

가스터빈의 규모별 성능차이를 고려한 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 성능해석

명노성* · 박성구* · 김동섭*†

* 인하대학교 기계공학부

Analysis of Performance of SOFC/GT Hybrid Systems Considering Size-Dependent Performance of Gas Turbines

No Sung Myung*, Sung Ku Park* and Tong Seop Kim*

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received November. 10, 2010 ; Revised January 13, 2011 ; Accepted January 14, 2011)

Key Words: SOFC(고체산화물 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Power(출력), Efficiency(효율) Pressure Ratio(압력비)

초록: 고체산화물 연료전지(SOFC)와 가스터빈을 결합한 하이브리드 발전시스템에서 가스터빈의 규모별 성능차이가 시스템의 성능에 미치는 영향에 대하여 해석하였다. 이를 위해 kW급, MW 이하급, 수 MW 급 등 서로 다른 세 가지 가스터빈을 선정하여 사용하였다. 가스터빈이 순 출력을 거의 내지 못하는 kW급 시스템에서도 연료전지 단독 시스템과 비교해 효율이 증가하였으며, 가스터빈의 출력이 커질수록 (즉, 성능이 좋아질수록) 하이브리드 시스템에서 가스터빈이 차지하는 비중이 커지고 시스템의 효율이 높아짐을 확인하였다. 가스터빈의 압력비 증가에 따른 성능 변화를 살펴본 결과 세 가지 하이브리드 시스템에서 모두 출력은 증가하지만, 효율의 변화는 크지 않음을 확인하였다.

Abstract: This study analyzes the performance of hybrid power systems combining a solid oxide fuel cell (SOFC) and a gas turbine (GT). Research focus is given to the influence of the size-dependent gas turbine performance on hybrid system performance. Three hybrid systems adopting different gas turbines (kW, sub-MW, multi-MW classes) are designed. As the gas turbine power increases (i.e. as the gas turbine performance enhances), the gas turbine power portion increases and the hybrid system efficiency increases. The hybrid system shows efficiency improvement over the SOFC only system even in the case where the gas turbine net power is nearly zero. The increase of gas turbine pressure ratio contributes to the net hybrid system power output in all of the three cases, while system efficiency is almost independent on the pressure ratio.

- 기호설명 -

AR : 바이패스 되는 공기 비율
 F : 페러데이 상수
 FR : 추가로 공급되는 연료 비율
 I : 전류
 LHV : 저위 발열량
 \dot{m} : 질량유량
 \dot{n} : 몰수
 SCR : 수증기/연료비

SOFC : 고체산화물 연료전지
 TIT : 터빈입구 온도
 U_f : 연료이용률
 V : 전압
 \dot{W} : 출력
 η : 효율

하첨자

AC : 교류
 aux : 보조장치
 C : 압축기
 conv : 직-교류 변환
 DC : 직류

† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr

GT : 가스터빈
 gen : 발전기
 HS : 하이브리드 시스템
 m : 기계
 T : 터빈

1. 서론

환경오염과 에너지 자원 고갈이 세계적 관심사로 떠오르면서 발전설비 분야에 있어서도 친환경적이면서 효율이 높은 발전시스템에 대한 수요가 과거 어느 때 보다 커지고 있다. 특히 화학반응을 통해 직접 전기를 발생시켜 효율이 높고 공해물질 배출이 적은 연료전지의 중요성이 부각되고 있다. 기존의 열기관 중에서는 운전 신뢰성이 높고 다른 열기관들에 비하여 친환경적인 가스터빈의 역할이 커지고 있다. 또한 이러한 두 시스템을 결합한 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템은 각각의 시스템이 단독으로 운전할 때 보다 높은 효율을 얻을 수 있다고 기대되며, 최근 관심의 대상이 되고 있다.⁽¹⁻³⁾

하이브리드 시스템을 구성함에 있어서 작동온도가 높은 고온형 연료전지를 이용하게 되는데, 이는 연료전지에서 발생하는 고온의 배기열을 이용하여 가스터빈과 연료전지를 효과적으로 결합하여 두 시스템의 단독 운전시 보다 상대적으로 높은 효율을 얻을 수 있기 때문이다. 이런 이유로 대표적인 고온형 연료전지인 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)가 주목받고 있다.^(4,5) 하이브리드 시스템은 연료전지의 작동 압력에 따라 상압형과 가압형으로 나눌 수 있는데 이론적으로 가압형을 통해서 더 높은 열효율 달성이 가능하다.⁽⁶⁾ 가압형이 상압형에 비하여 터빈입구온도를 높이기가 용이하기 때문에 동일한 터빈입구온도로 설계할 때 전체적인 연료소모가 적고, 연료전지의 작동압력이 높아서 셀 전압이 높은 것 등이 높은 열효율을 얻을 수 있는 주요 원인이다.⁽⁶⁾ 이러한 이유로 상용화에 있어서는 가압형에 초점이 맞춰 진행되고 있는데 현재까지 Siemens-Westinghouse사가 가장 먼저 220kW급 가압형 SOFC 하이브리드 시스템을 개발하였으며,⁽⁷⁾ Rolls-Royce사에서도 1MW급 SOFC 하이브리드 시스템을 개발 중에 있다.⁽⁸⁾ 또한 미국 에너지성 (DOE)에서도 수십 MW급 이상의 개발을 목표로 하고 있다.⁽⁹⁾ 기타 연구개발 현황은 참고

문헌⁽³⁾을 통해서 살펴볼 수 있다.

현 수준에서 개발되어 있는 최대 SOFC 사이즈는 수백 kW이지만 궁극적으로 대형화를 목표로 하고 있다. 예를 들어 미국 에너지성 (DOE)은 수십 MW급 이상의 개발을 목표로 하고 있다.⁽⁹⁾ 따라서 하이브리드 시스템은 수 kW의 작은 용량에서부터 MW급 이상까지 다양한 규모로 개발이 가능하며, 용량별로 가스터빈의 규모도 달라진다. 연료전지는 모듈형 개발이 원칙이므로 발전 용량이 연료전지 자체의 성능에 크게 영향을 미치지 않는다고 예상할 수 있다. 그러나, 가스터빈은 용량에 따라서 설계 파라미터들(최고온도, 압력비, 구성부 효율 등)이 크게 다르기 때문에 엔진의 성능 또한 차이가 크다. 따라서 하이브리드 시스템의 규모별로 적합한 시스템 설계 방향과 성능이 다를 것으로 예상된다.

현재까지는 주로 마이크로 가스터빈 (수십 내지 수백 kW급)을 사용하기에 적합한 하이브리드 시스템 용량 범위에 초점을 맞춘 연구, 개발이 진행되었다.⁽¹⁰⁻¹⁶⁾ 최초의 시험평가를 마친 시스템⁽⁷⁾과 개발이 시도되었던 시스템⁽⁸⁾도 이 범주에 속한다. 이외에도 더욱 초 소형급 (수 kW) 가스터빈을 사용하는 하이브리드 시스템에 대해서도 기초 연구가 수행된 바 있고,^(17,18) 수 MW 가스터빈을 사용하는 시스템에 대한 성능 예측도 이루어진 바 있다.^(19,20)

이와 같이 최근 들어 하이브리드 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되었으나 각 연구에서 사용하는 설계 파라미터들이 다르고 기준이 되는 가스터빈의 성능이 다르기 때문에 가스터빈 규모에 따른 하이브리드 시스템의 설계 및 성능 차이를 일목요연하게 이해하기가 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 일관성 있는 연료전지 설계 파라미터 (성능)를 바탕으로 규모별로 서로 다른 성능을 가지는 가스터빈들을 선택하여 하이브리드 시스템을 구성하고 성능 해석을 수행하여 각 용량별 성능 차이를 비교분석하고자 하였다. 이를 위해서 서로 다른 출력 급의 세 가지 가스터빈들을 대상으로 하였고 추가적으로 주요 설계 파라미터인 압력비 변경에 따른 하이브리드 시스템의 성능 변화 경향도 비교 분석하였다.

2. 시스템 개요 및 구성

2.1 하이브리드 시스템 구성 및 모델링

Fig. 1 에 가압형 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 구성도를 나타내었다. 이것은 이전 연구^(6,13,14)

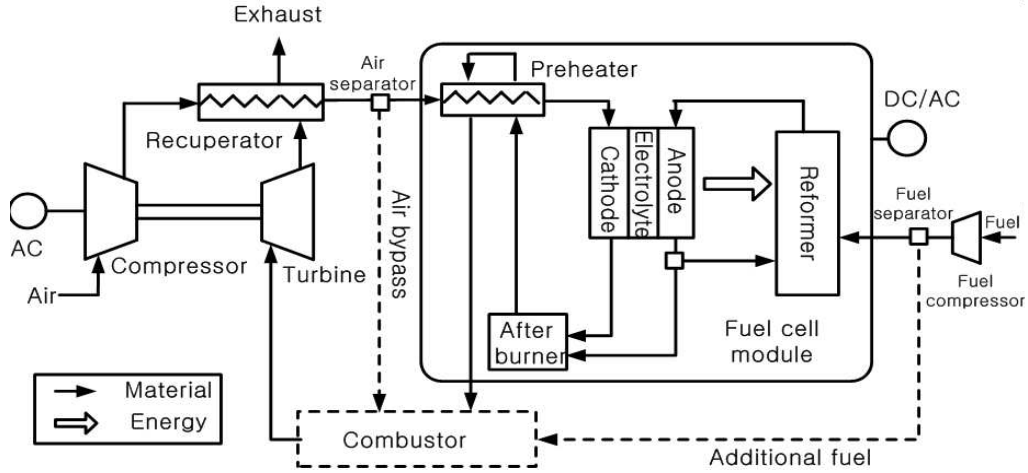
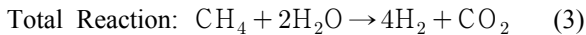
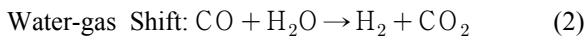
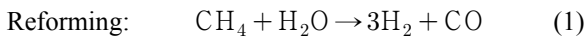
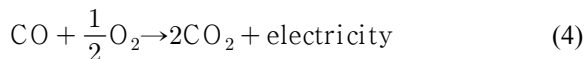
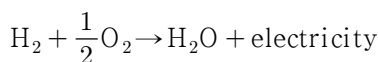


Fig. 1 SOFC/GT hybrid system configuration

에서 채택하였던 구성으로서 상용화를 위한 테스트를 거친 시스템⁽⁷⁾의 구성과도 유사하다. 위와 같이 가압형으로 시스템을 구성하면 서론에서 설명한 바와 같이 상압형에 비해 원하는 터빈입구 온도를 맞추기 위한 추가적인 연료소모가 적을 뿐 아니라, 연료전지를 가압으로 작동시킬 수 있다는 장점이 있다. 연료는 순수메탄을 가정하였는데, 연료 압축기를 통해 가압되어 시스템으로 공급된다. 공급된 연료는 수증기 개질(steam reforming)을 거쳐 수소와 일산화탄소로 변환된다. 이때 필요한 수증기 공급을 위하여 연료극 출구가스가 재순환된다. 개질 방식으로는 개질에 이용되는 열을 연료전지에서 공급받는 내부개질(internal reforming) 방식을 사용하였으며 개질 반응식은 다음과 같다.



개질반응을 통해서 얻어진 수소와 일산화탄소는 연료전지에서 아래의 전기화학 반응을 통해서 전력을 생산한다.



개질기 및 연료전지 셀에서의 반응은 모두 평형반응(equilibrium reaction)으로 가정하였다.

공기는 압축기를 통해 시스템으로 공급되며 재

생기(recuperator)에서 터빈 출구가스의 열을 회수하고 연료전지로 공급된다. 연료전지 내로 유입되는 공기는 후연소기 출가를스를 통해 한번 더 예열된 뒤 연료전지로 공급된다. 연료전지에서 반응을 마친 출가를스에 포함된 미반응 연료는 후연소기에서 연소된 뒤 터빈에서 팽창하고, 이어서 재생기로 공급되어 공기를 예열한 뒤 외부로 배출된다.

연료전지로 공급된 총 연료량과 반응연료량의 비를 연료이용률(U_f)로 다음과 같이 정의하며, 개질에 필요한 증기의 양은 다음과 같이 수증기/연료비(steam carbon ratio, SCR)로 표현된다.

$$U_f = \frac{(\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{reacted}}{(\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{supplied}} \quad (5)$$

$$SCR = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (6)$$

SOFC의 출력은 아래와 같이 계산되는데, 이때 전압은 온도와 압력의 함수로 주어지는 상관식을 사용하였다.⁽¹³⁾

$$\begin{aligned} \dot{W}_{SOFC,DC} &= V \cdot I \\ &= V(\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{reacted} \cdot 2F \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{SOFC,AC} = \dot{W}_{SOFC,DC} \cdot \eta_{conv} \quad (8)$$

가스터빈 출력은 아래와 같이 계산되는데 보조기기(연료압축기, 재순환 블로워 등)에 의한 소모동력과 발전기 효율을 고려하였다.

$$\dot{W}_{GT,AC} = (\dot{W} \cdot \eta_m - \dot{W}_c) \cdot \eta_{gen} - \dot{W}_{aux} \quad (9)$$

하이브리드 시스템의 순 출력과 효율은 아래와 같이 계산하였다.

$$\dot{W}_{HS} = \dot{W}_{SOFC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} \quad (10)$$

$$\eta_{HS} = \frac{\dot{W}_{HS}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{CH_4}} \quad (11)$$

완전히 새로운 가스터빈들을 설계, 제작하는 것은 전체 하이브리드 시스템 개발 기간과 비용 면에서 바람직하지 못한 면이 많기 때문에 기존 제작된 가스터빈을 사용하는 것이 더 현실적인 방안이 되는데, 이 경우에 하이브리드 시스템에서도 가능한 원래 가스터빈의 설계 작동 조건을 만족시켜 주는 것이 필요하다. 특히 최고 온도인 터빈입구온도(TIT)가 가스터빈 성능에 지대한 영향을 주기 때문에 이를 유지해야 하는데, 가압형 시스템에서 연료전지를 거쳐서 터빈 측으로 공급되는 가스의 온도가 원래의 가스터빈 설계온도와 같지 않을 것이기 때문에 추가적인 조정이 필요하다. Fig. 1에서 점선으로 표시된 부분이 이를 위한 것^(6,13,14)으로서, 터빈 입구온도가 가스터빈 설계온도 보다 낮을 때는 터빈 앞의 연소기에 추가적인 연료를 공급하고, 설계온도 보다 높을 때에는 연료전지로 공급되는 공기의 일부를 터빈 입구로 바이패스하여 터빈입구의 온도를 낮추어 준다.

하이브리드 시스템에 공급되는 전체 연료유량 중 터빈측으로 추가적으로 공급되는 연료의 비율(FR)과 바이패스되는 공기의 비율(AR)은 각각 아래와 같이 정의된다.

$$FR = \frac{\text{fuel supply to gas turbine}}{\text{total fuel supply}} \quad (12)$$

$$AR = \frac{\text{bypass air flow}}{\text{total air flow}} \quad (13)$$

상용소프트웨어 HYSYS⁽²¹⁾를 사용하여 해석을 수행하였다.

2.2 연료전지와 가스터빈의 기준 성능

Table 1에 연료전지의 설계조건과 연료전지 단독으로 작동할 때의 성능을 나타내었다. 연료전지 작동 온도는 900°C이고 압력은 상압에 가까우며 셀 입출구 온도차는 200°C, 이 때 작동 전압은 0.726V 이다. 이러한 수치들을 사용하여 해석한 결과 연료전지 단독 운전시의 효율은 55.9%로 예측되었다.

Table 2에는 선택한 세 가지 가스터빈의 성능 및 설계 파라미터들을 보였다. 세 엔진 모두 재생사이클 엔진들로서 재생기가 포함된 하이브리드 시스템에 사용되기에 적합하다. 이 표에 나타내는 성능지표들(출력, 효율 등)은 발표된 문헌상의 자료에 근접하도록 구성부 설계 변수 해석을 통해 구한 결과이다. 가장 작은 엔진은 2kW급 엔진⁽²²⁾으로서 초소형인 만큼 압축기, 터빈의 효율이 낮아서 재생사이클임에도 불구하고 열효율

Table 1 SOFC design Parameters

FCT [°C]	900
ΔFCT [°C]	200
Pressure Ratio	1.186
Voltage [V]	0.726
Steam Carbon Ratio	3
Utilization Factor	0.7
Compressor Efficiency [%]	76.0
Inverter Efficiency [%]	95.0
Efficiency [%]	55.9

Table 2 Design specifications of three gas turbines

	kW class GT	sub-MW class GT	multi-MW class GT
Air mass flow [kg/s]	0.0709	0.27	17.8
Pressure Ratio	2.8	3.5	9.9
Compressor Efficiency [%]	65.0	76.0	86.0
Turbine Efficiency [%]	68.2	87.0	86.0
Recuperator Efficiency [%]	85.0	85.0	92.0
TIT [°C]	850	840	1130
Mechanical Efficiency [%]	99.0	99.0	99.0
Generator Efficiency [%]	95.0	98.0	97.0
Power [kW]	2.0	30.0	4600
Efficiency [%]	10.3	31.6	39.9

Table 3 Performance of hybrid systems adopting three different gas turbines

Parameters		kW GT hybrid	sub-MW GT hybrid	multi-MW GT hybrid
Cell voltage [V]		0.752	0.758	0.784
FR		-	-	0.0282
AR		0.500	0.374	-
Mass flow [kg/s]	Fuel	0.0011	0.0055	0.682
	Air	0.079	0.27	17.8
Power [kW]	FC	33.16	164.29	20176.0
	GT	0.02	21.04	4451.0
	Total	33.18	185.33	24627.0
Specific Power [kJ/kg]		468.00	686.4	1383.5
Efficiency [%]		59.6	67.7	72.2

은 10%를 다소 상회하는 정도이다. 두 번째 가스터빈은 수십 kW급 엔진으로서 현재의 마이크로 가스터빈들을 대표한다고 볼 수 있는데,⁽²³⁾ 30kW 급으로서 열효율은 30%를 조금 상회한다. 세 번째 엔진은 현재 상용화되어 있는 재생 사이클 엔진 중 제일 큰 4.6MW 급으로서 터빈입구온도가 비교적 높고 압력비도 다소 높으며, 엔진의 열효율은 40%에 육박한다.^(19,20) 2kW, 30kW 가스터빈들은 터빈입구온도가 거의 같고, 4.6MW 급 엔진은 이들보다 200°C 가까이 더 높다.

3. 결과 및 토의

3.1 하이브리드 시스템 성능 비교

기 제작된 가스터빈을 하이브리드 시스템에 사용하게 되면 작동 조건이 변할 가능성이 있다. 가스터빈 단독 운전시에는 재생기와 터빈 사이에 연소기만 존재하지만, Fig. 1의 하이브리드 시스템에서는 예열기, 연료전지 스택 및 후연소기 등 더 많은 유동요소가 존재한다. 따라서 하이브리드 시스템에서는 추가적인 압력 손실이 생겨서 터빈 입구압력, 즉 팽창비가 바뀌게 되고 이로 인해서 설계점과 비교하여 가스터빈 압축기의 작동점이 바뀌는 문제가 생길 가능성이 있다.⁽¹⁴⁾ 하지만 본 연구에서는 다소간의 설계 변경(팽창비 변경에 대응하기 위한 터빈 설계변경 등)이 이루어져서 Table 2의 가스터빈들의 설계 운전점(터빈 입구온도 등)들이 하이브리드 시스템에서도 유지된다고 가정하였다. 가스터빈 단독 운전 시에는 연소기에서의 압력 손실을 입구 압력 기준으로 3%로 가정하였으며 (Table 2 계산에 적용), 하이브리드 시스템에서의 압력손실은 각 요소 입구

압력 기준으로 예열기에서는 3%, 스택에서는 2.5%, 개질기에서는 1%, 후연소기에서는 3%, 가스터빈 연소기에서는 3%로 가정하였다.

Table 3에 세 가지 가스터빈을 사용하여 구성한 하이브리드 시스템들의 성능 예측 결과를 보였다. 2kW 및 30kW 가스터빈으로 구성된 하이브리드 시스템들에서는 연료전지 작동온도가 요구되는 가스터빈의 터빈입구 온도보다 높고, 더욱이 연료전지 출구의 미반응 연료까지 후연소기에서 연소되므로 터빈입구온도를 맞추기 위해서는 공기의 바이패스가 필요하다. 반면에 4.6MW 급 엔진에서는 요구되는 터빈입구 온도가 충분히 높기 때문에 오히려 추가적으로 연료를 터빈측으로 공급하여야 한다. 모든 시스템에서 가스터빈 출력은 설계출력(Table 2)에 미치지 못하는데, 재생기와 터빈 사이의 유동요소 증가로 압력 손실이 증가하여 터빈출력이 감소하는 것이 가장 큰 이유이다. 압력 손실의 영향은 가스터빈 설계 압력비가 작을수록 크다. 특히 2kW급 엔진은 하이브리드 시스템에 사용될 경우에 순 출력을 거의 내지 못하는 것으로 예측되었다. 30kW급 엔진을 이용한 시스템에서는 가스터빈 순출력이 약 21kW로서 설계출력의 약 70%를 생산하고, 4.6MW급 엔진을 사용한 시스템에서는 약 3%의 출력 손실이 예상되었다.

하이브리드 시스템별로 연료전지와 가스터빈의 출력 비중을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 2kW, 30kW, 4.6MW 세 가스터빈을 사용한 하이브리드 시스템의 순 출력은 각각 약 33kW, 185kW, 24.6MW 로 예측되었으며, 가스터빈 비중은 각각 0.06%, 11.45%, 18.1%로 예상되었다. 연료전지가

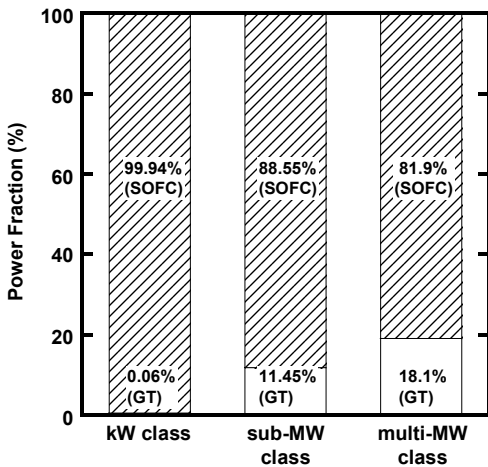


Fig. 2 Power split in the hybrid systems

주기적인 것은 분명하지만, 규모가 큰 가스터빈을 사용할수록 하이브리드 시스템에서 가스터빈이 차지하는 출력 비중이 높아진다. 한편 하이브리드 시스템들은 모두 연료전지 단독 시스템에 비하여 열효율이 높다. 특히 가스터빈이 순 출력에 거의 기여하지 못하는 첫 번째 시스템에서조차 연료전지 단독 운전에 비하여 약 4% point, 즉 상대적으로 약 6.7%의 효율 상승이 가능하였다. 이는 연료전지가 가압된 상태로 운전하게 되어 전압이 상승하는 것이 크게 기여한 결과이다. 즉, 이는 가압시스템의 장점을 보여주는 예로서 비록 가스터빈 출력 기여가 크지 않더라도 가압 운전에 의해 효율 개선이 가능함을 의미한다. 30kW, 4.6MW급 가스터빈을 기반으로 한 하이브리드 시스템에서는 연료전지만의 설계에 비하여 각각 약 21%, 29%의 열효율 향상이 예상되었다.

3.2 압력비가 성능에 미치는 영향

추가적으로 가스터빈의 주요 설계변수인 압력비의 영향을 살펴보았다. 이 경우는 앞선 예에 비하여 가스터빈의 설계 변경을 다소 더 한 경우로 볼 수 있다. 압력비가 변하게 되면 우선적으로 연료전지 전압변화로 연료전지 출력이 다소 변하게 된다. 즉, 압력비가 증가하면 전압증가로 연료전지 출력이 증가하려는 경향이 생긴다. 이외에도 압력비가 높아지면 재생기로 유입되는 터빈출구 가스온도가 낮아지고 이로 인해서 재생기 출구의 공기온도가 낮아진다.

2kW, 30kW급 가스터빈을 사용한 경우에 공기를 바이패스 시켜야 하는데, 압력비가 높아지면

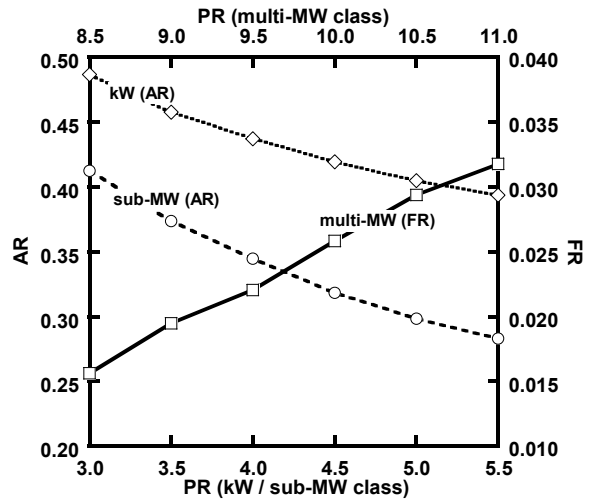


Fig. 3 AR and FR of the hybrid systems

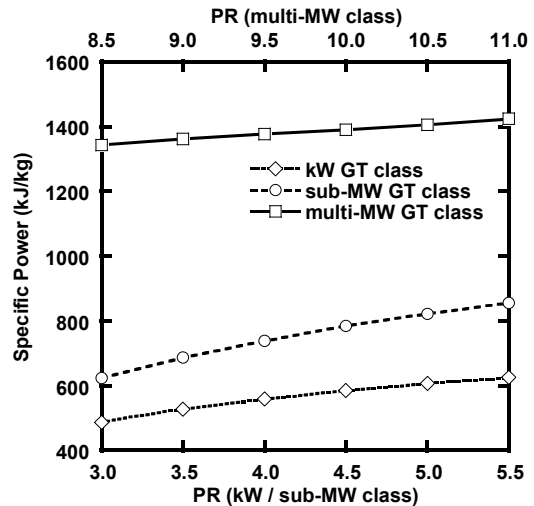


Fig. 4 Specific power of the hybrid systems

바이패스 되어 터빈입구 쪽으로 공급되는 재생기 출구 공기의 온도가 낮아지므로 동일한 터빈입구 온도를 맞추기 위해서 바이패스 되는 공기양도 줄게 된다. Fig. 3에 AR의 변화를 보였다. 이렇게 되면 연료전지 쪽으로 공급되는 공기량이 상대적으로 늘어나면서 필요한 연료전지 작동온도를 얻기 위한 연료량이 증가하게 되고 연료전지 출력이 커지게 설계된다. 즉, 전류밀도가 동일하게 설계한다면 연료전지 셀 수를 증대(유효 반응면적 증대)시켜야 한다. 결국 2kW, 30kW 급 가스터빈을 사용한 경우에 압력비를 높여서 설계하면 입구 공기 유량이 동일해도 출력은 증가하게 된다. Fig. 4에 출력을 입구공기로 나눈 비출력을 도시

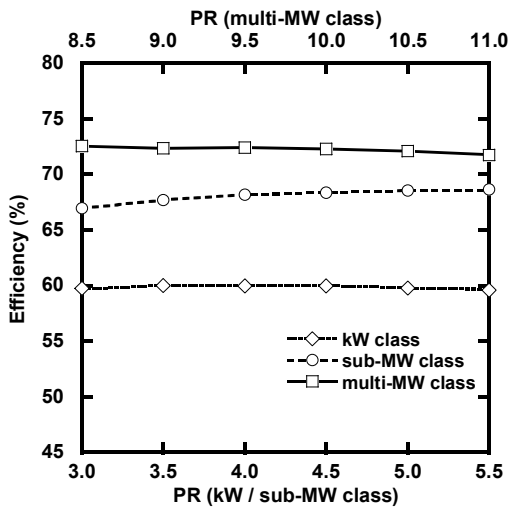


Fig. 5 System efficiency of the hybrid systems

하였다. 4.6MW 급 엔진을 사용한 하이브리드 시스템에서는 앞서 언급한 바와 같이 터빈측으로 연료를 추가적으로 공급해 주어야 한다. 이러한 시스템에서 압력비가 높아지면 재생기 출구 공기 온도가 낮아지므로 연료전지 입구 공기온도를 맞추기 위해서 후연소기 출구 가스가 예열기로 더 많은 열을 전달해 주어야 한다. 따라서 연소기로 공급되는 가스의 온도가 낮아지게 되어 결과적으로 터빈입구온도를 유지하기 위해서 더 많은 연료가 추가적으로 공급되어야 한다. Fig. 3에서 이 경향을 파악할 수 있다. 이로 인해서 압력비 증가는 하이브리드 시스템의 순 출력 증가를 가져온다. 즉, 세 시스템에서 모두 압력비 증가가 (입구 공기유량이 안변하더라도) 시스템의 순출력 증가로 이어진다. 특히 출력 비중이 높은 연료전지의 출력이 증가하는 경우(2kW, 30kW급)가 반대로 출력 비중이 낮은 가스터빈 출력이 증가하는 경우(4.6MW급)보다 순 출력 증가 비율이 높다 (Fig. 4의 기울기 비교).

Fig. 5에는 압력비 변화에 따른 각 시스템의 열 효율 변화를 나타냈다. 세 시스템 모두 압력비 증가에 따라서 열효율은 그다지 많은 변화를 나타내지 않는다. 세 시스템 모두 압력비 증가에 의해 연료 소모와 출력은 모두 증가하고, 열효율은 크게 변하지 않는 것으로 해석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 각각 다른 출력범위의 가스터빈

들과 연료전지의 결합을 통해 가압형 하이브리드 시스템을 구성하고 해석을 수행하여 출력 용량에 따른 성능 차이와 원인을 분석하였으며 결과는 다음과 같이 요약된다.

연료전지의 기준 성능은 동일하다고 가정하였을 때 출력이 큰, 즉 성능이 우수한 가스터빈을 사용할수록 하이브리드 시스템의 효율이 높아진다. 즉, 연료전지 단독 설계와 비교한 효율 향상 정도가 더 커진다.

터빈입구온도가 낮은 kW 및 수십 kW급 소형 가스터빈들을 사용하면 재생기 출구에서 터빈 측으로 공기를 바이패스 하여야 하고 터빈 입구온도가 높은 MW급의 가스터빈을 사용하면 오히려 터빈입구온도를 맞추기 위하여 터빈측으로 추가적으로 연료를 공급해야 한다.

kW급 가스터빈을 사용하면 하이브리드 시스템에서는 가스터빈 순 출력이 거의 발생하지 않으나 연료전지 전압상승 효과로 하이브리드 시스템 효율은 여전히 연료전지 단독 운전 시 보다 높다. 30kW, 4.6MW급 가스터빈을 사용한 경우에 연료전지 단독 운전시 보다 21%, 29% 정도의 효율 향상이 예상되었다.

모든 경우에 가스터빈 압력비를 높게 설계하면 입구 공기의 단위 유량당 출력(비출력)은 증가하지만 열효율은 크게 변하지 않는다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NO. 2009-0073734).

참고문헌

- (1) Williams, M. C., Strakey, J. P. and Singhal, S. C., 2004, "U.S Distributed Generation Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 79~85.
- (2) Williams, M. C., Strakey, J. P. and Sudoval, W., 2006, "U.S DOE Fossil Energy Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
- (3) Kim, T. S. and Park, S. K., 2009, "Integrated Power Generation System Based on High Temperature Fuel Cells - a Review of Research

- and Development Status," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 33, No. 5, pp. 299-310.
- (4) Singhal, S. C., 2000, "Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology," *Solid State Ionics*, Vol. 135, pp. 305~313.
- (5) Singhal, S. C., 2002, "Solid Oxide Fuel Cells for Stationary, Mobile, and Military Applications," *Solid State Ionics*, Vol. 152-153, pp. 405~410.
- (6) Park, S. K. and Kim, T. S., 2006, "Comparison between Pressurized Design and Ambient Pressure Design of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine System," *Journal of Power Sources*, Vol. 63, pp. 490~499.
- (7) Veyo, S. E., Shockling, L. A., Dederer, J. T., Gillett, J. E. and Lundberg, W. L., 2002, "Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power Systems : Status," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, pp. 845-849.
- (8) Agnew, G. D., Bozzolo, M., Moritz, R. R. and Berenyi, S., 2005, "The Design and Integration of the Rolls-Royce Fuel Cell Systems 1MW SOFC," ASME paper GT2005-69122.
- (9) Pierre J. F., Office of Fossil Energy Fuel Cell Program FY2007 Annual Report; 2007: 3~5.
- (10) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2004, "Performance Characteristics Analysis of Gas Turbine - Pressurized SOFC Hybrid Systems," *Trans. of the SAREK*, Vol. 16, No. 7, pp. 615~622.
- (11) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J.H., 2005, "Comparative Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems Considering Different Cell Inlet Preheating Methods," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 6, pp. 722~729.
- (12) Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, J. H., Kim, T. S., Ro, S. T. and Suzuki, K., 2005, "Performance Analysis of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid Power System Based on a Quasi-Two Dimensional Model," *Journal of Power Sources*, Vol. 142, pp. 30~42.
- (13) Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S., Kim, J. H., Sohn, J. L., and Ro, S. T., 2006, "Design Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems Considering Temperature Constraints," *Journal of Power Sources*, Vol. 160, pp. 462~473.
- (14) Park, S. K., Oh, K. S. and Kim, T. S., 2007, "Analysis of the Design of a Pressurized SOFC Hybrid System using a Fixed Gas Turbine Design", *Journal of Power Sources*, Vol. 170, pp. 130~139.
- (15) Chan, S. H., Ho, H. K. and Tian, Y., 2002. "Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant," *Journal of Power Sources*, Vol. 109, pp. 111~120.
- (16) Chan, S. H., Ho, H. K. and Tian, Y., 2003, "Multi-level Modeling of SOFC-Gas Turbine Hybrid System," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 889~900.
- (17) Lim, T. H., Song, R. H., Shin, D. R., Yang, J. I., Jung, H., Vinke, I. C. and Yang, S. S., 2008, "Operating Characteristics of a 5 kW class Anode-Supported Planar SOFC Stack for a Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 1076~1083.
- (18) Magistri, L., Costamagna, P., Massardo, A. F., Rodgers, C. and McDonald, C. F., 2002, "A Hybrid System based on a Personal Turbine (5kW) and a Solid Oxide Fuel Cell Stack : A Flexible and High Efficiency Energy Concept for the Distributed Power Market," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, pp. 850~857.
- (19) Lundberg, W. L., Veyo, S. E. and Moeckel, M. D., 2003, "A High-Efficiency Solid Oxide Fuel Cell Hybrid System using the Mercury 50 ATS Gas Turbine," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 125, pp.51~58.
- (20) Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, T. S. and Ro, S. T., 2006, "Performance Characteristics of a MW-class SOFC/GT Hybrid System Based on a Commercially Available Gas Turbine," *Jornal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 361~367.
- (21) Aspen Technology, HYSYS, ver. 2006.5.
- (22) Ribaud, Y., 2004, "Overall Thermodynamic

Model of an Ultra Micro Turbine," *Journal of Thermal Science*, Vol. 13, No. 4, pp. 297~301.

(23) Lee. J. J., Yoon, S. H., Kim, T. S. and Sohn, J. L., 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.