

ORIGINAL ARTICLE

가축분뇨 및 음식물쓰레기의 혐기성 소화 병합처리 시 VS 제거효율과 메탄 발생량의 관한 연구

최영익 · 지현조 · 정진희 · 정병길¹⁾ · 김정권^{1)*}

동아대학교 환경공학과, ¹⁾동의대학교 환경공학과

A Study on VS Removal Efficiency and Methane Emission in Combined Anaerobic Digestion of Livestock Manure and Food Waste

Young-Ik Choi, Hyeon-Jo Ji, Jin-Hee Jung, Byung-Gil Jung¹⁾, Jung-Geon Kim^{1)*}

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

Abstract

Livestock manure treatments have become a more serious problem because massive environmental pollutions such as green and red tides caused by non-point pollution sources from livestock manures have emerged as a serious social issue. In addition, more food wastes are being produced due to population growth and increased income level. Since the London Convention has banned the ocean dumping of wastes, some other waste treatment methods for land disposal had to be developed and applied. At the same time, researches have been conducted to develop alternative energy sources from various types of wastes. As a result, anaerobic digestion as a waste treatment method has become an attractive solution. In this study has three objectives: first, to identify the physical properties of the mixture of livestock wastewater and food waste when combining food waste treatment with the conventional livestock manure treatment based on anaerobic mesophilic digestion; second, to find the ideal ratio of waste mixture that could maximize the collection efficiency of methane (CH₄) from the anaerobic digestion process; and third, to promote CH₄ production by comparing the biodegradability. As a result of comparing the reactors R1, R2, and R3, each containing a mixture of food waste and livestock manure at the ratio of 5:5, 7:3, and 3:7, respectively, R2 showed the optimum treatment efficiencies for the removal of Total Solids (TS) and Volatile Solids (VS), CH₄ production, and biodegradability.

Key words : Anaerobic Digestion, Livestock Manure, Food Waste, Combined Treatment, CH₄

1. 서론

경제 성장과 더불어 축산물의 수요가 증가하였고, 가축농가에서 발생하는 가축분뇨의 양도 증가하였다. 고농

도의 가축분뇨가 하천으로 방류될 시 하천의 용존산소를 고갈시키고 조류의 과잉번식을 일으켜 부영양화 현상을 초래할 수 있다. 비점오염원의 광범위적인 환경오염으로 녹조 및 적조 발생과 같은 사회적인 이슈로 대두되면서

Received 27 March, 2018; Revised 14 May, 2018;

Accepted 15 May, 2018

*Corresponding author: Jung-Geon Kim, Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea
Phone : +82-51-890-2077
E-mail : jungkim@deu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가축분뇨 처리에 대한 심각성이 증대되었다.(Park, 2000)

뿐만 아니라 인구 증가와 소득 수준의 향상으로 인해 음식물 쓰레기 또한 증가하는 추세를 나타내고 있다. 그러나 음식물 쓰레기는 함수율이 높아 압축의 효과를 거둘 수 없고, 매립 처리 시 악취와 침출수 발생 및 해충 번식의 문제와 소각 처리 시 보조연료 등이 필요하여 매립장의 반입 및 직매립을 금지하는 등 처리하는 데 큰 문제를 나타내고 있다(Kim, 2000).

또한, 우리나라는 폐기물 등의 해상 투기 및 소각의 규제를 목적으로 하는 런던협약에 서명하였고, 2016년 1월 1일부로 폐기물의 해상 투기가 전면 금지됨에 따라 배출되는 폐기물의 육상 처리에 관한 다양한 방법의 연구와 적용의 필요성이 증대되었다(Lee, 2006).

이와 동시에 폐기물 처리 과정에서 다양한 폐기물을 이용한 대체 에너지 개발에 대한 연구를 진행함에 따라 혐기성소화를 이용한 처리 방식이 주목을 받고 있다(Yang, 2009).

혐기성소화 공법은 산형성균과 메탄형성균으로 분류되는 혐기성 미생물에 의해 생물학적으로 분해 가능한 고농도의 유기물이 메탄 및 이산화탄소의 형태로 분해되며, 암모니아 생성을 통해 질소를 제거하는 공법으로 적정 온도 유지, 적정 pH 조절 및 질소 제거를 위한 외부탄소원 주입을 통해 C/N비 조절을 필요로 한다. 혐기성소화 과정에서 발생하는 메탄가스(CH₄)를 이용하여 대체 에너지원으로 활용할 수 있다(Ministry of Environment, 2011).

일반적으로 혐기성소화 공정에서 혐기성 미생물은 약 pH 7 정도에서 원활한 활동을 하는 것으로 알려져 있으

며, 이보다 낮거나 높아질 경우 미생물이 사멸하여 혐기성소화 공정이 제대로 일어나지 않는다(Park, 2015). 반응조 내 산소의 유무, 온도 및 pH의 변화에 따라 굉장히 민감하게 반응을 하며, 혐기성소화 공정 중 발생하는 메탄가스의 차집 효율에도 영향을 미치게 된다(Lee, 2009).

이에 본 연구에서는 혐기성 중온 소화를 바탕으로 한 기존 가축분뇨 처리에 음식물 쓰레기를 병합 처리하여 혼합된 가축분뇨와 음식물쓰레기의 물리적 성상을 파악하고, 혐기성소화 공정에서 발생하는 메탄가스 차집 효율이 최대가 되는 이상적인 혼합비율을 도출하고, 생분해도의 정도를 비교하여 메탄가스 발생량을 증대시키도록 유도하고자 한다.

2. 재료 및 분석방법

2.1. 실험재료

본 실험에서 사용된 가축분은 경상남도 김해시에 위치한 A축사에서 사육하는 돼지의 분을 채취하여 사용하였고, 음식물쓰레기의 경우 부산광역시 동의대학교 구내 식당에서 발생하는 음식물로서, 음식물쓰레기에 포함된 수분이 충분히 제거된 것을 채취하였다. 본 실험에 적용하기 위해 음식물 속에 포함된 생선뼈, 육류뼈 및 껍데기류 등과 같은 불순물을 제거한 후 시료의 성분이 균일하도록 가정용 믹서기를 이용하여 파쇄한 후 사용하였다. 식종액의 경우 B시의 음식물 혐기성 처리시설의 혐기성 소화액을 채취하였고, 소화액 속 이물질을 제거하기 위해 체거름하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 돈분, 음식물, 식종액의 특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of sludge, food waste and livestock using experiments

Parameter	Food waste	Livestock	Sludge
pH	4.61	7.93	7.43
CODCr (Chemical Oxygen Demand, mg/L)	201,495	142,000	65,000
TS (Total Solids, %)	25.80	14.20	16.70
VS (Volatile Solids, %)	17.5	9.6	72.0
Alkalinity (mg/L)	52.44	10,200	15,200
VFA (Volatile Fatty Acid, mg/L)	330	4,220	14,636
NaCl (%)	0.03	0.15	0.06

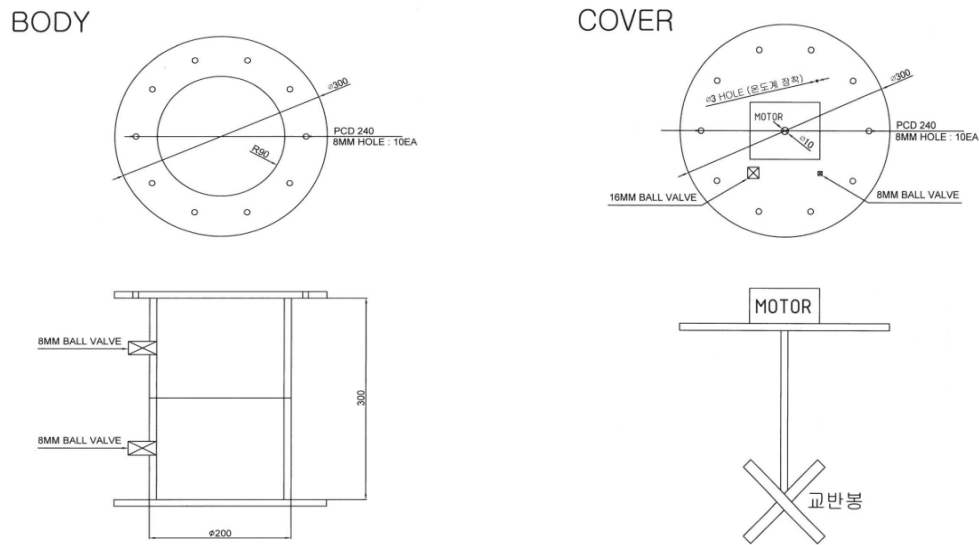


Fig. 1. Schematic diagrams of anaerobic-reactor.

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1. 실험장치

본 연구에서 제작된 혐기성소화 장치는 Fig. 1와 같이 단상의 중온소화조로서, 각각의 반응조별 혼합비율을 통한 효율을 알아보기 위해 R1 반응조는 음식물과 가축분뇨 폐수의 비를 5:5, R2 반응조는 음식물과 가축분뇨 폐수의 비를 7:3, R3는 음식물과 가축분뇨 폐수의 비를 3:7로 설정하였고, 혐기성소화 반응 중 CH₄ 발생량의 경향을 파악하기 위해 회분식(batch) 공법을 사용하였다.

각 반응조는 아크릴 재질로써, 반응조 본체의 온도를 중온성 소화조건으로 유지하기 위하여 수욕조를 설치하

였으며, 수욕조 내 물의 온도를 조절하여 35±2℃로 유지될 수 있도록 온도센서를 설치하여 내부온도를 확인할 수 있게 제작하였다. 또한, 각 반응조는 원통 형태이며 총 용적이 약 3 L이고 유효용적이 약 1.5 L로 설정하여 운영하였고, 측면에 일정한 간격으로 시료를 채취할 수 있도록 시료 채취구를 설치하였으며 반응조 하부에서 시료를 채취하였다. 또한, 각 반응조 내에서 소화과정이 진행됨에 따라 발생하는 가스는 각 반응조 상단의 유효용적 5 L의 가스 포집장치를 설치하였다.

2.2.2. 실험방법

본 연구에서 가축분뇨 폐수와 음식물을 이용한 혐기

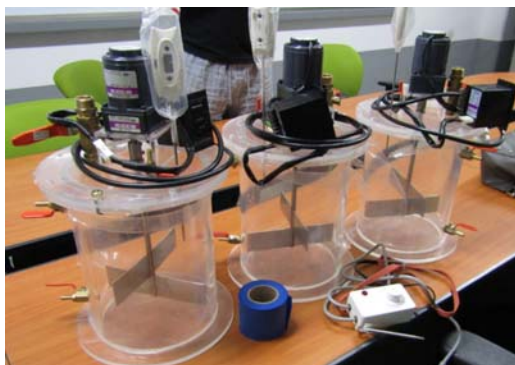


Fig. 2. Photographs of anaerobic-reactor.

Table 2. Analysis method in experiment

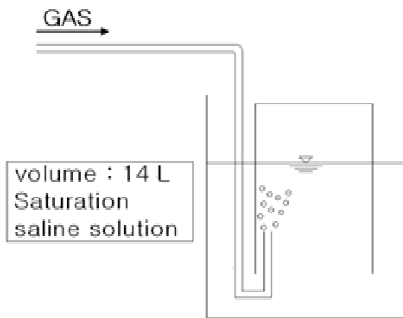
Parameter	Analysis Method
pH meter	pH meter (HORIBA D-51)
TS	Total solid dried at 103 ~ 105 °C (film dryer) (standard methods 2540B)
VS	Fixed and volatile solid ignited at 550 °C (electric muffle furnaces DYFN - 1010)
VFA	distillation method
gas meter	gas detector (GA 2000)

성소화 공정의 주요 인자에 대한 기초 연구를 진행하였으며 회분식(batch) 공법으로 시운전 1~2일 후 정상 운전기간을 25일로 실시하였다.

운전조건은 R1, R2 및 R3 각각의 반응조에 혼합된 시료의 무게 1 kg으로 실시하였다. 혼합 시료와 혐기성 소화액 비율은 5:1로 하여 총 유효용량 1.3 L를 채워 실시하였다. 또한, 반응조의 온도를 중온소화 형태로 유지하기 위해 각 소화조 내부에 온도 센서를 control box에 연결하여 35±2 °C로 유지하였다. 그리고 각 반응조의 혐기성 슬러지의 물리적 성상(TS, VS 등) 및 발생 가스량과 가스비율을 분석하여 CH₄ 생성효율을 고찰하였다.

2.2.3. 분석방법

시료의 sample은 각 항목의 분석방법은 standard method에 따라 Table 2의 방법으로 분석하였다. pH의 측정에는 pH meter로 측정하였으며, TS 및 VS는 standard methods 2320B와 2540B에 준하여 측정하였으며, 염분 농도는 측정기 (sekisui SS-31A)를 이용하였다. gas 발생 조성 분석은 매립장 가스측정에 사용하는 GA 2000으로 측정하였다. 또한 가스 부피 및 특성은 Fig. 3과 같은 방법으로 측정하였다.

**Fig. 3.** Schematic diagram of gas collector.

3. 결과 및 고찰

3.1. TS 및 VS 감소율 변화

TS 및 VS의 시간에 따른 감소율에 대한 분석 결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다.

R1(5:5)의 경우 투입 전 TS가 18.3%였으나, 혐기성 반응이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 25일간 운전한 결과 11.8%까지 감소하였으며, 감소율은 35.5%이다. VS는 투입 전 13.3%였으나, 혐기성 반응이 진행함에 따라 일정한 농도로 감소하는 경향을 나타내었다. 25일간 운전한 결과 8.0%까지 감소하였으며, 감소율은 39.8%이다.

R2(7:3)의 경우 투입 전 TS가 24.8%였다. 이는 음식물류 폐수가 가축분뇨 폐수에 비해 고형물이 많이 포함되어 있어 TS가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다. 혐기성 반응이 진행됨에 따라 감소하였고, 25일 후 11.4%까지 감소하였다. 감소율은 54.0%이다. VS는 투입 전 16.5%로 나타났으며 VS 또한 TS와 같이 음식물 쓰레기 함유 비율이 높아 가장 높게 나타났다. 이후 혐기성 반응이 진행됨에 따라 일정한 농도로 감소되었고, 25일 후 VS는 10.3%였다. 감소율은 37.6%이다.

R3(3:7)의 경우 음식물류 폐수의 함량이 가장 적어 TS가 가장 낮게 나타났다. 투입 전 TS가 17.8%였고, 혐기성 반응이 진행됨에 따라 11.6%까지 감소하였고, 감소율은 34.8%이다. VS는 투입 전 11.4%였고, 혐기성 반응이 진행됨에 따라 6.2%까지 감소하였고, 감소율은 45.6%이다.

위의 실험 결과를 바탕으로, 음식물류 폐수와 가축분뇨 폐수의 혼합 슬러지에서 TS 및 VS는 시간이 지남에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 나타내었다. TS의 감소율의 변화는 다소 불규칙적인 하향곡선의 형태를 나타내었으나, VS의 감소율을 대체로 일정한 것으로 나타났다.

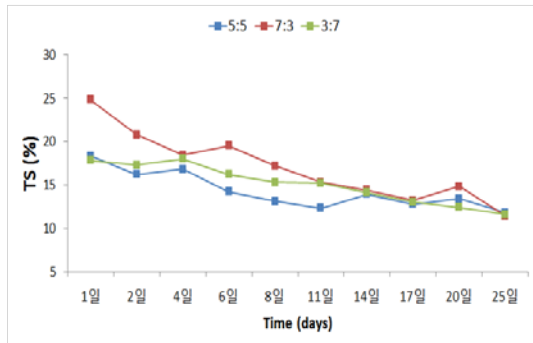


Fig. 4. Variations of TS with food waste and livestock manure in anaerobic digester.

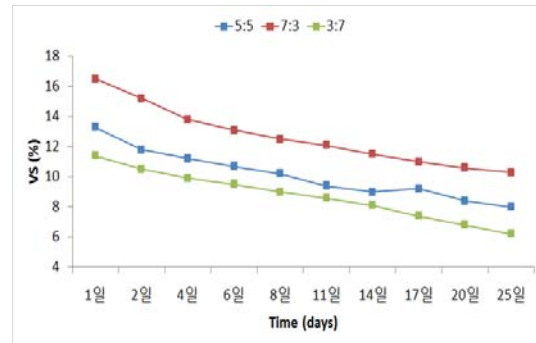


Fig. 5. Variations of VS with food waste and livestock manure in anaerobic digester.

3.2. CH₄ 발생량 변화

CH₄의 분석을 Fig. 7에 나타내었다. R1, R2 및 R3 비율에 따른 메탄가스 발생량은 1일차에 불안정한 미생물 활성도로 인해 각각 30.4%, 31.0%, 29.0%로 나타났다. 그 후 26일 전후로 활발한 미생물 활성에 기인하여 CH₄ 함량의 급격한 수치 상승을 나타내었다.

R1(5:5)의 경우 혐기성 반응이 진행됨에 따라 2~6일째 56.2%의 CH₄ 가스 발생률을 나타내었으며, 이후 기질의 감소로 인해 8~25일까지 56.2~24.7%로 CH₄의 발생량이 서서히 감소하였다.

R2(7:3)은 R1과 R3보다 VS 함량이 많아 CH₄의 발생량이 다른 두 비율보다 많은 양이 발생하였다. 초기 CH₄ 발생량이 31.0%로 가장 높았으며 6일째 58.4%의 CH₄ 가스 발생률을 나타내었고, 이후 기질의 감소로 인해 8~25일 까지 53.1~30.2%까지 일정한 농도로 감소

하였다.

R3(3:7)의 경우 VS함량이 가장 낮아 초기 CH₄ 발생량이 29.0%로 가장 낮으며 4일째 55.3%로 가장 많이 발생하였으며, 4일 이후 25일까지 일정한 농도로 발생량이 감소하였다.

위의 실험 결과를 바탕으로, 대체로 운전 초반 2~6일의 시점에서 메탄가스의 발생량이 55~60% 수준으로 가장 많이 발생하였으며, 시간이 지남에 따라 반응조 내 소화 작용으로 메탄 발생률이 줄어드는 것으로 나타났다.

3.3. 생분해도 측정

생분해도를 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 생분해도는 70~90 N·L/Vs·kg으로 알려져 있다(Montero, 2009). 본 연구에서는 음식물류 폐수 : 가축분뇨 폐수(7 : 3)의 생분해도가 91.8 N·L/Vs·kg으로 가장 높게 나타났다.

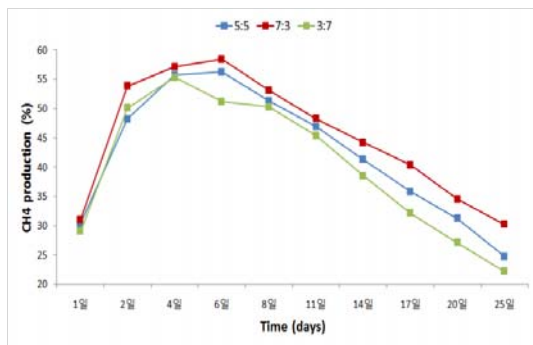


Fig. 6. Variations of CH₄ production with food waste and livestock manure in anaerobic digester.

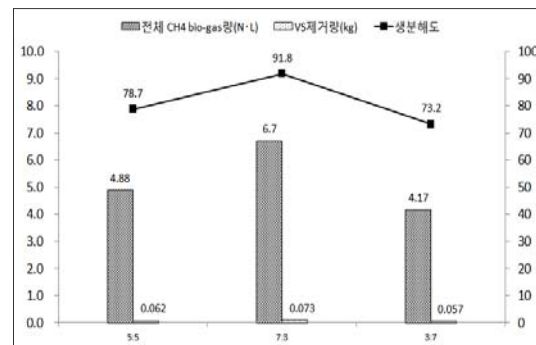


Fig. 7. Variations of biodegradability with food waste and livestock manure in anaerobic digester.

4. 결 론

본 연구에서는 혐기성소화공정을 이용하여 가축분뇨와 음식물쓰레기의 병합처리에 관한 기초 연구를 위해 실험을 시행하였다.

(1) 각각의 반응조의 가축분뇨와 음식물쓰레기의 혼합비율을 R1(5:5), R2(7:3), R3(3:7)로 나누어 비교한 결과, R1과 R3에 비해 R2의 TS 및 VS 제거 효율이 보다 높게 나타났다. 이는 음식물류 폐기물이 가축분뇨 폐수보다 단독으로 있을 때 VS의 함량이 더 높게 나타났기 때문이라고 판단된다.

(2) 각각의 반응조에서 CH₄ 가스의 발생량을 비교한 결과, 각각 최대 함량은 R1 56.2%, R2 58.4%, R3 53.8%로 VS 함량 및 CH₄ 가스의 발생량은 R2(7:3)에서 가장 높게 나타났다.

(3) 종합적으로, 반응조별 생분해도를 비교했을 때 R1(5:5)일 때 78.7 CH₄ N·L/VS·kg, R2(7:3)일 때 91.8 CH₄ N·L/VS·kg, R3(3:7)일 때 73.2 CH₄ N·L/VS·kg 수준의 비율을 나타내어 R2(7:3)에서 가장 활발한 분해가 이루어졌다고 판단된다.

(4) 연속 회분식 공정을 통한 추가 연구를 진행하여 batch 공정에서 나타난 TS, VS 감소율 및 생분해도를 비롯한 메탄가스 발생률 등의 결과와 비교하여 음식물쓰레기와 가축분뇨 폐수의 병합처리 효율을 판단할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학창의재단(학부생연구프로그램사업)의 지원을 받아 수행된 연구임

REFERENCES

- Kim, J. H., 2000, Characteristics of VFAs formation in the acidogenic phase of food waste and sewage sludge co-digestion, Ph. D. Dissertation, Ulsan University, Ulsan, KOR.
- Lee, B. G., 2006, The condition and management measure of marine disposal of wastes, The Korean Society Of Marine Environment & Safety, May, 109-115.
- Lee, S. W., 2009, A Study on increase of methane product for food waste anaerobic digestion using the sulfate reduction reaction, Ph. D. Dissertation, Dong-Eui University, Busan, KOR.
- Ministry of Environment, 2011, A Study on the Economic Analysis and the Improvement of the Installation and Operation of the Livestock Treatment Facilities, Research Service Report, Korea Environment Corporation, Seoul, KOR.
- Montero, B., Garcia-Morales, J. L., Sales, D., Solera, R., 2009, Analysis of ethanogenic activity in a thermophilic-dry anaerobic reactor, Use of fluorescent in situ hybridization, Waste Management, 29, 1144-1151.
- Park, K. C., 2000, Comparison of anaerobic digestion performance in sewage sludge and livestock wastewater mixing food waste, Ph. D. Dissertation, Dong-A University, Busan, KOR.
- Park, S. H., 2015, The characteristics of optimal mixing ratio for anaerobic digestion of livestock and food wastes, Ph. D. Dissertation, Hanbat National University, Daejeon, KOR.
- Yang, H. H., 2009, A Study on the operation and performance of anaerobic digesters of STPs in Korea, Ph. D. Dissertation, Korea University, Seoul, KOR.