



음식물류 폐기물 처리를 위한 준 회분식 액순환 건식 혐기성 소화법에 대한 기초연구

조찬휘, 이병희[†]

경기대학교 환경에너지공학과

(2015년 6월 8일 접수, 2015년 6월 21일 수정, 2015년 6월 22일 채택)

Preliminary Study of Semi-continuous Liquid Recirculating Anaerobic Digestion for Source Separated Food Waste

Chan-Hui Cho, Byong-Hi Lee[†]

Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University,

ABSTRACT

In this study, the experiment was carried out to produce methane by applying Semi-Continuous Leachate Recirculation Anaerobic Digestion System fed with source separated food waste from school cafeteria. There were two systems and each system consisted of a bioreactor and a liquid tank. Each bioreactor had a screen near the bottom of the reactor. 2.5L of separated liquid was transferred to the liquid tank for 30min each day by using a tubing pump and the liquid from the liquid tank was pumped to the bioreactor at the upper of the bioreactor as soon as the transfer was ended. Through this circulation, the liquid having high concentration of VFAs was supplied to the top of bioreactor. At the beginning of the experiment, food waste/inoculum anaerobic sludge volume ratio was 2:8 that is 9g VS/L of OLR(Organic Loading Rate). Feeding was conducted every two weeks. Experimental results showed that the contents of moisture, combustible matter, ash were 65.91%, 32.73%, and 1.36%, respectively. Two different food waste loading were studied. The average organic loading rates were 3.51g VS/d for System A and 3.86g VS/d for System B, respectively. The average produced methane based on food waste fed to bioreactor were observed as $6.30\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgVS} \cdot \text{d}$ for system A and $4.94\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgVS} \cdot \text{d}$ for System B, respectively.

Keywords : Food waste, Anaerobic digestion, Liquid circulation, Methane.

[†]Corresponding author(bal@kyonggi.ac.kr)

초 록

본 연구에서는 학교 식당에서 배출되는 음식물류 폐기물을 준 회분식 액순환 건식 혐기성 소화를 이용해서 메탄가스를 생산하였다. 두 시스템이 운전되었는데, 각 시스템은 생물반응조와 액 저장조로 구성되었다. 각 생물반응조 바닥은 스크린이 설치되어 있어 2.5L의 분리된 액체는 액 저장조로 30분 동안 이송되고 이송이 끝나자마자 이송된 액은 반응조 상부로 투입된다. 이 같은 순환은 고농도의 VFAs를 가지는 액체를 반응조 상부로 공급하는 역할을 한다. 실험 초기에는 음식물류 폐기물/식중 미생물의 부피 비는 2:8이고 이는 9g VS/L의 유기물 부하로 나타낼 수 있다. 음식물류 폐기물 투입은 2주에 한 번이었고, 평균 수분, 휘발물질, 회성분은 각각 65.91%, 32.73%과 1.36%로 파악되었다. 두 개의 고형물 부하가 연구되었는데, 각각 3.51g VS/d (System A)와 3.86g VS/d(System B)이다. 음식물류 폐기물 당 메탄 발생량은 각각 $6.30\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgVS} \cdot \text{d}$ (System A)와 $4.94\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgVS} \cdot \text{d}$ (System B)이다.

주제어 : 음식물류 폐기물, 혐기성 소화, 액 순환, 메탄

1. 서론

음식물류 폐기물은 2013년도 기준 매년 5백만 톤이 발생되고 있다. 2005년 이후로 대부분의 음식물류 폐기물은 음식물류 폐기물의 직매립 금지로 재활용되고 있다¹⁾. 대부분의 경우 퇴비화되거나 사료화 되고 있으며, 국내에서 음식물류 폐기물을 전처리 없이 그자체로 처리하는 시설은 거의 없는 실정이다²⁾. 퇴비화 및 사료화 공정은 처리해야 할 폐수를 발생시키며, 음식물류 폐기물 자체로 처리하는 건식 혐기성 소화의 경우도 폐수를 발생시키지만 에너지원인 메탄을 생산하는 장점이 있다^{3,4,5)}.

건식 혐기성 소화공정은 반응조의 고형물 농도를 20%내외로 유지하는 것으로 음식물류 폐기물을 건식 소화공정으로 처리하는 경우에는 물의 추가 투입 없이 혐기성 반응이 수행될 수 있으나, 고형물 농도가 10% 이내로 유지하는 습식 혐기성 소화공정을 이용하는 경우에는 음식물류 폐기물에 물을 투입해야하므로 공정 투입물의 부피가 증가한다⁶⁾. 이 같은 이유로 음식물류 폐기물을 건식 혐기성 소화공정으로 처리하는 경우에는 습식 혐기성 소화공정에 비해 반응조의 체적을 크게 줄일 수 있다⁷⁾. 혐기조 반응은 반응조 온도를 일정하게 유지시켜 주어야 하는데, 중온

소화의 경우에는 35℃내외, 고온 소화의 경우에는 55℃를 유지시켜 주어야 한다⁸⁾. 반응조의 온도를 유지하기 위해서는 반응조 투입 전에 투입물의 온도를 반응조와 동일하게 맞춰야 했고, 건식 혐기성 소화공정 투입물이 습식 혐기성 소화공정 투입물보다 수분이 적은관계로 투입물의 반응조 온도에 맞추는데 소요되는 열량이 적다. 이 같이 건식 혐기성 소화공정은 습식 혐기성 소화공정에 비해 반응조가 작아지고, 또한 소화공정 투입물의 가온에 적은 에너지가 필요하다.

건식 혐기성 소화공정에 있어서 가장 크게 대두되는 문제는 반응조 내부 물질의 혼합인데, 일부 공법에서는 기계식 교반을 사용하고 있으나, 고농도의 고형물로 인해 운전이 어려워 있는 것으로 보고되었다⁷⁾. 또 다른 혼합방법은 반응조 하부의 고형물을 인발해서 반응조 투입물과 함께 반응조 상부에 투입하는 것인데, 이는 반응조 내부 물질의 이동을 통해서 반응조 혼합을 유도하는 것이다. 위에서 언급한 두 방법은 수분이 매우 적은 음식물류 폐기물에 수분을 투입해서 적정 고형물 농도를 유지시켜 운전하는 것으로 유럽의 여러 현장에서 적용되고 있다⁹⁾. 두 번째 혼합방법을 사용하는 공법이 국내 음식물류 폐기물 혐기성 소화에 적용되었는데¹⁰⁾, 이 공법의 운전이 원활하지 않은 것으로 보고되었다¹¹⁾. 유럽에

서 발생하는 음식물류 폐기물은 수분함량이 적은 관계로 수분투입량 조절을 통해 반응조에서의 혐기성 반응을 제어할 수 있으나, 수분이 많이 포함된 국내 음식물류 폐기물의 경우 수분 투입량 조절이 불가능해서 발생된 현상으로 추정된다.

건식 혐기성 소화조 반응조에서의 물리적인 혼합을 대신해서 혐기성 반응조의 액체 순환을 수행하는 공법이 개발되었다^{12~15)}. 이 공법은 혐기성 반응조 하부에서 액체를 모아 액체 저장조 이송 후에 이를 혐기성 반응조 상부로 투입시켜 건식 혐기성 반응조의 혼합을 수행한다. 혐기성 반응은 크게 가수분해 반응, 산 생성 반응, 메탄생성 반응으로 나뉘는데, 산 생성반응이 과다하면 이 반응으로 생산된 휘발성 산은 가수분해 및 메탄생성 반응을 방해하여 전체적인 혐기성반응을 멈추게 한다. 그러므로 혐기성 반응에서의 적절한 휘발성 산 총량 조절은 전체적인 혐기성 반응의 성패를 좌우한다.

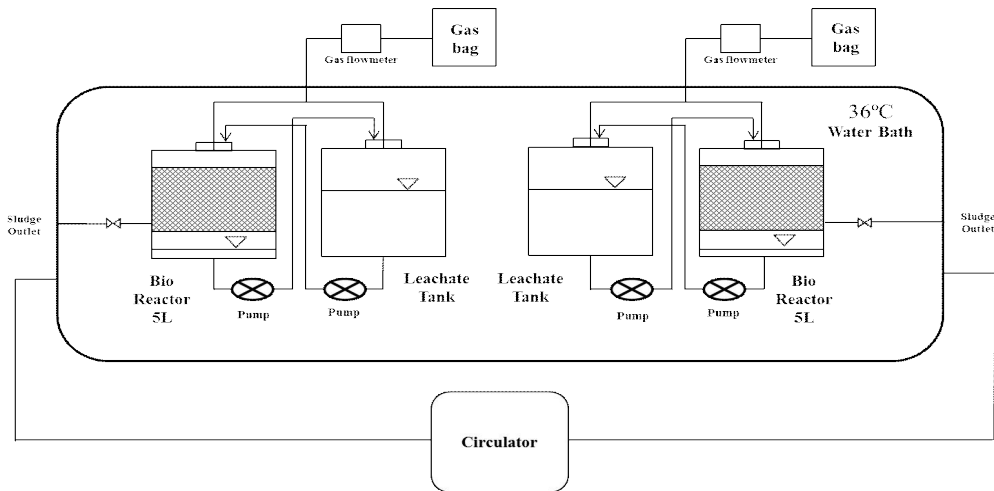
음식물류 폐기물에는 다량의 유기물을 함유하고 있는데, 수분이 충분히 존재하는 혐기성 상태에서는 가수분해 및 산 생성반응이 활발할 것이므로 짧은 시간에 다량의 휘발성 산이 생산될 것이고, 다량의 휘발성 산은 가수분해 및 메탄생성 반응을 억제할 것이라 판단된다. 그러므로 다량의 수분이 존재하는 음식물류 폐기물의 경우에는

혐기성 반응조에서 수분을 일시적으로 인발하여 수분이 포함된 휘발성 지방산을 일시적으로 인발한 후에 혐기성 반응조 상부로 공급하면 과도한 휘발성 지방산에 의한 가수분해 및 메탄생성 반응 억제를 해소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로 다량의 유기물뿐만 아니라 수분을 함유하고 있는 국내 음식물류 폐기물의 액체 순환 혐기성 반응 시스템을 연구해서 국내 음식물류 폐기물에 적합한 건식 혐기성 소화공정에 대한 연구가 필요하다.

2. 재료 및 방법

본 실험은 경기도 수원시에 위치한 K대학교 기숙사 식당에서 음식물류 폐기물을 수집하여 실험을 수행하였다. 음식물류 폐기물은 2주에 1회 수집하였으며 음식물류 폐기물의 반응조 투입에 따른 온도 영향을 최소화시키기 위해 투입 하루 전에 음식물류 폐기물을 수집하여 반응조 온도 36°C가 유지되는 BOD incubator에 저장 시켰다. 투입되는 음식물류 폐기물에 대해서는 가온이외의 전 처리는 수행되지 않았다.

실험 장치는 [Fig. 1]에서 보여주고 있는바와 같이 2개의 시스템으로 구성되어 있으며 한 개의 시스템은 생물반응조 (Bioreactor)와 액 저장



[Fig. 1] Schematic diagram of high solid anaerobic digestion process.

조 (Leachate Tank)로 구성되어 있다. 음식물류 폐기물은 생물반응조 상부를 개방하여 투입시켰으며 투입 후 대기 중 산소에 의한 혐기성 반응 저해를 방지하기 위해 생물반응조 상부 덮개 밀봉 후 덮개 구멍을 통해 질소 가스를 주입하여 반응조 상부의 산소를 제거하였다. 중온 소화를 수행하기 위해 시스템의 생물반응조 및 액 저장조는 수조에 넣었는데, 수조의 수온은 물 순환장치의 수온 설정에 의해 36°C로 유지되었다. 동절기에는 수온의 저하가 우려되어 수조 내부에 가온장치를 투입하였다.

생물반응조와 액 저장조의 용량은 5L 이며 내경은 180mm, 길이는 260mm이고 덮개 높이는 20mm이다. 생물반응조 하단에는 양과 망이 덮힌 4mm간격으로 직경 4mm 구멍이 뚫린 스테인리스 스틸 다공판을 설치하여 생물반응조 내부의 액체가 하부로 모일 수 있도록 하였다. 하부의 모인 액체를 인발하기 위해 다공판에는 별도의 8mm구멍을 만들어 인발호스가 통과할 수 있도록 하였다. 생물반응조 하부에 모여지는 액체는 상부 덮개 구멍과 하단 8mm구멍을 통과하는 관을 통해 반응조 외부로 인발된다. 혐기성 소화가 완료된 고형물을 인발하기 위해 스테인리스 스틸 다공판 상부 높이에 수평으로 내경 14mm의 관을 설치하였고, 이 관은 수조를 통과하여 수조 외부 밸브와 연결시켰다. tubing pump는 생물반응조 하단에서 인발된 액체를 액 저장조로 이송하는데, 액 이송은 하루에 한번 수행되었으며 이송시간은 30분으로 하여 생물반응조의 액이 서서히 하부로 이동하도록 하였다. 액 이송은 액 저장조 상부 덮개의 구멍을 통해서 이루어지도록 하였다. 액 이송이 완료되면 생물 반응조로의 액 순환이 수행되는데, 액 인발과 동일하게 tubing pump를 사용하였다. 액 순환은 액 이송이 완료됨과 동시에 수행하는데, 액 인발과 동일한 시간이 30분동안 액 순환이 일어나도록 하였다. 액 저장조 상부 덮개 구멍을 통과하는 액 순환관은 생물반응조 상부 덮개 구멍과 연결하여 생물반응조 상부로 순환액이 공급되도록 하였다. 가스는 생물반응조 및 액 저장조 상부 덮개 구멍을 통해 수집

되었는데, 각 시스템에서 수집된 가스는 tipping bucket을 통과한 후 gas bag으로 수집된다. tipping bucket은 가스가 포집부에 차면 가스를 gas bag으로 보내는데, tipping 횟수는 전자장치를 통해서 기록되어 총 가스발생량을 파악하게 된다.

실험 초기에는 액 인발 수행 후 액 순환을 수행하지 않고 액 저장조에 액을 일시적으로 저장한 후 일시적이 아닌 주기적으로 소량의 액 순환이 일어나도록 하였는데, 이는 실험초기 순환액의 고농도 VFAs에 의해 생물반응조에서의 가수분해 및 메탄생성 반응이 저해 받지 않도록 하기 위함이다. 실험이 경과하면서 가스발생량 증대를 위해서 액 순환유량을 증가시켰는데, 실험 시작 후 4개월 후 부터 30분 액 인발/액 순환 모드에서 안정적으로 가스가 발생하는 것이 관측되어 이 운전모드를 사용하고 있다.

음식물류 폐기물은 경기도 수원시에 위치한 K대학교 기숙사 식당에서 수집하였는데, 음식물 투입량 변화에 따른 혐기성 반응 변화를 파악하기 위해 각 시스템에 다른 량의 음식물류 폐기물을 투입하였다. A와 B시스템에는 각각 약 0.7g VS/m³/d 및 0.77g VS/m³/d의 음식물류 폐기물을 2주에 1회 투입하였는데, 이는 각각 평균적으로 3.2g VS/m³ (System A)와 3.5g VS/m³ (System B)에 해당한다. 식중 혐기성 미생물은 서울특별시 N 물재생센터 혐기성 소화조의 슬러지를 사용하였는데, 시행착오를 거쳐 음식물류 폐기물:혐기성 슬러지 부피 비를 2:8로 한 경우 운전이 안정적으로 수행되었다.

투입되는 음식물류 폐기물은 삼성분 분석을 통해 수분, 가연분, 회분을 파악하였고, TS 및 VS 량은 Standard Methods¹⁶⁾에 준해 분석하였다. 가스성분은 MultiFunction Gas Analyser(Gas Data Ltd, UK)를 이용해 가스 중 CH₄, CO₂, N₂, O₂를 측정하였다.

2014년 8월에 적정 음식물 투입량 대비 식중 미생물양을 파악한후 실험을 수행하였는데, 2015년 6월까지 분석을 위한 순환액 인발을 제외하고는 소화슬러지를 포함한 A 및 B 시스템으

로 부터의 어떠한 인발도 이루어지지 않았다.

3. 결과 및 고찰

음식물류 폐기물의 삼성분 분석 결과 수분, 가연분, 재의 비율은 각각 65.91%, 32.73%, 1.36%로 나타났다 ([Table 1] 참조). 음식물류 폐기물은 두 가지의 다른 평균 부하량(System A 150g, System B 165g)으로 투입하였으며, 삼성분 분석에 기초한 평균 주입 유기물 부하량은 Ssystem A에 대해서 0.7g VS/m³/d, Ssystem B에 대해서 0.77g VS/m³/d로 나타났다.

[Table 2]는 음식물류 폐기물 주입주기 (phase)를 기준으로 측정한 바이오가스량 및 성상이다. 이 표에서 A와 B는 각각 System A 및 B를 말하는 것이다. 각 Phase 별 실험일은 [Table 3]에 나와 있으며, 14년 8월19일에서 9월1일까지 진행한 실험의 경우 초창기 가스성분 분석기의 수리로 인하여 구형 가스분석장치를 사용하여 A-1과 B-1의 1, 2일차 가스분석은 CH₄와 CO₂만 측정할 수 있었다. System A의 경우 발생된 바이오가스의 2/3 가량은 7일 이전에 발생하였으며, 메탄 함량의 경우 5~7일차에 최대치로 발생하기 시작하였다. A-1의 경우 실험 초기였기 때문에 반응조 내 혐기성 미생물이 음식물류 폐기물에 적응하는데 시간이 좀 더 걸린 것

으로 판단된다. System B의 경우에도 바이오가스의 2/3 가량은 7일 이전에 발생하였으며, 메탄 함량의 경우 System A보다는 좀 더 빠르게 최대치로 발생하기 시작하였다. 이는 혐기성 미생물이 음식물류 폐기물에 적응한 후 System A보다 많은 유기물을 섭취한 것으로 판단된다. B-1의 7~9일의 발생 바이오가스의 경우 전후의 자료를 근거로 가스 백에 이상이 있어 가스의 성상이 잘못 나온 것으로 판단하였다.

[Table 2] Period and Accumulated Methane Volume with Regard to Phase

| Phase | Period | Accumulated Methane (L) |
|-------|-------------------|-------------------------|
| A-1 | 14.08.19~14.09.01 | 21.1 |
| A-2 | 14.09.22~14.10.05 | 22 |
| A-3 | 15.01.08~15.01.21 | 20.9 |
| A-4 | 15.03.05~15.03.18 | 24.5 |
| B-1 | 14.08.19~14.09.01 | 23.9 |
| B-2 | 15.01.08~15.01.21 | 16.7 |
| B-3 | 15.05.10~15.05.23 | 16.6 |

Note : The volume of accumulated Methane is calculated in STP conditions.

[Table 1] Results of Three Element Analysis of Food Waste

| Item | Food Waste 1 | Food Waste 2 | Food Waste 3 | Average |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | (Unit : g) | (Unit : g) | (Unit : g) | |
| Food Waste (Wet basis) | 19.52 | 17.17 | 21.31 | 19.33 |
| Moisture | 12.04 | 9.73 | 16.44 | 12.74 |
| | (61.71%) | (56.69%) | (77.17%) | (65.91%) |
| Combustible component | 7.23 | 7.17 | 4.58 | 6.33 |
| | (37.03%) | (41.78%) | (21.50%) | (32.73%) |
| Ash | 0.24 | 0.26 | 0.28 | 0.26 |
| | (1.25%) | (1.53%) | (1.32%) | (1.36%) |

Note : Food wastes of 1, 2, 3 were taken on Aug. 19, 2014, Sep. 12, 2014 and Jan. 18, 2015, respectively.

[Table 3] Daily Produced Biogas Volume and Characteristics

| Phase | Day | CH ₄ | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | Produced Biogas L |
|-------|-------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------------|
| | | % | % | % | % | |
| A-1 | 1 | 50.0 | 44.4 | - | - | 14.00 |
| | 1~4 | 58.2 | 30.2 | - | - | 8.71 |
| | 4~7 | 39.5 | 9.7 | 40.2 | 10.6 | 3.30 |
| | 7~11 | 41.0 | 2.9 | 42.6 | 12.8 | 4.17 |
| | 11~12 | 64.0 | 6.8 | 22.1 | 7.3 | 2.68 |
| | 12~14 | 73.0 | 19.0 | 5.0 | 2.9 | 5.83 |
| A-2 | 1~8 | 53.0 | 40.0 | 6.5 | 1.1 | 21.70 |
| | 8~14 | 75.0 | 20.0 | 2.8 | 1.1 | 14.30 |
| A-3 | 1~4 | 24.5 | 75.0 | 0.8 | 0.2 | 21.00 |
| | 4~5 | 65.0 | 32.0 | 2.9 | 1.0 | 5.56 |
| | 5~6 | 73.0 | 20.0 | 5.9 | 1.0 | 5.50 |
| | 6~11 | 74.0 | 18.0 | 6.9 | 1.0 | 5.50 |
| | 11~14 | 74.0 | 19.0 | 5.8 | 1.2 | 5.50 |
| A-4 | 1 | 30.5 | 65.0 | 20.0 | 4.5 | 3.87 |
| | 1~2 | 36.0 | 39.0 | 18.3 | 8.1 | 2.60 |
| | 2~5 | 57.0 | 28.0 | 10.7 | 4.2 | 4.33 |
| | 5~8 | 47.0 | 50.0 | 2.0 | 1.0 | 10.00 |
| | 8~10 | 73.0 | 18.0 | 6.0 | 2.9 | 5.00 |
| | 10~11 | 75.0 | 10.0 | 10.8 | 4.1 | 2.00 |
| B-1 | 1 | 50.0 | 42.6 | - | - | 15.00 |
| | 1~2 | 58.2 | 30.2 | - | - | 9.06 |
| | 2~4 | 62.0 | 15.1 | 17.0 | 5.9 | 3.23 |
| | 4~7 | 64.0 | 16.0 | 15.4 | 4.6 | 5.10 |
| | 7~9 | 41.0 | 2.9 | 42.6 | 12.8 | 4.17 |
| | 9~11 | 69.0 | 21.3 | 6.5 | 3.2 | 1.59 |
| | 11~14 | 71.0 | 20.0 | 6.0 | 3.0 | 5.07 |
| | 1 | 21.0 | 79.0 | 0.6 | 0.0 | 15.00 |
| B-2 | 1~4 | 66.0 | 30.0 | 3.9 | 1.1 | 5.07 |
| | 4~6 | 74.0 | 20.0 | 4.9 | 1.0 | 6.00 |
| | 6~11 | 74.0 | 20.0 | 4.9 | 1.0 | 6.35 |
| | 11~14 | 73.0 | 21.0 | 4.9 | 1.0 | 4.00 |
| | 1 | 27.0 | 40.0 | 28.7 | 4.3 | 7.92 |
| B-3 | 1~2 | 16.8 | 44.9 | 33.4 | 4.9 | 4.40 |
| | 2~4 | 30.9 | 61.0 | 6.2 | 1.9 | 7.27 |
| | 4~7 | 72.0 | 18.0 | 8.8 | 1.2 | 5.05 |
| | 7~10 | 65.0 | 23.0 | 10.5 | 1.5 | 6.33 |
| | 10~14 | 72.0 | 17.0 | 9.6 | 1.4 | 5.17 |

투입된 VS당 생산된 메탄가스량은 System A의 경우 6.30m³CH₄/kgVS · d 이였고, System B의 경우 4.94m³CH₄/kgVS · d 였다.

투입된 VS당 생산된 메탄가스량(System A)

$$= \frac{(21.1 + 22 + 20.9 + 24.5)}{4} \times 10^{-3} m^3 CH_4$$

$$\times \frac{1}{3.51 \times 10^{-3} kg VS \cdot d} = 6.30 m^3 CH_4 / kg VS \cdot d$$

$$\begin{aligned} & \text{투입된 VS당 생산된 메탄가스량(System B)} \\ &= \frac{(23.9 + 16.7 + 16.6)}{4} \times 10^{-3} m^3 CH_4 \\ & \times \frac{1}{3.51 \times 10^{-3} kg VS \cdot d} = 6.30 m^3 CH_4 / kg VS \cdot d \end{aligned}$$

이는 System B에 더 많은 음식물류 폐기물을 투입했었지만, 반 연속식 공정운전으로 인해 반응조 내 순간적인 부하로 인해 반응조 내 혐기성 미생물의 활동이 저해되었다고 판단된다. 이는 다음 [Fig. 2]의 누적 메탄발생량 그래프에서 System A의 경우 발생하는 메탄가스량이 거의 일정하지만, System B의 경우 B-1에서 B-3으로 갈수록 메탄가스량이 감소한 것으로부터 알 수 있다.

4. 결론

연구의 결과 국내 음식물류 폐기물은 건식 혐기성소화 공정으로 처리할 수 있었고 메탄을 성공적으로 생산할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 공정은 생물반응조 내 기계적 교반 없이 혐기성 반응조로부터의 액체의 재 순환만 으로 혐기성소화를 진행할 수 있었다. 차후 국내 음식물류 폐기물의 고온 운전조건에서의 혐기성소화 효율

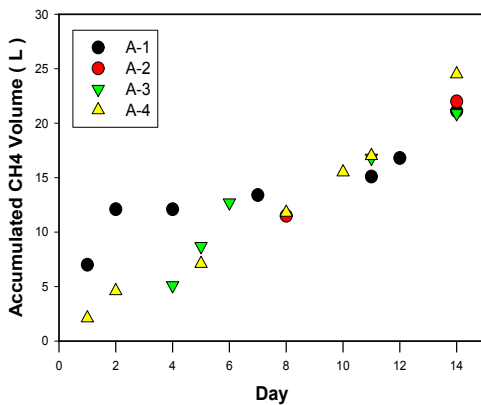
에 대한 연구 및 순환액의 NH₃-N 및 염분 농축이 혐기성 소화에 미치는 영향을 파악해야 한다. 본 연구를 통해서 수분을 다량 함유한 국내 음식물류 폐기물을 액순환 건식 혐기성소화를 통해 처리할 수 있는 가능성을 파악하였다. 또한 본 연구에서는 유기물 투입이 적은 System A가 유기물 투입이 많은 System B에 비해 가스발생량이 많았는데, 이에 대한 연구는 좀 더 많은 실험을 통해서 증명되어야 한다고 판단된다.

사사

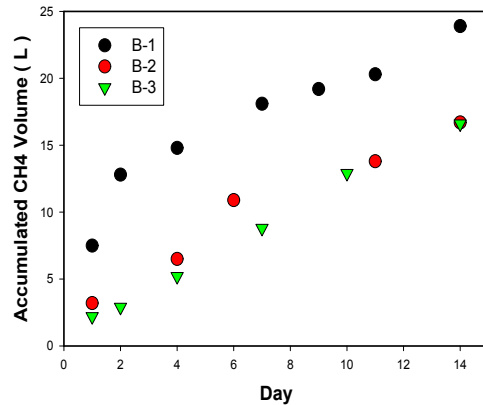
본 논문은 2015년도 SL공사의 에너지대학원 인재 양성 프로그램에서 지원받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, “음식물류 폐기물 관리정책 방향 및 개선방안 연구”. (2013)
2. 환경부, “전국폐기물통계조사”. (2013)
3. A. Karagiannidis and G. Perkoulidis G., “A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for



(a) System A



(b) System B

[Fig. 2] Daily accumulated gas volume with regard to system and phase

- energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes”, *Bioresource Technology*, 100(8), 2355~2360. (2009).
4. J. Mata-Alvarez, *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, IWA Publishing, pp. 111~140. (2003).
 5. 김문환, 조시경, 오세은, “고농도 음식물류 폐기물의 연속 중온 건식혐기성소화 시 반응조 안정성지표 및 저해현상의 모니터링”, *한국도시환경학회지*, 11(2), 161~167. (2011).
 6. K. D. Monson, S. R. Esteves, A. J. Guwy and R. M. Dinsdale, *Anaerobic digestion of biodegradable municipal wastes a review*, Sustainable Environment Research Centre, pp. 126~130. (2007).
 7. 이병희, 이제승, “침출수 순환형 음식물류 폐기물 혐기성 소화공법에 대한 초기 특성 파악”, *유기성 자원 학회지*, 21(4), 50~61. (2013)
 8. A. Khalid, M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood and L. Dawson, “Review The anaerobic digestion of solid organic waste”, *Waste Management*, 31, 1737 - 1744, (2011).
 9. K. D. Monson, S. R. Esteves, A. J. Guwy and R. M. Dinsdale, *Anaerobic digestion of biodegradable municipal wastes a review*, Sustainable Environment Research Centre, pp. 189~203. (2007).
 10. http://www.seohee.co.kr/home/seohees/base/bu/bu06_pop01.php
 11. 감사원, “감시결과보고서 - 음식물류 폐기물 바이오가스화 시설사업 관리실태”. (2014)
 12. G. Hofenk, S.J.J. Lips, B.A. Rijkens and J.W. Votberg, *Two-phase anaerobic digestion of solid organic wastes yielding biogas and compost*, Commission of the European Communities, pp. 1~32. (1986)
 13. D. P. Chynoweth, G. Bosch, J. F. K. Earle, Robert Legrand and Kexin Liu, “A novel process for anaerobic composting of municipal solid waste”, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 28/29(1), 421~432. (1991).
 14. A.H.M. Veeken and B.V. M. Hamelers, “Effect of substrate-seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowaste”, *Water Science and Technology*, 41(3), 255~262. (2000).
 15. S. Kusch, H. Oechsner and T. Jungbluth., “Effect of various leachate recirculation strategies on batch anaerobic digestion of solid substrates”. *Int. J. Env. Waste Manage.*, 9(1/2), 69~88, (2012)
 16. A. D. Eaton, L. S. Clesceri and A. E. Greenberg., *Standard Methods for the examination of water & wastewater*, 20th ed., APHA, AWWA, WEF, pp. 2-54~2-59. (1998).
 17. <http://www.roplant.or.kr/index.php?pid=2&sid=4> 