

마이크로 가스터빈(MGT) 성능 시뮬레이션 모델 개발

허광범* · 박정극* · 임상규* · 김재훈**

Development of Performance Simulation Models for MGT

Kwang-beom Hur*, Jung-keuk Park*, Sang-kyu Rhim*, Jae-hoon Kim**

Key Words : Micro Gas Turbine(마이크로 가스터빈), Biomass Fuel(바이오매스 연료), Simulation(시뮬레이션), Sensitivity Study(민감도 분석), Performance Analysis(성능해석)

ABSTRACT

All forecasts of a future energy demand anticipate an increase across the globe. With the increase of energy demand, the emission of CO₂ is also likely to increase by at least the same amount because energy supply will be based on fossil fuels, which is more apparent in a number of developing countries. In this context, the Micro Gas Turbine (MGT) is being considered as a promising solution. In order to propose a feasible concept of those technologies such as improving environmental effect and economics, we performed a sensitivity study for a biomass fueled MGT using a simulation model. The study consists of 1) the fundamental modeling using manufacturer's technical specifications, 2) the correction with the experimental data, and 3) the sensitivity study for system parameters. The simulation model was developed by PEPSE-GT 72, commercial steam/gas turbine simulation toolbox.

1. 서론

전 세계적으로 에너지 수요가 급격히 증가할 것이라는 예측은 많은 문헌을 통해 접할 수 있다.^(1,2) 특히 전력 에너지는 편리성, 안전성, 환경친화성 등 때문에 다른 에너지원의 수요 증가보다 더 가파르게 증가할 것으로 예상된다.⁽²⁾ 따라서 현재 재생에너지가 보급되는 추세를 고려하였을 때, 앞으로도 상당한 기간 동안 화석연료의 의존도가 매우 높을 것으로 전망된다. 화석연료 중에서 천연가스의 소비에 주목할 필요가 있는

데, 개발도상국에서 발전용으로 사용하기 위한 소비량이 급격히 높아질 것으로 예측되기 때문이다.^(3,4) 화석연료에 기반한 에너지 수요의 증가는 기후변화의 주요 원인인 CO₂의 배출량을 늘리게 되며, 이에 대한 해결책은 다양한 각도에서 제안되고 있다. 특히, 향후 우리나라에서도 기존의 화력발전연료에서 발생하는 이산화탄소 등 온실가스의 배출량을 의무적으로 감축해야 하는 기후변화협약의 발효가 예상되고 있다.⁽⁵⁾ 바이오매스 가운데, 본 연구에서는 축산폐수처리장의 혐기성 소화공정을 통하여 생산되는 바이오가스의 활용방안에 대하여 초점을 맞추고 있고 바이오가스중 메탄은 이산화탄소보다 21 배나 더 강력한 온실가스로 작용하므로 지구온난화, 오존층 파괴 등의 환경문제를 유발하고 있다.^(6,7) 이와 같이 기술적, 환경적, 정책적 요건을 충족시킬 수 있는 옵션 중의 하나로서, 마이크로 가스터

* 한국전력공사 전력연구원 (교신저자)

BK21 Mechatronics Group,

** 충남대학교 기계설계공학과 교수

E-mail : kbhur5798@hanmail.net

빈(Micro Gas Turbine; MGT) 시스템을 들 수 있다. MGT는 다양한 수효처에 비교적 용이하게 설치될 수 있으며, 전력 및 냉난방 열을 생산, 안정적으로 공급하는 분산형 전원으로서 유리하다고 알려져 있다. 이와 함께 초소형 발전시스템의 기술 진보에 따른 경제성 확보, 전력소매시장의 규제완화 및 환경문제 등으로 MGT의 전력시장 진입이 늘어날 것으로 예상된다. 세계적으로 MGT에 대한 연구와 개발은 산업체를 중심으로 진행되고 있다. MGT를 제작하는 대표적인 기업으로는 미국의 Capstone과 유럽의 Turbec을 들 수 있으며, 여기에서 생산된 MGT를 이용하여 다양한 목적으로 적용 가능한 MGT 솔루션을 생산하는 소규모 업체들이 많이 있다. MGT에 대한 개괄적인 전망과 동향은 Pilavachi의 연구 결과에서 확인할 수 있다.^(3,4) 국내에서는 전력, 가스회사 및 연구소를 중심으로 국내 환경에서의 적용 타당성 입증을 위한 건설 및 실증 실험에 초점을 둔 연구가 진행되고 있으며,^(8,10) 학계에서는 가스터빈에 대한 성능해석 기술 등이 활발하게 개발되고 있다. 특히 학계에서의 연구는 마이크로 가스터빈에 대한 실증실험 데이터를 기반으로, 시뮬레이션 모델을 구성하고, 이를 이용하여 탈설계 조건에서의 다양한 성능 특성을 평가, 해석, 예측하는 것에 중점을 두고 기술개발을 추진하고 있다.^(11,14)

본 논문은 위에서 언급한 MGT를 이용한 응용시스템의 개념설계를 위하여 요구되는 기본 자료의 생성과 관련이 있다. MGT에 대한 기본적인 성능 자료는 제작사에 의해 일부 공개된 상태이지만, 제작사에서 제공한 성능 자료는 실제 MGT를 이용한 실험 결과와는 다소 상이할 것으로 판단된다. 또한 향후 MGT를 이용한 응용 시스템을 설계하기 위해서는 MGT의 성능에 영향을 미치는 변수들의 민감도를 파악하여 성능 개선 인자를 선별할 필요가 있었다. 실제 MGT의 성능을 반영한 시뮬레이션 모델과 민감도 분석 결과를 확보하고 향후 시뮬레이션 모델을 예컨대 열병합 시스템과 같은 외부 시스템과 종합적으로 시뮬레이션 할 수 있도록, MGT에 대한 시뮬레이션 모델은 증기터빈/가스터빈 범용목적 시뮬레이션 도구인 PEPSE-GT 72를 사용하였다.⁽¹⁵⁾ 제작사의 자료와 가스터빈의 기본을 이용하여 예비 모델링을 수행하였으며, 실증실험에서 얻어진 결과를 이용하여 시뮬레이션 모델이 실제 시스템과 보다 유사하도록 보정 작업을 수행하였다. 마지막으로 주요 변수에 대한 민감도 분석을 수행하고 결과를 정리하였다.

2. 시뮬레이션 모델 개발

2.1. 개발목적

국내에서는 바이오매스를 연료로 사용하는 MGT 시스템이 아직 건설된 경험이 없으며, 실증 시설을 건설하여 타당성을 입증하는 단계이다. 따라서 실증 시설을 건설하는 것과 동시에 운영 및 정비와 관련된 요건, 실제 현장의 상황을 고려하여 시스템의 성능 변화와 관련된 문제점을 검토해 보는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서 개발되는 시뮬레이션 모델은 다음과 같은 목적을 위하여 개발되었다.

- 연료 및 운전특성과 관련한 연소기 성능 분석
- 리큐퍼레이터의 파울링, 압력강하, 재료별 열전달 특성에 따른 MGT 시스템 분석
- 외기조건, 연료조건, 운전부하 등과 같이 주요 제어 변수에 대한 민감도 분석
- 열병합 시스템과의 연계를 통한 통합 성능 분석

2.2 시뮬레이션 절차

본 논문에서 다루는 MGT 시스템은 Capstone 사의 60 kW급 모델인 C60을 대상으로 하였다.⁽¹⁷⁾ 시뮬레이션 모델의 범위와 개발 절차는 다음과 같다.

2.2.1 대상 및 범위

본 논문에서 다루는 MGT 시스템의 시뮬레이션 범위는 Fig. 1과 같다. 시스템을 구성하는 주요 기기는 바이오매스 전처리기, 가스 연소기, 리큐퍼레이터, 압축기, 가스터빈 등이다. C60 모델은 국내에서도 많은 실증 실험을 거쳐, 주요 운전성능특성 및 데이터가 비교적 다수 공개된 상태이다.^(8,10)

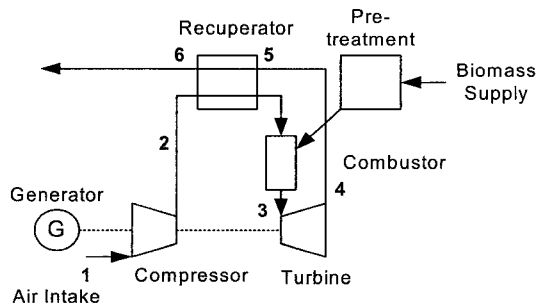


Fig. 1 Biomass fueled cogeneration MGT system

2.2.2 도구 선정 및 절차

가스터빈 시스템을 시뮬레이션 하기 위한 도구로서 대표적인 것으로는 Kurzke의 GasTurb와⁽¹⁶⁾ Thermoflow의 GT-MASTER⁽¹⁷⁾ 등을 들 수 있다. 상업용으로 보편화된 대형 가스터빈의 경우에는 시뮬레이션 도구에 서 터빈의 대략적인 구조와 대표적인 성능지표들을 미리 제공하기 때문에 사용자가 시뮬레이션을 하는데 용이한 측면이 있으나, MGT의 경우는 일반적인 가스터빈과는 다른 특성이 많아서 이러한 사례를 찾기 어려웠다. 따라서 본 연구에서 언급하는 MGT 모델이란 시뮬레이션 도구가 제공하는 기기 중에서 MGT의 각 구성 요소와 유사한 것을 선택하여 이들을 연결하고, 제작사에서 제공한 기본 설계정보, 실험 데이터, 그리고 적절한 공학적 가정을 이용하여 근사시킨 결과물을 의미한다. 본 연구에서는 MGT 시스템뿐만 아니라 향후 열병합 시스템 또는 다른 형태의 발전 시스템과의 연계하는 측면을 고려하여, 범용목적의 증기 및 가스터빈 시뮬레이션 도구인 Sciencetech의 PEPSE-GT 버전 72를 사용하였다.⁽¹⁵⁾ PEPSE-GT는 주로 발전소의 열적 성능을 계산해 주는 정상상태 질량-에너지 계산도구이다. 기력발전뿐만 아니라 가스터빈 시스템 및 복합 화력발전, 임의의 작동유체를 사용하는 발전 시스템에 대해서도 활용이 가능하다. PEPSE-GT를 이용하여 대형 발전소의 민감도 분석을 수행한 논문은 다수 보고되었다.⁽¹⁸⁻¹⁹⁾

Fig. 2는 Fig. 1의 MGT를 시뮬레이션하기 위해 구성된 PEPSE-GT 모델을 보여주고 있으며, Table 1은 Fig. 2에 제시된 기기들의 모델링을 위하여 필요한 필수 항목을 보여주고 있다. 시뮬레이션 모델 개발 절차는 Fig. 3과 같다.

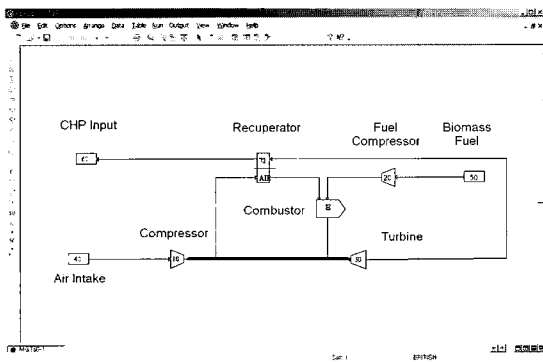


Fig. 2 MGT simulation model using PEPSE-GT

Table 1 Input parameters for an MGT model using PEPSE-GT

Component	Input Parameters	Availability
Compressor	◦ Shaft mechanical efficiency	Unknown
	◦ Stage pressure ratio	Known
Turbine	◦ Stage turbine efficiency	Unknown
	◦ Outlet pressure (or pressure ratio)	Unknown
Combustor	◦ Duct burner pressure drop	Unknown
	◦ Fractional heat losses to the environment	Unknown
Recuperator	◦ Air inlet reference temperature	Known
	◦ Air outlet reference temperature	Known
	◦ Gas inlet reference temperature	Known
	◦ Gas outlet reference temperature	Known
	◦ Air outlet reference flowrate	Unknown
	◦ Gas inlet reference flowrate	Known
Air Intake	◦ Exiting fluid temperature	Known
	◦ Exiting fluid pressure	Known
	◦ Exiting fluid mass flowrate	Unknown
	◦ Air relative humidity	Known
Fuel Intake	◦ Exiting fuel temperature	Unknown
	◦ Exiting fuel pressure	Unknown
	◦ Exiting fuel mass flowrate	Unknown
	◦ Fuel heating value	Known
	◦ Fuel composition	Unknown
Fuel Compressor	◦ Compressor discharge pressure	Unknown
	◦ Driving motor electrical efficiency	Unknown
	◦ Motor to compressor shaft mechanical efficiency	Unknown
	◦ Compressor efficiency	Unknown

시뮬레이션 모델은 크게 제작사의 자료를 이용하여 수행되는 기준모델 구현과 실험 데이터로 기준모델에 대한 세부 상관식을 튜닝하여 보정모델을 구현하는 작업으로 구분된다. 예비 시뮬레이션 모델은 MGT 제작사에서 제공한 기술자료와 설계 열평형도를 이용하여 만들어지며, 이를 ‘기준모델’이라 부른다. PEPSE-GT를 이용한 시뮬레이션을 위해서는 Table 1과 같이 각 기기별 상세 데이터가 필요하지만, 제작사에서 제공하는 자료는 Table 1의 ‘Availability’에서 ‘Known’으로 표시한 항목들뿐이다.

따라서 공학적 가정 및 반복계산을 통해 제작사에서 제공한 열평형도 및 성능지표들을 맞출 수 있도록 Table 1의 ‘Unknown’으로 표기된 값을 찾는 것이 기준모델 구성의 목표이다. 한편 제작사가 제공한 자료와 실제 실험 결과와는 다소 상이한 측면이 있음을 발견하였다. 다소 상이한 측면을 시뮬레이션 모델에 추가해 주어야 하는데, 이를 반영한 모델을 ‘보정모델’이라고 부른다. 그러나 자체 실험을 통하여 제작사에서

제공한 것과 동일한 수준의 열평형도 및 성능자료를 얻는 것이 현실적으로 어려웠기 때문에, 기준모델을 만드는 것과 같은 방식으로 보정모델을 구성하지 않고, 기준모델에서 몇 개의 주요 변수만 수정하여 실험 결과로부터 얻은 운전 열평형도를 맞추도록 조정하는 방법을 채택하였다. 기준모델 및 보정모델의 상세 구성에 대해서는 다음 절에서 설명한다. 마지막으로 보정모델을 이용하여 탈설계 분석 및 변수별 민감도 분석을 수행하였다.

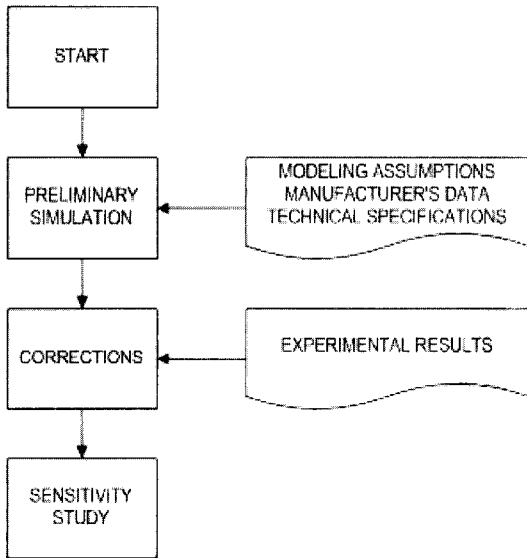


Fig. 3 Simulation flowchart for MGT system

2.2.3 기준모델개발

기준모델은 MGT 제작사인 Capstone에서 제공한 기술자료와 설계 열평형도를 이용하여 구성한다. Fig. 2의 시스템 구성도는 제작사에서 제공된 MGT 구조와 동일하게 모델링되었다. Table 2에는 C60 모델의 대표적인 설계사양과 열평형도 정보를 나타냈었는데, 이들은 Table 1에서 'Known'으로 표시된 자료에 해당된다. 시뮬레이션 결과 Table 2에서 제공된 모든 성능지표들이 적절히 생산되는 'Unknown' 변수들이 구해졌는지 파악함으로써 기준모델 구성은 종료된다. 'Unknown' 변수들은 PEPSE-GT가 제공하는 'Control' 기능을 이용하여 구해지는데, Control 기능은 뉴턴-랩슨 방법을 다중변수에 적용이 가능하도록 구성한 방법이다.⁽¹⁵⁾

PEPSE-GT에서는 시뮬레이션 모델로부터 얻어야 하는 값들을 '목표치'로 설정하고, 우리가 변화시킬 수 있는 변수를 '제어변수'로 설정하면, PEPSE-GT의 내부적인 알고리즘이 목표치에 근접하도록 제어변수의 값을 조정해 준다. 따라서 기준모델에서는 목표치가 Table 2에 제시된 값들이며, 제어변수는 Table 1의 'Unknown' 변수들로 설정되었다.

Table 2 Technical specifications for C60 model

	Parameters	Values
Temperature Distribution	Ambient* (°C)	15.0
	Compressor exit* (°C)	204.4
	Combustor inlet* (°C)	510.0
	Turbine inlet* (°C)	954.4
	Turbine exit* (°C)	635.0
	Recuperator exit* (°C)	343.4
System Performance	Rated output	60.0 (+0/-2) kW
	Thermal efficiency (LHV based)	28.0 (+-2)%
	Fuel type*	Natural Gas
	Fuel flow (LHV based)*	771,000 kJ/hr
	Heat rate (LHV based)	12,900 kJ/kWh
	Exhaust heat energy	571,000 kJ/hr
	Exhaust mass flow*	1728 kg/hr

* Model Inputs

Table 3에는 기준모델의 검증 결과를 보여주고 있다. recuperator의 입력변수는 'Unknown' 변수들을 구하는 목표치가 되기도 하지만, 일단 'Unknown' 변수들이 결정되면 recuperator의 입출구 조건은 결정된 'Unknown' 변수들을 이용하여 재계산이 된다. 따라서 Table 3에서는 recuperator에 대한 입력값과 결과값이 다소간의 오차가 발생하게 된다. 기준모델 구성 결과 대부분의 변수에 대하여 매우 유사한 값을 얻어냈으며, 이 과정에서 MGT 시스템의 각 기기의 주요 시뮬레이션 변수에 대한 정보를 찾을 수 있었다. 예컨대 Table 3의 열교환기 및 터빈 효율은 제작사에서는 제공하지 않았지만, 기준모델을 구성하는 가운데 얻어진 결과물이다.

Table 3 Preliminary simulation results

Parameters	C60	PEPSE-GT	Error*(%)
Ambient** (°C)	15.0	15	-
Compressor Exit** (°C)	204.4	204	0.20
Combustor Inlet** (°C)	510.0	507	0.59
Turbine Inlet** (°C)	954.4	954	0.04
Turbine Exit** (°C)	635.0	637	0.31
Recuperator Exit** (°C)	343.4	345	0.46
Rated Output (kW)	60.0	60.0	-
Thermal Efficiency (%)	28.0	28.2	0.70
Recuperator Effectiveness(%)	-	93.5	-
Compressor Isentropic Efficiency(%)	-	85.5	-
Gas Turbine Isentropic Efficiency(%)	-	90.2	-

* Error = (C60의 값-PEPSE-GT의 값)/C60의 값 × 100
 ** Model Inputs

2.2.4 보정모델개발

본 연구에서는 실제 MGT의 성능을 보여주는 시뮬레이션 모델을 얻는 것을 목표로 하였다. 이는 제작사가 제공한 자료와 실제 실험 결과와 다소 상이한 측면이 있음을 발견하였기 때문이다.⁽⁸⁾ 그러나 자체 실험을 통하여 제작사에서 제공한 것과 동일한 수준의 열평형도 및 성능자료(예컨대 주요 위치별 온도, 공기 및 연료의 유량 등)를 얻는 것이 현실적으로 어려웠기 때문에, 보정모델을 기준모델과 같은 방법으로 만드는 것은 불가능하였다. 이에 대한 해결책으로 본 연구에서 채택된 방법은 기준모델에서 입력으로 사용한 변수들 중에서 일부에 대해서만 실험 결과로부터 얻은 실측치가 나오도록 상관식을 만들어 주었다. 자체 실증실험을 통해 얻은 자료 중에서 (1) 외기조건에 따른 성능 시험과 (2) 부분부하에 따른 성능시험 결과를 이용하여 보정모델을 구성하였다.

2.2.4.1 외기온도에 따른 보정

실험 데이터를 통하여 외기온도에 따른 성능 변화를 기준모델이 잘 예측하는지 검토하고 차이가 발생하는 경우, 필요한 시뮬레이션 변수를 보정하였다. 성능

시험의 결과는 동절기 성능검증을 위한 winter-1, 2 데이터와 하절기 성능검증을 위한 summer-1, 2 데이터를 이용하였다. Table 4에는 성능시험 결과와 시뮬레이션을 수행하여 나온 결과를 정리하였다.

실험결과와 기준모델의 시뮬레이션 결과의 차이는 근본적으로 공기밀도 차이에 의한 공기유량의 차이로 분석되었다.

Table 4 Corrected results for ambient temperature

Date		winter-1	winter-2	summer-1	summer-2
Experiment	Ambient Temperature (°C)	-2.8	-2.5	22.5	30.0
	Ambient Pressure (kPa)	99.6	99.0	101.3	101.3
	Output (kW)	60.50	60.13	54.50	52.90
Simulation (Before Correction)	Output (kW)	60.8	60.7	57.0	56.5
Simulation (After Correction)	Output (kW)	60.4	59.8	55.0	53.0

공기유량의 변화는 부차적으로 연료유량을 변화시키면서 전체 MGT의 성능에 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 외기온도별 공기밀도를 감안하여 연료 유량을 조정하는 상관식을 입력하였다. PEPSE-GT의 시뮬레이션 모델을 방정식 (1)의 함수 f라고 한다면, 방정식 (2)와 같이 Fuel intake에서의 연료유량은 Air intake에서의 공기유량과 외기온도에 대한 함수로 만들어 방정식 (1)에 대입한 것이다. 외기온도에 따른 보정 상관식은 방정식 (2)에 해당된다.

$$\text{electric output} = f(\text{fuel flow, other parameters}) \quad (1)$$

$$\text{fuel flow} = g(\text{air flow, ambient temperature}) \quad (2)$$

Table 4에서 Simulation(Before Correction)은 방정식 (2)를 적용하기 전의 결과이며, Simulation(After Correction)은 적용 후의 결과이다.

2.2.4.2 부분부하에 따른 보정

Table 5는 여름에 실시된 부분부하 운전성능 시험 결과와 기준모델의 시뮬레이션 결과를 요약한 것이다.

부하가 내려갈수록 예상되는 출력은 다소 차이를 보인다는 것을 알 수 있었다. 이는 터빈 및 압축기, 그리고 기타 모든 MGT 구성 기기들이 부분부하 하에서는 효율이 변화하는데, 이를 반영하지 못했기 때문인 것으로 분석되었다. Fig. 2에서 압축기와 터빈에 대한 효율을 발전기 출력의 함수로 표현되도록 조정하였다. 수식적으로는 방정식 (3)과 방정식 (4-1, 2)와 같이 나타낼 수 있다. 방정식 (3)과 같이 PEPSE-GT 모델이 함수 f 를 통하여 전기출력을 계산하는 역할을 한다면, 방정식 (4-1)와 (4-2)에서는 전기출력의 변화함에 따라 터빈 및 압축기의 효율을 조정하는 함수 $g1$ 과 $g2$ 가 보정 상관식에 해당되며, 보정 상관식의 결과는 다시 방정식 (3)으로 피드백 된다. 방정식 (3)과 (4)의 연속 계산 결과가 PEPSE-GT에서 설정한 오차 이내로 들어가면 계산을 멈추고 최종적으로 전기출력이 계산되어 나온다.

$$\text{electric output} = f(\text{turbine efficiency, compressor efficiency, other parameters}) \quad (3)$$

$$\text{turbine efficiency} = g1(\text{electric output}) \quad (4-1)$$

$$\text{compressor efficiency} = g2(\text{electric output}) \quad (4-2)$$

Table 5에서 Simulation(Before Correction)은 보정 상관식의 적용 전의 결과이며, Simulation(After Correction)은 적용 후의 결과이다.

Table 5 Corrected results for partial loads

Load		100%	75%	50%
Experiment	Ambient Temperature(°C)	29.7	33.5	33.2
	Output (kW)	54.9	44.9	30.0
	Heat Rate (kJ/kWh)	14915.46	16271.43	17829.99
Simulation (Before Correction)	Output (kW)	54.3	47.5	34.8
	Heat Rate (kJ/kWh)	15080	15381	15371
Simulation (After Correction)	Output (kW)	54.3	45.0	30.5
	Heat Rate (kJ/kWh)	15080	16235	17538

3. 민감도 분석

민감도 분석은 C60 보정모델을 이용하였으며, 외기 온도, 연료구성비, 터빈배기압력, 그리고 고도에 대한 탈설계 분석과 압축비 및 터빈입구온도에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 탈설계 분석에서는 보정모델의 내부 변수는 임의로 변화시키지 않은 상태에서 MGT에 가해지는 외부 조건을 변화시키면서 출력 및 열소비율을 시뮬레이션 하였다. 민감도 분석에서는 MGT 모델의 특정 내부 변수가 재료의 열화, 성능 저하, 설계 변경 등을 통해 바뀌었다는 가정 하에 출력 및 열소비율을 시뮬레이션 하였다. 단 민감도 분석에서는 변화된 특정 변수 이외의 다른 모든 변수는 보정모델의 그것을 그대로 유지하도록 하였다.

3.1 탈설계 분석 - 외기온도

Fig. 4에 외기온도의 변화에 따른 전기출력 및 열소비율에 대한 결과를 제시하였다. 참고로 제작사의 데이터를 같이 첨부하였다. 제작사의 데이터는 외기온도가 약 26°C 이하에서는 출력이 일정하게 유지되도록, 그리고 15°C 이하에서는 열소비율도 일정하게 유지되도록 공기 및 연료 유량을 조정하고 있지만, 실제 데이터로 보정된 시뮬레이션 모델에서는 특히 출력의 경우 15~26°C 사이의 구간에서 차이가 많이 나는 것으로 분석되었다. 시뮬레이션 모델 역시 외기온도와 부분부하에 따라 공기 및 연료 유량, 기기 효율 등을 조정하고 있으므로, Fig. 4에서의 차이는 주로 15°C에서 26°C사이에 대한 보정이 미흡한 것으로 풀이된다. 이 부분은 추가적인 실험 데이터로 수정이 가능할 것이다.

3.2 탈설계 분석 - 연료구성비

Fig. 5에서는 LNG의 대표적인 발열량인 50,000 kJ/kg을 전후로 값을 변화시키면서 출력과 열소비율에 대한 결과를 분석하였다. 외기온도 및 연료유량은 동일하다고 가정하며, 그 이외의 모든 변수는 보정모델이 결정하였다. 따라서 고발열량의 연료 주입은 높은 터빈입구온도를 만들어, 출력이 증가하게 될 것이다. 그래프에서도 발열량이 증가할수록 출력은 선형적으로 증가하였다. 그러나 연료가 가지고 있는 발열량도 동시에 증가하기 때문에 전체적인 열소비율은 증가하는 결과를 보였다.

다음과 같은 세 가지의 바이오매스 연료의 조성에

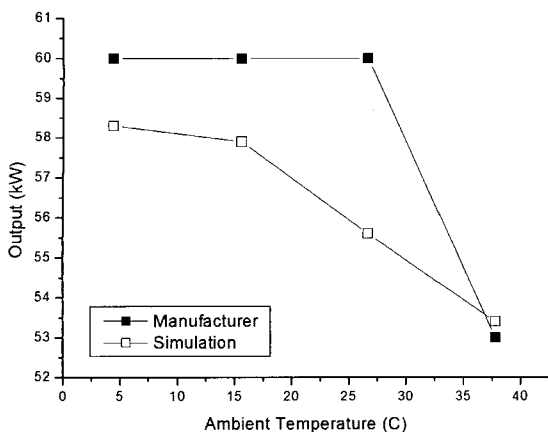


Fig. 4 MGT performance versus ambient temperatures

대해서는 별도의 민감도 분석이 수행되었다. 본 연구에서 다루고 있는 바이오가스 축산분뇨의 메탄가스이고, 임의의 축산분뇨를 시료채취를 통하여 조성분석을 해 본 결과 Table 6과 같은 대표적인 조성표를 얻을 수 있었다. Table 6에서 제시된 조성의 연료를 이용하여 60kW의 출력을 내는 경우, MGT 시스템의 열소비를 다음과 같이 나타냈다. 단 외기온도는 일정하고 연료 유량은 자동적으로 조절되어 공급되면서 60kW를 생산한다고 가정하였다.

메탄의 함량이 높을수록 효율은 좋은 것으로 나타났다. LNG를 사용하는 경우와도 큰 편차를 보이고 있지는 않았다. 다만 바이오매스 연료를 전처리하고 압축하여 보내는 시스템의 전력 소모 등을 감안한다면 실제 효율은 Table 6에 제시한 값보다 다소 떨어질 것

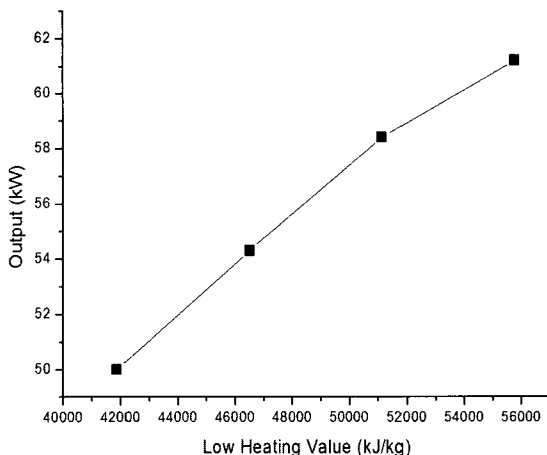


Fig. 5 MGT performance versus fuel heating values

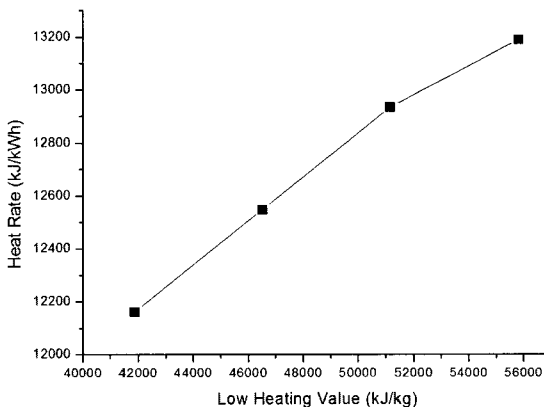


Table 6 Heat rate of biomass fuel cases

Case	Heat Rate (kJ/kWh)
Case 1: CH4 40%, CO2 2%, N2 58%	14106
Case 2: CH4 50%, CO2 2%, N2 48%	13656
Case 3: CH4 60%, CO2 2%, N2 38%	13206

으로 판단된다.

3.3 탈설계 분석 - 터빈배기압력

모든 터빈사이클은 배기압력이 매우 중요한 성능변수 중의 하나이다. 가스터빈의 경우는 공기 중으로 배기가스가 배출되므로, 대략 1기압 정도의 배기압력을 형성하게 된다. 그러나 MGT의 경우는 리큐퍼레이터를 지나 배기가스가 최종 배출되므로, 리큐퍼레이터에

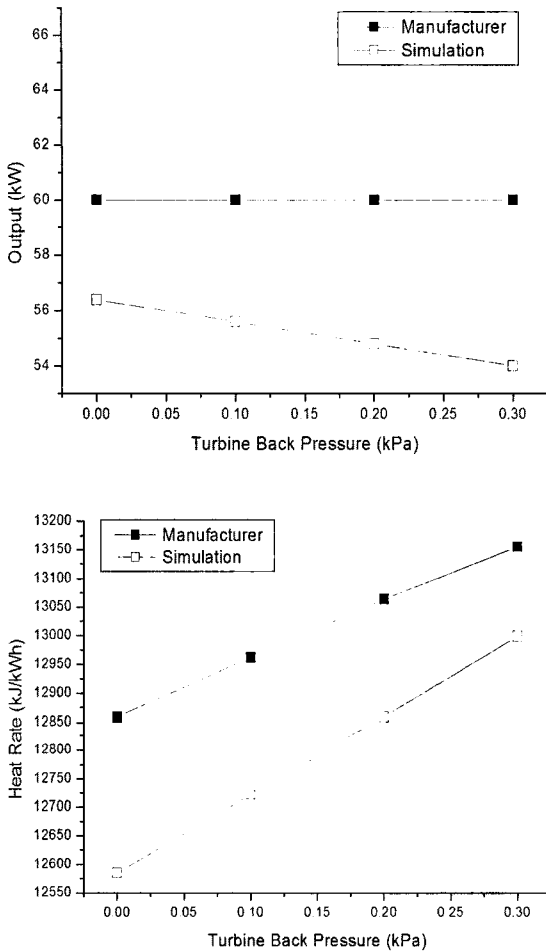


Fig. 6 MGT Performance versus turbine back pressures

서 발생하는 압력강하를 고려하면 배기압력이 1기압보다는 높은 값에서 결정될 것으로 보인다. 민감도 해석은 제작사 데이터에서 제공되는 범위인 8 in H₂O 이내에서 수행되었다. 모든 조건은 보정모델과 동일하고 배기압 만큼 선별적으로 조정하였다. Fig. 6에 결과를 제시하였다. 배기압력이 높아질수록 효율은 선형적으로 감소하였으며 이는 모든 조건은 일정하기 때문에, 단순히 터빈 출구 엔탈피가 설계치보다 상승하여 출력이 감소하였기 때문이다. 제작사의 데이터는 효율이 감소하는 영향을 보였으나 출력의 차이가 없는 것으로 조사되었는데, 이 부분에 대해서는 그 원인을 찾지 못하였으나, 배기압에 따라 연료 유량 또는 공기유량을

조절하는 것이라고 추측된다. 리큐퍼레이터는 배가스의 열을 회수하는 중요한 역할을 하지만, 리큐퍼레이터의 배가스가 흐르는 배관의 압력강하가 크게 나타날 경우 터빈배기압력을 높이는 결과를 초래할 것이다.

3.4 탈설계 분석 - 고도

고도는 공기의 온도에도 영향을 주지만, 대기압도 바뀌기 때문에 해수면과는 다르게 밀도에 영향을 준다. 따라서 해수면 기준의 외기온도 및 공기유량에 대한 상관식을 갖고 있는 보정모델은 고도가 달라지면, 상관식도 수정되어야 한다. 고도의 상승으로 대기압이 변화하는 경우, 해수면 100m 당 공기의 온도는 0.2% 정도 감소하는 반면, 공기 밀도는 대략 1.0%씩 낮아진다. (해수면 기준, 공기밀도는 1.2250 kg/m³, 온도는 283.15 K로 가정) 또한 이러한 경향은 해수면 5km까지는 선형적으로 변하는 것으로 간주하여도 큰 오차는 벌어지지 않는 것으로 확인되었다.⁽²⁰⁾ 따라서 매우 높은 고도에 설치되는 경우가 아니라면, 고도에 의한 영향을 무시하여도 무방할 것으로 판단된다.

3.5 종합 탈설계 분석

외기온도 및 부하에 대한 종합적인 민감도 분석을 수행하여 Table 7에 수록하였다. 종합 민감도 분석 결과는 MGT 시스템의 성능에 가장 중요한 영향을 끼치는 외기온도와 부분부하에 대하여 입체적인 평가가 가능하다.

Table 7에서는 각 부하별, 외기온도별로 전기출력, 열소비율, 터빈입구온도, 터빈출구온도, 배기가스온도, 그리고 연료유량을 일괄적으로 보여주고 있다. 이를 토대로 다음과 같은 분석 결과를 얻을 수 있다.

- 외기온도가 올라가거나, 부하가 정격출력에서 떨어질수록, 출력과 효율이 감소한다.
- 외기온도가 올라가거나, 부하가 정격출력에서 떨어질수록, 터빈입구온도는 감소한다.
- 외기온도가 떨어지거나, 부하가 정격출력에서 떨어질수록, 터빈출구온도 및 배기온도는 감소한다.
- 터빈입구온도와 연료유량은 부하가 달라지는 경우 차이를 보이지만, 같은 부하에서는 외기온도에 비교적 큰 영향은 받지 않는다.

Table 7 Performance for ambient temperature and partial loads

Temperature(°C)		4.4	15.6	26.7	37.8
100%	Output(kW)	58.3	57.9	55.6	53.4
	HR(Btu/kWh)	12233	12318	12827	13356
	HR(kJ/kWh)	12898	12987	13524	14082
	TIT(K)	1217	1227	1217	1207
	TET(K)	895	910	923	932
	EGT(K)	600	618	639	645
	Fuel(kg/s)	0.0040	0.0040	0.0042	0.0039
	75%	Output(kW)	46.1	45.8	44.0
HR(Btu/kWh)		13170	13261	13809	14378
HR(kJ/kWh)		13886	13982	14560	15159
TIT(K)		1230	1240	1230	1220
TET(K)		904	920	933	942
EGT(K)		577	595	615	620
Fuel(kg/s)		0.0032	0.0032	0.0033	0.0031
50%		Output(kW)	31.2	31.0	29.8
	HR(Btu/kWh)	14228	14326	14918	15532
	HR(kJ/kWh)	15001	15105	15729	16376
	TIT(K)	1245	1255	1245	1235
	TET(K)	622	632	641	647
	EGT(K)	565	582	602	607
	Fuel(kg/s)	0.0023	0.0023	0.0024	0.0023

3.6 민감도 분석 - 압축기 압력비

C60의 설계 압력비인 4.8에서 증감시키면서 출력과 열소비율을 확인하였다. 압력비는 압축기의 성능변화 또는 설계 개선 등을 통해 변경되었다고 가정하며, 다른 주변 기기의 효율 등은 설계치를 유지하였다. 외기 온도 및 공급되는 공기 및 연료 유량 조건은 일정하게 하였으며, 나머지 운전 조건은 압력비의 변화에 따라 달라지게 된다. 압력비를 높이면 터빈출구온도가 낮아지면서 열교환을 하는 공기의 온도가 낮아지게 되고, 이와 연동되어 터빈입구온도도 낮아진다. 터빈의 입출구 온도가 동시에 낮아지면서 출력에 변화가 생기는데, 이에 압축기의 압력비를 높임으로서 소모되는 출력을 감안하면, 전체 출력은 감소하고 효율은 떨어지게 된다. Fig. 7의 결과에서 압력비가 높아질수록 출

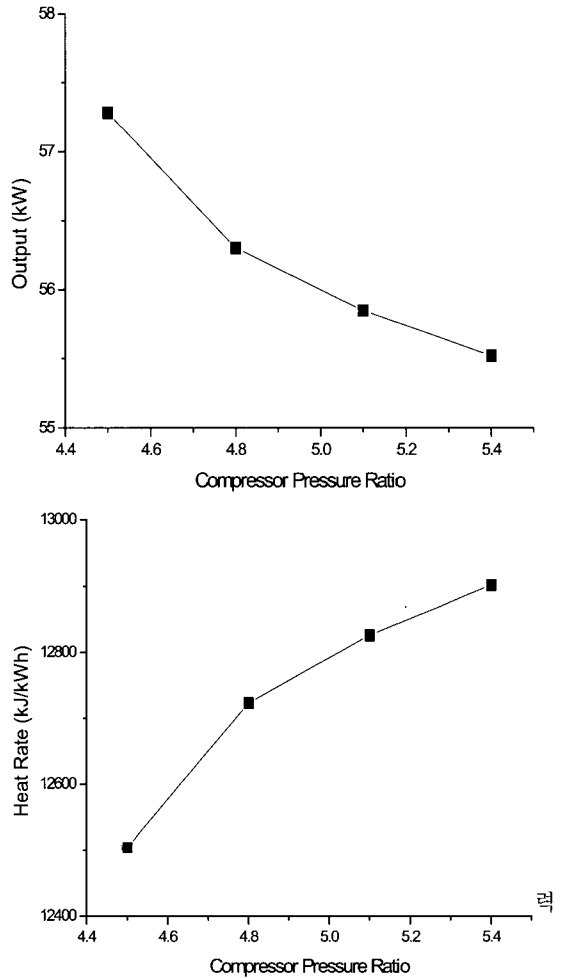


Fig. 7 MGT performance versus compressor PR

력이 떨어지고 열소비율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만 그 비율은 차츰 낮아졌다. 이는 일반적인 Recuperator를 사용하는 가스터빈에서 나타내는 현상과 일치함을 알 수 있다.

3.7 민감도 분석 - 터빈입구온도

PEPSE-GT로 구성한 MGT 모델에서는 터빈입구온도가 공기 및 연료 유량뿐만 아니라, 연소기의 열손실 및 압력강하 등에 의해 결정된다. 기준모델 및 보정모델에서 이미 결정된 이와 같은 연소기 설계 변수들을 조정하여 다른 조건들은 일정한 상태에서도 터빈입구온도를 다소간 상승 또는 강하시킬 수 있다. 본 민감도 분석에서는 이와 같은 방법으로 터빈입구온도만을

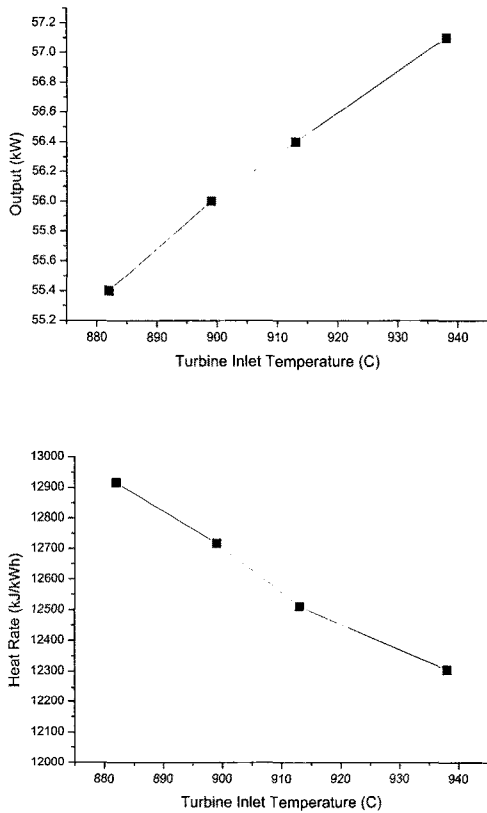


Fig. 8 MGT performance versus Turbine Inlet Temperatures

선형적으로 변화시키면서 출력 및 열소비율을 분석하였다. 외기온도 및 공기/연료 유량 조건은 일정하게 유지하였으며, 나머지 운전 조건은 터빈입구온도의 변화에 따라 달라지게 된다. Fig. 8에 결과를 제시하였다. 터빈입구온도가 높을수록 가스가 갖고 있는 엔탈피가 크기 때문에 출력 상승에 영향을 주게 된다. 따라서 터빈입구온도가 상승할수록 출력과 효율은 선형적으로 상승하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문은 바이오매스 연료로 구동되는 MGT에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 이용한 민감도 분석을 수행한 내용을 담고 있다. 시뮬레이션 모델은 증기터빈/가스터빈 범용목적 시뮬레이션 도구인 PEPSE-GT 72를 사용하였다. MGT 시스템의 각 구성요소에 대한 기계적 특성과 수학적 모델링 방법에 대한 검토

를 수행하고, 제작사의 자료를 이용하여 기본 모델링을 수행한 다음, 자체 수행한 실증실험 데이터를 기반으로 시뮬레이션 모델을 보정하고, 이를 이용하여 탈설계 분석 및 민감도 분석을 수행하였다.

탈설계 및 민감도 분석을 통해 다양한 변수를 설계 조건과 상이한 조건으로 변환하여 MGT 시스템의 성능 변화를 살펴볼 수 있었다. 본 연구에서는 가스터빈 엔진 모델이 제공하는 입력 변수인 1) 외기온도, 2) 연료구성비, 3) 터빈배기압력, 그리고 4) 고도에 대한 발전기 출력 및 열소비율의 탈설계 분석을 수행하였으며, 압축비 및 터빈입구온도에 대해서는 특정 변수만을 변화시킨 민감도 분석을 수행하였다. 바이오매스 연료로 구동되는 MGT를 이용한 열병합 발전시스템 실증 설계에 있어 참조 데이터로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- (1) Office for Official Publications of the European Communities, 1996, "Perspective outlook on long-term energy systems," Report EUR 17358 EN.
- (2) OECD International Energy Agency, 2006, "Energy Technology Perspectives."
- (3) Pilavachi, P. A., 2002, "Mini- and Micro-gas Turbines for Combined Heat and Power," *Applied Thermal Engineering*, No. 22, pp. 2003~2014.
- (4) Pilavachi, P. A., 2000, "Power Generation with Gas Turbine Systems and Combined Heat and Power," *Applied Thermal Engineering*, No. 20 pp. 1421~1429.
- (5) Soimakallio S, Paappanen T, Ekholm T, 2007, "Greenhouse Gas Balances for Biomass-Based Transportation Fuels and Agrobiomass in Finland", 15th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany.
- (6) Tiangco, V., 2007, "Biomass Initiatives in California", 15th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany.
- (7) Wirthmann Ferreira, E. and Seabra da Rocha, S., 2007, "Climate Change and International Trade : Challenges and Policy Options", 15th European

- Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany.
- (8) Hur, K. B., Rhim, S. G., 2004, "Development of distributed micro gas turbine technology with grid connection," Korea Electric Power Research Institute, Internal Report.
- (9) Sohn, W. S., Choi, K. S., Kim, H. S., Han, J. O., 2004, "Study of performance and exhaust gas characteristics on 27kW class micro-Gas turbine cogeneration system," *Summer Meeting of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, pp. 993~998.
- (10) Lee, S. S., Park, B. S., Park, H. C., 2003, "Experimental study on the operation of 60kW micro gas turbine and its exhaust gasdriven-hot water generator," *18th Energy Technology Workshop*, Daejeon.
- (11) Kim, S. Y., Park, M. R., Choi, B. S., 1998, "Review on performance analysis technology of power generation gas turbine," *Fluid Machinery Development Workshop*, Seoul, pp. 198~208.
- (12) Kim, T. S., Hwang, S. H., 2004, "Performance characteristics for off-design operation of micro gas turbines," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 7, No. 3, pp. 39~47.
- (13) Lee, J. J., Kim, T. S., 2005, "Analysis of operation performance of a micro gas turbine generator system," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 8, No. 5, pp. 13~21.
- (14) Lee, J. J., Yoon, J. E., Kim, T. S., Sohn, J. H., 2007, "Performance test and component characteristics evaluation of a micro gas turbine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, pp. 141~152.
- (15) Sciencetech, 2006, "PEPSE-GT manual engineering description."
- (16) Kurzke, J., 2001, Gasturb ver. 9.0.
- (17) Thermoflow Inc., 2004, GT MASTER/PEACE THERMOFLEX(GT TEMPLATE)
- (18) Minner, G., 1999, "Modeling of gas turbine engines, heat recovery steam generators, and combined cycles using PEPSE," *PEPSE User's Group Meeting*, Idaho Falls.
- (19) Heo, G. Y., Chang, S. H., Choi, S. S., 2005, "Development of a need-oriented steam turbine cycle simulation toolbox," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, pp. 859~869.
- (20) International Organization for Standardization, 1975, "Standard atmosphere," ISO 2533:1975.