

Research Article

Open Access

## 돈분 슬러리를 이용한 단상 혐기소화공정의 특성연구 및 성능평가

박우균,<sup>1</sup> 전항배,<sup>2</sup> 박노백,<sup>1\*</sup> 권순익,<sup>1</sup> 신중두,<sup>1</sup> 홍승길<sup>1</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원, <sup>2</sup>충북대학교 환경공학과

### Performance Evaluation and Characteristic Study of the Single Anaerobic Digestion from Piggery Slurry

Woo kyun Park,<sup>1</sup> Hang Bae Jun,<sup>2</sup> Noh Back Park,<sup>1\*</sup> Soon Ik Kwon,<sup>1</sup> Joung Du Shin,<sup>1</sup> and Seung Gil Hong<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea, <sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea)

Received: 2 March 2011 / Accepted: 21 March 2011  
© The Korean Society of Environmental Agriculture

#### Abstract

**BACKGROUND:** Disposal of slurry animal manure produced by an anaerobic slurry-type barn method is not easy since the animal slurry contain high moisture content which makes solid-liquid separation a difficult process. However, recently, the interest about anaerobic digestion process as an environment-friendly waste disposal method has gained a wide interest because it can treat highly organic matter contained by the piggery slurry, decrease the odor after treatment, and enable the effective recovery of the methane gas which is a valuable energy resource. The objectives of this study were to identify the solubilization characteristics and to improve the anaerobic digestion efficiency of piggery slurry through full-scale anaerobic digestion experiments. **METHODS AND RESULTS:** In a full-scale continuous anaerobic digestion operation, the adaptability of single anaerobic digestion and its digestion efficiency were also evaluated in the farm field. The actual pH range and alkalinity concentration of piggery slurry used during the operation were comparatively higher than the concentrations of pH and alkalinity in the digestion tank which were stable at 7.5~8.0, 4,008 mg/L (asCaCO<sub>3</sub>), respectively. The removal efficiency of organic matter (TCOD) by anaerobic digestion was 75~90% and methane gas production amount was at 0.33 L/L/day, a little higher than that of ordinary animal manure.

robic digestion was 75~90% and methane gas production amount was at 0.33 L/L/day, a little higher than that of ordinary animal manure.

**CONCLUSION(s):** Our findings showed higher recovery of highly purified methane and greater efficiency of anaerobic tank digestion since its methane gas content was at 65~70%.

**Key Words:** Full scale biogas plant, Methane production, Piggery slurry, Single Anaerobic digestion

#### 서론

가축분뇨는 생활오수에 비해 발생량은 적으나 고형물 농도가 매우 높아 환경오염 부하량이 크기 때문에 적정처리를 목적으로 연구되어 왔다(Park *et al.*, 2009). 그러나 가축분뇨는 혐기성 소화시 유용에너지 자원인 메탄가스의 효과적인 회수가 가능하여(Bonmati *et al.*, 2001; Van Lier *et al.*, 2001), 가축분뇨의 처리와 대체에너지의 개발, 온실가스 감축을 동시에 만족할 수 있는 방법으로 혐기성 소화공정이 제시되고 있다.

최근의 혐기성 기술은 환경오염에 의한 생태계의 위협은 물론 에너지 고갈이라는 시대적 상황이 고농도 유기성 폐수처리와 함께 에너지 생산이라는 필수적인 기술로 인식되기에 이르렀다. 혐기성 공정은 전통적인 완전혼합형 반응조(Continuous Stirred Tank reactor, CSTR)로부터 혐기성 여상(Anaerobic Filter; Young and McCarty, 1969), 혐기성 유동상 반응조(Anaerobic Fluidized Bed Reactor; Frostell, 1982),

\*교신저자(Corresponding author):  
Tel: +82-31-290-0233 Fax: +82-31-290-0206  
E-mail: pnb502@korea.kr

다단협기성 반응조(Anaerobic Baffled Reactor, ABR; William *et al.*, 1999) 및 상향류식 혐기성 블랭킷 반응조(Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB; Lettinga *et al.*, 1980) 등이 개발되어 다양한 고효율(high-rate) 시스템 형태로 발전되어 왔다. 이러한 고효율 혐기성 공정들은 메탄생산, 수소생산 (Markov *et al.*, 1995) 및 질소제거 등의 다양한 목적과 대상 폐수에 따라 보다 최적화된 형태의 2상 혐기성 공정(Two Phased Anaerobic Digestion, TPAD; Shin *et al.*, 2001), 통합 소화 공정(co-digestion; Callaghan *et al.*, 1999) 및 혐기-호기(anaerobic-aerobic) 복합공정 등으로 진보되어 왔다. 특히 1980년대에 개발된 UASB 공정은 반응조내 대량의 혐기성 메탄생성균을 확보할 수 있는 장점과 처리효율이 뛰어나 다양한 산업폐수 및 도시하수 처리에 적용되고 있으며(Lettinga *et al.*, 1993; Fang *et al.*, 1995), 혐기성 소화조의 단점인 긴 체류시간을 극복하여 전 세계적으로 실용화된 혐기성 공정 중 60% 이상을 차지하고 있다. 그러나 총 유기물(TS, total solid) 함량이 2% 이상인 폐수의 경우 CSTR 형태의 반응조 운전이 일반적이며 유기물 부하가 높을 경우 2-stage 또는 2-phase 등이 논의되어 왔다.

그러나 국내에서 혐기성 소화기술의 실용화 사례가 많지 않은 것은 다른 처리방법에 비하여 초기 시설투자비 및 소요면적 등이 크고 유지관리 측면에서 많은 어려움이 있기 때문으로 판단된다. 혐기성 소화기술의 많은 장점에도 불구하고 국내에서 가축분뇨 처리를 위한 혐기성 소화가 미진한 것은 공정의 부적절한 설계와 운전미숙, 계절별 축사관리 방법 등에 따른 돈분 슬러리의 성상에 적절하게 대처하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 혐기소화 특성을 반영한 실제 규모의 혐기성 소화공정을 설계, 제작하여 돈분 슬러리를 대상으로 운전하고, 고형물 농도변화 및 제거효율, biogas 발생량 등을 검증하였다. 또한 혐기성 소화공정의 개발 및 소화효율 증대와 바이오에너지인 메탄가스의 회수 이용기술을 확립하는데 목적을 두고 농가 현장에서도 적용이 가능한 실제 규모의 혐기성 소화 시스템을 이용하여 돈분 슬러리 처리에 대한 운전 특성과 처리효율 및 적용 가능성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 공시원수

돈분 슬러리를 대상으로 중온 소화방식의 실규모 플랜트를 운전하였다. 공정에 유입된 돈분 슬러리의 pH는 평균 7.0 이었고, TS(total solid)와 VS(volatle solid)은 각각 3, 2.5 % 이었다. 유입된 유기물의 화학적산소요구량(COD)은 변동이 크게 나타났는데, 평균적으로 약 32,000 mg/L 정도로 유입되었다. 돈분 슬러리 내 포함된 총질소(total nitrogen) 농도는 약 1.04 ~ 3.56 g/L로 평균 약 1.35 g/L의 질소가 유입되는 것으로 나타났다. 운전기간 동안 돈분 슬러리의 성상은 Table 1과 같다.

### 실험장치 및 방법

돈분 슬러리를 1일 10 m<sup>3</sup> 씩 투입할 수 있는 중온 혐기성 소화방식의 실규모 plant에서 본 연구를 수행하였다. 실규모의 plant 운전은 1999년부터 2003년까지 약 3년 정도를 운

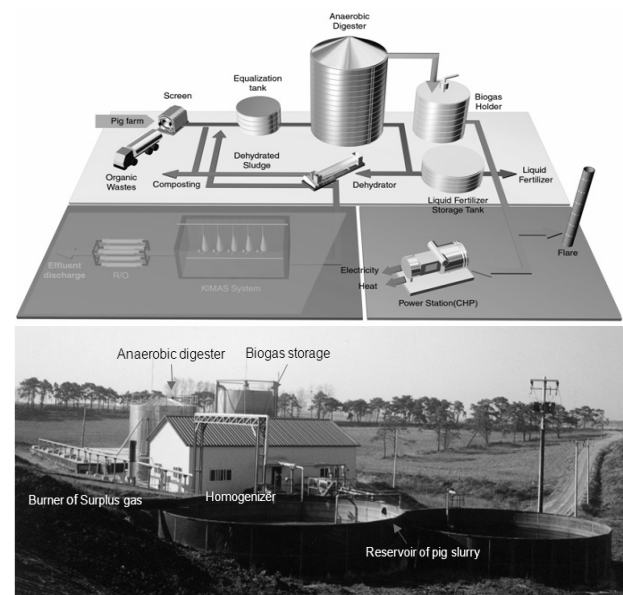


Fig. 1. Schematic diagram of full-scale anaerobic digestion system.

Table 1. Components of raw piggery slurry for this experiment

Component	Range	Average
pH	6.11~7.3	7.0
TS (%)	0.4~4.2	3.02
VS (%)	0.2~3.5	2.0
VS/TS (%)	51~78	70
COD (mg/L)	12,340~48,300	32,000
T-N (mg/L)	1,047~3,561	1,345
Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	2,010~7,000	4,008

전하였으나, 초기 12개월은 시운전 및 안정화를 위한 운전기간으로 본 실험에는 정상상태(steady state)에서의 결과를 나타내었다. 본 실험에 사용된 실규모 플랜트는 Fig.1과 같은 흐름을 기본으로 하여 설계하였고, 충남 C지역에 제작 설치하여 운영하였다. 사용된 시스템 전체의 구성은 돈분 슬러리 저장조, 균등조, 열교환기, 혐기성 소화조, 가스 포집조, 소화액 저장조, Biogas 보일러, Biogas 발전기로 구성하였다. 실험에 사용된 혐기성 소화 시스템의 규모는 1일 돈분 슬러리 10 m<sup>3</sup>이 처리 가능한 규모(돼지 1,800두)이며, 혐기성 소화조의 유효용량은 200 m<sup>3</sup>으로 지상부에 설치하였다. 가스 포집조는 가스의 유입과 함께 가스 포집조가 물위로 부상하는 부상식 가스 포집조를 이용하였고, 가스 포집용량은 100 m<sup>3</sup>으로 하였다. 포집된 바이오 가스는 물 트랩을 통하여 수분이 분리된 후 가스 보일러 또는 가스발전기의 원료로 사용 가능하게 설계하였으며, 혐기성 소화조의 온도 유지를 위한 에너지는 가스보일러나 가스발전기 운전으로 생산되는 온수를 별도의 온수 저장조에 저장하고 열교환기를 이용하여 에너지를 공급할 수 있도록 하였다. 혐기성 소화조의 소화온도를 계측하기 위하여 소화조의 상단과 중앙에 온도센서가 설치되었으며, 소화액의 혼합정도를 판단하는데 이용하였다.

시스템의 최초 운전을 위하여 혐기성 소화의 발효 미생물로 사용된 식종 슬러리(seed sludge)는 C시 하수처리장의 소화 슬러리를 사용하였으며, 시료로 사용된 돈분 슬러리는 1차 스크린을 통과한 액상물질을 사용하였다. 혐기성 소화조에 투입되는 기질은 슬러리 돈사의 바닥 아래에 설치된 피트(pit area)에서 7~20일 정도 체류과정을 지난 후 돈분 슬러리 저장조로 이송된다. 이송된 돈분 슬러리는 하루 1~3회 일정량(평균 약 10 m<sup>3</sup>)을 수중 슬러리(slurry) 펌프를 이용하여 균등조로 이송하여 실험에 사용하였다. 매회 펌프를 작동하기 전에 저장조 내부의 기질을 송풍기(blower)로 약 1시간 교반하여 성상이 일정하게 유지 되도록 하였다. 그리고 균등조로 이송하기 전에 3 mm 진동 스크린을 이용하여 돼지체모 등 협잡물을 제거하고 짧은 시간 내에 소화효율을 높일 수 있도록 하였다. 균등조에서 일정한 양이 혐기성 소화조로 투입되면 동시에 혐기성 소화조 내의 발효잔류물은 투입되어진 양 만큼 소화액 저장조로 월류시키고 이때 유출되는 소화액은 고형물의 유출을 최소화하기 위하여 소화조 상부에 별도의 분리벽을 설치하여 운전하였다. 소화조내의 소화액 혼합을 위하여 소화조 외부에 설치된 소화액 순환펌프(3.5 kW)를 1일 24시간 연속 가동하였고, 소화액의 온도가 균일하지 않은 경우에는 혼합 상태가 불량한 것으로 판단하여 외부와 완전 밀폐된 가스 송풍기를 추가로 가동하여 바이오 가스를 소화조 내부에서 순환시킴으로써 교반 강도를 높여주었다. 혐기성 소화조의 온도는 Biogas 발전기와 보일러에 의해 35 ± 1°C로 유지되도록 설정하였고, 발효조 내의 가스 압력은 혐기성 소화조 상부에 가스압력계와 가스압력 조절기를 설치하여 약 1.765 kPa가 되도록 자동조절 장치를 설치하여 운전하였다. 또한 모든 시스템의 운영은 센서(sensor)에 의한 중앙자동제어 방식으로 운영하였다.

## 분석방법

본 시험에서의 분석항목 pH, 알칼리도, TS(total solids), VS(volatil solids), COD<sub>C</sub>(chemical oxygen demand), SCOD<sub>C</sub>(soluble COD), TN(total nitrogen)는 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 분석하였다. 가스 발생량은 현장에 설치된 Wet Gas Meter를 이용하였으며, 가스조성은 검지관법 및 Gas Chromatograph(GC/TCD)을 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 실규모 플랜트에서 유기물 및 pH 변화

Fig. 2는 10 ton/day 실 규모 혐기소화 시스템에서 TCOD의 거동을 나타낸 것이다. 메탄생성조(혐기소화조)의 유기물 부하율(OLR)은 0.5~3 kg-VS/m<sup>3</sup>·day 범위였다. 운전초기 혐기성소화조의 충격부하를 감소하기 위해 낮은 유기물 부하율에서 시작하였으며, 유입 TCOD는 약 18,000 mg/L이었고 혐기성소화조의 유출 TCOD는 약 3,800 mg/L로 약 78% 정도의 제거효율을 나타내었다. 운전기간 약 200일 이후부터 유입 돈분슬러리의 평균 TCOD가 약 34,000 mg/L로 증가하였을 경우 혐기소화조에서 유출되는 유기물 농도는 2,000 mg/L 이하로 약 90% 정도의 안정적인 제거효율을 나타내었다. 이는 소화조의 수리학적체류시간(HRT)이 길어 생물학적으로 이용 가능한 유기물의 전환이 활발한 것으로 판단된다.

혐기소화조 유출수의 용존유기물농도(SCOD)도 1,400 mg/L 이하로 제거되는 것으로 나타났는데, 유입원수의 BOD<sub>5</sub>/TCOD의 비는 0.42이고, 최종 유출수의 BOD<sub>5</sub>/TCOD비는 0.08로 유출수내 TCOD는 대부분 난분해성 유기물인 것으로 예상된다. 또한 유출 TCOD 중 SCOD가 약 70% 이상 차지하는 것으로 나타나 혐기소화조에서 유출되는 난분해성 유기물은 용존성 유기물 형태로 배출되는 것으로 나타났다.

pH는 혐기성 반응에서 중요한 인자 중 하나이며, 메탄생성균은 pH에 매우 민감하나, 산생성균은 메탄생성균에 비해 덜 민감한 것으로 알려져 있다. 하지만 산생성균은 pH 변화에

Table 2. Operating conditions of full-scale anaerobic digestion system

Parameter	Conditions
Digester type	Single CSTR
Digester volume (m <sup>3</sup> )	200
Hydraulic retention time (day)	20
Temperature (°C)	35±1
Mixing method	Gas circulation
Operation method	Semi-continuous
Organic loading rate (kg-VS/m <sup>3</sup> ·day)	0.5~3

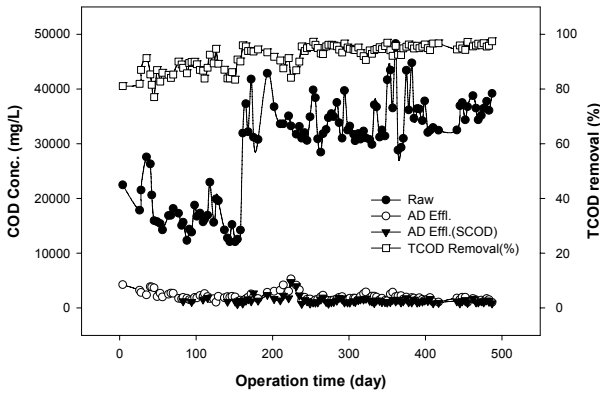


Fig. 2. Variations of organic concentrations during the anaerobic digestion operating periods in raw pig slurry and digester.

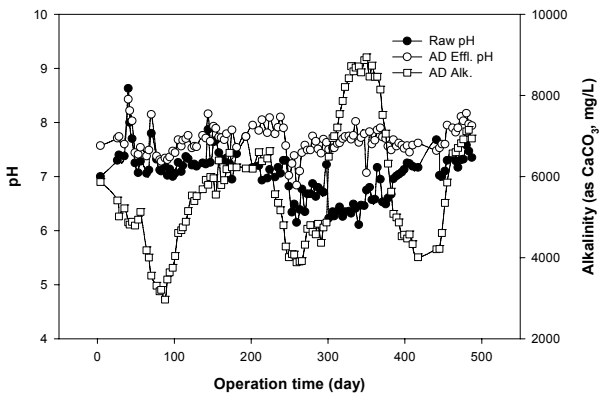


Fig. 3. Variation of pH and alkalinity during the anaerobic digestion operating periods.

따른 VFAs(volatile fatty acids) 생성이나 가수분해에 영향을 받는 것으로 여러 연구자들에 의해 증명되었다(Breure and Van andel, 1984; Bull *et al.*, 1984). 최적의 메탄생성 미생물의 성장을 보장하는 pH는 6.5~7.6 범위로 매우 좁은 편이다. 반면 혐기성소화공정에 의한 유기물의 메탄전환에 필수적인 단계인 유기산 생성단계에서는 고농도의 유기산과 이산화탄소가 생성되어 pH가 저하되기 때문에 기질의 특성에 따라 메탄생성균의 활성을 유지하기 위해 알칼리도의 공급이 불가피하게 된다.

Fig. 3은 혐기성 소화 운전 중 pH 및 알칼리도 변화를 보여주고 있다. 전체 운전기간 중 축산분뇨의 pH는 약 6~8 범위였으며, 소화조 내의 pH는 7.2~8.0 범위로 유입수 pH 보다 높은 경향을 보였다. 알칼리도의 농도는 약 3,500~9,000 mg/L (as CaCO<sub>3</sub>)로 비교적 변동 폭이 컸는데, 이는 가축축사 내에서 사용되는 청소수에 의해 알칼리도의 변화가 있는 것으로 판단된다. 그러나 청소수에 따른 알칼리도의 감소에도 불구하고 소화조내의 pH가 비교적 안정적인 농도를 보인 것은 돈분내 포함되어 있는 알칼리도의 양이 충분하고 소화조의 체류시간이 길기 때문에 산생성 미생물과 메탄생성 미생물의 상호작용이 균형을 이룬 것으로 판단된다. 일부 연구자들은

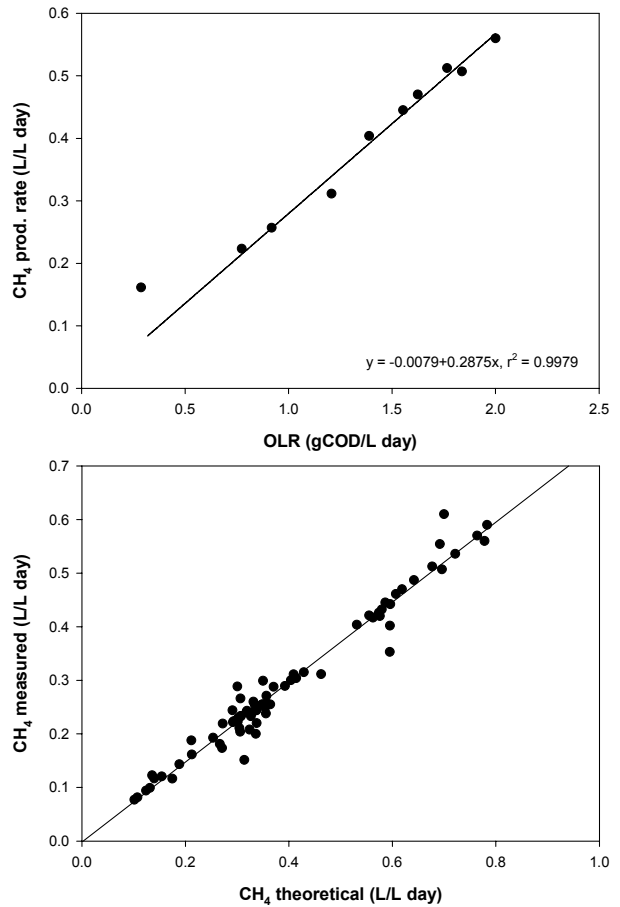


Fig. 4. Methane production various operation modes in single anaerobic digestion reactor.

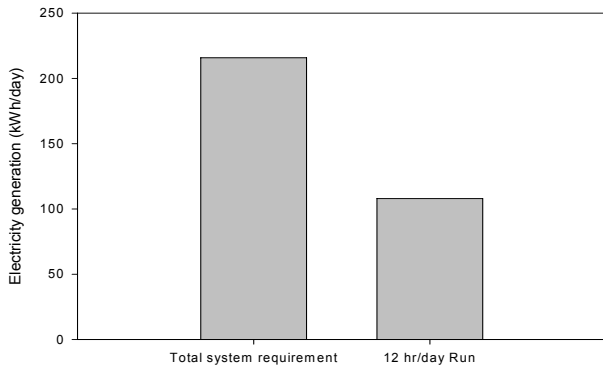
산생성 또는 혐기성소화공정에서 pH 조절을 하지 않는다면 pH 값이 5~7 범위에서 완충되는 경향이 있기 때문에 산생성 단계에서 pH는 변화하지만 최종 pH는 알칼리도 및 화학적 조성과 같은 폐수의 특성에 더욱 의존적이라고 주장하였다(Breure and Van andel, 1984; Bull *et al.*, 1984). 1차 슬러지를 소화시키는 경우에 알칼리도는 4,000 mg/L 이하, 폐슬러지를 소화시키는 경우에 있어서 pH는 약 7.5~8.5 정도로 유기물의 종류에 따라 차이가 있음을 보여주고 있다. Metcalf and Eddy(2004)에 의하면 35°C의 중온 혐기성 소화에서 정상적인 소화를 위해서는 알칼리도가 최소한 1,000~5,000 mg/L로 알려져 있다.

바이오가스 발생 및 전력생산 특성

Fig. 4는 실규모 혐기성소화조에서 메탄가스 발생량을 나타낸 것이다. 전체 운전기간 동안 OLR(organic loading rate) 증가에 따라 가스 총 발생량이 증가하였으며, OLR 1.2 에서 약 0.69 L/L·day(단위 반응조 부피당 하루에 발생한 gas 양)가 발생하였다. 이 때 메탄가스 발생량은 0.33 L/L·day로 약 48%이었다. 제거된 COD를 포도당으로 환산하여 계산된 이론적 메탄발생량(식 1)은 평균 0.52 L/L·day이었고 실제 메탄 발생량은 계산값의 약 63% 정도였다. Park 등(2009)은 돈분

**Table 3. Biogas composition during anaerobic digestion operating**

CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	others
65~70%	25~30%	4~5% (H <sub>2</sub> S : 3~6 ppm)



**Fig. 5. Electricity produced by generators operation hours.**

폐수의 2상 소화 공정에서 OLR 1.2 gSCOD/L·day 에서 0.38 L/L/day의 메탄가스를 생산하였으며, Oh 등(2007)의 연구에 의하면 TPAD 시스템을 이용한 양돈폐수의 메탄발효 실험을 통하여 OLR 1.8~14.4 g/L·day에서 0.3~0.42 L-CH<sub>4</sub>/g-COD<sub>removed</sub>의 메탄가스가 발생하였다. Lee and Kim(1999)은 양돈폐수를 대상으로 2상 소화 시스템에서 OLR 2.2 g-COD/L·day에서 0.333~0.492 L-CH<sub>4</sub>/g-COD-day의 메탄가스가 발생하였다고 하였다. 또한 Cavaleiro 등(2008)은 도시 하수에 저분자 유기산을 병합하여 OLR 3.6 g-COD/L·day 에서 0.45 L-CH<sub>4</sub>/g-COD-day의 메탄가스가 발생하였다고 보고하였는데, 폐수의 성상은 다르나 OLR을 기준으로 볼 때 메탄전환율은 비슷한 것으로 나타났다.

$$\text{이론적 메탄가스발생량 (L/L·day)} = \frac{\text{Methaneconversion}(\%)}{\text{Removed COD}(\text{mg/L})} \cdot 0.3974\text{L/g-COD} \quad (\text{식 1})$$

혐기성 소화에 의한 바이오 가스의 조성은 Table 3과 같이 CH<sub>4</sub>가 65~70%, CO<sub>2</sub>가 25~30%이었다. Metcalf and Eddy (2004)는 메탄함량은 소화조에 공급되는 유기물질의 종류에 따라 다르며, 지방이 62~72%, 단백질이 73%, 조섬유가 45~50%를 함유한다고 보고하였다. 또한 USEPA(1997)에 따르면 혐기성 소화에서 전형적인 가스의 조성은 메탄이 70%일 때 이산화탄소 29%와 Hydrogen sulfide 0.01%, 메탄이 75%일 경우에는 이산화탄소 22% 기타 Hydrogen, Nitrogen 및 Hydrogen sulfide가 약 3%를 차지한다는 보고와 유사하였다. 황화수소는 바이오가스 발전기 부식에 가장 큰 영향을 미치는데, 황화수소 함량이 미량(6 ppm 이하)으로 혐기성 소화공정에서 황화수소 가스를 줄이기 위해 FeCl<sub>3</sub> 주입설비를 설치하여 돈분 슬러리 투입시 35% 액상 FeCl<sub>3</sub>을 1,000 mg/L로 주입

하면서 제거된 것으로 판단된다.

발생되는 바이오가스는 Dual fuel형 열병합 발전시스템 (37kW, 60Hz, 220/380V)을 이용하여 전기와 온수를 생산하는데 이용하였다. Fig. 5는 현장에서 시설의 운전에 요구되는 총 전력요구량은 215.8 kWh로 발전기 1기를 이용하여 1일 12~18 시간을 가동하였을 때 전력요구량의 50~75% 수준으로 공급이 가능하였다. 발전량은 발전기의 무리한 부하를 방지하기 위해 1일 18시간 이상은 가동하지 않았으며, 발전기의 부하가 5~9 kW시 평균 1 kWh의 전력을 생산하기 위한 바이오가스 소모량은 1.8 m<sup>3</sup>으로 나타났다.

### 요 약

축산농가에서 발생하는 돈분 슬러리의 처리 능력을 평가하기 위하여 Full-scale의 단상 혐기성 소화조에서 중온소화와 고형물 체류시간을 20일로 하여 연속적으로 운전하면서 성능평가 및 특성연구를 실시하였다. 운전기간 중 알칼리도는 약 4,000 mg/L(3,500~9,000 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)이었고, 소화조 내의 pH는 7.5~8.0 범위로 약간 높은 경향이었으나 pH는 안정적이었다. 바이오가스의 발생량은 OLR 1.2 g-COD/L·day에서 0.69 L/L·day의 바이오가스를 생산하였고, 제거된 COD를 바탕으로 계산된 메탄가스 발생량은 63% 수준이었다. 생산된 바이오가스 중 메탄가스 함량은 65~70%이었고, CO<sub>2</sub>는 약 30% 전후였으며, 열병합 발전을 실시하였을 때 총전력요구량의 50~75% 수준을 공급하였다. 또한 발전기 부하가 5~9 kW시 평균 1 kWh의 전력을 생산하기 위한 바이오가스 소모량은 약 1.8 m<sup>3</sup>이었다. 따라서 실제 규모의 plant에서 약 500일간 운전한 결과 유입되는 돈분 슬러리의 TS 농도에 상관없이 소화조 내에 일정 농도의 유기물을 확보할 수 있었고, 바이오가스의 발생량은 일반적인 축산분뇨 가스 발생량 보다 높게 나타나 단상 혐기성 소화공정으로 고효율 처리가 가능한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

APHA, 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., Washington, D.C.  
 Bonmati, A., Flotats, X., Mateu, L. and Campos, E., 2001. Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry, *Wat. Sci. Tech.*, 44(4), 109-116.  
 Breure, A.M. and Van Andel, J.G., 1984. Hydrolysis and acidification fermentation of a protein gelatin in an anaerobic continuous culture, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 20(1), 40-45.  
 Bull, M.A., Steritt, R.M. and Lester, J.N., 1984. An evaluation of single- and separated-phase anaerobic industrial wastewater treatment in fluidized bed reactors, *Biotechnol. Bioeng.*, 26(9), 1054-1056.

- Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. and Forster, C.F., 1999. Co-digestion of waste organic solids : batch studies, *Bior. Technol.* 67(2), 117-122.
- Cavaleiro, A.J., Pereira, M.A. and Alves, M., 2008. Enhancement of methane production from long chain fatty acid based effluents, *Bior. Technol.* 99, 4089-4095.
- Fang, H.H.P., Chui, H.K., Li, Y.Y. and Chen, T., 1995. Effect of degradation kinetics on the microstructure of anaerobic biogranules, *Wat. Sci. Tech.*, 32(8), 165-172.
- Frostell, B., 1982. Anaerobic fluidized bed experimentation with a molasses wastewater, *Process Biochem.*, Nov/Dec, 37-40.
- Lattinga, G., Man, A.D., van der Last, A.R.M., Wiegant, W., Frijns, J. and van Buuren, J.C.L., 1993. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, 27(9), 67-73.
- Lee, G.H. and Kim, J.S., 1999. Treating swine wastewater by anaerobic bioreactors, *Korean J. Environ. Agric.* 18(1), 54-60.
- Lettinga, G., van Velsen, A.F.M., Hobma, S.W., de Zeeuw, W. and Klapwijk, A., 1980. Use of the up-flow sludge blanket(USB) concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment, *Biotechnol. Bioeng.*, 22, 699-734.
- Markov, S.A., Bazin, M.J. and Hall, D.O., 1995. The potential of using cyanobacteria in photobioreactor for hydrogen production, *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 52, 59-86.
- Metcalf and Eddy, 2004. Wastewater engineering: Treatment and reuse, *Fourth Edition*, McGraw-Hill Inc.
- Park, N.B., Park, S.M., Choi, W.Y. and Jun, H.B., 2009. Methane production and nitrogen removal from piggery wastewater in the TPAD coupled with BNR process, *Korean J Water Qual.* 25(1), 18-25.
- Shin, H.S., Han, S.K., Song, Y.C. and Lee, C.Y., 2001. Performance of UASB reactor treating leachate from acidogenic fermenter in the two-phase anaerobic digestion of food waste, *Wat. Res.*, 35(14), 3441-3447.
- USEPA, 1997. A manual for developing biogas systems at commercial farms in the united states, *Ag STAR Handbook*, EPA-430-B-97-015, *US Environmental Protection Agency, Atmospheric Pollution Prevention Division*, Washington, D. C.
- Van Lier, J.B., Tilche, A., Ahring, B.K., Macarie, H., Moletta, R., Dohanyo, M., Hulshoff Pol, L.W., Lens, P. and Werstraete, W., 2001. New perspectives in anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, 43(1), 1-18.
- William, P., Barber, M. and David, C.S., 1999. The use of the anaerobic baffled reactor(ABR) for wastewater treatment, *Wat. Res.*, 33(7), 1559-1578.
- Young, J.C. and McCarty, P.L., 1969. The anaerobic filter for waste treatment, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 41, 160-173.