

가축분뇨 병합처리 바이오가스화를 위한 설계 및 운전 기술지침 마련 연구(II) - 정밀모니터링 결과 중심으로 -

이동진, 문희성, 손지환, 배지수[†]

국립환경과학원 폐자원에너지연구과

A Study on Establishment of Technical Guideline of the Installation and Operation for the Efficient Bio-gasification Facility of Pig Manure and Food Waste(II): - Results of the Precision Monitoring -

Dongjin Lee, HeeSung Moon, Jihwan Son, Jisu Bae[†]

Environmental Resource Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received: Jun. 2, 2017 / Revised: Aug. 29, 2017 / Accepted: Sep. 7, 2017)

ABSTRACT: The purpose of this study is to provide a design and operation technical guideline for meeting the appropriate design criteria to bio-gasification facilities treating organic wastes. 9 anaerobic digestion facilities which is normally operated during the field survey and 14 livestock manure farms were selected for precision investigation. the physicochemical analysis was performed on the moisture and organic contents, nutrients composition (carbohydrate, fat, protein), volatile fatty acids (VFAs), and nitrogen, etc. Volatile solids (VS) of organic wastes brought into the bio-gasification facilities were 2.81 % (animal manure only) and 5.92 % (animal manure+food waste), respectively. Total solids (TS) results of samples from livestock farms were 5.6 % in piglets and 11~13 % in other kinds of breeding pigs. The actual methane yield based on nutrients contents was estimated to 0.36 Sm³CH₄/kgVS which is equivalent to 72 % of theoretical methane yield value. The optimum mixing ratio depending on the effect of the combined bio-gasification was obtained through the continuous stirred-tank reactor (CSTR) which is operated at different mixing ratio of swine manure and food waste leachate. The range of swine manure and food waste leachate from 60:40 to 40:60 were adequate to the appropriate conditions of anaerobic digestion; less than 100 gTS/, more than alkalinity of 1 gCaCO₃/L, C/N ratio 12.0~30.0, etc.

Keywords: Swine manure, Food waste, Anaerobic digestion, Bio-gasification

초 록: 본 연구는 유기성폐자원(가축분뇨, 음식물류폐기물, 음식물류폐수 등)을 병합 소화하는 시설을 대상으로 적정 설계 기준치를 충족하기 위한 설계 및 운전 기술지침서 마련하고자 현장조사와 정밀모니터링을 실시하였

[†] Corresponding author(e-mail : jisubae88@gmail.com)

다. 현장조사시 정상적으로 운영 중인 9개의 혐기소화시설과 사육돈 종류에 따른 가축분뇨 발생원 (농가) 14곳을 정밀모니터링 대상으로 선정하였으며 삼성분, 영양성분 (탄수화물, 단백질, 지방), 휘발성지방산, 질소 등에 대한 물리화학적 분석을 실시하였다. 가축분뇨 바이오가스화 시설로 반입되는 유기물의 휘발성고형물 농도는 (Volatile solids, VS) 단독처리시 2.81 %, 음식물류와 병합처리시 5.92 %로 조사되었으며, 유기물분해율은 단독처리 대비 20.5 % 증가된 63.6 %의 제거율을 보였다. 영양물질 결과를 바탕으로 이론적 메탄수율과 실제 현장에서의 메탄수율을 비교한 결과, VS 기준 실제 메탄수율은 이론값 대비 72 %에 해당하는 $0.36 \text{ Sm}^3\text{CH}_4/\text{kgVS}$ 로 실측되었다. 농가발생원의 총고형물 농도를 분석한 결과, 자돈 및 이유돈은 5.6 %로 가장 낮았으며 육성돈, 비육돈, 모돈 등은 약 11~13 %로 높은 유기물 함량을 보였다. 또한 가축분뇨에는 모래, 가축털 뭉치 등의 이물질이 존재함으로써 혐기소화 과정에서 스크리닝 등의 전처리 과정을 사전에 실시하여야 한다. 음폐수와 가축분뇨의 혼합비율을 달리하여 운전한 연속식 반응기를 통해 병합처리 효과에 따른 적정 혼합비율을 도출하고자 하였다. 연속식 반응기 실험에서 가축분뇨와 음폐수의 혼합비율을 100:0, 80:20, 40:60, 20:80으로 설정하여 진행하였을 때, 60:40~40:60의 범위에서 적정 혐기소화 조건 (100 gTS/L 이하, 알칼리도 1 gCaCO₃/L 이상, C/N비 12.0~30.0 등)에 부합하는 실험결과를 도출하였다.

주제어: 가축분뇨, 음식물류폐기물, 음폐수, 병합 소화, 바이오가스화

3. 연구결과

3.3. 정밀모니터링 결과

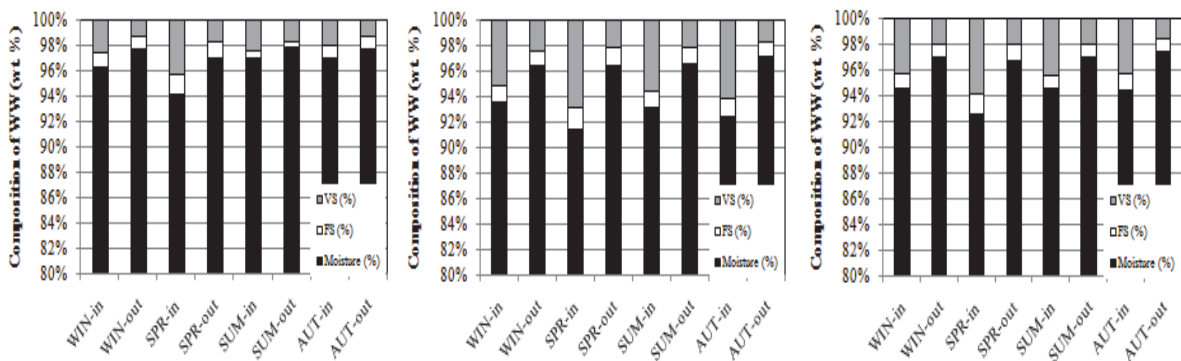
3.3.1. 삼성분 및 유기물 분해율(VS 기준)

가축분뇨 단독 및 병합처리 바이오가스화 시설의 수분, 가연분, 회분 (% 기준)을 나타내는 삼성분 분석을 실시한 결과는 Fig. 3과 같고, VS/TS, VS 분해율은 Table 4와 같다. 대상 시료의 평균 TS 함량은 6.0 %, VS 함량 4.7 %, FS 함량 1.3 %, VS 기준 유기물 분해율은 평균 59.7 %로 나타났다.

3.3.2. CODcr 및 영양성분(탄수화물, 단백질, 지방)

가축분뇨 단독 및 병합처리 바이오가스화 시설의 CODcr 분석 결과는 Fig. 4와 같다. 대상 시료의 평균 CODcr 값은 유입 79,194 mg/L, 유출 24,992 mg/L로, 소화조를 거쳐 평균 68.2 %의 CODcr 제거율을 보였다.

소화조로 유입되는 원료의 영양성분을 분석한 결과는 다음 Fig. 5과 같다. 단백질, 지방, 탄수화물 각각 평균 2.42 g/100 g (44.3 %), 1.61 g/100 g (29.5 %), 1.43 g/100 g (26.2 %)를 차지하였다. 유입과 유출의 영양성분 비교시 탄수화물과 지방은 각각 71.3 %, 71.3 %



* AM : 가축분뇨 단독, AMX : 가축분뇨 + 음식물류폐기물, Avg : 전체 평균
* WIN : 겨울, SPR : 봄, SUM : 여름, AUT : 가을

Fig. 3. Results of moisture contents, TS and VS.

Table 4. Results of TS, VS and VS removal efficiency

Season	AM			AMX			Avg		
	TS (%)	VS (%)	VS 제거율	TS (%)	VS (%)	VS 제거율	TS (%)	VS (%)	VS 제거율
WIN-in	3.69	2.62	-	6.47	5.17	-	5.43	4.21	-
WIN-out	2.28	1.32	49.4	3.54	2.47	52.3	3.00	1.98	53.1
SPR-in	5.77	4.25	-	8.50	6.81	-	7.48	5.85	-
SPR-out	2.93	1.71	59.8	3.55	2.16	68.3	3.32	1.99	66.0
SUM-in	3.04	2.39	-	6.87	5.59	-	5.43	4.39	-
SUM-out	2.16	1.67	30.1	3.43	2.15	61.6	2.95	1.97	55.2
AUT-in	2.94	1.98	-	7.61	6.09	-	5.61	4.33	-
AUT-out	2.25	1.32	33.0	2.85	1.69	72.2	2.59	1.54	64.5
TOTAL-in	3.86	2.81	-	7.36	5.92	-	5.99	4.70	-
TOTAL-out	2.41	1.51	43.1	3.34	2.12	63.6	2.97	1.87	59.7

* AM : 가축분뇨, AMX : 가축분뇨+음식물류폐기물, Avg : 전체 평균
 * WIN : 겨울, SPR : 봄, SUM : 여름, AUT : 가을, TOTAL : 사계절 평균
 * in : 소화조 유입물, out : 소화조 유출물

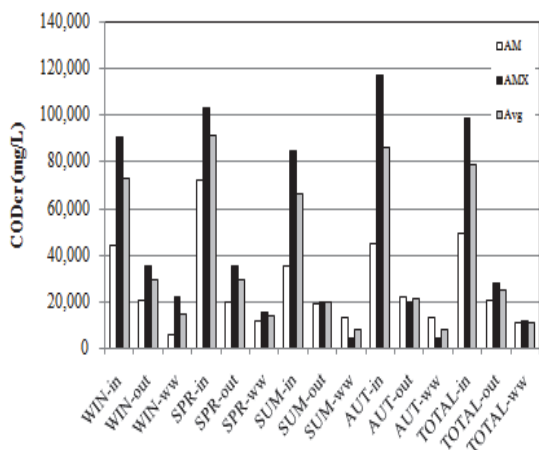


Fig. 4. Results of CODcr in bio-gasification facilities.

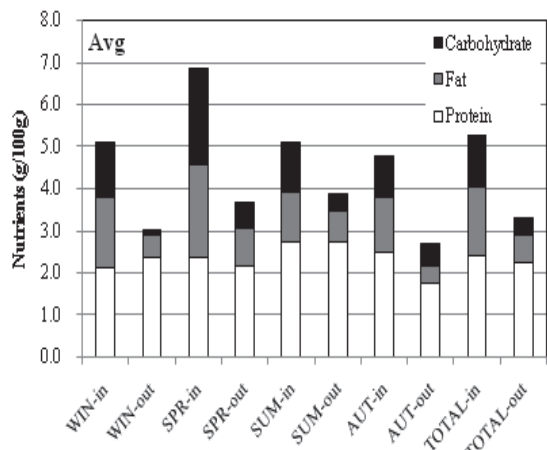


Fig. 5. Results of Nutrients contents in bio-gasification facilities.

60.9 % 분해되었고 단백질은 이보다 현저히 낮은 7.0 % 감소되었다.

3.3.3. 저해요인

3.3.3.1. 휘발성지방산(VFAs)

VFAs는 유기물 분해시 발생하는 화합물로 혐기 소화조 내부에 과도하게 축적될 경우, 혐기성 반응은 불안정한 상태로 볼 수 있다.¹⁹ 대상 시료의 VFAs 기기분석 분석결과, 평균 유입 7,974 mg/L, 유출 1,137 mg/L로 나타났다. 수분석 결과는 평균 유입 12,059 mg/L, 유출 2,476 mg/L로 나타났다.

3.3.3.2. 질소(TN, NH₄⁺), 인(TP, PO₄-P)

유기성폐자원의 암모니아성 질소 (NH₃-N)는 혐기성소화조 내부에 고농도로 존재할 경우, 수소 및 메탄 발생농도, 휘발성 고형물 제거에 영향을 미친다.¹⁴ Fig. 6은 대상 시료의 총질소 (TN)와 암모니아성 질소 농도를 나타낸다. 대상 시료의 TN 농도는 혐기성소화조를 거치면서 농도가 약간 증가하는 경향을 보이고, NH₃-N은 유입과 유출이 비슷한 농도를 보였다. 이는 대상 시료 중 가축분뇨의 단백질화합물이 분해되어 암모니아성 질소로 전환되어 높은 농도로 유출된 것으로 추측된다. 인 (TP, PO₄-P)은 후속 연계 폐수처리 및 액비화와 관련된 인자이다.

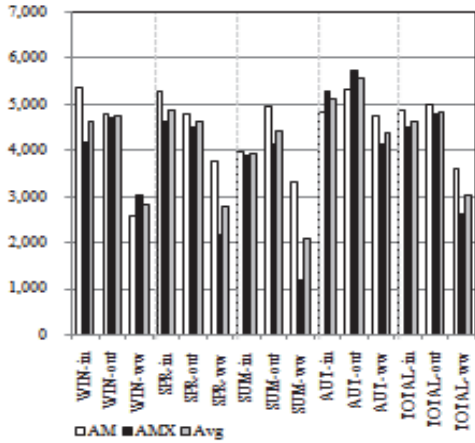


Fig. 6. Results of TN in bio-gasification facilities.

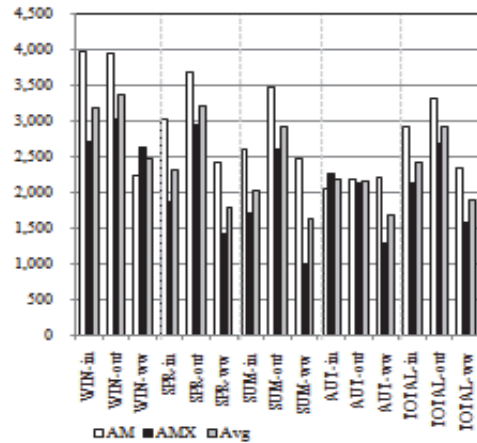


Fig. 7. Results of NH₃-N in bio-gasification facilities.

대상 시료의 인 (TP, PO₄-P) 분석 결과는 Fig. 7과 같으며, 평균 TP 농도는 유입 861 mg/L, 유출 238 mg/L로, 평균 PO₄-P 농도는 유입 518 mg/L, 유출 104 mg/L로 나타났다.

3.3.4. 메탄가스 발생량

Table 5은 이론적 메탄생성율과 실제 현장에서의 평균 메탄생성율을 비교한 것이다. 이론적 메탄생성율은 VS 기준 0.50 Sm³CH₄/kgVS이고, CODcr 기준 0.35 Sm³CH₄/kgCODcr로 나타났다. 가축분뇨 단독 및 병합처리 바이오가스화 시설 9 개소를 대상으로 건조가스 및 표준상태 (0 °C, 1기압)로 메탄생성율을 산출하였다. 실제 메탄생성율은 VS 기준 0.36 Sm³CH₄/kgVS이고, CODcr 기준 0.20 Sm³CH₄/kgCODcr로 실측되었으며, 평균 분해율을 각각 감안하였을 때, 이론치와 비슷하거나 초과하는 결과를 보였다.

Table 5. Comparison of theoretical and actual methane yield

구분	VS** (%)	CODcr*** (mg/L)	Methane yield (A)**** (Sm ³ CH ₄ /kgVS)	Methane yield (B)**** (Sm ³ CH ₄ /kgCOD)
실측치	4.2	63,897	0.36	0.20
이론치			0.50	0.35
실측치/분해율*****	-	-	0.60(=0.36/0.597)	0.36(=0.20/0.546)

* 가축분뇨 병합처리 바이오가스화 9개 시설 경우를 기준으로 함
 ** VS은 정상운전 기간 중 (2~7개월)에 현장 시설에서 분석한 1일 평균치로 함
 *** CODcr은 현장 분석값 및 사계절 정밀모니터링 (겨울, 봄, 여름, 가을)의 분석 자료를 바탕으로 함
 **** 건조 가스 및 표준상태 (0 °C, 1기압) 기준임
 ***** 100 % 분해 가정시 실측치를 근거로 한 추정치임(분해율은 VS 59.7 % 이고, CODcr 54.6 % 적용)

3.4. 농가 발생원 조사

3.4.1. 농가 발생원 가축분뇨 특성

바이오가스화 시설에 유입되는 가축분뇨 농도의 변동이 심하여 농가 발생원의 총고형물 (TS)을 조사한 결과 (Fig. 8 참고), 자돈 및 이유돈은 5.6 %로 낮았으며, 육성돈, 비육돈, 모돈 등은 약 11~13 %로 높은 경향을 보였다. 농가별 변화가 크게 나타났으며, 바이오가스화 시설로 유입되는 가축분뇨의 평균 농도가 3.9 %인 것을 감안할 경우, 꽤 높은 농도인 것을 알 수 있다. 이는 농가 발생원으로부터 배출되는 가축분뇨가 평균 2~6 개월 동안의 저장·정치 기간을 거치기 때문으로 판단된다.

농가에서 발생하는 가축분뇨의 휘발성지방산은 가축 종류별로 Fig. 9와 같은 농도 분포를 보였다. 자돈, 육성돈, 비육돈 등은 약 15,000 mg/L이며 시설

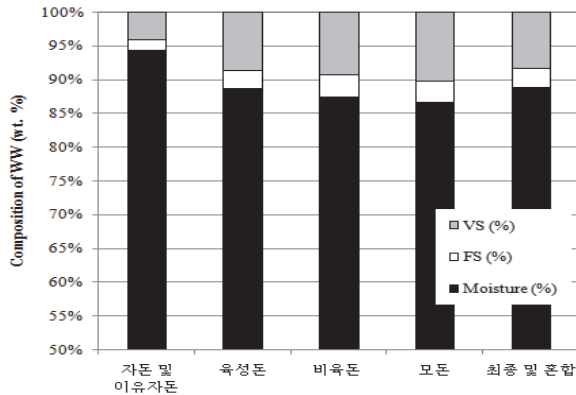


Fig. 8. Results of moisture contents, TS and VS in Fig manure.

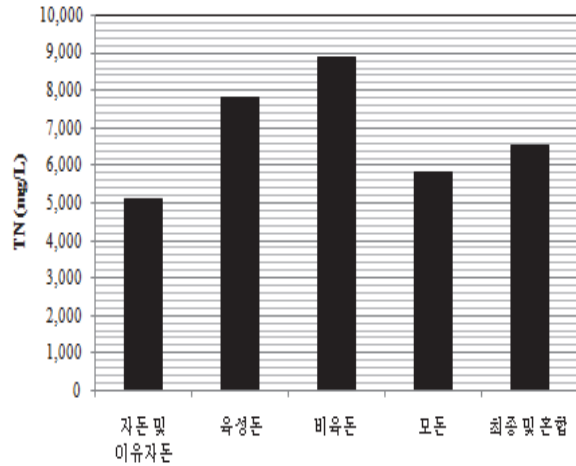


Fig. 10. Results of TN in Fig manure.

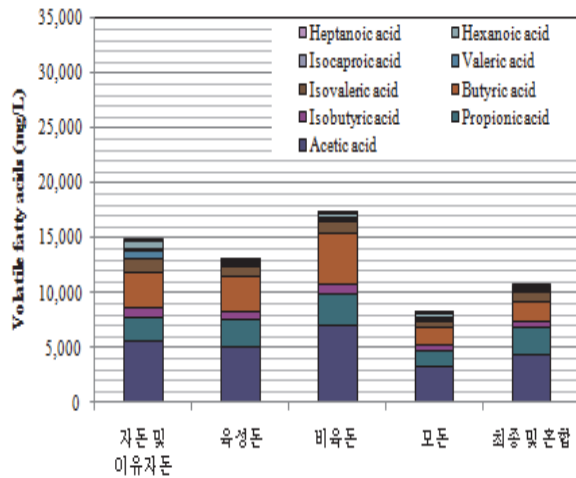


Fig. 9. Results of VFAs in Fig manure.

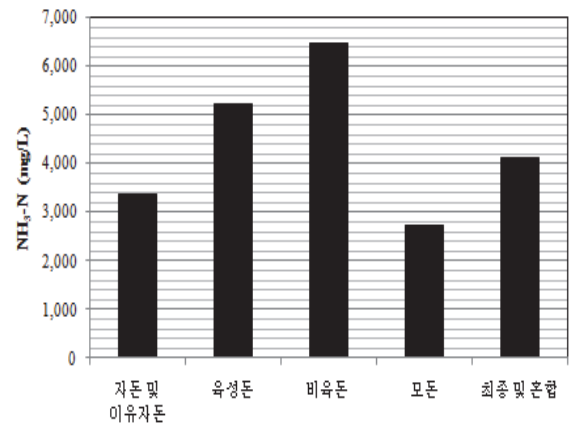


Fig. 11. Results of NH₃-N in Fig manure.

에 따라 큰 차이를 보였다. 단, 모돈은 스톨 형태의 농가에서 사육되어 분뇨 발생 즉시 수거되는 시스템이므로 VFAs 농도가 8,331 mg/L로 낮게 나타났으며, 액비화조 형태로 조성되어 있는 최종 및 혼합저장조의 VFAs는 10,727 mg/L로 나타났다. 농가 발생원 가축분뇨의 전체 평균 VFAs는 12,895 mg/L로 나타났다.

가축분뇨 (돈분뇨)는 물리화학적 특성상 높은 암모니아성 질소 농도를 가짐으로써 혐기소화 과정에서 암모니아 독성에 의한 미생물의 활성도에 저해 요인으로 작용할 수 있다. 가축분뇨의 돼지 종류별 TN 분석결과는 Fig. 10, NH₃-N은 Fig. 11에 도식화하였다. TN은 6,804 mg/L, NH₃-N은 4,403 mg/L로 음식물류폐기물과 비교시 높은 평균 농도 값을 나타냈으며, 음식물류폐기물에 비하여 매우 높은 농도

값을 나타내었다.

3.4.2. 농가 발생원 가축분뇨의 이물질

가축분뇨에는 모래, 왕겨, 가축털 뭉치, 주사기 등의 이물질이 존재한다. 이물질은 ① 중-대형 헝잡물, ② 모래, 씨앗 등 헝잡물, ③ 모발 및 미세 헝잡물 등으로 조사되었다. 가축분뇨에 함유된 이물질은 그 발생량이 크지 않아 약 1% 이내로 볼 수 있으며, 스크리닝 등에 의하여 어렵지 않게 제거가 가능하다. 다음의 Fig. 12은 가축분뇨에 포함된 이물질이다.

3.5. 병합처리 효과

혼합비율별 원료 성상을 적정 혐기성소화 조건인 100 gTS/L 이하, pH 6.0~8.0, 알칼리도 1 gCaCO₃/L

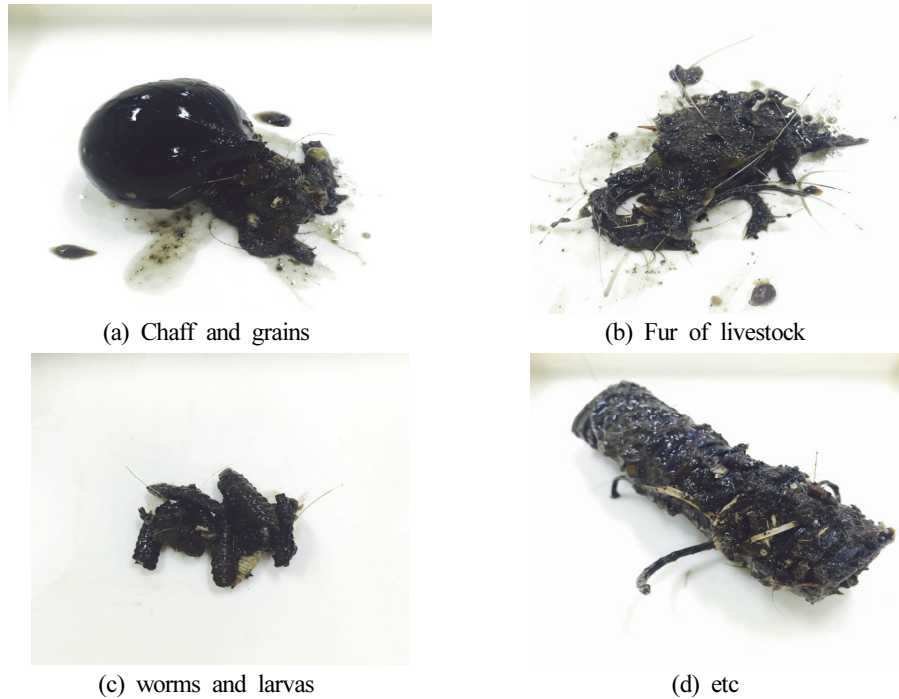


Fig. 12. Extraneous substances of Fig manure.

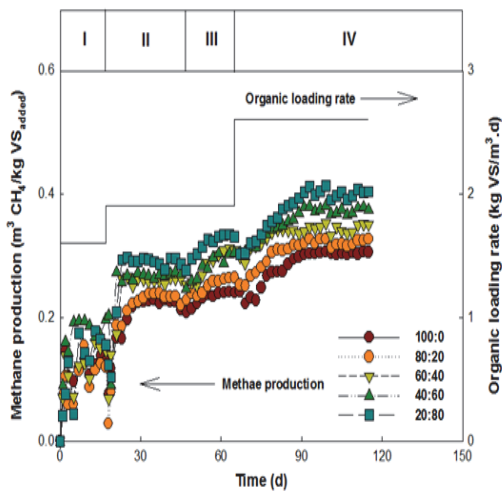


Fig. 13. Methane production and OLR by the mixing ratio.

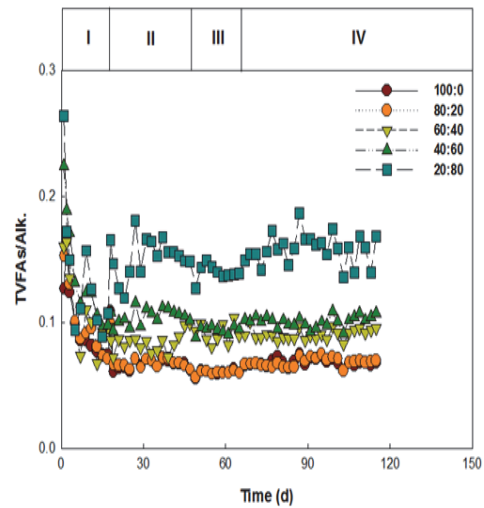


Fig. 14. VFAs/Alkalinity ratio by the mixing ratio of AM & FW.

이상, TN 6 g/L 이하, COD/N 비 12.0~30.0에 대입하였을 때, 유입 원료 상에서 가축분뇨 대비 음폐수 비율은 60:40~40:60로 혼합시 초기 혐기소화에 적절한 병합비율이라 할 수 있다.

연속식 반응기 실험에서는 가축분뇨와 음식물류 폐기물의 병합 비율을 100:0, 80:20, 60:40, 40:60 및

20:80으로 설정하여 총 5개의 병합 비율로 연속식 반응기를 운전하였다.

Fig. 13에는 가축분뇨와 음폐수의 병합비율 및 유기물 부하에 따른 메탄발생량 변화를 나타내었다. 병합 처리하였을 때 음폐수의 비율이 높아질수록 메탄 발생량은 증가하는 경향을 보였다. Fig. 14에는

가축분뇨와 음폐수의 병합비율 및 고형물 부하에 따른 휘발성지방산/알칼리도 비의 변화 양상을 도식화 하였다. 가축분뇨 단독처리 하였을 때 알칼리도는 11.5 ± 0.2 gCaCO₃/L로 나타났으며, 기질 내 가축분뇨의 비율이 감소할수록 알칼리도는 10.4 ± 0.2 , 8.6 ± 0.4 , 6.9 ± 0.3 , 3.8 ± 0.2 gCaCO₃/L로 점차 감소하였다. 휘발성지방산/알칼리도 비는 병합 비율에 따라 0.067~0.156 범위로 나타났으며 혼합 기질 내 가축분뇨의 비율이 높을수록 낮아지는 경향을 보였다.

결과적으로 가축분뇨에 음폐수의 병합비율이 증가할수록 메탄생성율은 증가하지만 휘발성지방산/알칼리도는 낮아져서, 가축분뇨 약 40 % 정도 투입 때까지 메탄생성율이 현저히 낮아지지 않으면서 소화조의 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

편집자 주

이 특집원고는 총 3편으로 구성되어 있으며, 1편은 유기물자원화 25권 2호에 게재되었으며, 3편은 후속으로 계속 이어집니다.

References

1. Ministry of Environment, Economic analysis of waste-to-energy project, (2008).
2. Ministry of Environment, The status of waste generation and treatment in Korea, (2013).
3. Ministry of Environment, The status of livestock manure in Korea, (2014).
4. Statistics Korea, 2014 Agriculture, Forestry and Fisheries survey report, (2014).
5. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Measures for recovery for long-term livestock manure, (2013).
6. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Energization plan of livestock manure, (2009).
7. Ministry of Environment, Comprehensive plan of energization and land disposal of food waste leachate[2008~2012], (2007).
8. Ministry of Environment, Comprehensive plan of energization and land disposal of food waste leachate, (2012).
9. Ministry of Environment, 2014 Status of organic waste energy utilization facilities, (2014).
10. Ministry of Environment, Official testing method on wastes, (2012).
11. Ministry of Food and Drug Safety, Official food testing method. General testing method, (2015).
12. Ministry of Environment, Official testing method on water, (2014).
13. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed. Washington, USA, (1998).
14. D. J. Lee, Translation of guidelines for biogas production and use in Germany, National Institute of Environmental Research (2014).
15. Buswell, A. M. and H. F. Mueller, H. F., "Mechanism of methane fermentation", Industrial and Engineering Chemistry, 44(3), pp. 550 ~ 552 (1952).
16. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., Integrated solid waste management, McGraw-Hill, (1993).
17. Ministry of Environment, Study for preparation of technical guidelines for livestock manure biogasification facilities, (2015).
18. Sanders, F. A. and Bloodgood D. E., "The effect of nitrogen-to-carbon ratio on anaerobic decomposition, Journal of Water Pollution Control Federation", 37(12), pp. 1741 ~ 1752 (1965).
19. D. J. Lee, Translation of anaerobic sludge digestion operation manual in U.S, National Institute of Environmental Research (2014).
20. D. J. Lee, Guidelines for operation management of food waste biogasification facilities, National Institute of Environmental Research (2014).

21. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Fertilizer control ACT, (2015).
22. Ministry of Environment, Standard design of livestock manure facility, (2009).
23. K. M. Lee, Y. M. Jo, Characterization of odorous elements in a livestock waste treatment plant, Korean Journal of Odor Research and Engineering, 10(1), pp. 8 ~ 17 (2011).
24. J. H. Kim, J. G. Park, M. S. Moon, J. B. Oh, J. S. Shin, The characteristic and management of odor emitted from pig farms, Korean Journal of Odor Research and Engineering, 10, pp. 201 ~ 215 (2009).
25. Parkin, G. F. and Owen W. F. , “Fundamental of anaerobic digestion of wastewater sludges”, J. Environmental Engineering, 112(5), pp. 887 ~ 920 (1991).
26. O’ Flaherty, V., Lens P., Leahy B. and Colleran E., “Long-termcompetition between sulfate-reducing and methane-producing bacteria during the full-scale treatment of citric acid production wastewater”, J. Water Research, 32, pp. 185 ~ 196 (1998).