

Comparison of the Performance of Chamber and Bag Digesters for Solid State Anaerobic Digestion of Separated Solid Fraction of Swine Manure

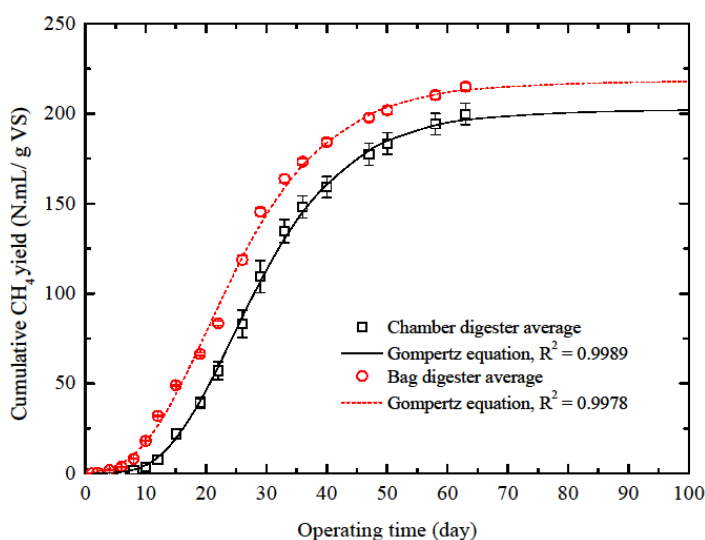
Jaehee Lee, Seunghun Lee, Eunjong Kim, Hyunsoo Jo, and Heekwon Ahn*

Dept. of Animal Biosystems Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received: April 5 2015, Revised: April 16 2015, Accepted: April 17 2015)

The performance of chamber and bag digesters for solid state anaerobic digestion (SS-AD) of separated solid fraction of swine manure was investigated using lab-scale digester (4,460 mL total volume and 1,800 mL of effective volume) operating at 37°C for 63 days. The performance of two different digester types was evaluated in terms of the kinetic constants of methane production obtained from the Gompertz and Gaussian equations. Methane production potential of chamber and bag digester was 202 and 218 N·mL CH₄/g VS. Time to produce 95% methane production potential (T₉₅) and calculated effective anaerobic digestion time were 55.5 days and 41.8 days for chamber digester and 52.8 days and 43.5 days for bag digester, respectively. Our results reveal that the performance was not significantly different between chamber and bag digester.

Key words: Solid-state anaerobic digestion, Bag digester, Chamber digester, Swine manure



The performance of anaerobic digestion was not significantly different between chamber and bag digester. Methane production potential of chamber and bag digester was 202 and 218 N·mL CH₄/g VS.

*Corresponding author : Phone: +82428215785, Fax: +82428232766, E-mail: hkahn@cnu.ac.kr

§Acknowledgement: This study was financially supported by research fund of Chungnam National University in 2013.

Introduction

국내 양돈농가는 '13년 통계청 제시 기준 약 5,640호이며, 농가당 평균 사육두수는 1,759두로 '12년에 비해 농가호수는 감소한 반면 지속적인 규모화로 농가당 평균 사육두수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이로 인해 '13년 기준 돈분뇨 발생량은 1,831만톤으로 우리나라 전체 가축분뇨 발생량의 39%를 차지하고 있다. 국내에서 발생된 돈분뇨를 안정적으로 처리하기 위해서는 처리형태를 다양화할 필요가 있다. 퇴액비화 위주의 기존 처리방법은 돈분뇨를 작물에 필요한 비료원으로 자원화하는 것을 주목적으로 하고 있으나 혐기소화 처리방법은 돈분뇨로부터 대체에너지를 생산하고 혐기소화 공정을 거친 최종산물을 퇴액비 형태로 토양에 환원할 수 있어 돈분뇨의 가치를 비료자원과 더불어 에너지원으로 확대시키는 장점이 있다.

혐기소화 (Anaerobic Digestion, AD) 시스템은 밀폐된 상태에서 분뇨를 처리하므로 악취 제어가 용이하고 바이오가스를 활용한 대체 에너지 생산이 가능해 전 세계적으로 가축분뇨 처리용으로 많이 이용되고 있으며 (Alastair J. Ward et al., 2008) 원료의 함수율에 따라 고상 (Solid-State Anaerobic Digestion, TS > 20%), 반건식 (Semi-dry Anaerobic Digestion, 12% < TS < 20%) 및 습식혐기소화 (Wet Anaerobic Digestion, TS < 12%) 등으로 구분된다 (Sigrid Kusch, 2013).

젖소분뇨, 한우분뇨, 고액분리된 돈분뇨 고형물의 경우 고상혐기소화에 적절한 수분을 유지하고 있는 것으로 알려져 있다 (Ahn et al., 2010; Schäfer et al., 2006). 고상혐기소화 기술은 고상 유기물 처리에 적합한 시스템임에도 불구하고 젖소분뇨, 한우분뇨, 고액분리된 돈분뇨 고형물 등을 대상으로 한 고상혐기소화 기술개발 연구가 국내에서 수행된 사례는 많지 않다.

바이오가스 생산효율 및 설치운영비 등을 고려해 Indian digester, Chinese digester, Bag digester, Plug flow digester, Batch digester 등 다양한 형태의 혐기소화조가 개발된 바 있다 (W.E. Edlmann, 1986). 설치비용이 상대적으로 매우 저렴한 PE (Poly ethylene)나 HDPE (High density poly ethylene)를 재질로 만들어진 고상혐기소화용 Bag digester의 경우 내구성이 좋지 않아 장기적인 사용이 어려울 뿐만

아니라 바이오가스 생산효율 유지에 제한적인 요소들이 많은 것으로 보고되고 있다 (Joy Agnew et al., 2011; C.J. Sangeetha et al., 2012; Nguyen, Vo Chau Ngan et al., 2012). 고상혐기소화용 Bag digester의 경우 Bag내에 고상물과 액상물이 혼합된 상태로 처리되는 특징이 있다. 고상혐기용 Chamber digester는 Chamber 내부에 설치된 스크린에 의해 고상물과 액상물이 분리된 상태로 처리가 가능해 고상물 교반 및 액상물 (침출수) 재순환 등의 운영전략 접목이 용이한 장점이 있는 반면 초기투자비용이 높은 단점이 있기도 하다.

본 연구에서는 고액분리된 돈분뇨 고형물 혐기소화 시스템 설계 시 접목 가능한 Chamber와 Bag digester의 특성을 이해하고 각각 소화조 형태별 필요한 설계인자를 도출하기 위한 목적으로 Chamber와 Bag digester의 혐기소화 효율을 비교 평가하였다.

Materials and Methods

고액분리 돈분뇨 및 접종슬러지 본 연구에서는 논산 계룡축협 공동자원화시설에 설치된 저속데칸타를 이용해 고액분리 과정을 거친 돈분뇨 고형물을 기질 (Substrate)로 사용하였으며, 대전 하수종말처리장의 소화조에서 채취한 접종액을 3,500 rpm에서 30분간 원심분리과정을 거쳐 고액분리한 고형물을 접종슬러지 (Inoculum)로 사용하였다. 고액분리된 돈분뇨 고형물과 접종슬러지는 실험에 이용될 때까지 4°C로 저장 보관하였으며, 접종슬러지는 실험 착수 전 2주간 혐기상태에서 Starvation 시킨 후 사용하였다. 본 연구에 이용된 고액분리된 돈분뇨 고형물과 접종슬러지의 함수율은 각각 72.6±0.1%, 89.8±0.5% (w.b.; wet basis)이고 휘발성 고형물은 각각 92.6±0.3%, 59.0±1.8% (d.b.; dry basis) 이다 (Table 1).

고상혐기소화 고액분리된 돈분뇨 고형물과 접종슬러지 혼합물을 4:1의 비율 (VS 기준)로 혼합 후 Chamber digester는 4,460 mL 부피 아크릴 반응기에 넣어 실리온 패킹으로, Bag digester는 동일한 부피의 PE bag에 넣어 열선이 장착된 진공포장기 (FreshpackPro)로 기밀을 유지하였으며, 발생된 바이오가스는 5 L Tedlag bag을 이용해 저장

Table 1. Characteristics of separated solid fraction of swine manure, sewage sludge and mixture (Mean±S.D., n = 3).

Items	Solid-liquid separated swine manure (Substrate)	Sewage sludge (Inoculum)	Mixture (S/I ratio 4)
Moisture content (% , w.b.)	72.6±0.1	89.8±0.5	79.2±0.2
Volatile solids (% , d.b.)	92.6	59.0	78.7
Bulk density (kg/m ³)	422.0±9.9	1,000.0	567.0
Free air space (%)	62.3	4.8	49.9
Feeding (g)	525.9	554.6	1,080.5

하였다. 고액분리된 돈분뇨 고형물과 점종슬러지가 차지하는 유효용적은 1,800 mL로 전체 반응기의 40%에 해당되며, Chamber digester의 경우 반응기 하부에 스크린이 설치되어 있고 스크린 상부 3,080 mL의 58% 용적을 차지하도록 설계해서 실험하였다.

시료분석 함수율은 105°C 에서 24시간 회화로에서 건조시킨 후 측정하였고, 휘발성고형물은 시료를 건조시킨 후 550°C에서 약 8시간 회화 후 측정하였다.

바이오가스의 CH₄, CO₂ 농도는 내경 2 mm, 외경 3 mm, 길이 1.8 m, 80~100 mesh의 Porapak Q column과 열전도도검출기 (Thermal Conductivity Detector, TCD)를 장착한 기체크로마토그래피 (Gas Chromatography, GC; iGC 7200, DS Science, Korea)를 이용해 분석 하였으며, GC는 주입구, 컬럼부, 검출부 모두 50°C 조건에서 헬륨(He)가스 25 mL min⁻¹ 유속으로 분석하였다.

실험방법 Chamber digester는 시료를 반응장치에 투입 후 반응기 총 부피에서 시료가 차지하는 부피 차의 2배 만큼 질소로 Flushing 시켰고, Bag digester의 경우 반응기 내부의 공기를 완전히 제거한 상태에서 실험하였으며, 바이오가스 발생량 평가 및 시료분석은 실험 착수 후 2일까지는 매일, 12일까지는 2일에 한번, 12일 이후부터는 3~4일에 한번씩 수행하였다. 바이오가스량은 Tedlag bag을 분리해서 60 mL 주사기 (Syringe)를 이용하여 수동으로 반복측정 후 표준상태 (0°C, 1atm)에서의 가스부피로 환산하였으며, 본 실험은 총 63일 동안 수행되었다.

모의해석(Simulation) 혐기소화 과정 중 유기물은 최종적으로 메탄과 이산화탄소 형태로 분해되므로 고상혐기소화 과정 중 발생된 메탄과 이산화탄소를 바탕으로 아래의 식 (1)과 (2)를 이용해 고상혐기소화 과정 중 분해된 유기물의 양을 계산하였다.

BMR(Biomass removed) = CH₄ 무게 + CO₂ 무게

$$BMR = \frac{V_o \times \frac{16g}{1mole} \times \frac{CH_4}{100} + \frac{44g}{1mole} \times \frac{CO_2}{100}}{\frac{22.413L}{1mole}} \quad (1)$$

상기 식에 CO₂ = 100 - CH₄를 대입하여 다음과 같은 식으로 도출 할 수 있다.

$$BMR = V_o \times (1.963 - (0.0124 \times CH_4)) \quad (2)$$

여기서, BMR: 제거된 유기물량 (g)

V_o : 발생 가스량 (L)

CH₄ : 메탄 함량 (%)

$$TVS_e = TVS_o - BMR \quad (3)$$

여기서, TVS_e: 분해 후 남아 있는 TVS량 (g)

TVS_o: 초기 TVS량 (g)

초기 휘발성 고형물 총량 (TVS_o) 중에 분해되지 않은 휘발성 고형물 총량 (TVS_e)의 비율 (TVS_e/TVS_o)을 y축에, 운전시간의 역수 (1/digestion time)를 x축에 도식화하면, 운전시간이 무한대로 근접할 때 1/digestion time이 0 (Zero)으로 근접하므로 이 때 y축과 만나는 점은 휘발성 고형물 중 난분해성 부분 (Refractory fraction, R_o)을 의미한다. 기질의 최종생분해도 (Ultimate Biodegradability, UB)는 위에서 언급한 Graphical statistic analysis 방법을 이용해 계산하였다 (Tritt et al., 1991; Kang et al, 1993).

고상혐기소화 과정 중 메탄 발생 특성은 Gompertz equation과 Gaussian equation을 이용해 평가하였다. 식 (4)와 (5)의 상수들은 MS-Excel의 Solver 기능을 이용해 계산하였다.

[Gompertz equation]

$$M = P \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{max} \times e}{P} \right] (\lambda - t) + 1 \right\} \quad (4)$$

여기서, M : 누적 메탄 발생량 (Nm³/ kg VS at time t)

P : 발생 가능한 최대 메탄 발생량 (Nm³/ kg VS)

R_{max} : 일일 최대 메탄 발생량 (Nm³/ kg VS·d)

λ : Lag phase

t : 시간 (day)

[Gaussian equation]

$$y = a \times \exp \left\{ -0.5 \times \left(\frac{t - t_0}{b} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

여기서, y : 일일 바이오가스 또는 메탄 발생량 (Nm³/ kg⁻¹ VS·d)

a : 상수 (Nm³/ kg⁻¹ VS)

b : 상수 (day)

t₀ : 일일 바이오가스 또는 메탄 발생량이 가장 높은 시점 (day)

t : 소화 기간 (day)

Results and Discussion

바이오가스 발생량 평가 Fig. 1, 2는 고상혐기소화 과

정 중 Chamber와 Bag digester의 누적 바이오가스 발생량 및 메탄 발생량 변화를 보여주고 있다. Chamber digester의 경우 누적 바이오가스 발생량 및 메탄 발생량은 각각 353 N·mL/ g⁻¹ VS, 200 N·mL/ g⁻¹ VS이었고, 이 때의 평균 메탄함량은 56.7%이었다. 이에 비해 Bag digester는 누적 바이오가스 발생량 및 메탄 발생량은 각각 358 N·mL/ g⁻¹ VS, 215 N·mL/ g VS로 메탄 발생량이 Chamber digester에 비해 7% 높았으며, 이 때의 평균 메탄함량은 60.1%로 Chamber digester와 유사한 수준을 보였다.

Chamber digester의 경우 메탄함량은 운전 후 10일부터 15일까지 급격한 증가를 보였고 29일부터 완만한 변화를 보이는 반면, Bag digester는 운전 즉시 메탄함량이 증가하기 시작하여 12일까지 급격한 증가를 보였고, 29일부터 완만한 변화를 보였다. Chamber와 Bag digester 메탄함량이 운전 초기에 큰 차이를 보이는 이유는 Bag digester의 경우 고상과 액상이 일정부분 혼합되어 소화효율을 촉진하는 이유로 여겨진다. 그리고 모든 소화조가 운전 후 29일부터 메탄발생량이 급격히 둔화되는 것은 메탄생성균 성장에 필요한 필

수영양분 부족과 더불어 이로 인해 사멸된 세포에서 흘러나온 대사산물 중 독성물질이 누적돼 나타나는 감퇴기 (Phase of decline)에 도달했음을 의미한다고 볼 수 있다 (K.U. Korazbekova et al. 2014).

최종 생분해도 평가 고액분리된 돈분뇨 고형물과 접종슬러지 혼합물을 고상혐기소화시키는 동안 초기 TVS량과 분해되지 않고 남아있는 TVS량에 대한 누적 비율 (TVS₀/TVS_t)을 운전일자의 역수로 환산하여 Fig. 3에 도식화 하였다. 고액분리된 돈분뇨 고형물과 접종슬러지 혼합물 (S/I ratio 4)을 Chamber와 Bag digester에서 63일 동안 혐기소화시킨 결과 최종생분해도 (Ultimate Biodegradability, UB)는 각각 59.0%, 56.3% (p-value 0.320)로 유사한 값을 보였다. 이와 같은 결과는 고액분리 돈분 대상, S/I ratio 0.2~1.4인 조건에서 최종생분해도가 48~51%라고 Moller et al. (2004)이 보고한 결과와 최대 8%의 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 이러한 차이는 원료특성이 상이하기 때문인 것으로 추정된다.

고상혐기소화 과정 중 발생된 메탄과 이산화탄소를 바탕으로 계산한 누적 유기물 제거율을 TVS (Total Volatile

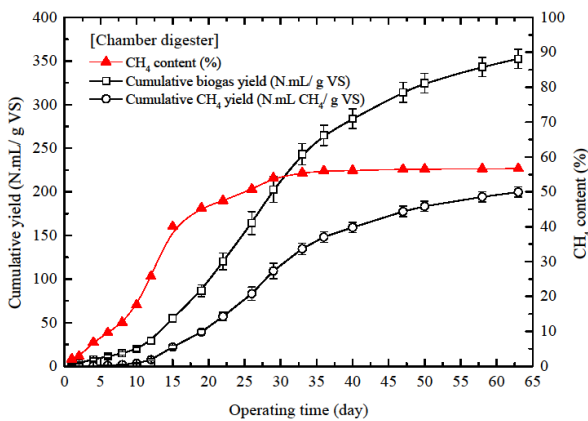


Fig. 1. Cumulative biogas and CH₄ yield of separated solid fraction of swine manure and inoculum mixture in chamber digester.

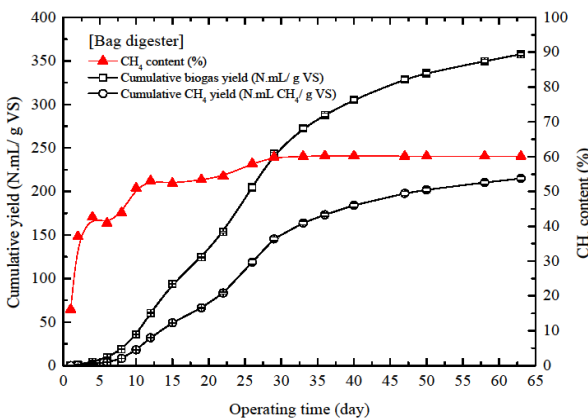


Fig. 2. Cumulative biogas and CH₄ yield of separated solid fraction of swine manure and inoculum mixture in bag digester.

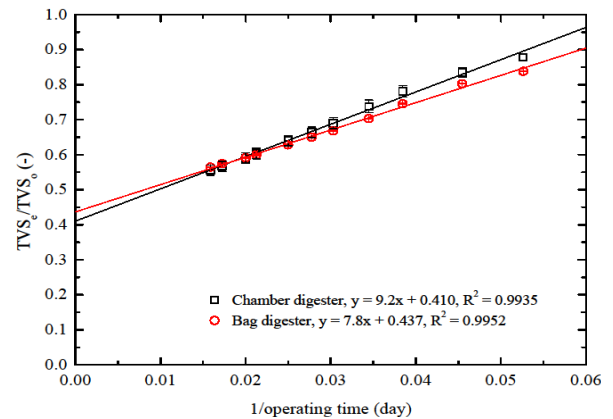


Fig. 3. Comparable graphical determination of the ultimate biodegradability of separated solid fraction of swine manure.

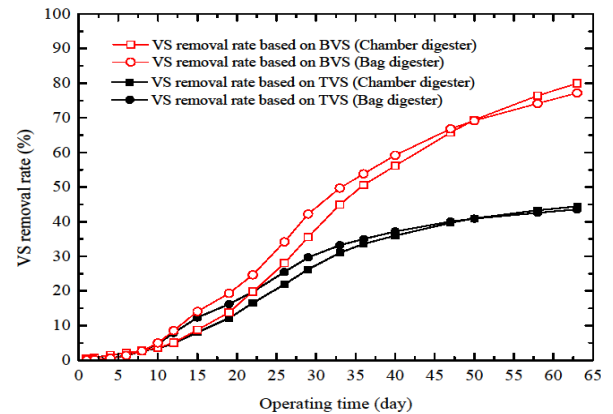


Fig. 4. VS removal rate based on TVS and BVS.

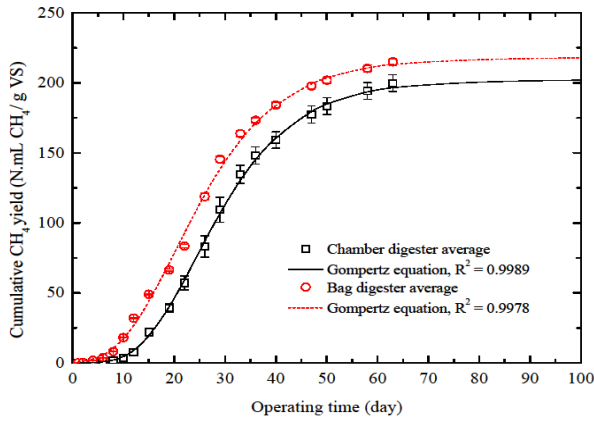


Fig. 5. Experimental and calculated cumulative CH₄ production for chamber and bag digesters using the kinetic model of Gompertz equation.

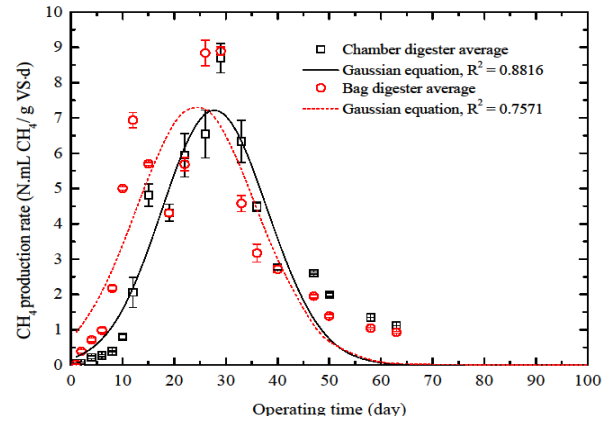


Fig. 6. Gaussian plots of CH₄ production rate for chamber and bag digesters.

Table 2. Kinetic Gompertz and Gaussian parameters of methane production.

Items	Parameters	Chamber digester [†]	Bag digester [‡]
	TVS _c /TVS ₀ (-)	0.41±0.01	0.44±0.01
	Cumulative methane production (N·mL CH ₄ / g VS) (exp.)	199.8±5.9	214.9±2.3
Gompertz parameters	P (N·mL CH ₄ / g VS)	202.1±4.9	218.0±2.3
	R _m (N·mL CH ₄ / g VS)	7.1±0.3	7.3±0.1
	λ (days)	13.7±0.4 [¶]	9.3±0.1 [¶]
	T95 [§] (days)	55.5±1.1	52.8±0.5
	Effective period to produce CH ₄ (days)	41.8±0.7	43.5±0.5
	Determination coefficient (R ²)	0.9989±0.0002	0.9978±0.0000
	Maximum specific CH ₄ yield (N·mL CH ₄ / g VS)	7.3±0.4	7.4±0.1
Gaussian parameters	t ₀ (days)	27.9±0.8 [¶]	24.2±0.1 [¶]
	a (N·mL CH ₄ / g VS)	7.3±0.4	7.4±0.1
	b (days)	10.3±0.4	11.4±0.2
	Determination coefficient (R ²)	0.8816±0.0005	0.7571±0.0067

[†]Mean±S.E., n = 2

[‡]Mean±S.E., n = 3

[§]Time to produce 95% CH₄ production potential.

[¶]Means with different superscripts are significantly different (p < 0.05).

Solid) 기준과 BVS (Biodegradable Volatile Solid) 기준으로 구분해 Fig. 4에 도식화하였다. Chamber와 Bag digester의 TVS 기준 누적 유기물 제거율은 각각 44.4%, 43.6%로 유사한 값을 보였고 BVS 기준으로 환산한 경우도 79.9%, 77.2%로 큰 차이를 보이지 않았다. 유기물 제거율 평가 시 기준에 많이 이용하고 있는 TVS를 기준으로 하기 보다는 BVS를 기준으로 하는 것이 실제 분해 가능한 유기물을 중심으로 보다 더 신뢰성 있는 결과를 얻는데 효과적일 것으로 사료된다.

Kinetic modeling 평가 Chamber와 Bag digester에서 63일 동안 혐기소화 과정에서 발생된 누적 메탄발생량과

Gompertz equation에 의한 모델링 결과는 Fig. 5에 도식된 바와 같다.

고액분리된 돈분뇨 고형물과 접촉슬러지 혼합물로부터 발생된 실제 누적 메탄발생량과 Gompertz equation에 의한 결과 간의 결정계수는 0.9978~0.9989로 매우 높은 상관관계를 보이고 있다. Table 2는 실제 Gompertz equation에 의해 도출된 메탄발생 잠재력 (P), 일일 메탄 발생량 (R_m), Lag phase, 95% 메탄발생 잠재력 시점 (T95) 및 메탄생산유효기간 등을 요약한 결과이며, Chamber digester의 평균값은 202 N·mL CH₄/ g VS, 13.7일, 55.5일 및 41.8일이고, Bag digester 평균값은 218 N·mL CH₄/ g⁻¹ VS, 9.3일, 52.8

일 및 43.5일의 결과를 얻었다. Bag digester가 Chamber digester 보다 7.3% 높은 최종 메탄발생량 (Ultimate methane yield)과 4.4일 짧은 Lag phase의 결과를 보인 것으로 보아 Bag digester가 Chamber digester 보다 다소 높은 고상혐기 소화 효율을 보이는 것으로 나타났으나 ANOVA 일원분산분석 (OriginPro v8.1 software)을 수행한 결과, Lag phase는 통계적으로 유의적 차이가 있는 반면 메탄발생 잠재력은 유의적 차이가 없는 것으로 나타나 Chamber와 Bag digester의 고상혐기소화 효율은 큰 차이가 없는 것으로 사료된다. Gaussian equation을 이용해 Gompertz equation을 통해서 얻은 일일 최대 메탄발생량에 도달하는 시점을 계산한 결과 Chamber digester는 28일로 Bag digester에 비해 약 4일 정도 늦는 것으로 나타났다 (Table 2). Table 2에 요약한 결과와 같이 Gaussian equation에 의해 도출된 Chamber와 Bag digester의 일일 최대 메탄발생량은 평균 7.3, 7.4 N·mL CH₄/g⁻¹ VS·d로 매우 유사한 결과를 보였으며 Gaussian equation을 이용해 도출한 일일 최대 메탄발생량과 Gompertz equation으로 도출한 값 간에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. ANOVA 일원분산분석 (OriginPro v8.1 software)을 수행한 결과 Gaussian equation을 이용해 도출한 메탄발생 특성과 관련된 상수들 중 최대 메탄발생시점을 제외한 상수들은 Bag digester와 Chamber digester 간 유의적 차이를 보이지 않았다.

Conclusions

고액분리된 돈분뇨 고형물을 대상으로 37°C 조건에서 63일 동안 Chamber와 Bag digester의 고상혐기소화 효율 및 특성을 비교 평가하였다. Chamber와 Bag digester는 각각 202 N·mL CH₄/g⁻¹ VS, 218 N·mL CH₄/g⁻¹ VS의 메탄 생산효율과 BVS (Biodegradable Volatile Solid) 기준으로 79.9%, 77.7%의 유기물 분해율을 보였다. 고액분리된 돈분뇨 고형물을 Chamber와 Bag digester로 고상혐기소화시킬 경우 돈분뇨 고형물에 함유돼 있는 유기물의 약 56~59%는 생분해 가능한 것으로 나타났다. Gompertz equation에 의하면, Bag digester가 Chamber digester에 비해 메탄발생량과 Lag phase 소요일수 측면에서 약간 우수한 것으로 나타났지만 통계적으로 유의적인 차이를 보이지 않는 것으로 보아 반응조 유형 (Chamber와 Bag digester)은 고상혐기소화 효율에 큰 영향을 미치지 않는다고 사료된다. Bag digester는 상대적으로 시설비용이 저렴한 장점을 가진 반면, 기계적인 연계공정을 구축하는데 한계가 있고 내구성이 낮으므로 소규모 시스템에 적용하는 것이 바람직하며, Chamber digester는 초기 투자비용이 상대적으로 높은 반면, 침출수

회수와 유지관리가 용이하고 기계적인 연계공정 구축이 가능하기 때문에 대규모 시스템에 적용하는 것이 유리하다고 본다. 고액분리된 돈분뇨 고형물은 개별 농가에 비해 공동 자원화시설에서 다량 발생되므로 Chamber 형태의 고상혐기소화조를 기존의 공동자원화시설과 연계하기 위한 연구를 지속적으로 추진할 필요가 있다.

References

- Agnew, J., P. Lung, and B. Lung. 2011. Design and commissioning of a pilot-scale solid state anaerobic digester for the Canadian prairies. *The Canadian Society for Bioeng. CSBE* 11-404.
- Ahn, H.K., M.C. Smith, S.L. Kondrad, and J.W. White. 2010. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of Switchgrass-animal manure mixtures. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 160:965-975.
- C.J., Sangeetha, Bala Murali Krishna, C., M.G.D.M. Cox, and T.C.A. De Haas. 2012. A study on flexi mobile digester using cow dung for energy production. *Proceedings of International Conference on Advances in Architecture and Civil Eng. ENVI18(1)*.
- Edelmann, W.E. 1986. Technical and social problems for the propagation of biogas in Rwanda. *Biogas Technol. Transfer and Diffusion.* 87-97.
- Kafle, G. K., and S. H. Kim. 2013. Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: Batch and continuous operation. *Appl. Energy.* 103:61-72.
- Kang, H., and P. Weland. 1993. Ultimate anaerobic biodegradability of some agro-industrial residues. *Bioresour. Technol.* 43:107-111.
- Korazbekova, K.U., and Zh.K. Bakhov. 2014. Performance of leach-bed reactor with immobilization of microorganisms in terms of methane production kinetics. *J. Biol. Sci.* 14(4): 258-266.
- Kusch, S. 2013. Understanding and Managing the Start-up Phase in Dry Anaerobic Digestion. *RCITD.* 18(22):26-30.
- Moller, H.B., S.G. Sommer, and B.K. Ahring. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fraction of manure. *Biomass Bioenergy.* 26:485-495.
- Tritt, W.P. and H. Kang. 1991. Ultimate biodegradability and decay rates of cow paunch manure under anaerobic conditions. *Bioresour. Technol.* 36:161-165.
- Vo, C.N.N., H.T. Phan, and H.N. Vo. 2012. Review on the most popular anaerobic digester models in the Mekong Delta. *J. Viet. Env.* 2(1):8-19.
- Ward, A.J., P.J. Hobbs, P.J. Holliman, and D.L. Jones. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 99:7928-7940.