

200kW 급 마이크로 가스터빈의 운전특성 분석[§]

김정호* · 강도원* · 김동섭**

* 인하대학교 기계공학과

Analysis of Operating Characteristics of 200kW Class Micro Gas Turbine

Jeong Ho Kim*, Do Won Kang* and Tong Seop Kim**

* Division of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received May 23, 2013 ; Revised August 7, 2013 ; Accepted August 23, 2013)

Key Words: Micro Gas Turbine(마이크로 가스터빈), Power(출력), Efficiency(효율), Full Load(전부하), Part Load(부분부하), Sensitivity(민감도)

초록: 본 연구에서는 현재 개발중인 200kW 급 마이크로 가스터빈의 운전 특성을 조사하였다. 세부적인 성능 데이터를 이용하여 부분부하 제어방식(터빈 입구온도 제어방식(constant TIT control)과 터빈 출구온도 제어방식(constant TET control))과 외기온도에 따른 성능 및 작동특성을 분석하였다. 넓은 운전 범위에 대하여 압축기 서지마진과 터빈 입출구 온도 같은 작동 파라미터의 민감도를 단위 연료량 변화에 따라 예측하였다. 정상상태 계산으로 부분부하 변동 시 최대서지마진의 감소에 대한 정보를 민감도 분석을 통해 알 수 있다.

Abstract: This study simulates the operation of a 200 kW class micro gas turbine that is currently under development. The performance and operating characteristics depending on the load control scheme (constant turbine inlet temperature versus constant turbine exit temperature) and ambient condition were investigated using detailed component performance data. The sensitivities of operating parameters, such as the compressor surge margin and flow path temperatures, according to unit fuel flow change were predicted for a wide load range. The sensitivity analysis showed that the steady state calculation provided useful information about the maximum surge margin reduction during load change.

- 기호설명 -

DPC : 전력조절장치
 ε : 열교환기 유용도
 LHV : 저위발열량
 \dot{m} : 질량유량
 MGT : 마이크로 가스터빈
 P : 압력
 PR : 압력비
 S : 민감도
 SM : 서지마진
 T : 온도
 TET : 터빈 출구온도

TIT : 터빈 입구온도
 \dot{W} : 출력
 η : 효율
 Y : 파라미터

하첨자

air : 공기
amb : 대기상태
c : 저온부
C : 압축기
d : 설계조건
fuel : 연료
gen : 발전기
h : 고온부
in : 입구
 MGT : 마이크로 가스터빈

§ 이 논문은 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 31., 영흥에너지파크) 발표논문임.

† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

- ml* : 기계적 손실
- o* : 운전상태
- out* : 출구
- ref* : 기준상태
- s* : 서지상태
- T* : 터빈

1. 서 론

세계적으로 에너지 자원의 고갈 및 환경오염의 문제가 대두되고 있다. 또한 국제 원유가격의 상승으로 연료의 가격 또한 상승하였다. 이러한 상황에서 높은 효율과 친환경적인 발전시스템의 개발이 필요하다. 특히 전력이송에 의한 손실이 적고 에너지 수요에 대한 대응이 빠른 분산발전(distributed generation)의 관심과 필요성이 높아지고 있다. 풍력, 태양열, 연료전지 등 다양한 분산발전 시스템 중에 친환경적이며 운전 신뢰성과 유지보수성이 좋은 마이크로 가스터빈(micro gas turbine)이 주목을 받고 있다.⁽¹⁾

해외에서는 최근 효율이 30% 넘는 200kW 급 엔진이 상용화 되고 있다. 그리고 마이크로 가스터빈의 연료로서 천연가스뿐만 아니라 바이오 연료를 이용하여 친환경적으로 발전시스템을 연구 개발 중에 있으며 분산발전의 효율을 높이기 위하여 열병합발전 시스템으로 사용하고 있다.^(2,3) 이러한 세계적인 경향을 반영하여 국내 대형 병원과 대형 할인매장 등에서 마이크로 가스터빈으로 열병합발전 시스템을 적용하고 있으며 성능분석 및 경제성 분석도 이루어 지고 있다.^(4,5) 국내에서도 마이크로 가스터빈의 개발이 계획된 바 있고,⁽⁶⁾ 넓은 운전조건 범위에서 상용 마이크로 가스터빈의 성능 분석과^(7,8) 동적 작동특성 해석에 대한 연구도 진행되었다.⁽⁹⁾ 현재는 200kW 급 마이크로 가스터빈의 개발을 목표로 연구가 진행되고 있다.^(10,11)

마이크로 가스터빈은 약 300kW 이하의 소형 가스터빈으로서 대형 가스터빈에서 사용하는 고온부 냉각기술을 사용하기 힘들므로 터빈입구온도가 낮게 설계된다. 따라서 단순사이클로는 열효율이 낮기 때문에 재생기를 사용하여 재생사이클로 설계되고 재생기의 효과를 충분히 발휘하기 위하여 낮은 압력비로 설계된다. 마이크로 가스터빈은 대체로 압력비 3~5 정도로 설계된다.

기저부하용 전원장치로써 사용되는 대형 가스터빈과는 다르게 분산발전으로 사용되는 마이크로 가스터빈은 많은 시간 동안 설계상태가 아닌 부분

부하 상태로 운전된다. 따라서 기저부하용 전원장치와는 달리 마이크로 가스터빈은 부분부하시의 성능이 운전 경제성 측면에서 중요하다. 하지만 잦은 부하 변동으로 인하여 안정적으로 작동하는 것이 운전 신뢰성과 유지보수 측면에 있어서 더 중요하다.

본 연구에서는 현재 개발중인 200kW 급 마이크로 가스터빈을 안정적으로 작동하기 위하여 부분부하 운전방법과 외기온도에 따른 성능분석을 하였다. 이를 바탕으로 연료량 변화에 따른 출력, 공기유량, 최대압력, 최대온도, 터빈 출구온도, 서지마진 등의 변화와 민감도를 분석하여 현재 개발중인 엔진의 연구개발에 있어 기초 자료를 제공하고자 한다. 해석을 위해서 상용프로그램인 Gasturb 9.0 을 사용하였다.⁽¹²⁾

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 모델링

본 연구의 대상인 마이크로 가스터빈의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 압축기와 터빈, 발전기는 단축으로 설계되었다. 본 시스템에서는 감속기어 없이 엔진 축과 발전기(high speed motor/generator)가 연결되어 고주파 전기를 생산하고, 전력조정장치(digital power controller, DPC)에서 고속 교류전기를 교류-직류-교류의 전환을 통하여 저속 교류전기(60Hz)로 변환 후 외부로 공급한다. 또한 엔진이 부분부하 운전시 가변 회전수 운전을 하게 되는데 이때 전력조정장치를 이용하여 일정한 교류전기를 공급한다.

덕트를 통과한 공기는 압축기에서 가압 후 이중 일부는 베어링 냉각을 위한 2 차 공기로 사용된다. 나머지 공기는 재생기 저온부를 통과하여 터빈을 통과한 배기가스와 열교환을 한다. 열교환

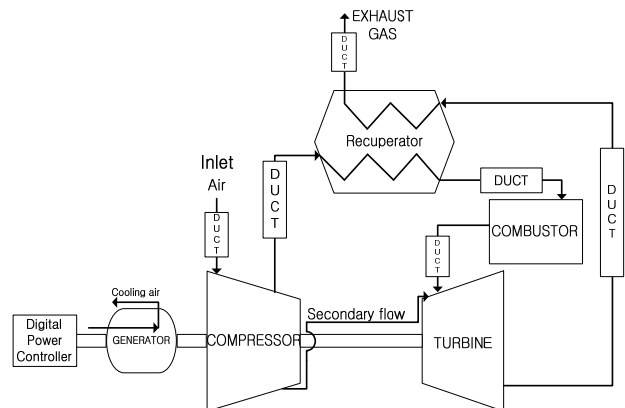


Fig. 1 MGT system configuration

Table 1 Design specification of MGT

Parameters	Unit	Value
Inlet air flow	kg/s	1.454
Relative humidity	%	60.0
Ambient pressure	kPa	101.3
Ambient Temperature	°C	15.0
Pressure ratio	-	4.2
Turbine inlet temperature	°C	980
Turbine exhaust temperature	°C	684.5
Compressor isentropic efficiency	%	83.0
Turbine isentropic efficiency	%	87.8
Recuperator effectiveness	%	90.0
Recuperator pressure loss(cold side)	%	1.5
Recuperator pressure loss(hot side)	%	3.5
Duct pressure loss	%	1.5~2.5
Shaft speed	Rpm	40,000
Shaft Power	kW	240
Thermal efficiency	%	39.5

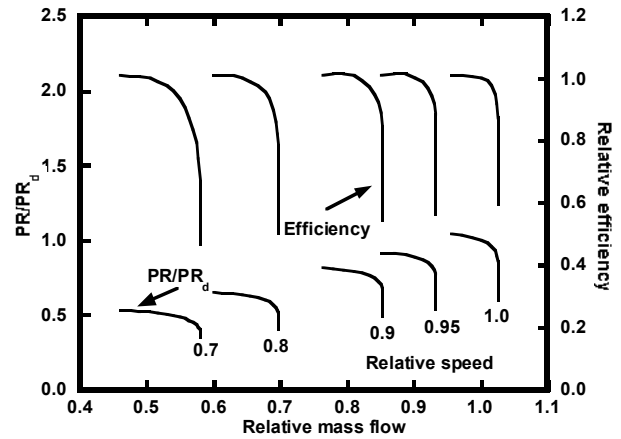
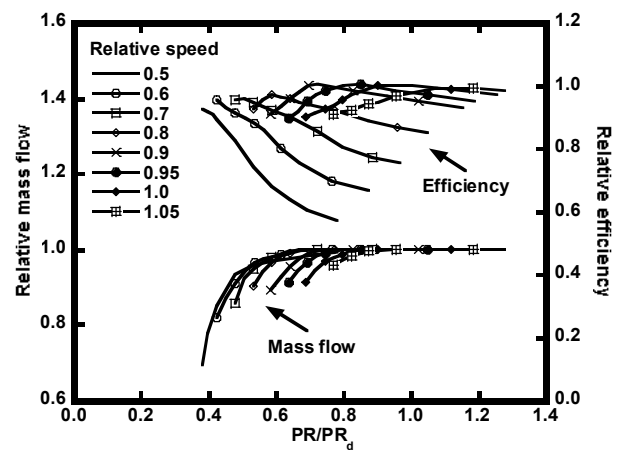
을 하여 온도가 상승된 공기는 연소기로 공급되고 연소반응 후 연소가스는 베어링 냉각에 사용된 2차 공기와 터빈입구에서 혼합된 뒤 터빈 로터에서 팽창하여 일을 발생시킨 후 재생기 고온부를 통과하여 대기로 배출된다. 2차 공기가 출력에 기여하는 비율은 50%로 가정하였다.⁽¹³⁾

마이크로 가스터빈의 설계사양은 ISO 조건에서 압력비 약 4.2, 축출력(Shaft power)은 약 240kW, 열효율은 약 39%로 설계되었다. 연료는 천연가스를 사용하며 주요 구성부로 1단 원심형 압축기, 재생 열교환기, 연소기, 1단 원심터빈 그리고 재생열교환기로 구성된다. Table 1에 성능과 파라미터들을 요약하였다.

설계조건인 엔진은 아직 설계가 완료되지 않아 탈설계(off-design)시 필요한 압축기와 터빈의 성능선도는 본 엔진 개발그룹에서 보유하고 있는 설계점이 비슷한 맵을 축척(scale)하여 사용하였으며 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내었다. 성능선도는 무차원화 하여 표시하였다. 탈설계시 작동점은 압축기와 터빈의 매칭에 의해서 결정이 된다. 매칭을 통하여 결정된 작동점에 의해 압축기 맵에서 유량, 압력비, 효율이 결정되고 터빈 맵에서 유량, 팽창비, 효율이 결정된다.

서지마진이란 압축기 선도에서 작동점이 서지에 얼마나 근접해 있는지를 나타내는 척도이다. 서지마진은 다음과 같이 압력비와 유량에 의한 식으로 정의한다.

$$SM(\%) = \left[\frac{\dot{m}_o \cdot (PR_s)}{\dot{m}_s \cdot (PR_o)} - 1 \right] \times 100 \quad (1)$$

**Fig. 2** Compressor map**Fig. 3** Turbine map

압축기 성능선도에서 유량이 감소하고 압력비가 증가하여 작동점이 서지라인에 근접할수록 서지마진은 감소한다. 재생기의 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad (2)$$

각 구성부 사이의 유로(덕트)에서의 압력손실도 고려되었다. 마이크로 가스터빈의 순 출력 및 효율의 식은 다음과 같다.

$$\dot{W}_{MGT} = \dot{W}_T - \dot{W}_C - \dot{W}_{ml} \quad (3)$$

$$\eta_{MGT} = \frac{\dot{W}_{MGT}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{fuel}} \quad (4)$$

하첨자 ml 은 베어링의 손실(기계적 손실)로 시스템 출력의 약 5%로 가정하였다.⁽¹³⁾ 아래 해석의 경우 축출력(shaft power) 기준으로 하였다.

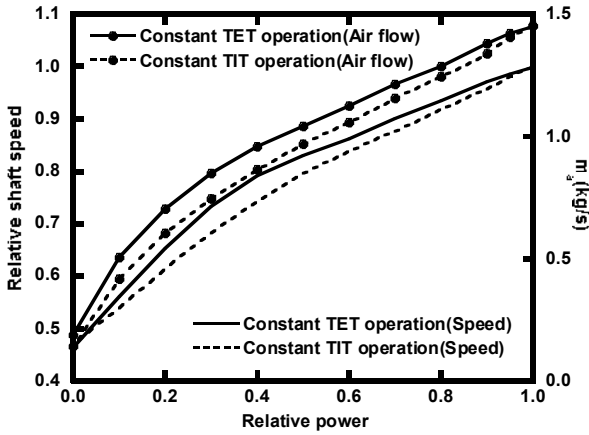


Fig. 4 Variations in shaft speed and air flow rate with power ($T_{amb} = 15^{\circ}C$)

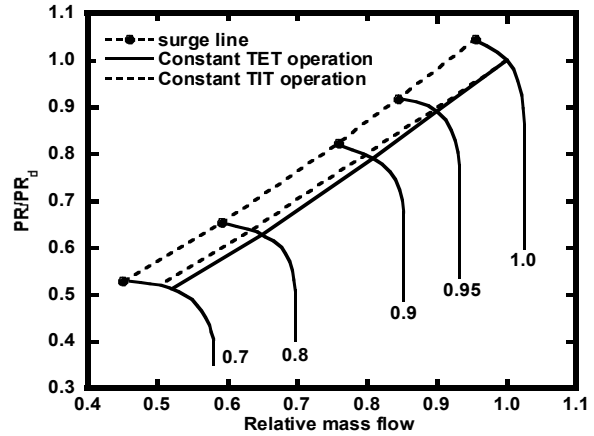


Fig. 6 Variation in operating line with operation method ($T_{amb} = 15^{\circ}C$)

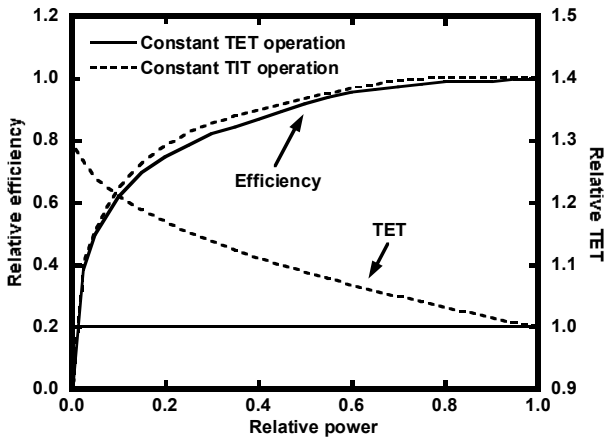


Fig. 5 Variations in efficiency and TET with power ($T_{amb} = 15^{\circ}C$)

3. 해석결과

3.1 부분부하 운전방법에 따른 성능분석

부분부하 운전에는 공기 유량을 최대로 고정하고 연료만으로 부하를 조절하는 최대공기유량 제어(maximum air flow control)방법과 공기유량과 연료를 동시에 조절(variable air flow control)하는 제어방법이 있다. 최대공기유량 제어 방법은 부하가 변동하여도 연료만을 제어(fuel only control)하여 회전수를 일정하게 유지하기 때문에 압축기 특성에 따라 흡입 가능한 최대한의 유량으로 운전된다.

공기유량을 제어하는 방법에는 부하에 따라서 축 회전수를 변화시키는 가변회전수 운전과 입구 안내깃(inlet guide vane, IGV)의 개도를 조절을 하는 IGV 운전이 있다. 두 경우 부하 감소시에 공기유량을 감소시킨다. 이 공기유량 제어 운전은 터빈 입구온도 제어(TIT control)와 터빈 출구온도 제어

(TET control)를 위하여 사용된다. 선행 연구 결과에 의하면 열회수 사이클의 경우 연료만 제어하는 방법보다 연료와 공기유량을 동시에 제어하면 터빈출구온도(TET)를 높게 유지할 수 있다.⁽³⁾

본 연구의 대상인 마이크로 가스터빈은 부하에 따라서 축 회전수를 변화시키는 가변회전수 운전을 하기 때문에 최대공기유량 제어방법을 제외하고 터빈입구온도 제어(TIT control)와 터빈출구온도 제어(TET control)방법을 사용하여 대기조건이 $15^{\circ}C$, 1 기압에서 부분부하 운전 방법에 따른 성능 분석을 수행하였다.

먼저 Fig. 4에서 TET 제어방식과 TIT 제어방식을 사용하여 부분부하에 따른 공기유량과 상대 축 속도를 나타내었다. 동일한 부분부하 운전시 TET 제어방식의 경우 회전속도가 더 빠르고 공기유량이 많다. Fig. 5에서는 효율의 변화를 보였다. 동일한 부분부하 시 공기유량이 적은 TIT 제어방식의 TET와 효율이 더 높은 것으로 보인다. 이는 TIT 제어 방식이 부하 감소에 따라 상대적으로 압축기로 흡입되는 공기유량이 적기 때문에 TET가 증가하게 된다. 결국 TET 증가로 재생기의 열 회수 성능이 높아지게 되고 시스템의 효율을 상승하게 된다.

Fig. 6에 부분부하 운전방법에 따른 작동선을 비교하였다. TIT 제어방식이 TET 제어방식보다 작동선이 서지라인(surge line)과 더 가깝다. 회전수가 감소할수록 TET 제어방식의 서지마진이 더 크다. 현재 계산은 정상상태를 기준으로 계산을 수행하였지만 만약 과도상태(transient)로 작동을 할 경우 압축기의 작동점이 서지라인을 넘어갈 우려가 있기 때문에 마진이 클수록 좋다.

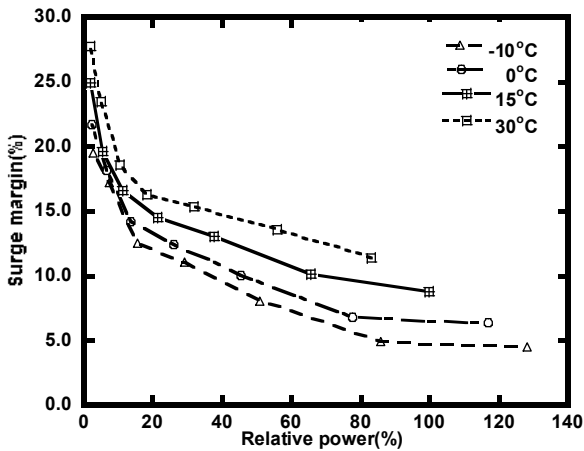


Fig. 7 Variation in surge margin with ambient temperature

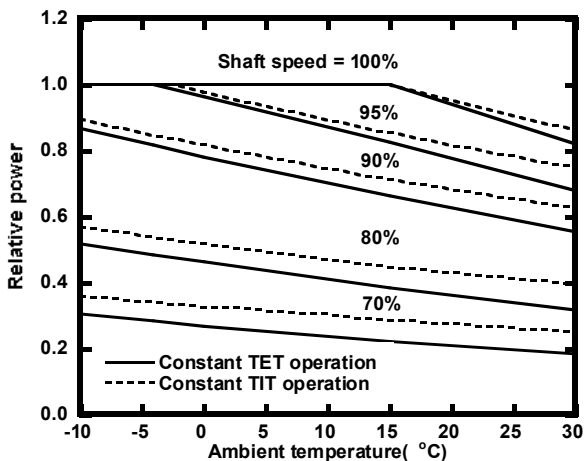


Fig. 8 Variation in power with ambient temperature

3.2 외기온도에 따른 성능분석

외기온도의 변화는 압축기 입구로 유입되는 공기유량을 변화시켜 출력, 효율 및 TET 에 영향을 준다. 우리나라의 연평균 최저기온과 최고기온을 고려하여 -10°C 와 30°C 를 최저기온과 최고기온으로 설정하고 성능변화를 살폈다. Fig. 7 에는 외기온도 변화에 따른 서지라인 변화를 비교해 보았다. 외기온도가 높아질수록 서지마진이 커지고 외기온도가 낮아짐에 따라 서지마진이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 외기온도가 낮아짐에 따라 공기밀도가 증가하므로 압축기 입구로 흡입되는 공기유량과 압력비가 증가하게 된다. 이때 공기유량 증가량 대비 압력비 증가량이 더 많아 서지마진이 줄어들게 된다.

Fig. 8 은 외기온도 15°C 에서 전부하(full load)와 부분부하(part load)가 외기온도의 변화에 따라 TET 제어 방법과 TIT 제어방법의 출력변화를 예측한

결과를 비교하였다. 외기온 15°C 이하에서 생산 가능한 상대 최대출력은 1.0 이상이지만 발전기, 베어링 용량 등을 고려하여 현실적인 상대 최대출력을 1.0 으로 유지하는 시스템 설계를 고려하였다.

엔진이 동일한 회전수에서 운전시 TIT 제어방법보다 TET 제어방법이 외기온 변화에 따라 출력 변화율이 크다. 하지만 동일한 회전수와 외기온 조건에서는 TIT 제어방법이 출력이 더 크다.

3.3 연료량 변화에 따른 운전성능 민감도 해석

3.3.1 민감도 계산방법

마이크로 가스터빈의 경우 대형 가스터빈보다 RPM 변동이 크고 운전시 순간적인 외부교란이나 제어문제가 발생할 경우 서지마진이 대폭 감소하게 된다. 서지마진이 감소할 경우 압축기에 손상을 주기 때문에 엔진을 안정적으로 운전하기 위해서는 서지마진 확보가 중요하다. Fig. 6 을 보면 TIT 제어방식보다 TET 제어방식의 경우 서지마진이 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 높은 출력과 효율적인 측면보다 시스템의 운전 신뢰성과 유지보수 측면을 고려하여 이후 연료량 변화에 따른 민감도 계산은 TET 제어방식을 기준으로 수행하였다.

연료량 변화에 따라 운전상태, 특히 서지마진이 얼마나 민감하게 변하는지 예측하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다. 각 구성부의 주요 파라미터에 대한 성능변화 민감도를 연료량의 단위비율(1%) 변화에 대한 파라미터의 변화율로 정의하였다.⁽¹¹⁾ 민감도 식은 다음과 같다.

$$S = \frac{\Delta Y / Y_{ref}}{\Delta \dot{m}_{fuel} / \dot{m}_{fuel,ref}} \quad (5)$$

여기서 S 는 민감도를 나타내고, Y 는 각 주요 파라미터를 의미한다. $\Delta \dot{m}_{fuel} / \dot{m}_{fuel,ref}$ 은 부분부하 기준연료량 대비 변화율이며 $\Delta Y / Y_{ref}$ 은 부분부하 운전 중 기준 파라미터 대비 변화율을 나타낸다.

3.3.2 주요 파라미터에 대한 민감도 분석

TET 제어방식으로 부분부하 운전을 할 때 등속으로 운전중인 엔진에 부하가 증가될 때 회전속도가 감소하게 된다. 이때 공급되는 연료의 양을 증가시키면 회전속도가 증가되고 TIT 와 TET 가 모두 상승하였다가 압축기와 터빈의 매칭을 통해 일정한 TET 와 새로운 부하조건을 만족시키는 작동

Table 2 Parameter definition

	Y_{ref}
1	power(\dot{W})
2	air flow(\dot{m}_{air})
3	compressor outlet pressure($P_{C,out}$)
4	turbine inlet temperature(TIT)
5	turbine outlet temperature(TET)
6	surge margin(SM)

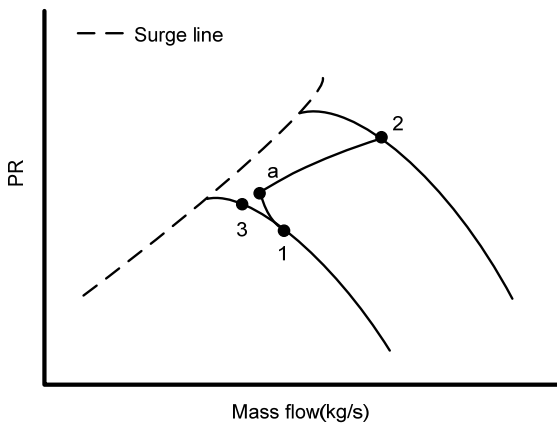


Fig. 9 Compressor map with operation point

점으로 이동한다.

민감도 분석의 목적은 정상상태 해석으로 과도 상태를 예측하는 것이다. 정상상태로 해석하기 때문에 등속운전 중 부하 증가 시 기계적 관성으로 인해 발생하는 회전수 감소를 예측하기 어려워 부하가 증가될 때 동시에 연료공급이 이루어져 회전 속도의 감속 없이 가속을 한다는 가정 후 해석을 수행하였다. Fig. 9 에 Point 1 에서 Point 2 로 이동하는 작동점의 궤적을 보였다. Point 1 은 부분부하 운전조건(TET 제어방식)을 만족하는 임의의 회전수 선상에 있는 작동점, Point 2 는 TET 가 일정한 상태에서 연료량 1% 증가 시 이동된 작동점, Point 3 의 경우 동일한 회전수 선상에서 연료 1%증가 시 이동된 작동점 그리고 Point a 의 경우 Point 1 에서 2 로 작동점이 이동할 때 최소 서지마진 값을 가지는 작동점이다.

민감도 해석을 하는 방법을 크게 두 가지로 생각해 볼 수 있다. Point 1 에서 Point a 를 통과하여 Point 2 로 이동할 때 최소 서지마진 값을 가지는 회전수 선위에 있는 작동점에서 민감도 해석을 수행하는 방법과 Point 1 에서 Point 3 으로 이동할 때 민감도를 해석하는 방법이다. 이후 Point 1 에서 a,

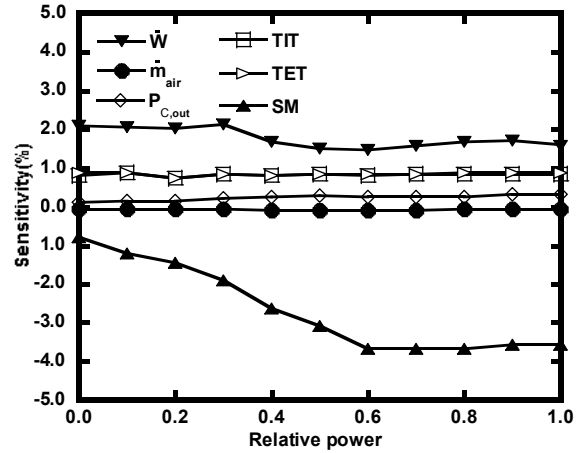


Fig. 10 Variation in parameter sensitivity with power (process A (point 1-a-2))

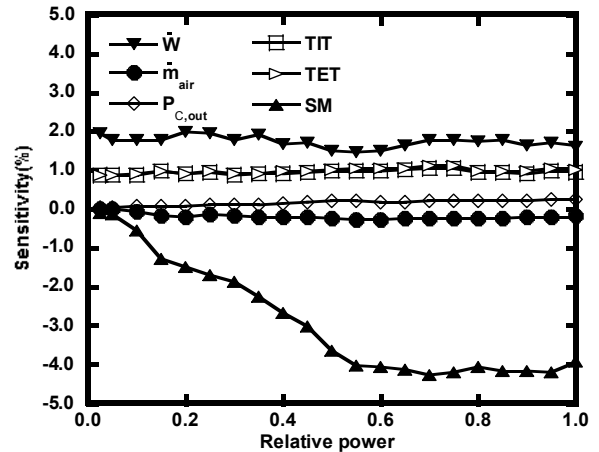


Fig. 11 Variation in parameter sensitivity with power (process B (point 1-3))

2 로 이동하는 과정을 A 과정, Point 1 에서 3 으로 이동하는 과정을 B 과정으로 정의하였다. 먼저 A 과정에서 최소 서지마진 값을 찾기 위해 회전수를 여러 구간으로 나눠 계산하였다. 계산 결과 최소 서지마진은 대체로 초기 10%미만의 회전수 구간에서 발생한다. 여러 구간을 나눠 계산한 결과는 과도상태 해석과 유사하다. 최소 서지마진 값을 가지는 작동점 Point a 에서 부분부하 변화에 따른 주요 설계 파라미터의 민감도를 해석하여 Fig. 10 에, B 과정에서 주요 설계 파라미터의 민감도를 Fig. 11 에 요약하였다. 해당 파라미터인 Y 는 1. 출력, 2. 공기유량, 3. 압축기 출구압력, 4. 터빈 입구온도, 5. 터빈 출구온도, 6. 서지마진이다. Fig. 10 과 Fig. 11 에서 횡축의 상대출력(Relative power)은 연료량 변화가 없는 상태 즉, Fig. 9 의 Point 1 상태를 의미한다.

Fig. 10 과 Fig. 11 에서 민감도가 양수이면 연료

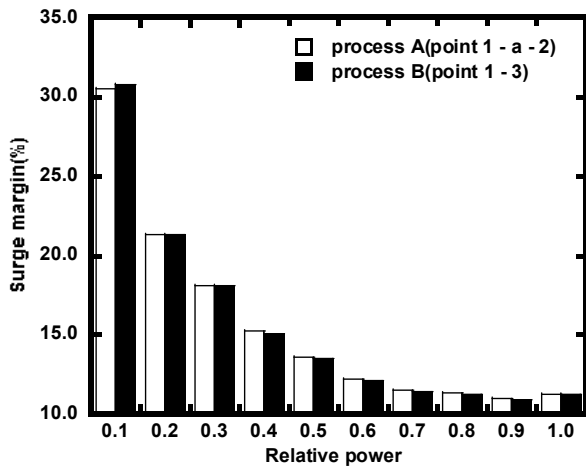


Fig. 12 Comparison of surge margin with process

량 1%증가 할 때 파라미터의 값이 증가를 의미하고 음수이면 감소를 의미한다. Fig. 10 과 Fig. 11 을 비교해보면 부분부하에 따른 민감도의 변화가 서지마진의 민감도를 제외하고 유사한 것을 확인할 수 있다. 과정 A 와 B 모두 부분부하 운전 상태에서 출력은 약 2.0%내외의 민감도를 보였다. 공기유량은 약 -0.1%, 압축기 출구압력은 약 0.3%, 터빈 입구온도와 터빈 출구온도는 1% 미만의 민감도를 보였다. 서지마진의 경우 A 과정과 B 과정의 경향은 비슷하나 100% 부하에서 50% 부분부하까지는 B 과정의 경우가 절대값기준 약 -0.4%의 민감도가 큰 것으로 보이고 50% 이하의 부분부하에서는 A 과정의 민감도가 큰 것으로 보였다. 매우 소폭이긴 하지만 공기유량의 민감도(약 -0.1%)가 감소하고 압축기 출구압력의 민감도(약 0.3%)가 증가하였는데 이는 압축기와 터빈의 매칭에 의한 결과이다. 연료량의 증가는 터빈 입구압력을 증가시키고 이에 따라 압축기 출구압력도 증가하게 된다. 압축기 맵에서 동일 회전수로 운전 중일때 압축기 출구압력이 증가 하면 공기유량은 감소한다.

설계 파라미터 중 엔진의 안정적인 운전에 주요한 파라미터인 서지마진을 비교해 본 결과 10%의 부분부하를 제외한 나머지 부분부하 운전상태에서 A 과정에서 최소 서지마진 값이 B 과정에서의 서지마진과 거의 같은 것을 Fig. 12 에서 확인할 수 있다. 거의 같은 이유는 Fig. 9 에서 Point a 와 Point 3 공기유량이 거의 같기 때문이다. 서지마진의 경우 압축기 맵의 형상에 영향을 많이 받는다. 압축기 맵에서 회전수가 높은 경우 유량변화 대비 압력변화의 폭이 크기 때문에 서지마진의 민감도가 상대적으로 크고 회전수가 낮은 경우 유량변화 대비 압력변화의 폭이 작기 때문에 서지마진의 민감

도가 상대적으로 작다.

Fig. 9 에서 보이듯이 A 과정에서 최대 서지마진이 감소하여도 B 과정으로 예측한 서지마진을 넘어가지 않기 때문에 B 과정으로 예측한 것보다 서지마진을 확보하게 되어 엔진을 안정적으로 운전하는데 도움이 된다. 또한 연료량 변화에 따른 최소 서지마진을 예측하기 위하여 회전수를 여러 구간으로 나눠 서지마진을 찾아야 하는 A 과정보다 한번의 계산으로 서지마진을 구할 수 있는 B 과정이 편리하고 쉽게 과도상태를 대략적으로 모사 할 수 있다.

4. 결론

동일한 부분부하 시 TIT 제어방법에 비해 TET 제어방법이 회전속도가 더 빠르고 압축기로 유입되는 공기유량이 더 많았다. 공기유량이 상대적으로 적은 TIT 제어방법이 터빈출구온도가 더 높기 때문에 재생기의 열 회수량도 높아져 시스템 효율이 상승하게 된다.

부분부하 운전방법에 따라 압축기 맵에서 작동점의 이동경로를 비교해본 결과 TIT 제어방법이 TET 제어 방법보다 서지라인에 더 가까운 상태로 작동한다. 즉 TET 제어방법을 사용하면 서지마진을 더 확보할 수 있다.

외기온도 변화에 따른 출력 변화율은 TET 제어방법이 더 큰 것으로 나타났고 동일한 외기온도와 회전수 조건에서 TIT 제어방법의 출력이 더 높게 나타났다.

연료 1% 증가 시 과도상태로 작동하면서 서지마진이 최소가 되는 작동점(A 과정)에서의 주요 파라미터의 민감도 결과와 동일 회전수에서 연료 1% 증가시 작동점(B 과정)에서의 민감도 결과를 비교 분석한 결과 서지마진을 제외한 다른 파라미터들의 민감도는 거의 유사한 것을 알 수 있다. 서지마진의 경우 10% 부하를 제외하고 A 과정에서 서지마진이 B 과정에 서지마진과 거의 같다. 따라서 여러 구간을 계산하여 최소 서지마진 값을 찾아야 하는 A 과정 보다 B 과정을 통하여 쉽게 계산할 수 있고 과도상태를 대략적으로 모사 할 수 있다.

후 기

본 논문은 2011 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 2011T100200099)

참고문헌

- (1) Rodgers, C. and Watts, J. and Nichols, K. and Brent, R., 2001, "Microturbines, in Distributed Generation," Borbely, A.M. and Kreider, J., ed., CRC Press, pp.119-150.
- (2) Tan, E. S. and Zuhlairi, M. A., 2012, " Feasibility of Biodiesel as Microturbine Alternative Fuel Through Atomization Characteristics Study," ASME GT2012-68039.
- (3) Visser, W. P. J., Shakariyants, S. and De Later, M. T. L., 2012, "Performance Optimization of a 3kW Microturbine for CHP Applications," ASME GT2012-68686.
- (4) Kim, B. S., Gil, Y. W. and Hong, W. P., 2009, " The Energy Performance & Economy Efficiency Evaluation of Microturbine Installed in Hospital Buildings," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 23, No. 12, pp. 176~183.
- (5) Hong, W. P., Kim, B. S. and Cho, Y. S., 2010, " The Energy Performance Analysis of Micro Gas Turbine in Large Scale Store," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 30, No. 2, pp. 454~459.
- (6) Oh, J. S. and Lee, H. S., 2002, " Prototype Development of a 75kW class Microturbine - Design/Manufacture and Self-Sustaining Test-," *Proceedings of 2012 Annual Meeting of Korean Fluid Machinery Association*, pp. 307~313.
- (7) Kim, T. S. and 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.
- (8) Lee, J. J. and Kim, T. S., 2004, "Analysis of Operation Performance of a Micro Gas Turbine Generator System," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 8, No. 5, pp. 13~21.
- (9) Kim, J. H., Jeon, Y. J., Kim, T. S. and Ro, S. T., 1999, "Analysis of the Dynamic Characteristics of a Small Regenerative Gas turbine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 23, NO. 6, pp. 769~777.
- (10) Park, J. H., 2011, "Practical Application of a 200kW Class Micro Gas Turbine Cogeneration System," *Proceedings of 2011 Annual Meeting of Korean Fluid Machinery Association*, pp. 491~494.
- (11) Shin, H. D., Kang, D. W., Kim, T. S., Choi, M. k. and Park, P. J., 2012, "Design Parameter Sensitivity Analysis of a 200kW Class Micro Gas Turbine System," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 15, No. 6, pp. 39~45.
- (12) Enter Software, Gasturb 9.0, 2001.
- (13) Bruckner, R. J. and Puleo, B. J., 2008, "Compliant Foil Journal Bearing Performance at Alternate Pressures and Temperatures," ASME paper GT2008-50174.