

환경편익을 고려한 매립가스 자원화 사업의 경제성분석

김 영 준, 이 종 연*, 구 준 모***, 강 용 태**

경희대학교 대학원 기계공학과, *환경관리공단, **경희대학교 공과대학 기계공학과

Economic Analysis of Landfill Gas Recycling Considering Environmental Benefit

Young Jun Kim, Jong Yeon Lee*, June mo Koo***, Yong Tae Kang**

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kyung Hee University, Yong In, Gyeong-gi 446-701, Korea

*Environmental Management Corporation, Incheon 404-708, Korea

**School of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yong In, Gyeong-gi 446-701, Korea

(Received October 13, 2009; revision received January 18, 2010)

ABSTRACT: The objectives of this study are to analyze the possibility of the landfill gas recycling for the middle and small scale landfills where the recycling facilities are not installed in Korea. It was found that the power generation plants by landfill gas were installed in domestic 15 landfills and the gas engine generation was adopted in 14 places. As the result of economic analysis, the landfill gas recycling is found to be available in 12 places and CERs of 153,693 tCO₂e can be secured per year. Through the reduction of the air pollutants and VOCs, the social benefits of 730 million won accrue per year. Also, the power production of 18.8 GWh will substitute the crude oil imports of 4,048 TOE and the revenue of 2.49 billion won is expected to power trading. It is also found that the power generation plants by landfill gas will give the social benefits such as the reduction of the environmental problems and the substitution effect of crude oil imports.

Key words: Landfill gas(매립가스), Gas engine generation(가스엔진발전), CERs(탄소배출권), Social benefit(사회적편익)

1. 서 론

매립가스(Landfill Gas, LFG) 중 메탄과 이산화탄소는 지구온난화를 유발하는 물질로 알려져 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서도 온실가스로 규정하고 그 배출량을 감축하려는 국제적인 노력을 기울이고 있다. 특히 메탄은 이산화탄소에 비해 분자 당 온실효과가 약 21배에 달하는 것으로 파악되고 있고, 전체 지구온난화에 대한 기

여도가 이산화탄소 다음으로 높은 약 18%에 이르는 것으로 보고되고 있다. 또한 그 발생량의 상당부분이 폐기물 매립지에서 기인하므로 매립지의 매립가스 관리에 대하여 많은 관심이 모아지고 있다.^(1,2)

매립가스의 조성은 유기물의 분해과정에서 생성되는 45~60%의 부피비를 갖는 메탄(CH₄), 40~60%를 차지하는 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂), 산소(O₂)와 미량의 황화수소(H₂S), 암모니아(NH₃), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등으로 이루어져 있다. 매립가스에 포함된 고농도의 메탄을 활용함으로써 에너지 수요 급증에 따른 재생에너지의 확보와 매립지 주변의 환경오염저감 및 온실가스 배출을 효과

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-3834; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: jmkoo@khu.ac.kr

적으로 감축시킬 수 있다.

매립가스의 활용 방식은 매립가스를 직접 연료로 사용하거나 전력을 생산하는 방법, 천연가스 수준으로 고질화(Upgrading)하여 도시가스로 공급하거나 자동차 연료로 공급하는 방법이 있다. 국내의 경우 매립가스를 활용한 자원화 방식은 가스엔진 방식의 전력생산이 대부분을 차지하고 있다. 현재 발전시설이 설치되어 운영 중에 있거나 설치되고 있는 15개소의 매립지중 수도권매립지의 스팀터빈 발전방식을 제외한 나머지 14개소의 매립가스 발전시설은 가스엔진 방식을 채택하고 있는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 국내 지자체의 향후 폐기물 매립 계획과 매립지 이용계획 등을 고려하여 매립가스 발생량을 추정하고, 연구대상 매립지를 선정할 후, 가스엔진발전의 도입에 따른 경제성분석을 수행하여 매립가스 자원화 사업의 가능성을 평가하였다.

2. 매립가스 발생량 추정

매립가스 발생량 예측에 관한 연구로는 화학양론식 산정법, 유기물이 미생물의 분해에 의해 발생하는 메탄 발생량을 평가하는 BMP(Biochemical Methane Potential) 기법에서 최근에는 확률적 접근법인 Monte Carlo Simulation 기법 및 First-Order Decay 모델을 개선한 IPCC 2000 Reference 모델 등의 연구로 발전되어 왔다.⁽³⁾

본 연구에서는 온실가스 배출량을 추정하기 위해서 동역학 모델계열의 IPCC Good Practice Method를 기반으로 만들어진 모델을 이용하였다.⁽⁴⁾ 이 모델은 매립가스 자원화 사업을 온실가스 감축사업으로 추진하는데 있어 온실가스 배출량 산정을 추정하기 위한 방법론으로 활용되고 있다.

매립가스에 의한 온실가스 발생량 추정식은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 BE_{CHA,swds,y} &= \phi \times (1-f) \times GWP_{CHA} \\
 &\times (1-OX) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_f \\
 &\times MCF \times \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \times DOC_j \\
 &\times e^{-k_j(y-x)} \times (1-e^{-k_j}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, $BE_{CHA,swds,y}$ 는 메탄 발생량(tCO_{2e}), ϕ 는

모델 불확실성 계수, f 는 매립가스 사용율, GWP_{CHA} 는 지구온난화지수, OX 는 메탄 산화율, F 는 메탄 비율, DOC_f 는 유기탄소 전환비율, MCF 는 메탄 보정계수, $W_{j,x}$ 는 매립량(ton/year), DOC_j 는 유기탄소함량(%), k_j 는 메탄발생 속도상수, j 는 폐기물 종류, x 는 폐기물 매립기간, y 는 메탄발생량 산정년도 이다.

매립가스 발생량의 경우 식(1)에서 GWP_{CHA} 를 제외한 순수 메탄발생량의 자료를 이용하여 역산을 통해 매립가스 발생량을 추정할 수 있다.

폐기물 내 유기탄소 함량은 환경부의 매립 폐기물의 물리적 성상 자료⁽⁵⁾와 물리적 성상별 유기탄소 함량에 대한 IPCC 지침서의 기본 값을 이용하여 산정하였으며,⁽⁶⁾ 속도상수 k 는 대상 폐기물의 다양한 성상이 혼합 매립된다는 것을 고려해 전체의 폐기물이 중간정도의 분해속도로 분해된다고 가정하였다. 기타의 변수에 대해서도 IPCC 지침서에 제시한 강수 및 기후조건에 따라 설정된 기본 값을 적용하였다. 메탄발생량 추정을 위해 적용된 주요 변수는 Table 1과 같다.

폐기물 매립량은 환경부의 자료(2008년)를 이용하였다.⁽⁵⁾ 자원화 사업기간(2010~2020년)의 발생량 예측을 위해 향후 매립되는 폐기물의 양 및 성상은 지자체의 매립계획과 이용계획 등을 참조하여 반영하였으며, 별도의 계획이 없는 지자체의 경우에는 매립가능기간까지 2007년 말의 매립량 및 매립성상 자료가 그대로 유지된다고 가정하였다.

본 연구의 연구대상 매립지는 환경부에서 2008년 발표한 매립가스 자원화사업 활성화 방안에서 평가하였던 매립가스 발생량 추정자료를 근거로 하여 선정하였다. 매립시설 용량 10,000 m³ 이상인 생활폐기물매립장(138개소) 중에서 매립가스 발생

Table 1 Parameters of methane generation rate

Parameters	Value
ϕ	0.9
f	0
GWPCH4	21
OX	0.1
F	0.5
DOCf	0.5
k	0.1
MCF	1

추정량이 1 Nm³/min 이상인 매립지 42개소를 대상으로 매립가스 자원화 사업기간을 2010년에서 2020년까지로 가정하고, 식(1)에 의해 산정된 2010년부터 2020년까지의 매립가스 평균 발생 추정량이 2 Nm³/min 이상인 매립지 14개소를 연구대상 매립지로 선정하였다.

3. 경제성분석

3.1 경제성분석 방법

내부수익율(Internal Rate of Return, IRR)은 어떤 투자사업의 순현재가치를 0으로 만드는 할인율이다. 즉 내부수익율은 다음 식(2)의 관계를 만족하는 r 의 값이 된다.⁽⁷⁾

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i} = 0 \quad (2)$$

여기서, NPV 는 순현재가치(won), n 는 분석기간(year), B 는 편익(won), C 는 비용(won), r 는 할인율(%)이다. 이 내부수익율이 투자자가 정해놓은 최소요구수익율(Minimum Attractive Rate of Return)보다 크면 그 사업에 투자할 가치가 있다고 판단하는 것이다.

본 연구에서는 매립가스 자원화 사업의 도입에 따른 편익과 비용을 분석하고 내부수익율을 구하여 자원화 사업의 가능성을 평가하였다. 편익부분은 탄소배출권 판매편익, 대기오염물질 저감편익, 휘발성유기화합물 저감편익 및 전력판매 편익으로 구성되고, 비용부분은 자원화 사업에 소요되는 비용(사업비와 운영비)과 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM) 사업에 소요되는 비용(CDM 등록비와 행정비, 모니터링 검증비, UN 기금공제)으로 구성된다.

매립가스를 이용한 가스엔진 발전방식은 매립가스의 포집 및 이송시설, 전처리시설, 발전시설, 제어장치 및 송전시설 등으로 구성된다. 전처리시설은 유독성이 매우 심하고 설비를 부식시키며 연소 후에는 아황산가스로 산화하여 산성비의 원인물질로 배출되어 대기환경을 오염시키는 황화수소를 제거하기 위한 탈황탑, 수분제거를 위한 데미스터(Demister)와 냉각기, 매립가스의 포집과 일정한 압력으로 가스엔진에 공급하기 위한 가스블로워,

미세먼지와 이물질, 미량의 수분을 제거하기 위한 가스필터, 미량의 유해물질인 할로겐화합물과 휘발성유기화합물을 제거하고, 실린더와 배기밸브 등에 스케일을 형성하여 마모를 촉진시키는 실록산 등의 제거를 위한 흡착탑으로 구성하였다.

3.1.1 분석기간

분석기간은 매립가스의 활용 가능량과 사용가능기간 등을 고려하여 건설기간(1년) 및 운영기간(10년)을 포함한 2010년부터 2020년까지로 가정하였다. 또한 편익과 비용 산정의 기준년도는 2009년 6월이다.

3.1.2 전력판매단가

전력판매단가는 신재생에너지이용 발전전력 기준가격의 변동요금(계통한계가격 +10, 132.63원/kWh)을 적용하였다. 2008년 평균 계통한계가격(System Marginal Price)은 122.63원/kWh이다.

3.1.3 발전기 가동율

발전기 가동율은 (주)서희건설의 호동 LFG발전소 수지분석(2006년) 자료를 참조하여 70%로 가정하였다.

3.1.4 가스엔진 발전효율

가스엔진 발전기의 발전효율은 34%로 가정하였다.

3.1.5 감가상각비

감가상각비는 10년 정액법으로 산정하였다.

3.1.6 최소요구수익율

매립가스 자원화 사업에 따른 최소요구수익률은 한국은행 경제통계시스템의 자료를 이용하여 산정하였으며, 최근 5년 간(2004~2008)의 국고채권 평균수익율(5년) 4.8%와 회사채(무보증 3년)AA⁻ 평균수익율 5.4%의 평균인 5.1%로 가정하였다.

3.2 편익분석

3.2.1 온실가스 저감편익

매립가스를 이용하는 CDM 사업은 두 가지 측면에서 온실가스 감축효과를 산정하는데, 첫 번째는 매립가스에 포함되어 있는 온실가스인 메탄을 포집하여 제거를 하는 과정에서 발생하는 회피(Avoidance)효과이다. 본 연구에서는 베이스라인 산정

에 있어 기존의 매립장에서 소각(Flaring)등의 처리가 이미 이루어지고 있는 상황을 베이스라인으로 하였으며, 이에 적용되는 조정계수(Adjustment Factor)는 이미 등록된 국내 매립가스 관련 CDM 사업 사례(수도권 매립지 61.15%, 방천리 매립지 14.79%)의 평균값인 37.97%를 적용하여 회피효과를 산정하였다.^(8,9) 또한 포집율은 50%로 가정하여 적용하였다. 두 번째는 매립가스의 에너지화를 통하여 화석연료를 대체함으로써 발생하는 온실가스 감축효과이다. 매립가스와 같은 재생에너지를 이용한 전력 생산 시 온실가스 감축효과는 생산되는 전력량과 온실가스 배출계수를 이용하여 산정하게 되는데, 적용되는 국내 전력배출계수는 CDM 방법론에 의거하여 CM(Combined Margin)값을 이용하여 산출하였다.⁽¹⁰⁾ 산출된 전력배출계수는 0.5380 tCO₂e/MWh이었다.

탄소배출권(Certified Emission Reductions, CERs)은 EU ETS(Emissions Trading Scheme)의 배출권 거래 시장, 수요-공급자간 직접거래 및 브로커 등을 통해 거래가 이루어지고 있다. 거래가격은 탄소거래정보기관을 통해 발표되고 있으며, 본 연구에서는 Thomson Reuter에서 발표하는 CERs Index 자료를 이용하여 최근 1년 간(2008년 5월 ~ 2009년 5월)의 CERs 평균 거래가격을 산정하여 적용하였다. CERs의 평균 거래가격은 15.15 EUR/CERs 이었다.

CERs 거래는 주로 온실가스 감축의무국이 많은 유럽의 수요자를 통해 이루어지며 유로화로 거래된다. 거래가격의 수익산정을 위해 원화로의 환산을 위한 환율을 적용하였으며, 이에 CERs의 거래 가격 산정기간과 동일하게 외환은행의 환율자료를 이용하여 1년 간 평균 환율을 산정하였다. 평균 환율은 1727.36원/EUR이었다.

이상의 조건을 이용하여 온실가스 감축량과 CERs 판매수익을 산정하였다.

3.2.2 대기오염물질 저감편익

국내 발전소의 전력 생산과 매립가스 자원화에 의한 전력 생산에 따른 대기오염물질 배출량 변화를 상대적으로 비교하고, 편익을 산정하기 위해 생산 전력 단위당 대기오염물질 배출량을 추산하였다.

국내 발전소의 대기오염물질 배출량은 국립환경과학원에서 발표한 2005년 전력부문 대기오염물질 배출량 자료를 전력사용량으로 나누어 계산한 한국환경정책 평가연구원의 자료를 이용하였고,⁽¹¹⁾

가스엔진발전기의 대기오염물질 배출량은 M사의 배출량 자료를 이용하였다.

또한, 전력 생산에 따른 환경오염 비용을 추정하기 위해 본 연구에서는 대기오염물질 단위당 환경비용은 EU의 추정치를 사용하였다.⁽¹²⁾ EU의 추정치는 오염물질별 대기오염의 사회적 한계비용을 계산한 것으로 사회적 비용에는 조기사망율과 질병유발율 등과 같은 건강피해, 오존에 의한 농작물 생산성 감소, 건물 및 구조물에 대한 산성비 영향 등의 피해 비용이 고려된 자료이다. 본 연구에서는 인구 10만 도시의 경우를 적용하였으며, EU의 추정대상 오염물질이 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs), 미세먼지(PM)의 4종류 물질로 한정되어 있어 일산화탄소(CO)는 KAIST의 추정치를 적용하였다. 환율은 CERs의 거래가격 산정에 이용된 평균환율을 적용하였다. Table 2는 EU의 추정치인 대기오염물질 단위당 사회적 피해 비용이다.

매립가스 자원화에 의한 대기오염물질 저감편익은 각 부문별 대기오염물질 배출 저감량에 EU의 단위당 환경오염비용을 곱하여 산출하였다.

3.2.3 휘발성유기화합물(VOCs) 저감편익

매립가스에는 암모니아와 황화합물, 메르캅탄류와 같이 매립가스의 악취를 유발하는 물질이 소량으로 존재하는데, 폐기물 매립지의 경우 일반적으로 황화합물과 메르캅탄류는 1%이내, 암모니아는 0.1~1%를 차지한다고 보고되고 있다.⁽¹³⁾

또한 비메탄계 유기화합물(Non-Methane Organic Compounds, NMOCs)의 농도도 0.01~0.6%를 차지하는 것으로 보고되고 있는데, NMOCs 가운데 약 85%가 VOCs로 알려져 있으며,⁽¹⁴⁾ VOCs 중 검출빈도가 높은 물질로는 트리크로로에텐, 벤젠, 톨루엔, 비닐클로라이드 등이다. VOCs는 인체에 유해할 뿐만 아니라, 질소화합물과 함께 광화학 반응을 통해 오존, 알데히드, PAN(Peroxyacetyl Nitrate) 등과 같은 2차 오염물질들을 생성한다.⁽¹³⁾

미국 환경청에서는 폐기물 매립지에서 발생하는 매립 가스량을 예측하기 위하여 1991년 LAEEM(Landfill Air Emissions Estimation Model)을 개발하였다.⁽¹⁵⁾ 이 모델을 미국 환경청의 EIIP(Emission Inventory Improvement Program)에서는 대기오염 배출량 산정을 위한 모델로 추천하고 있으며, 모델에서는 매립가스 중 메탄의 비율을 50%로

Table 2 Damages of air pollutants

Air pollutants	Damage cost(won/kg)
PM	57,002
SOx	10,364
NOx	7,254
VOCs	3,627
CO	7,669

가정하고, VOCs의 비율을 4,000 ppm(핵산기준)으로 가정하여 VOCs의 배출량을 산출한다. VOCs 배출량은 식(3)에 의해서 구해진다.

$$M_{voc} = 2L_oR(e^{-kc} - e^{-kt})C_{voc}(3.6 \times 10^{-9}) \quad (3)$$

여기서, M_{voc} 는 VOCs 배출량(Mg/year), L_o 는 메탄 발생율, R 는 연간 매립량(Mg/year), k 는 메탄발생 속도상수, c 는 매립종류 후 경과시간(year), t 는 매립시작 후 경과시간(year), C_{voc} 는 VOCs 농도(ppm 핵산기준)이다.

VOCs 배출 저감편익도 EU의 추정치인 Table 2의 값을 사용하여 산출하였다.

3.2.4 전력판매 편익

매립가스를 이용하여 생산한 전기는 한국전력 거래소를 통하여 판매된다. 본 연구에서는 매립가스(CH₄ 50%)의 저위발열량(4,280 kcal/Nm³)과 2010년부터 2020년까지의 매립가스 평균 포집가능량, 가스엔진 발전효율을 이용하여 가스엔진 발전시의 매립가스 자원화 규모(발전기 용량)를 산정하였고, 발전기 가동율과 전력판매단가를 이용하여 연간 전력생산량과 전력판매 수익을 산출하였다.

3.3 비용분석

3.3.1 자원화 사업비용

매립가스의 자원화 사업에 소요되는 비용은 사업비와 운영비로 구분하였다.

사업비는 공사비와 부대비용(설계·감리비)으로 구분하였고, 연구대상 매립지별로 자원화 사업규모에 맞는 포집시설 및 전처리시설, 발전시설 등에 대하여 설비를 산출하고 전문업체의 견적을 참조하여 공사비를 산정하였다.

운영비는 인건비와 유지보수비, 가스료로 구분하였으며, 매립가스 발전소의 운영 규정상 전기시

설은 전기안전관리자에 의하여 관리가 이루어져야 하므로, 인건비는 전기안전관리자 1인을 기준(3,000만원으로 가정)으로 산정하였다. 유지보수비는 발전기 수리비용과 포집시설의 정비, 부품의 교체, 이에 대한 경비 등에 사용되는 비용으로 (주)서희건설의 호동 LFG발전소 수지분석(2006년) 자료를 참조하여 전력판매수익의 21.5%로 가정하여 산출하였다. 매립가스 사용료로 지자체에 납부하는 가스료는 매립장마다 지자체와의 계약조건에 따라 다양하게(2~6%) 적용되고 있는 것으로 조사되어, 전력판매수익의 5%로 가정하여 산출하였다.

3.3.2 CDM 사업비용

매립가스의 CDM 사업에 소요되는 비용은 CDM 등록비와 행정비, 모니터링 검증비, UN기금공제로 구분하였다. CDM 사업의 유효기간은 10년 1회 옵션을 적용하여 등록 후 10년간 사업이 지속되는 것으로 가정하였다.

CDM 등록비는 등록컨설팅비용과 DOE (Designated Operational Entity) 검증비용으로 구분되며, 각각의 비용은 최근 유사사업의 등록사례에 대한 전문업체의 견적을 참조하여 각각 3,000만원으로 가정하였다.

CDM 사업으로 등록 후 연간 소요되는 비용은 행정비용이 있다. 행정비용의 산정은 연간 온실가스 감축량을 기준으로 15,000 tCO_{2e}까지는 0.1 US\$/t을 적용하며, 15,000 tCO_{2e} 이상에 대해서는 0.2 US\$/t을 적용하여 산출하게 되며, 연구대상 매립지의 온실가스 감축량을 기준으로 산출하였다(US\$에 대한 환율은 1,250원/US\$를 적용). 모니터링은 사업자의 의사에 따라 기간을 정하여 수행할 수 있는데, 본 연구대상 매립지가 소규모임을 고려하여 2년에 1회의 빈도로 모니터링을 수행하는 것으로 가정하여 모니터링 검증비용을 산정하였다. 모니터링 검증비용은 모니터링 보고에 대한 컨설팅 비용과 DOE 검증비용으로 구분되며, 이 역시 최근 유사사업의 등록사례에 대한 전문업체의 견적을 참조하여 연평균 1,800만원의 비용이 소요되는 것으로 가정하였다.

한편, 배출권을 획득할 때 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 획득되는 CERs에 대해 기후변화에 의해 피해를 받는 도서국가나 개발도상국가의 지원을 위한 펀드(Fund) 조성을 위해 2%를 징수한다. 사업자 입장에서 이는 비용으로 간주 될 수 있어 이를 비용으

로 산정하였다.

3.4 경제성분석 결과

연구대상 매립지별 매립가스 발생량 추정 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 자원화 사업기간 동안의 매립가스 평균 발생 추정량과 자원화 사업규모(발전기용량), 자원화 사업과 CDM 사업 추진으로 발생되는 비용과 편익, 경제성 분석을 위한 내부수익율 산정 결과를 Table 3에 나타내었다. 그리고 Table

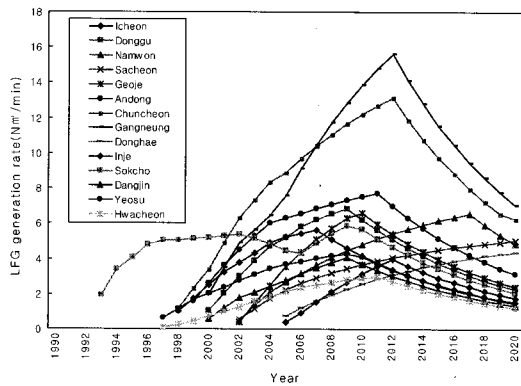


Fig. 1 Prediction results of LFG generation rate.

4는 매립가스 자원화 사업에 의한 매립지별 온실가스 감축량과 대기오염물질 및 휘발성유기화합물 배출 저감량, 전력생산량 등 연간 편익분석 결과이다.

Fig. 1에서 보면 2009년부터 2012년 사이의 기간 동안 대부분의 매립지에서 매립가스 발생량이 증가에서 감소로 전환되는 것으로 나타났는데, 이는 2005년 음식물폐기물 직매립 금지 제도의 시행에 따라 매립장에 반입되는 유기성 폐기물의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

또한 환경부의 폐기물 에너지화 종합대책(2008년)의 일환으로 지자체별로 소각시설과 가연성폐기물 자원화시설 등이 도입되고 있어 매립가스 발생원인 가연성분의 매립비율이 줄어들고 건축폐기물 등 불연성분의 매립비율이 증가하여, 향후 매립가스 발생량은 더욱 감소할 것으로 예상된다.

경제성분석 결과 연구대상 매립지 14개소 중 당진과 화천을 제외한 12개소 매립지에서 경제성 확보가 가능한 것으로 나타났다. 또한 자원화 사업으로 발생하는 편익 중에서 환경편익(온실가스와 대기오염물질, VOCs 저감편익)이 수익률 향상에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다. 경제성 확보가 가능한 12개소 매립지의 자원화 사업을 통하여 연간 153,693 tCO₂e의 CERs를 확보할 수 있으며, 배

Table 3 Results of economic analysis

Landfill	LFG Generation rate (Nm ³ /min)	Gas engine (kW)	Costs(Million won)				Benefits(Million won)				IRR (%)
			Initial costs	Annual costs			Annual benefits				
				Running	CDM	Depreciation	CERs	Air pollutants	VOCs	Electricity	
Gangneung	15.6	800	2,366	200	45.2	236.6	984.1	42.9	146.0	643.3	55.7
Chuncheon	9.5	500	1,601	132	33.9	160.1	598.8	25.8	87.9	387.9	47.3
Namwon	5.6	300	1,072	90	26.9	107.2	355.8	15.4	52.4	230.9	38.6
Andong	5.3	300	1,065	85	26.4	106.5	335.4	14.2	48.6	213.8	35.1
Sacheon	4.4	200	974	72	24.9	97.4	278.8	10.8	37.4	162.6	27.6
Geoje	4.1	200	947	72	24.6	94.7	263.2	10.8	37.4	162.6	27.1
Donggu	3.9	200	940	70	24.2	94.0	248.1	10.4	35.5	156.1	24.8
Donghae	3.6	200	935	68	23.7	93.5	227.7	9.8	33.7	148.0	21.4
Sokcho	3.6	200	1,029	68	23.7	102.9	227.6	9.8	33.7	148.0	17.4
Inje	2.8	100	812	51	22.4	81.2	176.0	5.4	18.7	81.3	9.0
Icheon	2.6	100	767	51	22.1	76.7	163.9	5.4	18.7	81.3	8.9
Yeosu	2.6	100	817	51	22.1	81.7	162.0	5.4	18.7	81.3	6.3
Dangjin	2.3	100	798	51	21.7	79.8	147.0	5.4	18.7	81.3	4.3
Hwacheon	2.0	100	792	51	21.2	79.2	126.4	5.4	18.7	81.3	0.2

Table 4 Results of annual benefit analysis

Landfill	CERs (tCO _{2e})	Air pollutants					VOCs (kg)	Electricity (MWh)
		PM(kg)	SOx(kg)	NOx(kg)	VOCs(kg)	CO(kg)		
Gangneung	37,608	1,459	-2,363	1,634	-995	-3,139	40,262	4,850
Chuncheon	22,885	880	-1,425	985	-600	-1,893	24,260	2,925
Namwon	13,598	524	-849	586	-357	-1,127	14,453	1,741
Andong	12,819	485	-786	543	-331	-1,044	13,421	1,613
Sacheon	10,654	369	-598	413	-252	-794	10,327	1,226
Geoje	10,058	369	-598	413	-252	-794	10,327	1,226
Donggu	9,484	354	-574	396	-242	-762	9,808	1,177
Donghae	8,704	335	-544	376	-229	-723	9,292	1,116
Sokcho	8,698	335	-544	376	-229	-723	9,292	1,116
Inje	6,728	184	-299	206	-126	-397	5,163	613
Icheon	6,266	184	-299	206	-126	-397	5,163	613
Yeosu	6,191	184	-299	206	-126	-397	5,163	613
Dangjin	5,618	184	-299	206	-126	-397	5,163	613
Hwacheon	4,831	184	-299	206	-126	-397	5,163	613

Table 5 Economic analysis except benefits of air pollutants and VOCs reduction

Landfill	IRR(%)	Landfill	IRR(%)
Gangneung	47.2	Donghae	15.5
Chuncheon	39.8	Sokcho	11.8
Namwon	31.6	Inje	4.5
Andong	28.5	Icheon	4.1
Sacheon	21.8	Yeosu	1.4
Geoje	21.1	Dangjin	-0.9
Donggu	18.9	Hwacheon	-5.7

출권 거래를 통하여 40.2억 원의 판매수익 창출이 가능하다. 대기오염물질과 VOCs 저감으로 연간 7.3억원의 사회적 편익이 발생하고, 또한 연간 18.8 GWh의 전력생산으로 4,048 TOE의 원유수입 대체효과와 한국전력거래소를 통한 전력판매로 24.9억원의 수익이 예상된다.

환경편익을 제외한 전력판매 편익만을 고려하는 경우 매립가스 자원화 사업은 전체 연구대상 매립지에서 경제성이 없는 것으로 평가되었다.

또한 자원화 사업을 민간사업자가 수행하는 경우를 고려하여 대기오염물질 저감과 VOCs 저감 편익과 같은 사회적 편익을 제외한 경제성분석 결과를 Table 5에 나타내었다. 연구대상 매립지 중 9개소 매립지만이 경제성 확보가 가능하고, 수

익률은 큰 폭으로 감소하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 매립가스 자원화 시설이 도입되지 않은 중·소규모 매립지를 대상으로 매립가스 발생량을 추정된 후, 매립가스 평균 추정 발생량이 2Nm³/min 이상인 매립지 14개소를 연구대상 매립지로 선정하여 가스엔진 발전 도입에 따른 편익과 비용을 분석하고, 경제성평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2007년 말 기준으로 매립용량 10,000 m³ 이상인 생활폐기물매립장은 138개소이며, 경제성 분석 결과 12개소의 매립지에서 경제성 확보가 가능한 것으로 나타났다.
- (2) 매립지 12개소의 자원화 사업을 통하여 연간 153,693 tCO_{2e}의 CERs를 확보할 수 있으며, 배출권 거래를 통하여 40.2억 원의 판매수익 창출이 가능하다.
- (3) 대기오염물질과 VOCs 저감으로 연간 7.3억원의 사회적 편익이 발생한다.
- (4) 연간 18.8 GWh의 전력생산으로 4,048 TOE의 원유수입 대체효과와 한국전력거래소를 통한 전력판매로 24.9억 원의 수익이 예상된다.

위 결론에서와 같이 매립가스 자원화 사업은 경

제성분석 결과 환경개선효과 및 원유수입 대체효과와 같은 사회적 편익이 큰 사업으로 평가된다.

후 기

본 연구는 2007년도 경희대학교 연구비지원에 의한 결과 임(KHU-20070780).

참고문헌

1. Chung, J. D., Kim, J. W., Kim, J. T., and Han, J. M., 2007, A study on the measurement and prediction of greenhouse gas generated from middle and small scale landfill, Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol. 24, No. 6, pp. 569-579.
2. Thorneloe, S. A., 1996, Influence of landfill gas on global climate-Landfilling of waste: Biogas, E&FN SPON, pp. 187-197.
3. Hong, S. P., 2008, Estimation of methane generation rate and potential methane generation capacity at Cheongju megalopolis landfill site based on LandGEM model, Journal of Environmental Health Science, Vol. 34, No. 6, pp. 414-422.
4. UNFCCC, 2008, Methodological tool: Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site, Version 04.
5. Ministry of Environment, 2008, Nationwide status of waste generation and disposal.
6. IPCC, 2006, IPCC 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories.
7. Kim, J. W. and Lee, C. S., 2008, A study on rate of returns in engineering projects, Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 74-79.
8. UNFCCC, 2009, ACM0001: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities, Version 11.
9. UNFCCC, 2008, AMS-III.G: Landfill methane recovery, Version No. 6.
10. UNFCCC, 2007, AMS-ID: Grid connected renewable electricity generation, Version 13.
11. Kang, M. O. and Lee, S. Y., 2008, The environmental reform and its effect of a subsidy to energy and electric power sector, Korea Environment Institute, pp. 90-91.
12. Hlland, M. and Watkiss, P., 2002, Benefits table database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe, netcen, BeTa Version E1.02a.
13. Kim, M. G., Jung, Y. R., Seo, Y. M., Nam, S. H., and Kwon, Y. J., 2001, Determination of volatile organic compounds emitted from municipal solid waste landfill site by Thermal desorption-Cryofocusing-GC/FID/FPD, Analytical Science and Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 274-285.
14. US EPA, 1987, Hazardous waste treatment storage and disposal facilities-air emission models, EPA-450/3-87-026.
15. Jang, Y. K., 2000, Estimation of greenhouse gas and non-methane VOC emission by waste landfill, Suwon University, Vol. 15, pp. 397-407.