

증산제를 통한 혐기소화율 개선 및 슬러지 감량 활용방안

이광현, 김길수, 손병권, 최찬섭, 조진우*, 신재훈*, 정태영*†

(주)한국종합기술, 연세대학교 환경공학부*

Application Plan of Sludge Reduction and Improvement of Anaerobic Digestion Rate Using VFAs from Food Waste

Kawng Hun Lee, Gil Su Kim, Beong Keon Sun, Chan Sup Choi, Gin Woo Cho*,
Jae Hoon Shin*, Tae Young Jeong*†

Korea Engineering Consultants Corp.
Division of Environmental Engineering, Yonsei University, Wonju, Korea*

(Received: Aug. 21, 2018 / Revised: Sep. 17, 2018 / Accepted: Sep. 18, 2018)

ABSTRACT: This study examined the improvement of anaerobic digestion rate and sludge reduction as a result of the addition of anaerobic digestion with thickened sludge and solution of VFAs obtained from food waste. The methane production rate of the digestion system was 2.21 times higher when anaerobic digestion reactor injected into anaerobes with VFAs from food wastes of 5 percent. Also, The reduction of the amount of concentrated sludge injected will proceed rapidly because of the TCOD concentration in the digestion reactor was more than twice higher. Indirectly it was shown that the increased production system contributed significantly to the methane production efficiency.

Keywords: Thickened sludge, Reduction, Anaerobic digestion, VFAs, Methane production

초 록: 본 연구는 음식물폐기물로부터 얻어진 증산제 용액을 농축슬러지와 함께 혐기소화조의 투입한 결과 혐기소화율 향상 및 슬러지 감량화를 살펴보았다. 혐기소화조에 증산제를 5%정도 농축슬러지와 함께 투입한 소화조의 메탄생성율이 약 2.2배 정도 높게 발생하였으며, 소화조내 TCOD 농도값이 약 2배 이상 높게 나타난 것은 투입된 농축슬러지의 감량화가 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 또한, 투입된 증산제로 인해 메탄생성효율에 크게 기여함을 간접적으로 알 수 있었다.

주제어: 농축슬러지, 감량화, 혐기소화, 휘발성유기산, 메탄생성

1. 서 론

혐기성 소화법은 공정으로부터 에너지 회수가 가능하고 공정이 비교적 간단하며, 산소 공급이 불필

요하여 유기성 폐하수 처리 시 호기성 공정에 비하여 월등히 경제적인 것으로 알려져 있다. 하지만 이 공정은 초기 투자비용이 크고, 메탄 생성균의 느린 증식 속도에 따른 반응조의 용량증대와 더불어 처리

† Corresponding author(e-mail : jtaey67@yonsei.ac.kr)

효율이 높지 않은 것 등의 단점이 있어 제한적으로 사용되어 왔으며 주로 도시하수슬러지의 처리, 분뇨 처리, 농·축산 폐기물의 처리 등에 이용되어 왔다.

국내에서는 도시하수처리장의 슬러지 처리나 분뇨처리 및 몇몇 기업의 산업폐수처리에 메탄 발효공정이 이용되고 있지만¹⁾, 기술 수준이 낮아 원활한 운영이 어려운 경우가 대부분이다. 국내 산업의 발달과 함께 고농도의 유기성 폐수발생량이 급증하고 에너지 부족으로 인한 폐자원으로 부터의 대체에너지 개발이 시급한 실정임에도 불구하고 현재 국내의 거의 모든 생활하수 및 유기성 산업폐수는 유지관리비가 고가인 호기성 처리에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 국내의 막대한 양의 폐기물로부터 대체 에너지를 회수 할 수 있는 메탄 발효기술은 외국기술수준에 비하여 매우 미약한 실정이라 할 수 있다. 외국의 경우 환경오염방지와 대체 에너지 개발이라는 측면에서 재래식 메탄발효공정의 단점을 보완한 신공정의 개발이 70년대 이후 활발히 진행되어 오고 있다.²⁻⁵⁾

따라서 근래에 들어 와서 혐기성 소화공정은 활성이 뛰어난 메탄 생성균을 고농도로 유지할 수 있고, 높은 유기물 부하의 적용이 가능하며, 처리시설의 소요규모를 감소시킬 수 있는 AFFR(Anaerobic Fixed Film Reactor), UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), AFBR(Anaerobic Fluidized Bed Reactor) 등과 같은 신공정을 연구, 개발하여 실용화 단계에 있다. 이러한 신공정은 초기 투자비용을 절감할 수 있고 메탄 생성을 극대화할 수 있어 매우 경제적인 것으로 알려져 있으며, 하폐수처리에 있어 이러한 신공정의 도입은 세계적인 추세라 할 수 있다. 특히 메탄발효신공정의 개발은 일본, 유럽 등과 같이 국토가 협소하고 인구가 밀집한 지역의 신규 처리시설에 활발히 적용되고 있으며, 기존의 처리시설도 이러한 공정으로 대체하고 있는 실정이다. 이러한 실용화를 위한 연구 외에도 선진 외국에서는 각 공정의 효율 향상을 위한 기초적 연구에도 많은 노력을 기울이고 있다. 또한, 발생 메탄가스뿐만 아니라 발생 슬러지, 탈수 케이크 등의 재이용에 관하여도 연구와 실용화가 이루어지고 있다.⁶⁻⁸⁾

혐기성 소화 개선을 위한 하수슬러지 전처리

는 물리적인 힘이나 화학적인 반응을 통하여 유입수의 입자성 물질, 미생물세포, 난분해성 고형물 등을 보다 쉽게 분해될 수 있는 물질로 전환하여 혐기성 소화효율을 높이며 소화시간을 단축시키기 위한 수단으로써 본 처리인 혐기성 소화전에 실시하는 일련의 과정이다. 즉 혐기성 소화의 전처리는 유기성 고형물질이 다량 포함된 슬러지가 무기물화되어 가는 혐기성 소화 기간을 단축 및 공정의 안정화를 유도하는 것이다⁹⁻¹⁰⁾. 그러나 하수슬러지의 메탄발효는 매우 효율이 낮은 관계로 에너지 효율 측면보다는 단순 슬러지 감량화에 초점을 맞추고 있지만 하수슬러지의 감량화는 별다른 효과를 보여주지 못하고 있는 실정이다.

한편, 음식물폐수처리 시 혐기성소화조에 투입한 결과 대부분 셀룰로오스 성분이 높아 소화조에 스크럼 및 비정상적인 산생성물이 크게 발생하여 소화조의 소화효율을 낮추는 등의 부작용을 일으켜 유기물 부하를 충분히 높이지 못하는 단점이 있다고 보고⁶⁾되고 있으며 이를 보완하기 위하여 하수슬러지 및 축산폐수 등 병합처리를 하고 있다.

하지만 음식물폐수는 유기산 성분이 풍부하기 때문에 이러한 유기산을 부유물질과 분리하여 혐기소화조에 적용하는 연구가 미비한 상태이다. 따라서 본 연구 목적은 음식물폐수로부터 얻어진 증산제(VFAs from food waste)를 혐기성소화조에 적용하여 농축슬러지의 감량화 및 소화율 향상을 위한 개선효과를 살펴보고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험조건 및 폐수 특성

실험에 이용된 식중오니는 ○○시 하수종말처리장의 혐기성 소화조에서 채취하여 실험실로 운반하여 질소가스로 치환한 후 하수슬러지를 기질로 하여 반연속적으로 안정화시켰다. 본 연구에서 실시한 실험은 농축슬러지와 증산제 첨가에 따른 소화가스량의 증가율과 슬러지 감량화를 비교하고자 Fig. 1 과 같이 혐기성소화조를 2개를 운영하였다. 증산제

는 음식물폐수를 나노분리막(NanoFiltration)을 이용하여 순수한 용액을 분리하였다. 혐기소화조에 농축슬러지만 투입한 것을 대조구(소화조 1)로 기준으로 하고 소화조 2에는 농축슬러지에 증산제를 5% 첨가

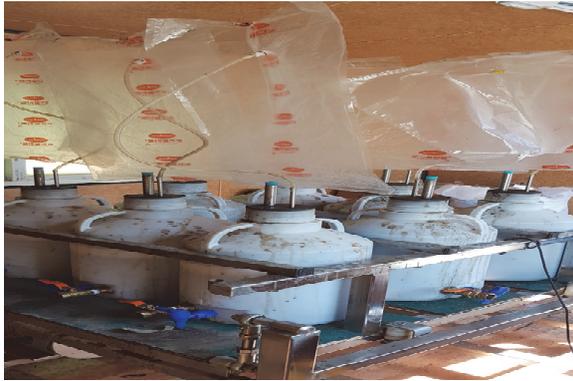


Fig. 1. Anaerobic digestion pilot apparatus.

하였다. 혐기소화조에 투입한 것은 Table 1에 제시하였다. 각 소화조에 일일 전체 투입량은 500 mL로 하였으며, 증산제 효과를 보기 위하여 소화조 2에 투입하여 비교하였다.

혐기소화조에 투입된 농축슬러지와 증산제의 조성은 Table 2에 제시하였다.

2.2. 연구방법

본 연구에서는 증산제 투입효과에 따른 혐기소화조의 개선 효율 및 이에 따른 슬러지 감량화를 살펴 보기 위하여 혐기성 소화조에 Table 2에 제시한 것처럼 매일 반연속식으로 투입하였다. 혐기소화조에서 매일 발생된 가스량을 포집 한 후 휴대용 바이오 가스분석기(Optima 7 Boigas, MRU)를 이용하여 가스성분을 측정하였다. 본 소화조의 처리특성을 살펴

Table 1. The operation condition in anaerobic digestion

	Digestion 1	Digestion 2
Injected condition	thickened sludge 100%	thickened sludge 95% + VFAs 5%
Input Volume	thickened sludge 500 mL/day	thickened sludge 475 mL/day + VFAs 25 mL/day
HRT	30 day	
Temperature	35°C	
Reactor	Rectangle 2m × 2m	

Table 2. The each wastewater component

	Anaerobic digestion solution	Thickened sludge(control)	VFAs from food waste
pH	7.72	5.55	3.62
conductivity (uS/cm)	9.58	3.00	13.57
TCOD (mg/L)	13,280.12	88,520.24	58,854.35
SCOD (mg/L)	907.32	2,981.34	56,674.25
TS (mg/L)	22,550.00	25,150.00	26,350.00
VS (mg/L)	14,650.00	18,800.00	16,850.00
TN (mg/L)	1,305.57	281.24	1,665.25
TP (mg/L)	29.38	12.24	373.35
Acetic (mg/L)	13.08	1,535.11	10,675.55
Propionic (mg/L)	3.59	1,027.39	1,137.68
Iso-butyric (mg/L)	0.68	152.21	325.28
Butyric (mg/L)	0.85	517.42	710.99
Iso-valeric (mg/L)	0.87	229.29	195.56
Valeric (mg/L)	0.95	238.61	290.05
VFAs (mg/L)	20.03	3,700.03	13,335.10

보기 위해 가스량, VFAs(Volatile Fatty Acids)은 가스 크로마토그래피(GC 8A, FID, Shimadzu, Japan), TS (Total Solids), VS(Volatile Solids), pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Suspended Solid (SS), Total Nitrogen (TP), Total Phosphate (TP)와 같은 수질분석 항목들은 Standard methods¹¹⁾에 의하여 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1. 가스량 분석결과

농축슬러지(control)만을 투입한 것과 농축슬러지에 증산제 5%를 첨가하여 소화조를 32일간 운전하였다. 운전한 결과 발생된 가스량의 성분과 메탄발생량을 Fig. 2에 나타냈다. 두 소화조 모두 메탄함량은 거의 유사한 값을 나타내고 있지만 발생된 메탄 가스량은 매우 큰 차이를 보여주었다. 운전 초기는 두 소화조의 가스발생량은 비슷하게 나타나고 있지만 시간이 지날수록 발생량의 차이는 약 2.21배 이상 차이를 나타냈다. 반응초기는 소화조내 혐기성미생물들이 적응하는 유도기라 판단되어지며 적응이 완료된 이후 매우 급격하게 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 증산제를 투입한 효과라 사료된다.

은 거의 유사한 값을 나타내고 있지만 발생된 메탄 가스량은 매우 큰 차이를 보여주었다. 운전 초기는 두 소화조의 가스발생량은 비슷하게 나타나고 있지만 시간이 지날수록 발생량의 차이는 약 2.21배 이상 차이를 나타냈다. 반응초기는 소화조내 혐기성미생물들이 적응하는 유도기라 판단되어지며 적응이 완료된 이후 매우 급격하게 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 증산제를 투입한 효과라 사료된다.

3.2. 유기물(COD) 특성

본 장치에서 소화조내의 유기물의 특성을 살펴본 결과 Fig. 3에 나타냈듯이 농축슬러지보다 증산제를 투입한 소화조의 TCOD가 약 2배 이상 나타났으며, SCOD의 경우는 유사한 값을 나타내고 있다. 소화조의 TCOD가 차이를 보이는 것은 증산제로 인하여 혐기

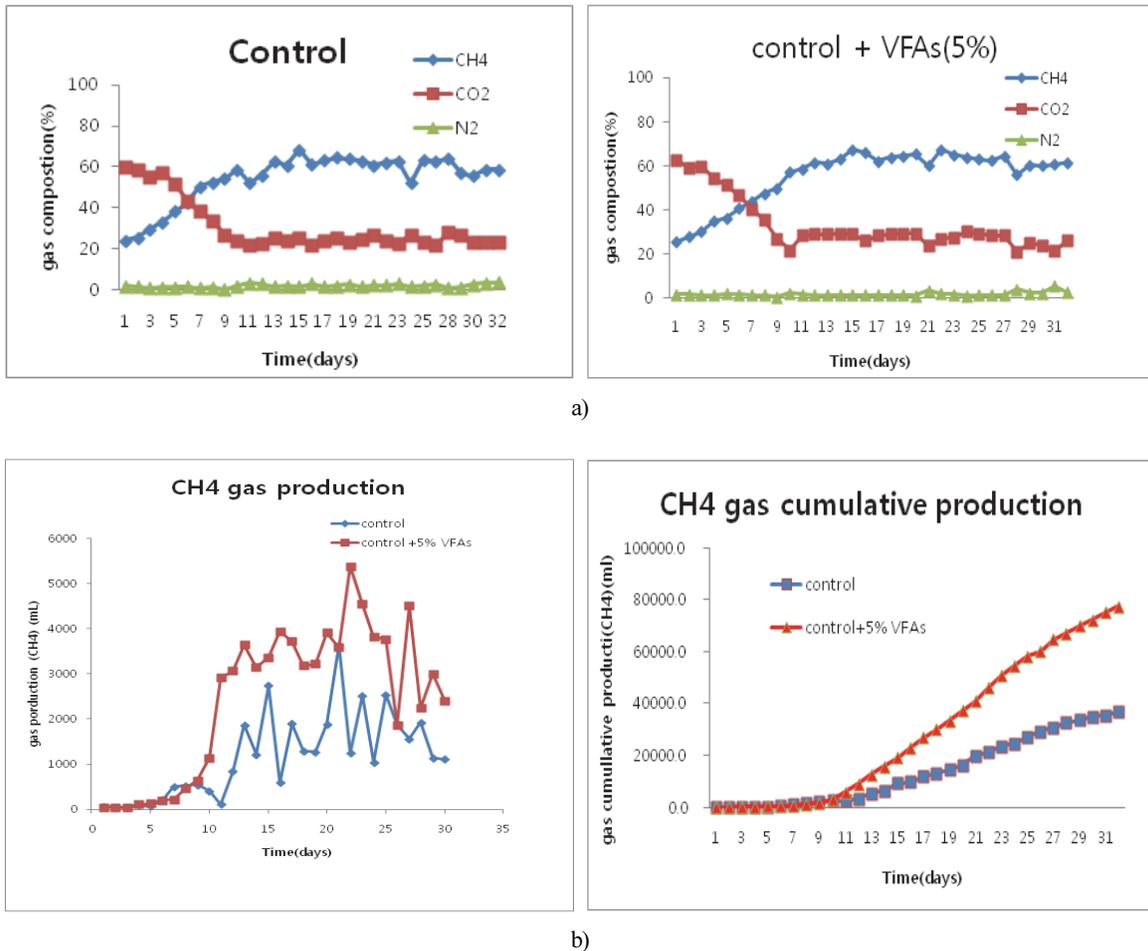


Fig. 2. a) Gas composition, b) CH₄ gas production

소화조내의 메탄발생량이 크게 발생됨을 보여주듯이 소화조내의 혐기성미생물 중 메탄생성균의 증가로 인해 TCOD값이 큰 차이가 나타났다고 사료된다. 실질적으로 메탄생성균을 측정하지 못하였지만 위의 투입된 증산제는 메탄생성균의 활성화를 가져다 주었으며, 이에 대한 반응으로 메탄가스량이 많은 량을 발생시켰다고 예측할 수 있다. 소화조내 TCOD 값이 높게 나타난 것은 혐기성 소화공정에 있어서 가수분해가 제한요인이라고 알려져 있는데 투입된 증산제로 인해 혐기성미생물들이 활성화로 인해 가

수분해 단계가 감소된 결과라 볼 수 있으며, 이는 투입된 증산제가 5%정도 밖에 안됨에도 불구하고 메탄 가스발생량의 차이를 보여지고 있는 것은 매우 큰 효과임을 보여주고 있다. 따라서 투입된 농축슬러지의 분해율이 빠르게 진행되고 있다고 볼 수 있다.

3.3. 고형물의 특성

소화조내의 고형물의 농도를 살펴본 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 보듯이 증산제를 투입된 소화조내의 총고형물과 휘발성고형물의 농도가 농

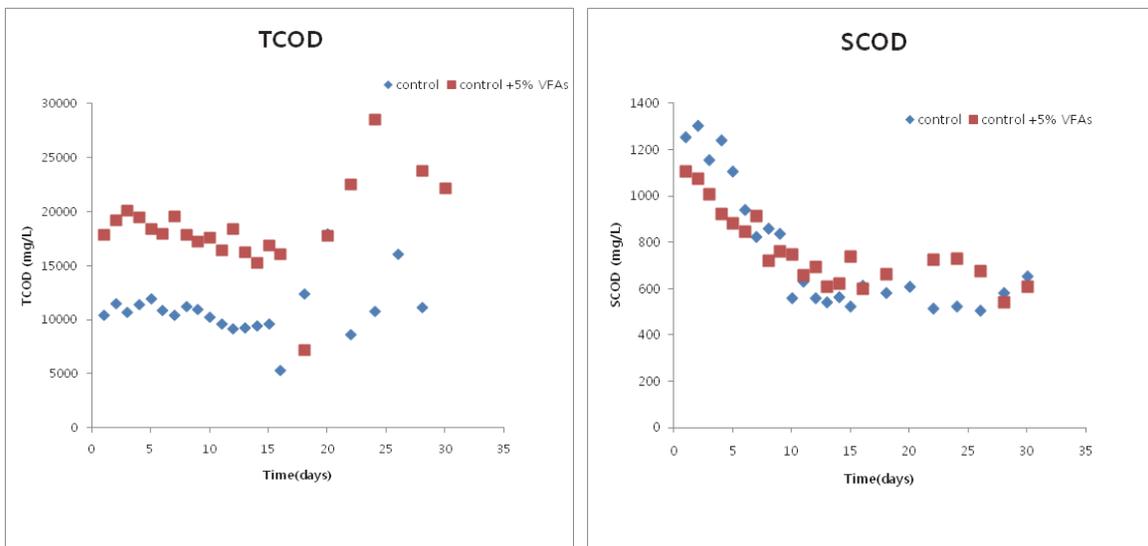


Fig. 3. Variation of TCOD and SCOD in each anaerobic digestion.

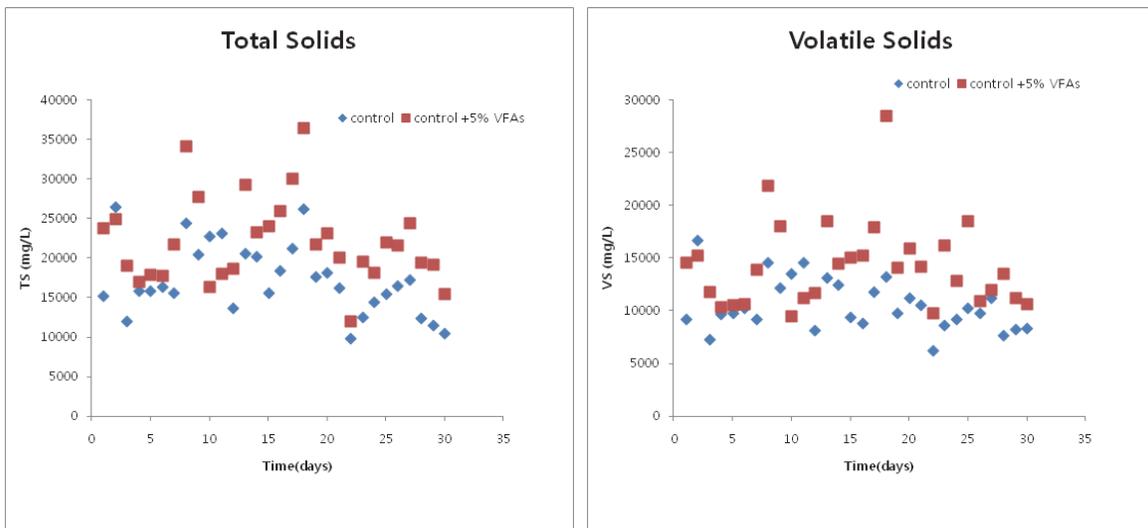


Fig. 4. Variation of Total Solids and Volatile Solids in each anaerobic digestion.

축슬러지만 투입된 것에 비해 높게 나타남을 보여 주고 있다. 위의 메탄가스발생량과 COD의 특성에서 제시하였듯이 소화조내 미생물의 농도가 더 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 투입된 증산제 효과로 인해 소화조내 혐기성 미생물의 활성도가 증가되어 미생물의 수가 증가됨을 추정할 수 있다.

3.4. 영양염류의 특성

영양염류의 특성인 TN 및 TP의 변화는 Fig. 5에 나타냈다. 두 소화조 모두 큰 변화없이 유사한 형태로 나타나고 있다. Table 1에서 제시하였듯이 초기 투입된 조건에서 총질소와 총인의 농도는 증산제가 상당부분 높게 나타나고 있는데 투입된 양이 5%임을 감안하면 소화조의 운전에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있으며 오히려 미생물의 활성화에 기여하였다고 사료된다.

3.5. VFAs의 특성

증산제를 첨가한 소화조의 메탄가스발생량이 농축슬러지만 투입된 소화조보다 큰 증가폭을 나타낸 것은 Table 3과 Fig. 6에 증산제의 VFAs의 농도를 보면 알 수 있다. 일반적으로 메탄 가스 발생은 혐기소화과정에서 가수분해단계와 산발효단계 그리고 메탄생성단계를 지나면서 생성된다고 보고되고 있다. 특히 메탄생성은 초산을 이용하면서 메탄생성과정이 70%, 수소를 이용하면서 생성하는 메탄생성과정이 30% 정도 메탄가스가 생성이 된다고 보고되고 있다¹⁰.

본 연구에서의 증산제가 첨가된 소화조에서 메탄 가스 발생량이 높게 나타난 것은 Table 3에서 보듯이 증산제의 초산농도가 상대적으로 매우 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 다른 유기산들은 농축슬러지와 비슷하지만 초산의 농도는 약 7배정도 높음을

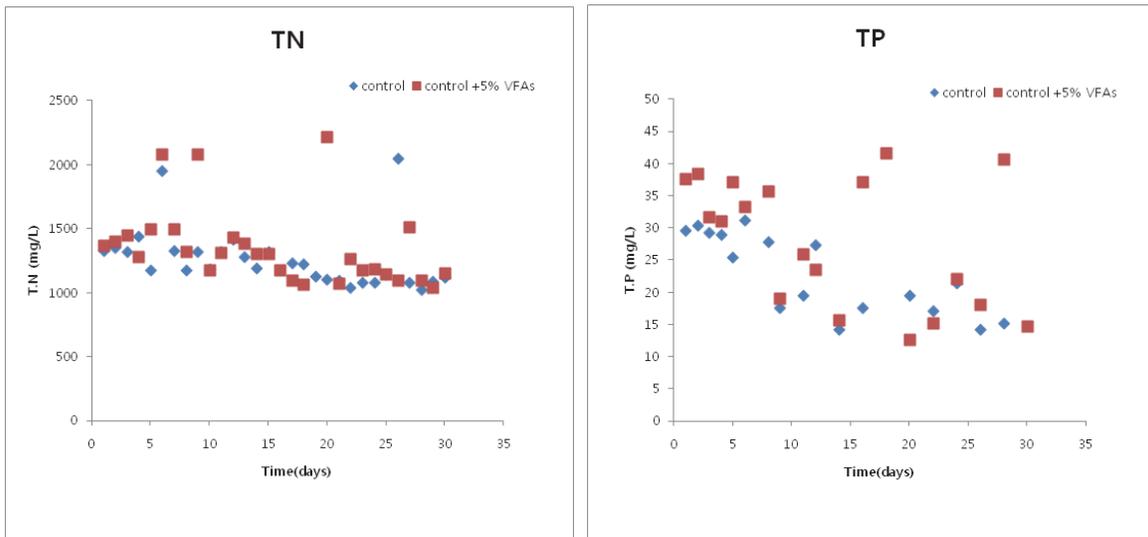


Fig. 5. Total Nitrogen and Total Phosphorus in each anaerobic digestion.

Table 3. VFAs concentration

	Anaerobic digestion solution	VFAs from food waste	Thickened sludge
Acetic acid (mg/L)	13.08	10675.55	1535.11
Propionic acid (mg/L)	3.59	1137.68	1027.39
Iso-butyric acid (mg/L)	0.68	325.28	152.21
Butyric acid (mg/L)	0.85	710.99	517.42
Iso-valeric acid (mg/L)	0.87	195.56	229.29
Valeric acid (mg/L)	0.95	290.05	238.61

보여주고 있다. 본 연구에서는 농축슬러지에 증산제를 5%정도만 투여해서 나타난 결과를 볼 때면 상당한 효과임을 알 수 있다.

Fig. 7은 두 소화조내의 VFAs농도의 변화를 나타냈으며 두 반응조 모두 유사한 형태를 보여주고 있는 것으로 보아 농축슬러지의 분해는 같지만 투입된 증산제의 효과로 인해 메탄가스 발생량에 크게 기여하고 있음을 간접적으로 작용이 되었다고 판단된다. 본 연구는 음식물폐기물로부터 얻어진 증산제의 효과를 입증할 수 있었으며, 향후 혐기성소화율 향상에 적용된다면 고효율 메탄가스효율의 크게 향상될 것으로 사료된다. 또한 슬러지의 감량화 뿐만 아니라 에너지측면에서도 크게 도움이 될 것이며, 상용화할 수 있는 방안도 고려해볼 필요가 있다고 판단된다.

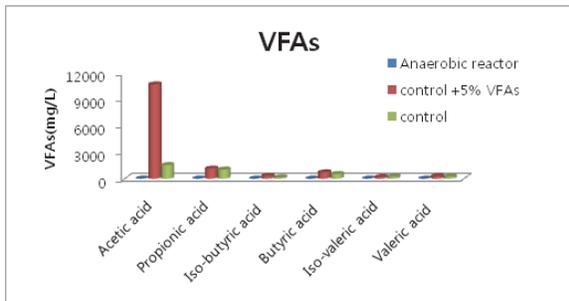


Fig. 6. The VFAs concentration

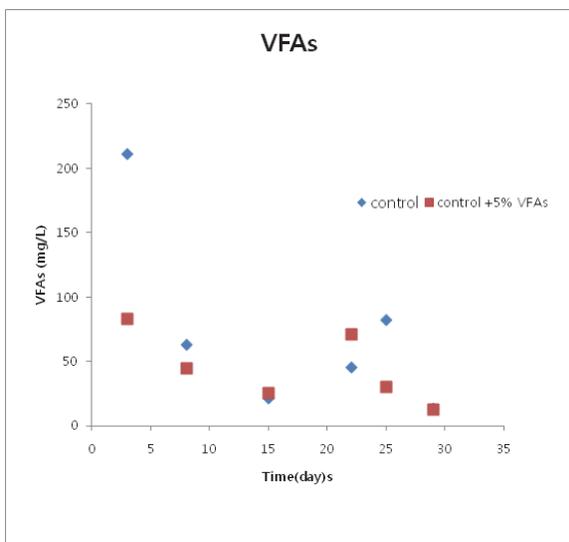


Fig. 7. Variation of VFAs in digestion 1 and 2

4. 결론

본 연구는 음식물폐기물로부터 얻어진 바이오가스 증산제 용액을 농축슬러지와 함께 혐기소화조의 투입한 결과 메탄생성의 특성 및 소화조 향상을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 증산제를 첨가한 소화조에서 농축슬러지만 투입한 소화조보다 메탄가스 발생량이 약 2.21배 정도 높게 발생하였다.
2. 소화조내의 TCOD 농도의 변화에서도 증산제를 투입한 소화조가 농축슬러지만 투입한 소화조보다 2배이상 높게 나타나 농축슬러지의 분해향상에 도움을 주었다.
3. 증산제의 VFAs농도 중 초산의 농도가 매우 높게 나타남으로 메탄생성효율에 크게 기여함을 간접적으로 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 에너지기술개발사업(한국에너지기술평가원)에서 지원받았습니다. 과제번호(2063010140590). 이에 감사드립니다.

References

1. [환경관리공단, 하수슬러지 처리 및 자원화 방안] Environmental Management Corporation, A Study on the Treatment and Resource of Sewage Sludge. (2005).
2. Stern Review on the Economics of Climate Change. (2006).
3. Richard A., Posner, Catastrophe : risk and response. (2006).
4. IAR4, WG., ntergovernmental Panel on Climate Change. (2007).
5. [환경부, 환경백서] The Department of the Environment, Environment white paper. (2015).

6. Ahn, C. W., Jang, S. H. and Park, J. S., "Effects of Mixing Ratio and Organic Loading Rate of Acid Fermented Food Wastes and Sewage Sludge on the Anaerobic Digestion Process", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 25(3), pp. 247~256. (2006).
7. Jeong, T. Y., "Role and Characteristics of Sulfate Reducing Bacteria(SRB) and Methane Producing Bacteria(MPB) by Sulfate Concentration in Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludges", Yonsei University, Academic Thesis. (2003).
8. Shuler, M. L., and Kargi, F., "Microorganisms of Wastewater", Dongwha Technology. (1996).
9. Shin, H. S., Bae, B. U. and Paik, B. C., "Anaerobic Digestion of Distillery Wastewater in a Two-phase UASB System", *Koeran Society of Civil Engineers*, 10(4). pp. 185~192. (1990).
10. Ghosh, S., Conrad, J. R. and Klass, D. L., "Anaerobic Acidogenesis of Wastewater Sludge", *J.WPCF*, 47(1), pp. 30~45. (1975).
11. APHA, AWWA and WPCF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 17th edition, American Public Health Association, Washington, D.C. (1989).