

유기성 폐기물 에너지화 기술동향 및 전망

한국에너지 기술연구소/ 바이오매스연구팀 박순철
305-343 대전시 유성구 장동 71-2, Tel. (042)860-3557

머리말

자연계에서 혐기소화(일명 “메탄가스화”) 현상이 관찰되고 이 것에 흥미를 가진 사람들이 이를 연소시켜보고 이를 이용하려고 시도한 것은 꽤 오랜 일인 것으로 생각된다. 필자가 아는 어떤 분만 해도 이일에 관심을 기울인 것이 일제시대 부터라고 하였다¹⁾. 어쨌던, 우리나라에서는 1970년대 산림남벌이 엄격히 규제되는 가운데 농촌에서 인축분뇨를 이용하여 메탄가스를 발생시키고 이를 취사등에 이용한 것이 일반인들에게 이러한 기술이 널리 알려 지게된 계기가 아닌가 한다. 그러나, 지하에 간단한 구덩이를 파고 용기를 묻어서 메탄가스화가 일어나도록 했던 초기의 소형 메탄가스화 장치는 당시 정부(내무부, 농림부 등)의 적극적 보급정책에도 불구하고 지나치게 추운 겨울(혐기소화의 최적온도는 38°C)과 원시적 운영, 그리고, 농촌지역의 급격한 현대화로 별로 빛을 보지 못한채 좋지 않은 인식만을 남기고 잊혀져 갔다.

그러나, 산업이 발달하고 도시화가 이루어 지면서 다량의 고농도의 유기성 산업폐수와 유기성 폐기물(산업 슬러지, 음식쓰레기 등이 대표적)이 발생하면서 유기성 폐기물의 혐기소화는 환경 기초시설로서 새로이 조명을 받게 된다. 일반적으로 1,000ppm 이상의 유기물을 포함한 폐수나 슬러지 등은 일반적인 활성슬러지법으로는 유기물의 제거가 쉽지 않으므로 메탄가스의 생산이용은 물론이고 폐수 혹은 폐기물 처리의 한 방법으로 식품산업, 축산업계를 포함하는 다양한 산업폐수의 처리방법으로 혐기소화 기술이 보급되기 시작한 것이다. 1995년의 통계에 의하면 축산농가용으로 49개소, 산업용(주정, 사료, 전분박, 식품,

화공, 섬유 업체)으로 35개소에 산업폐수의 혐기소화 장치가 보급되어 연간 약 37,000 toe (톤원유 상당량)의 메탄가스가 이용되고 있는 것이다²⁾. 덧붙여, 최근 축산폐수에 의한 수질오염이 심화되자 혐기소화 처리 기술을 위주한 축산폐수 공동처리장의 건설이 활발히 추진되고 있다(1996년까지 52개소 추진중).

한편, 최근에는 세계적으로 도시 고형폐기물 처리문제가 심각해지고 유기물의 혐기성 분해시 발생하는 메탄가스가 강력한 지구온난화 가스라는 사실이 밝혀지면서 유기성 도시 고형 폐기물의 매립처리가 문제점으로 대두되면서 기존 매립지 가스의 연소이용, 그리고 유기성 폐기물(해외의 경우 putrescible waste, 국내의 경우 음식쓰레기)의 혐기소화에 많은 관심이 고조되고 있다. 우리나라의 음식쓰레기는 독특한 음식문화 때문에 수분이 많고(한국인이 특히 짜게 먹는 것은 아니지만 국물이 많으므로 따라서 건조할 경우 염분도 높다) 발생량도 많아서 크나큰 사회문제가 되고 있다. 그러므로 환경부는 음식물쓰레기의 감량화, 재활용 (1995년 재활용율 2.1%, 2001년 21% 목표)을 적극 추진할 예정이다. 그런데, 모든 폐기물이 다 그렇지만 음식쓰레기의 경우는 그 처리 혹은 재활용에 있어 현지의 배출, 수거상황과 성상등 제반 여건을 고려하여 다양한 방법이 고려될 필요가 있을 것으로 생각된다. 본고에서는 사료화, 퇴비화와 함께 음식쓰레기의 에너지화 재활용 방법으로 최근 선진각국에서 앞다투어 개발되고 보급되고 있는 유기성 폐기물 특히 도시폐기물 중 음식쓰레기의 혐기소화 기술에 대하여 개관하고 국내 최초인 안양시의 Pilot Plant를 간단히 소개하고자 한다.

기술의 개요

도시 폐기물을 혐기성 소화처리하여 폐기물중의 생분해성 유기물질을 메탄가스로 전환하여 에너지로 쓰고 소화처리가 어려운 잔재를 퇴비화하는 기술은 일찍이 1960년대부터 시도된 바 있다. 매립지에 투기된 폐기물중의 유기물은 주변환경에 따라서는 안정화 되는데 100년 가까이

걸리는 경우도 있지만 최적의 조건에서 거의 완벽한 혐기소화에는 약 3주간이 걸린다고 알려져 있다. 그리고 도시폐기물 중의 유기물이 분해되면서 생성되는 가스는 메탄가스와 이산화탄소인데 유기물중 에너지의 대부분은 메탄가스로 거의 고스란히 전환된다.

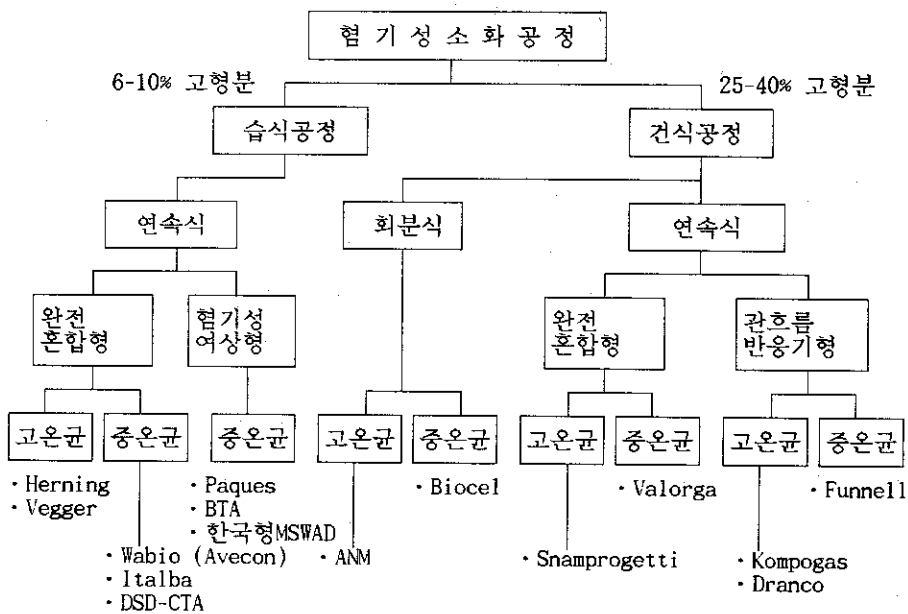
1969년에는 유기물을 혐기소화하는 기술적 타당성이 실험실적으로 확인되었고, 1980년대에 들어와서는 고형분 함량이 10%를 넘는 유기물질을 혐기소화하는 기술이 개발됨으로서 기술개발은 물론 상업화에도 커다란 진전을 보게 되었다. 이와 같이 고형분 함량이 높은 물질의 혐기소화 기술상의 문제점은 휘발성 지방산의 생성 및 축적인데, 이들 기질을 생분해성 유기물 함량을 조절하여 유입시키거나 (즉, 리그닌 혹은 셀룰로스를 다량 함유한 기질을 공급한다) 산생성 단계와 메탄발생 단계의 공정변수를 조작하여 분리시키는 방법을 사용하여 기술적으로 해결함으로써 상업화의 전기를 마련한 것이다.

이와 같은 혐기성 소화처리 주요단계를 살펴보면 물론 소화처리 공정이 가장 중요한 공정단계 이겠으나 도시폐기물 처리상의 여러가지 공정단계들이 소화처리 반응기의 설계 및 운전에 영향을 미치게 된다. 이들 관련 단계들을 살펴보면, 수거 및 수집 단계; 분리 및 분별 단계; 파쇄 및 분별을 포함하는 전처리 단계; 혐기소화 처리의 단계; 호기성 퇴비화, 폐수처리 (규모에 비하여 많지는 않음) 및 혐잡물의 매립을 포함하는 후처리의 단계가 있을 수 있다.

유기성 폐기물의 혐기소화 처리공정 단계는 투입기질의 초기농도에 따라서 건량기준 6-10%의 유기물 농도로 원료가 투입되는 습식공정과 25-40%의 유기물 농도로 원료가 투입되는 건식공정으로 우선 나눌 수 있다. 다음으로는 반응기가 회분식으로 혹은 연속식으로 운전되는가에 따라서 구분되며, 다음 단계로 혐기발효조의 반응기 형태 즉 완전혼합(CSTR), 관흐름형(PFR; Plug flow reactor) 혹은 혐기성 여상(anaerobic filter) 반응기 이냐에 따라서 분류할 수 있다. 최종적으로는

혐기소화 반응기의 내부온도 즉 메탄가스화 반응에 관여하는 균주의 종류에 따라 다음 [그림 1]과 같이 구분된다.

그림의 하단에 표시한 영문 명칭은 각 분류에 해당하는 대표적인 공정으로서 최소한 파일럿 규모의 실험결과가 발표 되었거나 대부분은 1 개소 이상의 실규모 공정을 운영하고 있는 것이며, 각 공정에 대하여는 당 연구실의 보고서에 상세하고 비교하였다³⁾. 습식공정 중에서는 Wabio(핀란드), BTA(독일) 공정이 실용화 됨과 동시에 보급이 활발하며 건식공정은 Valorga(프랑스)와 Dranco(벨기에) 공정이 보급의 역사가 깊다.



[그림 1] 도시 유기성 폐기물의 혐기성 소화처리 공정의 분류

우리나라에서는 당 연구팀과 (주)한라중공업에 의하여 연속 습식공정으로 중온 혐기성 여상형 반응기를 이용한 2상 소화시스템이 개발되어 안양시 (3톤/일, Pilot plant)⁴⁾와 의왕시(15톤/일, 실규모) 및 파주시(30톤/일)에서 활용되고 있다 (MSWAD 공정).

기술개발 및 보급현황

1988년 프랑스의 아미앵시에 Valorga 공정이 준공된 이후 1996년 까지 프랑스, 오스트리아, 벨기에, 독일, 스위스, 핀란드, 이탈리아, 네델란드, 덴마크, 스웨덴, 영국 등 유럽 국가와 인도, 캐나다, 미국 등지에 50개 정도의 유기성 폐기물 혐기소화 시설이 보급된 것으로 판단되며 실규모 공정운영의 결과들이 속속 발표되고 있다. 다음 <표 1>에는 지금까지 실규모 운영결과가 발표되고 있는 대표적인 공정의 설치사례를 소개한다.

음식물 쓰레기 혐기소화 처리시설의 기술 개발은 <표 1>에서 보듯이 대부분 자국이나 자국내의 설치지역에서의 유기성 폐기물의 발생상황, 수거방법상의 특징들을 반영하여 각국에서 독자적으로 개발되고 시공, 시험개발되고 지금은 국제적으로 서로 시장을 넓혀가기 위하여 경쟁이 치열한 상황이다. 예를들면, 프랑스의 경우는 도시쓰레기의 분리수거 관행이 정착되지 않아 도시쓰레기 전체를 건식으로 소화하는 Valorga 공정을 개발하였으며, 덴마크는 축산폐수와 음식쓰레기를 통합 소화처리하는 Vegger 공정, 스위스는 음식쓰레기와 정원쓰레기를 통합소화하여 메탄가스와 양질의 퇴비를 동시에 얻는 공정을 개발하는 등에서 이를 알 수 있고 벨기에의 Dranco 공정은 동 분야 선발 주자임을 이유로 국제시장에서 성가를 높여가는 등으로 상황을 미루어 짐작할 수 있다.

최근 동 분야 기술개발의 경향은 각국에서 재활용과 분리수거가 정착하여 유기성 폐기물 (부패성의 유기물, 즉 음식쓰레기)의 비중이 커지고 이의 매립으로 메탄가스와 침출수가 다량 발생하면 대기중으로 방출되는 메탄가스는 지구온난화에 큰 영향을 미치고 침출수는 주변 지하수계 및 토양오염, 악취 등의 문제를 발생시킨다는 것이 규명됨으로서 음식쓰레기의 재활용으로 매립을 줄여가거나 아예 금지하는 조치(덴마크의 경우)들이 이루어지고 있다. 이에 대응하여 초기에는 호기성 퇴비화가 보급되었으나 퇴비의 수요가 포화됨에 따라 감량화율이 뛰어나고 메탄가스를 얻어 에너지로 이용할 수 있는 혐기소화에 관심이 고조되고 있다.

<표 1> 도시 유기성 폐기물의 혐기소화 처리의 대표적 상업화 공정

지역명	국가	대상폐기물	공정명	소화온도	전처리의 특징	용량(톤/년)	준공년도
잘쯔부르크, Salzburg	오스트리아	SS-MSW*	Dranco	고온(55°C)	Drum screen	20000	1993
바사, Vaasa	핀란드	SS-MSW와 하수슬러지	Wabio (Avecon)	중온(38°C)	Drum	40000	1990
아미앵, Amiens	프랑스	MSW (미분리)	Varlorga	중온	Drum	55000	1988
베거, Vegger	덴마크	SS-MSW와 축산분뇨	Jysk biogas	고온	습식분리	15000	1991
라이덴, Leiden	네델란드	MSW와 SS-MSW	Paques	중온	Drum	100000	1996
바덴 바덴, Baden-Baden	독일	SS-MSW	BTA	중온	미분쇄	5000	1993
뮌헨, Rumlang	스위스	SS-MSW와 정원쓰레기	Kompogas	고온	수선별	5000	1992
의왕시, Euwang	한국	SS-MSW (음식쓰레기)	MSWAD (2상)	중온	Drum	4500	1997

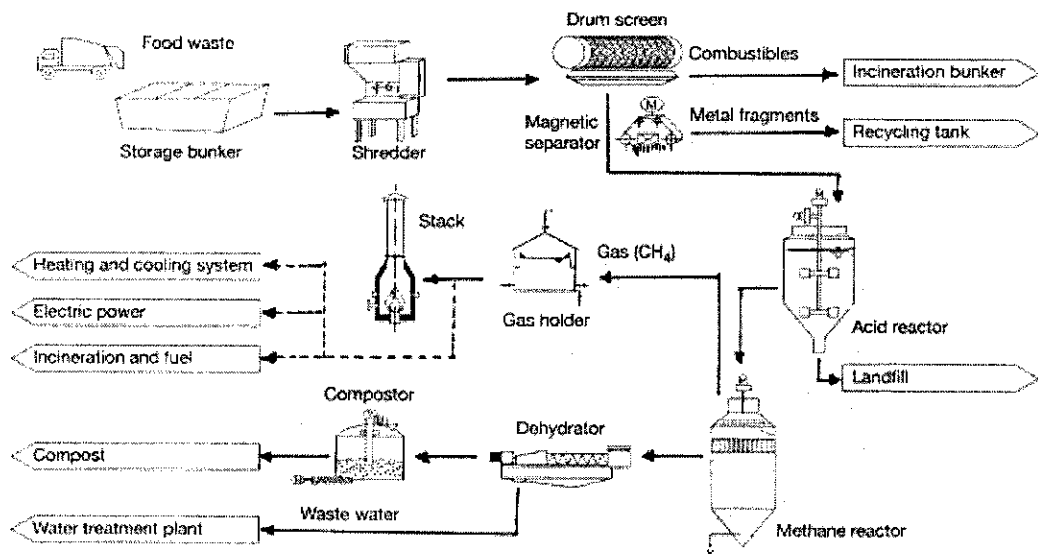
*SS-MSW : Source sorted MSW (발생원 분리수거 음식물 쓰레기)

기술적으로는 분리수거된 음식쓰레기는 부패하기 쉽고 다량의 수분이 포함되어 있으므로 단일 소화조를 사용할 경우 혐기소화조가 불안정하므로 2상 소화법(산발효상과 메탄발효상으로 나누어 소화를 시행하는 방법)이나 전화가 어려운 고형물의 재순환 혹은 이러한 고형물과의 통합소화(예를들면 하수슬러지 혹은 축산폐수, 식품폐기물 등을 같이 소화하는 방법)를 연구개발하고 있다. 한편, 분리수거를 하기는 하지만 도시쓰레기는 적잖이 소화가 불가능한 혐잡물(특히 비닐)을 포함하고 있으므로 이들을 분리하여 제거하는 여러 가지 전처리 기술, 그리고 혐기소화후 소량 생겨나는 혐기소화 퇴비와 기술의 정착에 따라 안정적으로 생산되는 메탄가스(Biogas ; 메탄 55-70%의 양질의 기체연료)의 품질관리 및 이용방안에 관하여 활발한 연구 혹은 실규모 시범연구가 진행되고 있다.

안양시 Pilot Plant의 경우

파일럿 플랜트는 안양시 평촌동 소재 기존 소각로 부지 내에 건설되었고 안양시는 분리수거 음식물의 수집 및 공급에 협조하였으며 전체시설은 전처리, 소화, 퇴비화 및 가스이용 시설로 구분할 수 있다. [그림 2]에는 이 플랜트의 공정도를 나타내 보였다.

전처리 공정은 생분해가 불가능한 부분의 제거를 위한 시설이다. 쓰레기 수거용 공용 비닐봉투에 분리수거된 음식쓰레기는 병커에 부러지고 파쇄기로 보내지며 파쇄된 쓰레기에서부터 비닐, 직물류, 목재류 등의 조대물을 제거하는 50mm 체눈의 드럼스크린(drum screen)을 통과하게 된다. 여기서 가려진 음식쓰레기를 포함한 유기물 성분은 병뚜껑, 철판 등이 자력선별기로 제거된 다음 산발효조로 투입된다.



[그림 2] 안양시 3톤/일 음식쓰레기 메탄가스화 Pilot Plant

산발효조에서는 유기물의 가수분해와 산성화가 이루어짐과 동시에 드럼스크린에서 미처 제거되지 못한 비닐조각, 플라스틱 등 부유물과 뺏조각, 조개껍질, 스테인레스 수저, 병뚜개 등 고비중의 협잡물이 비중차로 선별되어 반응기의 상하부로 배출 제거된다.

산발효조는 저속의 임펠러로 혼합되며 37°C 정도로 온도가 조절되며 균질화된 음식물쓰레기는 급속히 가수분해되고 곧이어 다양한 유기산으로 분해된다. 다량의 유기산을 포함한 균질화된 산발효액은 메탄발효조로 이송되어 메탄으로 전환되며 메탄화로 거의 유기물이 제거된 알칼리성(pH 7.5 - 8.0)의 메탄발효여액은 산발효조로 재순환되어 산발효조의 과도한 산성화를 막는다 (pH 6.5 내외 유지).

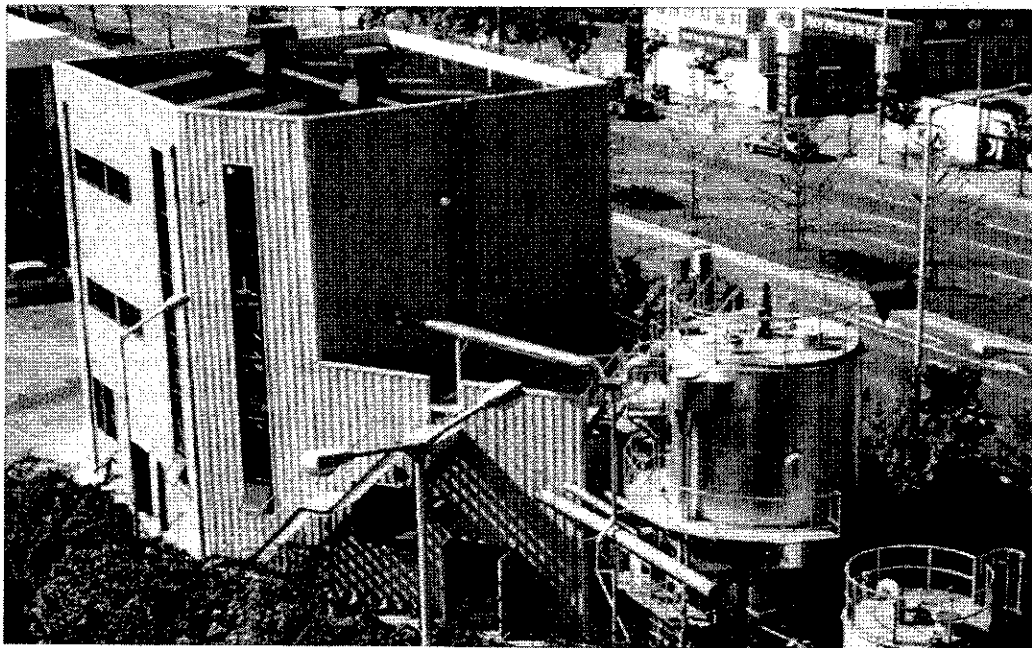
메탄발효조에서도 분해되지 않는 생분해가 느린 유기성 고형물과 메탄발효과정에서 생성되는 소량의 혐기성 슬러지는 주로 메탄발효조의 상부에서 배출되며 이는 스크류프레스로 탈수되고 호기성 퇴비화 장치에서 처리되어 철저히 부숙되고 안정화된 양질의 혐기성 퇴비(Humus)로 생산되게 된다. 이 퇴비는 탈수의 과정에서 염분이 제거되어 염분함량 0.3 - 0.7% 정도의 저염분 퇴비라는 것이 한가지 특징이다. 한편 메탄발효조에서 생성되는 70% 내외의 메탄을 포함하는 바이오가스는 한시적으로 가스저장조(2시간 용량)에 저장되었다가 자체와 주변건물의 냉난방, 가스엔진을 통한 발전 혹은 소각로의 조연제로 사용될 수 있다.

파일러트 플랜트의 건설후 초기 운전시험 단계에는 많은 문제점들이 발견되었다. 예를 들면 산발효조 하부의 고비중 협잡물 제거구에 뺏조각, 금속편 등이 압축되어 폐색되는 등이 그것이다. 실제로 거의 모든 트러블은 비닐봉지에 담겨온 음식쓰레기중의 많은 량의 병뚜개, 혹은 껍질째 버려진 온전한 과일 등 분해가 잘되지 않고 곳곳에 폐색을 일으킬 수 있는 협잡물에 의한 기계적인 문제점들이었다. 이러한 문제점들은 드럼스크린, 킨베이어, 배관의 확장 등의 조치로 모두 해결되어서 현재까지도 일상적으로 운영이 되고 있다.

산발효조 용량 15m³, 메탄발효조 용량 45m³인 이 음식물쓰레기의 2상혐기소

화 공정은 정상상태(steady state) 운전에서 하루 5톤 정도의 도시쓰레기가 투입 되는 상황에서 3톤 정도의 음식물쓰레기를 가려내어 수분 70% 정도의 혐기성 퇴비 100kg과 70%의 메탄을 포함하는 230m³ 정도의 바이오가스를 생산하고 있다. 한편, 재순환을 하고 남은 혐기발효 여액은 호기성 처리를 거쳐 이 파일 러트 플랜트의 경우 하루 약 2톤이 방류된다. 이러한 물질수지는 생분해가 가 능한 휘발성 고형분의 약 73%가 메탄가스로 분해된다는 것을 나타내고 있다. 한편 동일한 개념의 공정이 의왕시에 실규모로 설치 되었는데 하루 15톤의 미 리 분리된 음식쓰레기 (주민협조로 음식쓰레기 비율 80%)를 동일한 성능으로 메탄가스화 하고 있다. [그림 3]에 이 플랜트의 사진을 실었다.

The Anyang City Anaerobic Digestion Plant.



[그림 3] 안양시 음식쓰레기 혐기소화 Pilot Plant 전경

맺음말

우리나라 음식쓰레기 처리 문제는 어제 오늘의 일이 아니고 너무나 많이 알려져서 이제는 누구나가 전문가가 되었고 일가견을 갖게 되었다. 확실히 우리나라의 음식쓰레기는 절대량이 많고 수분이 많으며 게다가 물기를 빼면 고형물 단위량에 다량의 염분을 포함하고 있어 유럽의 음식쓰레기와는 다른 점이 많다. 그러나, 이와같은 점은 우리나라에서 혐기소화 처리공정이 뿌리 내리는데 좋은 토양이 되고 있으며 앞서도 밝혔듯이 의왕사에서 최초의 한국형 공정이 빛을 보게 되었는데 유럽의 공정들은 그네들의 음식쓰레기 발생현황과 성상을 잘 반영하고 있겠지만 우리나라 음식쓰레기에 가장 적합한 공정이라고는 할 수 없다.

예를들면 Dranco 공정과 같은 건식공정은 고형물이 25%를 넘는 그네들의 음식쓰레기를 단일 발효조에서 소화하여 최대한의 메탄가스를 얻고 다량의 고형물을 퇴비로 반출하는 공정이다. 우리나라의 경우 수집되는 음식쓰레기 자체가 이미 고형물 15% 정도의 고수분 유기물이며 부패하기 쉬워서 비닐봉지에 싸서가 아니면 배출하기가 힘들 뿐 아니라 그대로 소화조에 넣어서는 산패가 일어날뿐 메탄발효가 되지를 않는다.

이러한 점들을 잘 고려하여 유기성 폐기물의 혐기소화 기술개발에 적용하고 우리나라 실정에 맞는 공정을 발전시켜서 우리나라 음식쓰레기의 효율적인 재활용(에너지화를 통한) 및 처리를 도모하고 나아가서는 우리와 상황이 비슷한 아시아권의 여러나라에 우리의 동 분야 기술이 퍼져 나갈 수 있도록 하여야 하겠다.

참고문헌

- 1) Private communication 최세일
- 2) 에너지자원기술개발 지원센터 (1998) "1997년도 신재생에너지 관련 자료집"

- 3) 박순철 외 (1995) “생분해에 의한 폐기물의 에너지 및 비료화 공정 개발 연구 (III)” 한국에너지기술연구소 보고서 KIER 95-1123, 통상산업부
- 4) S. C. Park (1998) “Food Waste Disposal Using Anaerobic Digestion” CADDET Technical Brochure No. 66 (IEA/OECD, UK)