $CH_4$  and  $CO_2$  contents (%)

$CO_2$  (%) =  $100 - CH_4$  (%) 이므로 이를 식 (6)에 대입하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[14]</sup> 식 (7)을 이용하여 본 실험

험에서 발생된 바이오가스로부터 TVS 제거효율을 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{제거된 유기물의 무게}(g)(BMR) \\ & = V_0(1.963 - (0.0124 \times CH_4)) \end{aligned} \quad (7)$$

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 음식물류 폐기물의 초기 특성

음식물류 폐기물의 초기 조성은 Table 1에 나타난 바와 같다. SCFMR 운전실험 기간 중 시료의 pH는 4.5~5.2를 보였으며, Lim 등<sup>[15]</sup>은 음식물류 폐기물의 pH를 4.0~4.5로 보고하여 동 조사결과가 다소 높은 값을 보였고, 또한 대전녹색환경지원센터<sup>[16]</sup>에서는 평균 5.0으로 보고하여 동 결과가 조금 높은 값을 보였다. Kim 등<sup>[17]</sup>은 4.22~5.12, Cho<sup>[18]</sup>는 3.97~5.40 범위로 평균 4.67로 보고하여 동 조사결과와 비슷한 범위를 보였다. TS는 16.1~18.0%로 평균 17.0%, VS는 13.0~15.8%로 평균 14.4%로 VS/TS는 평균 84.12%를 나타냈다. Cho<sup>[18]</sup>의 TS 16.5%, VS 14.32%와 대전녹색환경지원센터<sup>[16]</sup>에서 보고한 TS 16.4%와는 유사한 결과를 나타냈으나, 여타 연구자들<sup>[15,19]</sup>의 보고와는 약간의 차이를 보였으며, 이는 Kim 등<sup>[17]</sup>의 연구결과에서와 같이 시료의 계절적 요인 및 주거형태별 차이에서 오는 현상으로 여겨진다. 그 밖의 성상은 Kang<sup>[5]</sup>이 보고한 U광역시와 P시 음식물류 폐기물의 특성과 약간의 차이는 있으나 대체적으로 유사한 결과를 보였다.

음식물류 폐기물의 C/N 비는 10.8~12.7로 하수슬러지의 최적 C/N 비로 알려진 17 보다는 조금 낮았다.<sup>[20]</sup>

Table 1. Characteristics of Food wastes

pH	4.5~5.2	T-N (mg/L)	4,300~5,110
TS (%)	16.1~18.0	NH4+-N (mg/L)	1,380~1,480
VS (%)	13.0~15.8	NH4/TN (%)	29.4~32.5
VS/TS (%)	80.9~87.9	T-P (mg/L)	800~890
TCODCr (mg/L)	130,700~173,200	PO4-P (mg/L)	98~125
SCODCr (mg/L)	49,900~73,700	PO4/TP(%)	12.2~14.6
SCOD/TCOD (%)	37.0~42.9	TVFAs (mg/L as C <sub>2</sub> )	2,920~4,380
Carbon (%)	44.6~51.7	Hydrogen (%)	6.3~8.2
Oxygen (%)	31.1~35.5	Nitrogen (%)	3.8~4.8
Sulfur (%)	0.0~0.2	C/N Ratio	10.8~12.7

#### 3.2 SCFMR 운전인자

SCFMR의 운전 초기에는 하수슬러지에 적응된 혐기성 미생물을 음식물류 폐기물에 적응시키기 위한 과정이 진행되었으며, 이후 혐기성 미생물이 안정된 적응력을 가진 것으로 판단된 운전 120일에 음식물류 폐기물 소화조 유입 TS 기준 10%(R1)는 유기물 부하율 3.0kgVS/m<sup>3</sup>d부터 3.1kgVS/m<sup>3</sup>d의 범위, TS 기준 15%(R2)는 유기물 부하율을 2.6kgVS/m<sup>3</sup>d로 시작하여 점차 유기물 부하율을 늘려가며 최종적으로 3.1kgVS/m<sup>3</sup>d부터 3.4kgVS/m<sup>3</sup>d의 범위로 실험을 진행하였다.

소화조 운영에 필요한 인자 즉, pH, Alkalinity, 유기회발산(TVFAs), TCOD, SCOD, TS, VS, T-N, NH<sub>3</sub>-N, T-P 및 PO<sub>4</sub>-P에 대해 R1은 HRT 30일, R2는 HRT 40일 운전 결과를 기준으로 소화조의 유출수를 분석하여 평균값을 Table 2에 나타내었다. SCFMR의 유출수 TS는 R1이 4.0%로 유지되어 습식 소화 범위에서 운전되었으며, R2는 6.2%를 보여 반건식 소화 범위에서 운전되었다.

Fig. 2와 Fig. 3에 pH와 Alkalinity 그리고 TVFAs의 변화를 나타내었다. R1에서는 pH가 7.0에서 7.7 범위로 유

Table 2. A summary of SCFMR operation at Digestate (effluent)

	Parameter	R1 (TS 10%) (HRT 30d)	R2 (TS 15%) (HRT 40d)
Influent	TS (%)	10	15
	VS (%)	8.7	13.3
	TCODcr (mg/L)	98,300	151,800
	SCODcr (mg/L)	39,900	61,300
Effluent	pH	7.4	6.7
	Alkalinity (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	13,900	12,500
	TS (%)	4.0	6.2
	VS (%)	2.7	4.3
	TCODcr (mg/L)	50,600	107,500
	SCODcr (mg/L)	13,900	36,600
	T-N (mg/L)	3,500	4,340
	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	2,700	3,800
	T-P (mg/L)	480	720
	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	70	80
	TVFAs (mg/L as C <sub>2</sub> )	2,400	5,800
	V/A	0.18	0.48
	P/A	0.13	0.81

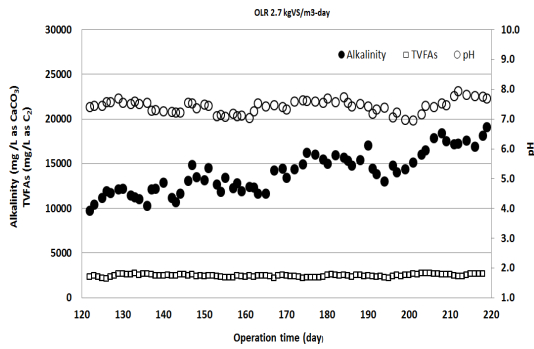


Fig. 2. Temporal variation of pH, alkalinity and TVFAs concentration of TS 10% fed for during SCFMR operation (R1)

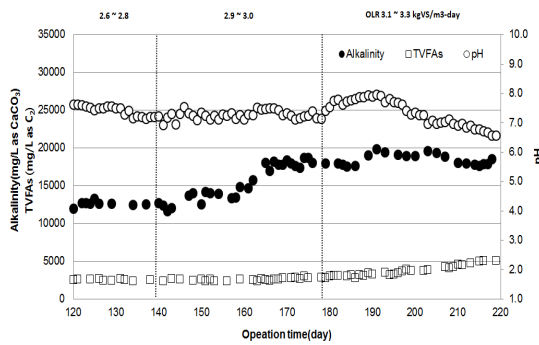


Fig. 3. Temporal variation of pH, alkalinity and TVFAs concentration of TS 15% fed for during SCFMR operation (R2)

지되었으나, 실험 후반기에는 Alkalinity 증가와 함께 8.0까지 상승하기도 하였다. R2는 유기물 부하율 2.6kgVS/m<sup>3</sup>d 부터 3.0kgVS/m<sup>3</sup>d까지는 pH가 7.5 내외에서 안정적으로 유지되었으나, 유기물 부하율이 증가함에 따라 pH가 8.0까지 상승하다가 이내 6.7(HRT 40d, OLR 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d)까지 감소하는 결과를 보였다. pH의 하락은 VFAs의 축적으로 인한 현상으로 pH와 유기물 부하율은 Lee et al.<sup>[21]</sup>이 음식물류 폐기물의 고효율 바이오가스화를 위한 설계 및 운전 기술지침 마련 연구에서 단일 소화조의 pH는 6.5~8.0, OLR은 1.5~4.0kgVS/m<sup>3</sup>d로 제시한 범위에서 운전되었으나, R2에서 pH가 감소하는 경향으로 볼 때 HRT 40일, 유기물 부하율 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d 운전에서 소화조가 불안정한 상태로 운전되었다.

Alkalinity는 R1에서 혐기성 미생물이 안정된 적응력을 가진 운전 120일에 10,000mg/L as CaCO<sub>3</sub>에서 19,000 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로 지속적으로 증가하였으며, 동 운전기간

동안 증가세가 멈추지 않았다. R2는 운전 120일에 12,000 mg/L as CaCO<sub>3</sub>에서 운전 160일 이후 18,000mg/L as CaCO<sub>3</sub>로 급격히 상승하였다. 이후 실험 190일경에는 20,000 mg/L as CaCO<sub>3</sub>까지 증가하였으나, HRT가 40일로 줄어들고 유기물 부하율이 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d로 증가하자 18,000 mg/L as CaCO<sub>3</sub>로 감소하였으며, SCFMR 운전기간 중 Alkalinity는 You 등<sup>[22]</sup>의 Pilot 실험결과와 유사한 경향을 보였다. 혐기성 소화조 운전 시 pH와 Alkalinity는 서로 밀접하게 관련되어 있고, Free ammonia 독성이나 VFAs의 농도 등에도 영향을 미친다.<sup>[23]</sup> Alkalinity는 유기질소 성분의 분해로 생성된 Ammonia, 이산화탄소 및 황산염의 환원반응 그리고 Acetate 분해에 의한 메탄생성반응 등에 의해 생성되며, 유입기질의 pH, 산 및 메탄생성반응에 의해 발생하는 이산화탄소, VFAs의 생성에 의해 소모된다.<sup>[24]</sup> TVFAs는 R1에서 3,000mg/L as C<sub>2</sub> 이하에서 안정적으로 유지되었으며, R2의 경우에도 유기물 부하율을 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d 일 때 2,000mg/L as C<sub>2</sub> 이하로 바이오가스 시설의 설계 및 운영지침(안)<sup>[21]</sup>으로 제시된 4,000mg/L이하에서 운전되었다.

혐기성 소화조의 안정성을 평가하는 인자로 VFAs 중 P/A (Propionic acid/Acetic acid) 비를 들 수 있으며, 정상상태에서의 P/A 비는 1.4 이하로 알려져 있다.<sup>[25~26]</sup> 본 실험에서는 R2의 유기물 부하율 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d에서 TVFAs가 5,000mg/L as C<sub>2</sub> 이상으로 상승한 상태에서도 P/A 비가 1.05를 유지하여 안정된 값을 보였다. Alkalinity에 대한 TVFAs의 비는 혐기성 소화조의 안정성을 나타내는 또 하나의 지표이며, 정상상태에서 운전되는 소화조의 TVFAs/Alkalinity 비는 0.1~0.3이다<sup>[24, 27~28]</sup>. R2에서 TVFAs/Alkalinity 비는 운전 120일에는 0.21로 안정적인 상태를 유지하였으며, 이후 TVFAs가 4,000mg/L as C<sub>2</sub>를 상회한 운전 207일에도 0.23으로 안정된 값을 보였다. Song 등<sup>[27]</sup>은 정상적인 혐기성 소화조의 VFAs 농도를 300~2,000mg HAc/L로 보고하고 있다. 그럼에도 불구하고 유기물 부하율이 3.1kgVS/m<sup>3</sup>d를 넘어선 운전에서는 점진적인 TVFAs의 축적(1,270mg HAc/L)과 암모니아 등에 의한 메탄생성반응의 저해가 있는 것으로 여겨진다. 암모니아는 단백질이나 요소 등이 혐기성 상태에서 분해될 때 생성되는 물질로서 pH의 변화에 따라 Ammonium Ion인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 Free

Ammonia인  $\text{NH}_3^-$  형태로 존재하며 형태 및 농도에 따라서 혐기성 미생물에 독성이 될 수 있다. Ammonia는 R1에서는 2,400mg/L에서 조금씩 증가하여 3,300mg/L까지 증가하였으며, R2는 2,400mg/L에서 조금씩 증가하여 HRT 40일 운전에서는 3,500mg/L 범위에서 안정되었다. R1과 R2 모두 Ammonia 저해를 일으키는 농도<sup>[29]</sup>에 근접하는 것으로 나타났으나, 장기운전으로 미생물의 적응성이 향상<sup>[30]</sup> 되었을 것으로 판단되지만, Ammonia 가스에 의한 독성영향도 일부 작용했을 것으로 여겨진다.

### 3.3 바이오가스 및 메탄가스 발생량

바이오가스와 메탄 생성량 비교에는  $v/v-d(\text{Nm}^3 \text{ Biogas (methane)}/\text{m}^3 \text{ Reactor-day, volume of biogas(methane) produced}/\text{volume of reactor volume-day})$ 단위와  $\text{Nm}^3 \text{ Biogas(methane)}/\text{kg TVSfed, Nm}^3 \text{ Biogas(methane)}/\text{m}^3 \text{ 음식물류폐기물 fed}$ 를 이용하였다.  $v/v-d(\text{Nm}^3 \text{ Biogas (methane)}/\text{m}^3 \text{ Reactor-day})$ 는 유효한 소화조 부피 당 하루에 발생한 바이오가스 및 메탄 발생량의 부피를 뜻한다. 따라서 소화조의 부피를 알면 즉시 바이오가스 및 메탄 발생량을 알 수 있는 아주 간편한 방법이며,  $\text{Nm}^3 \text{ Biogas (methane)}/\text{kg TVSfed, Nm}^3 \text{ Biogas(methane)}/\text{m}^3 \text{ 음식물류폐기물 fed}$  단위로 음식물류 폐기물의 주입량을 통해 바이오가스 및 메탄발생량을 평가할 수 있다.<sup>[23]</sup>

R1의 바이오가스 발생량은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 HRT 30일 이전의 바이오가스 발생을 보게 되면 소화조가 안정감 있게 유지되는 것으로 판단할 수 있으나, HRT가 30일로 유지되는 약 90일간의 바이오가스 발생량을 보게 되면 점진적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과로 미루어볼 때, 투입 고형물 농도 10%로 SCFMR을

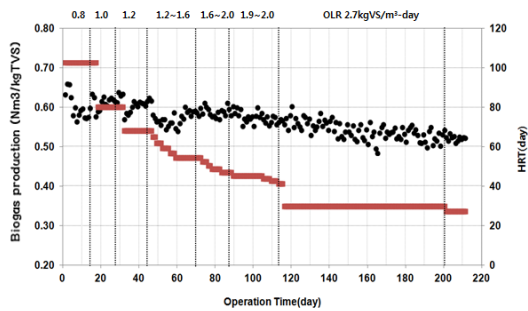


Fig. 4. Biogas production of according to HRT in R1 (TS 10%)

운전할 경우 HRT를 30일 이상으로 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. HRT 30일(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d) 운전에서 평균 2.11v/v-d의 바이오가스 발생량을 보였으며, 이때 1kg TVS 당 0.54Nm<sup>3</sup> 바이오가스가 발생하였다. 이는 TS 10% 음식물류 폐기물 1톤 주입 시에 47.0Nm<sup>3</sup>의 바이오가스가 발생함을 의미하며, 실험에 사용된 음식물류 폐기물의 평균 TS 17%를 고려하면 음식물류 폐기물 1톤으로부터 79.9Nm<sup>3</sup>의 바이오가스가 발생한다.

R2의 바이오가스 발생량은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 HRT 50일(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d) 조건에서 1.70v/v-d, 0.61 Nm<sup>3</sup>/kgTVS의 바이오가스 발생량을 나타내었으며, TS 15% 음식물류 폐기물 1톤 주입 당 81.1Nm<sup>3</sup>의 바이오가스가 발생한다. HRT 40일

(OLR 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d)에서는 유기물 부하량이 18% 증가한 것에 비해 바이오가스 발생량의 증가율은 6%에 그쳐 1kg TVS 당 바이오가스 발생량이 0.51Nm<sup>3</sup>으로 낮게 나타났으며, 점진적으로 바이오가스 발생량이 줄어들어 약간의 과부하 상태로 운전된 것으로 판단된다. R1의 HRT 30일 기준으로 볼 때 DRANCO process가 적용된 국내 상용시설<sup>[31]</sup>의 100m<sup>3</sup>/톤의 결과보다 조금 적은 바이오가스 발생량을 보였다. 그러나 OWS사의 DRANCO process 기술자료<sup>[32]</sup>에서 TS 40%의 Solid organic waste로 148m<sup>3</sup>/톤의 바이오가스를 생산하는 것을 단순 TS 농도 기준으로 음식물류 폐기물과 비교하면 월등히 많은 바이오가스 생산량(1.27배)을 보인다.

R1의 바이오가스 중 메탄발생량을 Fig. 6에 나타내었다. HRT 30일 운전(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d)에서 평균 1.55v/v-d의 메탄발생량을 보였으며, 이때 1kg TVS 당 0.35Nm<sup>3</sup>의 메탄이 발생하였다. 실험에 사용된 음식물류 폐기물의 평

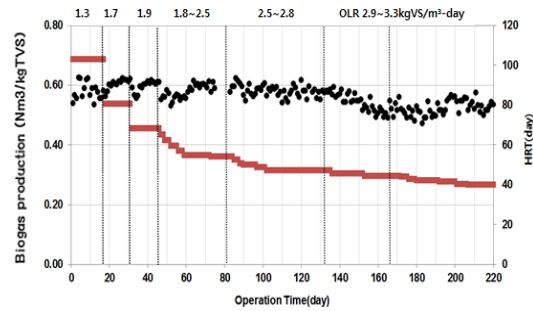


Fig. 5. Biogas production of according to HRT in R2 (TS 15%)

균 TS 17%를 고려하면 음식물류 폐기물 1톤에서 51.9Nm<sup>3</sup>의 메탄이 발생하는 것을 의미한다. Jang et al.<sup>[14]</sup>은 HRT 15일, TS 11%에서 0.271m<sup>3</sup>/kgVS로 보고하여 메탄수율이 낮았지만, HRT가 15일인 점을 감안하여야 한다. 본 실험 결과는 Lee et al.<sup>[10]</sup>이 실제 음폐수 바이오가스 플랜트에서 실측한 0.36Nm<sup>3</sup>/kgVS와 비슷하였으며, Heo et al.<sup>[33]</sup>의 결과보다는 조금 낮았다. HRT 30일 운전기간 중 메탄 함량은 65~77% 범위이며, 평균 70%로 음식물류 폐기물의 바이오가스 중 메탄함량 결과와 유사하거나 약간 높은 결과를 보였다.<sup>[10,34]</sup>

R2의 메탄발생량은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 HRT 50일(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d) 조건에서 평균 1.17v/v-d, 0.41 Nm<sup>3</sup>/kgTVS의 메탄발생량을 나타내었으며, 실험에 사용된 음식물류 폐기물의 평균 TS 17%를 고려하면 음식물류 폐기물 1톤에서 56.2Nm<sup>3</sup>의 메탄발생량을 얻을 수 있는 것으로 R1의 HRT 30일 결과보다 높았다. 그러나 HRT를 40일(OLR 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d)로 줄였을 때에는 1.24v/v-d를 나타내었으며, 1kg TVS 당 메탄발생량은 평균 0.34Nm<sup>3</sup>으로 R1의 HRT 30일 결과보다 낮게 나타났다. 메탄함량은

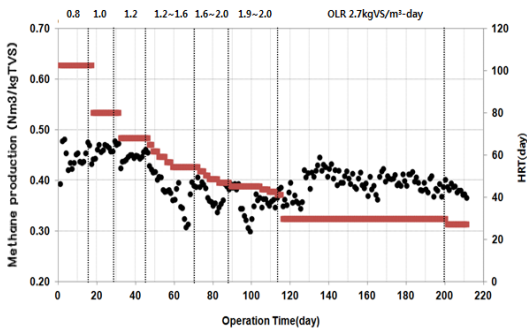


Fig. 6. Methane gas production of according to HRT in R1 (TS 10%)

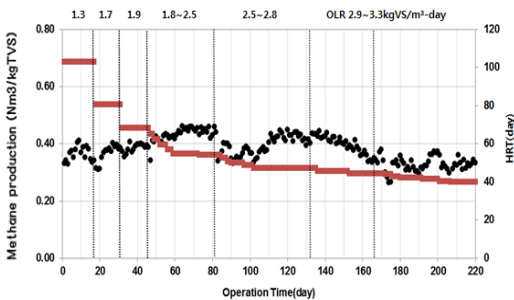


Fig. 7. Methane gas production of according to HRT in R2 (TS 15%)

66~67%로 R2에 비해 조금 낮은 값을 보였다.

Table 3에는 R1과 R2에 대한 바이오가스 및 메탄발생량을 요약하였으며, Table 3에서 보는 바와 같이 HRT가 늘어날수록, TS 함량이 증가할수록 바이오가스와 메탄이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 반면 소화조 용적당 바이오가스 발생량은 HRT가 늘어날수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 소화조의 유기물 부하율(OLR)에 따라 나타나는 전형적인 현상이다. 그러나 R1의 HRT 30일 운전기간과 R2의 HRT 40일 운전기간에서 바이오가스 발생량 경향으로 볼 때 약간의 과부하 상태에서 운전된 것을 알 수 있으며, 따라서 HRT를 그보다 높게 유지할 필요가 있을 것으로 판단된다.

한편, K시 바이오가스 플랜트의 바이오가스 생산량 설계기준<sup>[35]</sup>은 0.58Nm<sup>3</sup>/kgVS로 하여 본 실험결과와 유사하였으며, 바이오가스 생산량의 극대화를 위하여는 HRT를 길게 설정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

### 3.4 TVS 제거율

Biogas 발생량과 유입시료의 TVS를 바탕으로 TVS 제

Table 3. Biogas and methane gas production of according to HRT in R1 and R2

HRT (d)	Parameter	R1 (TS 10%)	R2 (TS 15%)	
50	Biogas	v/v-d	-	1.70
		Nm <sup>3</sup> /kg TVS	-	0.61
		Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> food waste fed	-	81.1
	Methane	v/v-d	-	1.17
		Nm <sup>3</sup> /kg TVS	-	0.41
		Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> food waste fed	-	49.6
40	Biogas	v/v-d	1.71	1.80
		Nm <sup>3</sup> /kg TVS	0.58	0.51
		Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> food waste fed	50.5	67.8
	Methane	v/v-d	1.07	1.24
		Nm <sup>3</sup> /kg TVS	0.36	0.34
		Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> food waste fed	31.3	44.4
30	Biogas	v/v-d	2.11	-
		Nm <sup>3</sup> /kg TVS	0.54	-
		Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> food waste fed	47.0	-
	Methane	v/v-d	1.55	-
		Nm <sup>3</sup> /kg TVS	0.35	-
		Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> food waste fed	30.5	-

거울을 평가하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었으며, R1과 R2에서 HRT 조건에 따른 평균 TVS 제거율을 Table 4에 요약하였다.

R1에서 TVS 제거율은 HRT 40일(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d) 운전에서 평균 67.1%, HRT 30일(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d) 운전에서는 평균 65.7%를 보였다. 그러나 HRT 30일 운전에서는 TVS 제거율이 점점 낮아지는 현상을 보여 과부하 혹은 TVFAs나 Ammonia 저해가 작용했을 가능성이 있는 것으로 보인다. R2에서 TVS 제거율은 HRT 50일(OLR 2.7kgVS/m<sup>3</sup>d) 운전에서 평균 66.8%를 나타내었고, HRT 40일(OLR 3.3kgVS/m<sup>3</sup>d) 운전에서는 62.9%를 보였으나, 이 역시 R1의 HRT 30일 운전에서와 같이 TVS 제거율이 감소하는 경향을 보였다. TVS 제거율은 Jang et al.<sup>[14]</sup>이

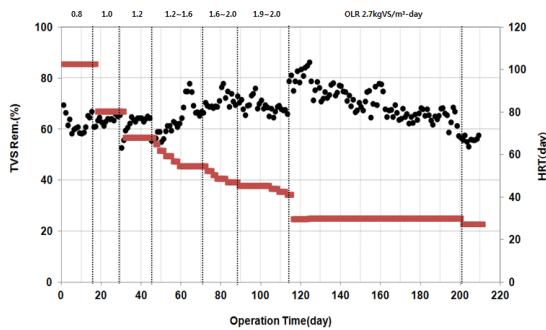


Fig. 8. TVS removal efficiency of according to HRT in R1 (TS 10%)

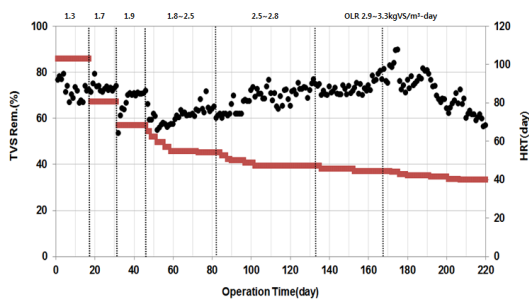


Fig. 9. TVS removal efficiency of according to HRT in R2 (TS 15%)

Table 4. TVS removal efficiency of according to HRT

HRT (day)	R1 (TS 10%)	R2 (TS 15%)
50	—	66.8
40	67.1	62.9
30	65.7	—

75.8%, Lee et al.<sup>[33]</sup>은 76%로 보고하였는데, 이는 유입수와 유출수의 VS 농도를 근거로 산출하여 본 연구의 TVS 제거율과는 차이를 보여주고 있다. Lee et al.<sup>[10]</sup>도 실제 음식물류 폐기물 바이오가스 플랜트에서 75.0~91.1%의 VS 분해율을 보고한 바 있는데, 이 역시 유입 및 유출수의 VS 농도만을 실측한 결과이다. 유입수와 유출수의 VS농도만으로 TVS 제거율을 구하게 되면 소화조 내에 축적되는 유기물이 없고 유입수와 유출수의 양이 같아야만 정확한 제거율 산정이 가능하므로, Biogas 발생량과 유입시료의 TVS를 바탕으로 TVS 제거율을 평가하는 것이 정확한 방법이라고 할 수 있다.

SCFMR을 이용한 음식물류 폐기물의 혐기소화 실험에서 TVS 제거율은 HRT와 유기물 부하율의 변화에 따라 62.9~67.1%로 나타났으나, 소화조의 안정적인 운전을 고려하면 음식물류 폐기물의 유입 TS 농도 10%에서는 HRT 30일보다 높게 유지하고 15%에서는 HRT 40일보다 높게 유지할 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

간헐 주입 연속혼합 혐기성 소화조(Semi-Continuously Fed and Mixed Reactor, SCFMR)를 이용하여 음식물류 폐기물의 소화조 주입 TS 농도와 체류시간에 따른 바이오가스 및 메탄발생량, TVS 제거율과 소화조 운전인자의 특성을 파악코자 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) TS 10%의 HRT 30일 운전과 TS 15%의 HRT 40일 운전에서 1kg TVS 당 메탄가스 발생량은 각각 0.35Nm<sup>3</sup>, 0.34Nm<sup>3</sup>를 보였으나, 약간의 과부하 상태에서 운전된 것으로 소화조의 안정적인 운전을 고려하면 음식물류 폐기물의 유입 TS 농도 10%에서는 HRT 30일보다 높게 유지하고 15%에서는 HRT 40일보다 높게 유지할 필요가 있는 것으로 판단된다.
- 2) TS 10%의 HRT 30일 운전과 TS 15%의 HRT 40일 운전에서 Biogas 발생량과 유입시료의 TVS를 바탕으로 한 TVS 제거율은 각각 65.7%, 62.9%로 나타났으며, 유입수와 유출수의 VS농도로 TVS 제거율을 구하게 되



면 소화조 내에 축적되는 유기물로 인한 오류가 발생할 수 있으므로 Biogas 발생량으로 TVS 제거율을 산정하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.

- 3) SCFMR 운전을 통해 소화조 운영에 필요한 인자들에 대한 실험값을 제시하였으며, 이는 음식물류 폐기물의 Pilot나 상용규모 플랜트의 설계 참고자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 대전녹색환경지원센터의 2014년도 연구개발 사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

## References

- [1] Ministry of Environment(ME), 2015, "2014 The nations of waste occurrence & treatment status".
- [2] Ministry of Environment(ME), 2016, "2016 White paper of environment".
- [3] Korea Food waste Recycling Association, 2015, "Problems and improvement of food waste recycling", Korea Organic Resource Recycling Association Symposium.
- [4] Ministry of Environment(ME), 2015, "2014 Organic waste into energy utilization facilities".
- [5] Kang, H., 2011, "Feasibility study to design an anaerobic digestion system to treat some organic wastes produced in Ulsan", Research report for Daejeon Environmental Technology Center, Korea.
- [6] Kang, H., 2006, "A study on physico-chemical characteristic of food waste generated from different sources to estimate biogas production", Research report of Daejeon Environmental Technology Center, Korea.
- [7] You, Y. S., 2013, "Daegu food waste treatment facilities", 16th organic waste-to-energy technology forum, 2013. 9. 26. Daegu, Korea Environment Corporation, Ministry of Environment, Korea.
- [8] Editorial department, 2015, "High performance food waste digestion process demonstration plant operational practices applied - Ulsan", Korea Organic Resource Recycling Association Symposium.
- [9] Park, S. C., Cho, J. K., Lee, J. P., Hong, J. J., Lee, J. S., and Kim, M. S., 1995, "Process development for energy and compost recovery from biodegradable municipal solid waste(II)", KIER-941123, Korea Institute of Energy Research.
- [10] Lee, D. J., Gang, J. K., Lee, S. Y., Kim, K. H., and Bae, J. S., 2015, "A study on establishment of technical guideline of the installation and operation for the efficient bio-gasification facility of food wastes (II) - Results of the periodical monitoring and the technical inspection", J. of The Organic Resource Recycling Association, 23(2), 11-18.
- [11] Shin, K. S., 2003, "Application of electron beam irradiation for effective eatewater sludge treatment", Ph. D. Dissertation, Chungnam National University, Korea.
- [12] Kang, H., 2008, "A feasibility study for renewable energy biogas from sewage sludge", Daejeon Environmental Technology Center, Korea.
- [13] Jeong, K. H., Kang, H., Jeong, J. H., Kim, S. W., and Ahn, H. W., 2014, "Biogas production from daily cow manure using semi-continuously fed and mixed reactor", J. of Korea Society of Waste Management, 31(8), 843-853.
- [14] Jang, E. S., Ruy, S. H., and Phae, J. G., 2007, "Effect of TS concentration on anaerobic digestion using supernatant of food waste", J. of The Organic Resource Recycling Association, 15(2), 118-127.
- [15] Lim, B. S., Kwon, C. J., Jeong, J. H., and Kang, H., 2010, "Characteristics of food wastes in Daejeon metropolitan city", J. of the Korea Organic Resource Recycling Association, 27(6), 522-529.
- [16] Daejeon Green Environment Center, 2016, "Construction of biogas plant for food waste & food waste leachate in Daejeon metropolitan city - characteristics research services", Kyeryong Construction Industrial Co. Ltd., Korea.
- [17] Kim, Y. K., Kim, S. M., Kim, M. K., Choi, J. T., and Nam, S. Y., 2009, "Characteristics of the food waste and wastewater discharged from food waste treatment process", Korean J. of Environmental Health, 35(6), 526-531.
- [18] Cho, N. C., 2015, "Efficient operating methods of

- anaerobic digestion”, Master’s Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Korea.
- [19] Choi, J. M., Kim, J.K., and Lee, C. Y., 2015, “Bio-degradation characteristics of food waste on various collection systems”, J. of the Korea Organic Resource Recycling Association, 23(1), 23-28.
- [20] Dai, X. H., Li, X. S., Zhang, D., Chen, Y. U. and Dai, L. L., 2016, “Simultaneous enhancement of methane production and methane content in biogas from waste activated sludge and perennial ryegrass anaerobic co-digestion: The effects of pH and C/N ratio”, Bioresource Technology, 216, 323-330.
- [21] Lee, D. J., Kang, J. K., Lee, S. Y., Kim, K. H., and Bae, J. S., 2015, “A study on establishment of technical guideline of the installation and operation for the efficient bio-gasification facility of food wastes(III)”, Jor. of The Organic Resource Recycling Association, 23(3), 11-22.
- [22] You, Y. S., You, S. I., Lee, Y. S., Park, H. S., and You, E. C., 2011, “Pilot-scale Study of Horizontal Anaerobic Digester for Biogas Production using Food-waste”, Waste Association co Proceeding, 193-195, Korea.
- [23] Jeong, K. H., Kang, H., Jeong, J. H., Kim, S. W., and Ahn, H. W., 2014, “Biogas production from daily cow manure using semi-continuously fed and mixed reactor”, J. of Korea Society of Waste Management, 31(8), 843-853.
- [24] Yoon, H. S. and Song, Y. C., 2016, “Effect of organic loading rate on the bioelectrochemical anaerobic digestion of food waste”, J. of Korean Society of Waste management, 33(6), 527-536.
- [25] Kang, H. and Moon, S. H., 2015, “Evaluation of swine wastewater pretreatment using anaerobic filter, J. of Korean Society of Environmental Engineers, 37(7), 418-425.
- [26] Hill, D. T., Cobb, S. A. and Bolte, J. P., 1987, “Using volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure”, Trans. ASAE, 30(2), 496-501.
- [27] Song, Y. C., Feng, Q., and Ahn, Y., 2016, “Performance of the bio-electrochemical anaerobic digestion of sewage sludge at different hydraulic retention time”, Energy & Fuels, 30(1), 352-359.
- [28] Kim, D. H., Song, Y. C., and Feng, Q., 2015, “Influence of applied voltage for bioelectrochemical anaerobic digestion of sewage sludge”, J. of Korean Society of Environmental Engineers, 37(9), 542-549.
- [29] McCarty, P. L., 1964, “Anaerobic waste treatment fundamentals, Part 3 : Toxic materials and their control”, Public Works, Nov., 91-94.
- [30] Perkin, G. F., and Miller, S. W., 1982, “Response of methane fermentation to continuous addition of selected industrial toxicants”, Proceeding of the 37th Predue Industrial Waste Conference, Lafayette, Ind., 729-743.
- [31] Hong, J. S., Kim, J. W., and Shin, D. Y., 2008, “A study on the comprison of operation for long & short time in the DRANCO process”, J. of Environmental and Sanitary Engineering, 23(4), 73-82.
- [32] De Baere, L., 2010, “The DRANCO technology: A unique digestion technology for solid organic waste”, Organic Waste System(OWS) Pub. Brussels, Belgium.
- [33] Heo, N. H., 2008, “Biogas production and utilization technologies from organic waste”, New & Renewable Energy, 4(2), 21-30.
- [34] Lee, D. Y., Hwang, K. H., Jung, C. H., Lee, Y. J., Kim, C. Y., Oh, Y. K., and Choi, K. H., 2013, “Continuous dry & wet fermentation from food waste”, Korea Organic Resource Recycling Association Symposium, 76-76.
- [35] Kim, K. J., 2012, “Installation of biomass energy plant”, The Korean Society of Mechanical Engineers Symposium, 249-265.