

매립가스(LFG)의 에너지 이용 기술

가. 기술개요 및 개발필요성

1) 기술의 개요

급속한 경제 발전과 생활 수준의 향상에 따른 소비성향의 변화 및 인구의 도시집중화현상 등으로 인해 우리나라의 도시 쓰레기의 배출은 양적인 증가와 질적인 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 배출된 도시쓰레기의 최종처분은 대부분이 매립 처리되고 있고 매립쓰레기는 생물분해 가능한 유기물질에 의하여 다량의 CO₂, CH₄가스를 발생시킨다. CH₄는 천연가스의 주성분으로서 대체에너지 활용가능성이 매우 높다. 따라서 매립지에 의한 환경 오염의 해결과 대체 에너지의 개발 전략으로 도시 폐기물 매립지로부터 발생하는 매립가스(Landfill Gas, LFG)를 회수 이용하는 방안을 제시하고자 한다.

2) 기술개발의 필요성

가) 대체에너지와 도시환경 관점

자원이 부족한 우리나라 실정에 비추어 대체에너지의 개발이 시급한 현시점에서 매립지마다 다량의 매립가스가 발생하고 있음에도 불구하고 효율적인 이용 및 처리 방안이 없어 태워버리거나 방치하고 있는 실정이다. LFG 는 50-60% 메탄을 함유하며 약 5,000Kcal/m³ 의 고발열량을 가지지만 포집의 어려움, 수분과 유해미량성분의 함유 등의 문제로 국내에서는 아직까지 본격적으로 재활용되지 않고 있다. LFG 에너지화의 차원 뿐만 아니라 도시쓰레기의 매립 중 또는 매립완료된 매립지 수의 점차적인 증가로 매립지 주변의 대기 및 수질오염과 토양의 오염은 가장 시급히 해결해야 할 도시 행정의 과제로 부각되고 있다. 또한 최근에는 메탄 가스, CO₂가 지구온난화에 기여하는 물질로도 인식되어 이를 저감하는 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 LFG 이용은 대체에너지 개발 차원과 대기환경 보존 차원에서 신속히 이루어 져야 한다.

나) 국내외 현황 비교 관점

미국, 독일에서 LFG 회수기술은 수십년간의 연구개발결과로 직접연소에 의한 에너지 회수와 전력생산활동에 이용되고 있으나 국내현황은 대부분 LFG 추출에 관한 기초연구에 머무르고 있는 실정이다. 최근에 수도권매립지에서 매립가스 보일러 연료재사용을 검토하여 침출수 처리시설 소화조 가동보일러에 적용한 바 있다. 그러나 LFG에 내포되어 있는 수습중의 미량성분 제거에는 손이 미치지 못하고 있다. 매립가스를 발전용 혹은 그 외의 연료로 활용하기 위해서는 첫째 수분제거에 의해 LFG의 발열량을 높여야 하며, 둘째 방향족화합물, 황화합물, 염소화합물 등의 미량유해성분을 제거하여야 한다.

다) 수도권 매립지의 관점

현재 인천광역시 서구 백석동에 위치한 수도권 매립지는 총면적이 630만평의 국내 최대규모의 위생매립지로서 5개 공구로 구분되어 있다. 5개 공구중 제 1공구는 123만평으로 1998년 12월에 사업계획과 기본 및 실시설계를 하였고 1989년에 기반시설공사를 착공하여 1992년부터 폐기물 반입이 개시되었다. 제 2공구는 환경연구센터 부지로 이용될 것이다. 제 3공구는 1994년 8월에 기반시설 조성사업 실시설계를 완료하고 1996년 7월에 기반시설공사를 착공하여 1999년부터 폐기물 반입이 개시될 예정이다. 이후에 조성될 제 4공구와 제 5공구도 폐기물 매립지로서 폐기물의 반입량을 고려한 착공이 예상된다. 1992년 2월부터 폐기물이 반입된 제 1공구 매립지는 1996년 12월까지 총 매립량의 약 55%에 해당하는 30백만톤이 매립되었으며 현재까지 매립이 진행 중이다. 현재 제 1공구의 일부에서 발생 포집되어 소각되고 있는 매립가스는 기존시설 가동시 분당 $300\sim 320\text{m}^3/\text{min}$ 정도이며, 운영관리조합은 제 1공구의 매립가스 매장량만 해도 약 $70\text{억}\text{m}^3$ 에 달할 것으로 보고 있다. 앞으로 개설될 제 3, 4, 5공구 매립장에서 발생될 매립가스량을 생각해보면 현재 조합에서 이용하고 있는 양은 발생량에 비해 매우 적은 양이라고 할 수 있다. 매립장의 매립가스 포집시설 설치시 매립가스의 재이용 목적이 아닐지라도 매립지 운영관리 면에서 필연적이므로 매립가스를 이용 전력을 생산함으로써 연간 2.5만toe의 대체 에너지를 공급할 수 있는 것으로 예상되며 아래와 같은 필요성이 기대된다. 또한 강제적으로 매립가스를 수집하고 이를 에너지화하는 과정에서 매립지 표면으로 발산하여 환경에 악영향을 미치는 물질들은 제어할 수 있으므로 주변지역의 대기환경개선이 기대된다.

이상의 관점으로부터 LFG 이용 발전시스템의 개발기술은 다음과 같은 중요성을 가진다..

(1) 기술적인 면

- 매탄가스 활용에 대한 외국기술에 대응
- 환경오염 방지
- 대체에너지로서 활용 기술의 확보

(2) 경제적인 면

- 환경친화적인 대체에너지 확보
- 환경오염 방지비용의 대폭적인 절감

(3) 사회·문화적인 면

- 버려지는 에너지의 활용 방안 제시
- 매립가스에 의한 환경오염 방지
- 매립가스의 폭발위험과 악취 및 유해성을 갖는 VOC의 제거로 주변 지역 환경 개선과 환경에 미치는 위해성 평가의 기초자료로 사용가능
- 매립가스에 포함된 CH₄와 CO₂ 물질의 지구온난화 물질 저감

나. 관련 기술의 국내·외 현황

1) 국내의 경우

가) 국내의 이용대상 매립지 현황

전국의 매립지 중 대·중규모 매립지는 수도권매립지를 포함하여 13개 분포하고 있다(Table 1-1).

(1) 수도권매립지의 이용현황 및 계획

(가) 수도권매립지 1공구에서는 Table 1-2 와 같이 보일러를 이용하여 매립가스를 사용하고 있다. 이용량으로 볼 때 1,750m³/hr는 결코 적은 양이 아니지만 매립지의 규모와 포집되어 소각되는 매립가스량(300m³/min)의 10%에 불과하다. 이 사용량도 여름철에는 소비량이 감소하여 이용율은 더욱 떨어진다.

(나) 수도권매립지 3공구시설의 매립가스 이용

'99년에 완공된 3공구 침출수처리장에서는 1공구에서 포집된 매립가스를 중앙소각장치로부터 이송하여 약품저장 탱크의 가온과 관리동의 난방을 하고 있다.

(다) 수도권매립지의 매립가스 처리시설 및 처리량

수도권매립지에서는 매립지 2단, 4단, 6단, 7단에 수평포집관을 설치하고 있으며 이런 포집관은 매립지 주위에 설치된 가스이송관을 통해 중앙소각장치로 이송되어 소각처리되고 매립지 내부에 설치된 수직의 응축수배제장치에서 자연발산되는 매립가스는 일부 간이소각기를 설치하고 있다.

① 가스이송관

- 직경 : 600m
- 연장 : 6.4km
- 재질 : HDPE
- 수평가스 포집관 커넥터 : 43개소
- DRAIN-LEG : 55개소

② 중앙소각장치

- 소각기(6기) 용량 : 85m³/분·기 × 4기(340m³/분) --- 기존시설
- 170m³/분·기 × 2기(340m³/분) --- 신규시설

총용량 : 680m³/분

- 블로워 : 최대 흡입용량 = 155m³/분

정격 흡입용량 = 85m³/분

정격 진공압 = -1,900mmAq

- 부대시설 : 응축수 저장 및 이송장치 = 8m³ 및 0.1m³

가스성상 분석장치 = 1대(메탄, 이산화탄소, 산소, 질소 등)

중앙제어장치 1개소

③ 중앙소각장치의 소각량 : 300~320m³/분(기존시설 가동시)

Table 1-1. Large landfill sites in Korea

매립지명	매립기간	매립면적 (천m ²)	매립용량 (천m ³)	LFG 발생 추정량* (천m ³ /일)	예상 발전량 (MW)	총 에너지 대체량 (전력 toe/년)
1. 수도권	'93~2025	20,799	250,000	460	30	22,000
2. 부산 생곡	'96~2001	380	11,483	165	10	7,500
3. 대구 다사	'93~2000	435	26,100	205	13	9,800
4. 대전 금고	'96~2010	570	8,465	48	3	2,200
5. 진주 내동	'94~2001	261.5	5,854	28	1.8	1,300
6. 광주 운정	'93~1999	286	4,369	53	3.5	2,600
7. 원주 흥업	'95~2004	163	3,140	27	1.8	1,300
8. 청주 문암	'94~1998	210.5	1,800	31	2	1,500
9. 목포 대양	'95~2004	180	2,897	25	1.6	1,200
10. 포항 호동	'94~2001	200	1,209	13	0.8	600
11. 창원 천선	'93~2020	163	3,810	11	0.7	500
12. 양산 유산	'95~2005	235	3,019	23	1.5	1,100
13. 제주 회천	'92~2002	203	2,416	18	1	700
합 계				647	70.8	52,300

Table 1-2. Boilers driven by LFG in SDK landfill I section

구 분 규 격	연료소비량		용도	활용여부
	경유	매립가스		
주철재 온수 (250kcal/hr)	220ℓ/hr	540m ³ /hr	침출수처리장 소화조 가온	가동중
주철재 온수 (250kcal/hr)	220ℓ/hr	540m ³ /hr	침출수처리장 소화조 가온	가동중
노통연관증기 (1.5톤/hr)	110ℓ/hr	270m ³ /hr	관리동(1) 난방	가동중
주철재 온수 (10만kcal/hr)	10ℓ/hr	25m ³ /hr	계량실 난방 및 급탕	가동중
냉난방유니트 (냉방40RT/난방15만kcal/hr)	15ℓ/hr	40m ³ /hr	관리동(2) 냉방 및 난방	가동중
주철재 온수 (10만kcal/hr)	10ℓ/hr	25m ³ /hr	관리동(1) 난방 및 급탕	가동중
주철재 증기 (1.5톤/hr)	70ℓ/hr	170m ³ /hr	약품저장시설 약품가온	가동중
노통연관 온수 (20만kcal/hr)	30ℓ/hr	70m ³ /hr	정비동 난방 및 급탕	가동중
노통연관 온수 (20만kcal/hr)	30ℓ/hr	70m ³ /hr	처리장운전동 난방 및 급탕	가동중
계	715ℓ/hr	1,750m ³ /hr		

나) 난지도 매립지의 현황 및 매립가스 이용 계획

(1) 난지도 매립지의 현황

난지도 매립지는 15년간('78.3~'93.3) 단순 매립 방법으로 매립되어 해발 90m 이상인 두 개의 인공산을 형성하고 있다. 면적은 약 823,000평이며 매립된 계기물의 총요적은 91,972,000 m³이고 중량으로 환산하면 11,694천톤이다. 가스성상 조사결과, 생활폐기물이 매립된 제 1 매립지의 CH₄ 농도범위는 45-60%를 유지하고 있으며 생화폐기물과 건축폐기물이 매립된 제 2 매립지는 25-60%를 보이고 있다.

(2) 매립가스 이용계획

“난지도 매립지 안정화공사 실시설계보고서(서울시 1996)”에 따르면 시간의 경과에 따른 매립가스 평균조성변화는 CH₄는 52.96%, CO₂는 41.99%, O₂는 0.38%, N₂는 1.83%이며 추출시험에서 얻어진 매립지 단위 가스발생량은 1.5Nm³ LFG/yr · m³ refuse 로서 이를 이용하여 CH₄의 추출량을 구하면 175 Nm³ LFG/min이다. 현재 난지도 매립지 안정화 공사가 진행중에 있으나 2002년 월드컵사업의 일환으로 난지도의 매립가스를 난방용으로 이용하기 위하여 사업이 추진되고 있다.

(3) 국내의 매립가스 이용 기술개발 현황

매립가스를 이용하여 대체 에너지화하기 위한 이용기술에 대한 관심이 일어나기 시작한 것은 80년대 후반으로 비교적 짧은 기간이며 또한 실제 적용된 사례현황도 적다. 하지만 대규모인 수도권 매립지의 발생 매립가스에 대한 처리 및 이용방안이 대두되면서 관심이 높아지고 있다.

'90년대 초 연세대와 KAIST에서 행한 “난지도 매립지 가스추출 이용기술 개발에 관한 연구”는 매립지 가스추출의 영향 반경과 매립지 투과계수 등을 구하여 매립가스 추출효율을 평가하였다. 그리고 90년대 중반에 거신양행에서 행한 “쓰레기 매립장의 LFG 포집, 정제, 활용에 따른 최적화개발”은 기존의 포집과 유사한 blower식 추출방법을 상용하였으며 정제 기술은 알카리 습식법으로 CO₂/CH₄분리에 중점을 두었다. 또한 발생량 계산에 따른 LFG 이용 경제성을 평가하였다. '95년도에 삼성물산(주)의 “매립가스 처리 및 이용 기술개발”에서는 첫째, 실험실 규모와 대형 모의매립지를 운전하여 발생하는 가스 및 침출수의 모니터링 기법에 대한 효율적인 매립가스 관리시스템, 둘째, 추출·처리 시스템의 최적 설계기술, 매립가스 정제시스템, 셋째, 매립가스 처리 및 이용을 고려한 한국형 매립공법을 제안하기 위한 수치해석에 대한 연구가 행하여졌다. 또한 “1000만m³/년 이상규모 매립가스(LFG) 실증실험”에서는 LFG와 LPG가스의 혼합을 통한 도시가스 대체 에너지로서의 실증실험에 대한 연구가 행해졌다.

전술한 사항을 볼 때 ①매립가스의 유해성에 대한 안정성 평가와 ②실제 매립지에서의 발생량 실측, 포집 및 모니터링 기법에 대한 고찰이 결여되었으며 ③직접연료화 및 에너지레벨로 볼 때 LFG 정제가스의 직접이용 및 ④전력생산에 대한 실증실험기술은 아직 미흡한 것으로 보인다.

2) 국외의 경우

가) 매립 가스 이용 방안

1970년 후반에 처음으로 매립가스를 이용하기 시작하여 환경오염에서의 제어나 메탄가스의 경제적인 가치가 높아짐에 따라 새로운 대체 에너지원으로 많은 연구와 이용이 늘어나고 있는 실정이다. International Energy Agency(IEA) Bioenergy Agreement의 Task XI에서의 LFG Activity 에 의하면 1995년도 집계로 5대륙에 걸쳐 13개국에서 LFG에너지 회수설비가 적어도 400여개로 알려져 있다.

LFG 에너지 회수설비에 대한 현황을 Table 1-3 에 나타내었다. 대부분이 미국, 독일, 영국으로 전체 매립가스 이용 사례의 75%정도 이상을 차지하고 있으며 이 중 대부분이 전력생산을 가장 많이 채택사용하고 있다. 일례로 영국에서는 65여개의 LFG에너지 회수 설비가 가동되고 있으며 이중 82%는 전력(total around 85MW capacity)을 생산하고 나머지 18%는 LFG분리정제공정의 채택으로 직접 가스를 이용하는 것으로 조사되었고, 부가적으로 42개의

LFG를 이용한 전력설비가 추진되고 있다. 이는 전기에너지의 장점인 에너지 이용과 거리 제한에 관계없이 수요처의 확보가 가능하다는 장점이 있기 때문이다. 스웨덴에서는 5개의 LFG설비를 가지고 있으며 대부분이 열회수발전에 쓰인다. 이는 환경오염물질의 배출 및 운영유지관리에서 타 시스템보다 우수한 스팀생산발전을 선호하고 있는 상황이다. 또한 캐나다에서는 매립지에 9개의 LFG이용설비를 가지고 있으며 그중 7개가 upgrading 형태로 LFG를 분리·정제해서 직접 연료로 이용하는 것으로 나타났다.

Table 1-3. LFG energy recovery schemes in IEA LFG Activity member countries and Germany^a

Country	No. of schemes	Comments
USA ^b	137	mostly electricity generation
Germany	112	Plans for additional 77 new energy recovery schemes
UK	65	53 electricity generation schemes(total around 85MW capacity); 12 projects use the gas directly. An additional proposed 42 electricity generation schemes have been awarded contracts under NFFO.
Sweden	55	Mostly heat recovery
Netherlands	22	Mostly electricity generation(total around 20MW)
Canada	9	7 direct use; 2electricity generation. A further 8 are under construction or proposed
Denmark	9	
Norway	9	

a - Not an IEA Landfill Gas Activity member country : data collected by the Dutch Landfill Gas centre. Included in because Germany is a major user of LFG

b - Thorneloe, S.A. and Pacey, J.G.(1995). Landfill gas utilization database of North American Projects

미국내 매립가스 이용 사례중 이용 형식별로 살펴보면 매립가스 이용 형태가 발전을 위주로 하고 있으며, 공해오염물질(NOx, CO)의 배출 및 운영유지관리에서 타 시스템보다 우수한 스팀생산을 통한 발전방식을 선호하고 있는 추세이나, 가스 엔진 및 가스터빈을 통한 발전도 상당수 이루어지고 있다. 이와 같은 미국 이용사례뿐만 아니라 유럽의 여러 나라에 있어서도 매립지로부터의 메탄가스 유효이용이 활발한 실정이다. 이들도 초기에는 매립가스 활용을 위하여 여러 가지로 시도하였으나 나라마다 또는 매립지가 위치한 지역적 여건에 따라 가장 적합한 방법을 선택하고 있으므로 자료를 통한 나라별 이용기술현황을 조사하였다.

(1) 미국

미국에서는 환경과 건강의 관심사 때문에 US EPA에서 매립지 발생가스를 오염물질로 규정하였다. 그리하여 EPA에서는 현존하거나 새로이 건설되어질 매립지에 대한 매립가스 발생 기준을 제안하고 있다. Clean Air Act에 의해 제안된 규제대책으로 인해 도시고형 폐기물 매립지의 발생가스를 포집, 제어하는 시스템을 도입하여 에너지화하는 장소가 꾸준히 늘고 있다고 한다. 이러한 규제에 영향을 받은 매립지들이 매립가스를 소각하지 않고 이용하여 큰 이익을 얻고 있다. 매립지 발생가스 제어에 대한 에너지 회수는 석탄연료 전력공장의 2차 발생가스 및 화석연료의 사용을 감소시킬 수 있다.

US EPA 보고서의 내용을 토대로 조사한 Table 1-4 에서는 미국에서의 매립가스를 이용한 에너지 회수 시스템을 형태에 따라 나타내었다. 앞에서 기술한 것과 같이 전체 시스템 중의 78%가량이 전력을 생산하고 있으며 지역시설에 제공하고 있다. 전력생산에서는 내부 연소(Internal combustion, IC) 엔진을 사용하여 총 350MW의 전력을 생산하고 있고 가스 엔진 및 스팀 터빈을 이용하기도 한다. 또한 직접적인 가스이용을 통하여 디젤 연료를 생산하며 가장 경제적인 방법인 보일러 연료로 사용하는 것도 22%정도이다.

Table 1-4 Example of the types of LFG utilization project in the USA

	Types of energy project	Portion(%)
Electricity	Internal combustion engine	54
	Gas-fed turbine	19
	steam-fed turbine	5
Others	pipeline quality	4
	Direct-gas use	18

Table 1-5 에서는 미국에서의 주(state)마다 매립가스를 이용한 사례를 분류해보았다. US EPA에서는 미국 매립지에서 연간 발생하는 메탄의 양을 8-16Tg정도로 추산하고 있는데 이 값은 전세계적으로 발생하는 20-40Tg에 대해 많은 비중을 차지하고 있다.

Table 1-5. Number of LFG utilization projects per state in the USA

State in USA	Number of projects
California	37
New york	13
Michigan	9
Pennsylvania	7
Illinois	7
Wisconsin	6
New jersey	4
Maryland	4
North carolina	2
Texas	2
Oregon	2
Ohio	2
New hampshire	2
All others	13

일반적인 매립가스 이용은 화석연료의 보존과 함께 부산물의 배출을 제어하는 결과를 보이고 있으나 기술적인 문제와 비기술적인(운영 및 보수) 문제로 인하여 새로운 매립지의 에너지 회수설비 설치를 가로막고 있다.

(2) 영국

영국에서는 대부분 매립지가 잠재적인 산업에너지 수요처와 거리를 둔 곳에 위치하고 있기 때문에 매립가스를 실제 이용 수요자에게 제공할 수 있는 상업적인 기회를 가지지 못했다. 따라서 매립가스를 이용한 전력 생산이 대부분을 차지하고 있다. 일반적인 전력생산의 장치는 가스터어빈과 스팀터어빈 두가지 형태가 일반적이다.

또한 매립지별 이용기술 사용현황을 중심으로 Table 1-6 에 나타내었다. 일반적으로 보일러의 연료의 경우 수분 및 분진을 제거한 전처리 공정만을 사용하는데, 매립지 사용처에 대한 거리가 일반적으로 1km 미만인 장점에 기인한다고 사료된다. 매탄의 농도가 60% 미만으로 예비 가스에 대한 공급도 매립가스 이용시스템에 필요가 장치이기도 하다.

Table 1-6. Example of LFG utilization system in United Kingdom

구분	LFG사용	연소 기술	이격 거리 (m)	전처리	메탄 농도	기타
A	보일러	Dual fuel gas oil LFG burner	300	수분제거 필터	52~53%	Gas-oil은 예비용임
B	보일러 난방	Dual fuel gas oil LFG burner	700	수분제거 필터	60%	Oil은 LFG공급에 문 제가 있을때만 사용
C	보일러	LFG 전용 버너	200	수분제거 필터	52~53%	
D	Tunnel Kiln	표준 단일 오리피스버너	-	수분제거	50%	LFG는 메탄농도를 50%로 맞추기 위해 NSG와 혼합
E	Transever- search kiln	단일 오리피스 버너	200	수분제거 필터	50%	NSG는 LFG관의 압력계에 의해 LFG의 공급을 보충
F	보일러	3연료 버너 LFG/NSG 노즐혼합	27,500	수분제거 필터	45~65%	
G	침출수 가열	Standard flarestack with coil pipe shroud	매립 지내	수분제거 필터	46%	
H	Tunnel Kiln	Single orifice, duel supply LFG/NSG, manyal change over	100	수분제거	47%	
I	Tunnel Kiln	Dual fuel twin orifice LFG/NSG burner	200	수분제거		LFG는 각 버너로공 급되고 NSG로 보충
J	Tunnel Kiln	Single orifice, duel supply LFG/LOG, automatic change over	500	수분제거 필터	42~43%	LFG관의 압력계에 의해 버너의 자동진 행스위치 조절
K	Cacination plant	opposing banks of bar supplying gas and air	18,000	수분제거	45%	
L	온실 가열	-	300	수분제거	-	

나) 매립가스 이용 사례

매립가스(CH₄)는 천연가스의 주성분이다. 매립지로부터 발생하는 매립가스도 천연가스의 일종으로 생각할 수 있다. 따라서 매립가스를 이용할 경우 시스템은 크게 추출·포집 시스템과 이용시스템으로 나뉜다. 실례로 매립지에 설치한 가스정, 가스정을 접속하는 배관, 수분등을 제거하는 필터 및 가스를 흡입하는 펌프 또는 콤푸레샤 등의 설비, 이용 목적에 따라서 전력, 직접연료화 또는 열에너지로 교환하는 이용시스템이 그것이다. 일반적으로 매립가스의 여러 가지 용도 중에 가장 널리 활용되는 분야 네 가지를 아래와 같이 구분해 이용사례를 알아보았다.

(1) 중질 가스로의 직접 이용

(2) 발전/병합발전

(3) 고품질의 파이프라인 가스로 정제

(4) 기타 온실가온용, 이산화탄소 제조, 메탄올 제조용, 연료전지에 이용 등

(가) 중질 가스의 직접 이용(Sale of Medium-Btu Gas)

가장 간단하면서도 비용이 적게 드는 방법으로서 보일러, 건조기, 킬튼, 시멘트나 아스팔트 제조공정 등에 직접 이용하는 방법이다. 수요자에게까지 파이프라인을 건설하는데 드는 비용이 1km당 약 15만 달러에서 30만 달러 가량 소요된다(1996년 현재 미국 기준).

잉여 가스는 보관이 곤란하기 때문에 가스 발생량과 수요량이 일치하여야 최고의 효율을 올릴 수 있으며 기존 에너지원과 열량이나 연소특성이 다르기 때문에 이를 감안하여 보일러 등의 에너지 이용 설비를 개조할 필요가 있다. 보일러의 개조 비용은 시간당 1만 파운드의 스팀을 생산하는 보일러의 경우 약 12만 달러, 시간당 8만 파운드의 스팀을 생산하는 경우는 약 30만 달러가 필요하지만 상황에 따라 가변적이다. 운영 및 유지비용(O&M costs)은 일반 연료를 사용할 때와 별 차이가 없다.

※ 직접 연료로 사용시 고려해야 할 LFG의 특성

- 높은 수분 함량; 3-7%의 수분이 함유되어 있으므로 이를 제거하기 위한 장치 필요
- 낮은 화염 온도; 천연 가스보다 화염 온도가 낮으므로 더 큰 과열 장치가 필요
- 낮은 열량; 포집 과정에서 섞인 공기가 열량을 저하시킬 수 있으므로 대비 필요

매립가스 직접 이용의 예

① ASCON Landfill (Wilmington, California)

-가스 발열량 : 4,720 kcal/m³

② AZUSA Landfill (AZUSA, California)

-가스 발열량 : 4,450 kcal/m³

③ CINNAMINSON Landfill (CINNAMINSON, New Jersey)

-가스 발열량 : 5,340 kcal/m³

④ U.K의 매립가스 이용

⑤ Pattonville High School (Missouri)

(나) 발전용(Power Generation)

매립가스의 발전 방법에는 내연 기관(Internal combustion engine), 연소 터어빈(combustion turbine) 및 보일러/스팀 터어빈(boiler/steam turbine)등이 많이 이용된다(Table 1-7). 매립 가스 이용이 활발한 나라중의 하나인 미국에서는 LFG를 이용한 발전에 IC 엔진을 가장 많이 사용하고, 그 다음으로 CT를 사용하고 있다. 또 다른 방법으로는 전력 생산과 난방을 겸하는 열병합발전(cogeneration)이 있다. 일반적으로 전력만을 생산할 경우

의 효율이 20~50%인 반면 열병합발전은 폐열을 이용하여 난방을 하기 때문에 더 높은 효율을 기대할 수 있다. 미국의 경우 LFG를 이용한 발전은 “공공전력 규제정책법(the Public Utilities Regulatory Policy Act)”에 따라 ”소규모 발전업자(small power producer)”로 지정을 받아 전력회사가 생산된 전력을 구매하도록 되어 있다. 우리 나라도 매립가스의 이용을 촉진하기 위해서는 미국과 유사한 지원제도가 마련되어야 할 것이다.

Table 1-7. Comparison of electric generation

구분	내연기관 (IC 엔진)	연소 터빈 (CT)	스팀 터빈/보일러
발전 규모(MW)	≥1	>3	>8
LFG발생량(mcf/d)	≥625	>2,000	>5,000
투자비용(\$/kW)	1,100 - 1,300	1,200 - 1,700	2,000 - 2,500
운영 및 유지 비용 (cent/kWh)	1.8	1.3 - 1.6	1.0 - 2.0
발전 효율	25 - 35	20 - 28 (CT) 26 - 40(CCCT)	20 - 31
열병합 가능성	낮음	중간	높음
압축 필요성 (투입가스압력,psig)	낮음(2 - 35)	높음 (165+)	낮음(2 - 5)
장점	-저비용 -고효율 -가장 널리 이용	-부식에 강함 -낮은 운영 및 유지 비용 -설치 면적 작음 -NOx 배출 적음	-부식에 강함 -가스성분과 발생량 조절이 가능

북미의 매립가스 이용 발전 매립지

① Santa Rosa Central Landfill

- 발전 형식 : 가스엔진 방식(Caterpillar 3526 Engine)
- 발전 용량 : 6.4MW/H(0.8MW*8기)

② New Island Landfill

- 발전 형식 : 가스엔진 방식
- 발전 용량 : 5.3MW(0.525MW* 4기 + 1.1MW * 3기)

③ Altamont Landfill

- 발전 형식 : 가스터어빈 방식(Mn. W. Nugent & CO 사, 모델명 1577-2B-DN)
- 발전 용량 : 6.4MW(3.2MW*2기)

④ Gazmont Landfill

- 발전 형식 : 스팀터어빈 방식(보일러)
- 발전 용량 : 23.3MW(1기)

(다) 고품질 가스로 정제(Upgrade to High-Btu Gas)

LFG를 천연가스와 같은 수준으로 정제하여 압축 천연 가스 차량의 연료나 도시 가스로 사용하는 방법이다. 그러나 비교적 높은 투자비용 때문에 1일 4백만 입방피트(14,000m³)이상의 가스가 발생할 경우에만 경제성이 있다. 이 시설은 CO₂와 그 밖의 불순물을 제거하기 위해 폭 넓은 처리 과정을 거쳐야 하며, 도시 가스로 이용하기 위해서는 승압 과정 및 더 까다로운 품질 테스트 등의 절차를 거쳐야 한다. 그러나 회수된 가스를 전량 이용할 수 있다는 이점도 있다. 매립가스를 고품질 가스로 정제하는 매립지는 아래와 같다.

① Palos Verdes (California)

-가스 발열량 : 9,000 kcal/m³

② Operating Industry(California)

-가스 발열량 : 9,000 kcal/m³

③ MOUNTAIN VIEW Landfill(California)

-가스 발열량 : 6,230 kcal/m³

④ OPERATING INDUSTRIES Landfill (Monterey Park, California)

-가스 발열량 : 8,900 kcal/m³

(라) 기타 용도

기타 용도로는 이산화탄소의 제조 원료 등으로 쓰는 방법이 있으나 그 활용은 제한적으로 이루어지고 있다. 기타 용도로의 활용가능성은 매립지의 요구, 규모, 가스의 질 등 매립지의 특성에 따라 달라진다. 매립가스 규제 정책, 매립지 운영자의 목표, 잠재적 수요자의 요구 등도 중요한 요인이다. 그러나 이러한 용도로의 활용은 상업적인 것과는 아직 거리가 있다.

① CLG 차량 연료

LA 카운티 보건국의 푸엔테 힐스 매립지는 LFG를 차량 연료로 활용하는데 성공하였다. 매립지 현장에 압축 LFG 주입기를 설치하고 쓰레기 수거 차량에 연료로 공급하고 있다. 이 프로젝트로 인해 잉여 가스를 태워 없앨 필요가 없어졌으며 동시에 쓰레기 수거 차량의 배출 가스도 줄이는 효과를 가져 왔다.

② 메탄올 생산

자동차 연료나 화학적 공급연료로서의 사용을 위한 LFG의 메탄올 변환은 1980년대 초부터 미국내에서 연구되어 왔으나 메탄올 가격이 낮기 때문에 경제성이 맞지 않아 실질적인 생산은 이루어지지 않았다. 1990년대에 들어와서 메탄올 가격이 2~3배 상승하면서 캘리포니아 남부 해안 대기관리국(South Coast Air Quality Management District)으로부터 50만 달러를 지원 받아 테라메스사(TeraMeth Industries, Inc.)는 LFG로부터 고급 메탄올을 생산하는 설비를 설치하여 1997년부터 1일 63,000리터(16,667 갤런)의 메탄올을 생산한다.

③ 연료전지(Fuel Cell)

LFG를 활용한 연료 전지는 모듈화의 용이성, 소용량화 가능, 고효율, 저소음, 낮은 환경 영향 등의 장점으로 인하여 잠재성이 매우 큰 기술이다. 따라서 일단 기술적인 문제가 해소되면 LFG를 이용한 발전에 가장 이상적인 기술이라 생각된다. 천연 가스를 이용한 연료 전지는 몇 개가 상업적으로 가동되고 있으나 LFG를 이용한 것은 아직 (1996년 10월 기준) 개발 단계에 있다. 가장 커다란 난점은 LFG 정제 시스템을 개발하는 것이다.

연료 전지는 LFG와 같은 연료로부터 얻어지는 수소에 공기중의 산소를 전기화학적으로 반응시켜 에너지를 얻는 기술이다. 연료와 공기가 공급되는 한 전기를 50% 이상의 고효율로 계속적으로 얻어질 수 있다.

발전에 적합한 연료 전지는 phosphoric acid fuel cells(PAFC); molten carbonate fuel cells(MCFC); solid oxide fuel cells(SOFC)등 세 가지 형태가 있다(Table 1-8). 이 중 PAFC가 LFG를 이용한 상업적 발전에 가장 가까이 근접해 있으며, EPA가 캘리포니아 선벨리의 펜로우즈 매립장서 200kW짜리 PAFC를 시험하고 있으며(1996년 현재) 기타 몇 곳에서 시험 가동 중이다.

Table 1-8. Five type of commercial fuel cell in present

Fuel cell type	Operating Temp(℃)	Present or Potential Application
Alkali	50~100	Space Vehicles에 사용되었고, 지상차량과 잠수함 등에 사용 가능
Solid Polymer	50~100	대형차나 버스의 사업용 생산은 2000년경에 가능
Phosphoric Acid	~200	중간크기의 CHP(combined heat and power) system으로 200kW급의 상업용 제품이 IFC Corp에 의해 생산
Molten Carbonate	~600	중·대형 CHP system으로 1~2MW급이 제작중
Solid Oxide	500~1,000	2kW에서 수 MW의 다양한 크기로 제작이 가능한 CHP system으로 가장 활용 가능성이 높음

④ 고순도 CO₂ 생산

점차 고순도의 CO₂에 대한 요구가 증가함에 따라 LFG로부터 상업적 수준의 CO₂를 생산하는 연구는 미국의 에너지부 지원으로 Acirion Technologies, Inc.에서 실시되고 있다.

3) 국내외 특허 및 현존 기술과의 관련성

가) 기술 도입 타당성

우리나라는 정유공업의 발달로 정유공정 부생가스로부터 미량불순물을 제거하는 기술이 축적되어 있다. 또한 본 연구팀은 난지도, 수도권매립지의 유해성분 조사를 수차 실시한 경험이 있으며 유해성분 전처리를 자체적으로 해결할 수 있을 것으로 판단한다.

가스 발전설비는 크게 두가지로 가스를 직접 이용하는 가스엔진과 가스를 열에너지화하여 전력화하는 스팀터어빈으로 나눌 수 있다. 국내에서 가스엔진 자동차를 생산하고 있으며, 중유사용 가스터어빈은 상용화되고 있다. 따라서 이들 기술들을 조합, 응용, 발전시켜 LFG 발전기술을 개발할 수 있다고 사료되는 바, 기술도입은 고려하지 않는다.

나) 매립지 가스 추출/처리/이용 관련 특허

(1) 매립가스 포집용 차단막 시스템(Landfill gas capping liner system) (특허번호 5206067)
본 시스템에서 사용되는 차단막은 상부의 가스통로부분과 하부의 가스통과부분으로 구성되어 있다. 가스 통로 부분은 세로방향으로 길게 뻗어 있으며 차단막 위에 위치하는 점토층과 최종복토층의 무게를 지탱해야 한다. 매립지에서 발생하는 가스를 통과시켜 가스통로로 연결해주는 가스통과부분은 가스통로의 끝에 위치한다.

(2) 매립가스 이용 제어 (특허번호 5295763)

매립지 경계에 매우 근접하여 추출정을 설치하고 매립지 경계밖에 수평방향으로 수압에 의해 균열을 형성시킨다. 이때 매립지 경계 밖 균열은 추출정의 영향권내 위치하도록 함으로써 균열지역에 모인 가스를 추출할 수 있도록 한다.

(3) Multi-mode combuster (특허번호 4983364)

· Thermal combuster와 catalytic oxidizer 가 파이핑으로 교차연결되어 농도가 추출가스의 농도에 따라 두 가지 중 하나만 작동하도록 설계됨

· 구성: dilution air valve, heat exchanger, electric heater, 보조연료 연결장치

· 대안:Thermal combuster대신에 internal combustion engine사용가능

(4) Condensate trap for vapor extraction system (특허번호 5372621)

· 구성 : vapor tight vessel, mist eliminator (impingement type), condensate collector

· vessel의 구성 : vapor inlet, vapor outlet, swing check valve

· swing check valve : 일정한 높이까지 찰 때는 닫혔다가 열린 후, 다시 일정한 높이 이하로 응축수가 배제되면 check valve가 닫힘

(5) Process for the separation of landfill gas (특허번호 4681612)

메탄, 이산화탄소, 불순물 등이 혼합된 매립가스로부터 연료로 사용 가능한 메탄을 압축 상태로 정제하는 프로세스이다. 본 공정에서 이산화탄소와 불순물은 저온 칼럼을 통해 정제된다. 또한 이산화탄소를 불순물로부터 분리하는 공정을 옵션으로 사용할 수 있다.

(6) Recovery of methane from landfill gas (특허번호 4770676)

Multi-column 흡착시스템을 통해 매립가스로부터 순수한 메탄과 이산화탄소를 분리하는 공정이다. 매립가스는 temperature swing adsorption section(TSA)를 통과하면서 미량의 불순물이 제거되는 전처리 과정을 거친 후 pressure swing adsorption section(PSA)을 통과하므로써 메탄과 이산화탄소가 분리된다.

(7) Regeneration of adsorbents (특허번호 4784672)

본 특허는 상기 multi-column 흡착시스템의 TSA에서 사용된 활성탄과 zeolite를 재생하는 공정에 관한 것이다. 먼저 고온의 가스를 zeolite와 접촉시켜 재생 가능한 최고온도까지 상승시킨 후 통과되어 나온 가스를 38℃ 정도로 온도를 낮춰 활성탄과 접촉시킨다. 이렇게 온도를 저감시키는 이유는 재생공정시 활성탄이 손상되는 것을 방지하기 위해서이다.

(8) Method and apparatus for disposing of landfill produced pollutants (특허번호 4838184)

매립지에서 발생하는 가스와 침출수 중에 포함된 오염물질을 제거하는 공정으로서 1차적으로 공기와 혼합된 매립가스를 연소시키는 동시에 부산물로 나온 고온의 폐열을 이용하여 침출수를 증발시킨다. 증발공정 후 남은 침출수 농축잔류물은 2차 연소공정으로 투입되어 연소된다.

(9) Method of controlling the flow landfill gas from sanitary landfills and apparatus for performing the method (특허번호 4890672)

혐기성 분해에 의해 발생하는 매립가스량 보다 더 많은 양의 가스를 추출하므로써 외부로부터 공기가 침투되도록 하여 매립지를 호기성 상태로 전환시키는 공정이다. 매립지는 호기성 상태로 전환되면서 온도가 올라가는 한편 가스 중 이산화탄소와 질소의 양이 증가한다. 각 추출정의 온도는 측정되어 호기성 전환상태를 파악하는 자료로 쓰이며 가스이송관의 온도계는 control chamber내의 추출량 조절밸브와 연결된 microprocessor로 온도 정보를 전달한다.

(10) Device for extracting and burning methane (특허번호 4907964)

본 장치는 매립가스를 추출하여 연소장치에 공급하는 시스템이다. 압축공기가 주입되는 첫 번째 venturi는 가스정에 연결되어 있으며 압축공기의 흐름에 의해 형성된 가스정의 진공에 의하여 매립가스가 추출된다. 압축공기와 매립가스의 혼합체는 두 번째 venturi를 통해 더 많은 공기와 혼합된 후 연소실로 투입된다.

(11) Process and apparatus for purification of landfill gases (특허번호 5059405)

매립가스를 탈수하고 입자상 물질과 aerosol의 제거를 위하여 여과시킨 후 zinc oxide column을 이용하여 황화합물을 제거한다. 이어 activated alumina column을 이용하여

halogens를 제거한 후 activated charcoal column을 이용하여 hydrocarbons를 제거한다. 잔류하고 있는 불순물은 activated alumina column에 충전한 potassium permanganate에 의해 산화된다. 이상의 공정을 거쳐 정제된 가스는 소각시설에서 연소되어 순수한 이산화탄소와 공기의 혼합체가 된다. 이후 가스는 일반적인 이산화탄소 처리공정을 거친다.

(12) Landfill gas production testing and extraction method (특허번호 5063519)

매립지의 여러 지점에서 가스발산시험을 한후 가스발산량, 가스조성을 파악하고 시험지점의 토양을 채취하여 점성계수, inertial resistance coefficient를 측정하여 투과특성을 파악한다. 이상의 결과를 통하여 투과 특성과 매립가스발산 간의 관계를 분석하여 가스추출시 매립지 표면의 압력이 제로가 되도록 운전하는 주요자료로 이용한다.

다. 현존기술의 문제점 및 해결방안

1) 현존기술의 취약점(문제점)

가) LFG 이용기술(발전포함) 전단계

- LFG 포집단계 : 블로와 감압에 의하여 추출 LFG 에 공기가 유입될 수 있다.
: LFG 추출 설비가 고비용이다.
- LFG 정제단계 : 매립가스에 포함되어 있는 수분 및 미량유해성분(VOC, Cl 및 S 성분류)의 효율적인 전처리 및 제거
: 유해 성분 제거용 흡착제의 재사용

나) LFG 이용 발전 설비

- 국내에는 LFG 이용 발전 설비가 전무하다.
- LFG 가스엔진 : 국내 경우가 없다.
: LFG 정제 및 불순물 제거 흡착제의 재사용이 어렵다.
: 가스엔진 적용시 LFG 낮은 발열량
- LFG 스팀터어빈 : 국내 경우가 없다

2) 기술개발과정에서의 애로사항

가) LFG 이용기술(발전포함) 전단계

- 매립지 현장 확보 문제
- LFG 효율적인 포집을 위한 추출설비 건설문제
- 포집 LFG 저장문제

나) LFG 이용 발전 설비

- LFG 용 가스엔진 개발시 고비용과 시간문제
- 다습, 다유해물질 함유 LFG 에 의한 발전설비의 부식 및 노후

3) 문제점 및 애로사항 해결방안

가) LFG 이용기술(발전포함) 전단계

- LFG 포집문제 : 매립가스의 효율적 포집은 수도권 매립지의 추출설비를 응용하여 해결 가능함
- LFG 함유 수분문제 : 매립가스에 포함되어있는 수분 제거는 추출시의 온도하강과 고압 저장조에 의한 응축 등의 물리적 방법이나 CaCl₂, silica gel, molecular sieve 등의 흡습제 사용
- LFG 함유 미량유해성분 : 활성탄이나 활성탄 섬유 등의 다성분계에 적합한 흡착제를 사용
- 유해성분 제거용 흡착제 재사용 : 흡착된 흡착제는 매립지 환경에서 적합한 TSA를 적용하여 재생

나) LFG 이용 발전 설비

- LFG 가스엔진 개발의 문제 : 국내에 가스엔진 자동차가 상용화되어 있는 바, 자동차 가스엔진을 LFG 발전설비로 직접 이용
- 발전 설비의 부식문제 : LFG 전처리에 의한 수분제거
- 발전용 LFG 의 저발열량 : 고발열량의 LPG 첨가로 적정 발열량 유지

라. 기술개발시 기대효과 및 활용방안

1) 기대 효과

- 버려지고 있는 메탄가스의 대체에너지원으로 개발
- 매립가스의 경제적인 이용 공정 개발
- 매립가스 이용 용도 확대
- 효율적인 가스 이용 방안에 대한 산업재산권 획득
- 매립지에서 발생하는 미량유해성분을 제거함으로써 악취 및 온난화 물질 저감 방안을 마련
- 악취 및 온난화 물질 저감 방안 마련

2) 활용 방안

- 개발된 가스처리 시설을 매립가스가 대량 발생되고 있는 매립지(수도권 김포매립지, 난

지도 매립지, 오폐수처리장 등)에 적용 유도

- 각 공정에 대한 조립식 연계로 인한 소규모 매립지에 적용 가능
- 천연가스의 대체에너지로서 적용
- CNG 자동차, 보일러 연료 등으로 이용 가능

마. 개발기술의 경제성

1) 개발기술의 에너지자원 효과

가) 일반적 효과

매립지로부터 발생하는 메탄가스의 회수 이용방안은 대체에너지의 개발에 긍정적인 영향을 줄 것이라 사료되며 다음과 같은 세부 효과가 기대된다.

- 매립가스의 분석기술 검증 - 매립지에서의 환경위해평가에 대한 기초자료 확보
- 매립가스의 전처리 공정의 기술 개발 - 미량유해성분 및 악취성분의 저감
- LFG 활용 발전시스템개발 - LFG의 본격적인 대체에너지로의 활용

나) 경제적 효과

국내 최대 규모의 위생 매립지로서 5개의 공구로 구분되어 있으며, 현재 소각되고 있는 매립가스의 양은 110~183m³/min으로 추후 2~3년 내에 최대 발생량을 기록할 것이다. 활용 에너지 측면에서 발열량당 비용을 고려해보면 산업용 가스화, 열병합발전, 도시 가스화순으로 저렴하게 평가되고 LFG 10,980m³/hr(김포매립지 최대소각량)을 기준으로 각 매립가스 활용에 대한 생산단가를 산출해 보면 가스엔진전력 25.74원/KW, 가스터빈전력 25.74원/KW, 스팀터빈 전력 32.65원/KW, 열병합발전 41.37원/KW, 산업용가스화 163.5원/KW, 도시 가스화 236.33원/KW이다. 또한 투자비에 대한 수익성을 분석하면 return of investment 와 payout period는 열병합발전이 우수하며 Break even point에 해당하는 시설규모는 스팀터빈 전력은 2,705m³/hr, 가스터빈은 1,657m³/hr, 가스엔진 발전은 1,085m³/hr, 열병합발전은 108m³/hr, 도시가스화는 994m³/hr, 산업용 가스화는 1,166m³/hr부터 손익분기점이 나타났다. 위와 같은 상황을 볼 때 김포매립지의 매립가스 발생량에 대한 경제적인 효과는 높다고 보이며 이용설비에 대한 전력생산이 방법이 적합하다고 사료된다.

2) 개발 기술의 보급 환경(제도적, 경제적 여건 등)

가) 제도적 여건

- 매립장 확보 및 매립가스 이용 여건

국가의 대체에너지 확보란 관점에서 모든 사람들이 LFG의 대체에너지화는 찬성한다. 하지

만 매립면적이 10 만평 이상이며 매립개시기간이 1년이상인 대형매립장의 경우 그 운영관리를 주관하는 기간에서 대기환경문제 개선, 비영리 대체에너지 확보의 관점보다는 LFG 개발이 큰 이익이 생기는 것으로 생각하며, 많은 기업이 직접 투자할 것으로 생각한다. 그러나 LFG 의 가치성으로부터 투자를 하는 기업은 극히 드물 것으로 사료된다. 바꾸어 말하면 대형매립지 관리기관은 누구나 LFG를 원하면 무상으로 제공하여야 한다. 김포 수도권매립지의 예를 들면, 90년대 후반부터 매립지 제 2공구에 각종 환경관련기관 수용을 위한 건물 공사가 있었지만 그 건물에 제공되는 에너지(전력, 냉난방)에 LFG 가 사용되지 않았다.

- LFG 의 판매

현재 대량 포집후 전량 연소되는 LFG 처리시스템으로부터 대량포집후 이용시스템으로 전환된다고 가정할 때 LFG 발전시스템 공급의 여분의 정제 LFG가 부산물로 나온다. 이 경우 LFG를 수요측에 제공하기 위한 방법에는 직접판매와 매립지 위치 지방가스주식회사의 LNG 라인을 이용한 간접방법이 있다. 두가지 모두 LNG, LPG 기준 가스의 가격 경쟁에서 자유로울 수 없으며, 특히 후자의 경우 엄격한 LFG 전처리가 필요하다. 따라서 개발된 LFG 소비시스템이 제도적으로 이루어 져야 한다.

- LFG 발전에 의해 생산된 전기 판매

국내에서 LFG 발전에 의해 전력을 생산한 경우도 없지만, 전력이 생산되고 자체사용후에도 잉여전력이 있으면 외부로 판매할 수 있어야 한다. 미국의 경우 LFG를 이용한 발전은 “공공전력 규제정책법(the Public Utilities Regulatory Policy Act)”에 따라 ”소규모 발전업자 (small power producer)”로 지정을 받아 전력회사가 생산된 전력을 구매하도록 되어 있다. 우리 나라도 매립가스의 이용을 촉진하기 위해서는 미국과 유사한 지원제도가 마련되어야 할 것이다.

- 개발된 발전시스템의 보급

LFG 발전시스템을 보급하기 위해서는 포집하지 않는 경우 또는 포집후 전량 연소하는 현재 방법을 제도적으로 막고 LFG 발생량 대비 전력화비율을 명시하여야 한다. 이렇게 제안할 수 있는 명분은 첫째, 국내 대체에너지 기술력을 높이며 둘째, LFG 이용량에 따라 매립가스 지면 발산, 주변대기환경오염 등의 환경오염원을 크게 줄일 수 있기 때문이다.

나) 경제적 여건

- 관련기업

LFG 이용 전력시스템을 매립지에 설치 적용할 경우 현 기술, 제도하에서는 매립지 관련기업의 경제적인 이윤을 기대하기 어렵다고 사료된다. 그 이유는 기존의 전기가격, 가스가격보다 LFG 유래 전기, 가스가격이 싸지 않기 때문이다. 따라서 LFG 발전시스템을 만들어 제공하는 측과 LFG 발전시스템을 설치하는 측(매립지 운영측)이 같다면 대단한 상승효과를

기대할 수 있다.

3) 시장 현황

가) 국내시장

- 전국 중,대형 매립지 현황

전국에 현재 매립중이거나 매립완료시기가 최근인 중,대형 매립지는 모두 13개소로 매립면적은 최소 163,000 m² 에서 최대 20,799,000 m² 이며 추정 LFG 발생량은 최소 11,000 m³/일, 최대 460,000 m³/일로 추정되고 있다. LFG 발생량이 전량 포집되지는 않지만 포집기술에 따라 20-50% 까지 회수할 수가 있다. 이상의 풍부한 LFG를 배출하는 중,대형 매립지는 기술 이전 시장이라고 할 수 있으며, 그 외의 다수 소형매립지도 매립지 조기 안정화, 주변 대기환경 개선 차원에서 LFG 이용 시스템을 적용할 수 있다.

나) 국외시장

국외에 향한 다른 기술이전 문제와 마찬가지로 본 LFG 발전시스템은 현재 환경오염이 등한시되고 있는 개발도상국이 외국 시장이 될 수 있겠다. 한편 본 연구팀이 추구하는 기존 자동차 가스엔진 응용 발전 시스템은 적용이 광범위 할 수 있으므로 선진국 시장에도 접근할 수 있다고 사료된다.

4) 개발 기술의 투자 경제성 검토

가) 일반적 평가(무형의 효과)

- LFG 의 가스 직접이용 측면

LFG는 매립지종류에 따라 차이는 있지만 40-60 %vol 의 CH₄를 함유하고 있는 바, 약 4500 Kcal/m³ 의 발열량을 가진다. 폭발 가능성이 매우 높은 정도로 고급에너지원이다. 본 기술개발은 LFG 정제기술 개발을 동반하는 바, 무해 LFG를 LNG 또는 LPG와 같이 주변 주택, 중소형 사업장 등의 가스 수요처에 손쉽게 제공될 수 있다. 이러한 효과는 매립장 주변 주민들에게 가스 공급의 혜택을 줌으로서 매립지에 의한 피해의식 및 불만을 상당 부분 해소할 수 있을 것이다.

- LFG 의 발전이용 측면

국내에는 LFG 발전이용 경우가 아직까지 없다. 도시폐기물 50% 이상의 매립으로 풍부한 LFG를 보유하면서도, 자동차 가스엔진을 국내 제작하면서도, LNG가스발전 설비를 국내에 보유하면서도 LFG 이용 발전시스템이 전무한 점은 이 분야의 무관심으로 밖에 설명할 수 없다. 따라서 본 연구는 빠른 시간내에 LFG 발전시스템의 실용화를 추구하고, 매립지의 인식과 LFG의 인식을 바꾸어 놓을 것이다.

- LFG 의 유해성 측면

LFG 는 CO₂, CH₄ 의 주유가스 구성비가 90 %vol 이상이지만 황화합물, 염소화합물, VOC 등 유해성분이 수십종 함유되어 있어 매립지주변 대기환경을 오염시킨다. 본 기술이 개발되면 LFG 포집이 효율적으로 이루어짐과 동시에 유해성분의 문제점이 상당히 개선될 것이다.

나) 투자 경제적 평가(금전적 효과)

(1) 외국의 매립가스 이용 현황

외국의 사례를 조사한 이용현황은 다음과 같다.

- 중질가스 생산에 의한 판매
- 가스터빈에 의한 전력 생산
- 가스엔진에 의한 전력 생산
- 스팀터빈에 의한 전력 생산
- 고질가스 생산에 의한 판매 등이 있다.

(2) 매립가스 이용 대안별 경제성 검토

앞의 가스 재이용 방법별 대안비교를 통해 검토된 적용가능한 대안으로선 첫째 중질가스 생산판매, 둘째 전력생산이용 및 판매로 귀착될 수 있겠으며 두 번째 전력생산방법은 다시 가스엔진 발전, 가스터빈 발전 그리고 스팀터빈 발전방식으로 구분할 수 있겠다.

이와 같이 총 4가지 대안을 대상으로 경제성 평가를 하였다.

(가) 경제성 평가 및 분석방법

경제성 평가 즉 수익성을 분석하는 방법에는 각 대안별 투자비 및 운영비를 기준으로 수익성을 평가할 수 있는 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 대표적인 방법으로는

- Return on Investment(ROI) 분석법
- Payback Period(PP) 분석법
- Turnover Ratio(TOR) 분석법

등이 있는바 상기 방식들에 대한 계산식은 다음과 같다.

- Return on Investment(ROI) 분석법

$$ROI = P \times I = \frac{\text{연간이익}}{\text{총투자비}} \times 100$$

여기서 P: 연간 회수되는 투자비, I: 총 투자비

- Payback Period(PP) 분석법

투자비 회수기간을 나타내는 방법으로 수익성 산출에 종종 사용되는 방법이다. 이때 투자비에는 시운전비가 포함되어야 하고 유지관리비 및 총투자비 이율을 제외한 것이 이익이 된다.

$$PP = \frac{I}{(R - OC + DI - AI)}$$

여기서 I: 투자비

R: 연간수입

OC: 연간유지관리비

DI: 연간감가상각비 및 이율

AI: 연간투자비이율

- Turnover Ratio(TOR) 분석법

간편한 경제성 평가방법으로 이 값이 1보다 큰 경우는 경제성이 있는 것으로 추정할 수 있다.

$$TOR = \frac{\text{총년간수입}}{\text{고정투자비}} > 1$$

이상의 수익성 평가방법을 이용하여 난지도 매립가스 재이용의 경제성을 검토해 보면 다음과 같다.

(나) 대안별 경제성 분석

4가지 대안들에 대한 경제성 분석을 위해 각 대안별 전제조건이 설정되어야 하며 타당성있는 투자비와 운영비의 가정이 필요하게 된다. 본 경제성 검토에서는 각 대안별 조건은 난지도 매립지 현장조건을 따르도록 하되 투자비 및 운영비는 국내 실증 예가 전혀 없음으로 인해 미국 매립가스 처리 전문 설계사의 자료를 이용하여 상대평가되었다.

① 대안별 전제조건

㉠ 중질가스생산에 의한 판매

정제된 매립가스를 난지도에서 약 4.5km 떨어진 서울화력에 판매하여 유틸리티 보일러에 보조연료로 사용하는 것으로 가정하였다.

정제시설의 구성은 수분(free liquid) 및 분진 그리고 부분적으로 탈수장치를 포함하는 것으로 가정했고 가스이송을 위한 가압용 압축기도 포함하는 것으로 했다. 또한 서울화력의 매립정제가스 사용을 위한 보일러 개조도 고려하였다.

이들 시설에 대한 초기투자비 및 운영 유지관리비 등은 미국내에 있는 유사 project의 비용을 기초로 하여 산정하였다. 따라서 본 절에서 언급될 모든 화폐단위는 US dollar이다. 서울화력까지의 배관비는 \$230/m로 가정하였으며 다음은 중질 가스 정제 판매의 경제성 평가에 반영된 비용항목들이다.

- Electric Driven Compressors and Coolers
- Dehydration Unit
- Electric Connection
- Pipeline
- Steam Plant Modification

㉔ 가스터빈에 의한 전력생산

장비가격은 흔히 사용되는 Solar turbine을 기초로 하였고 가스터빈 전력생산의 경제성 평가를 위해 포함된 시설은 가스압축시설, Turbine/Generator, 배기연돌, Related Switchgear 그리고 MCC 등이다.

대표적인 가스터빈의 가스 전압장치는 $28\text{kg}/\text{cm}^2(400\text{PSIG})$ 의 고압장치이며 그 밖의 시설로서 분진 및 수분(free liquid) 제거설비가 터빈의 수명 연장을 위해 설치되는 것으로 하였다.

이들 시설에 대한 초기투자비 등은 장비제작자의 가격 및 미국내 유사 project의 비용을 기초로 하여 산정하였으며 다음은 각 평가에 반영된 비용 항목들이다.

- Compressor
- Dehydration/Liquid Removal Unit
- Gas Turbine/Generator Assembly
- Switchgear
- Electrical Connection

㉕ 가스엔진에 의한 전력생산

장비가격 및 운전, 유지관리비는 제작사의 자료를 이용하였고 가스엔진 전력생산의 경제성 평가를 위해 포함된 시설로서는 수분(free liquid) 및 분진제거 그리고 압축시설이다.

일반적으로 가스터빈에 비해 작은 가압장치가 필요하게 되는데 약 $628\text{kg}/\text{cm}^2(80\sim90\text{PSIG})$ 정도 압축시설이 필요한 것으로 산정하였다.

본 평가에 반영한 가스엔진 발전설비 비용항목은 다음과 같다.

- Electric Driven Compressors and Coolers
- Dehydration Unit/Liquid Removal Unit
- Switchgear
- Electrical Connection

㉖ 스팀터빈에 의한 전력생산

대부분의 장비가격은 제작사의 자료에 기초를 두었고 매립가스처리에 필요한 장치는 타방식에 비해 가장 적게 소용되는 바 단지 수분(free liquid)만을 제거하는 것으로 고려하였다. 가스터빈 plant에 대한 초기투자비는 미국내 유사 project의 비용을 기초로하여 반영하였으며

본 평가를 위해 감안된 스팀터빈 plant의 비용항목은 다음과 같다.

- Boiler
- Steam Turbine
- Generator
- Air Cooled Condenser
- Water treatment plant
- Controls
- Switchgear

경제성 분석의 전제조건을 정리하면 아래와 같다.

Table 1-9. 경제성평가 전제조건

항목	조건	항목	조건
· LFG 재이용량	50Nm ³ /min, CH ₄	· 판매가(전력)	40원/KWh
· Plant 수명	20년	(가스)	80원/Nm ³ , LFG
· 감가상각비	5년, 정액법	· 가스수요처 거리 (서울화력)	4.5km
· 초기투자비율	10%	· 자본투자비율	25%
· Escalation	5%	· 용자비율	75%
· Royalty	5%	· 용자상환기간	10년
· 잔존가	10%		
· 소득세	35%		

② 대안별 경제성 분석결과

본 경제성 분석은 ROI(Return On Investment), 즉 투자비 회수율과 PP(Payback Period), 즉 자본 회수년도의 정산수치를 이용하여 평가하였다. 평가결과는 다음과 같다.

Table 1-10. 경제성 분석결과

항목 \ 대안별	중질가스생산	전력생산		
		가스엔진	가스터빈	스팀터빈
ROI(%)	150.04	48.60	12.24	23.37
PP(년)	1.3	2.1	12.0	6.7

상기 경제성 분석결과는 Table 1-9에 정리된 전제조건을 기준으로 평가된 항목으로 초기투자비 및 운영, 유지관리비는 미국자료를 이용하여 산정된 것이다. 따라서 상기 Table 1-10의 결과치를 절대적인 가치로 판단하면 곤란하며 대안별 상대평가치로만 이용함이 바람직하겠다.

결과를 분석해보면 중질가스를 생산한 후 4.5km 떨어져 위치하고 있는 서울화력에 판매하는 것이 가장 경제적인 것으로 평가되었으며 이때 자본회수기간은 1.3년이다. 나머지 전력생산 방식은 상대적으로 큰 차이를 보인다고 볼 수는 없으나 가스엔진 방식이 ROI가 48.6%, PP가 2.1년으로 다소 우수한 것으로 평가되었으며, 그 다음으로는 스팀터빈방식이 ROI가 23.37%, PP가 6.7년으로 평가되었다. 가스터빈은 ROI가 12.24%, PP가 12년으로 가장 경제성이 낮은 것으로 평가되었다.

대안별 초기투자비(Capital Cost)와 운영 유지관리비(O&M Cost)를 비교해보면 초기투자비는 중질가스<가스엔진<스팀터빈<가스터빈 순으로서 전력생산 방식중에는 스팀터빈 높은 것은 중질가스생산 판매 방식이었다.

난지도는 CH₄ 발생 모델링을 통하여 본 발생량에 대한 추이를 보면 매립완료된지 상당 기간이 경과 되었으며 1992년에 매립가스 최대발생량을 나타내었고 현재 발생하는 메탄 발생량은 상당히 감소하고 있는 실정이다. 매립된 폐기물의 성상은 미생물에 의해 분해되기 어려운 무기불질이 다량 포함되어 있는 상황이나 신규 매립장 또는 매립진행 중인 매립장의 경우는 상대적으로 무기물질이 매우 적으므로 LFG 발생량이 보다 많을 것으로 생각된다. 따라서, 매립지에서 발생하는 가스의 발열량을 높이기 위해 다른 고발열량의 가스를 혼합한다고 하더라도 상당한 경제성이 있을 것으로 사료된다.

● 수도권 매립지 매립가스의 경우

매립지 인근 주민이 가장 큰 피해를 느끼는 부분이 악취이며, 그 원인 중의 하나가 매립가스(LFG)이다. 국가적으로 가장 관심이 많은 위생매립지라고는 하나 완전한 포집은 되고 있지 않고 일부 포집된 것을 소각처리하고 있으나 불완전연소로 인한 문제점이 거론되고 있기도 하다. 매립가스 포집 처리시설은 주변 환경오염 방지와 매립장 조기 안정화의 수단으로서 위생매립지라면 필수적인 시설인 것이다.

매립가스 포집시설은 난지도 매립지 등 여타의 매립지와 달리 설계에 반영되어 매립 매 2단 제방 주위에는 가스이송관이 있고 매립 매 2단에 수평포집관이 설치된 것이 현재 제 1공구는 2단 제방이 설치된 것이 현재 제 1공구는 117개의 대부분의 응축수 배제정이 폐쇄되어 있고, 현재에도 300~350m³/min 정도의 매립가스가 포집되고 있다.