한국신·재생에너지학회 2009년도 춘계학술대회논문집 pp.821~824

# 농작물의 $CO_2$ 고정화 연계 LFG-MGT 시스템의 타당성 연구

*박 정극[1], **허 광범[2], 임 상규[3]

# Feasibility study of LFG-MGT power generation system with $CO_2$ fixation development

*Jungkeuk Park, **Kwangbeom Hur, Sanggyu Rhim

**Key words** : LFG(Landfill Gas)(매립지가스), MGT(마이크로가스터빈), $CO_2$ fixation($CO_2$ 고정), Siloxane(실록산)

**Abstract** : LFG-MGT CHP system development project with $CO_2$ enrichment in greenhouses was introduced. LFG is produced from the anaerobic digestion of landfilled waste and it has been utilized for power/heat generation since it contains around 50% of $CH_4$. Utilization of LFG from small scale landfill is also needed as well as large scale landfill. However, due to economy of scale, it is very difficult to develop business model. In this context, combining CHP system with greenhouses is considered as feasible option for LFG utilization. LFG-MGT CHP system with $CO_2$ fixation in greenhouses has been derived as an active greenhouse gas reduction strategy, The focus of the system is beyond carbon neutral LFG utilization to neutral carbon absorption. The system is feasible in terms of direct and indirect $CO_2$ emission reduction with more economical way.

## 1. 서 론

대기 중의 $CO_2$ 농도 증가로 인한 기후 변화 현상이 전세계적으로 일어나고 있으며 실생활에서도 기후 변화로 인한 변화를 체험할 수 있다. 이에 따라 세계 각국은 신재생에너지 개발과 활용에 많은 노력을 기울이고 있다. 신재생에너지 외에도 CCS(Carbon Capture and Storage, 이산화탄소 포집 및 회수) 기술 또한 온실가스 배출 저감 목표량을 달성하는데 있어 큰 역할을 할 것으로 보인다.

온실가스는 다양한 분야에서 배출되고 있는데 동력, 전력 그리고 열과 같은 에너지 생산에서 발생되는 온실가스 이외에도 하수처리, 쓰레기 매립 등의 분야에서도 다량의 온실가스가 배출된다. 특히 매립지에서 유기성 폐기물의 혐기성 소화에 의해 생성되는 LFG의 주성분은 온실가스인 동시에 연료로 활용될 수 있는 $CH_4$와 대표적 온실가스인 높은 농도로 포함되어 있어 자원화가 시급한 실정이다. 2002년 미국 전체 온실가스 발생량의 9%가 $CH_4$였는데 이 중 32%가 LFG에 의한 것이었다.[1)]

이런 상황에서 세계 각국은 LFG 자원화를 통한 CDM 사업을 추진하여 왔다. 매립지가스의 자원화는 직접 연소와 가스엔진, 스팀터빈 및 가스터빈을 이용한 전력 생산 그리고 $CH_4$ 농축을 통한 차량 이용 또는 도시가스망 공급 등의 다양한 방법을 활용하여 이루어질 수 있다. LFG 자원화의 장점은 이들 이용 기술이 이미 개발되어 있다는 것이다.

2007년 3월 기준으로 세계적으로 등록되었거나 추진 중인 CDM 사업중 LFG 자원화 관련 사업은 총 7%인 125개에 이른다.

이에 따라 국내에서도 LFG 자원화 관련 CDM 사업이 활발하게 진행되고 있는데 수도권 매립지와 대구 방천리의 LFG 자원화 사업이 CDM으로 등록되었으며 부산 생곡 매립장 등 4 곳의 LFG 자원화 사업이 등록을 위한 절차를 밟고 있다.

대규모 매립장에서 발생되는 LFG의 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 발생되는 LFG의 자원화를 위한 보다 경제성이 있는 기술 모델 개발이 시급하다고 할 수 있겠다. 이에 본 논문에서는

소규모 매립장의 LFG 자원화를 위한 모델로 MGT 발전 및 농작물 재배를 통한 $CO_2$ 고정시스템을 제안하고 타당성에 대해 논해 보고자 한다.

## 2. 신규 LFG 자원화 모델의 필요성

### 2.1 절 국내 매립장 LFG 자원화 현황

2007년 작성된 환경부 자료에 따르면 국내에서 현재 사용되고 있는 매립장 수는 총 227개이며 이미 매립이 완료된 매립장까지 포함할 경우 국내 매립장 수는 300개 이상이 된다. 이중 19 곳의 매립지에서 발생되는 LFG(Landfill Gas, 매립지 가스)의 에너지화가 이루어지고 있다. LFG의 자원화는 크게 전력 생산과 보일러 등으로의 가스 공급으로 구분할 수 있는데 19곳의 자원화 설비 중 매립지 15곳의 총 발전 용량은 수도권매립지 공사의 50MW급 스팀 터빈을 포함하여 80.83MW이다. 그리고 가스 공급 용량은 917,238$m^3$/day이다. 2007년에 에너지화 된 LFG는 총 383,830천$m^3$에 이르고 전량 CER 획득에 연계될 경우 233만 톤의 CER 확보가 가능한 양이다.

### 2.2 절 소규모 매립장 현황 및 신규 LFG 자원화 모델 필요성

대규모 매립지에서 발생되는 LFG의 경우 사업 타당성이 확보되는 경우가 많은데 소규모 매립지의 경우 발생 규모의 경제성에 의해 LFG 자원화 사업을 추진하는 것이 어려운 상황이다. 이지환(2008)은 매립지 용량이 10,000~100,000$m^3$인 41개소 매립장에 대해 LFG 자원화 사업의 경제성 평가를 수행하였는데 전력 판매 수익은 물론 CDM 사업 등록을 통한 CER 판매 수익을 고려하는 경우에도 모두 경제성이 없는 것으로 나타났다.[2] 그러나 소규모 매립지에서 발생되는 LFG의 양은 개별적으로는 적은 양이나 전체의 총합은 무시할 수 없는 양이다. 매립시설 용량 1만톤 이상인 매립장의 총 LFG 발생량은 212$m^3$/분에 달하는데 이는 수도권 매립지 LFG 자원화 사업을 기준으로 할 경우 약 20MW 용량의 발전을 할 수 있는 양에 해당한다. 또한 발생되는 모든 가스를 태워서 날려 보내는(flaring) 경우로 가정해도 연간 온실가스 발생량이 $CO_2$ 22만톤에 달한다.

따라서 정부 지원 등을 통한 소규모 매립장 LFG 자원화가 필요하나 이에 앞서 보다 경제성이 확보되는 신규 LFG 자원화 모델 개발이 절실하다고 할 수 있겠다.

## 3. LFG를 이용한 MGT 발전-$CO_2$ 고정 시스템

본 3장에서는 앞서 살펴 본 것과 같이 소규모 매립장에서 발생되는 LFG의 자원화를 위한 신규 모델로 MGT 발전-$CO_2$ 고정 시스템의 타당성에 대해 논하고자 한다.

### 3.1 시스템 구성

LFG를 이용한 MGT 발전-CO2 고정 시스템은 LFG 포집-$CH_4$ 농축/LFG 정제, MGT 열병합발전 그리고 농작물을 이용한 $CO_2$ 고정의 3단계 하부시스템으로 구성되는 시스템 개념도는 Fig.1과 같다.

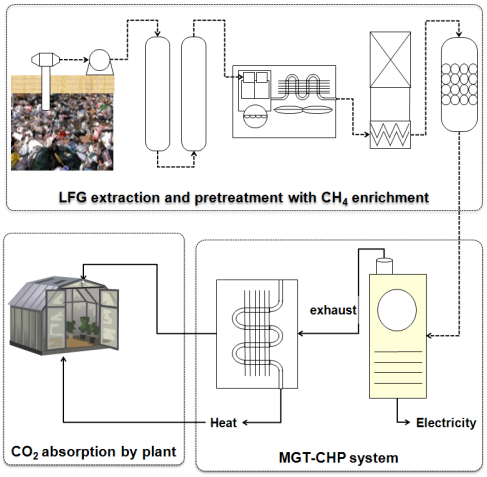


Fig. 1 Schematic diagram of landfill gas-MGT CHP system with greenhouse for $CO_2$ absorption

### 3.2 LFG 포집 및 전처리시스템

포집된 LFG의 조성은 지역에 따라 크게 다르기 때문에 이를 이용하는 시스템은 대부분 연료 LFG 조성에 대한 품질 기준을 가지고 있다. 연료 LFG 조성은 LFG 적용 시스템의 신뢰성과 성능에 큰 영향을 끼친다. 품질 기준의 대표적인 항목에는 발열량(또는 Webber 수), $H_2S$ 농도, $NH_3$ 농도 그리고 실록산 농도가 포함된다.

발열량은 터빈 연소기 내의 화염 안정성에 직접적인 영향을 끼치는데 이는 동일한 열출력을 얻기 위한 유량의 변화에 기인한다.[3] $H_2S$는 부식성이 있고 압축기와 터빈 부품의 마모를 유발할 수 있다.[4] 또한 암모니아의 연소는 NO를 형성할 수 있는데 이는 반응하여 대기 중에 NOx 배출로 연결될 수 있다.[5] 실록산은 연소 후 열교환기 등의 부품에 퇴적되어 성능 저하를 유발시킬 수 있고 가스 엔진 부품 표면을 마모시킬 수 있다.[6]

따라서 LFG를 연료화하기 위한 전처리시스템이 필요하다. 유기성폐기물의 혐기성소화과정에서 발생되는 LFG 또는 바이오가스의 연료 가격은 전처리시스템에 의해 발생되므로 경제적으로 설계되어야 한다. 광주 위생매립장에 설치될 LFG의 연료 조건은 Table 1과 같다. 3.3절에서 언급되겠지만 MGT의 경우 저발열량 가스 연료의 $CH_4$ 기준 농도는 35% 이상으로 대부분의 LFG이 만족할 수 있는 수준이다. 그러나 $CH_4$ 농도가 낮은 경우 화염 안정성이 저하되어 MGT 부하 조절이 힘들며 또한 $CH_4$ 농도가 낮을수록 LFG의 압축 시 손실이 증가하는 단점을 피하기 위해 본 모델에서는 $CH_4$ 농도를 75% 이상으로 설정하였다.

Table 2 Landfill gas fuel conversion specification for LFG-MGT system

| Condition | Requirement |
|---|---|
| CH4 Concentration | over 75% |
| H2S Concentration | under 50ppm |
| NH3 Concentration | under 50ppm |
| Moisture Content | dew point: over -14.3℃ |
| Siloxane Concentration | No detect (5ppb) |
| Fuel pressure | over 0.6MPa |

연료 조건 달성과 경제성 달성을 위한 전처리 시스템의 구성은 Fig 2.와 같다. 가스 냉각 건조기, $CH_4$ 농축 및 $H_2S$ 제거를 위한 액상 촉매 반응기, 가스 압축 그리고 실록산 제거탑으로 이루어진다. 가스 냉각 건조기가 가장 전단에 위치하는 이유는 냉각 응축을 통한 수분 제거 시에 실록산과 $H_2S$도 같이 제거시킬 수가 있어 전처리 경제성과 효율을 동시에 높일 수 있다. Schweigkofler(2001) 등은 LFG 또는 바이오가스의 냉각 응축 건조 과정(5℃로 가스 냉각) 에서 실록산이 9~11% 제거되고 VOC는 20~25% 제거됨을 발견하였다.[7] 또한 SCS 사에 의하면 미국 Calabasas 매립장에서는 LFG가 약 4℃로 냉각되는 경우의 실록산 제거 효과는 15~49%에 달한다.[8]

$CH_4$ 농축에는 PSA 공정, 액상 촉매 또는 멤브레인이 이용되나 액상 촉매를 이용한 방법이 가장 경제적이며 또한 $H_2S$도 동시에 제거할 수 있다는 장점이 있다.

LFG의 이용에 있어 가장 문제가 되는 오염물질은 실록산이다. 실록산에 의한 발전 설비의 피해는 2000년 이후에 다수 보고되었는데 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. 특히 국내의 경우 실록산 함유량 분석에 대한 표준 절차가 확립되지 않았고 시험을 의뢰할 수 있는 기관이 거의 없어 실록산 제거 설비 설계 및 운영에 있어 많은 어려움이 있다.

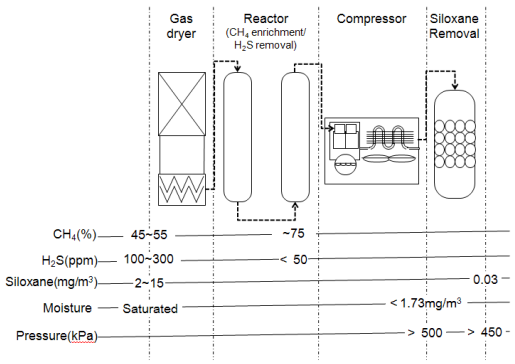


Fig. 2 LFG pretreatment system design

## 3.3 MGT 열병합발전시스템

MGT(Micro Gas Turbine)은 주로 1MW 미만의 소형 가스 터빈을 의미하는데 가스 엔진에 비해 효율은 다소 낮으나 낮은 소음과 유지 보수 비용 저감 등의 장점으로 인해 널리 보급되고 있다. MGT의 제작사로는 Capstone, Ingersollland 그리고 Turbec 등이 있는데 세계 시장의 대부분은 미국의 Capstone 사가 점유하고 있다. 국내에도 아파트 단지를 비롯하여 공주 축산폐수처리장과 속초시 하수처리장에 다수 설치되어 운영되고 있다.

MGT 중 용량이 가장 작은 Capstone사의 CR-30 모델의 제품 사양은 Table 2.와 같다.

Table 3 Capstone CF-30 specification

| Condition | Requirement |
|---|---|
| Electrical Output | 30kW |
| Electrical Efficiency | 26%(LHV) |
| Fuel flow | 415MJ/hr(HHV) |
| Exhaust gas flow | 0.31kg/s 275℃ |
| Siloxane Concentration | No detect (5ppb) |
| Fuel pressure | over 0.6MPa |

Table 2에서 나타난 바와 같이 MGT의 발전 효율은 26%로 가스 엔진의 효율(28~42%)에 비해 다소 낮다는 단점이 있다. 낮은 발전 효율을 만회하기 위해서 275℃에 달하는 배가스를 이용하는 열교환기 또는 흡수식 냉방 설비와 같은 열병합발전설비를 구축해야 한다.

## 3.4 $CO_2$ 고정을 위한 유리 온실

MGT의 배가스의 $CO_2$ 농도는 연료 내의 $CO_2$ 농도에 따라 크게 변한다. 대체적으로 혐기성소화에서 발생한 바이오가스를 MGT에 적용할 경우 배가스의 $CO_2$ 농도는 약 5% 미만이 될 것으로 보이는데 이는 대기 중의 $CO_2$ 농도에 비해 100배 이상 높은 값이다.

온실(greenhouse)는 적정 온도를 유지하여 외부 환경에 관계없이 작물을 재배할 수 있도록 하는 일반적인 설빙이다. 작물의 재배는 대기 온도뿐만 아니라 대기 중의 $CO_2$ 농도에도 크게 영향을 받고 따라서 적정 $CO_2$ 농도를 유지하는 것이 중요하다.

일반적으로 $CO_2$ 농도가 증가함에 따라 밀, 보리, 콩 등을 포함한 많은 식량 작물인 C3 식물의 광합성과 생장은 촉진된다.[9] 광합성은 식물과 조류(algae)의 엽록체에서 일어나는 반응으로 그림 3과 같이 표현될 수 있다.

$$6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

Fig. 3. Photosynthesis reaction

$CO_2$ 농도는 광합성과 식물 생장에 있어 매우

중요하지만 에너지를 절약하기 위해 온실의 환기는 최소화되는 경향이 있고 따라서 온실 내의 $CO_2$ 농도가 낮아져 작물의 생장을 저해하는 일이 일어나기 쉽다.[10] 온실 내의 $CO_2$ 농도 저하를 방지하고 광합성을 촉진하기 위해 온실 내에 $CO_2$를 주입하여 $CO_2$ 농도를 높여주는 연구가 다수 수행된 바 있다.

따라서 온도가 높고 $CO_2$ 농도가 상대적으로 높은 LFG를 이용한 MGT의 배가스를 농작물 재배를 위한 온실에 이용하는 것은 에너지 효율 증대 및 온실가스 저감 측면에서 긍정적인 조합으로 보인다.

H.-P. Klà.ing 등(2007)은 $CO_2$ 농도가 오이 생장에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였는데 결과는 Table 3에 요약된 바와 같으며 온실 내 CO2 농도를 대기 중의 $CO_2$ 농도 수준인 380μmol/mol로 유지한 경우 $CO_2$ 농도 제어를 하지 않은 경우에 비해 오이 수율이 최대 35%까지 증가한 것으로 나타났다.[10]

**Table 4. Growth characteristics of cucumber with $CO_2$ supply into greenhouses [10]**

| Characteristic | Spring | | Autumn | |
|---|---|---|---|---|
| | U* | S* | U | S |
| Cucumber yield(kg/m$^2$) | 3.30 | 4.52 | 3.32 | 4.60 |
| Fruit size(g) | 378 | 421 | 353 | 389 |
| Fruit fraction(g/g)* | 0.525 | 0.544 | 0.543 | 0.615 |
| Leaf-to-root ratio(g/g)* | 3.96 | 4.27 | 3.68 | 3.63 |

* U: $CO_2$ Unsupplied Case
S: $CO_2$ Supplied Case

Tabel 3에 나타난 바와 같이 $CO_2$ 농도의 증가는 작물의 재배 수율뿐만 아니라 leaf to ratio, fruit faction 등 작물의 다양한 특성에 변화가 발생하고 심지어 작물의 영양소 구성 또한 영향을 받게 된다. 따라서 $CO_2$ 농도 증가가 작물에 미치는 영향이 심도 있게 분석되어야 한다.

## 4. 결 론

대규모 매립장에서 발생되는 LFG를 이용하기 위한 노력이 활발하게 진행되고 있으며 상당한 성과를 올리고 있다. 그러나 경제성이 확보되지 않은 소규모 매립장에서 발생되는 LFG의 자원화 노력은 장기적인 측면에서 필수적이라 할 수 있다. 사업성 확보를 위해 경제성 및 효율 측면에서 향상된 LFG 전처리시스템을 개념적으로 설계하였으며 소규모 매립장에서의 LFG 자원화 모델로서 MGT 열병합발전 및 유리 온실을 통한 CO2 고정시스템을 개략적으로 살펴보았다.

액상 촉매를 이용한 LFG의 CH4 농축/H2S 제거 공정과 가스 냉각 건조 공정의 위치 변경을 통한 실록산 제거 비용 절감이 검토되었다. 또한 유리 온실을 통한 농작물 재배에 온도가 높고 $CO_2$ 농도가 높은 MGT 배가스를 적용하는 것은 기술 조합으로서의 가치가 높은 것으로 평가되었다. 다만 $CO_2$ 농도가 각종 작물의 다양한 특성에 미치는 영향이 충분히 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] Lee, J. H., 2008, "The Economic Analysis of Landfill Gas Generation in Solid Waste Disposal Site," Korea Energy Management Corporation

[3] 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.

[4] Arthur Wellinger, Anna Lindberg, 1999, “Biogas upgrading and utilization”, IEA Bioenergy Task 24.

[5] Chris Deed, Jan Gronow Alan Rosevear, Peter Braithwaite, Richard Smith, Peter Stanley, 2004, “Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines”, Environment Agency.

[6]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.

[7] Martin Schweigkofler, Reinhard Niessner, 2001, "Removal of siloxanes in biogases," J. of Hazadous Materials, Vol.83, pp.183-1961.

[8] 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.

[9] S. Assenga et al., 2004, “Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric $CO_2$”, Field Crops Research, Vol.85, pp.85-102.

[10] H.-P. Klà.ing et al., 2007, “Model-based control of $CO_2$ concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield”, Agricultural and Forest Meteorology, Vol.143, No3-4, pp.208-216.