

# 메탄발효를 이용한 음식물 쓰레기 소화 처리 및 바이오 가스 생산 기술

김시욱\* · 박순철

\*조선대학교 공과대학 환경공학부, 한국에너지기술연구소 바이오매스 연구팀

1997년 현재 국내 유기성 폐기물 발생량은 생활폐기물중 음식물쓰레기가 연간 480만톤, 하수슬러지 등의 사업장 폐기물이 410만톤, 가축분뇨 3,050만톤, 그리고 농산부산물이 680만톤 등 총 4,620만톤이었다. 특히 음식물 쓰레기는 하루 13,063톤이 발생함으로써 생활폐기물 발생량의 27.3%를 차지하고 있다(1). 우리 나라 음식물 쓰레기는 수분 함량이 75-85%로 높고 수거 운반시 심한 악취를 유발한다(2). 이와 같은 부패성 음식물 쓰레기는 매년 그 양이 감소하고 있으나 1996년도의 경우 음식물 쓰레기의 92.8%를 매립 처리하였고 2.6%를 소각 처리하였으며, 4.6%만이 재활용되었다. 더욱이 음식물 쓰레기를 매립 처분할 경우 높은 함수율 때문에 심한 악취 및 침출수의 발생과 유기물 부하 상승으로 인하여 지하수와 하천에 2차 오염을 유발시키고 최근에는 지역이기주의로 인하여 새로운 매립지 확보마저 어려운 실정이다. 음식물 쓰레기를 소각처리할 경우에도 음식물 쓰레기 자체의 높은 수분함량으로 인하여 발열량이 낮기 때문에 소각처리도 부적절하다.

현재 국내에서 시도되고 있는 음식물 쓰레기의 재활용 기술은 주로 사료화, 퇴비화 및 지렁이를 이용한 처리 정도이다(3). 사료화의 경우 건식사료화, 습식사료화, 증자(cooking)에 의한 사료화, 기름튀김 방식에 의한 사료화 기술이 현재 이용되고 있으며 1997년에는 하루 746톤이 가축의 사료로 이용되었다. 퇴비화의 경우에는 호기성 퇴비화, 혐기성 퇴비화, 건조발효, 발효분해, 소멸화 분해 기술이 이용되고 있으며 1997년에 하루 514톤이 재활용되었다. 그러나 이 기술들은 기술의 특징에 따라서 고가의 설치비용이 소요되거나 대규모의 부지를 요구하고, 부패 또는 악취발생의 문제점을 안고 있다. 예를 들어 음식물 사료화는 분리수거의 난점이 있고 부패성 또는 병원성 미생물의 발생과 사료내 이물질로 인하여 가축에 피해가 우려되며, 음식물 쓰레기내에 영양분의 불균일로 가축의 영양상태의 불균형을 초래할 수 있다. 또한 퇴비화는 우리 나라 음식물 자체의 과다수분 및 염분 등으로 농작물에 피해를 줄 수 있고 퇴비화된 음식물 쓰레기를 토지화하는 과정에서 악취를 유발하게 된다(4). 따라서 최근에는 국내외적으로 음식물 쓰레기를 혐기 소화처리하고 이 과정에서 생산되는 메탄가스를 에너지

화하는 기술 개발에 주력하고 있다.

## 국내 기술의 현황

유기물 쓰레기를 이용한 에너지화는 우리 나라의 경우 1970년대에 인축 분뇨나 농촌 폐기물을 이용한 메탄화 기술이 연구·개발되었고(5-7) 최근에는 산업화, 도시화가 이루어짐에 따라 다량의 고농도 유기물이 발생하여 유기성 폐기물의 혐기성 소화에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다(8-10). 일반적으로 1,000ppm 이상의 유기물을 포함한 폐수나 슬러지 등은 일반적인 활성슬러지법으로는 유기물의 제거가 쉽지 않으므로 메탄가스의 생산은 물론이고 폐수 혹은 폐기물 처리의 한 방법으로 식품산업, 축산업계를 포함하는 다양한 산업폐수의 처리방법으로 혐기소화 기술이 보급되기 시작하였다. 1995년의 통계에 의하면 축산농가용으로 49개소, 산업용(주정, 사료, 전분박, 식품, 화공, 섬유업체)으로 35개소에 산업폐수의 혐기소화 장치가 보급되어 연간 약 37,000 toe(톤원유 상당량)의 메탄가스가 이용되고 있다(11). 또한 최근 들어 축산폐수에 의한 수질오염이 심화되자 혐기소화 처리기술을 위주로 한 축산폐수 공동처리장의 건설이 활발히 추진되고 있다. 현재 상용화되고 있는 음식물쓰레기의 혐기소화 처리 시설은 한국에너지기술연구소와 (주)한라산업개발에 의해 개발된 중온 혐기성 여상형 반응기를 이용한 2상 소화시스템으로 안양시(3톤/일), 의왕시(15톤/일), 과주시(30톤/일)에서 운전되고 있다.

## 외국 기술의 현황

1988년 프랑스의 아미앵시에 Valorga 공정이 준공된 이후 1996년까지 프랑스, 오스트리아, 벨기에, 독일, 스위스, 핀란드, 이탈리아, 네덜란드, 덴마크, 스웨덴, 영국 등 유럽 국가와 인도, 캐나다, 미국 등지에 50개 정도의 유기성 폐기물 혐기소화 시설이 보급된 것으로 판단되며 실규모 공정운영의 결과들이 속속 발표되고 추가적인 건설이 이루어지고 있다. 다음 Table 1에서는 지금까지 실규모 운영결과가 발표되고 있는 대

**Table 1.** Commercial anaerobic digestion processes for the removal of municipal solid wastes

지역명	국가	대상폐기물	공정명	소화온도	전처리의 특징	용량(톤/년)	준공년도
Amiens	프랑스	MSW(미분리)	Valorga	중온	Drum	55,000	1988
Vaasa	핀란드	SS-MSW*와 하수슬러지	Wabio(Avecon)	중온(38°C)	Drum	40,000	1990
Vegger	덴마크	SS-MSW와 축산분뇨	Jysk biogas	고온	습식분리	15,000	1991
Rumlang	스위스	SS-MSW와 정원쓰레기	Kompogas	고온	수선별	5,000	1992
Salzburg	오스트리아	SS-MSW	Dranco	고온(55°C)	Drum screen	20,000	1993
Baden-Baden	독일	SS-MSW	BTA	중온	미분쇄	5,000	1993
Leiden	네덜란드	MSW와 SS-MSW	Paques	중온	Drum	100,000	1996

\*SS-MSW : Source Sorted Municipal Solid Wastes.

표적인 공정의 설치사례를 소개하였다(10).

음식물 쓰레기 혐기소화 처리시설의 기술 개발은 Table 1에서 보듯이 특정국가나 지역에서의 유기성 폐기물의 발생상황, 수거방법상의 특징들을 반영하여 개발되고 시공, 시험되고 있다. 예를 들면, 프랑스의 경우는 도시쓰레기의 분리수거 관행이 정착되지 않아 도시쓰레기 전체를 건식으로 소화하는 Valorga 공정을 개발하였으며, 덴마크는 축산폐수와 음식물 쓰레기를 통합 소화 처리하는 Vegger 공정, 스위스는 음식물 쓰레기와 정원 쓰레기를 통합소화하여 메탄가스나 양질의 퇴비를 동시에 얻는 Rumlang 공정을 개발하는 등에서 이를 알 수 있다.

### 혐기성 소화 처리공정

지금까지 개발된 다양한 형태의 혐기성 소화 반응조의 처리 공정은 다음과 같다(9).

#### ① Dry continuous digestion(건식 연속혐기성 소화)

고형물 함량 20~40%인 상태의 폐기물을 연속적으로 처리하는 공정으로 완전혼합형(Completely-Mixed System)과 관흐름형(Plug-Flow System)이 이용될 수 있으며 이에 해당하는 상업 공정으로는 다음과 같다.

- Valorga process(프랑스)
- Dranco process(벨기에)
- Kompogas process(스위스)
- Funnell process(미국)

#### ② Dry batch digestion(건식 회분식 소화)

이 공정은 Accelerated Landfill 개념으로 반응기에 원료폐기물을 충전한 다음 이미 소화가 거의 종료된 반응기에서 소화액(미생물 함유)을 접종한 다음 밀폐시켜 자연분해되도록 한 시스템으로 이에 해당하는 상업 공정은 다음과 같다.

- Biocel process(네덜란드)

#### ③ Leach-bed processes

본 공정은 앞선 Dry Batch Digestion 공정과 비슷한 개념이나 침출액을 서로 순환시킨다는 점에서 다르다. 즉 3개의 반응조를 이용하여 3단계로 이루어지는데 첫 운전은 발효가 거의 완료된 3번째 반응기(stage 3)에서 내용물을 폐기한 후 새로운 폐기물이 주입되면서 소화가 시작된다. 일단 폐기물이 주입되면 stage 1으로 전환되게 되는데 stage 1에서 생성되는 침출액(유기산 함유액)을 메탄발효가 활발히 진행되고 있는 stage 3로 보내어 메탄화 시킨다. 이어서 stage 3의 활성 미생물이 계속 순환되어 자체내 발효가 성숙되면 stage 1은 stage 2로 된다. 이에 해당하는 공정으로는 다음과 같다.

- SEBAC(Sequential batch anaerobic composting)(미국)

#### ③ Wet continuous digestion(습식 연속혐기성 소화)

본 공정은 유기성 도시폐기물이 고형물 함량 약 10%인 슬러지 상태로 회석되어 재래식의 완전혼합 반응기에서 연속적으로 혐기성 소화처리되는 것으로 일반적인 하수슬러지나 축산슬러지의 발효방식과 비슷하다. 본 공정을 적용할 경우에는 유리, 자갈등과 같은 무기물질이 소화조 바닥에 축적되지 않도록 전처리 단계에서 완전 제거시키는 노력이 필요하다. 도시폐기물만을 적용하여 소화시킬 경우 회석수의 다량 사용으로 인한 전체적인 부피를 줄이기 위해 소화 잔사 탈수액을 재순환하여 고형물 농도를 조절하는 회석수로 사용하기도 한다. 최근에는 도시폐기물에 하수슬러지나 축산분뇨등과 같은 고형물 함량이 낮은 폐기물을 섞어서 발효시키는 Co-Digestion 방식이 특히 덴마크 등에서 많이 시도되고 있다.

- Avecon process(핀란드)
- Italba process(이태리)
- Snamprogetti process(이태리)
- Herning(덴마크)

#### ④ Multi-stage wet digestion(다단 습식소화)

본 공정은 반응시스템을 2단계 이상으로 구분하여 가수분해,

산생성, 메탄생성이 각각 분리된 반응조에서 단계적으로 수행되는 시스템으로 여기에 해당하는 공정으로는 다음과 같다.

- BTA process(독일)
- ANM process(독일)
- Paques process(네덜란드)
- DSD-CTA process(독일)

한편 메탄 생성 효율과 유기물 쓰레기의 처리속도를 높이기 위하여 공정개발과는 별도로 미생물학적 접근도 이루어지고 있다(12). 즉, 유기물 쓰레기의 처리에 사용되는 메탄 발효 효율은 궁극적으로는 미생물에 의해 좌우되는데 다당류를 비롯한 당류, 단백질, 지방 등 모든 유기물이 포함된 폐수가 메탄 발효세균의 기질로서 이용될 수 있다. 메탄 생성세균은 acetate, methanol, formate, methylamines, 일산화탄소, 그리고 수소와 이산화탄소만을 기질로 이용할 수 있기 때문에 상기한 유기물이 메탄으로 발효될 때까지는 최소한 3종 이상의 미생물군이 Fig. 1에서와 같이 작용한다(13).

그러나 메탄생산에 관여하는 위 3종류의 미생물 중에서 메탄 생성 세균의 성장 속도가 가장 낮기 때문에 발효공정의 체류시간(HRT)이 10일 이상으로 길고, 체류시간을 줄이기 위해 유기물 공급량을 늘리면 유기산의 농도가 증가하면서 pH가 내려가게 되어 메탄 발생량이 급격히 줄게 되고 유기물의 제거 효율도 떨어진다(14). 이에 따라 유기성 폐기물 처리 속도의 향상과 메탄 생성의 효율을 높이기 위한 연구가 꾸준히 진행되어왔다. 예를 들어 유기산 생성 세균을 고정화하여 1차 산

반응조 내의 유효균체수를 높힘으로써 음식물의 발효속도와 메탄생성 효율을 극대화하거나 특정 유기산을 분해하여 메탄을 생성하는 균체에 대한 연구도 이루어지고 있다(15-16).

## 2상 메탄 발효 시스템

2상 발효 시스템(Two-phase system)은 산생성조와 메탄 생성조를 분리하여 단계적으로 발효를 수행하는 시스템이다. 2상 발효시스템의 경우 산생성균과 메탄생성균의 생리적 특성과 영양요구조건은 매우 다르다. 만일 성장조건이 다를 경우 산생성균과 메탄생성균 사이에 성장균형이 깨지게 됨으로써 성장이 억제된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 산생성과 메탄생성을 구분하는 2상 혐기 소화공정이 개발되었다(17-18). 재래식 단상 시스템(One-phase system)의 경우 산과 메탄이 동시에 생성되기 때문에 메탄발효를 위한 최적 조건을 유지하기가 매우 어렵다. 더구나 유입수의 특성에 따라 발효안정성은 매우 낮아지게 된다. 그러나 2상 발효시스템의 경우 수소농도를 낮게 유지할 수 있기 때문에 과량의 유기화합물질이 유입되더라도 syntrophic bacteria가 잘 성장할 수 있는 최적조건을 유지할 수가 있다(19). 이러한 이유로 2상 혐기성 소화조에 대한 연구가 주목을 받게 되었으며, 과거 20여년동안 다양한 각종 공정 개발이 이루어져 왔다. 하지만 이 연구들은 주로 포도당과 같은 쉽게 생분해 되는 탄수화물에 대해서만 연구되어 왔다. 여기서는 본 연구자들이 개발한 3단계 메탄발효시스템에 대하여 소개하고자 한다(20).

## 3단계 메탄 발효 시스템

3단계 메탄 발효 시스템(three-stage methane fermentation system)은 고효율로 메탄을 생산하기 위하여 Ghosh와 Pohland (17)에 의해 개발된 2상 소화 시스템을 변형하여 개발하였다. 이 시스템은 반혐기성 가수분해/산발효 공정, 혐기성 산발효 공정, 그리고 절대 혐기성 메탄발효공정으로 이루어져 있다 (Fig. 2).

일차 CSTR 형태의 반혐기성 가수분해/산발효조는 20L의 용적으로 음식물쓰레기를 신속히 가수분해하고 산을 생산할 수 있도록 고안되었다. 전 고형분(total solid) 함량이 높은 음식물쓰레기는 파쇄후 발효조로 주입되고 본 실험실에서 제조한 미생물 혼합액을 접종하였다. 미생물 혼합액은 음식물 쓰레기의 탄수화물, 지방, 단백질등을 가수분해하기 위하여 *Cellulomonas cellulans*, *Flavobacterium breve*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis*, 그리고 *Bacillus alcalophilus* 등의 미생물 균주로 제조하였다. 발효액은 impeller에 의해 진탕되며 이 때 발효조의 하단 부위로부터 컴프레서를 이용하여 공기가 유입되도록 하였다. 그러

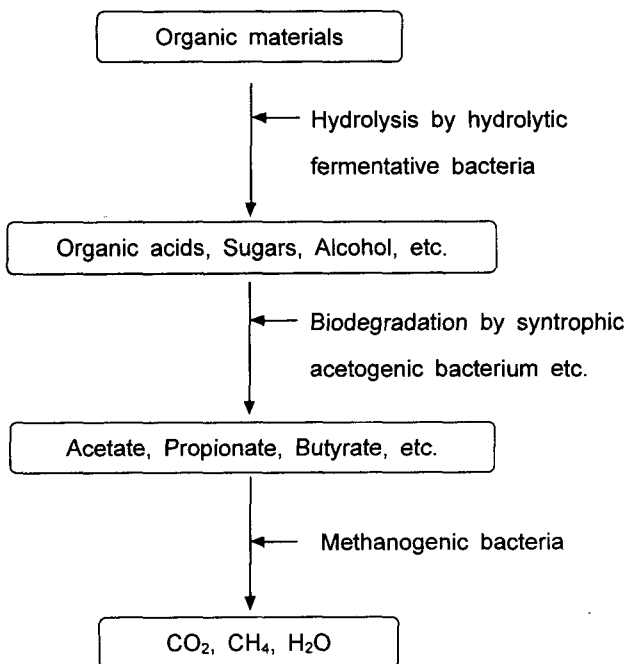
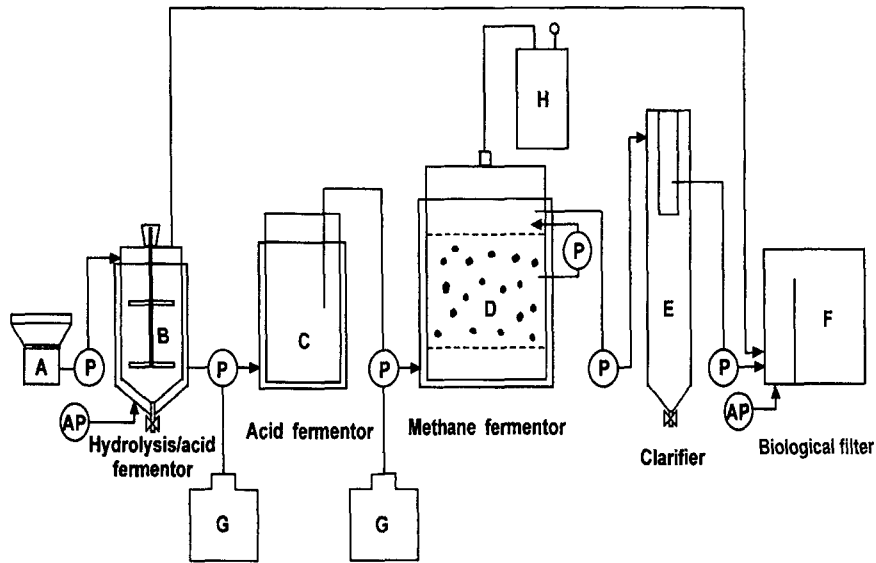


Fig. 1. The pathway of methane generation from organic materials.



**Fig. 2.** Schematic diagram of a modified three-stage methane fermentation system consisting of a CSTR hydrolysis/ acidogenic reactor and two UASB reactors for acidogenic and methanogenic processes. A, waste crusher; B, hydrolysis/acid fermenter; C, acid fermenter; D, immobilized bed methane fermenter; E, clarifier; F, biological filter chamber; G, NaOH feeding bottle; H, gas reservoir tank; P, peristaltic pump; AP, aerated pump.

나 발효액의 기질농도가 매우 높아 발효액 전체에 고른 산소 전달이 어렵기 때문에 반헤파기성 상태를 유지하게 된다. 한편 분해가 되지 않는 불질들을 제거하기 위해 발효조 하단 중앙 부위에 직경 10cm의 배수구를 설치하였다. 운전 온도와 pH는 각각 45°C와 5.0-5.5를 유지하였다. 2일간의 소화과정을 거친 후 소화액은 Upflow anaerobic sludge blanket(UASB) 형태의 2차 발효조로 운반된다. 2차 혐기성 산발효조는 20L의 용적이며 *Clostridium butyricum*을 이용하여 2일간 35°C에서 다량의 아세트산과 뷰티르산 등의 유기산을 생산하였다. 산 발효액은 최종 단계인 메탄발효조의 하단부위로 운반되도록 하였다. 이 발효조 역시 UASB 형태이며 용적은 120L이고 41°C에서 운전되며 열교환기, 가스측정기, 가스배기장치등이 부착되어 있다.

최종 3차 발효액에 잔존하여 있는 유기탄소, 질소, 인 등을 제거하기 위하여 몇 개의 공정을 추가적으로 사용하였다. 최종 발효액을 먼저 침전조로 운반하여 고형물을 침전시킨 후, 액상은 고정화 종속영양세균과 질산화세균이 들어있는 호기성 생물여재조(45L)로 주입하였다. 3일 후 처리액을 다시 탈질화세균이 생물여재막에 부착되어 있는 무산소조로 유입하여 질소를 제거하였다. 여재는 폐비닐을 재생하여 표면을 울퉁불퉁하도록 제조함으로써 표면적을 넓게 만든 1 m 길이의 막대기 형태로 되어 있다. 1차 반헤파기성 가수분해/산발효조에서 배출되는 가스의 악취를 제거하기 위하여 배출가스를 호기성 생물여재조로 통과하도록 제작하였다.

3단계 메탄 발효 시스템의 운전조건과 소화처리 및 메탄 생산량에 대해서는 Table 2에 나타나 있다. 최종 방류수의 total

**Table 2.** Operation conditions and performance of three-stage system

Parameter	1st process	2nd process	3rd process	Biological Filter
HRT(d)	2	2	12	9
Loading(kgVS/m <sup>3</sup> d)	20~22.8	25~27.4	12~18.8	1~1.2
PH	5.0~5.5	5.0~5.5	7.6~7.9	8.3~8.7
Temp(°C)	30	35	41	30
T-N(mg/L)	4,287	3,216	2,624	166
NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	117	172	1205	66
COD(mg/L)				
TCOD	44,948	30,582	2,382	1,145
SCOD	32,223	20,632	1,071	1,104
BOD(mg/L)	51,081	20,876	1,356	287
Gas yield(m <sup>3</sup> /kgVS)	-	-	0.65~0.70	-
Gas composition				
CH <sub>4</sub> (%)	-	8.9%	72%	-
CO <sub>2</sub> (%)	-	91.1%	28%	-
Methane yield (m <sup>3</sup> /kgVS)	-	-	0.45~0.50	-
Volatile acids(mg/L)				
Acetic	3,151	2,976	313	-
Propionic	0	1,013	0	-
Butyric	123	562	0	-
Valeric	829	1,543	0	-
Caproic	0	0	0	-
Total	4,103	6,094	313	-

HRT, hydraulic retention time; T-N, total nitrogen; COD, chemical oxygen demand; BOD, biological oxygen demand.

**Table 3.** Comparison of performance of three-stage system with conventional anaerobic digestion system at mesophilic temperature

	Three-stage system (Food wastes) <sup>a</sup>			Two-phase (Food wastes) <sup>b</sup>		Pilot two-phase (Activated sludge) <sup>c</sup>	
	Hydrolysis	Acid	Methane	Acid	Methane	Acid	Methane
HRT(d)	2	2	12	5	15	3.1	9.1
Loading(kg VS/m <sup>3</sup> · d)	20~22.8	25~27.4	12~18.8	25~35	10~15	18.9	6.2
pH	5.0~5.5	5.0~5.5	7.6~7.9	5.5~6.5	7.4~7.8	5.6	7.7
% TS in feed	17.53	7.4	6.5	25.8	5~6	7.5	4.3
Total volatile fatty acids	4,100	6,100~9,100	313	9,000~13,000	4,000~7,000	9,445	172
Methane yield (m <sup>3</sup> /kg VS added)	-	-	0.45~0.50	-	0.44	-	0.29
VS reduction(%) <sup>d</sup>	8.2	9.5	38	-	-	25.0	41.8

<sup>a</sup>In this work; <sup>b</sup>Data from Park et al.(9); <sup>c</sup>Data from Ghosh(21); <sup>d</sup>These VS reductions were calculated by the WPCF formula in other for them to be compared to reductions reported by others.

chemical oxygen demand(TCOD)는 95% 이상 감소하였으며, total nitrogen(T-N)의 경우에도 96% 이상 제거되었고, total phosphorus(T-P)는 10 mg/L 이하만이 검출되었다. 한편 생산된 바이오가스중 메탄 함량은 72%이었으며, 생산수율은 0.45-0.50 m<sup>3</sup>/kg · volatile solids를 나타내었다. 본 공정과 기존 공정의 운전 조건 및 처리효율은 Table 3에 비교하였다.

**결론**

다단계 고속 메탄 발효 기술은 대량 발생하고 있는 유기성 폐기물을 고속처리하고, 부패로 인한 악취 발생을 억제하며, 매립에 의한 수질 및 토양오염을 방지함으로써 유기성 폐기물로 인한 지방자치체간의 NIMBY현상을 막을 수 있다. 또한 유기성 폐기물로부터 메탄을 생산함으로써 메탄을 에너지로 이용하여 건물의 냉난방이 가능할 수 있고, 1998년 현재 연간 16억불에 해당하는 액화천연가스(LNG)의 수입 대체효과를 얻을 수 있으며, 10년 이상 된 매립지로부터 발생하는 매립지 가스(LFG)를 발전용 에너지로 전환하여 주변 가정에 전력을 공급할 수 있는 기술의 기반이 마련될 수 있다.

**참고문헌**

1. 심재근. 1998. 음식물쓰레기 줄이기 연구결과 공동 발표회, pp.5-19.
2. 환경부. 1997. 환경백서, pp.77-78.
3. 한국자원리사이클링학회. 1999. 리사이클링백서, 317-322.
4. 박홍양. 1998. 음식물쓰레기 줄이기 연구결과 공동 발표회, pp.131-148.

5. 한동욱. 1970. 한국농공학회지, 12, 62-67.
6. 박영대, 임재현, 박남중. 1978. 농사시험연구보고 21, 61-66.
7. 박영대, 박남중. 1979. 농사시험연구보고 21, 53-60.
8. 홍순석, 박상전, 홍중준. 1998. 폐기물 자원화, 4, 31-42.
9. 박순철, 조재경, 이준표, 홍중준, 이진석, 김미선. 1994. “생분해에 의한 폐기물의 에너지 및 비료화 공정개발연구(II)”, 한국에너지기술연구소 보고서, KIER-941123.
10. 박순철. 1998. ETIS 분석지, 4, 8-13.
11. 전홍석. 1996. “대체에너지 기술개발 기본계획 개선연구”, 한국에너지기술연구소 보고서, 951Z101103FG1.
12. Jules, B., Van, L., Katja, C. F., Carla, T. M., Frijters, J., Alfons, J. M., and Gatze, L. 1993. Appl. Environ. Microbiol. Apr. 1003-1011.
13. Bryant, M.P., Wolin, E. A., Wolin, M. J., and Wolfe, R. S. 1967. Arch. Microbiol, 59, 20-32.
14. Archer, K. B., Hilton, M. G., Adams, P., and Weiko, H. 1986. Biotechnol. Lett., 8, 197-202.
15. 배재근, 고종호, 김병홍. 1994. Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol., 22, 407-414.
16. Henson, J. M., and Smith, P. H. 1985. Appl. Environ. Microbiology, 49, 1461-1466.
17. Ghosh, S., and Pohland, F. G. 1974. J. Water Pollut. Control Fed., 46, 748-759.
18. Ghosh, S., Conrad, J. R., and Klass, D. L., 1975. J. Water Pollut. Control Fed., 47, 30-45.
19. Zhang, T. C., and Noike, T. 1991. Water Sci. Technol., 23, 1157-1166
20. Kim, S. W., Park, J. Y., Kim, J. K., Cho, J. H., Chun, Y. N., Lee, I. H., Lee, J. S., Park, J. S., and Park, D. H. 2000. Appl. Biochem. Biotech., 84-86, 731-741.
21. Ghosh, S. 1991. Water Sci. Technol., 23, 1179-1188.