

가스터빈의 성능과 연료전지의 출력비중이 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템 성능에 미치는 영향

안지호* · 강수영* · 김동섭*†

* 인하대학교 기계공학부

Influence of Gas Turbine Performance and Fuel Cell Power Share on the Performance of Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems

Ji-Ho Ahn*, Soo Young Kang* and Tong Seop Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received December 14, 2011; Revised February 1, 2012; Accepted February 2, 2012)

Key Words : Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Fuel Cell Temperature(연료전지 작동온도), Air Bypass(공기 바이패스)

초록: 출력 규모가 다른 세가지 상용 가스터빈들을 바탕으로 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템을 구성하고 성능을 비교하였다. 각 가스터빈을 사용할 때 연료전지와 가스터빈의 출력 비중 및 효율을 비교, 분석하였고 연료전지 설계온도를 변화시키면서 출력 비중의 변화와 시스템 효율 변화를 분석하였다. 수십 kW 급 소형 가스터빈을 사용한 하이브리드 시스템에서는 연료전지 온도가 변하여도 효율은 거의 변화가 없었지만 MW 급 및 수백 MW 급 등 중, 대형 가스터빈을 사용하는 경우에는 연료전지 작동온도가 높아질수록 시스템 효율이 높아짐을 확인하였다. 또한 연료전지로 공급되는 공기량을 조절하여 연료전지 출력 비중을 변화시키는 것에 대해서도 해석하였다.

Abstract: Solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid systems that use three gas turbines having different power outputs were devised and their performance was compared. The power shares of the gas turbine and fuel cell and the net system efficiency were compared among the three systems, and their variations with the design fuel cell temperature were investigated. The system efficiency was predicted to be insensitive to the fuel cell temperature in the sub-MW system, but it increased with increasing fuel cell temperature in both the multi-MW and hundred-MW systems. The influence of air bypass around the fuel cell on the system performance was also investigated.

- 기호설명 -

- | | | | |
|-----------|-----------------|-----------|--------------|
| AR | : 바이패스 되는 공기 비율 | SOFC | : 고체산화물 연료전지 |
| e | : 전하 | T | : 온도 |
| F | : 페러데이 상수 | U_f | : 연료이용률 |
| HRSG | : 열회수 증기발생기 | V | : 전압 |
| LHV | : 저위발열량 | \dot{W} | : 출력 |
| \dot{m} | : 질량유량 | w | : 비출력 |
| \dot{n} | : 몰유량 | η | : 효율 |
| P | : 압력 | 하첨자 | |
| R | : 기체상수 | AC | : 교류 |
| SCR | : 수증기/연료 비 | air | : 공기 |
| | | aux | : 보조장치 |
| | | C | : 압축기 |
| | | conv | : 직-교류 변환 |

† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr

DC	: 직류
gen	: 발전기
GT	: 가스터빈
HP	: 고압
IP	: 중압
LP	: 저압
m	: 기계
net	: 전체시스템
NG	: 천연가스
ref	: 기준
ST	: 증기터빈
T	: 터빈

1. 서론

산업이 발전함에 따라 급증하는 에너지의 이용으로 인해 환경오염이 사회적 문제로 대두되고 있으며 이를 해결하기 위해 여러 노력들이 진행 중에 있다. 발전분야에서도 고효율, 친환경적인 발전 시스템의 수요가 증가하고 있으며 이러한 수요를 충족하기 위해 많은 연구가 진행 중이다. 연료전지는 기존의 발전시스템과 달리 전기화학반응을 통해 발전을 하기 때문에 높은 효율이 가능하고, 친환경성이 탁월하다. 또한 기존의 발전시스템 중에서는 효율이 높고 친환경적인 가스터빈의 역할이 증가하고 있다. 따라서 이러한 두 시스템의 장점을 엮어서 각각의 시스템이 단독으로 운전할 때보다 높은 효율을 보이도록 구성된 하이브리드 시스템에 대한 관심이 고조되고 있다.⁽¹⁻³⁾

특히 고체산화물 연료전지(SOFC)는 고온에서 작동하기 때문에 가스터빈과의 연계가 용이하다.⁽⁴⁻⁶⁾ 하이브리드 시스템의 구성방식에 있어서는 상압형 보다는 효율이 높은 가압형에 상대적으로 연구의 초점이 맞춰져 있다.⁽⁷⁾ 220kW 급 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 실증⁽⁸⁾을 시작으로 1MW 급 시스템을 연구 및 개발 중이다.^(9,10) 또한 미국 에너지관리부(DOE)에서도 합성가스를 사용하는 수백 MW 급의 대규모 하이브리드 시스템 개발을 목표로 하고 있다.^(2,11)

대부분의 기존 연구들에서는 개발이 완료된 연료전지를 바탕으로 가스터빈을 추가적으로 장착하여 하이브리드 시스템을 구성하는 방식에 초점을 맞추었다. 가압형 시스템을 바탕으로 다양한 하이브리드 시스템 구성이 제시된 바 있으며,⁽¹²⁾ 연료전지의 예열 방법과 개질 방법에 따른 성능해석⁽¹³⁾이 수행되었다. 상용화된 마이크로 가스터빈과 결합한

하이브리드 시스템의 성능해석^(14,15)과 연료전지에 맞춰 가스터빈을 일부 개조한 하이브리드 시스템에서 연료전지 작동온도 변화와 연료극 개조에 따른 성능변화^(16,17) 등 다양한 연구들이 진행되었다.

하이브리드 시스템들은 가스터빈의 규모에 따라 각 설계 변수들이 다르기 때문에 가스터빈 규모별로 구성 방식이 상이하게 전개될 가능성이 있고 각각의 경우에 성능이 다를 수 밖에 없다. 이러한 성능차이를 파악하기 위해 동일한 연료전지 설계 변수를 바탕으로 이미 상용화된 증소형의 가스터빈과 결합하여 하이브리드 시스템을 구성하고 그 성능을 비교, 분석한 연구도 발표되었다.⁽¹⁸⁾ 본 연구에서는 이 선행연구의 연장선상에서 가스터빈 규모별로 (수십 kW, 수 MW, 100MW 이상의 대형) 상용 가스터빈을 사용하여 하이브리드 시스템을 구성할 때 발생하는 성능의 차이점을 분석하고자 하였다. 특히 대형 가스터빈을 사용한 시스템을 새로이 도입하였다. 각 시스템 별로 연료전지의 출력비중이 각각의 하이브리드 시스템에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한, 현재까지 개발되어있는 연료전지 규모에 한계가 있으므로 대형(수백 MW 급) 시스템에서는 한번에 큰 규모의 하이브리드 시스템의 건설과 실증이 이루어지지 않고 점진적으로 연료전지 용량을 키우면서 실증이 이루어질 가능성도 있다. 따라서 이런 상황에 맞춘 해석을 수행하였다. 즉, 가스터빈 압축기 출구공기를 모두 연료전지로 공급하는 기존의 시스템과 달리 가스터빈으로 바이패스하여 원하는 연료전지 출력을 얻도록 할 경우에 대하여 바이패스 비율에 따른 성능변화를 예측하였다.

2. 시스템의 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

하이브리드 시스템은 두 가지의 형태로 구분된다. 먼저 Sub-MW 급, Multi-MW 급의 소형 및 중형 가스터빈을 기반으로 한 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 압축기를 통과한 공기가 재생기(recuperator)를 거쳐 연료전지로 바로 공급되는 가압형 하이브리드 시스템이며, 이러한 구성은 기존 연구에서 적용한 가압형 하이브리드 시스템의 구성과 동일하다.⁽⁸⁾ 가압형 시스템은 터빈입구온도 유지를 위한 연료소모가 적을 뿐만 아니라 전압이 높기 때문에 출력과 효율이 증가하는 장점이 있다.⁽⁷⁾ 연료는 천연가스를 사용하였고, 연료압축기를 통해 시스템으로 공급

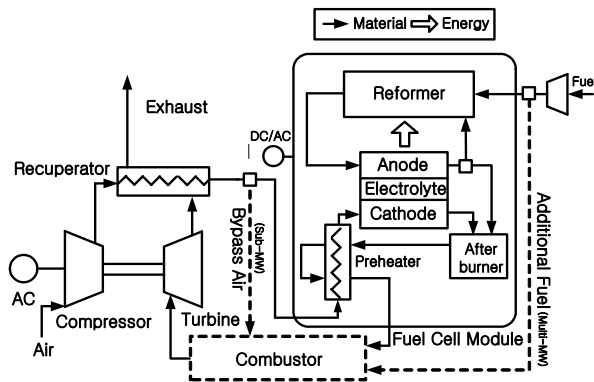


Fig. 1 Sub & Multi-MW system configuration

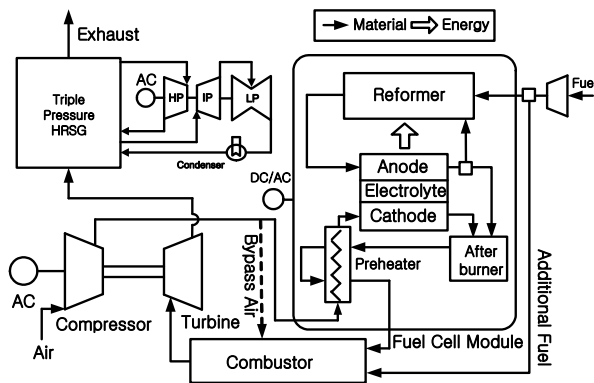


Fig. 2 Hundred-MW system configuration

된다. 연료전지로 공급된 연료는 개질기를 통해 수소와 일산화탄소로 변환된다. 개질과정에서 필요한 수증기는 연료극 출기가스를 재순환시켜서 공급(anode recirculation)하였으며, 개질반응 시 필요한 열량을 연료전지 내부에서 공급하는 내부개질(internal reforming)을 사용하였다. 공기는 압축기를 통해 시스템으로 공급되며 재생기(recuperator)에서 가스터빈 출기가스의 열을 회수한 후 예열기(preheater)를 통해 한번 더 열 회수과정을 거쳐 연료전지 입구온도를 유지하며 공기극(cathode)로 공급된다. 연료전지에서 반응을 통해 전기를 생산한 후 출기가스에 포함된 미반응 연료는 후연소기(after burner)에서 연소되어 예열기를 거쳐 연료전지 밖으로 배출된다. 그 후 터빈에서 팽창과정을 거친 후 마지막으로 개질기에서 열을 회수한 후 외부로 배출된다. 본 연구에서는 기 제작되어 있는 가스터빈을 사용하는 것으로 가정하였기 때문에 각 가스터빈의 설계변수를 유지할 필요성이 있으며, 그 중 하나인 터빈 입구온도(turbine inlet

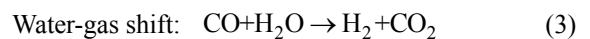
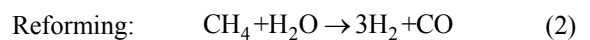
temperature)를 유지하기 위해 연료를 추가로 더 공급하거나 공기를 바이패스 하도록 하였다. Sub-MW 시스템의 경우 낮은 터빈 입구온도로 인해 연소기가 불필요하며, 연료전지 출구온도가 설계된 터빈 입구온도보다 높기 때문에 가압된 공기의 일부를 바이패스하여 온도를 유지한다.^(7, 16, 17) 반면에 Multi-MW 시스템은 터빈 입구온도가 연료전지 출구온도보다 높기 때문에 연료가 추가로 공급되며, 연소기(combustor)를 통해 터빈 입구온도를 유지한다.

Hundred-MW 시스템은 Fig. 2 에 나타내었으며, 요구되는 터빈입구온도가 높기 때문에 Multi-MW 시스템과 마찬가지로 연료를 추가로 공급하였다. 또한 앞서 언급한 두 시스템과는 달리 재생기가 포함되어 있지 않으며, 배열회수 증기발생기(HRSG)로부터 열을 회수하여 증기터빈으로부터 추가적인 출력을 얻어낸다. 이런 구성은 복합발전용으로 사용되는 대형 가스터빈의 특성을 그대로 반영한 것이다. 또한 Multi-MW, Hundred-MW 시스템의 가스터빈에서는 높은 터빈 입구온도로 인해 터빈 냉각을 고려하였다.

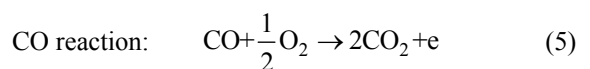
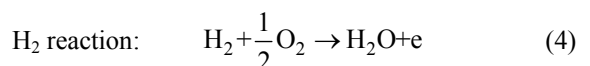
2.2 시스템 모델링

공급된 연료는 수증기 개질(steam reforming)을 통해 수소와 일산화탄소로 변환되며, 개질 시 필요한 수증기/연료의 비(steam carbon ratio, SCR)과 반응식은 다음과 같다.

$$SCR = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (1)$$



개질반응을 통해 얻어진 수소와 일산화탄소는 연료전지 연료극으로 공급되고 공기극으로 공급된 산소와 함께 다음의 반응식을 통해 전기를 생산한다.



모든 반응은 연료전지 내부에서 평형반응으로 가정하였다. 반응된 연료는 연료전지로 공급된 총 연료량과 함께 연료이용률(U_f)로 나타내며 다음

과 같이 정의하였다.

$$U_f = \frac{(\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO} + 4\dot{n}_{CH_4})_{\text{reacted in the cell}}}{(\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO} + 4\dot{n}_{CH_4})_{\text{supplied to the cell}}} \quad (6)$$

연료전지의 기준 전압을 0.7V 로 가정하였으며⁽⁷⁾ 연료전지의 작동 온도와 압력에 따른 전압의 변화를 Nernst 식으로 나타내었다.⁽¹⁹⁾

$$V = V_{\text{ref}} + \Delta V = V_{\text{ref}} + (RT/4F) \cdot \ln(P/P_{\text{ref}}) \quad (7)$$

전압을 바탕으로 하여 연료전지의 출력을 식 (8)을 통해 계산하였고 이때 직-교류 변환효율을 고려하였으며, 재순환 블로워 등에 의한 소모동력 또한 포함하였다.

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

where $\dot{W}_{\text{SOFC,DC}} = V \cdot (\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO}) \cdot 2F$

이를 바탕으로 연료전지의 설계변수와 그 성능을 Table 1 에 나타내었으며 효율이 52.6%로 예측되었다.

가스터빈의 출력은 다음과 같이 계산되며, 연료 압축기 등과 같은 소모동력과 발전기 효율을 고려하였다.

$$\dot{W}_{\text{GT}} = (\dot{W}_T - \dot{W}_C / \eta_m) \cdot \eta_{\text{gen}} - \dot{W}_{\text{aux,GT}} \quad (9)$$

HRSG 와 증기터빈이 포함되어 있는 Hundred-MW 시스템에서 증기터빈의 출력은 다음과 같이 계산하였으며, 발전 효율과 펌프와 같은 소모동력도 고려하였다.

$$\dot{W}_{\text{ST}} = (\dot{W}_{\text{T,HP}} + \dot{W}_{\text{T,IP}} + \dot{W}_{\text{T,LP}}) \cdot \eta_{\text{gen}} - \dot{W}_{\text{aux,ST}} \quad (10)$$

위 식들을 조합하여 하이브리드 시스템의 출력과 효율을 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{SOFC}} + \dot{W}_{\text{GT}} + \dot{W}_{\text{ST}} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{net}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{(\dot{m} \cdot \text{LHV})_{\text{NG}}} \quad (12)$$

각 시스템을 비교하기 위해서는 동일한 기준을 제시할 필요가 있다. 따라서 각 출력을 입구공기 유량으로 나눈 비출력을 통해 분석하였으며 다음과 같이 계산하였다.

Table 1 SOFC design Parameters

Fuel cell temperature [°C]	900
Cell inter temperature [°C]	700
Pressure ratio	1.19
Voltage [V]	0.70
Steam to carbon ratio	3
Utilization factor	0.7
Compressor efficiency [%]	76.0
DC to AC conversion efficiency [%]	95.0
Fuel cell efficiency [%]	52.6

Table 2 Design specification of three gas turbines

Item	Sub-MW GT	Multi-MW GT	Hundred-MW GT
Compressor inlet flow rate [kg/s]	0.27	17.6	569.0
Pressure ratio	3.5	9.9	19.9
Turbine inlet temperature [°C]	840	1193	1500
Turbine coolant fraction relative to compressor inlet air [%]	-	9.5	17.0
Compressor polytropic efficiency [%]	76.0	90.0	90.5
Turbine polytropic efficiency [%]	87.0	80.6	88.6
Pressure losses [%]	0.5~5.0	0.5~5.0	0.5~5.0
Mechanical efficiency [%]	99.0	98.0	99.5
Generator efficiency [%]	98.0	98.0	99.5
Gas turbine power [MW]	0.03	4.6	256.8
Steam turbine power [MW]	-	-	131.7
Gas turbine efficiency [%]	30.1	38.5	59.1

Table 3 Performance of three hybrid systems

	Sub-MW System	Multi-MW System	Hundred-MW System
AR [%]	35.2	-	-
Cell voltage [V]	0.729	0.756	0.774
SOFC power [MW]	0.141	15.3	479.5
Specific SOFC power [kJ/kg]	521.5	866.1	842.7
Gas turbine power [MW]	0.0228	4.49	261.4
Steam turbine power [MW]	-	-	153.4
System power [MW]	0.164	19.8	894.3
Specific system power [kJ/kg]	605.9	1120.8	1571.5
System efficiency [%]	65.7	68.4	73.5

$$w_{SOFC} = \dot{W}_{SOFC} / \dot{m}_{air}, w_{net} = \dot{W}_{net} / \dot{m}_{air} \quad (13)$$

Table 2 에 각각의 가스터빈의 설계변수와 성능을 나타내었다. 표에 나타난 설계변수는 이미 발표된 문헌^(20,21)의 자료를 토대로 하여 모사한 결과이다.

마지막으로 연료전지의 규모에 따른 시스템 성능변화를 파악하기 위해 공기를 가스터빈으로 바이패스 시켜 해석할 필요성이 있다. 이때 바이패스 되는 공기의 비율을 AR 이라고 정의하였으며 다음과 같이 나타내었다.

$$AR = \frac{\text{bypass air flow}}{\text{total air flow}} \quad (14)$$

이미 개발되어 있는 가스터빈에 연료전지를 결합할 경우 추가적인 구성부로 인해 압력손실이 발생하여 가스터빈의 팽창비가 감소하고, 늘어난 연료량으로 인해 유량이 증가하는 등 작동 조건이 변하게 된다.⁽¹⁷⁾ 따라서 실제 가스터빈을 아무런 개조 없이 사용할 경우에는 압축기를 통과한 공기를 모두 연료전지로 공급하지 못할 가능성도 존재한다. 이러한 문제점을 회피하기 위하여 본 연구에서는 상용화된 가스터빈의 일부를 개조하여 (특히 늘어난 터빈 유량을 받아들일 수 있도록 터빈 유로를 확장하여) Table 2 의 설계점이 하이브리드 시스템에서도 유지된다고 가정하였다. 해석을 위해 상용 소프트웨어인 HYSYS⁽²²⁾를 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 하이브리드 시스템의 기준 성능비교 상용 가스터빈에 연료전지를 장착한 하이브리드

시스템의 성능을 Table 3 에 나타내었다. 하이브리드 시스템은 연료전지의 추가로 인해 압력손실이 발생하며, 이는 가스터빈 팽창비에 영향을 미친다. 이와 같은 이유로 Hundred-MW 시스템을 제외한 나머지 두 시스템의 터빈 출력은 Table 2 에 나타난 설계출력에 미치지 못한다. 압력손실의 영향은 가스터빈의 압력비가 작을 때 더 크게 나타나는 경향이 있는데, Sub-MW 시스템은 설계출력에 비해 24.1%, Multi-MW 시스템은 2.46%의 출력손실이 발생한다. Hundred-MW 시스템에서도 연료전지로 인한 압력손실은 있지만 재생기가 구성되어 있지 않기 때문에 저온부에서의 압력손실이 없으며(고온부의 압력손실은 HRSG 에서의 압력손실과 동일하다), 증가한 연료량으로 인해 터빈 작동유량이 증가하여 가스터빈 출력이 다소 (약 3%) 증가하게 된다. 또한 단독 시스템일 때보다 팽창비가 낮기 때문에 가스터빈출구 온도가 높아지고(약 37°C), 이로 인해 발생하는 증기 유량의 증가로 인해 증기터빈의 출력은 17.0% 증가하였다.

가장 작은 규모인 Sub-MW 시스템의 터빈입구온도는 연료전지의 작동온도(900°C) 보다 낮다. 더욱이 연료전지에서 반응되지 않은 연료를 후연소에서 연소하게 되면 터빈으로 향하는 온도가 더욱 높아지기 때문에 설계된 터빈 입구온도의 유지를 위해서는 압축기 출구에서 나오는 공기의 일부를 바이패스 하는 것이 요구(AR=35.2%)된다. 반면에 다른 두 시스템의 경우 터빈입구온도가 충분히 높기 때문에 가스터빈 연소기로 연료를 추가로 공급하여 터빈입구온도를 달성한다.

각 시스템의 터빈 설계변수가 다르기 때문에 압력비가 서로 다르고 이는 연료전지의 작동압력에 영향을 주어 전압의 변화를 가져온다. 전압은 식 (7)에 따라 연료전지의 출력에 영향을 미치기 때문에 압력비가 높은 Hundred-MW 시스템의 연료전

지 비출력이 다른 시스템에 비해 높아야 된다. 그러나 Table 3 에 나타낸 바와 같이 연료전지의 비출력을 살펴보면 Multi-MW 시스템이 가장 높은 결과를 보인다. 이러한 현상은 압축기를 통과한 가압된 공기가 연료전지로 모두 공급되지 못하기 때문에 발생한다. Sub-MW 시스템에서는 낮은 전압과 공기 바이패스로 인해 연료전지로 공급되는 공기 유량이 감소되기 때문에 비출력이 가장 낮다. 다른 두 시스템은 높은 터빈 입구온도로 인해 공기의 바이패스를 할 필요가 없지만, 터빈 냉각유량 때문에 감소되는 공기유량이 고려된다. 높은 연료전지 작동 압력으로 인해 Hundred-MW 시스템의 전압이 Multi-MW 시스템보다 더 높지만, 터빈 냉각으로 공급되는 공기유량이 더 많기 때문에 연료전지로 공급되는 공기유량이 감소하여 연료전지의 비출력(시스템 입구, 즉 압축기 입구에 공급된 공기유량당 출력입에 유의)은 Multi-MW 시스템보다 낮은 결과를 보인다.

각각의 하이브리드 시스템은 모두 가스터빈 혹은 연료전지 단독 작동시보다 효율이 높다. 동일한 연료전지를 사용하더라도 규모가 큰 가스터빈을 사용할수록 하이브리드화에 의한 효율향상 정도가 더 크다. Fig. 3 에 각 시스템에의 연료전지와 가스, 증기터빈의 출력비중을 나타내었다. 성능이 높은 가스터빈을 사용할수록 효율 뿐만 아니라 하이브리드 시스템에서 가스터빈의 출력비중이 증가한다. 이것은 연료전지가 하이브리드 시스템에서 출력을 내는 주 기기(가스터빈에 비하여 출력 비중이 더 높음)이지만 다양한 가스터빈과의 조합을 통해 전체 성능이 달라지는 결과를 보여주는 것이다.

3.2 연료전지의 출력비중 변화에 따른 분석
작동온도를 800°C 부터 1000°C 까지 변화시키며

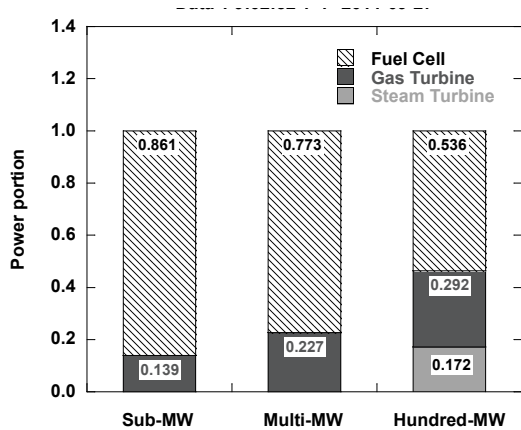


Fig. 3 Power split

파라메트릭 해석을 하여 연료전지의 출력비중에 따른 변화를 살펴보았다. 식 (7)에 의해 작동온도가 높아질수록 연료전지의 전압이 증가하고 이는 출력의 증가로 이어지며 증가한 작동온도로 인해 연료전지로 공급되는 연료량도 증가한다. 그러나 연료량이 공기량에 비하여 여전히 상대적으로 작기 때문에 가스터빈의 출력은 크게 변함이 없다.

Fig. 4 와 Fig. 5 에 연료전지 작동온도에 따른 시스템의 비출력과 효율을 나타내었다. 작동온도가 증가함에 따라 Multi-MW, Hundred-MW 시스템은 연료전지 출기가스의 온도가 높기 때문에 상대적으로 가스터빈 연소기로 추가 공급되는 연료의 양이 감소하게 된다. 또한 작동온도의 영향으로 연료전지의 출력이 증가하게 되고 상대적으로 효율이 좋은 연료전지의 출력비중의 증가로 인해 전체 시스템의 성능 또한 상승한다. 그러나 Sub-MW 시스템은 출력과 효율의 변화가 거의 없다. 이 시스템

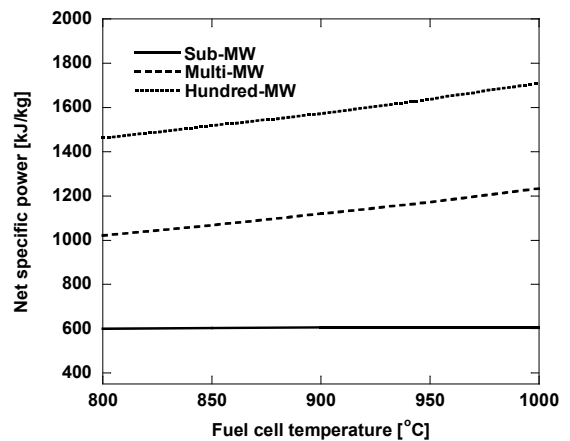


Fig. 4 Variation in net specific power with fuel cell temperature

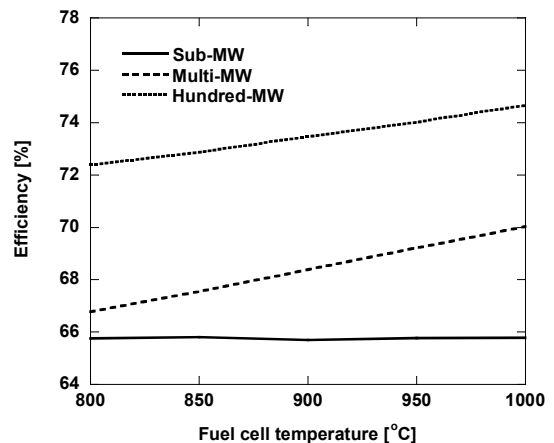


Fig. 5 Variation in system efficiency with fuel cell temperature

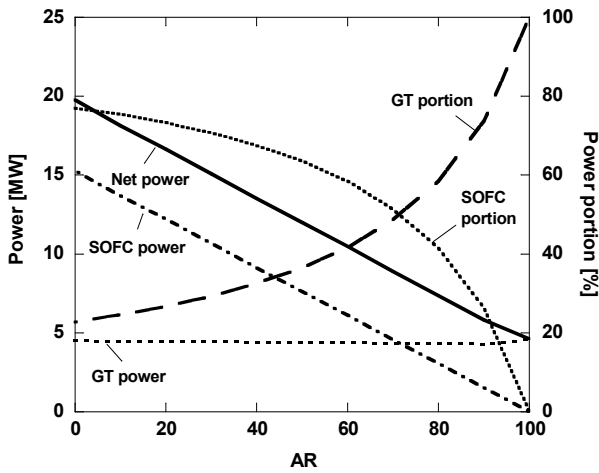


Fig. 6 Impact of air bypass in the Multi-MW system

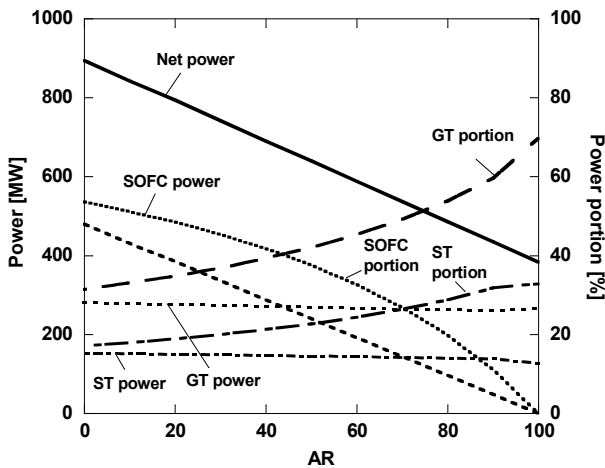


Fig. 7 Impact of air bypass in the Hundred-MW system

템은 설계된 터빈 입구온도가 연료전지 작동온도보다 낮기 때문에 공기를 바이패스 시켜 설계값을 유지한다. 따라서 작동온도가 증가할수록 이를 충족하기 위해 바이패스 되는 공기량도 증가하게 된다. 결과적으로 연료전지의 전압은 증가하였으나 연료전지로 공급되는 공기유량이 감소하여 출력과 효율이 거의 일정하다.

3.3 연료전지의 규모를 고려한 공기 바이패스의 효과

지금까지는 가압형 하이브리드 시스템을 구성하면서 압축기를 통과한 공기가 터빈 설계점을 유지하는 한 최대 연료전지로 공급된다고 가정하였다. 그러나 Multi-MW 시스템 이상에서 사용할 수 있는 대규모의 연료전지는 현재 개발 중에 있기 때문에 작은 규모의 연료전지를 가스터빈과 결합하고 순차적으로 연료전지 규모를 키워가는 해석

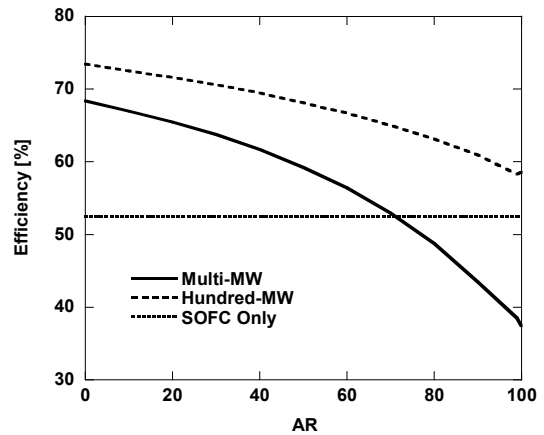


Fig. 8 Influence of air bypass on system efficiency

을 해볼 필요가 있다. 따라서 Sub-MW 시스템과 같이 가압된 공기를 가스터빈 연소기로 바이패스를 하여 연료전지로 향하는 유량을 감소시켰다. 바이패스 되는 공기의 비율은 식 (14)로 나타내었다.

공기를 바이패스를 함으로써 연료전지로 공급되는 공기의 양이 감소하며, 이에 맞추어 점차 작은 규모의 연료전지를 사용한다고 가정하였다. Fig. 6, 7 에 공기 바이패스 율의 증가에 따른 출력 및 출력비중의 변화를 보였다. 바이패스 율이 증가하면 연료전지의 출력이 감소하게 된다. 그러나 공기를 바이패스를 하더라도 가스터빈 출력 변화는 거의 없다. 연료전지로 공급되는 연료 유량 변화로 터빈 유량이 조금 변하는 효과만 있기 때문이다. Fig. 8 에 바이패스 효과에 따른 시스템의 효율을 나타내었다. 하이브리드 시스템에서는 주기기인 연료전지의 출력비중이 크기 때문에 가스터빈 성능 차이가 크게 나타나지 않는다. 즉, 하이브리드 시스템 효율 차이가 아주 크지는 않다. 그러나 바이패스를 함으로써 연료전지의 비중이 작아질수록 가스터빈의 비중 (엄격히 말하면 Hundred-MW 시스템에서는 가스/스팀 터빈의 출력 비중)이 커지면서 시스템의 효율차이가 증가한다.

4. 결론

본 연구에서는 각기 다른 성능을 지닌 가스터빈들과 연료전지의 결합을 통해 가압형 하이브리드 시스템을 구성하고 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 동일한 성능의 연료전지를 가지고 하이브리드 시스템을 구성한다면 성능이 좋은 가스터빈을 장착할수록, 즉 가스터빈의 출력 비중이 커질수록

하이브리드 시스템의 효율이 높다. 마이크로터빈 급의 소형 가스터빈, 수 MW 의 중형 가스터빈 그리고 대형 가스터빈을 사용한 하이브리드 시스템에서 연료전지와 비교하여 각각 25%, 30%, 40%의 효율 향상이 예상된다. 그러나 대규모의 가스터빈은 터빈 냉각유량이 증가하기 때문에 연료전지의 비출력은 중형 가스터빈을 사용할 때에 비하여 감소한다.

(2) 연료전지의 작동온도가 높아질수록 연료전지의 출력이 증가하여 시스템의 출력과 효율이 상승한다. 그러나 소형 가스터빈에서는 터빈 입구온도가 낮기 때문에 연료전지의 작동온도가 증가하여도 터빈 입구온도 유지를 위해 공기를 바이패스하게 되고 따라서 연료전지로 공급되는 공기의 양이 감소하기 때문에 출력과 효율은 거의 일정하게 유지된다.

(3) 공기를 바이패스시켜 연료전지의 규모를 작게 할수록 하이브리드 시스템의 출력은 감소한다. 그러나 하이브리드 시스템의 효율의 감소폭은 작은 규모의 가스터빈을 선정할수록 크다.

후 기

본 연구는 2011 년도 정부(교육기술과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0002491).

참고문헌

- (1) Williams, M. C., Strakey, J. P. and Surdoval, W. A., 2006, "U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cells Program," *J. of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
- (2) Pierre, J. F., 2007, "Office of Fossil Energy Fuel Cell Program FY2007 Annual Report", pp. 3~5.
- (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," *Tran. 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) Campanari, S., 2001, "Thermodynamic Model and Parametric Analysis of a Tubular SOFC module," *J. of Power Sources*, Vol. 92, pp. 26~34.
- (6) Chan, S. H. and Xia, Z. T., 2001, "Anode Micro Model of Solid Oxide Fuel Cell," *J. of The Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 4, pp. A388~A394.
- (7) 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.
- (8) Veyo, S. E., Vora, S. D., Litzinger, K. P. and Lundberg, W. L., 2002, "Status of Pressurized SOFC/Gas Turbine Power System Development at Siemens Westinghouse," *ASME paper*, GT2002-30670.
- (9) 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.
- (10) Bozzolo, M. and Massardo A. F., 2011, "Modeling and Performance Analysis of the Rolls-Royce Fuel Cell Systems Limited: 1MW Plant," *J. of Engineering for gas turbine and power*, Vol. 133, No. 021707 pp. 1~11.
- (11) Lundberg, W. L., Iyengar, A. K. S., Smeltzer, E. E. and Shocking, L. A., 2009, "Conceptual Design of a High-Efficiency Baseline SOFC/Gas Turbine Power System Fueled with Coal Syngas and Equipped for CO2 Separation," *International Colloquium on Environmentally Preferred Advanced Power Generation*, ICEPAG2009-1020, Feb. 10-12, 2009, Newport Beach, California.
- (12) 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. 615~623.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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. 462~47.
- (16) 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.
- (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) Myung, N. S., Park, S. K. and Kim, T. S., 2011, "Analysis of Performance of SOFC/GT Hybrid Systems Considering Size-Dependent Performance of Gas Turbines," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 35, No. 4, pp. 399~407.
- (19) Larminie, J and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained. 2nd ed. Chichester*, John Wiley & Sons, pp. 35~41.
- (20) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained. 2nd ed. Chichester*, John Wiley & Sons, pp. 35~41.
- (21) Farmer, R., 2008, *2007-08 Gas turbine world handbook*, Pequot Publishing Inc, Vol. 26.
- (22) Lee, J. J., Yoon, J. E., 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, pp. 141~152.
- (23) Aspen Technology, AspenOne HYSYS, ver. 7.2