

바이오가스 마이크로 가스터빈 성능해석

허 광범¹⁾, 박 정극²⁾, 임 상규³⁾, 김 재훈⁴⁾

Performance Analysis of Bio-gas Micro Gas Turbine System

Kwang-beom Hur¹⁾, Jung-keuk Park²⁾, Sang-gyu Rhim³⁾, Jae-hoon Kim⁴⁾

Key words : Bio-gas(바이오 가스), Performance Analysis(성능해석), Micro Gas Turbine (마이크로 가스터빈), Off-design(탈설계)

Abstract : As the distributed generation becomes more reliable and economically feasible, it is expected that a higher application of the distributed generation units would be interconnected to the existing grids. In this context, the Micro Gas Turbines (MGT) by using Bio-gas 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 prediction of off-design characteristics. The performance analysis model was developed by PEPSE-GT 72, commercial steam/gas turbine simulation technique.

1. 서론

국내외적으로 대형발전설비에 대한 입지문제와 막대한 건설비용으로 추가적인 설비증가는 둔화되고 있으며, 국가적차원의 유효에너지를 향상시킬수 있는 분산형 발전시스템의 개발 및 설치가 절실히 요구되고 있는 실정이다.[1,2] 또한 급격한 경제성장과 산업의 고도화로 인해 전력소비의 급증과 환경오염 문제가 발생하고 있으며, 이로 인해 에너지 자원의 고갈과 환경과파 문제가 야기되고 있다. 이러한 문제점에 대처하기 위해 신재생에너지원을 이용한 전력생산 및 공급을 통하여 종래의 대형발전소 중심의 전력수급 체계로부터 수요관리와 제어를 고려한 체계로 변화하려 하고 있으며, 더 나아가 다양한 신재생 에너지원의 효율적 활용이 가능한 분산형 전원 시스템의 개발과 도입이 진행되고 있다. 이러한 분산형 전원의 보급을 위해서는 바이오가스와 같은 국내 부존자원의 적극적 활용을 토대로 한 기존의 대규모 발전설비와는 달리 소형이면서 높은 열효율을 가지며, 환경친화적인 발전원의 도입이 고려되어야 하는데 기존의 대형

발전설비인 수력, 화력, 원자력 발전은 이러한 소규모 친환경적인 시스템으로는 여러 문제점이 있어 현재 가장 환경 친화적 분산발전을 위한 시스템으로 바이오 에너지 마이크로 가스터빈을 이용한 열병합 발전 등이 선진국을 중심으로 활발히 연구되고 있으며, 미래에는 본격적인 보급이 활성화 될 것이다.[3,4,5]

본 논문은 이와 같은 기존 연구와 동일한 목적을 갖고 있으며, 특히 환경적 측면과 경제성이 우수한 바이오연료로 구동되는 MGT 시스템에 대한 시뮬레이션 모델 개발과 이를 이용한 탈설계 조건에서의 민감도 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 모델은 증기터빈/가스터빈 범용목적 시뮬레이션 도구인 PEPSE-GT 72를 사용하였다.[6] 제작사의 자료와 가스터빈의 기본을 이용하여 예비 모델링을 수행하였으며, 실증실험에서 얻어진 결과를 이용하여 시뮬레이션 모델이 실제 시스템과 보

1,2,3) 한국전력공사 전력연구원
E-mail : kbhur5798@hanmail.net
Tel : (011)852-5619 Fax : (042)865-5304

4) BK 21 Mechatronics Group
충남대학교 기계설계공학과 교수
E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr

다 유사하도록 보정 작업을 수행하였다. 마지막으로 주요 탈설계 조건에서의 민감도 분석을 수행하고 결과를 정리하였다.

2. 성능해석 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 탈설계 조건에서의 성능 분석
- 열병합 시스템과의 연계를 통한 통합 성능 분석

2.2 해석 절차

본 논문에서 다루는 MGT 시스템은 Capstone 사의 60kWe 급 모델인 C60을 대상으로 하였다.[7] 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.[7]

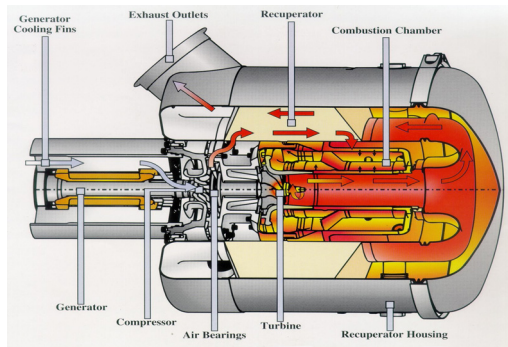


Fig. 1 Biomass Fueled MGT System[7]

2.2.2 해석 절차

가스터빈 시스템을 시뮬레이션 하기 위한 도구로서 대표적인 것으로는 Kurzke의 GasTurb와 Thermoflow의 GT-MASTER 등을 들 수 있다. 보편화된 가스터빈의 경우에는 시뮬레이션 도구가 설계사양 일체를 보유한 경우도 있으나, MGT의 경우는 그러한 예를 찾을 수 없었다. 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. 그런데 본 연구에서는 MGT 시스템뿐만 아니라 향후 다른 시스템과 연계하는 측면을 고려하여, 증기/가스터빈 시뮬레이션 도구인 Sciencetech의 PEPSE-GT 버전 72를 사용하였다.[6]

Fig. 2는 Fig. 1의 MGT를 시뮬레이션하기 위해 구성된 PEPSE-GT 모델을 보여주고 있다.

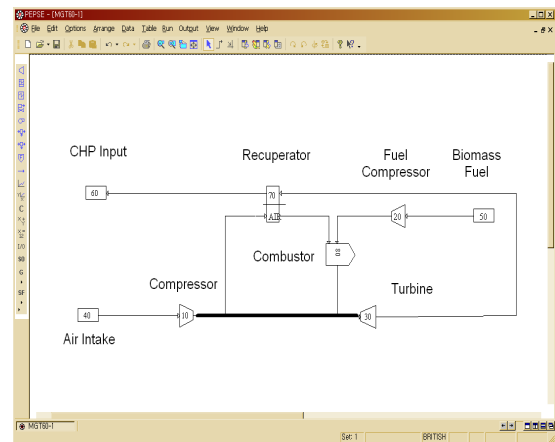


Fig. 2 MGT Analysis model using PEPSE-GT

PEPSE-GT는 주로 전력발전소의 열적 성능을 계산해주는 정상상태 질량-에너지 계산도구이다. 기력발전뿐만 아니라 가스터빈 시스템 및 복합 화력발전, 임의의 작동유체를 사용하는 발전 시스템에 대해서도 활용이 가능하다. PEPSE-GT를 이용하여 전력발전소의 탈설계 민감도 분석을 수행한 예도 많이 있다.[8, 9]

시뮬레이션 모델 개발 절차는 Fig. 4와 같다. 예비 시뮬레이션 모델은 MGT 제작사에서 제공한 기술자료와 설계 열평형도를 이용하여 만들어지며, 이를 ‘기준모델’이라 부른다. 기준모델은 실제 현장실험으로 얻어진 데이터를 이용하여 보정 작업이 수행된다. 보정은 설계 열평형도에 맞게 구현된 모델을 운전 열평형도에 맞도록 조정하는 작업이다. 이를 ‘보정모델’이라고 부른다. 마지막으로 보정모델을 이용하여 민감도 분석을 수행하는데, 독립변수로는 1) 외기온도, 2) 연료구성비, 3) 압축비, 4) 터빈입구온도, 그

리고 5) 터빈배기압력을 이용하였으며, 전기출력과 열 소비율을 종속변수로 정하고 변화량을 분석하였다.

2.2.3 기준모델개발

기준모델은 MGT 제작사인 Capstone에서 제공한 기술자료와 설계 열평형도를 이용하여 구성한다. Table 1에는 C60 모델의 중요 설계사양과 열평형도 정보를 나타냈다. Fig. 1의 시스템 구성도와 Table 1의 설계 열평형도 정보는 Fig. 2와 같이 PEPSE-GT 모델로 재구성되며, 각 구성기기별로 시뮬레이션에 필요한 변수를 입력하여, Table 1의 설계 사양을 만족시킬 수 있도록 반복 검증 작업이 진행된다.

Table 1 Technical specification of C60, MGT

	Parameters	Values
Heat balance	Ambient (°C, °F)	15.0 (59)
	Compressor Exit (°C, °F)	204.4 (400)
	Combustor Enter (°C, °F)	510.0 (950)
	Turbine Enter (°C, °F)	954.4 (1750)
	Turbine Exit (°C, °F)	635.0 (1175)
	Recuperator Exit (°C, °F)	343.4 (650)
System performance	Rated Output	60.0 (+0/-2) kW
	Thermal Efficiency (LHV based)	28.0 (+ -2)%
	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

Table 2에는 기준모델의 검증 결과를 보여주고 있다. 대부분의 변수에 대하여 매우 유사한 값을 얻어냈으며, 이 과정에서 MGT 시스템의 각 기기의 주요 시뮬레이션 변수에 대한 정보를 찾을 수 있었다. 예컨대 Table 2의 압축기 및 터빈 효율은 제작사에서는 제공하지 않았지만, 기준모델을 구성하는 가운데 얻어진 결과물이다.

2.2.4 보정모델개발

기준모델에서 얻어진 MGT 시스템의 기기별 시뮬레이션 변수들은 실제 현장실험으로 얻어진 데이터를 이용하여 보정된다. 보정은 설계 열평형도에 맞게 구현된 모델을 운전 열평형도에 맞도록 조정하는 과정이 되겠다. 자체 실증실험을 통해 얻은 자료 중에서 (1) 외기조건에 따른 성능시험과 (2) 부분부하에 따른 성능시험 결과를 이용하여 보정모델을 구성하였다

Table 2 Preliminary simulation results

Parameters	C60	PEPSE-GT	Error(%)
Ambient (°C)	15.0	15	0
Compressor Exit (°C)	204.4	204	0.20
Combustor Enter (°C)	510.0	507	0.59
Turbine Enter (°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	0
ThermalEfficiency (%)	28.0	28.2	0.70
Compressor Ratio	4.8	4.8	0
Compressor Efficiency(%)	-	85.5	-
Gas Turbine Efficiency(%)	-	90.2	-

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 3에는 성능시험 결과와 시뮬레이션을 수행하여 나온 결과를 정리하였다.

실험결과와 기준모델의 시뮬레이션 결과의 차이는 연료유량의 차이로 분석되었다. 연료유량은

Table 3 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

전체 MGT의 성능에 있어 가장 중요한 역할을 하는 변수이며, 다른 변수들은 실험 내용으로 볼 때, 큰 편차가 없었기 때문이다. PEPSE-GT 모델에서 연료유량을 결정하는 방정식을 외기온도의 변화에 맞도록 보정하여 재입력하였다.

3. 민감도 분석

탈설계 조건에서의 민감도 분석은 C60 보정모델을 이용하였으며, 외기온도에 대한 발전기 출력 및 열소비율의 변화와, 외기온도와 부분부하의 변화에 따라 MGT 시스템의 각 부분에서의 주요 변수를 분석한 종합 민감도 분석으로 구성된다. 민감도 분석을 수행하는데 있어, 시뮬레이션 모델에서 변화를 주는 독립변수 이외의 다른 모든 변수는 제작사가 제공한 설계값을 갖는 것으로 가정하였다.

Fig. 3에 열소비율에 대한 결과를 제시하였다. 참고로 제작사의 데이터를 같이 첨부하였다. 제작사의 데이터는 외기온도가 약 26°C 이하에서는 출력이 일정하게 유지되도록 터빈의 날개짓 형상과 연료 유량을 조정하고 있지만, 실제 데이터로 보정된 시뮬레이션 모델에서는 외기온도에 따라 출력이 약간씩 변화하고 있음을 알 수 있다. 온도가 ISO 상태를 벗어나는 경우 공기 밀도에 대한 상관식의 오차도 출력 및 열소비율에 영향을 주는 것으로 분석되었다.

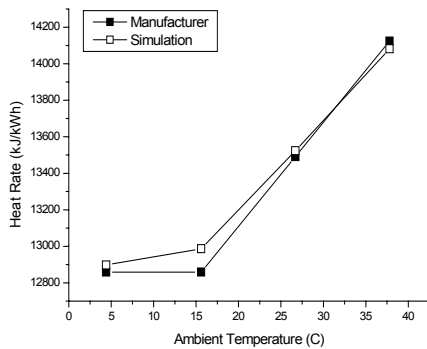


Fig. 3 Graph for Heat Rate & Air Temp.

4. 결 론

본 논문은 바이오매스 연료로 구동되는 MGT에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 이용한 민감도 분석을 수행한 내용을 담고 있다. 해석 모델은 증기터빈/가스터빈 범용목적 시뮬레이션 도구인 PEPSE-GT 72를 사용하였다. MGT 시스템의 각 구성요소에 대한 기계적 특성과 수학적 모델링 방법에 대한 검토를 수행하고, 제작사의 자료를 이용하여 기본 모델링을 수행한 다음, 자체 수행한 실증실험 데이터를 기반으로 시뮬레이션 모델을 보정하고, 이를 이용하여 탈설계 특성을 예측하였다.

시뮬레이션 모델은 크게 제작사의 자료를 이용하여 수행되는 기준모델 구현과 실험 데이터로 기준모델에 대한 세부 상관식을 튜닝하여 보정모델을 구현하는 작업으로 구분된다. 제작사에서는 전체 모델링에 필요한 데이터에 10% 정도만을 제공하므로, 기준모델 및 보정 모델을 개발하면서 공학적 가정 및 반복계산을 통해 필요한 시뮬레이션 변수를 유추하는 방법으로 진행되었다.

민감도 분석을 통해 다양한 변수를 탈설계 조건으로 변환하여 MGT 시스템의 성능 변화를 살펴볼 수 있었다. 본 연구에서는 가스터빈엔진 모델이 제공하는 입력 변수에 대한 발전기 출력 및 열소비율의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석 결과는 바이오매스 연료로 구동되는 MGT를 이용한 열병합 발전소 실증로 설계에 있어 참조 데이터로서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] Francisco Jurado, Antonio Cano, Jos_e Carpio, 2004, "Biomass based micro-turbine plant and distribution network stability", *Energy Conversion and Management*, pp. 2713-2727.
- [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] Rhim, S. G., 2004, "Development of distributed micro gas turbine technology with grid connection," Korea Electric Power Research Institute, Internal Report.
- [6] Scientech, 2006, "PEPSE-GT manual engineering description."
- [7] Capstone Turbine Corporation, 2002, "Technical reference," Capstone Model C60 Performance, 410005-001 Rev A.
- [8] Minner, G., 1999, "Modeling of gas turbine engines, heat recovery steam generators, and combined cycles using PEPSE," *PEPSE User's Group Meeting*.
- [9] Heo, G., 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.