

소규모 매립가스 자원화를 위한 마이크로터빈 열병합발전 및 유리온실 CO₂ 농도 증가 시스템의 타당성 연구

*박정극, **허광범, 임상규, 이인화

Feasibility Study of Microturbine CHP and Greenhouse CO₂ Enrichment System as Small Scale LFG Energy Project

*Jungkeuk Park, **Kwangbeom Hur, Sanggyu Rhim and Inhwa Lee

Abstract

As new small scale LFG (landfill gas) energy project model which can improve economic feasibility limited due to the economy of scale, LFG-Microturbine combined heat and power system with CO₂ fertilization into greenhouses was proposed and investigated including basic design process prior to the system installation at Gwang-ju metro sanitary landfill. The system features CH₄ enrichment for stable microturbine operation, reduction of compressor power consumption and low CO emission, and CO₂ supplement into greenhouse for enhancement plant growth. From many other researches, high CO₂ concentration was found to enhance CO₂ assimilation (also known as photosynthesis reaction) which converts CO₂ and H₂O to sugar using light energy. For small scale landfills which produce LFG under 3 m³/min, among currently available prime movers, microturbine is the most suitable power generation system and its low electric efficiency can be improved with heat recovery. Besides, since its exhaust gas contains very low level of harmful contaminants to plant growth such as NO_x, CO and SO_x, microturbine exhaust gas is a suitable and economically advantageous CO₂ source for CO₂ fertilization in greenhouse. The LFG-Microturbine combined heat and power generation system with CO₂ fertilization into greenhouse gas to enhance plant growth is technologically and economically feasible and improves economical feasibility compared to other small scale LFG energy project model.

Key words LFG(Landfill Gas)(매립지가스), MGT(마이크로가스터빈), CO₂ enrichment(CO₂ 농도 증가), Siloxane(실록산)

(접수일 2009. 6. 23, 수정일 2009. 8. 12, 게재확정일 2009. 8. 13)

* 한국전력공사 전력연구원

■ E-mail : jkpark@kepri.re.kr ■ Tel : (042)865-5385 ■ Fax : (042)865-5679

** 한국전력공사 전력연구원

■ E-mail : kbhur@kepri.re.kr ■ Tel : (042)865-5382 ■ Fax : (042)865-5679

1. 서론

기후 변화의 원인이 되는 온실가스는 동력, 전력 그리고 열과 같은 에너지 생산 분야 뿐만 아니라 하수처리 및 쓰레기 매립 등 다양한 분야에서 온실가스가 배출된다. 특히 매립지에서 유기성 폐기물의 혐기성 소화에 의해 생성되는 매립가스의 주성분은 온실가스인 동시에 연료로 활용될 수 있는 CH₄와 대표적 온실가스인 CO₂가 높은 농도로 포함되어 있어 자원화가 시급한 실정이다. 2002년 미국 전체 온실가스 발생량의 9%가 CH₄였는데 이 중 32%가 매립지가스에 의한 것이었다.⁽¹⁾

따라서 온실가스 배출 측면에서 상당한 부분을 차지함은 물론 자원화에 대한 기술적 난이도가 상대적으로 낮은 매립가스의 자원화 사업이 세계 각국에서 활발하게 진행되고 있다. 특히 미국에서는 현재 557 곳의 매립장에서 자원화 설비가 운영 중에 있으며 이로 인한 온실가스 배출 저감량은 8,600만 ton CO₂ eq/yr로 추정된다.⁽²⁾

2007년 작성된 환경부 자료에 따르면 국내에서 현재 사용되고 있는 매립장 수는 총 227 개소이며 이미 매립이 완료된 매립장까지 포함할 경우 그 수는 300개 이상이 된다. 이중 50MW 용량의 증기 터빈 발전기가 설치된 수도권 매립장을 비롯하여 총 19 곳의 매립장에서 매립가스 자원화 사업이 진행 또는 추진 중에 있다. 국내 매립가스 에너지화 현황은 Table 1에 요약된 바와 같다.

2007년을 기준으로 자원화로 인한 매립가스 내 CH₄ 회수량은 1.7억m³에 이르는 것으로 추정되며 전량 CER 획득에 연계될 경우 233만 톤의 CER 확보가 가능한 양이다.

매립가스 자원화는 모두 매립 규모가 일정 규모 이상되는 대규모 매립지에서 시행되고 있다. 일반적으로 매립가스 발생량이 10m³/분 이상인 대규모 매립장의 에너지화는 사업 타당성이 확보되는 것으로 간주되는데 매립가스 발생량이 그에 미치지 못하는 소규모 매립지의 경우 규모의 경제성에 의해

경제성 측면에서 타당성이 부족하여 매립가스 자원화를 위한 민간 자본의 유치는 물론 정부 차원의 지원 또한 어려운 상황이다. 이지환(2008)은 매립지 용량이 10,000~100,000m³인 41개소 매립장에 대해 매립가스 자원화 사업의 경제성 평가를 수행하였는데 전력 판매 수익은 물론 CDM 사업 등록을 통한 CER 판매 수익을 고려하는 경우에도 모두 경제성이 없는 것으로 나타났다.⁽³⁾

Table 1은 국내 매립장 가운데 매립 용량이 10,000 톤 이하인 매립장을 가스 발생량에 따라 정리한 것이다. 매립시설 용량 1만 톤 미만인 매립장에서 발생하는 매립가스의 총량은 연간 1.1억m³에 달하는데 이는 수도권 매립지 자원화 사업을 기준으로 할 경우 약 20MW 용량의 발전을 할 수 있는 양에 해당하며 매립가스 내 CH₄ 농도를 50%로 가정하고 CH₄의 온실가스 효과가 CO₂의 21배임을 감안하면 이로 인한 연간 온실가스 배출량은 241만 CO₂ 톤에 상당하며 발생하는 모든 가스를 태워서 날려 보내는(flaring) 경우로 가정하더라도 연간 온실가스 발생량이 CO₂ 22만 톤에 달한다. 또한 매립가스의 대기 방출 또는 일반 연소 시 다량의 VOC 또는 SO_x 등 오염 물질이 동시에 배출될 수 있어 인근 대기 환경을 크게 오염시킬 수 있다.

대규모 매립장에서 발생하는 매립가스의 경우 규모의 경제성(Economy of Scale)에 의해 사업성이 충분히 확보되는 경우가 많으나 대부분의 소규모 매립장의 경우 사업성 확보가 어려워 자원화 사업에서 외면당하기 쉽다는 것이다.

따라서 소규모 매립장에서 발생하는 매립가스의 자원화를 위한 보다 경제성이 있는 기술 모델 개발이 시급하다고 할 수 있겠다. 한전전력연구원에서는 중부발전의 지원을 받아 광주광역시 위생매립장에 매립가스 자원화 및 CO₂의 유리 온실 내 전환 특성 평가 과제를 수행 중에 있다. 본 논문에서는 시스템의 설치에 앞서 소규모 매립가스 자원화를 위한 모델로 마이크로터빈 열병합발전이 농작물 재배 효율 향상을 위한 온실 내 CO₂ 농도 증대 시스템의 연계를 제안하고 그 타당성에 대해 논해 보고자 한다.

Table 1. Small scale landfills with capacity below 10 kton

Estimated landfill gas production		No. of landfills
Above 3 m ³ /min		19
1 ~ 3 m ³ /min		23
Below 1 m ³ /min		93
Total	211.8 m ³ /min	138

2. 매립지가스 이용 마이크로터빈 발전 - 온실 내 CO₂ 부화 시스템

본 2장에서는 앞서 살펴 본 것과 같이 소규모 매립장에서

발생되는 매립가스의 자원화를 위한 신규 모델로 마이크로터빈 발전-CO₂ 고정 시스템의 타당성에 대해 논하고자 한다.

2.1 시스템 구성

매립가스를 이용한 마이크로터빈 발전-CO₂ 고정 시스템은 매립가스 포집-CH₄ 농축/매립가스 정제, 마이크로 열병합발전 그리고 농작물을 이용한 CO₂ 고정의 3단계 하부시스템으로 구성되는 시스템 개념도는 Fig. 1과 같다.

2.2 마이크로터빈 열병합발전시스템

Roberto와 Piero(2005)는 매립가스를 이용한 발전 설비들을 비교 분석한 바 있는데 Table 2는 이를 요약한 것이다.⁽⁴⁾

높은 전기 효율을 고려할 경우 연료전지는 매력적이지만 초기 설비 투자비가 매우 높고 연료 매립가스의 품질 기준이

매우 까다로워 전처리 비용이 높다는 단점이 있다. 또한 가스 엔진 발전기의 경우 현재 상업화되어 출시되는 제품의 최저 용량이 마이크로터빈에 비해 상대적으로 크기 때문에 매립가스 발생량이 3m³/min 이하인 경우에 적용하기가 어렵고 배기가스 내 오염물질 농도가 높아 처리 및 온실 적용에 어려움이 있다.

따라서 소형 매립가스 자원화에 있어 마이크로터빈이 가장 적합한 것으로 보이는데 가스엔진에 비해 높은 설치 단가와 낮은 전기 효율 문제는 해결해야 하는 과제이다. 단, 열회수를 통해 열병합발전시스템을 구현하는 경우 낮은 전기 효율은 어느 정도 상쇄될 것으로 보이며 200kW 이상 용량의 마이크로터빈의 효율은 33%로 가스 엔진에 상당히 근접한 것으로 보고 되고 있다.

2.3 CH₄ 농축/매립가스 전처리시스템

2.3.1 연료 매립가스 기준 설정

열병합발전 연료 및 배가스의 온실 내 CO₂ 농도 증대를 고려할 경우 포집된 매립가스를 직접 시스템에 적용하는 것은 적절하지 않으며 일정 수준의 연료 조건을 만족할 수 있도록 전처리 과정을 거치는 것이 필요하다.

Table 3은 매립가스의 품질을 결정하는 함유 물질과 잠재적인 악영향에 대한 정보를 요약한 것이다. 연료 매립가스 품

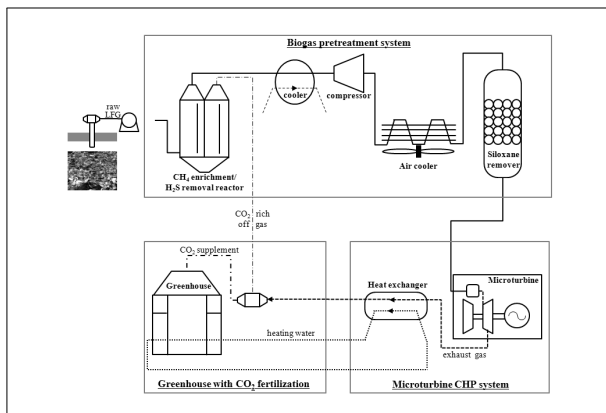


Fig. 1 Schematic diagram of landfill gas-Microturbine combined heat and power system with CO₂ fertilization in greenhouse

Table 2. Comparison for major landfill gas utilization equipment (equipment only)

	Gas engine	Gas turbine	Fuel cell (MCFC)
Electric efficiency (%)	33	28	50
NOx emission (ppm)	56.6	15	~ 0
Investment cost (10 ³ USD/kW)	1,200	1,500	2,800
O&M cost (USD/kW/yr)	115.2	99.84	96

Table 3. Influences of landfill gas components on power generation and exhaust injection for CO₂ enrichment in greenhouse

Components	Influences
CH ₄	<ul style="list-style-type: none"> • Low concentration results in combustion instability (high CO emission) and flame out. • Low concentration increases compressor power consumption. • For MGT fuel, CH₄ content should be over 35%.
H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Results in metal corrosion • Contaminate lubrication oil of compressors and increase oil change cost • Source of SOx production
NH ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Results in NO production which leads NOx emission
H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Increase gas volume and compressor power loss • Decrease absorption capacity of absorption material • Cause severe turbine damage and fosters corrosion environment
Siloxane compound	<ul style="list-style-type: none"> • Damage engine cylinder • Deposit on turbine parts such as turbine recuperator

질 기준의 대표적인 항목에는 CH₄ 농도(또는 발열량/Webber 수), H₂S 농도, NH₃ 농도 그리고 실록산 농도가 포함된다.

발열량은 터빈 연소기 내의 화염 안정성에 직접적인 영향을 끼치는데 이는 동일한 열출력을 얻기 위한 유량의 변화에 기인한다.⁽⁵⁾ H₂S는 부식성이 있고 압축기와 터빈 부품의 마모를 유발할 수 있다.⁽⁶⁾ 또한 암모니아의 연소는 NO를 형성할 수 있는데 이는 반응하여 대기 중에 NO_x 배출로 연결될 수 있다.⁽⁷⁾ 실록산은 연소 후 열교환기 등의 부품에 퇴적되어 성능 저하를 유발시킬 수 있고 가스 엔진 부품 표면을 마모시킬 수 있다.⁽⁸⁾

Table 4는 식물 성장을 저해하거나 온실 내 작업 환경을 악화시킬 수 있는 물질들의 잠재적 위험성에 대해 요약한 것이다.

현장에 적용될 30kW급 마이크로터빈의 제작사인 C사의 연료 기준과 현장 적용 상황을 고려하여 연료 매립가스의 품질 기준을 Table 5와 같이 수립하였다.

마이크로터빈 제작사인 C 사의 연료 가스 조건에 비해 본 시스템 적용을 위한 연료 매립가스 품질 기준은 CH₄과 H₂S 측면에서 크게 강화되었다. CH₄ 농도의 경우 C사는 연료 품

질 기준으로 35%를 제시하였지만 마이크로터빈 운전 안정성 확보, 압축기와 냉각 건조기 등의 전처리시스템의 동력 소모량 감소 및 CO 배출 농도 저감을 위해 75%로 설정되었다. 실제로 공주 축산폐수처리장에 설치된 마이크로터빈의 경우, CH₄/N₂ 바이오가스 내 CH₄ 농도가 32% 일 때도 전부하 운전이 가능한 것으로 확인되었다. Fig. 2는 공주 축산폐수처리장에 설치된 마이크로터빈의 부하에 따른 CO 배출 농도에 관한 그래프로 그림에 나타난 것처럼 CH₄ 농도가 낮은 경우(평균 40.5%) 배가스 내 CO 농도가 114~310ppm으로 높게 측정되었다.⁽⁹⁾

또한 CH₄ 농축 시 매립가스 농도가 크게 감소되어 압축 및 냉각 건조 단계에서의 동력 소모 또한 감소되어 매립가스 연료화 경제성이 향상된다. CH₄ 농축에는 PSA 공정, 액상 촉매 또는 멤브레인이 이용되나 액상 촉매를 이용한 방법이 가장 경제적이며 또한 H₂S의 동시 제거도 가능하다는 장점도 있다.

H₂S 농도의 경우 연소 시 SO_x를 생성하여 식물 성장에 영향을 주기 때문에 전처리 단계에서 거의 다 제거되어야 하는데 C사의 기준 농도(70,000ppm)에 비해 상당히 엄격하나 압축기 등 기타 기기의 허용 기준과 비교할 경우 큰 차이가 있다고 할 수는 없다.

Table 4. Harmful gas contaminants against plant growing and its potential influences

Components	possible harmful influences
SO ₂	• Causes acute necrosis (directly damage plants' cell)
C ₂ H ₄ / C ₃ H ₆	• Acts as plant hormone which leads to - premature senescence - develop excessive side shoot - prevent normal flower initiation
CO	• Fosters hazardous working environment • Indicates presence of C ₂ H ₄
NO _x	• Reduces plant growth dramatically
NH ₃	• Reduces efficiency of CO ₂ assimilation and water absorption of roots

Table 5. Landfill gas fuel conversion specification for LFG-MGT system

Condition	Requirement
CH ₄ Concentration	over 75%
H ₂ S Concentration	~ 0 ppm
NH ₃ Concentration	~ 0 ppm
Moisture Content	dew point: over -14.3°C
Siloxane Concentration	No detect (5 ppb)
Fuel pressure	over 0.6 MPa

2.3.2 매립가스 연료화 설비 설계

2.3.1항에서 설정한 연료 매립가스 조건 달성과 연료화 경제성 향상을 위한 전처리시스템의 구성은 Fig. 3과 같다. CH₄ 농축/H₂S 동시 액상 촉매 반응기, 가스 냉각 건조기, 가스 압축 그리고 실록산 제거탑으로 이루어진다.

Fe-EDTA를 사용하는 액상 촉매 반응기는 CH₄ 농축과 함

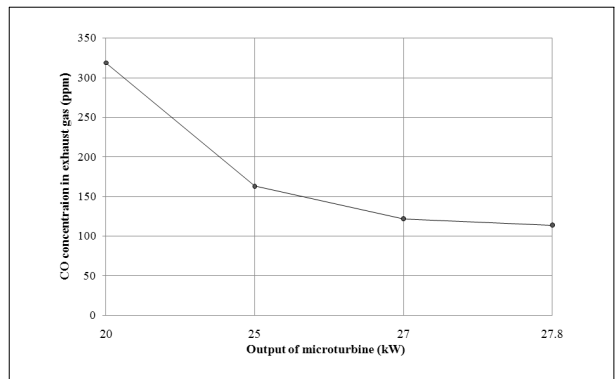


Fig. 2 CO emission with microturbine output⁽⁹⁾ (C company 30 kW model, CH₄/N₂ biogas)

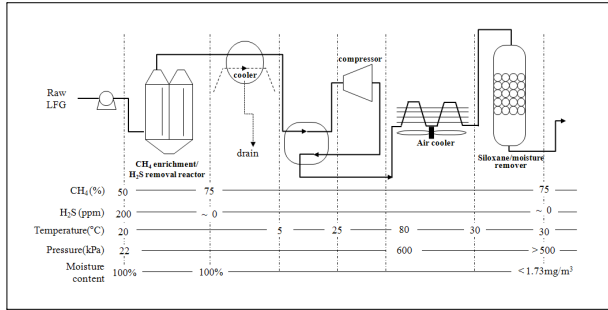


Fig. 3 Flow diagram and design of landfill gas pretreatment system

계 H₂S를 동시에 제거할 수 있다. 광주 위생 매립장에서 발생되는 매립가스의 CH₄ 농도를 50%에서 75% 이상으로 농축시키는 경우 전체 매립가스의 부피는 33%가 감소한다. 이 때 매립가스의 부피 감소는 액상 촉매 반응기 후단에 위치한 냉각 응축-가스 건조 공정과 압축 공정의 동력 소모를 크게 감소시키게 되고 궁극적으로 매립가스 연료화 비용을 감소시킨다. 또한 매립가스의 발열량 증가는 마이크로터빈의 안정적 운전 영역을 확장시켜 전력 수요에 따라 저부하 운전도 가능하게 한다. 공주 축산폐수처리장에 설치된 마이크로터빈 실험 결과 CH₄/N₂ 바이오가스 적용 시(평균 농도 40.5%) 70% 미만 부분 부하 운전 및 부하 변동 운전은 거의 불가능하였다.

액상 촉매 반응기에서는 CH₄ 농도 75%의 product gas 이외에 CO₂ 농도 30% 이상의 off gas가 발생한다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 상온의 고농도 CO₂ off gas는 온실 내 CO₂ 농도 증대에 활용될 수 있는데 특히 고온의 배가스 주입이 어려우나 광포화점이 증가하여 고농도 CO₂ 주입 효과가 커지는 여름철에 더욱 유용할 수 있다.

매립가스의 이용에 있어 가장 문제가 되는 오염물질은 실록산이다. 실록산에 의한 발전 설비의 피해는 2000년 이후에 다수 보고 되었는데 국내 수도권매립지에 설치된 6.5MW급 가스엔진 발전 설비 또한 연소실 내부 스케일 과다 침적과 이로 인한 엔진오일 오염 등의 현상을 경험하였고 결과적으로 정기 정비 주기가 대폭 단축되었고 정비 비용은 반대로 큰 폭으로 증가하였다.

실록산의 경우 검출되지 않는 수준으로 제거되어야 하는데 냉각 응축에 의한 수분 제거 공정은 실록산 및 기타 VOC의 제거 또한 이루어지므로 전처리 경제성과 효율에 도움이 된다. Schweigkofler(2001) 등은 LFG 또는 바이오가스의 냉각 응축 건조 과정(5°C로 가스 냉각)에서 실록산이 9~11% 제거

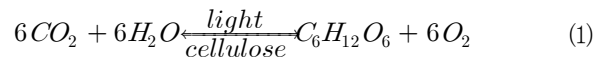
되고 VOC는 20~25% 제거됨을 발견하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 SCS 사에 의하면 미국 Calabasas 매립장에서는 매립가스가 약 4°C로 냉각되는 경우의 실록산 제거 효과는 15~49%에 달한다.⁽¹¹⁾

냉각 응축-가스 건조 공정에서 제거된 경우라도 추가적인 실록산 제거 공정이 없이 실록산을 완전 제거하는 것은 불가능하다. 실록산 제거 방식에는 응축, 흡수 그리고 흡착법이 있는데 원가스 내 실록산 농도가 상대적으로 낮고 소규모 설비의 경우 흡착법이 가장 경제적이다. 흡착 물질에는 활성탄과 실리카 겔이 가장 많이 사용되는데 활성탄의 비용 경제성이 보다 우수하다.

2.4 식물 성장 촉진용 온실 내 CO₂ 부하

2.4.1 CO₂ 농도와 식물 성장과의 관계

Eqn. (1)은 식물 성장에 절대적 영향을 미치는 광합성 반응식이다. 광합성 또는 CO₂ 동화 작용은 빛 에너지를 이용하여 CO₂와 H₂O를 당으로 변환한다.



반응식을 통해 높은 CO₂ 농도가 반응이 오른쪽으로 진행되는 즉, 광합성 반응을 촉진하는데 영향을 미칠 것으로 예상하는 것은 어렵지 않으며 이는 이미 많은 연구에 의해 확인되었다. 일반적으로 CO₂ 농도가 증가함에 따라 밀, 보리, 콩 등을 포함한 많은 식량 작물인 C₃ 식물의 광합성과 생장은 촉진된다.⁽¹²⁾

그러나 온실의 경우 온도 유지에 필요한 에너지 절약을 위해 환기를 최소화하는 경향이 있다. 따라서 온실 내의 CO₂ 농도가 낮아져 작물의 성장을 저해하는 일이 일어나기 쉽다. 온실 내의 CO₂ 농도 저하를 방지하고 광합성을 촉진하기 위해 온실 내에 CO₂를 주입하여 CO₂ 농도를 높여주는 연구가 다수 수행된 바 있다.

Table 6은 CO₂ 농도 증가가 식물 성장에 미치는 영향에 대한 선행 연구들의 결과를 요약한 것이다. Klasing 등(2007)은 CO₂ 농도가 오이 성장에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였는데 온실 내 CO₂ 농도를 대기 중의 CO₂ 농도 수준인 380μmol/mol로 유지한 경우 CO₂ 농도 제어를 하지 않은 경우에 비해 오이 수율이 최대 35%까지 증가한 것으로 나타났다.⁽¹³⁾

또한 Jaffin 등(2003)은 매립가스를 이용한 보일러 연소 가스의 온실 주입을 통해 CO₂ 농도를 800~2,500ppm으로

Table 6. Influence of CO₂ fertilization on plant growth found from the literatures⁽¹³⁻¹⁵⁾

Crop	Cucumber		Rose		Tomato	
Control case condition (ppm)	135-500		No supply		250-400	
Elevated CO ₂ condition (ppm)	380-500		800-2,500		700~900	
Comparison factors	yield	size	yield	weight	Vitamin C content	
Variation	+37%	+11%	+ 30%	+25%*	+10%*	

* estimated from the graph in the literature

유지하였을 때 대조군에 비해 장미의 수율이 30% 증가함을 확인하였다.⁽¹⁴⁾

CO₂ 농도의 증가는 작물의 수율, 크기 등 외형적 결과뿐만 아니라 작물의 색, 비타민 C 함량 그리고 효소 활동성 등 다양한 부분에 영향을 주는 것이 Shahidul 등(1995)의 연구에 의해 밝혀졌다.⁽¹⁵⁾

2.4.2 마이크로터빈 배가스 특성 및 CO₂ 공급원으로서의 타당성

온실 내 CO₂ 공급 방법은 CO₂ 가스의 직접 공급, 연소 가스 공급 그리고 유기물의 발효에 의한 공급 등이 있다. CO₂ 직접 공급은 순도와 제어 측면에서 가장 유리하나 경제성 측면에서 불리하다. 유기물의 발효는 온실 내 CO₂ 농도 제어가 어려운 등의 단점이 있다. 또한 연소 가스의 경우 온실 온도 유지 열원으로 동시 활용이 가능하다는 장점이 있으나 연소 가스 내 오염 물질의 제거가 필요하다는 단점이 있다.

연소 가스의 일종인 마이크로터빈 배가스의 오염물질 배출 농도는 매우 낮기 때문에 가장 효과적인 CO₂ 공급원이 될 수 있다. NO_x 배출 농도는 9ppm 이하이며 매립가스의 경우 희석 효과로 인해 더 낮아지게 된다. 연료 내 H₂S가 제거되는 경우 SO_x 또한 거의 배출되지 않는다.

마이크로터빈 배가스의 CO₂ 농도는 연료 매립가스 내의 CO₂ 농도에 따라 변한다. Fig. 4는 30kW 마이크로터빈의 전 부하 조건 시 공기 유입량을 이용하여 연소 반응식을 단순 계산한 경우 매립가스 내 CH₄ 농도에 따른 배가스 내 CO₂ 농도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에 나타난 것과 같이 마이크로터빈 운전 가능 매립가스 조성 범위에서 1.3~3.27%의 농도를 가질 것으로 예측되었다. 액상 촉매 반응기로부터의 off-gas가 혼합되는 경우 CO₂ 농도는 증가되었다. 연료

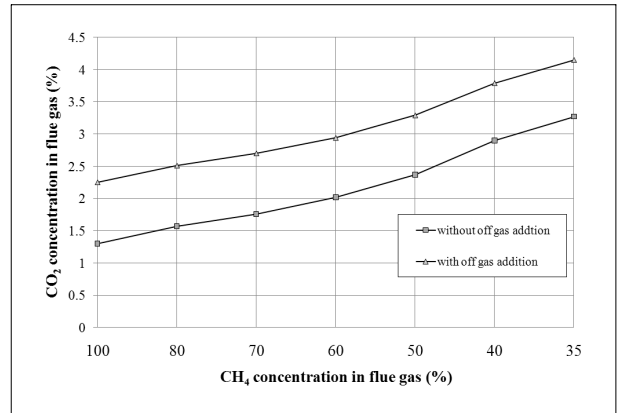


Fig. 4 CO₂ concentration in microturbine exhaust gas with different landfill gas composition

매립가스의 CH₄ 농도가 75%인 경우 CO₂ 농도는 2.6%가 된다. 대기 중 평균 CO₂ 농도가 384ppm임을 감안하면 직접 주입을 통한 CO₂ 농도 증가가 충분히 가능하다.

3. 매립지가스 이용 마이크로터빈 발전 - 온실 내 CO₂ 부화 시스템 경제성 평가

본 3장에서는 매립지가스 이용 마이크로터빈 발전-온실 내 CO₂ 부화 시스템 도입으로 인한 경제적 효과를 분석해 보고자 한다.

3.1 매립지가스 이용 마이크로터빈 발전 - 온실 내 CO₂ 부화 시스템 비용 예측

Table 2에 요약된 매립지가스 이용 원동기 데이터는 가스 전처리 비용을 제외한 것으로 이를 감안할 경우 총 시스템 건설 비용은 크게 증가한다. 또한 가스터빈에 비해 상대적으로 용량이 작은 마이크로터빈의 경우 설비비가 다소 높은 경향이 있다. 실제로 매립지가스 이용 마이크로터빈 시스템의 자본 비용은 매립지가스 전처리시스템과 열병합설비를 포함할 경우 2,000~5,000 USD/kW에 달하는데 이는 용량 범위 또는 사이트 특성에 따라 달라진다.^(16,17) 미국 EPA(2009)에 따르면 매립지가스를 이용한 발전시스템의 자본 및 유지 보수 비

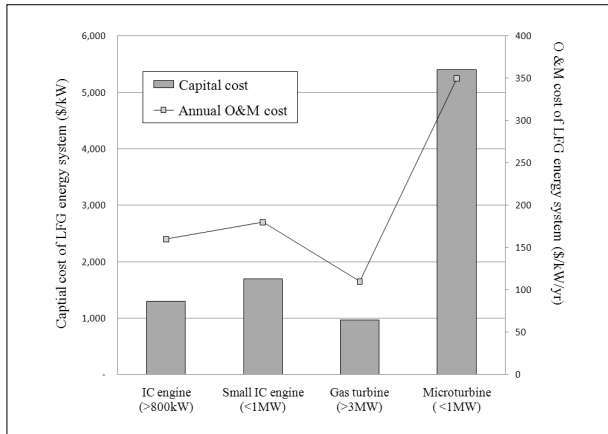


Fig. 5 Capital and O&M cost for LFG - microturbine CHP system⁽¹⁷⁾

용은 Fig. 5와 같이 추산할 수 있다.⁽¹⁷⁾ 속초시 하수처리장의 바이오가스 발전시스템의 경우 총 325kW 용량의 열병합발전 설비 건설에 총 3,250백만원이 투입되어 약 8,000USD/kW (환율 1,253원/USD 기준)의 자본 비용이 소요되었다고 할 수 있다.⁽¹⁸⁾ 그러나 속초 하수처리장 관련 사업에는 슬러지 농축 설비, 소화조 개선 설비 등이 포함된 비용으로 이를 제외할 경우 투입된 자본 비용은 3,683USD/kW(환율 1,253원/USD 기준) 인데 사업 추진 당시 환율을 감안하면 미국 EPA 기준에 근접할 것으로 보인다. 또한 공주 축산폐수처리장에 설치된 바이오가스 열병합설비의 경우 소요 건설비는 약 5,300USD/kW로 (환율 1,253원/USD 기준) 미국 EPA 자료를 국내에 적용하는 것이 타당하다.

매립지 자원화 설비의 유지/보수 비용은 현장 상황에 따라 크게 달라진다. 미국 EPA 자료에 나타난 매립지가스 자원화 설비의 유지/보수 비용은 연간 350USD/kW로 예측하였으나 미국 Calabasas 매립지의 경우 단위 생산 전력당 유지/보수 비용인 0.025USD/kWh의 환산값인 212USD/kW(이용률 97%)에 비해 큰 차이를 보인다.

매립지자원화 설비의 유지/보수 비용의 예측에 있어 가장 중요한 것은 H₂S와 실록산 농도이다. 매립지 가스 내에 포함된 H₂S와 실록산의 농도는 현장 특성에 따라 크게 변하는데 김기현 등(2003)의 연구에 따르면 광주 W 매립장과 제주 H 매립지 가스에 포함된 H₂S의 농도는 0.2~1,036ppm으로 조사되었다.⁽¹⁹⁾ 또한 수도권매립지공사(2005)의 연구 결과에 따르면 수도권매립지 가스 내 실록산 농도는 1.8~11.0mg/m³이다.⁽²⁰⁾

이를 바탕으로 매립가스 내 실록산 농도를 5.0mg/m³, H₂S

Table 7. O&M cost estimation for LFG-microturbine CHP system

Items	Annual cost (USD/kW)	Remarks
H ₂ S removal	22,78	absorption capacity = 0.3g/g *
CH ₄ enrichment	19,65	Catalysts cost
compression/ moisture removal	80,67	compressor and chiller unit
siloxane removal	1,30**	absorption capacity = 0.05g/g
other steps	270	5% of capital cost
Total	394.4	

* Data from Dongyang Carbon company

** When the mixture of 50% silica gel and 50% activated carbon is used.

Table 8. Produced profit from LFG-microturbine CHP system

Items	Amount
Electricity generation	7,884kWh/kW *
Heat generation	12,5Gcal/kW *
CDM income	102,56\$/kW **

* Assumed 90% availability

** With assumptions below:

- 0.555CO₂ ton reduction per MWh production
- Replacement heat supply from city gas with 80% boiler efficiency
- 2% of CER adaptation fee
- CER price equivalent to 80% of EUA exchanged at European Climate Exchange (<http://www.ecx.eu/CERemindx>)

농도를 500ppm(328mg/m³)으로 가정할 경우 kWh 당 연료화 비용은 Table 8과 같이 나타났는데 이는 미국 EPA 자료 데이터인 350USD/kW에 거의 근접한 값이다.

3.2 매립지가스 이용 마이크로터빈 발전 - 온실 내 CO₂ 부화 시스템 경제적 이득 예측

매립지가스 이용 마이크로터빈 발전 - 온실 내 CO₂ 부화 시스템 가동 시 이익이 발생하는 부분은 전력 판매, 열 판매, 농작물 생산 증대 및 CDM 수입으로 구분할 수 있고 이를 요약하면 Table 8과 같다.

Chalabi 등(2002)은 토마토 작물 재배에 있어 천연가스 보일러 배가스를 이용하여 온실 내 CO₂ 농도를 높일 때의 경제적 효과를 1972~1975년의 기후 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였는데 각 시나리오별 경제적 이익은 Table 10과 같이 요약될 수 있다.⁽²¹⁾ Table 9에 나타난 것과 같이 CO₂ 농도가

Table 9. Annual crop value margin change with different CO₂ enrichment scenario⁽²¹⁾

Scenario	Annual crop value margin (USD/m ²)
No enrichment	13,5
Enrichment only when heating	33,9
Optimal enrichment*	35,7~42,1

* 3 sub scenarios are included

Table 10. Example of profit estimations from adding CO₂ enrichment system

	Amount (USD)	Remarks
Capital cost*	351,000	5,400 USD/kW
CO ₂ enrichment effect	12,400	22,2 USD/m ² increase compared to no enrichment scenario

* excluded the capital cost for greenhouse

최적 제어될 경우 단위 면적당 농가 수익은 최대 212%가 증가한 것으로 나타났다.

Table 9에서 CO₂ 농도를 최적 제어하는 시나리오 중 배가스 열 회수 시스템이 채택되지 않은 경우의 경제적 이익은 37.7USD/m²으로 마이크로터빈 배가스의 열 회수가 이미 경제적 효과로 고려된 본 시스템의 경제성 분석에서는 이 값을 사용하는 것이 타당한 것으로 보인다.

Table 10은 65kW 마이크로터빈 열병합 발전 설비를 도입하여 500m² 면적의 온실에 CO₂ 부화를 하는 경우 농작물 증대로 인한 수입 증대 효과를 자본 비용과 비교한 것이다.

CO₂ 농도 증가에 의한 경제적 이익은 12,400USD에 달하는데 이는 총 자본 비용인 351,000USD의 3.4%에 해당하는 금액으로 소규모 매립장의 매립지가스 자원화 프로젝트 경제성 향상에 크게 도움이 될 수 있음을 보여준다.

4. 결론

소규모 매립장에서 발생하는 매립가스의 자원화의 경제성 향상 모델로 마이크로터빈 열병합발전이 농작물 재배 효율 향상을 위한 온실 내 CO₂ 농도 증대 시스템의 연계를 제안하였고 기본 설계 과정과 시스템의 타당성에 대해 개략적으로 논하였다.

CO₂ 농도 증대를 통한 광합성 반응 또는 CO₂ 동화 작용의

촉진 그리고 이를 통한 식물의 성장 촉진은 이미 잘 알려진 기술이며 Jaffin 등(2003)이 CO₂ 농도 증대에 의한 농작물 재배량 증가가 매립가스 이용 효과를 넘어선다고 밝힌 바 있듯이 소규모 매립가스 자원화는 물론 대규모 매립가스 자원화 사업의 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.⁽¹⁴⁾ 상용화된 제품의 용량과 열병합발전 효율 그리고 배기가스 품질 등을 검토한 결과 매립가스를 이용하는 다양한 원동기 가운데 마이크로터빈이 소규모 매립가스 자원화에 가장 적합한 것으로 나타났다. 특히 마이크로터빈 배가스는 온실의 열공급과 CO₂ 농도 증가를 위한 온실 직접 주입에 적합하였다. 매립가스 연료화 비용 절감 또는 경제성 향상을 위해 매립가스 CH₄ 농축/H₂S 동시 제거를 위한 액상 촉매 반응탑이 고려되었는데 이 때 가스 부피 감소에 따른 소비 동력 절감을 물론 CO₂ 농도가 높은 상온의 off gas 또한 활용할 수 있다는 장점이 있다.

매립지가스를 이용한 마이크로터빈 열병합발전시스템과 온실 내 CO₂ 부화 시스템에 대한 경제성 평가를 각종 문헌 자료를 바탕으로 수행하였다. CO₂ 부화 시스템이 적용되는 경우 온실 운영으로 인한 수입은 최대 200%까지 증대될 수 있었으며 특히 65kW 용량의 마이크로터빈 열병합 발전 설비와 500m² 면적의 유리 온실 운영을 연계할 경우 CO₂ 부화 인한 연간 경제적 이익은 전체 자본 비용의 3.4% 달하는 것으로 나타나 소규모 매립장의 자원화 프로젝트의 경제성 확보에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.

종합적으로 마이크로터빈 열병합발전이 농작물 재배 효율 향상을 위한 온실 내 CO₂ 농도 증대 시스템을 연계하는 것은 소규모 매립가스 자원화 측면에서 기술적 그리고 경제적인 측면에서 타당한 것으로 보이며 기존 자원화 모델에 비해 경제성 또한 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 다만 CO₂ 농도 증대의 다양한 작물 특성에 대한 영향과 실제 시스템 설치 후 운전을 통한 경제성에 대한 심도 깊은 분석은 추후 연구되어야 할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국중부발전(주)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Paulina Jaramillo, 2005, "Landfill-Gas-to Energy Projects: Analysis of Net Private and Social Benefits", *Environmental Science and Technology*, Vol. 39, No. 19, pp. 7365-7373.
- [2] U.S.A EPA database available at <http://www.epa.gov/landfill/proj/index.htm>
- [3] Lee, J. H., 2008, "The Economic Analysis of Landfill Gas Generation in Solid Waste Disposal Site", Korea Energy Management Corporation
- [4] B. Roberto, L. Piero, 2005, "Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 1391-1401.
- [5] David A. Wilson, Kevin M. Lyons, 2008, "Effects of dilution and co-flow on the stability of lifted non-premixed biogas-like flames", *Fuel*, Vol. 87, pp. 405-413.
- [6] Arthur Wellinger, Anna Lindberg, 1999, "Biogas upgrading and utilization", IEA Bioenergy Task 24.
- [7] Chris Deed, Jan Gronow Alan Rosevear, Peter Braithwaite, Richard Smith, Peter Stanley, 2004, "Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines", *Environment Agency*.
- [8] Raf Dewil, Lise Appels, Jan Baeyens, 2006, "Energy use of biogas hampered by the presence of siloxanes", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 1711-1711.
- [9] 박정극, 허광범, 임상규, 2008, "30kW급 바이오가스 마이크로가스터빈 시험 운전 결과", 2008 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 563-564.
- [10] Martin Schweigkofler, Reinhard Niessner, 2001, "Removal of siloxanes in biogases", *J. of Hazardous Materials*, Vol. 83, pp. 183-1961.
- [11] Ed Wheless, Jeffrey Pierce, 2004, "Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update", In proceedings of 27th SWANA Landfill Gas Symposium. Solid Waste Association of North America.
- [12] S. Assenga, P. D. Jamieson, B. Kimball, P. Pinter, K. Sayre, J. W. Bowden, S. M. Howden, 2004, "Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂", *Field Crops Research*, Vol. 85, pp. 85-102.
- [13] H.-P. Kläring, C. Hauschild, A. Heißner, B. Bar-Yosef, 2007, "Model-based control of CO₂ concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 143, No. 3-4, pp. 208-216.
- [14] A. Jaffrin, N. Bentounes, A. M. Joan, S. Makhlof, 2003, "Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth", *Biosystems Engineering*, Vol. 86, No. 1, pp. 113-123.
- [15] I. Md. Shahidul, M. Toshiyuki, Y. Yuichi, 2000, "Effect of carbon dioxide enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity", *Scientia Horticultureae*, Vol. 65, pp. 137-149.
- [16] Solid Waste Association of North America (SWANA), 2003, *Economic Feasibility Considerations Regarding Landfill Gas Microturbine Systems*, SWANA.
- [17] U.S. EPA, 2009, *LFG Energy Project Development Handbook*, U.S. EPA, Available at <http://epa.gov/lmop/res/handbook.htm>
- [18] Korea Energy Management Corporation (KEMCO), 2009, *2009 Handbook of Energy-Saving & Economic Statistics in Korea*. KEMCO.
- [19] Ki-Hyun Kim, Sang in Oh, YJ Choi, Eui Chan Jeon, Jae Hwan Sa and Young Sunwoo, 2004, *The Analysis of LFG Composition with Respect to Malodorous Sulfur Compounds*, *J. KOSAE*, Vol. 20, No. 1, pp. 77-85.
- [20] 천승규 외, 2005, *매립가스 중 규소화합물류의 측정분석방법 및 자원화시설에 대한 영향 연구보고서*, 수도권매립지관리공사.
- [21] Z. S. Chalabi, A. Biro, B. J. Bailey, D. P. Aikman, K.E. Cockshull, 2002, *Optimal Control Strategies for Carbon Dioxide Enrichment in Greenhouse Tomato Crops, Part II: Using the Exhaust Gases of Natural Gas Fired Boilers*, *Biosystems Engineering*, Vol. 81, No. 3, pp. 323-332.

박 정 극



1999년 연세대학교 기계공학과 공학사
2003년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과
공학석사
2005년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임보연구원
(E-mail : jkparkkepri.re.kr)

허 광 범



1993년 성균관대학교 기계공학과 공학사
2000년 충남대학교 대학원 기계설계공학과
공학석사
2008년 충남대학교 대학원 기계설계공학과
공학박사
1992년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
(E-mail : kbhur5798@hanmail.net)

임 상 규



1982년 중앙대학교 기계공학과 공학사
1982년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 책임연구원
(E-mail : sk6432@kepco.co.kr)

이 인 화



1983년 고려대학교 화학공학과 공학사
1985년 고려대학교 화학공학과 공학석사
1990년 고려대학교 화학공학과 공학박사

현재 조선대학교 환경공학과 교수
(E-mail : ihlee@chosun.ac.kr)