[2011-6-BM-001]

5MW급 바이오 가스터빈용 전처리시스템 설계연구

허광범*, 박정극, 윤은영, 이정빈

Design Study of Fuel Supply System for 5MW-class Bio Gasturbine by Using Food Waste Water

Kwang-beom Hur*, Jung-keuk Park, Eun-young Yun and Jung-bin Lee

Abstract Korea is the 11th largest energy consumption country and 96% of its total energy consumption depends on imports from overseas. Therefore it is a very important task to secure renewable energy sources which can reduce both the carbon-dioxide emission and dependency on overseas energy imports. Among the various renewable energy sources, organic wastes are important sources. In Korea, 113 million toe of methane is generated from organic wastes annually, but only 3.7% is effectively used for energy conversion. Thus, it is very important to make better use of organic wastes, especially for power generation. The goals of this project are to develope the fuel supplying system of Bio Gasturbine (GT) for 5MW-class co-generation system. The fuel supplying system mainly consists of H_2S removal system, Bio Gas compression system, Siloxane removal system and moisture separating systems. The fuel requirement of 5MW-class GT is at around 60% of CH_4, H_2S (<30 ppm), Siloxane(<10 mg/nm^3) and supply pressure (> 25 bar) from biogas compressor. Main mechnical charateristics of Bio Gasturbine system have the specific performance; 1) high speed turbine speed (12,840 rpm) 2) very clean emmission NOx (<50 ppm) 3) high efficiency of energy conversion rate. This paper focuses on the development of design technology for food waste biogas pretreatment system for 5MW-class biogas turbine. The study also has the plan to replace the fuel of gas turbine and other distributed power systems. As the increase of bioenergy, this system help to contribute to spread more New & Renewable Energy and the establishment of Renewable Portfolio Standards (RPS) for Korea.

Key words Food waste gas(음폐수 가스), Bio GasTurbine(바이오 가스터빈), H_2S Conditioning System(탈황시스템), Design development (설계 개발) Renewable Portfolio Standards(신재생에너지 의무발전비율)

(접수일: 2011. 2. 18, 수정일: 2011. 6. 3, 게재확정일: 2011. 6. 3)

* 한국전력공사 전력연구원
■ E-mail : kbhur5798@hanmail.net ■ Tel : (011)852-5619 ■ Fax : (042)865-5679

1. 서 론

화석연료 사용의 급격한 증가와 이로 인한 온실가스 배출은 지구 평균 온도의 지속적인 상승을 초래 하였다. 전 세계적으로 1차 에너지 소비는 2030년까지 연평균 1.5%씩, 총 40%가 증가될 전망이다. 그중 화석연료는 80%로 여전히 절대적 비

중을 차지할 것으로 예상된다. 에너지연소에 의한 CO2 배출량은 2030년까지 약 50%증가될 전망이며 이러한 온실가스배출량의 가파른 증가는 기후변화에 큰 영향을 미치고 있다.

더욱이 우리나라는 '08년 기준으로 세계 11위의 에너지 소비국이며 총에너지의 96%를 해외 수입에 의존하고 있다. 따라서 이산화탄소 배출을 줄이고 에너지 의존도를 낮출 수 있는 새로운 에너지원인 '신재생에너지'확보는 중요한 과제가 아닐 수 없다. 여러 가지 신재생에너지 중 유기성 폐기물이 중요한 자원인데, 국내에서 메탄이 113만 toe/년이 발생하지만 현재 단지 3.7%만이 에너지로 전화되어 사용되고 있다. 따라서 유기성폐기물에서 발생되는 에너지 활용도를 높이는 것은 큰 의미를 지닌다. 또한 런던협약, '96의정서가 채택되어 유기성폐기물 해양배출이 엄격히 제한됨에 따라 폐기물 처리과정을 통하여 에너지원화 하는 것이 시급하다[1-3]. 가스터빈은 주로 천연가스를 연료로 사용하는 장치이지만 연료유연성을 가지고 있기 때문에 여러 가지 종류의 연료를 사용할 수도 있다. 따라서 유기성 폐기물에서 발생한 바이오 가스를 사용하는 발전 시스템 개발은 바이오가스의 유효 에너지화를 위한 기술적 다양성을 제공하는 좋은 기회가 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 국내외 음식폐수 바이오 가스를 이용한 가스터빈 발전시스템에 적용할 최적의 전처리 시스템 설계 기술을 분석하고 5MW급 바이오 가스터빈용 전처리 시스템을 설계개발 하고자 한다.

2. 기술개요 및 동향분석

2.1 바이오 가스내 H_2S 발생원리

음폐수 바이오 가스는 유기물의 혐기성 소화를 이용한 것으로써 이 현상은 산소가 존재하지 않는 자연계(예를 들면 물속)에서 유기물이 가수분해, 소화되면서 유기산, 메탄가스와 암모니아 등으로 순차적으로 분해되는 과정에서 발생한다.

황산염 분해 박테리아의 혐기성 소화를 위한 최적 pH 범위는 6.0~8.0이지만, 메탄의 생성은 pH 6.75~7.55의 범위에서 더 효율적이다. 온도는 황화수소 생성에 중요한 역할을 하는데 30℃에서 생성률이 가장 높다. 황화물은 용액 상태에서 약산이고 일단 생성되면 생성물의 형태는 pH의 영향을 받는다(식 (1), 식 (2)). 중성 pH에서 약 50%는 $H_2S(aq)$ 형태로 존재한다. 용액과 기체 중 H_2S의 화학평형은 Henry의 법칙(식 (3))을 따르며, 이 역시 온도의 영향을 받는다[4,5].

$$H_2S(l) = HS^- + H^+ \qquad pKa = 7.04\ (18℃) \qquad (1)$$

$$HS^- = S^{2-} + H^+ \qquad pKa = 11.96\ (18℃) \qquad (2)$$

$$H_2S(l) = \alpha H_2S(g) \qquad \alpha = K_h = 1.99\ (30℃) \qquad (3)$$

황화수소(H_2S)의 최대 한계 농도는 나라와 지역별로 각기 다른경향을 보이는데, 황화수소의 경우, 설비의 부식성 야기뿐 아니라 인체의 유해성과도 직접적인 연관성이 있는 물질로서 이를 후속공정에 영향을 주지 않는 범위내로 저감되어야 할 필요성이 제기된다.

2.2 실록산 발생특성

록산이란 메틸, 에틸 또는 다른 작용기을 가지고 있는 실리콘에 산소와 결합된 실리콘 화합물(Si-O-Si)을 말한다. 실록산은 높은 압축성, 낮은 화염성, 낮은 표면장력 및 방수성, 고온 안정성등 매우 우수한 특성을 가지고 있어 다양하게 사용되고 있다. 게다가 실록산은 독성 및 알레르기가 매우 낮아 우리 생활용품에 널리 사용되고 있다. 반면, 실록산이 대기중에 노출되어 열화하게 되면 휘발성유기화합물(VOC)의 규제대상물질이다[6,7].

실록산은 샴푸, 화장품등 생활용품과 제제류, 코팅류등에 사용되는 공업용품등에 함유되어 있는 실리콘이 사용 후 폐기된 인위적인 실리콘 화합물로서, 하수처리장이나 매립장에서 발생하는 바이오가스에 함유되어 있다. 실록산의 년간 세계 생산량은 백만톤 이상으로 추정하고 있다. 실록산과 실리콘은 널리 사용되고 있으며 Fig. 1에서 가장 일반적인 제품들을 보여주고 있다.

실록산의 구조는 선형과 환형이 있으며, 실록산(Siloxane)은 실

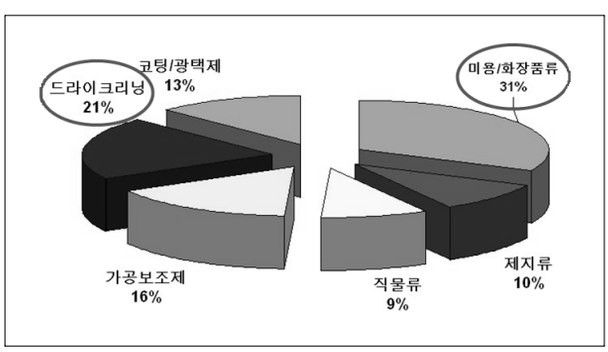

Fig. 1 Siloxane sources[7]

Table 1. Siloxane characteristics[8]

약어	분자식	분자량	증기압(25℃, mmHg)
D3	C12H18O3Si3	222	10
D4	C8H24O4Si4	297	1.3
D5	C10H30O5Si5	371	0.4
D6	C12H36O6Si6	445	0.02
L2	C6H18OSi2	162	31
L3	C8H24O2Si3	236	3.9
L4	C10H30O3Si4	301	0.55
L5	C12H36O4Si5	384	0.07

리콘(Silicon), 산소(Oxygen) 및 메탄(Methane)의 합성어이다. 슬러지 혐기소화시 발생하는 바이오가스에 실록산은 휘발성 실록산이며, 비휘발성의 polydimethylcyclosiloxane[-(Me2SiO)x-]은 낮은 증기압으로 인해 바이오 가스중에 함유되지는 않는다.

바이오가스에 함유되어 있는 실록산의 종류 및 물성은 Table 1에서 보여주고 있으며 실록산의 이름이 길기 때문에 편의상 약자를 사용하고 있다. 환형구조을 가지고 있는 실록산은 간단히 "D"로, 선형구조을 가지고 있는 실록산을 "L" 또는 "M"으로 표기한다. Table 1에서는 실록산에 대한 분자식, 분자량, 증기압을 나태내고 있다.

2.3 국내외 개발 현황분석[12]

신재생에너지 중 유기성폐기물 바이오 에너지를 이용한 가스터빈 열병합 발전시스템의 최적화를 위하여 연료화 전처리 시스템 기술개발 및 적용을 추진하고 있다. Fig. 2에서는 미국 LA Calabasas 매립장에 설치된 마이크로 가스터빈용 연료화 전처리시스템을 보여주고 있다. 이 시스템은 바이오 가스내 포함된 불순물인 황화수소(H_2S), 실록산(Siloxane), 수분 등을 제거하는 정제시설과 바이오 가스를 압축해 주는 압축기 및 냉각기 등으로 구성되어 있다[9-11].

Fig. 2 4.6MW-CLASS Biogas turbine & Fuel pretreatment system[10] (Calabasas, CA, USA)

3. 전처리시스템 공정설계

3.1 발전시스템 연료조건 및 성능

본 5MW급 바이오 가스터빈 열병합 발전시스템이 설치될 수도권 매립지 폐자원에너지타운내에 반입되는 음식폐기물은 하루평균 서울특별시에서 200톤, 인천광역시에서 100톤, 경기도에서 200톤 등 전체 500톤이 처리될 예정이며 바이오가스 발생량은 25,838 NM3/D이다.

바이오 가스터빈의 연료 요구요건과 관련하여 각 가스터빈 제작사에서는 바이오 연료의 물리적 성질과 요구되는 연료 조성을 제시하고 있다. 이들 요구 조건들이 모두 중요하고 관찰되어야 하고 바이오 가스와 관련된 가장 중요한 제한 조건은 다음과 같이 기술될 수 있다[13].

- 연료 온도는 가스터빈 전단에서 연료의 이슬점보다 20℃ 이상 되어야 한다.
- 발열량(평균 고위발열량, LHV)는 최소한 58.7 E6kJ/hr 은 되어야 한다.

실록산(Siloxane)의 쓰레기 매립지 가스와 폐수처리장에서의 바이오 가스에서 주로 발생이 된다. 실록산은 가스의 연소 시

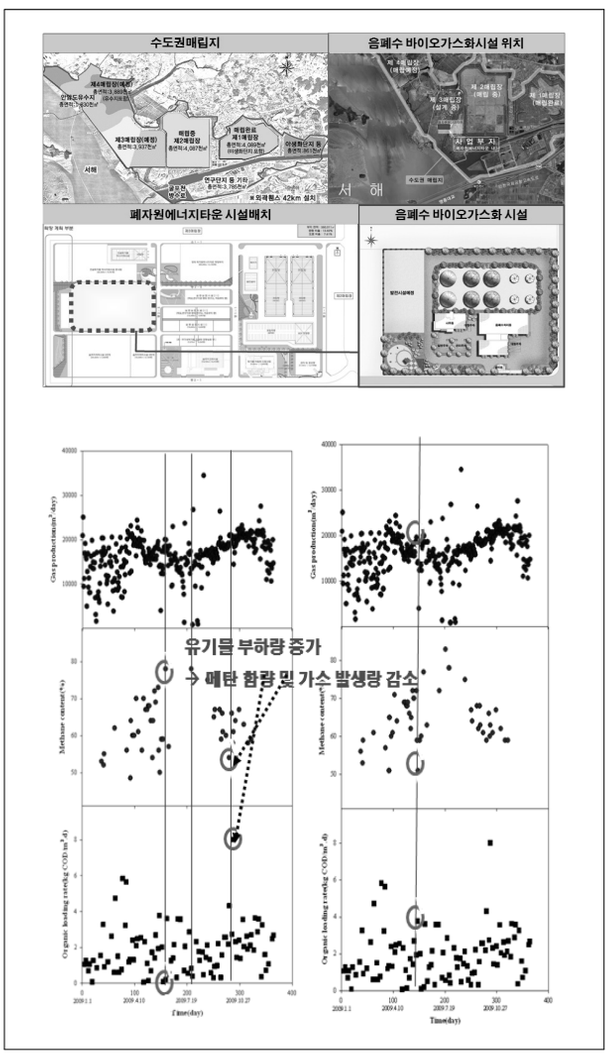

Fig. 3 Layout of food waste treatment system and biogas component at Sudokwan landfill site[12] (methane range: 48.5 - 83%)

SiO_2를 생성하여, 자원화 설비의 효율저하와 가동중지를 유발시키는 원인이 되고 있어 이를 제거하기 위한 전처리 기술이의 개발이 시급한 실정이다. 실록산의 제거 기술에는 냉각법(cooling and chilling), 심냉법(freezing), 흡수법(absorption), 흡착법(adsorption) 등이 있으며, 그 중 흡착법이 초기투자비용과 유지보수비 및 제거효율이 가장 뛰어난 것으로 알려져 있다[14].

3.2 바이오 가스터빈 발전시스템 구성

가스터빈은 압축기, 터빈등 회전하면서 일을 받거나 방출

Table 2. Design point of 5MW-class biogas turbine fuel treatment system

Parameter	Performance
CH_4 %	60%
H_2S, ppm	〈 30ppm
SILOXANE	Reviewing
NH_3, ppm	〈 50ppm
수분, %	0%
Fuel pressure kg/cm^2	25.5
Fuel temperature ℃	〈 60
Flow rate nm^3/hr	3,180
연료공급 온도	20℃ 이상
유분 함량	2ppm 미만

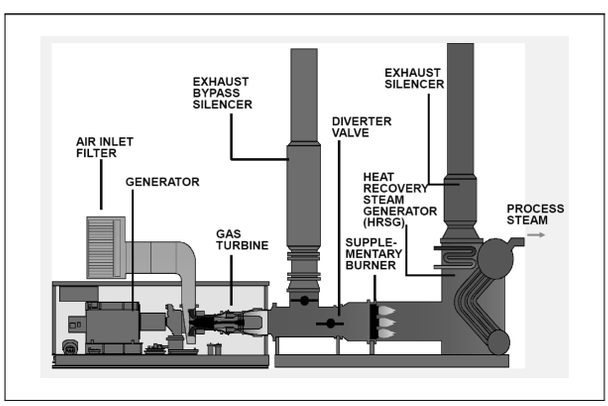

Fig. 4 Schematic diagram of biogasturbine[8]

하는 터보기기 연료의 연소에 의해서 고온의 가스를 생성하는 연소기등의 주요구성부와 각 구성부를 연결하고, 유동을 안내하는 덕트등 열유체 기기들로 구성된 시스템이다. 따라서 이러한 주요 구성부들에 대한 합리적이고 정확한 모델링이 요구된다. 아울러서 기관내에서 온도의 변화폭이 크고, 압력도 심하게 상승, 하강하며, 연소반응에 의하여 작동유체의 조성도 많이 변하므로 물성치를 정확하게 예측하는 것이 중요하다.

현재 작동중이거나 적용이 예상되는 가스터빈 시스템은 터빈입구 온도가 매우 높으므로, 터빈 블레이드를 포함한 고온부에 적절한 냉각이 필요하며, 경우에 따라서는 압축기 입구 공기의 20%를 상회하는 다량의 냉각 유량을 사용하기도 한다. 따라서 터빈내의 현상은 매우 복잡하여 이를 정확하게 예측하기란 쉽지 않다. 냉각이 필요한 이유는 블레이드를 포함한 고온부 재질의 내열한계 때문이다. 재료의 내열성이 향상

되고 있으나, 터빈입구온도의 증가가 더 빠른 속도로 진행되고 있기 때문에, 여전히 냉각은 필요하고, 오히려 예전에 비하여 더 많은 양의 냉각유체를 필요로 한다. 블레이드 냉각 방법으로는 내부대류냉각(internal convective cooling), 충동제트냉각(impingement jet cooling), 막냉각(film cooling), 투과냉각(trsnspiration cooling)등을 들 수 있으며, 후자일수로 냉각 효율이 높다. 가스 온도가 상당히 높은 경우에는 주로 제트충동냉각, 막냉각등의 복합한 방식을 사용하고, 그리 높지 않은 경우에는 충돌냉각과 대류냉각의 혼합형을 채택하고 있다[15].

냉각유체로는 주로 압축기에서 추출된 공기를 사용한다. 냉각유체의 자연스러운 주유동내로의 분출을 위하여 냉각공기는 주로 압축기 출구에서 추출하여 사용하여 왔으나, 현재에는 여러단의 냉각을 하는 고성능 시스템에서는 비교적 낮은 온도의 냉각유체를 이용하여 냉각 유량을 감소시키기 위하여 후단 노즐열에서 압축기 중간단의 공기를 사용하기도 한다. 그러나 분사의 어려움등으로 인하여 모든 로터들의 냉각에는 주로 압축기 출구공기를 사용하는 편이다. 또한 더욱 냉각효과를 높이기 위하여 냉각공기를 외부 열교환기를 통하여 냉각시킨 뒤 분사하는 방법이 사용되기도 한다[15,16].

Table 3. Performance parameter of 5MW-class biogas turbine system

component	Parameters	Reference data
Inlet	Air temperature (K)	288.15
	Air pressure (kPa)	101.3
	Pressure loss (%)	5
Compressor	Pressure ratio	14
	Number of stages	axial 10단+centrifugal 1단
	Isentropic efficiency (%)	83
Combustor	Fuel flow rate (kg/s)	0.3307
	Lower heating value kJ/kg)	49300
	Pressure loss (%)	6.5
Exhaust gas	Gas flow rate (kg/s)	21.52
	Pressure loss (%)	2.7
Performance	Gearbox efficiency (%)	98
	Power (kW)	5250
	Thermal efficiency (%)	32

3.3 전처리 시스템 공정설계

본 전처리 시스템 공정설계는 음식폐기물 바이오가스를 5MW급 바이오 가스터빈 발전용으로 연료화 할 수 있도록 정제를 하는 설비로서, 황화수소 제거시스템, 수분 제거기, 압축기, 칠러, 열교환기, 실록산 제거시스템, 계측 장치, 배관 및 피팅류 등 세부 장치로 이루어져 있다. 전처리 시스템의 주요 설계인자로는 기본 공정조건과 각 세부시스템의 구조로 표시할 수 있으며 바이오 가스 온도, 압력, 유량, 흡착제 성능 등이고 구조인자로는 불순물 제거시스템별 내부 구조, 높이, 직경으로 표시된다.

본 연구에서 설계 제작된 5MW급 바이오 가스터빈용 전처리 시스템 최종 출구에서 공급되는 연료 가스는 Table 2에서 명시하는 주요 연료 조건을 반드시 만족시킬 수 있어야 한다.

바이오 가스에 포함된 H_2S를 내부 충진물의 흡착으로 제거하는 제거 장치로, 수분 또는 H_2S 그리고 외부 환경에 의해서도 부식이 일어나지 않는 재질로 이루어지며 외부 도장 작업 또한 적절히 수행되어야 한다. 5MW급 바이오 가스터빈의 입구요구 압력인 25bar 이상의 압력으로 압축시켜주어야 하며 유지·보수가 용이하며 바이오 가스에 의한 윤활유의 오염이 최소화 되는 제품이어야 한다. Fig. 5의 전처리시스템은 바이오 가스에 포함된 Siloxane을 내부 충진물의 흡착으로 제거하는 제거 장치로, 수분 또는 H_2S 그리고 외부 환경에 의해서도 부식이 일어나지 않는 오스테나이트 재질로 이루어지며 외부 도장 작업 또한 적절히 수행되어야 한다[17-19]. Fig. 5는 5MW급 바이오가스터빈용 전처리시스템 공정설계도로서 음식폐수 바이오 가스 전처리시스템 및 이를 통한 소형 가스터

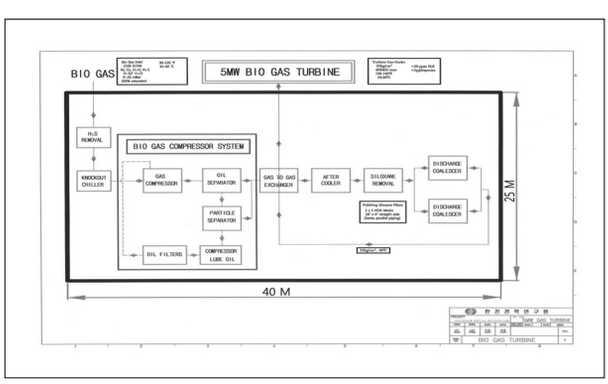

Fig. 5 Process design drawing of fuel treatment system for 5MW-class biogas turbine

빈 열병합발전시스템까지의 전체적인 공정을 나타낸다.

3.4 흡착제 물성 및 특성 메커니즘[8]

활성탄은 입자 하나 하나에 잘 발달된 무수한 미세공으로 이루어진 무정형의 탄소의 집합체이며 그 미세공(Micro Pore, Transitional Pore, Macro Pore)은 상호 연결되는 무수한 통로로 구성되어 넓은 내부표면적을 갖고 있다.

이 표면적은 상대분자 크기에 따른 세공의 크기의 적합성과 함께 활성탄의 생명인 흡착능력을 좌우하게 되며 활성탄소 1g은 1,000~1,600m^2의 대단히 넓은 표면적을 갖고 있으며 세공의 분포는 10Å의 세공구조를 주로 하여 150,000Å로 존재하는 해면상의 다공질이다.

활성탄은 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

① 유기물분자에 대해 고도의 흡착 능력을 갖고 있다.
② 미세기공(Micropore)이 잘 발달되어 유효 표면적이 매우 넓다(1000m^2/1g 이상)
③ 물리적, 기계적 강도가 크다.
④ 내열성이 우수하며 재생시 손실이 적다.
⑤ 회분이 적고 순도가 높아 고도여과(정화)시설에 적합하다.

흡착이란 활성탄소가 어떤 성분을 흡착하고 있을 때 흡착된 성분을 피흡착질(Adsorbate), 활성탄를 흡착제(Adsorbent)라고 한다. 흡착량은 활성탄소의 단위면적 또는 단위 질량에 대한 피흡착질의 질량, 중량으로 표시하거나 혹은 흡착분자수로 나타낸다. 그리고 전면적을 점유한 양을 포화흡착량이라 하며 실제로 피흡착질이 점유한 비율을 흡착율 또는 피복율(Coverage)이라고 한다. 피흡착질이 활성탄에 흡착되는 과정은 다음과 같다.

· 1단계; 피흡착질분자들이 흡착제(활성탄소) 외부 표면으로 이동
· 2단계; 피흡착질이 활성탄소의 대세공, 중간세공을 통해 확산
· 3단계; 확산된 피흡착질이 미세공 내부표면과의 결합 또는 미세공에 채워짐

일반적으로 알려진 흡착메커니즘은 물리흡착과 화학흡착으로 나뉜다. 물리흡착은 가스분자의 고체에 대한 약한 결합력을 가지며 결합에너지는 액체분자사이의 인력과 비슷하다. 흡착과정은 발열반응이며, 흡착열은 보통 피흡착물의 증발열보다 약간 높다. 고체에 가스분자들을 끌어당기는 힘은 온도가 증가하거나 압력이 감소하면 쉽게 사라진다, 이러한 원리들은 흡착제를 재생시키는데 이용되고 있다. 화학흡착은 흡착제와 피흡착물과의 반응에 의한 실제 화학결합을 포함한다. 화학흡착열은 반응열과 비슷한 수준이며, 화학흡착은 비가역적이다.

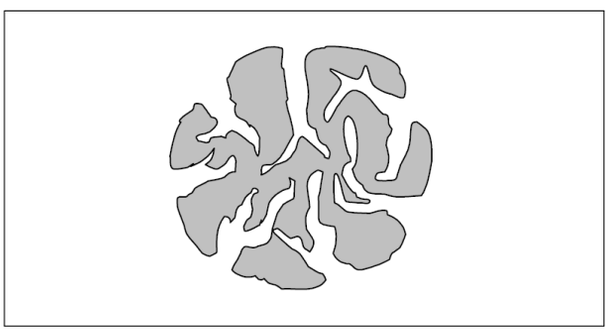

Fig. 6 Structure of Activated carbon[8]

3.5 전처리 시스템 설계개발

본 논문에서는 수도권매립지 음식폐수를 이용한 5MW급 바이오 가스터빈 발전용 전처리시스템의 설계 개발도면은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 바이오 가스에 포함된 수분을 응축하여 제거하는 열교환 장치와 열교환기를 통과한 최종 수분을 Demister에 의해 제거하는 장치로서, 외부탑은 수분 또는 H_2S 그리고 외부 환경에 의해서도 부식이 일어나지 않는 재질로 구성되어야 한다. 이에 맞는 Data 값을 토대로 설계제작 하였다.

바이오 가스에 포함된 황화수소 성분은 그 유독성이 매우

Table 4. 흡착제 물성 및 특성

흡착제	유형	입자크기	특징
CarbopackB 60/40	Activated charcoal	60/80mesh	porous
Carbotrap™ 20/40	Graphitized carbon	20/40mesh	non-porous
Norit ROZ3	Activated carbon	3mm diameter	-
Silica gel	Bead	1,5~3mm diameter	-
Activated alumina	Granule		

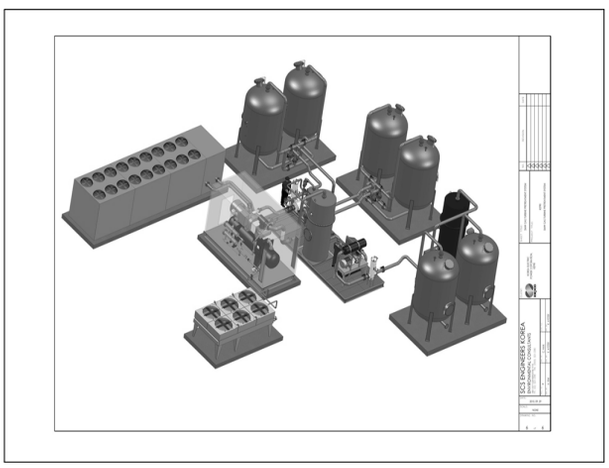

Fig. 7 Schematic diagram of Food waste biogas pretreatment system (Sudokwan Land Fill Site)

심하고 가스터빈에 치명적인 가스로서 500-5000ppm 범위로 분석됨으로써 효율적으로 제거하기 위한 정제장치내에 KOH, NaOH를 첨착한 흡착탑을 설계하였다. 또한, 규소화합물인 Siloxane은 마이크로 가스터빈 연소기나 재생열교환기에 퇴적되어 심각한 손상을 초래하고 그 수명을 단축시키는 물질이다. 효율적인 제거를 위하여 효과적인 흡착제를 충진하고 출구측 기준 10mg/nm^{3}이하로 제어되도록 제거탑을 설계하였다.

4. 결 론

음식폐기물 바이오 에너지를 이용한 5MW급 바이오 가스터빈 발전용 전처리 시스템의 설계기술 개발을 통한 국내 신재생에너지 보급활성화에 기여하는 바가 클 것으로 예상되고 있다.

이러한 현 상황은 버려지는 폐자원의 자원화라는 국가적 차원의 유효에너지 이용율 향상을 기대할 수 있고 kW급에서 수십 MW규모의 가스터빈을 개발 적용함으로써 국내 산업의 인프라를 확고히 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 국내에서 최초로 음식폐기물 바이오 에너지를 이용한 5MW급 바이오 가스터빈 설계기술을 개발하여 향후 신재생에너지 의무 발전비율에(Renewable Portpolio Standards) 확대적용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(5MW급 바이오 가스터빈용 전처리시스템 개발)(No. 2009T100200127).

References

[1] Hector L-A, Ricardo L, Tomas V-G, 2000, "A film-penetration model for non-isothermal absorption with chemical reaction" Chemical Engineering Science, vol. 55, pp. 5897-5906.

[2] K. B. Hur, S. G. Rhim, J. K. Park, G. G. Yoon, 2008, "Development of distributed micro gas turbine technology with connection", Korea Electric Power Research, TR, pp. 203-208.

[3] J. G, Lee, 2010, "Report of Hydro sulfide remove processes", Report for KEPCO. pp. 24-27.

[4] L.V.-A. Truong, N. Abatzoglou, 2005, "A H2S reactive adsorption process for the purification of biogas prior to its use as a bioenergy vector", Biomass and Bioenergy, vol. 29, pp. 142-151.

[5] P. A. Pilavachi, 2002, "Mini- and Micro-gasfor Combined Heat and Power", Applied Thermal Engineering, No. 22, pp. 201-207.

[6] P. L. McCarty, 1964, "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals", Public Works, pp. 95.

[7] A. Nicolas, B. Steve, 2008, "A review of biogas purification processes", Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Vol. 3. pp. 42-71.

[8] K. B. Hur, J. K. Park,J. G, Lee, 2011.02, "Technical Memo of characteristics evaluation for siloxane removal absorbent", TM.K02.P2011.0093, pp. 10-25.

[9] K. B. Hur, S. K. Rhim, J. K. Park, J. H. Kim, 2007, "System Development of Micro Gas Turbine co-generation", Key Engineering Materials, Vols. 345-346, pp. 1003-1006.

[10] Solar Turbines, 2008, "Specification of fuel, air, water (or steam) & compressor cleaning fluids for solar gas turbine engines", specification no. ES 9-98C.

[11] M. Takashima, R. E. Speece, 1989, "Mineral Nutrient Requirements for High-Rate Methane Fermentation of Acetate at Low SRT", Journal WPCF, 61(11/12), 1645-1650.

[12] 수도권 광역 음폐수 바이오 가스화 시설 설치공사 실시설계 공정 및 기계분야 보고서, 2010.12.

[13] K. B. Hur, S. K. Rhim, J. K. Park, J. H. Kim, 2008. 3, "Test Evaluation of Pretreatment System Material for

Bio-gas Micro Gas Turbine Power Generation", The Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 37-43.

[14] K. B. Hur, S. K. Rhim, J. K. Park, J. H. Kim, 2008.7.7, "CFD analysis in the sulfur removal tower for MGT system", The 5th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD5) 2008.7. 7 - 7. 11, Seoul National University, Seoul.

[15] 김동섭, 황성훈, 2004, "마이크로 가스터빈의 탈설계 운전 성능특성", 유체기계저널, 제7권, 제3호, pp. 39-47.

[16] K. B. Hur, S. K. Rhim, J. K. Park, 2009.11.5, "Integrated design of bio micro gas turbine co-generation system", COmputational Design in Engineering 2009, Seoul, pp. 466-469.

[17] K. B. Hur, S. K. Rhim, J. K. Park, J. H. Kim, 2008.8, "Development of Performance Simulation Models for MGT", Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 4, pp. 52-62.

[18-19]

허 광 범

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

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

박 정 극

1999년 연세대학교 기계공학과 공학사
2003년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 공학석사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원
(E-mail : serendipity@kepri.re.kr)

윤 은 영

2007년 한발대학교 환경공학과 공학사
2009년 한발대학교 대학원 환경공학과 공학석사

현 재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 위촉연구원
(E-mail : proposal84@naver.com)

이 정 빈

1984년 한양대학교 화학공학과 학사
1986년 한양대학교 대학원 화학공학과 공학석사
1997년 한국과학기술원 화학공학과 공학박사
1986년 한국전력공사 입사

현재 한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소 책임연구원
(E-mail : jblee@kepri.re.kr)