

# 매립가스 활용대안 선정을 위한 경제성 분석

## - Economic Analysis for comparing LFG Utilization Alternatives -

김동희

Kim Dong-Hee

김은주

Kim Eun-Joo

김봉선

Kim Bong-Sun

### Abstract

The most general treatment method of municipal solid waste is a landfill. The LFG (landfill gas) migration is a serious problem in environmental aspect. The object of this study is to present the possibility of LFG utilization as a replacement or supplementary fuel for local energy-demand. We have developed the EXCEL program for the economic analysis.

### 1. 서론

도시고형폐기물의 가장 일반적인 처리 방법은 매립으로 이런 쓰레기 매립지에서는 적절한 토양복토에 의하여 대규모의 혐기성 소화상태가 유지된다. 이러한 혐기성 환경에서 매립쓰레기중의 유기물질이 분해되어 다량의 매립가스(landfill gas ; LFG)를 발생시킨다. 매립가스의 주요성분은 메탄과 이산화탄소가 각각 50%와 30% 정도이며, 질소, 산소, 수분, 황화수소 및 미량유해물질이 포함되어 있다. 미국, 독일, 영국등 선진국의 LFG 활용기술은 지난 수십 년의 연구개발결과로서 적절한 LFG 정제 및 증열을 통하여 직접연소에 의한 에너지회수와 전력생산 등 대체에너지로서 적극적인 이용을 하고 있으나, 국내는 아직 매립가스를 활용하기 위한 시설은 극히 미비하며 발생되고 있는 매립가스의 대부분을 자연상태로 대기방출 및 소각시키고 있어 이를 대체 에너지원으로 활용할 경우 환경문제뿐만이 아니라 에너지의 효율적 이용을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 화공 플랜트 건설분야에서 사용되고 있는 투자비 및 수익성 분석 방법을 소개하고 이를 적용하여 I시에 소재하는 매립지를 대상으로 우리나라 특성에 적합한 LFG를 이용한 혼합가스 연료로의 활용기술 가능성에 관한 경제성 분석을 목표로 하고 있다.

\*인하대학교 산업공학과

## 2. 경제성 분석방법

경제성 분석에 있어서 실제 비용과 수익의 산출은 복잡할 뿐만 아니라 요인변동이 예상되는 장래를 대상으로 평가하는 것이기 때문에 정확한 평가가 불가능하다. 특히, 매립가스를 이용한 설비에 대해서는 국내의 건설실적 및 유지관리실적이 없어 정확한 산출을 위한 자료도 부족한 실정이다. 따라서 수도권 매립지에서 자체공급용 발전시설 또는 가스활용을 위한 증열 시설을 건설하는데 있어서는 투자비와 수익성을 중심으로 일반적 화공플랜트를 대상으로 한 경제성 분석을 실시하고자 한다. 경제성분석에서의 투자비산출방법 및 수익성·손익분기점 분석방법은 다음과 같다[1,4].

### 2. 1 투자비 산출방법

#### ① 공급 장치비의 비율에 의한 방법(Percent of Delivered-equipment Cost)

공급 장치비를 결정하여 고정 또는 전체 자본투자비를 산출하는 방법으로 대략 20~30%의 정확도를 가진다. 산출공식은 다음과 같다.

$$C_n = [\sum E + \sum (f_1 E + f_2 E + f_3 E + \dots)] (f_i) \quad \wedge \wedge \wedge \wedge \quad (1)$$

$f_1, f_2, f_3, \dots =$  multiplying factor for piping,  
electrical instrument, etc

$f_1 =$  industrial cost factor always greater than 1

#### ② 설비능력에 의한 방법(Power Factor Applied to Plant-capacity Ratio)

새로운 공정 공장의 고정자본투자를 이에 유사한 기존 공장의 투자비에 의해 추산하는 방법으로 통상 사용되는 지수율(exponential power ratio)의 값은 0.5에서 0.7을 사용한다. 사용되는 공식은 다음과 같다.

$$C_n = C (R)^x \quad \wedge \wedge \wedge \wedge \quad (2)$$

$C_n =$  New capital investment

$C =$  Fixed - capital investment of  
the constructed facility

$R =$  Capacity of the new facility divided  
by the old facility

$x =$  Power factor for plant - capacity ratio

### 2. 2 수익성 분석방법

#### ① 투자회수율 (return on investment; ROI)

투자가치의 유무를 결정하기 위해, 총자본 중 투자자본의 수익력을 평가하는 지표로서 투자자에 대한 이익분배분과 세금을 제외한 표준화된 수익성을 추산한다. 공식은 다음과 같다

$$ROI = \frac{\text{Annual Profit}}{\text{Total Investment}} \times 100 \quad \wedge \wedge \wedge \wedge \quad (3)$$

② 투자회수기간(payout period; PP)

감가상각비를 제외한 모든 비용을 총수입에서 뺀 것에 근거한 투자비용을 회수하기 위해 필요한 최소한의 시간길이이다. 비교적 간단한 방법으로 유동성을 간접적으로 파악할 수 있고 경영자에게 투자위험에 대한 정보를 제공할 수 있다.

$$PP = \frac{I}{R - OC + D\&I - AI} \quad \Lambda \Lambda \Lambda \Lambda \quad (4)$$

*I*: 초기투자액    *OC*: 연간 조작 비용  
*R*: 연간매출액    *D&I*: 연간 감가 상각 및 *OC*에 포함된 이자  
*A*: 총투자액에 대한 연간 이자

③ 고정자산 회전율(turnover ratio)

비교적 간단한 경제성 평가지수로 일반적인 화학공장의 경우 값이 1보다 클 경우 경제성이 있는 것으로 추정한다. 공식은 다음과 같다.

$$\text{Turnover ratio} = \frac{\text{gross annual revenue}}{\text{fixed-capital investment}} \quad \Lambda \Lambda \quad (5)$$

④ 손익분기점(break even point; BEP)

매립지가스 생산속도에 따른 비용 및 수익을 비교하는 것으로 총생산비용과 총수입이 같아지는 점, 즉 BEP로부터 특정 LFG 활용 공정을 이용할 경우 경제적으로 타당성이 있는 매립지 용량을 판단하게 된다. 공식은 다음과 같다.

$$S = \frac{f}{1 - \frac{v}{s}} \dots \dots \dots (6)$$

$$Q = \frac{f}{p - \frac{v}{m}} \dots \dots \dots (7)$$

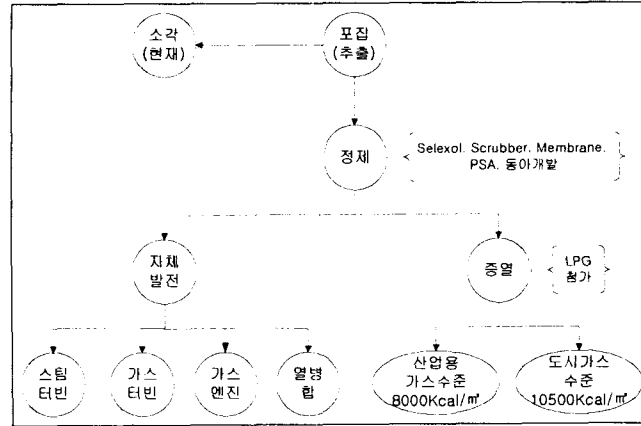
*S*: BEP 상의 매출액    *f*: 고정비    *v*: 변동비  
*Q*: BEP 상의 판매량    *p*: 판매가격    *m*: 판매량

### 3. 매립가스 활용방안 분석

#### 3. 1 대안선정 및 기초자료

대상 매립지는 총면적 630만평의 국내 최대 규모의 위생 매립지로, 매립된 폐기물은 20~25년 동안 다량의 유기물질, 메탄가스, 이산화탄소, 기타 휘발성 유기화합물로 구성된 매립가스를 폐기물 톤당 112~230 m<sup>3</sup>/min을 발생시킨다[2].

매립지 가스의 이용방안과 관련하여 일반적 타당성 및 전문가의 의견을 검토하여 [그림 1]과 같이 스팀터빈, 가스터빈, 가스엔진, 열병합을 통한 전력발전과 직접연료로 도시가스, 산업용가스로 활용하는 대안을 선정하였다. 매립지 주변의 복합화력발전소(원료로 LNG 사용), 종합환경연구단지(LNG로 냉난방), 지역난방공사(지역난방활용, 열병합 발전 이용) 등을 주요 수요환경으로 연구를 수행하였다.



[그림 1] 매립가스 활용을 위한 대안

각 활용 대안들의 경제성 평가를 위하여 본 연구에서의 투자비 산정은 각각의 공정에 대해 필요 기기의 공급 장치비를 결정하고, 그 외 배관, 전기 및 계장공사 등과 같은 직접비와 설계비 및 예비비와 같은 간접비 경우에는 위 비용에 식 (1)을 적용(평가 대상의 공정들은 분체 가공 설비(solid processing plant)는 아니지만 비교적 간단한 공정으로 이루어져 있으므로 분체 가공 설비를 참고)하여 각 공정의 특성에 따라 투자비를 합해 전체 자본투자비를 산출한다. 한 공정에서 용량이 변하는 경우 식(2)를 이용하여 그 용량에 대한 투자비를 산정한다.[3,4]

현재 소각량인 110~183 m<sup>3</sup>/min를 분석 대상으로 하여, 우선 대안선정 및 기초자료를 수집하고 기초자료를 바탕으로 추출 및 배송시스템의 투자비를 산출한다. 다음으로 기존 연구 자료들을 바탕으로 기준 능력에 있어서 여러 가지 정제방법 중 대상 매립지의 환경을 고려할 때 가장 적합한 신개발에 의한 정제 과정을 거친 각 활용대안에 대한 시스템 투자비용을 추정한다. 그 후 분석대상 능력에 대한 각 활용대안 투자비 및 수익성을 분석하는 과정을 통하여 추출/정제/활용 전과정 시스템의 투자비 및 수익성 분석을 종합함으로써 LFG 활용 최적공정 설계안을 도출한다. 또한 혼합 가스 활용 대안들의 경우 발열량과 LPG 가격을 기준으로 민감도 분석을 실시한다.

경제성 평가 과정 중 사용된 기초자료와 투자비 산정에 쓰인 비율은 [표 1]로 나타낼 수 있고 적용변수는 다음과 같으며, 그 외 각종 적용변수들인 utility 비용, product 단가, 인건비, 이율 등은 실제 용역 업체에 문의한 자료이거나, 얻기가 불가능한 데이터는 기존의 보고서에서 참고하였다.

[표 1] 경제성평가 기초자료

항목			가정
내구연한	추출 및 배송시스템		10년
	공정시스템		15년
	membrane		5년
감가상각비			정액법
투자비 이자			10%년
power factor			0.74
운전기간			330 일/년
수요처 거리	증기(스팀)		2 km
	가스 및 전기		10 km
가스발생속도(기준)			563 std m <sup>3</sup> /hr
장치비용	포집(기준)	₩	55,000 천원
	고압탱크	₩	1,500,000 천원/1기
	고압탱크사용기수		1기
유틸리티	LPG	₩	618 원/m <sup>3</sup>
제품단가	증기(30kg/or)	₩	6,000 원/ton
	전기	₩	46 원/kWH
	도시가스(LNG)	₩	287 원/m <sup>3</sup>
	산업가스(열량기준)	₩	219 원/m <sup>3</sup>
도시가스인건비		₩	12,000 천원/man,year
도시가스시설소요인원			30 명
도시가스혼합비(LFG:LPG)			71.239 28.8
산업가스혼합비(LFG:LPG)			84.8 15.2
도시가스열량기준			10,500 kcal/m <sup>3</sup>
산업가스열량기준			8,000 kcal/m <sup>3</sup>
수배송배관비(가스용)	₩		150,000 원/m

정제 산출열량

selexol	8460 kcal/m <sup>3</sup>
scrubber	5070 kcal/m <sup>3</sup>
membrane	8460 kcal/m <sup>3</sup>
PSA	8460 kcal/m <sup>3</sup>
연대개발	5070 kcal/m <sup>3</sup>

활용 산출열량

스팀	574 kcal/kg
전력	859.2 kcal/kw
도시가스	10500 kcal/m <sup>3</sup>
산업가스	8000 kcal/m <sup>3</sup>

신개발정제산출%	93%
----------	-----

- LFG 발생속도(투입량) : 많은 보고서에서 이론적인 LFG 발생속도를 제시하였으나 이론적 LFG 발생량은 실제 발생량에 비해 현격히 많은 것으로 평가하는 위험성이 있으므로 본 연구에서는 미국내 매립지에서 실제 LFG를 생산하는 속도들의 평균값을 이용하여 LFG 발생속도를 계산하였다.
- power factor : 기존 보고서들의 자료에 의한 power factor의 평균값으로 0.74를 적용하였다.
- 비교기준 LFG 투입량 : 기존시설 운전자료로부터 현재 중앙소각장치에서 매립가스 포집 및 소각량을 기준으로 최대인 10,980m<sup>3</sup>/hr을 비교한다.
- 내구연한 : 투자 대안 평가에 사용되는 내구연한은 공정이 노후화 되어 기능을 상실할 때까지의 기간으로 실제 관련업체에서 적용하는 기간으로 추출, 배송 10년, 활용 15년으로 산정한다.
- 배송거리 : 현재 매립지에서 가스회사까지의 거리 10 km을 배송거리 기준으로 한다.

- LPG 및 LNG 가스 가격 : 가스 대안들의 분석에 사용되는 LPG 및 LNG의 가격은 1997년 국내 판매가격으로 각각 309원/kg과 287.29원/m<sup>3</sup>을 적용하였다.
- LFG 혼합가스의 판매가격 : 수익성 분석시 사용되는 LFG 혼합가스의 판매가격은 10,500 Kcal 도시가스의 판매가격인 287.29원/m<sup>3</sup>를 기준하여 열량별 비례로 산정하여 적용하였다.

### 3. 2 활용 대안별 투자비 및 수익성 분석 종합

#### ① 스팀터빈 발전

정제공정을 거쳐 추출된 LFG를 보일러에서 연소하여 스팀을 생성한 후 스팀터빈과 발전기에 의해 전력을 생산한다. 증기 터빈에서 배기된 저압의 증기는 공기 냉각용 응축기에서 응축한 후 탈기기(deaeration)로 이송되어 재사용 된다.

#### ② 가스터빈 발전

스팀터빈에 의한 전력 생성 공정과 유사하나 증기 발생을 위한 보일러가 필요하지 않으며 저압의 압축기와 가스터빈 및 발전기만 필요함으로 다른 공정에 비해 간단하다. 그러나 가스터빈의 시동을 위해서는 액화석유가스나 천연가스과 같이 높은 발열량의 보조연료투입설비가 필요하다[2].

#### ③ 열병합 발전

보일러에서 생산된 고온, 고압의 증기를 이용하여 터빈/발전기에서 전력을 생산하고 증기터빈에서 배출된 증기의 열에너지를 공장의 공정용이나 난방용으로 사용하도록 하는 발전 시스템으로 재래식 상용발전시스템의 효율을 높일 수 있어 경제적 효과를 가져온다.

#### ④ 도시가스화

매립가스중의 CO<sub>2</sub>를 정제하여 메탄의 함량을 높일 경우 고비용이 소요됨으로 매립가스의 수분과 부유물질의 제거를 통하여 부분적으로 정화 후 5,000 Kcal/m<sup>3</sup>인 정제 LFG의 발열량을 높이기 위해 증열 과정에서 별도의 액화천연가스(LPG)를 첨가하여 도시가스관망이나 인근 수요시설에 공급하는 방안으로 이때 LPG의 첨가율은 현재 우리나라 도시가스의 발열량 10,500 Kcal/m<sup>3</sup> 기준으로 LFG 대 LPG 투입비율을 7 대 3으로 한다.

#### ⑤ 산업용가스화

도시가스화와 유사한 공정으로 국내의 산업용가스 8,000 Kcal/m<sup>3</sup> 기준으로 LFG 대 LPG 투입비율을 7 대 1.5로 한다. 전처리가 단순하고 소요비용이 적어 가장 경제적인 방법이다.

[표 2] 매립지 가스 활용대안 투자비 비교

		스팀터빈발전	가스터빈발전	가스연진발전	열병합발전	도시가스	산업용가스	
추출산출(정제 투입)	m <sup>3</sup> /hr	10,980	10,980	10,980	10,980	10,980	10,980	
정제산출(활용 투입)	직용시스템 Output m <sup>3</sup> /	신개발	신개발	신개발	신개발	신개발	신개발	
활용산출	MM kcal/hr	10,211.40	10,211.40	10,211.40	10,211.40	10,211.40	10,211.40	
	ton, m <sup>3</sup> /hr	19.79	20.98	26.52	43.63	150.57	96.33	
	MWh	22.49	23.84	30.14	44.98	14,339.59	12,041.75	
고장 투자비 MM Won	추출시스템	1,119.64	1,119.64	1,119.64	1,119.64	1,099.98	1,099.98	
	정제시스템	6,928.87	6,928.87	6,928.87	6,928.87	6,928.87	6,928.87	
	활용시스템	14,808.18	14,369.42	18,393.40	15,905.08	12,050.81	12,050.81	
	배출시스템	702.28	702.28	702.28	1,137.03	2,071.82	2,071.82	
Total		23,558.98	23,120.22	27,144.20	25,090.63	22,151.48	22,151.48	
연가총비 MM Won	depreciation & interest	추출시스템	223.93	223.93	223.93	223.93	220.00	220.00
		정제시스템	1,199.69	1,199.69	1,199.69	1,199.69	1,199.69	1,199.69
		활용시스템	2,468.03	2,394.90	3,065.57	2,650.85	2,008.47	2,008.47
	Total	배출시스템	140.46	140.46	140.46	227.41	414.36	414.36
		Total	4,032.11	3,958.98	4,629.64	4,301.87	3,842.52	3,842.52
	salaries & wages	정제시스템	220.91	220.91	220.91	220.91	220.91	220.91
		활용시스템	384.58	384.58	384.58	384.58	1,180.94	1,180.94
	Total	배출시스템	605.50	605.50	605.50	605.50	1,401.85	1,401.85
		Total	1,385.88	1,385.88	1,385.88	1,385.88	3,043.03	3,043.03
	consumable & parts	정제시스템	138.58	138.58	138.58	138.58	138.58	138.58
		활용시스템	332.60	161.91	202.15	363.24	304.45	304.45
	Total	배출시스템	471.18	300.49	340.73	501.83	443.03	443.03
		Total	65.71	65.71	65.71	65.71	65.71	65.71
	utility	정제시스템	83.61	83.61	83.61	83.61	20,205.69	8,958.73
		활용시스템	149.32	149.32	149.32	149.32	20,271.40	9,024.44
Total	배출시스템	279.12	279.12	279.12	279.12	279.12	279.12	
	활용시스템	279.71	139.86	139.88	795.25	602.54	602.54	
Total	배출시스템	558.83	418.98	418.98	1,074.38	881.66	881.66	
	Total	5,816.93	5,433.26	6,144.17	6,632.88	26,840.46	15,593.51	
daily energy output	MM kcal	474.94	503.43	636.41	1,047.14	3,613.58	2,312.02	
annual energy output	MM kcal	156,728.81	166,132.34	210,016.61	345,557.43	1,192,480.53	762,964.96	
annual cost	Won/MM kcal	37,114.64	32,704.39	29,255.63	19,194.72	22,508.09	20,438.04	
annual energy output	1000 ton, m <sup>3</sup>				356.27	113,569.57	95,370.62	
annual cost	1000 MW	178.14	168.83	238.70	160.32			
	won/ton, m <sup>3</sup>	32,654.23	28,774.00	25,739.71	18,617.33	236.33	163.50	

[표 3] 매립지 가스 활용대안 수익성 비교

		스팀터빈발전	가스터빈발전	가스연진발전	열병합발전	도시가스	산업용가스
추출산출(정제 투입)		10,980	10,980	10,980	10,980	10,980	10,980
정제산출(활용 투입)	직용시스템 Output	신개발	신개발	신개발	신개발	신개발	신개발
활용산출	MM kcal/hr	10,211.40	10,211.40	10,211.40	10,211.40	10,211.40	10,211.40
	ton, m <sup>3</sup> /hr	19.79	20.98	26.52	43.63	150.57	96.33
	MWh	22.49	23.84	30.14	44.98	14,339.59	12,041.75
Daily Energy	전기	MWh	539.81	572.20	723.34	485.83	
	중기/가스	ton, m <sup>3</sup>				1,079.62	344,150.22
열량	MM kcal	474.94	503.43	636.41	1,047.14	3,613.58	2,312.02
	No. Annual Days Operati	330.00	330.00	330.00	330.00	330.00	330.00
Annual Energ	전기	MWh	178,137.20	188,825.43	238,703.85	160,323.48	
	중기/가스	ton, m <sup>3</sup>				356,274.40	113,569,574.21
열량	10 <sup>6</sup> kcal	156.73	166.13	210.02	345.56	1,192.48	762.96
	Annual Operating Cost	MM Won/ye	5,816.93	5,433.26	6,144.17	6,632.88	26,840.46
Cost per ener	전기	원 / M Wh	32,654.23	28,774.00	25,739.71	41,371.84	
	중기/가스	원 / ton, m <sup>3</sup>				18,617.33	236.33
열량	Won/MM kcal	37,114.64	32,704.39	29,255.63	19,194.72	22,508.09	20,438.04
Revenue rate	열량	Won/MM kcal	63,421.79	63,421.79	63,421.79	63,874.75	27,333.33
Annual Revenues	MM Won	8,372.73	8,875.10	11,219.46	22,072.39	32,594.47	20,854.38
Gross Surplus(deficit) <sup>(1)</sup>	MM Won	2,555.80	3,441.83	5,075.30	15,439.52	5,754.01	5,260.87
Capital Investment	MM Won	23,558.98	23,120.22	27,144.20	25,090.63	22,151.48	22,151.48
Total D & I	MM Won	4,032.11	3,958.98	4,629.64	4,301.87	3,842.52	3,842.52
Gross Return On Investm	%	10.85	14.89	18.70	61.53	25.98	23.75
Payout Period <sup>(3)</sup>	year	5.57	4.54	3.88	1.46	3.00	3.22
Turnover Ratio <sup>(4)</sup>		0.36	0.38	0.41	0.88	1.47	0.94

\* gross surplus=annual revenue-annual operating cost  
 \* gross return on investment=gross surplus/capital investment×100  
 \* revenue rate (Won/MM kcal)=제품단가(Won/m3)/(활용산출열량(kcal/m3)\*1,000,000)  
 \* total D&I(MM Won)=capital investment(MM Won)/내구연한+capital investment\*연간투자이자(%/년)  
 \* PP=capital investment(MM Won)/(gross surplus+total D&I-capital investment\*연간투자이자(%/년))  
 \* turnover ratio=annual revenues/capital investment

정제 대안별만의 투자비 및 수익성 분석과정에서는 현재 추출용량에서 볼 때 scrubber 정제방법이 제일 우월한 것으로 나타났다. 그러나 활용대안별로 각 정제대안을 적용하여 투자·수익을 분석해 본 결과 전반적으로 모든 활용대안에 대하여 신개발정제방법이 비슷하거나 약간 우월한 것으로 보인다. 따라서 신개발정제방법을 거친 매립가스 활용대안들의 투자비 및 수익성을 비교해 보면 [표 2], [표 3]과 같다. 또한 LFG 혼합가스들간의 비교기준이 될 수 있는 발열량은 LPG 첨가 비율에 의해 결정되므로 혼합가스 대안들의 경제성은 LPG가격에 민감하게 반응한다. 분석에 사용한 97년 LPG 가격에서 나타난 대안들간의 순위는 LPG 가격이 상승, 또는 하락함에 따라 달라지는데 이는 가스화 대안들의 수익성이 LPG 가격에 민감하게 변화하는데 따른 것이다. [표 4]는 LPG 가격에 따른 대안간 순위의 변화를 나타낸 것이다.

[표 4] LPG 가격 변동에 따른 수익분석(투입량 10,980 m<sup>3</sup>/hr)

LPG 가격 변동	대안	ROI	생산단가 (원/m <sup>3</sup> )	대안간 순위 비교
20%감소	도시가스	44.22	200.75	열병합 > 도시가스 > 산업가스 > 가스엔진 > 가스터빈 > 스팀터빈
	산업가스	31.84	144.72	
10%감소	도시가스	35.1	218.54	열병합 > 도시가스 > 산업가스 > 가스엔진 > 가스터빈 > 스팀터빈
	산업가스	29.79	154.11	
현재 가격 (309원/kg)	도시가스	25.98	236.33	열병합 > 도시가스 > 가스엔진 > 산업가스 > 가스터빈 > 스팀터빈
	산업가스	23.75	163.50	
10%증가	도시가스	16.85	254.13	열병합 > 가스엔진 > 산업가스 > 가스터빈 > 도시가스 > 스팀터빈
	산업가스	19.71	172.9	
20%증가	도시가스	7.73	271.92	열병합 > 가스엔진 > 가스터빈 > 산업가스 > 스팀터빈 > 도시가스
	산업가스	15.66	182.29	
30%증가	도시가스	-1.39	289.71	열병합 > 가스엔진 > 가스터빈 > 스팀터빈 > 산업가스 > 도시가스
	산업가스	11.62	191.69	
40%증가	도시가스	-10.51	307.50	열병합 > 가스엔진 > 가스터빈 > 스팀터빈 > 산업가스 > 도시가스
	산업가스	7.57	201.08	
50%증가	도시가스	-19.63	325.29	열병합 > 가스엔진 > 가스터빈 > 스팀터빈 > 산업가스 > 도시가스
	산업가스	2.53	210.47	

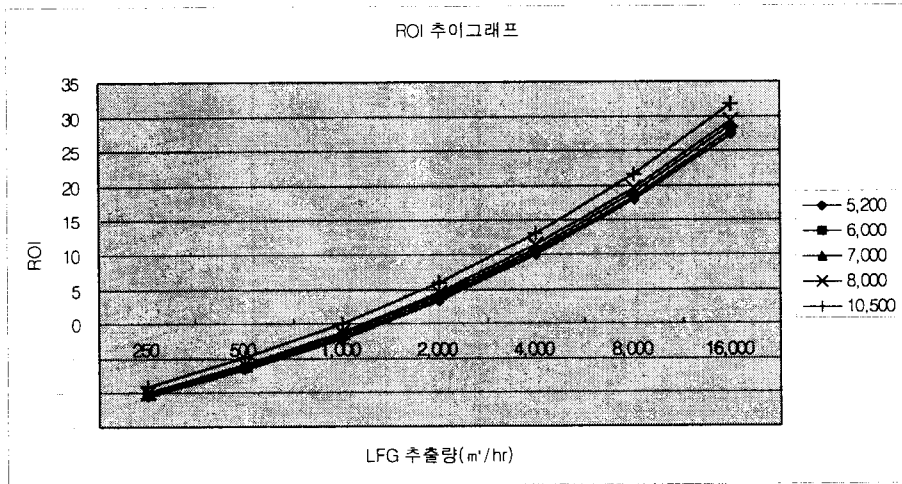
### 3. 3 결과 분석

모든 대안에 공통적으로 포함되는 추출 공정 후, 정제대안 중 모든 평가 항목에서 우수한 신개발의 정제공정을 거친 활용대안별 투자비 및 수익성을 여러 가지 관점에서 검토해 보면 다음으로 요약될 수 있다.

- ① 산출된 활용 에너지 측면에서 발열량당 비용을 고려해 보면 산업용가스화 대안, 열병합발전 대안, 도시가스화 대안 순으로 저렴하게 평가되고, 평가 대상 구간 중 10,980m<sup>3</sup>/hr을 기준으로 각 대안들의 생산단가를 산출해 보면 스팀터빈전력 32.65원/KW, 가스터빈전력 28.77원/KW, 가스엔진전력 25.74원/KW, 열병합발전 41.37원/KW, 도시가스화 236.33원/m<sup>3</sup>, 산업용가스화 163.5원/m<sup>3</sup>이다.

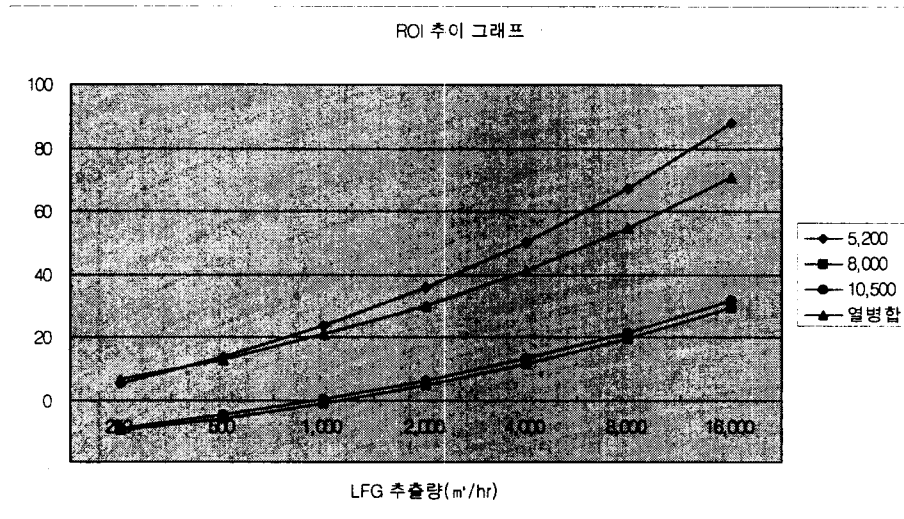


- ② 투자비에 대한 수익성을 분석해 보면 투자 회수율은 열병합발전 대안이 가장 우수하게 나타났고, 투자회수기간에서 열병합발전은 2년 이내에 도시가스는 3년, 산업용 가스와 가스엔진 발전은 4년, 가스터빈 발전은 5년 후 투자비를 회수할 수 있으나 스팀터빈 발전은 약 7년이 소요되는 것으로 평가되었다. 또한 고정자산 회전율은 열병합, 도시가스화, 산업용가스화에서 1이상의 수치를 기록하여 경제적으로 타당한 것으로 분석되었다. 손익분기점에 해당하는 시설규모를 살펴보면 스팀터빈전력은 대략 2,705m<sup>3</sup>/hr, 가스터빈전력은 1,657m<sup>3</sup>/hr, 가스엔진발전은 1,085m<sup>3</sup>/hr, 열병합발전은 108m<sup>3</sup>/hr, 도시가스화는 994m<sup>3</sup>/hr, 산업용가스화는 1,166m<sup>3</sup>/hr에서 손익분기점이 나타났다.



[그림 2] 발열량에 따른 ROI 비교

- ③ LFG 혼합가스의 발열량에 따른 투자비와 수익성을 분석해 보면 LPG를 첨가하지 않아 가장 낮은 발열량을 내는 5,200Kcal/m<sup>3</sup>의 혼합가스가 상대적으로 저렴한 운영비용이 소요되나 산출되는 혼합가스의 용량 역시 가장 작으므로 높은 발열량을 내는 혼합가스에 비해 수익성이 오히려 떨어지는 것으로 분석되었다. [그림 2]에서 나타난 바와 같이 ROI를 기준으로 볼 때 10,500Kcal/m<sup>3</sup>, 8,000Kcal/m<sup>3</sup>, 7,000Kcal/m<sup>3</sup>, 6,000Kcal/m<sup>3</sup>, 5,200Kcal/m<sup>3</sup>의 순서로 우수하게 나타났으나 이것은 판매단가를 현재 도시가스 기준의 열량비로 적용한 수치들이므로 판매단가를 달리 적용한다면 다소 다른 결과가 나올 수도 있다. 또한 가스화 대안의 특수한 경우로 증열 시스템을 거치지 않는 순수 정제가스만으로도 5,200Kcal/m<sup>3</sup>의 열량 산출이 가능하므로 이 때의 저렴한 시설 투자비를 고려하여 열병합발전, 도시가스화(10,500Kcal/m<sup>3</sup>), 산업용 가스화(8,000Kcal/m<sup>3</sup>) 대안들과 비교하면 [그림 3]과 같이 5,200Kcal/m<sup>3</sup> 정제가스가 가장 우수하고 그 뒤로 열병합발전, 10,500Kcal/m<sup>3</sup>, 8,000Kcal/m<sup>3</sup>의 순으로 수익성이 평가되었다.



[그림 3] 발열량에 따른 ROI 비교(시설비 고려)

- ④ 현재 LPG 가격인 309원/kg을 기준으로 했을 때 대안간의 순위는 열병합, 도시가스, 가스엔진, 산업가스, 가스터빈, 스팀터빈 순으로 나타났으나, LPG 가격 상승함에 따라 LFG 혼합가스 대안들이 타 대안에 비해 열위를 나타냄을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 수도권 매립지에서 매립가스에 의한 환경오염 절감 방안과 유용자원인 매립가스를 효율적으로 포집하고 실용화하기 위한 연구의 타당성을 검토하고 보다 경제적인 활용방안을 결정하기 위한 방법을 제시하고자 이를 위한 엑셀 프로그램을 개발하였다.

매립가스를 에너지원으로 활용하는 방법에는 스팀터빈, 가스터빈, 열병합을 이용한 발전시설과 도시가스, 산업용 가스로의 직접이용 등이 있으며, 이 대안들의 평가를 위한 투자비 산출을 위해 공급 장치비의 비율(percentage of delivered equipment cost)에 의한 방법을 사용하였고, 수익성의 평가에는 투자 회수율, 투자 회수기간, 고정자산 회전율, 그리고 손익분기점 등의 방법을 사용하였다. 경제성 분석결과, 수집된 매립가스를 신개발 정제공정을 거쳐 수분을 제거한 후 적정량의 LPG를 첨가(도시가스화)하여 인근 수요시설에 공급하는 방안이 가장 바람직한 대안으로 평가되었다.

결론적으로 LFG 활용 제안을 위한 경제성 분석 결과, 현재 소각량 중 최대인 10,980m³/hr 기준에 있어 신개발 정제방법만을 거친 발열량 5,200Kcal/m³의 정제 LFG

가스를 활용하는 대안이 가장 높은 경제성을 나타내며 그 다음으로는 정제된 LFG 가스를 이용한 열병합에 의한 전력생산, 도시가스화, 가스엔진, 산업용 가스화, 가스터빈, 스팀터빈에 의한 전력생산 순으로 수익성을 갖는 것으로 평가되었다. 또한 열량별, LPG 가격 변동에 따른 변화 등 다양한 민감도 분석도 실시하였다.

## 5. 참고문헌

- [1] 연세대학교, 한국과학기술원, 코오롱 엔지니어링, 매립지가스(LFG) 추출  
이용기술개발에 관한 기초연구, 한국과학재단, 1992.
- [2] 유성용 외, 매립가스 처리시설 설치효율 분석조사 연구용역보고서, 수도권 매립지  
운영관리조합, 1997.
- [3] Robert K. Ham, RECOVERY, PROCESSING, AND UTILIZATION OF GAS  
FROM SANITARY LANDFILLS, Solid and Hazardous Waste Research  
Laboratory, 1979
- [4] MAX S PETERS, KLAUS D. TIMMERHAUS, PLANT DESIGN AND  
ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERING, McGraw Hill Fourth Edition,  
1990.

## 저 자 소 개

김동희(Kim, Dong-Hee)

: 인하대학교 산업공학과를 졸업하고 동 대학원에서 석사, 박사학위를 취득하였다.  
현재 한국철도기술연구원에 선임연구원으로 재직중이며,  
주요관심분야는 시뮬레이션, 최적화 모델링 및 해법연구, 전문가시스템 등이다.

김은주(Kim, Eun-Joo)

: 인하대학교 산업공학과를 졸업하고 동 대학원에서 석사학위를 취득하였다.  
현재 (주)드림원 기술지원팀에 재직하고 있으며,  
주요관심분야는 온라인 마케팅, 전자상거래 등이다.

김봉선(Kim, Bong-Sun)

: 인하대학교 산업공학과를 졸업하고 동 대학원에서 석사학위를 취득한 후에 독일  
칼스루헤 대학교 경제학부에서 박사학위를 취득하였다.  
현재 인하대학교 기계공학부 산업공학전공 교수로 재직중이며,  
주요관심분야는 일정계획, 시뮬레이션, 물류시스템, 경제성 분석 등이다.