

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.9.652

소형 가압형 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 성능 비교해석

박성구* □유병준* □김동섭† □손정락** □안국영***
(2008년 4월 21일 접수, 2008년 7월 10일 수정, 2008년 8월 7일 심사완료)

Comparative Performance Analysis of Small Pressurized Fuel Cell/ Gas Turbine Hybrid Systems

Sung Ku Park, Byung June You, Tong Seop Kim, Jeong L. Sohn and Kook Young Ahn

Key Words: PEMFC(고분자전해질 연료전지), SOFC(고체산화물 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Pressurized System(가압형 시스템), Internal Reforming(내부개질), External reforming(외부개질)

Abstract

Design performances of the fuel cell / gas turbine hybrid power generation systems based on two different fuel cells (PEMFC, SOFC) have been comparatively analyzed. In each system, the fuel cell operates at an elevated pressure corresponding to the compressed air pressure of the gas turbine. Both internally and externally reformed systems were analyzed for the SOFC hybrid system. Component design parameters of 10kW class small systems are assumed. For all hybrid systems, increasing the turbine inlet temperature increases the power portion of the gas turbine. With increasing the turbine inlet temperature, system efficiency decreases in the PEMFC system and the internally reformed SOFC system while that of the externally reformed SOFC system increases slightly. The internally reformed SOFC hybrid system is predicted to exhibit the best system efficiency.

기호설명

AUX	: 보조장치	\dot{m}	: 질량유량
CIT	: 공기극 입구온도	\dot{n}	: 몰유량
ER	: 외부개질	TIT	: 터빈입구온도
F	: 패러데이 상수	V	: 전압
FR	: 추가연료 비율	하첨자	
FCT	: 연료전지 작동온도	AC	: 교류
IR	: 내부개질	C	: 압축기
LHV	: 저위 발열량	DC	: 직류
†	책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과	f	: 연료
	E-mail : kts@inha.ac.kr	FC	: 연료전지
	TEL : (032)876-7308 FAX : (032)868-1716	GT	: 가스터빈
*	인하대학교 대학원	HS	: 하이브리드 시스템
**	서울대학교 기계항공공학부	T	: 터빈
***	한국기계연구원		

1. 서 론

고효율이고 동시에 환경친화적인 발전설비에 대한 필요성이 증가하면서 연료전지가 각광받고 있다. 작동온도가 낮은 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 주로 휴대용 혹은 가정용 전원이나 가전기기, 자동차등에 사용될 목적으로 연구개발이 진행되어 왔다. 반면 작동온도가 높은 고체산화물 연료전지(SOFC)는 상대적으로 규모가 큰 분산발전이나 중대규모 발전에 사용하려는 연구가 진행되어 왔으나 최근 미국을 중심으로 SOFC 역시 군사용이나 차량용, 가정용 소형 전원으로 사용하기 위한 연구 역시 활발히 수행되고 있다.^(1,2) 이러한 기술개발 추세로 볼 때 수kW 또는 수십 kW 내외의 소형시스템에서 PEMFC와 SOFC가 경쟁 관계에 놓일 것으로 예상된다.

연료전지는 기존의 발전설비에 비하여 상대적으로 효율이 좋고 공해물질 배출이 적으며, 가압상태로 작동할 때가 상압상태로 작동할 때에 비해 성능이 좋다. 연료전지가 가압상태로 작동할 경우 연료전지 배출가스 역시 가압상태로 배출되며, 이러한 가압상태의 배출가스를 터빈을 이용하여 팽창시키게 되면 부가적인 출력을 얻을 수 있다. 따라서 연료전지와 가스터빈(GT)을 결합하여 하이브리드 시스템을 구성하면 시너지 효과를 기대할 수 있고, 특히 SOFC의 경우 작동온도가 높기 때문에 배출가스의 온도도 높아 큰 시너지 효과를 기대할 수 있다. 따라서 SOFC와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템을 개발하려는 시도가 최근 활발히 추진되기 시작했다.⁽³⁻⁶⁾ PEMFC에서도 가압시 셀성능이 좋은 점을 이용하는 동시에 고압가스를 이용하여 터빈을 구동함으로써 하이브리드 효과를 보고자 하는 시도가 진행된 바 있다.⁽⁷⁾

연료전지 스택 자체에는 수소가 연료로 공급되어야 하므로 천연가스 등 일반적인 연료를 공급하게 되면 연료의 개질(reforming)이 필요하다. 가장 보편적인 방법은 흡열반응인 수증기개질(steam reforming) 방법이다. 연료전지 혹은 하이브리드 시스템에서 일반적으로 개질에 필요한 열을 공급하는 방식은 발열반응인 셀 반응으로부터 방출되는 열을 개질기로 직접공급 하는 내부개질(internal reforming, IR) 방식과 개질에 필요한 열을 외부에서 개질기로 공급하는 외부개질(external reforming,

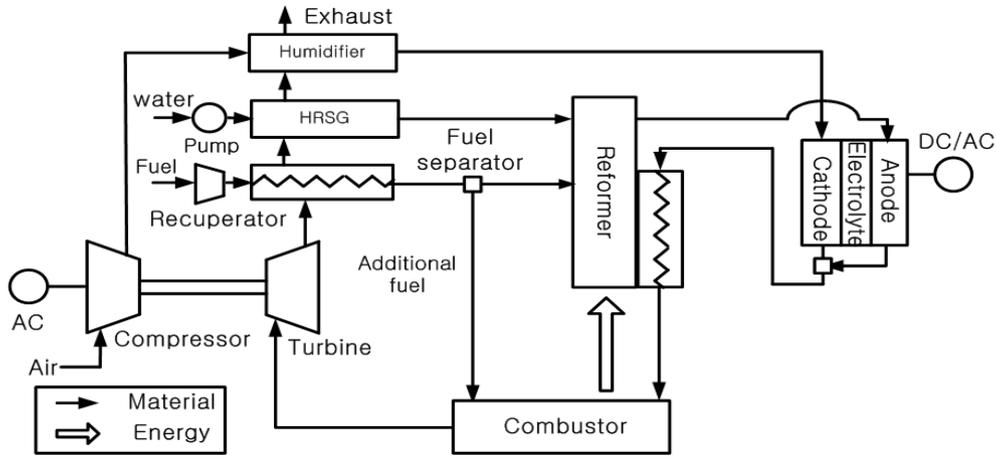
ER) 방식으로 구분된다. 두 가지 방식 중 내부개질방식이 외부개질에 비해 더 효율적이라고 알려져 있지만,⁽⁸⁾ 내부개질 방법이 상대적으로 기술적 난이도가 높기 때문에 시스템이 소형화될수록 이 방식을 적용하기 힘들 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 PEMFC와 SOFC를 이용한 하이브리드 시스템을 대상으로 10kW 급 소형 시스템을 가정하여 서로 성능을 비교하고자 한다. 특히 SOFC 시스템에서는 내부개질과 외부개질을 사용한 두 가지 시스템을 고려하여 성능을 비교하였다.

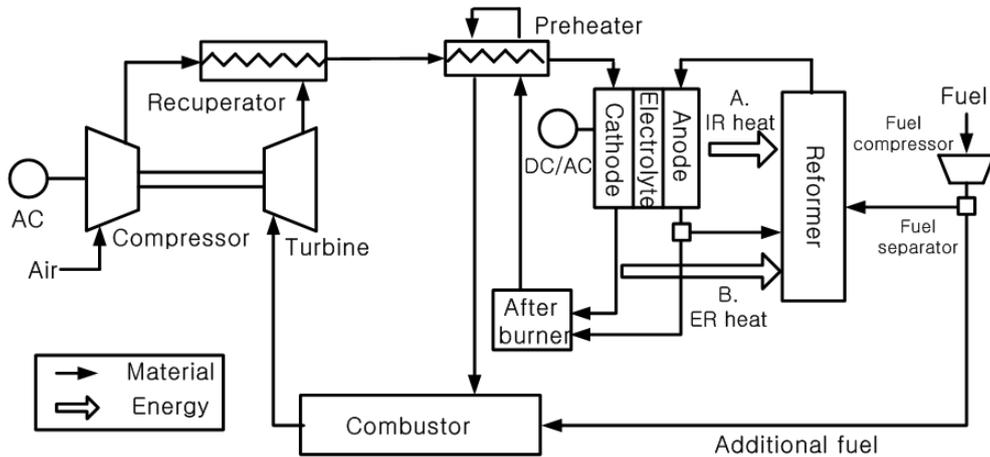
2. 시스템 구성

Fig. 1에 PEMFC 하이브리드 시스템과 SOFC 하이브리드 시스템의 개략도를 나타내었다. 두 시스템 모두 압축기를 통과한 공기가 연료전지에 공급되는 가압형 시스템이다. PEMFC 하이브리드 시스템은 연료전지 작동온도가 높지 않기 때문에 개질반응에 필요한 열을 셀에서 직접 공급할 수 없다. 따라서 연료전지 뒤에 위치한 연소기에서 열을 공급해주는 방식을 사용하였고, 열회수증기발생기(Heat Recovery Steam Generator, HRSG)에 추가적인 물을 공급하고 고온의 터빈출구 가스와 열교환을 통해 수증기를 생성하여 개질기에 공급하여 주게 된다. 따라서 PEMFC 하이브리드 시스템의 경우 터빈출구 가스는 공급되는 연료의 예열, HRSG를 통한 수증기 재생 그리고 연료전지 공기극에 공급되는 공기의 상대습도를 맞추기 위한 가습기에서의 열교환등의 세 번의 열회수 과정을 거치게 된다.

반면에 SOFC 하이브리드 시스템의 경우는 연료전지 작동온도가 상대적으로 높기 때문에 개질반응에 필요한 열을 셀에서 직접 공급해 줄 수 있게 되고(내부개질), 연료전지의 연료극 출구 가스를 재순환함으로써 개질반응에 필요한 수증기 역시 내부적으로 공급하여 줄 수 있다. 따라서 SOFC 하이브리드 시스템의 경우 터빈출구 가스는 압축기 출구 공기와 재생기에서 한 번의 열회수 과정을 거치게 된다. 하지만 설계상 내부개질이 힘들 경우를 고려하여 개질에 필요한 수증기는 연료극 가스 재순환을 통해 공급하지만 개질에 필요한 열은 공기극 출구가스로부터 공급하는 외부개질 방법을 채택한 시스템도 고려하였



(a) PEMFC / GT hybrid system



(b) SOFC / GT hybrid system (A: IR system only, B: ER system only)

Fig. 1 Fuel Cell / Gas Turbine hybrid system configurations

다. Fig. 1(b)에서 A는 내부개질 방식에서의 열전달을, B는 외부개질 방식에서의 열전달을 나타낸다.

연소기로의 추가적인 연료를 공급하는 이유는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우에는 필요한 임의의 설계 터빈입구온도를 맞춰주기 위해서이며, PEMFC 하이브리드 시스템의 경우는 개질에 필요한 열을 공급함과 동시에 터빈입구온도를 맞추기 위함이다.

3. 해석 방법

시스템을 구성하는 각각의 구성요소는 하나의 검사체적으로 가정하여 모델링하였다. 연료전지 작동온도는 공기극 출구온도로 가정하였다. PEMFC와 SOFC 하이브리드 시스템 모두 총출력은 10kW로 설정하였다. 시스템에 공급되는 연료

는 순수 메탄이며, 개질기로 공급되어 수증기개질(steam reforming)과 수성반응(water gas shift)을 통해 개질되어 연료극으로 공급된다. 개질기 화학반응은 평형반응으로 가정하였다. PEMFC 하이브리드의 경우는 연료전지 연료극으로 유입되는 일산화탄소를 제거하기 위해 선택적 산화반응(preferential oxidation reaction)도 고려하였다. 개질에 필요한 수증기의 양은 수증기/연료비(Steam Carbon Ratio)에 의해 결정되며, 연료 이용률(utilization factor)은 공급된 연료와 반응한 연료의 비로 정의한다.

일반적으로 연료전지 전압은 연료전지 작동온도와 작동압력 그리고 전류밀도를 고려한 상관식을 사용하여 이상적인 Nernst 전압으로부터 분극손실, 저항손실 등 각종손실을 차감하여 구하게 된다. PEMFC, SOFC에 대해서 각각 문헌^(9,10)상의 상관식들을 사용하였다. 연료전지와 개질기에서

Table 1 Design parameters of the fuel cell / gas turbine hybrid systems

Fuel Cell			Gas Turbine	
CIT / FCT	PEMFC	65°C / 70°C	Ambient Condition	15°C, 1atm
	SOFC	800°C / 900°C	Pressure Ratio	3.5
Utilization factor		0.7	TIT range	700°C~850°C
Steam Carbon Ratio		3.0	Compressor efficiency	70%
Conversion efficiency		95%	Turbine Efficiency	70%
Cell Voltage	PEMFC	0.785V	Recuperator effectiveness	70%
	SOFC	0.758V	Mechanical efficiency	99%
Current Density	PEMFC	600mA/cm ²	Generator efficiency	95%
	SOFC	400mA/cm ²		

구체적인 모델링 및 계산방법은 선행연구를 따랐으며,⁽⁵⁻⁷⁾ 본 논문에서는 자세한 수식은 생략한다.

셀전압과 반응하는 수소 (SOFC의 경우 일산화탄소도 포함) 유량으로부터 직류전력이 계산되고, 직교류 변환효율(η_{con}) 및 블로워나 연료 압축기의 전력과 같은 보조전력을 고려하여 최종 교류전력이 계산된다.

$$\dot{W}_{FC,DC} = V \cdot (\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{reacted} \cdot 2F \quad (1)$$

$$\dot{W}_{FC,AC} = \dot{W}_{FC,DC} \cdot \eta_{con} - \dot{W}_{AUX} \quad (2)$$

가스터빈의 출력은 터빈, 압축기의 동력과 기계적 효율(η_m)과 발전기 효율(η_{gen})등을 고려하여 아래와 같이 계산한다.

$$\dot{W}_{GT,AC} = (\dot{W}_T \cdot \eta_m - \dot{W}_c) \eta_{gen} \quad (3)$$

하이브리드 시스템의 총출력과 효율은 아래와 같이 계산된다. 하첨자 f 는 공급된 연료(메탄)를 의미한다.

$$\dot{W}_{HS} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} \quad (4)$$

$$\eta_{HS} = \frac{\dot{W}_{HS}}{(\dot{m} \cdot LHV)_f} \quad (5)$$

PEMFC 하이브리드 시스템에 사용된 열회수증기발생기(HRSG)는 예열기, 증발기, 과열기 세 가지 열교환기로 구성된다. 핀치온도차는 예열기의 고온부 입구 온도와 저온부 출구온도의 차이로 정의하였으며, 에너지 평형식을 통해서 개질기 입구온도를 맞춰줄 수 있는 값으로 제한하였고 15°C보다 낮을 수 없도록 설계하였다.

PEMFC 하이브리드 시스템에서 개질열의 공급과 터빈입구온도를 설계조건에 맞추기 위해 그리고 SOFC 하이브리드 시스템에서 터빈입구온도를 설계조건에 맞추기 위해 추가적으로 공급한 연료의 양을 아래와 같이 정의하였다. 즉, FR은 시스템에 공급된 총 연료량과 추가적으로 공급된 연료량의 비를 의미한다.

$$\dot{m}_{f,add} = FR \cdot \dot{m}_{f,total} \quad (6)$$

시스템 설계에 사용된 주요 파라미터들을 Table 1에 나타내었으며, 연료전지 공기극 입구온도(CIT)와 작동온도(FCT)는 PEMFC는 65°C와 70°C, SOFC는 800°C와 900°C로 설정하였다. 가스터빈의 압축비는 3.5로 설정하였고, 구성부의 효율은 기존의 수십 kW급 마이크로터빈의 구성부 효율보다 10~20% 낮은 값으로 가정하였다. 각 구성요소에서 압력손실은 0.5~3%를 가정하였다. 시스템 해석은 상용프로그램인 HYSYS⁽¹¹⁾를 사용하였다.

4. 해석결과 및 검토

Fig. 2 ~ Fig. 4에 각 하이브리드 시스템에서 연료전지와 가스터빈의 출력을 나타내었다. 터빈 입구온도가 700°C 이하일 경우 SOFC 하이브리드 시스템은 가스터빈의 출력이 음(-)이 되며, PEMFC 하이브리드 시스템은 개질기로 공급되는 연료와 수증기의 온도를 설계조건에 맞춰줄 수 없다. 따라서, 가스터빈 입구온도는 세가지 하이브리드 시스템 모두 700°C 이상으로 설정하였다.

세 가지 하이브리드 시스템 모두 터빈입구온도가 증가하게 되면 가스터빈 출력의 비중이 증가

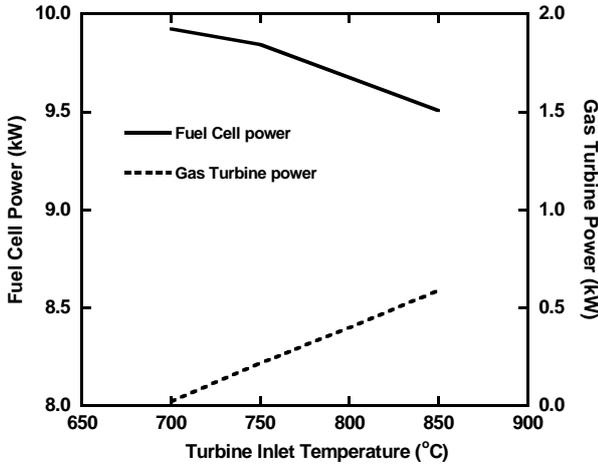


Fig. 2 FC and GT powers of the internal reforming type SOFC/GT hybrid system

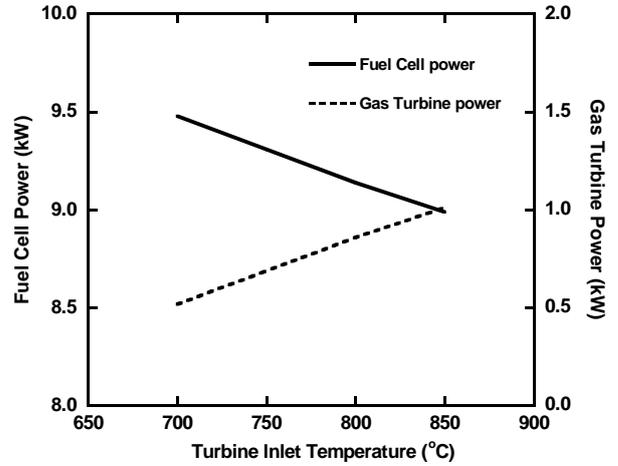


Fig. 4 FC and GT powers of the PEMFC/GT hybrid system

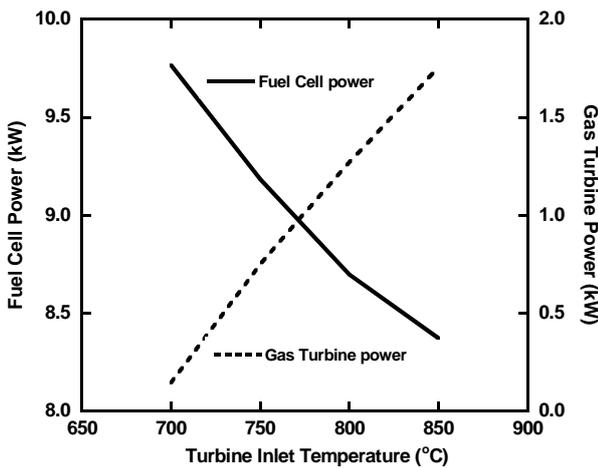


Fig. 3 FC and GT powers of the external reforming type SOFC/GT hybrid system

하게 되고 연료전지 출력의 비중은 감소한다. 내부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우 발열반응인 셀반응에서 방출되는 열의 일부를 개질에 사용하고 남은 열을 제한조건인 연료전지 작동온도를 맞추기 위해 공기극에 공급되는 공기를 가열하는데 사용하지만, 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우 셀에서 방출되는 모든 열이 공기극 가열에 사용되게 되므로 연료전지 작동온도를 맞추기 위해서는 상대적으로 더 많은 공기가 공급되어야 한다. 결국 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템에서 터빈으로 유입되는 가스의 유량이 내부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템보다 많기 때문에 동일한 가스터빈 설계조건에서 터빈의 출력

비중이 커지게 되고, 따라서 가스터빈의 출력증가 폭과 연료전지의 출력감소 폭이 더 큰 경향을 나타낸다. PEMFC 하이브리드 시스템의 경우 셀반응을 통해 발생하는 열을 외부에서 물을 공급하여 냉각시켜주기 때문에 연료전지의 작동온도를 맞추기 위해 추가적으로 공기를 공급할 필요가 없어 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템에 비해 가스터빈의 출력비중이 작고, 따라서 연료전지의 출력감소 폭과 가스터빈의 출력증가 폭이 내부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템에 비해 작다.

Fig. 5에는 각 하이브리드 시스템의 효율을 나타내었다. 내부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템과 PEMFC 하이브리드 시스템의 경우 터빈입구온도가 증가함에 따라 시스템 효율이 감소하는 경향을 나타내었고, 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우 터빈입구온도가 증가할수록 시스템의 효율이 미세하게 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과가 나타나는 가장 큰 이유는 터빈입구온도를 맞추기 위해 가스터빈 연소기에 추가적으로 공급하는 연료량 때문이다. 가스터빈 연소기에 추가적으로 공급하는 연료량과 전체 시스템에 공급되는 연료량의 비율 Fig. 6에 나타내었다. 내부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템과 PEMFC 하이브리드 시스템은 가스터빈 입구온도가 증가하면 가스터빈의 출력이 증가하게 되고 연료전지의 출력과 연료전지로 공급되는 연료량은 감소하게 되지만 가스터빈 출력비중이 크지 않으므로 연료전지 출력과 연료

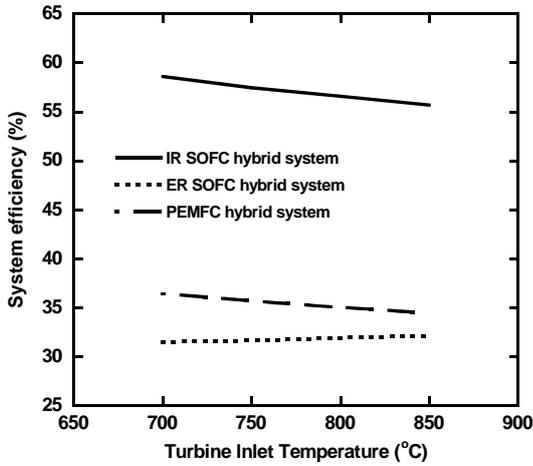


Fig. 5 Efficiencies of fuel cell/gas turbine hybrid systems

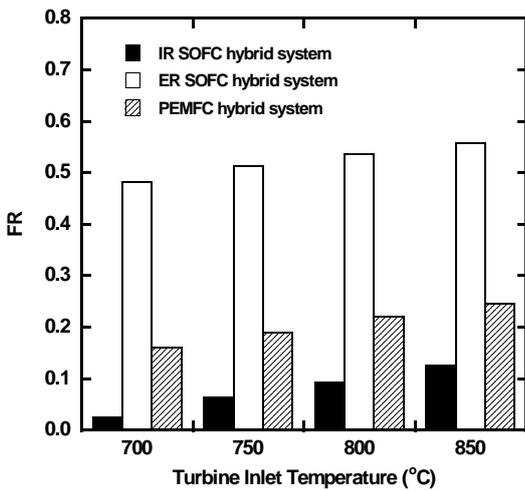


Fig. 6 Additional fuel supply ratio

량의 감소는 크지 않다. 하지만 터빈입구온도가 높아질수록 터빈입구온도를 맞추기 위해 더 많은 연료를 추가적으로 공급해야 하므로 터빈입구가 증가할수록 추가적으로 공급한 연료량과 시스템에 공급한 연료량의 비는 증가하게 되고, 결국 시스템으로 공급되는 총 연료량은 증가하게 된다. 모든 설계조건에서 하이브리드 시스템의 출력은 10kW로 동일하므로 터빈입구온도가 증가하여 추가적으로 공급되는 연료량이 많아지면 시스템 효율은 감소하는 경향을 나타내게 된다. 또한 내부개질 SOFC 하이브리드 시스템과 PEMFC 하이브리드 시스템을 비교하면, 추가적인 연료의 공급이 상대적으로 더 많은 PEMFC 하이브리드 시스템의 효율이 더 낮은 결과를 나타낸다.

한편, 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우도 터빈입구온도가 증가하면 연료전지 출력과 연료전지로 공급되는 연료량이 감소하고, 터빈입구온도를 맞추기 위해 추가적으로 공급하는 연료량도 증가하므로, 추가적으로 공급하는 연료량과 총 시스템에 공급되는 연료량의 비는 증가하게 된다. 하지만 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우 앞서 설명한 것처럼 다른 두 가지 하이브리드 시스템에 비해 상대적으로 가스터빈의 출력비중이 크고 터빈입구온도가 증가할 때 연료전지 출력과 연료전지로 공급되는 연료량의 감소도 크다. 결국 터빈입구온도가 증가하여 추가적으로 공급되는 연료량의 비율이 증가하더라도 전체 시스템에 공급되는 연료량은 미소량 감소하게 되어, 시스템의 효율은 미세하게 증가하는 경향을 나타내게 된다.

그러나 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템은 다른 두 가지 하이브리드 시스템에 비해 낮은 시스템 효율을 보인다. 일반적으로 SOFC와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템은 상대적으로 온도가 높은 연료전지 출가가스를 이용해 가스터빈을 구동하여 시너지 효과를 나타내는 시스템인데, 외부개질을 사용하게 되면 공기극 출구에서 개질열을 공급하므로 연료전지 출가 가스 온도가 상대적으로 낮게 된다. 더욱이 앞서 설명한 것처럼 동일한 출력을 생산할 때, 시스템에 공급되는 공기의 유량도 많기 때문에 터빈입구온도를 맞추기 위해서는 추가적으로 공급해야 하는 연료의 양이 다른 두 가지 시스템에 비해 많게 되고 따라서 시스템의 효율이 가장 낮게 나타나게 된다.

한편 본 논문에서는 가스터빈이 수 KW대의 소형으로서 구성부 효율을 가능한 낮게 가정하였는데, 이러한 구성부 효율도 전체 시스템 성능에 영향을 미친다. 예를 들어, 내부개질형 SOFC 하이브리드 시스템에서 수십 KW급 가스터빈을 고려하여 현재보다 구성부 효율을 10~20% 높게 설정한 경우⁽⁶⁾에 터빈입구온도 750~850°C 구간에서 가스터빈 출력의 비중이 9~14%이고, 시스템 효율이 58~59%로 예측되었다. 한편, 이번 해석에서는 가스터빈 비중은 0~5%, 효율은 55~57%이므로 각 파라미터가 더 낮다. 즉, 압축기, 터빈 등 가스터빈 구성부의 성능이 낮아지면 하이브리드 시스템에서 가스터빈 출력의 비중이 작아지고, 하이브

리드 시스템의 효율도 낮아지게 된다. 따라서 소형 시스템에서 가스터빈 구성부의 성능을 가능한 높게 유지하는 것이 하이브리드 효과를 유지하기 위한 중요한 요인이 된다.

4. 결 론

PEMFC와 SOFC를 가스터빈과 결합한 소형(10kW급) 하이브리드 시스템의 성능을 비교 분석하였다. PEMFC는 외부개질 방식을 사용하며, SOFC는 내부 및 외부 개질기를 사용하는 두 가지 경우를 모두 해석하였다.

터빈입구온도가 증가하면 추가적으로 공급해주어야 하는 연료량이 증가하며, 내부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템과 PEMFC 하이브리드 시스템에서 시스템 효율은 감소하는 경향을 나타내며, 외부개질을 사용하는 SOFC 하이브리드 시스템의 경우는 미세하게 상승하는 것으로 나타났다.

터빈입구온도가 변화하더라도 가스터빈 연소기로 추가적으로 공급되는 연료량과 시스템에 공급되는 연료량의 비가 작은 시스템의 효율이 높은 값을 나타낸다. 즉, 추가 연료량이 가장 작은 내부개질형 SOFC 하이브리드 시스템의 효율이 가장 높았으며, 외부 개질형 SOFC 시스템의 효율은 PEMFC 시스템에 비해서 낮은 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 한국 기계연구원 기본사업의 지원으로 이루어진 결과임

참고문헌

(1) Williams, M. C., Starkey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S DOE Fossil Energy Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
 (2) Davis, M. W., Fanny, A. H., LaBarre, M. J., Henderson, K. R. and Dougherty, B. P., 2007, "Parameters Affecting the Performance of a

Residential-Scale Stationary Fuel Cell System," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 4, pp. 109~115.

- (3) Traverso, A., Massardo, A., Roberts, R. A., Brouwer, J. and Samuelsen, S., 2007, "Gas Turbine Assessment for Air Management of Pressurized SOFC/GT Hybrid Systems," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2007, Vol. 4, pp. 373~383.
 (4) Karvountzimis G. C., Ferrall, J. and Powers, J. D., 2007, "Effect of Fuel Cell Operating Parameters on the Performance of a Multi-MW Solid Oxide Fuel Cell/ Gas Turbine Hybrid System," ASME Paper GT2007~27553.
 (5) Park, S. K and Kim, T. S., 2006, "Comparison Between Pressurized Design and Ambient Pressure Design of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems," *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp.490~499.
 (6) 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
 (7) You, B. J., Kim, T. S., Lee, Y. D. and Ahn, K. Y., 2007, "Design Parametric Analysis of PEM Fuel Cell and Hybrid System," *Trans. of KSME B*, Vol. 31, No. 5, pp.448~456.
 (8) Liese, E. A. and Gemmen, R. S., 2003, "Performance Comparison of Internal Reforming Against External Reforming in a SOFC, Gas Turbine Hybrid System," ASME paper GT2003-38566.
 (9) Barbir, F., 2005, *PEM Fuel Cells*, Elsevier Inc., ch.3
 (10) Massardo, A. F. and Lubelli, F., 2000, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell Cell-Gas Turbine Combined Cycles(IRSOF-C-GT) : Part A-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122, pp.130~139.
 (11) Aspen Technology, HYSYS, ver. 2006.5.