

## 미활용 바이오가스 에너지 이용

하수처리장 슬러지, 음식물, 유기성 폐수 소화가스와 매립지 가스 등 바이오가스의 에너지 활용 방안과 그 온실가스 저감 효과에 대하여 소개하며 특히 가장 일반적이고 손쉬운 방법인 가스엔진 발전 방법에 대하여 분석하였다.

박순철

유기성 폐기물의 분해, 소화 혹은 처리과정은 이산화탄소, 메탄가스, 산화질소(N<sub>2</sub>O) 등의 온실가스의 대기중 방출을 유발할 수 있다. 실제로 대부분의 국가에서 매립지와 하수처리장 슬러지 처리과정에서 온실가스가 방출되며 인간활동에서 유발되는 전체 메탄가스 방출의 약 20%가 이들 설비에서 배출되고 있다. 더구나, 산업화된 국가에서는 그 비율이 약 30~40%를 차지함으로써 폐기물 처리활동이 매우 중요한 온실가스 배출원이 되고 있다. 본고에서는 이와 같은 폐기물 분해 과정에서 생성되는 미활용 바이오가스(메탄가스와 이산화탄소 혼합가스)의 에너지 이용 방안과 그 효과 그리고 그 구체적인 방법의 하나인 가스엔진 발전 방안에 관하여 분석 하였다.

### 미활용 온실가스로서의 바이오가스

바이오가스 성분의 대종이 되는 메탄가스는 백년주기의 온실효과를 감안 할 때 같은 무게의 이산화탄소의 약 24.5배의 온실효과를 가져올 수 있는 가스이므로 매립지, 하수처리장 등 폐기물 처분시설의 온실가스 배출저감이 매우 큰 의의를 갖게 되는 것이다. 여기서는 관련 문헌을 참고하여 매립지의 방치, 매립지 가스의 이용, 도시쓰레기의 소각처리 등 여러 가지 폐기물 처리대안이 폐기물에 의한 바이오가스(온실가스) 배출에 있어서 어떠한 특성을 가지고 있는 지 소개하여 보려고 한다.

먼저 폐기물은 배출원에서 부터 분리수거될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있으며 처리의 기술대안은 매

립, 퇴비화, 혐기소화, 소각(에너지 회수 포함) 등이 있을 수 있다.

또한, 매립의 경우에는 매립지 가스를 포집, 단순 소각하거나 에너지를 회수 이용하는 방법이 있는데 이들 각각 다른 기술 대안을 조합하여 다음과 같이 8개의 폐기물 처리 대안을 상정 할 수 있다.

- ① 단순매립
- ② 매립 + 가스포집 + 가스소각
- ③ 매립 + 가스포집 + 에너지 회수
- ④ 음식쓰레기 분리수거 퇴비화 + 매립
- ⑤ 음식쓰레기 혐기소화 + 매립
- ⑥ 가연성분 (음식쓰레기 포함) 소각 + 매립
- ⑦ 음식쓰레기 혐기소화 + 가연성분 소각 + 매립
- ⑧ 전량소각

상기하는 8가지 폐기물 처리대안에 대하여 먼저 발생 가능한 겉보기 온실가스 배출량과 순 온실가스 배출량(net impacts)을 계산하였다. 먼저 겉보기 배출량은 도시폐기물 속에 포함된 전체 유기물량에서 이론적으로 배출될 수 있는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O의 발생량을 추정하여 이산화탄소 상당량(CO<sub>2</sub>-equivalents)으로 환산하고, 한편, 순 온실가스 배출량은 단순매립, 소각, 퇴비화 등에서 미분해되어 남는 것을 고려하여 고정화된다고 보고 혐기소화, 매립지 가스의 에너지 이용, 소각열 이용 등으로 폐기물에서 에너지를 회수하여 재이용할 경우에는 그 에너지 량 만큼의 석유사용이 줄어 온실가스 방출을 저감할 수 있다고 보고 순 온실가스 배출량을 계산하는 것이다.

박순철 한국에너지기술연구원 (bmscpark@kier.re.kr)

### 매립지 가스의 에너지 활용현황

외국의 경우 개략적으로 100만㎡ 이상의 매립용량을 갖는 매립지는 메탄가스 45%(v/v) 농도 이상의 매립지 가스를 시간당 최대 600㎡정도 방출할 수 있으며 이 가스로부터 850 kWe의 전기에너지와 1,250 kWth의 열 에너지를 공급할 수 있다(Haase Energietechnik GmbH, 1999). 그러므로, 1998년 현재 약 2,400개소의 매립장이 운영되고 있는 미국은 360개소의 LFG 이용 발전시설에서 730 MWe의 용량을 갖고 있으며, EU는 2,900개소의 매립장 중에서

400개소가 LFG 이용시설을 갖추고 573 MWe의 발전용량을 갖추고 있는 것으로 조사되었다.

발전시설을 갖추지 못한 곳은 거의 모두 가스 소각 시설을 갖추고 있는 것으로 추정된다. 외국의 매립지 가스 이용 사례에 대하여는 다른 문헌에서도 많이 소개하고 있으므로 본고에서는 생략한다.

현재 우리나라에서 운영중인 매립장은 294개소로서 그 면적은 1,663만㎡에 이른다고 하며 사용 완료된 매립지를 합하면 전국에 약 1,500개소의 매립지가 산재하는 것으로 추정되고 있다. 한편, 사용 완료된 중소규모 매립지 가운데 50~60%는 대부분 침출수 여과 장치 등이 미비된 비위생 매립장으로서 인적이 드문 산간, 계곡 등에 설치되어 향후 10~20년 후에 수질 문제가 심각히 대두 될 것이라는 예측도 있다. 어쨌든, 100만㎡ 이상의 대규모 광역 위생매립지 시설은 1990년대 이후에 건설된 것으로 10여개가 있으며 그 중에서 환경부가 매립지 가스의 활용이 가능한 것으로 조사한 곳은 전국에 수도권 매립지를 비롯한 13개소가 사용중에 있다(표 1 참조).

<표 1> 전국의 LFG 이용 가능한 매립지 현황 및 예상 발전량

매립지명	소재지	매립기간	매립면적 (천㎡)/용량 (천㎡)	LFG 발생 추정/ (천㎡/일)*	예상발전량 (MW)
수도권 (제1공구)	인천시서구 검단동	1992. 2 ~ 2000. 9	1,314/ 59,341	1,252 (포집량 806)	50 (포집률65%)
부산 (생곡)	부산시 강서구	1996. 4 ~ 2001. 5	380/ 11,483	165	15
대구 (다사)	대구시 달성군	1990 ~ 2000	435/ 26,100	205	20
광주	광주시 북구 운정동	1993. 10 ~ 1999. 10	286/ 4,369	53	5
대전 (금고)	대전시 유성구	1996. 8 ~ 2010	570/ 8,465	48	15
원주	원주시 총업면	1995 ~ 2004	163/ 3,140	27	5
청주 (문암)	청주시 흥덕구	1994 ~ 1999	210/ 1,800	31	3
목포	목포시 대양동	1995 ~ 2004	180/ 2,897	25	3
포항시 (호동)	포항시 남구 호동	1994. 5 ~ 2001. 6	200/ 1,209	13	2
창원	창원시 천선동	1993 ~ 2020	200/ 1,209	11	5
진주	진주시 내동면	1994 ~ 2010	261/ 5,854	28	10
양산시 (유산)	양산시 유산동	1995 ~ 2005	235/ 3,019	23	5
제주	제주시 회천동	1992. ~ 2002	203/ 2,416	18	3

주) (주)거신 제공 자료로서 LFG 발생 추정은 1999년 기준임

표 1에서 보듯이 상당수의 매립지는 매립종료 시점이 다가오고 있으며 안정화 관리 및 사후 대책이 필요한 시점이 되고 있다. 종료 매립지의 안정화 대책은 두 가지 방향이 있을 수 있는데 한가지는 일정기간이 경과 후 호기성 조기안정화 대책을 실시하여 재사용하는 방향이 있을 수 있고 다른 한가지는 비교적 장기적 대책으로서 LFG 발전 이용 후 안정화 재사용이 있을 수 있겠다. 이 두 가지 대안중 선택은 매립지의 입지, 관리현황, 추가 매립 공간의 확보 여부, 지역개발 계획 등 지자체의 입장과 행정당국의 결정에 달려 있다고 하겠다.

최근에 외서는 대규모 매립지의 경우에 LFG 사용이 추진되고 있으며 그 대표적인 사례가 2000년 6월 준공된 난지도 LFG 이용 시설이다. 9,200만톤의 쓰레기가 묻힌 난지도 매립지는 현재 하루 34만4,000㎡의 LFG가 발생하며 서울시는 그 50% (17만 2,000㎡/일)를 추출 포집하여 지역난방공사에 공급하고 그 열로 월드컵 경기장과 주변지역 아파트 1992가구에 공급하기로 결정한 것이다. LFG는 2017년까지 에너지

원으로 활용될 예정이다. 한편, 부산시는 민자유치 사업으로 55억원(US\$450만)을 투자 부산(생곡) 매립지에 2, 3MW의 LFG발전소를 2001, 2003년 연차적으로 건설 전력을 생산, 판매하기로 하였다. 부산 매립지는 현재 총 매립용량의 약 50%(321만2,000톤)만이 매립되어 있는데 하루 약 17만m<sup>3</sup>의 LFG가 발생되고 있다고 한다.

한편, 표 1에서 약 50MW의 발전이 가능하다고 보고되고 있는 수도권 매립지에는 2001년 6.5 MW 규모의 발전기가 설치되어 매립지 자체 소요전력(침출수 펌프, 포기변 동력 등)을 공급하고 있는 것으로 알려져 있다.

### 매립지 가스의 활용 방법과 경제성

앞서 LFG 활용 현황에서 이미 보았거니와 LFG는 소각하여 그 발생열을 이용할 수도 있고 LFG 발전을 활용하는 것이 대부분 이었다. 최근의 다른 시도들을 포함하여 LFG 이용은 다음과 같이 4가지 방법으로 대별할 수 있겠다.

- ① 중질가스로의 직접 열이용
- ② 발전/병합 발전 (가스엔진, 가스터빈, 스팀터빈)
- ③ 고품질의 파이프라인 가스로 정제 (CNG등 이용 포함)
- ④ 기타 온실가온용, 이산화탄소 제조, 메탄올 제조용, 연료전지 이용 발전 등 개발중인 것

<표 2> LFG 포집 및 발전설비의 연간운영비 (설비수명 20년)

포집·관리설비	년간운영비 (1995 A\$)*	발전설비	년간운영비 (1996 A\$)
추출정	16,000	희박연소 내연엔진 부장품 전기설비·배관공사 운영유지 관리비	230,000 30,500 150,000
압축송풍기	30,000		
파이프 연결	55,000		
응축수 제거 및	2,500		
여과정제	22,000		
잉여 소각시설	105,000		
운영유지 관리비			
합 계	230,500	합 계	410,500

주) 1996년 호주불 기준 (1A\$ = ₩651, 2000년)

한편, 매립지는 혐오시설로서 현재는 대부분 주거지, 업무 활동지에서 이격되어 있는 경우가 많으므로 공공부문(소각로 등 환경기초 시설), 산업체 등에서 중질 가스의 용도가 있는 곳을 제외하고는 발전에 이용되는 경우가 많다. 따라서, 가장 대표적인 LFG 이용례로서 가스엔진을 이용한 발전의 경우 개략적인 경제성 분석의 일례를 소개하여 그 현황을 살펴보기로 한다.

먼저 대상 매립지는 인구 13만 정도의 도시를 커버하는 매립지로서 100만m<sup>3</sup>의 용량을 가지고 있으며 해마다 10만m<sup>3</sup>의 쓰레기를 매립한다면 10년만에 매립이 종료될 것이다. 동 매립지를 대상으로 매립개시후 5년(절반 매립시기)부터 20년간의 총 LFG 발생은 122,005,361m<sup>3</sup>으로서 750m<sup>3</sup>/hr 정도의 최소 메탄가스 발생·포집량을 확보 할 수 있을 것으로 보았다.

한편, 동 매립지의 LFG 발전을 위한 시설비는 포집 설비와 발전설비로 양분할 수 있는데 설비의 수명을 20년이라 보고 그 각각에 소요되는 연간비용은 다음 표 2와 같다.

표 2에서 LFG 발전의 경우 가스엔진의 구입 및 운영 유지비가 상당한 것으로 평가되고 있으며 포집·관리 설비는 현행법상은 LFG 발전이 없다 해도 불가피하게 운영 유지되어야할 부분으로 평가된다.

상기한 연간 운영비를 근거로 동 100만m<sup>3</sup> 규모 매립지의 LFG 발전 단가를 계산하여 보면 다음 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

표 3의 LFG 발전단가는 ₩40/kWh에 불과한 상업 발전의 단가를 상회하지만 우리나라에서 현재 적용하고 있는 대체전력에 대한 수전단가인 ₩60/kWh에 비하면 적은 수치로서 1 MW 정도의 최소규모 LFG 발전도 이미 우리나라에서도 손익분기점에 도달하고 있음을 보여주고 있다. 한편, 포집정의 운영은 구태여

<표 3> LFG 발전의 단가 (100만톤 규모 매립지, 1.1 MW 가스엔진)

LFG	포집정 운영비 (A\$/년)	발전설비 운영비 (A\$/년)	발전량 (kWh)	발전단가 (1996A\$/kW)
50%(v/v) 메탄 750m <sup>3</sup> /hr iC엔진수명20년	230,500	410,500	7,183,004 (90% 운전 내부전력)	0.089 (₩57.94)

LFG 발전이 아니더라도 의무화되고 있음을 감안하고 만약 열병합 발전을 통한 열에너지의 유효이용 수단이 있으면 LFG 발전은 매우 타당성 있고 바람직한 방안을 미루어 짐작할 수 있다.

한편, LFG 발전은 앞서도 언급하였듯이 온실효과와 저감효과가 막대하므로 향후 온실가스 규제가 더욱 엄격하여지고 탄소세 등으로 배출권 거래가 이루어진다면 그 수익성은 더욱 좋아지는 방향으로 사태의 전개가 기대되고 있다. 따라서, 향후 대규모 매립지를 관장하고 있는 지자체는 공공 혹은 민간투자를 유치하고 LFG 발전 (혹은 여타 이용 방안)을 적극적으로 수용하여 환경의 개선과 함께 공익을 극대화하도록 하여야 할 것이다.

### 청정개발 체제와 미활용 바이오가스의 활용

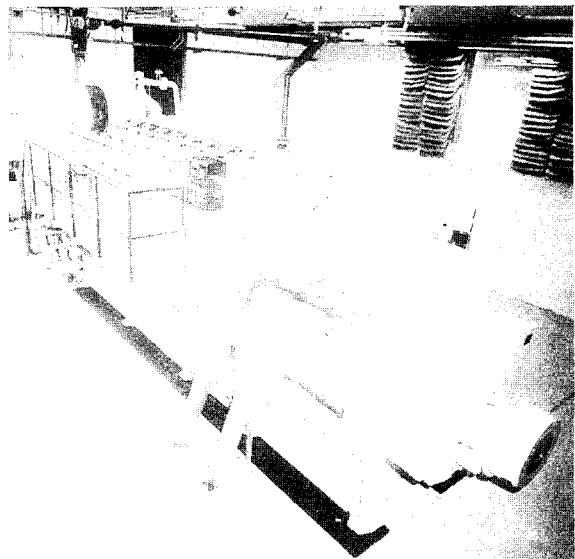
청정개발체제 (clean development mechanism, CDM)는 기후변화협약의 교토의정서에서 온실가스 감축의무의 이행을 위하여 국가 간의 온실가스 감축의 공동이행, 청정개발 체제의 활용, 배출권 거래제를 규정함으로써 생기게된 제도이다. CDM은 온실가스 저감 비용이 높은 나라가 비용이 낮은 나라에서 일정한 온실가스 감축 기술을 시행하고 이를 달성한 후 감축량의 일정분을 자국의 실적으로 인정받는 제도이다. 따라서, CDM을 통하여 선진국은 온실가스 저감비용의 감소를 개도국은 자본 및 기술이전에 의한 경제개발의 촉진을 기대하고 있다. CDM의 구체적인 운영 규칙과 감축인정의 구조 등에 대하여는 아직도 협상이 진행 중이며 확실히 규정되어야 할 일이 많다.

어쨌든 LFG와 같은 미활용 바이오가스 에너지 활용에서 CDM이 거론되는 것은 동 사업이 온실가스 감축효과가 크고 우리나라와 같은 개도국은 사업을 추진하기 위한 자본과 기술의 유치가 필요하기 때문일 것이다. 한편, LFG의 에너지 활용에 있어 CDM은 온실가스 감축효과를 현금수익화 할 수 있다는 점에서 CDM의 수행주체인 선진국 기술공여자는 물론이고 우리나라에서도 사업의 타당성을 높여 주는 계기가 될 수 있는 것이다. 예를 들어 해외 사업자의 참여의

사만 있다면 우리나라의 상당수 매립지는 CDM으로 인정받을 요건을 충분히 충족할 수 있으며 예상되는 저감 크레딧(배출권 거래시 US\$13/톤 CO<sub>2</sub> 예상)으로부터 적지 않은 수익을 추가로 얻을 수 있을 것으로 예상하고 있다.

그러므로, LFG의 에너지 활용사업을 추진함에 있어 해외의 자본·기술 유치 혹은 CDM 수용은 우리의 기술과 자본이 할 수 있는 최대한의 역량을 투입하는 것을 전제하여 추진할 일이지만 LFG의 이용은 온실가스의 저감효과가 탁월하며 LFG 이용을 실용화할 경우 상당한 투자와 대규모 엔지니어링 프로젝트의 수행이 불가피한 바 LFG의 에너지 활용 경험이 일천한 우리나라로서는 초기 도입단계에서 CDM을 활용하며 외국의 자본과 기술을 유치하는 방안이 검토될 수도 있겠다.

엄밀한 과학적 지식보다는 다양한 경우의 엔지니어링 경험이 필요한 LFG 에너지 활용기술의 성격상 난지도 매립지 가스 프로젝트나 부산 매립지 가스의 개발에 있어서 외국의 엔지니어링 기술진의 참여는 바람직하고도 당연한 결과라 할 수 있겠다. 그러나, 앞으



[그림 1] 대표적인 바이오가스 엔진 (외제품 : 250kW~1500kW)

로 유사한 프로젝트들이 다수 수행되어야 하겠고 우리나라 매립지의 사정이 외국과는 다른 점도 있으므로 (예를들면 적당한 매립부지가 적으므로 재사용을 고려할 수도 있고, 매립용지의 가격이 비싸고 상대적으로 주거지역에 가깝다는 점등), LFG 에너지 활용 프로젝트 엔지니어링 기법을 하루 빨리

습득, 현지화하여 독자적 설계, 시공, 운영 능력을 갖추고 관련 설비들의 생산 능력을 갖추는 일도 매우 시급한 일이라 하겠다.

다음 그림 1에 대표적인 바이오가스 이용 발전설비의 일종인 가스엔진을 소개하면서 본고를 맺고자 한다. 