

생쓰레기 연료전지 발전 (I)

본 자료는 일본 열병합발전센터자료에서 발췌 · 번역한 것임.

1. 처음으로

생쓰레기는 매년 2000만톤정도가 배출되어 그 대부분은 소각처리나 매립처분되고 있다. 따라서 소각에 수반한 다이옥신의 발생, 매립처분 용지의 확보난, 악취 등의 문제가 발생하고 있어 환경조화성이 높은 새로운 처리방법을 찾고 있다.

필자 등은 쓰레기를 再資源화하는 固定床式 고온메탄발효법에 의한 유기성폐기물처리시설을 개발하여 실제의 상업시설에 설치 운전하여 양호한 처리실적을 올리고 있다.

본 시설은 메탄생성균을 중심으로한 고온혐기성미생물의 기능을 이용하여 쓰레기 등의 유기성미생물을 메탄 및 이산화탄소를 주성분으로하는 바이오가스로 분해하는 것으로서 에너지원으로 유효이용가능한 바이오가스를 높은 효율로 회수하는것이 가능하다. 이 바이오가스를 최근 현저히 발전된 연료전지의 연료가스로 공급하면 다이옥신이나 질소산화물의 배출 없이 유기성폐기물을 클린하게 처리, 고효율발전과 배열 유효이용이 가능한 열병합발전시스템의 구축이 가능하여 환경 에너지문제에 크게 공헌할 수 있게된다.

바이오가스를 이용한 연료전지발전은 하수처리장에서 발생하는 잉여 汚泥나 맥주공장의 폐수를 원료로 하여 운전하고있는 예가 있으나 생쓰레기를 이용한것은 전세계적으로 실적이 없다. 금번 NEDO의 即効型提案公募事業으로 생쓰레기연료전지발전의 실증시험을 실시, 생쓰레기로부터 발생하는 바이오가스의 성상을 파악함과 아울러 생쓰레기메탄발효-연료전지발전시스템 구축을 위한 검증을 수행하였다.

2. 실증시험장치

메탄발효란 무산소조건(혐기조건)하에서 메탄생성균을 주로하는 혐기성미생물군에 의해 유기물을 분해, 바이오가스를 얻는것이다. 미생물은 활성이 높게

나타나는 온도역에 의하여 상온균, 중온균 등으로 분류되나 본 시스템에서는 약 55°C의 고온 혐기조건하에서 활성이 최고로 높은 고온혐기성미생물군을 이용하였고 이로 인하여 높은 분해효율을 실현하고 있다.

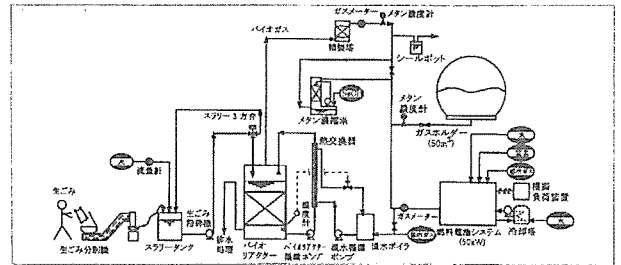


그림-1 실증시험시설 공정도

그림-1에 당사기술연구소 飛田급수시설내에 설치한 실증시험장치의 공정도를 나타내었다. 그림-1과 같이 실증시험장치는 생쓰레기 전처리장치, 바이오리액터, 바이오가스 정제/농축/貯藏장치, 연료전지발전장치, 온수보일러장치 등으로 구성되어있다. 그림2, 3은 생쓰레기 전처리장치/바이오리액터 및 연료전지장치를 나타내고있다.

실험에서 사용된 생쓰레기는 모 복합상업시설에서 발생하는 殘飯, 식품소재 및 식품조리잔사 등의 혼합 폐기물이다. 생쓰레기는 2일~3일에 한번의 빈도로 실험시설에 반입, 전처리를 한다. 한번 반입된 생쓰레기는 250~350kg정도이다.

2.1 생쓰레기의 전처리장치

전처리장치에 투입된 생쓰레기는 고압압축분별기(그림2)에 의하여 이물분별, 유기물의 페이스트화 후에 희석수와 함께 연속습식과쇄기에서 처리,생쓰레기 슬러리로 되어 탱크에 저장된다.생쓰레기슬러리의 평균성상은 표1과 같다. 생쓰레기슬러리의 유기물농도는 T-CODcr(중크롬산법에 의한 全化學的 산소요구량 농도)는 약 200,000mg/l로서 상당히 높고 비용해성 성분이 많다.

표-1 생쓰레기슬러리의 평균성상

유기물농도*	(T-CODcr)	207,250
	(S-CODcr)	66,350
고형분	(SS)	99,280
	(VSS)	94,060
유분	(n-hex)	12,860
질소	(K-N)	5,000

* T-CODcr : 전CODcr
S-CODcr : 용해성 CODcr

2. 2 바이오리액터

바이오리액터 본체는 스테인레스 원통형의 고정상식 리액터이다. 내부는 원통상으로 성형된 탄소섬유不織布로 된 미생물 擔體를 流下방향으로 간격없이 충전, 담체상에 부착 증식한 혐기성미생물과 투입슬러리를 접촉시킨 구조로 되어있다. 본 리액터는 생쓰레기를 상부로부터 투입하는 下向流型이다. 담체를 충전한 하향류형 고정상리액터 및 고온 혐기균에 의한 고온 메탄발효처리방식을 적용함에 따라 종래의 혐기처리법으로는 어려웠던 고형분을 다량 함유한 유기물의 처리가 가능하게 되었다.

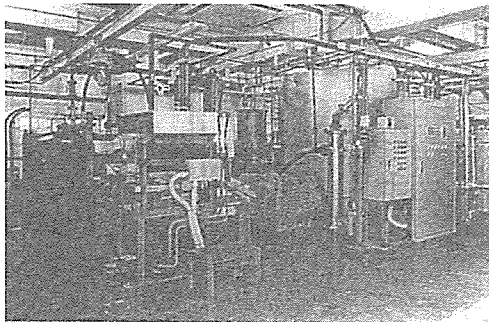


그림-2 전처리시설/바이오리액터

2. 3 바이오가스 정제/농축/저장장치

바이오가스는 주요성분인 메탄 및 이산화탄소 외에 유화수소, 암모니아 등의 부식성 불순가스성분을 포함하고 있다. 이들 성분을 제거하기 위하여 脫硫劑(산화철 펠렛) 및 활성탄을 충전한 건식가스정제탑을 설치하였다. 또한 연료전지 발전특성에 대한 바이오가스중의 메탄농도 의존성 등을 파악하기 위하여 수산화나트륨용액 스크라바방식의 메탄가스 농축탑을 설치하였다. 본 실증시험의 바이오리액터로부터 발생하는 바이오가스량은 30Nm³/d 정도로서 이번 시험에 사용된 최소형의 연료전지에서조차 연속발전이 불가능하였다. 따라서 정제 농축된 바이오가스를 용량 50m³의 가스저장시설에 저장, 연료전지시설은 정격출력의 60% (30KW) 출력으로 단속운전하는것으로 하였다. 바이오가스 저장에

는 폴리에스텔 구형가스홀더를 사용하였다.

2. 4 연료전지 발전장치

연료전지 발전장치는 정격발전능력 50KW의 도시가스를 연료로하는 인산형연료전지(富士전기(주)제품, FP-50)이다. 본 장치는 연료개질장치,直交변환장치 등을 유닛화한 장치와 외부 기기로서 냉각탑, 수처리장치 등이 포함되어있다. 또한 발전된 전력은 모의 부하장치에 의하여 열로 변환 대기중에 방출시켰다.

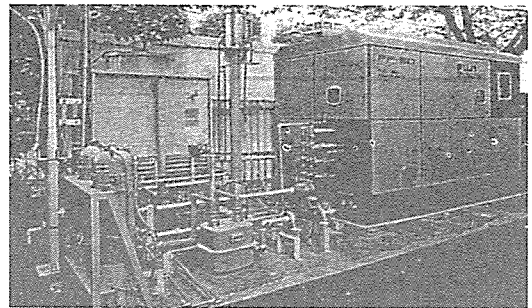


그림-3 시험시설 외관

3. 실험방법

실험에서는 2~3일마다 생쓰레기 반입 전처리, 바이오리액터의 연속운전, 저장 바이오가스에 의하여 주 1~2회 연료전지에 의한 발전을 실시하였다.

실험계획에 따라 연료전지장치에 공급되는 연료가스인 메탄농도를 결정, 가스홀더 내의 평균 메탄 농도가 소정의 값이 되도록 가스 농축탑의 운전조건을 결정하였다. 또한 조정된 연료가스가 발전실험시까지 충분히 균질화되도록 홀더내에서의 정치시간이 48시간 이상 되도록 노력하였다. 설정 메탄 농도는 대략 바이오리액터 출구농도(약 67%)로부터 약 93%의 범위이다.

발전시의 연료전지 제어파라미터는 실험계획에서 정한 메탄 농도를 기초로 설정하였으나 메탄가스농도의 계획치와 실측치에 약간의 차이가 발생한 경우도 있었다.

생쓰레기슬러리, 바이오리액터 내의 발효액, 바이오가스, 연료가스 등의 분석은 각각 법에서 정한 기준에 의하여 실시하였다.

4. 실험결과

4. 1 생쓰레기의 메탄발효

본 실증시험기간을 통하여 바이오리액터는 안정된

처리상황을 유지하였다. 바이오리액터에의 유기물 용적부하가 10~30kg T-CODcr/m³/d의 범위에서 생쓰레기슬러리 투입량을 변화시켰으나 각각의 부하에서 발효액중 유기산농도가 상이할 수 있지만 유기산이 축적되는 일은 없었다.

표-2에 나타난바와 같이 실험기간을 통하여 투입유기물의 분해율은 T-CODcr 기준으로 87%, 투입고형분(SS)의 가용화율은 89.9%(휘발물기준(VSS)은 90.8%), 유분(n-hex: 노말헥산 추출물) 제거율은 96.1% 였다. 또한 발효폐액중의 고형분의 대부분이 바이오리액터 내에서 증식한 혐기성미생물임을 감안, 실제의 투입 생쓰레기슬러리에서 由來하는 고형분의 可溶化率은 90%가 넘을것으로 사료된다.

전처리시설에서의 평균 異物배출율은 0.8%(중량비)로서 분별 제거한 이물의 태반은 플라스틱 필립류, 생선가시, 목편 등이었다.

표-2 평균제거율(바이오리액터)

항 목	제거율
T-CODcr	87.3
S-CODcr	75.9
SS	89.9
VSS	90.8
n-hex	96.1

4. 2 발생 바이오가스량, 메탄가스 농도

표-1에서 볼 수 있는바와 같이 바이오리액터로부터 발생하는 바이오가스량은 일평균 생쓰레기 투입량 140kg당 32.5Nm³(생쓰레기 톤당 233Nm³)이다. 또한 발생 바이오가스중의 메탄농도는 유기물 부하 등에 따라 약간 변동되었지만 단순 평균치는 약 66.1% 이다. 따라서 발생한 바이오가스가 갖는 열량은 약 18만 kcal(투입 생쓰레기 140kg당)이었다.

표-3 평균 생쓰레기처리량/바이오가스 발생량

생쓰레기 처리량	140 [kg/d]
바이오가스 발생량	32.5 [Nm ³ /d]
바이오가스 발생량	233 [Nm ³ /t-생쓰레기]

표-4에 바이오가스중에 함유된 불순가스성분의 농도(정제탑 입구), 정제 후의 평균농도(각각 4회 실험 평균치)를 나타냈다. 표-4에서 보는바와 같이 발생 바이오가스 중에는 고농도의 유화수소(평균 650ppm)가 함유되어있다. 또한 비교적 높은 농도의 암모니아(평균 28ppm)와 염화수소(평균 5.5ppm)도 검출되었으며

이들 가스성분은 연료전지에 유해함으로 완전히 제거할 필요가 있다. 본 실증시험설비에는 탈류제-활성탄에 의한 건식가스정제탑을 설치하여 실험기간을 통하여 불순가스성분은 검출한계 이하까지 제거하였다.

표-4 불순성분의 제거

항 목	정제탑 입구			정제탑 출구 농도
	최대농도	최소농도	평균농도	
유화수소	970.0	367.0	654.7	<0.0005
염화수소	9.5	3.4	5.5	<0.4
암모니아	31.7	23.5	27.6	<0.1

4. 3 발전효율

표-5 와 같이 연료전지설비의 발전효율은 투입 바이오가스(연료가스)의 발열량에 대하여 32~35% 정도(송전단 기준)이다. 바이오가스-연료전지시스템은 바이오리액터 출구농도 정도의 비농축가스(메탄농도 67%)도 농축가스(메탄농도 93%)와 동일한 정도의 효율로 발전되었다. 또한 바이오가스중의 메탄농도와 발전효율에 관해서도 명확한 상관관계가 인정되지 않았다. 또한 본 실증시험에 사용된 연료전지에 도시가스를 연료로 공급한 경우의 발전효율은 36.1%로 나타났다.

표-5 발전실험 결과

RUN	평균메탄 농도(%)	최대 최소 메탄농도(%)		연료전지 설정농도(%)	발전효율(%)
1	92.50	92.0	93.5	90	34.3
2	86.11	84.8	86.6	90	31.6
3	80.15	79.9	80.4	80	34.7
4	80.38	80.2	80.5	80	34.2
5	84.80	84.2	86.3	80	32.8
6	71.64	69.7	74.2	70	34.6
7	66.60	66.1	67.9	70	3.2
(평균효율)					33.6
도시가스					36.1

5. 고 찰

5. 1 생쓰레기 메탄발효

본 실증시험에 사용된 바이오리액터는 유기물 부하 10~30kg T-CODcr/m³/d 의 범위에서 안정된 메탄발효가 가능하였다. 바이오가스 발생량은 유기물부하의 변화에 양호하게 追隨함으로써 바이오리액터는 안정된 상태였음을 알수 있었다(그림-4). 시험기간을 통하여 발효액중의 잔류유기산농도도 낮은 수치를 유지하였다.

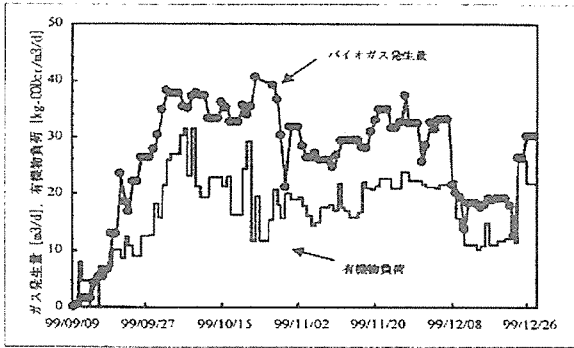


그림-4 유기물 부하와 바이오가스 발생량 변화

바이오리액터의 안정상태에서 유기물부하를 50% 정도 변화시켜도 생성 바이오가스의 메탄농도에는 큰 변화가 없었고 기존의 연료전지측의 제어계에 의하여 충분히 대응되는 것으로 판단되었다(그림-5).

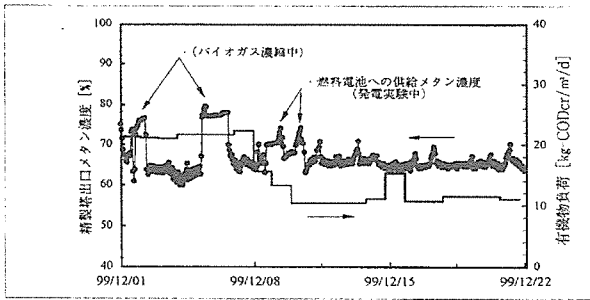


그림-5 유기물 부하와 바이오가스중 메탄농도와의 관계

5. 2 바이오가스에 의한 발전

발전에 관여하지 않는 이산화탄소를 함유한 바이오가스를 연료로 공급한 경우에는 100% 가연성가스인 도시가스에 비하여 약간의 효율 저하가 발생할것으로 충분히 예상하였으나 그림-6에서 보는바와 같이 메탄농도와 발전효율 간에는 상관관계가 없음을 알 수 있다.

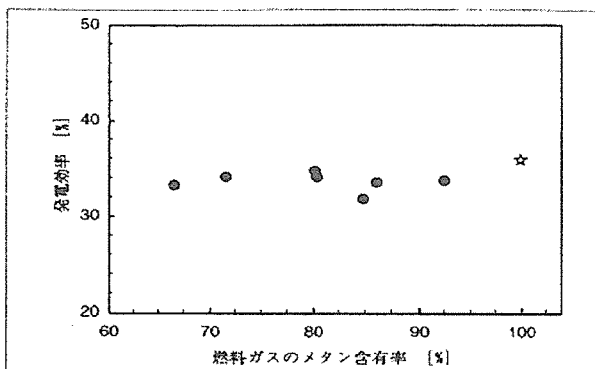


그림-6 연료가스중 메탄농도와 발전효율과의 관계 (별표는 도시가스인 경우의 발전효율)

금번의 실험에서는 각 발전실험 전에 설정한 바이오가스의 성상을 기초로하여 연료전지 제어계의 파라미터를 조정하였다. 역시 설정농도와 실제의 공급 바이오가스의 메탄농도와의 사이에 약간의 차이가 있는 경우가 있어 이로 인하여 발전효율에 불연속선이 발생, 연료가스중의 메탄농도와 발전효율 간에 명확한 상관관계가 인정되지 않았다는 사실을 알 수 있었다. 역시 연료전지측의 제어 운전 파라미터 설정시 예상한 농도와 실제의 연료가스중의 메탄농도와의 차이를 좁힘으로서 새로운 발전효율 향상이 기대된다. 또한 탈황제 및 활성탄에 의한 건식 바이오가스 정제장치의 성능은 연료전지의 연료가스로서 요구되는 순도를 충분히 달성할 수 있는 것이었다고 사료된다.

6. 마지막으로

복합상업시설로부터 배출되는 실제의 생쓰레기를 1일 평균 140kg의 비율로 고정상식 고온 메탄발효장치에서 처리하였다. 투입유기물은 고효율로 분해, 메탄화 되고 처리량 1톤당 평균 233Nm³의 바이오가스가 회수되었다. 또한 바이오리액터의 유기물 부하변동에 관계없이 바이오가스중의 메탄 농도는 약 63~67%로 안정되었다.

바이오가스중에는 비교적 고농도의 유화수소, 암모니아, 염화수소가 함유되어 있지만 이들 부식성 불순가스성분은 탈류제 및 활성탄에 의한 건식정제탑에서 충분히 제거되어 연료전지의 연료가스로 이용 가능하다.

정제처리한 바이오가스중의 메탄농도가 67~93%의 범위에서 평균발전효율은 33.6%를 달성하였다. 본 실증시험에 사용된 연료전지장치는 바이오가스발전의 경우에는 도시가스발전에 비하여 발전효율이 약간 낮지만 바이오가스-연료전지발전시스템의 실용화에의 문제점은 없었다.

금후에는 금번의 실증시험에서 얻은 지식을 기초로 본 실증시험에서 실현되지않은 排熱의 유효이용에 의한 열병합화의 검토, 아울러 보다 큰 설비에 의한 실증발전시험을 실시하고 유기성 폐기물의 고온메탄발효-연료전지발전의 실용화를 실현하여 나갈 생각이다.

본 실증시험은 NEDO의 平成10年度 即 型提案公募事業에서 채택된 것으로서 鹿島建設(주)엔지니어링 본부 환경기술부의 협력을 얻어 실시되었다.