

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 3, 1998

파일럿 규모 음식쓰레기 2상 혐기소화 처리공정에 관한 연구

이준표, 이진석, 박순철

한국에너지기술연구소

Pilot Scale Anaerobic Digestion of Korean Food Waste

J. P. Lee, J. S. Lee, S. C. Park

Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

A 5 ton/day pilot scale two-phase anaerobic digester was constructed and tested to treat Korean food wastes in Anyang city. The process was developed based on 3 years of lab-scale experimental results on an optimum treatment method for the recovery of biogas and humus. Problems related to food waste are ever increasing quantity among municipal solid wastes(MSW) and high moisture and salt contents. Thus our food waste produces large amounts of leachate and bed odor in landfill sites which are being exhausted.

The easily degradable presorted food waste was efficiently treated in the two-phase anaerobic digestion process. The waste contained in plastic bags was shredded and then screened for the removal of inert material such as fabrics and plastics, and subsequently put into the two-stage reactors. Heavy and light inerts such as bones, shells, spoons and plastic pieces were again removed by gravity differences. The residual organic component was effectively hydrolyzed and acidified in the first reactor with 5 days space time at pH of about 6.5. The second, methanization reactor part of which is filled with anaerobic fillers, converted the acids into methane with pH between 7.4 to 7.8. The space time for

the second reactor was 15 days. The effluent from the second reactor was recycled to the first reactor to provide alkalinities.

The process showed stable steady state operation with the maximum organic rate of 7.9 kgVS/m³day and the volatile solid reduction efficiency of about 70%. The total of 3.6 tons presorted MSW containing 2.9 tons of food organic was treated to produce about 230m³ of biogas with 70% of methane and 80kg humus. This process is extended to full scale treating 15 tons of food waste a day in Euiwang city and the produced biogas is utilized for the heating/cooling of adjacent buildings.

1. 서 론

우리나라에서 발생하는 생활쓰레기는 1990년대 초반까지 매년 증가하였으나, 쓰레기 줄이기 운동이 확산되면서 점차 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그러나 음식쓰레기의 경우 발생량 면에서 약간 줄어들기는 하였으나, 생활쓰레기에서 차지하는 비중은 1991년에 28.5%에서 1995년에는 31.6%로 증가하였다¹⁾. 이러한 음식물 쓰레기는 수분함량이 75~85%로써 매우 높고 발열량이 낮아 소각이나 매립처리에 많은 어려움을 주며, 또한 운반 및 매립과정에서 악취와 염오감의 원인이 되고 있다. 최근 우리나라를 비롯한 전세계적으로 소각처리 부하량 감소와 매립지 확보난으로 인하여 재활용이 가능한 유기성 폐기물의 혐기성 소화에 의한 유기질 비료의 생산과 대체에너지원인 바이오가스를 생산하는 고휘폐기물 혐기소화 처리기술이 실용화되어 보급되고 있다^{2,3,4)}.

우리나라 음식물 쓰레기의 휘발성 고휘물은 평균 92.15%를 보이며, 음식물 쓰레기를 이용하여 혐기성 생분해도를 측정한 결과 휘발성 고휘물 1g 당 330~440 mL의 메탄가스가 발생하는 것으로 나타나 폐기물의 감량화와 대체에너지 개발측면에서 혐기성 소화처리가 타당성이 있는 것으로 나타났다⁵⁾. 그러나 고휘상태로 배출되는 음식물 쓰레기를 단일 발효조로 혐기소화에 의해 처리할 경우 발효조의 고휘물 농도가 5%를 넘게 되면 쉽게 소화될 수 있는 용해성 유기물질이 많아 발효초기에

다량의 유기산이 생성되어 pH가 낮아지고, 축적되는 유기산액을 적절히 제어하지 못하면 낮은 pH로 인해 메탄 생성균의 성장이 저해를 받게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 메탄발효공정을 두 단계로 구분하여 첫 번째 단계에서는 유기산액의 제어를 위하여 가수분해-산생성 발효를 유도하고 두 번째 단계에서 메탄발효를 촉진하는 2상 소화시스템을 도입하였다⁶⁾. 하루 10 kg의 음식물 쓰레기를 처리할 수 있는 규모로 2상 혐기소화 시스템을 제작하여 실험을 실시한 결과 550~650 L의 가스가 발생하였으며, 발생가스중의 메탄함량은 70~75 %를 기록하였다⁶⁾.

본 연구는 위와 같은 3년간의 실험실 규모 연구 결과를 바탕으로 2상 혐기소화 시스템을 이용한 음식물 쓰레기 처리시설의 실용화를 위한 전단계로써 하루 5톤의 생활쓰레기를 처리할 수 있는 pilot 규모 운전 실험을 실시하였다.

2. 공정 개요

Pilot 규모 음식물 쓰레기 2상 혐기소화 처리시설은 경기도 안양시에 설치하였으며, 선별 수거된 하루 5톤의 생활쓰레기중 60%를 차지하는 음식물 쓰레기 3톤을 선별하여 처리할 수 있도록 설계하였으며, 또한 자동운전이 가능하도록 하였다.

본 pilot 시설은 생활쓰레기중 유기성 폐기물(주로 음식물 쓰레기)를 분리하는 전처리 공정과 대

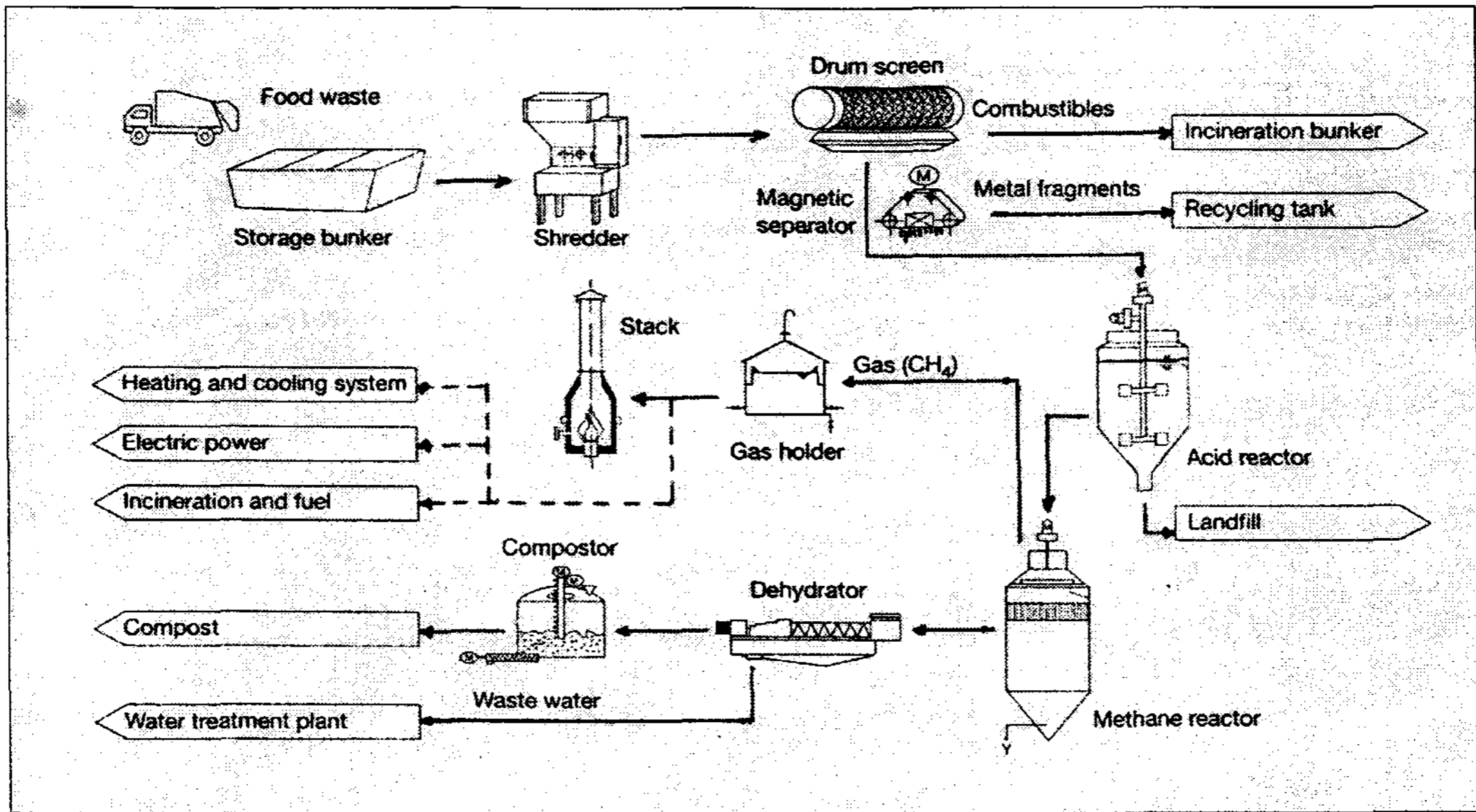


Fig. 1. Schematic diagram of 5 tons/day two-phase anaerobic digestion process

체 에너지원인 메탄가스를 생산하는 메탄발효공정, 그리고 유기질 비료를 생산하는 후처리 공정으로 나누어지며, 공정 흐름도는 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 생활쓰레기가 반입되면 저장조를 거쳐 파쇄기로 투입되고, 파쇄기에서는 20×80 mm 이하로 파쇄하여 드럼스크린으로 보내진다. 드럼스크린에는 직경 50 mm의 구멍이 촘촘히 뚫려있어 이곳으로 유기물질이 떨어지도록 되어 있으며, 직경 50 mm 보다 큰 물질(주로 비닐)은 소각장으로 보내진다. 드럼스크린을 빠져나온 유기물질은 conveyer를 타고 자력선별기를 거치면서 철편류가 분리되어 재활용 되고, 남은 유기물질은 screw feeder에 의해 메탄발효공정의 첫단계인 산발효조로 투입된다.

산발효조에서는 가수분해 - 산생성 반응이 일어나 생성된 유기산액을 두 번째 단계인 메탄발효조로 유입된다. 한편 산발효조에서는 앞의 전처리 공정에서 분리되지 못한 이물질의 분리도 함께 이루어지는데 유리조각과 같이 비중이 큰 물질은 발효조 하부로 배출되고 드럼스크린에서 미처 분리

되지 못한 비닐류는 발효조 상부에서 제거하여 매립지로 보내도록 되어 있다. 메탄발효조에서는 메탄화 반응을 거쳐 가스로 전환되고 발생된 가스는 가스저장조에 저장되어 냉난방이나 전력생산 등 대체에너지로 사용되게 된다. 그러나 본 시설에서는 경제성을 고려하여 연소탑을 거쳐 소각시키도록 하였다.

산발효조에서 유입된 유기산액은 메탄화 반응이 끝난 후 메탄발효조 상부로 유출되어 일부는 산발효조의 알칼리니티 공급을 위하여 산발효조로 순환되며, 일부는 메탄발효조 하부에서 발생하는 슬러지와 함께 탈수기로 보내진다. 탈수기에서 발생하는 탈수여액은 하수처리장으로 보내 처리하고, 탈수 cake는 부숙기를 거쳐 유기질 비료를 생산하게 된다. 악취를 제거하기 위한 시설로는 각각의 단위가기 또는 설비를 밀폐형으로 제작하였으며, 밀폐가 불가능한 부분은 국부포집을 하여 biofilter를 사용, 악취를 제거함은 물론 메탄발효조에서 발생한 가스의 소각시 공기공급원으로 사용하여 소각시키도록 하였다.

본 시설은 1996년 7월에 완공하여 약 8개월간의 시험운전을 거쳐 1997년 3월부터 현재까지 정상운전을 하고 있다.

3. 결과 및 고찰

실험에 사용한 생활쓰레기는 경기도 안양시 관양동 일대의 아파트 단지를 대상으로 하여 비닐봉투에 담긴 음식물 쓰레기를 수거하여 사용하였다. 수거된 생활쓰레기는 일평균 3,600kg으로 이는 당초 설계치의 5톤보다 적게 수거되었으나, 유기물질(주로 음식물)의 비율은 약간 높은 것이었으며, 그 성상은 Table 1에 나타낸 바와 같이 음식물의 구성비가 65.36%, 비닐류가 15.71%를 차지하고 있으며, 종이와 헝겊류가 12.08%를 보였다. 수분의 함량은 음식물이 77.64%, 비닐류가 64.46%, 종이와 헝겊류가 72.52%를 나타내고 있는데, 이는

음식물 쓰레기의 배출과정에서 물기가 흘러나와 비닐과 종이 등에 스며들어 상대적으로 음식물 쓰레기의 수분함량은 낮아지고 비닐과 종이 등의 수분함량은 높게 나타나는 것으로 생각된다. 음식물 중의 휘발성 고형물 함량은 89.95%로 나타났으며, 수거된 쓰레기의 수분함량은 74.05%, 겉보기 밀도는 715 kg/m³으로 나타났다.

수거된 쓰레기는 파쇄기를 거쳐 드럼스크린에서 이물질 제거 후 메탄발효공의 첫 단계인 산발효조로 투입되는데, 수거된 생활 쓰레기의 81.94%인 2,950kg으로 성상은 Table 2에 나타내었다. 음식물의 구성비는 75.42%와 고형물 구성비 66.2%로 비교적 양호한 것으로 나타났으며, 비닐류의 구성비가 6.77%로 드럼스크린에서 상당량의 비닐류가 제거되는 것으로 나타났다. 전처리 공정을 거친 쓰레기의 고형물 함량은 25.81%를 보였으며, 겉보기 밀도는 비닐류가 제거되어 812 kg/m³으로 수거된 생활 쓰레기보다 약간 높게 나타났고, 음

Table 1. The composition and properties of source sorted food waste as arrived

Components	wet weight %	Moisture content %	dry weight %	volatile solid (% of TS)
food organics	65.36	77.64	54.62	89.95
plastic bags	15.71	64.46	21.14	-
fabric and papers	12.08	72.52	12.58	-
bones and shells	2.91	53.68	5.11	-
miscellaneous	3.94	56.06	6.55	-
total	100.00	74.05	100.00	

Table 2. The composition and properties of source sorted food waste after pretreatment

Components	wet weight %	Moisture content %	dry weight %	volatile solid (% of TS)
food organics	75.42	77.34	66.20	89.97
plastic bags	6.77	62.23	9.91	-
fabric and papers	10.32	74.22	10.30	-
bones and shells	3.66	53.68	6.57	-
miscellaneous	3.83	52.71	7.02	-
total	100.00	74.19	100.00	

Table 3. Material balance of two-phase anaerobic digestion pilot plant

Material balance, average	wet basis(kg/day)	dry basis(kgTS)	dry basis(kgVS)
Incoming waste	3,600	892	-
Drum screen reject	-650	-164	-
AR input	2,950	728	532
AR reject	-774	-263	-87
Digestate sludge	-1,733	-91	-71
Biogas	-443	-374	-374

식물 중의 휘발성 고형물 함량은 89.97%로 실험실 연구결과⁵⁾와 비슷한 것으로 나타났다.

동 시설의 물질수지를 보게 되면 Table 3과 같이 3,600kg의 생활쓰레기가 수거, 반입되어 드럼스크린에서 650kg(반입쓰레기의 18.06%)의 이물질이 제거되었고, 산발효조로 2,950kg이 투입되었다. 산발효조에서 제거된 이물질은 774kg이고, 소화슬러지로 1,733kg이 배출되었으며, 443kg의 유기물질이 바이오가스로 전환되었다.

산발효조와 메탄발효조는 초기운전을 위하여 안양시 하수처리장의 3% TS를 갖는 메탄슬러지를 seed로 사용하였는데, 산발효조는 발효조 용적의 10%를, 메탄발효조는 발효조 용적의 50%를 충전하였다. 초기 운전이 끝난 후 최고 부하율에 도달하여 정상상태의 운전이 이루어진 다음 1997년 3월부터 약 3개월간 정상 운전상태의 실험분석을 수행하였다. Fig. 2에는 산발효조와 메탄발효조의 유기물 부하율을 나타내고 있으며, Fig. 3에는 메탄발효조에서 발생하는 가스량을 보여주고 있다. 메탄발효조의 가스발생량은 유기물 공급량에 따라 크게 좌우되는 것으로 나타났으며, 발생가스중의 메탄함량은 큰 변화없이 대체적으로 70% 내외를 유지하였다. 가스발생량의 측정은 메탄발효조에서만 이루어졌는데, 이는 메탄발효조에서는 메탄함량이 70% 내외의 높은 값을 유지하는 반면 산발효조는 발생량면에서 메탄발효조의 절반에 그치며, 메탄함량은 10~15%에 불과하여 에너지원으로 이용하는데 어려움이 따르기 때문이다⁶⁾.

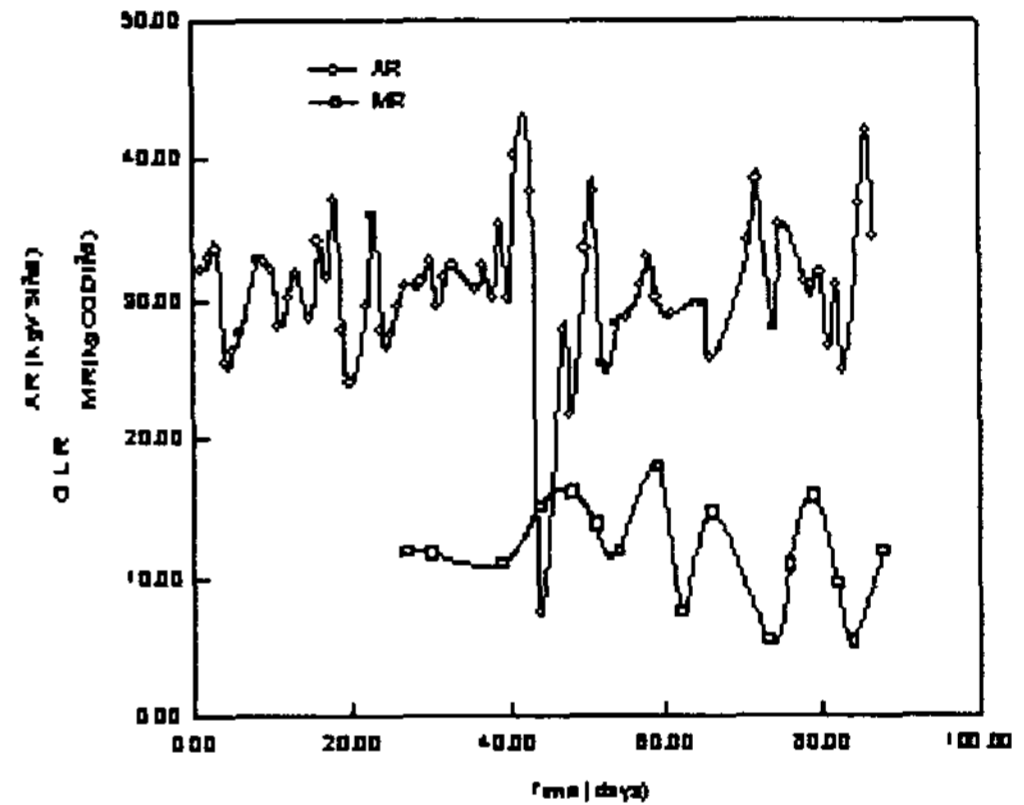


Fig. 2. Organic loading rate to the AR and MR

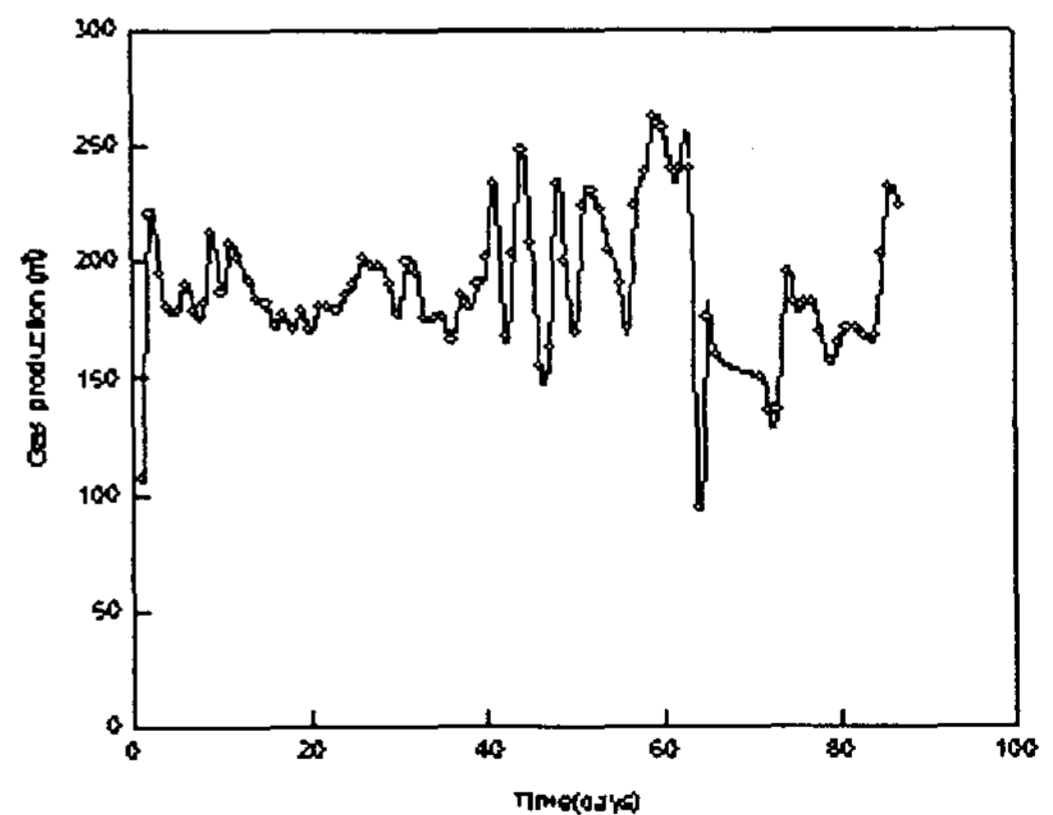


Fig. 3. Biogas production during steady state operation

산발효조는 교반기와 스키머를 설치하였는데, 스키머는 이물질 제거에 사용되었으며, 교반기는

Table 4. The main features of the process

Reactor and process condition		
AR volume (m ³), and pH	17.0	5.5~6.5
MR volume (m ³), and pH	58.0	7.4~7.8
Process temperature (°C)		35~38
Loading AR reactor (kgVS/m ³ day)		25~35
Loading MR reactor (kgCOD/m ³ day)		10~15
Overall organic loading (kgVS/m ³ day)		5.7~7.9 (Avg. 7.1)
MR effluent recycling (m ³ /day)		5.6

Table 5. Performance of two-phase anaerobic digestion pilot plant

Biogas production (m ³ /day)	236
Volumetric productivity (m ³ /m ³ reactor/day)	3.2
Organic matter conversion (% of VS input)	70.3
TS in AR (%)	5~6
TS in MR (%)	3.5~4
Total VFAs in AR (mg/L)	9,000~13,000
Total VFAs in MR (mg/L)	4,000~7,000
SCOD in MR (mg/L)	25,000~35,000
Methane yield (m ³ /kgVS)	0.44
Humus production (kg, 50% moisture)	80~100

20rpm 이하의 저속으로 운전되었다. 교반기의 회전속도가 적은 것은 발효조 내에서 이물질의 비중 선별을 용이하게 하는 역할을 하며, 또 하나의 중요한 역할은 메탄발효조에서 순환되는 완충액과 발효조 내에 존재하는 유기 고형물과의 원활한 접촉을 유도함으로써 가수분해-산발효를 촉진한다⁷⁾. 산발효조의 pH는 6.0 내외를 유지하며 운전하였는데, 메탄발효조에서 순환되는 완충액이 없으면 pH는 4 이하로 떨어지게 되어 더 이상의 가수분해-산생성 반응은 중지된다. 메탄발효조의 pH는 평균 7.6을 유지하였다. 이처럼 두 개의 발효조가 서로 다른 pH로 운전되는 것이 2상 혐기성 소화의 정상적인 지표인 것이다.

2상 혐기소화 시스템의 정상적인 운전을 위하여 중요한 변수는 산발효조의 pH, 산발효조와 메탄발효조의 유기물 부하량, 메탄발효조에서 산발효조로

순환시키는 완충액의 량, 산발효조와 메탄발효조의 용적비 등인데, 이는 실험실 연구를 통하여 얻은 결과⁶⁾와 pilot운전 결과를 토대로 Table 4와 같이 운전 조건을 확립하였다. Table 4와 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유기물 부하량의 변화가 심하게 나타나긴 하였으나, 정상적인 운전이 지속되었으며, 이러한 2상 혐기소화는 쉽게 생분해가 가능한 유기물질의 처리에 유리하다⁸⁾.

Table 5에는 pilot 시설의 성능을 나타내었다. J. Brinkman 등⁹⁾은 바이오가스 생산량이 발효조 용적당 3.0m³을, 유기물질의 메탄전환율을 45%로 보고하고 있으나, 본 pilot 연구결과는 기질의 차이가 있기는 하나 높은 메탄전환율을 보여 주었다. 또한 이 결과는 실험실 연구결과⁶⁾와 비교하여 유기질 비료의 생산량을 제외하고는 커다란 차이가 없음을 보여 주었다. 유기질 비료의 생산량은 실

험실 연구를 통하여 얻은 결과⁶⁾로 일일 180kg (수분 50%)이 발생할 것으로 예측하였으나, 메탄 발효조의 유출수에서 고형물의 회수가 용이치 않아 일일 80~100 kg (수분함량 50%)의 유기질 비료를 생산하였다.

메탄발효조의 유출수는 유기산 농도와 COD가 높긴 하지만 본 시설에서는 처리장치를 하지 않았으며, 그것은 시설규모에 비해 폐수 배출량이 적어 직접처리 보다는 인근의 폐수처리장이나 소각로의 침출수 처리와 연계하여 처리하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

4. 결 론

2상 혐기소화공정을 이용하여 파일로트 규모로 생활쓰레기중 유기질 폐기물을 처리하여 바이오가스를 회수하는 실험을 실시하였다. 우리나라 음식물 쓰레기는 혐기소화공정으로 처리하는 것이 타당성이 있으며, 음식물 쓰레기는 분해가 용이하여 2상 혐기소화가 적절한 처리방안이다.

음식물 쓰레기의 전처리에 있어 파쇄와 이물질의 제거는 다루기 힘든 일이긴 하지만 산생성과 메탄생성의 안정성이 요구되는 바이오가스 생산공정에서는 특히 중요하다. 전처리와 산발효조의 상하부에서 불가피하게 배출되는 상당한 량의 이물질과 유기물(39.6%)은 매립이나 소각에 의해 처리하였으나, 이물질 배출량을 줄이기 위하여는 음식물 쓰레기의 수거계획과 전처리 방법을 좀 더 연구할 필요가 있다. 메탄발효조의 유출수로 배출되는 혐기소화 폐수는 그 량이 적으므로 인근의 폐수처리장이나 여타 처리장과 연계하여 처리하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

동 공정의 정상상태 운전결과 적정 유기물 부하량은 7.9 kgVS/m³day 였으며, 이때 휘발성 고형물 제거율은 70%를 기록하였다. 하루 평균 3.6톤의 생활쓰레기를 전처리하여 2.9톤의 유기물질을 얻어

메탄발효공정으로 처리한 결과 230m³의 바이오가스를 생산하였고, 바이오가스중의 메탄함량은 70%이었으며, 100kg의 유기질 비료를 생산하였다.

동 공정은 최근 경기도 의왕시에 하루 15톤 처리 규모로 시설되어 운전되고 있으며, 여기서 생산된 바이오가스는 인근 건물의 냉난방에 이용하고 있다.

Reference

1. 통계연보, 1998
2. Europe warms to biogas, 1993, Chemical Engineering, pp.45.
3. IEA, 1994, Biogas from municipal solid waste, IEA Bioenergy Agreement Task XI; MSW conversion to energy report.
4. 박순철 외, 1995, "생분해에 의한 폐기물의 에너지 및 비료화 공정개발 연구(III)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KIER-951123
5. 박순철 외, 1993, "생분해에 의한 폐기물의 에너지 및 비료화 공정개발 연구(I)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KIER-93006G
6. 박순철 외, 1994, "생분해에 의한 폐기물의 에너지 및 비료화 공정개발 연구(II)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KIER-941123
7. J. K. Cho et al. 1996, "Bioenergy and Biotechnology.
8. P. Pavan, 1996, "Anaerobic digestion processes for the energetic valorisation of the green fraction of municipal solid waste and the recovery of volatile fatty acids", Management of Urban Biodegradable wastes, Ed. J-A. Hansen, James & James Ltd, London, pp.125~131.
9. J. Brinkman et al., 1996, "

Pilot Scale Anaerobic Digestion of Korean Food Waste

J. P. Lee, J. S. Lee, S. C. Park

Korea Institute of Energy Research

Abstract

A 5 ton/day pilot scale two-phase anaerobic digester was constructed and tested to treat Korean food wastes in Anyang city. The process was developed based on 3 years of lab-scale experimental results on an optimum treatment method for the recovery of biogas and humus. Problems related to food waste are ever increasing quantity among municipal solid wastes(MSW) and high moisture and salt contents. Thus our food waste produces large amounts of leachate and bed odor in landfill sites which are being exhausted.

The easily degradable presorted food waste was efficiently treated in the two-phase anaerobic digestion process. The waste contained in plastic bags was shredded and then screened for the removal of inert material such as fabrics and plastics, and subsequently put into the two-stage reactors. Heavy and light inerts such as bones, shells, spoons and plastic pieces were again removed by gravity differences. The residual organic component was effectively hydrolyzed and acidified in the first reactor with 5 days space time at pH of about 6.5. The second, methanization reactor part of which is filled with anaerobic fillers, converted the acids into methane with pH between 7.4 to 7.8. The space time for the second reactor was 15 days. The effluent from the second reactor was recycled to the first reactor to provide alkalinities.

The process showed stable steady state operation with the maximum organic rate of 7.9 kgVS/m³day and the volatile solid reduction efficiency of about 70%. The total of 3.6 tons presorted MSW containing 2.9 tons of food organic was treated to produce about 230m³ of biogas with 70% of methane and 80kg humus. This process is extended to full scale treating 15 tons of food waste a day in Euiwang city and the produced biogas is utilized for the heating/cooling of adjacent buildings.