가스터빈과 고체산화물 연료전지를 결합한 가압형 하이브리드 시스템의 설계변수 해석

정영현* • 김동섭† • 김재환**

(2002년 6월 5일 접수, 2002년 8월 13일 심사완료)

Parametric Design Analysis of a Pressurized Hybrid System Combining Gas Turbine and Solid Oxide Fuel Cell

Young Hyun Jeong, Tong Seop Kim and Jae Hwan Kim

Key Words : Gas Turbine(가스터빈), SOFC(고체 산화물 연료전지), Pressurized Hybrid System(가압형 하이브리드 시스템), Efficiency(효율), Power(출력)

Abstract

Thermodynamic performance analysis has been carried out for a hybrid electric power generation system combining a gas turbine and a solid oxide fuel cell and operating at over-atmospheric pressure. Performance characteristics with respect to main design parameters such as maximum temperature and pressure ratio are examined in detail. Effects of other important design parameters are investigated including fuel cell internal parameters such as fuel utilization factor, steam/carbon ratio and current density, and system parameters such as recuperator efficiency and compressor inlet temperature.

기호설명

A : 면적
E : 전압 포텐셜
F : Faraday 상수
F/A : 연공비
G : Gibbs 에너지
$\bar{h}$: 단위몰 당 엔탈피
I : 전류
J : 전류밀도
L : 길이
LHV : 저위발열량
$\dot{m}$: 질량유량
$\dot{n}$: 몰유량
P : 압력
PR : 압력비
R : 기체상수
S/C : 수증기/연료비
T : 온도
TIT : 터빈입구온도
U_f : 연료이용률
V : 전압
$\dot{W}$: 출력
α : 재순환비
η : 효율
ρ : 저항

상첨자
o : 표준상태

하첨자
a : 양극(연료극)
amb : 외기
AC : 교류
c : 음극(공기극)
DC : 직류
e : 전해질

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
Email : kts@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7307 FAX : (032)868-1716
** 회원, 항공우주연구원

FC : 연료전지
GT : 가스터빈
N : Nernst
p : 분극
rec : 재생기

1. 서 론

환경에 대한 전세계의 관심이 집중되면서 발전설비분야에서도 효율과 신뢰성이 높으면서도 공해물질 배출량이 현격히 적은 새로운 시스템에 대한 요구가 높아지고 있다. 특히, 연료의 화학적 에너지를 직접 전기에너지로 변환하므로서 공해요인이 적고 효율이 높은 연료전지(fuel cell)와 타 열기관에 비해 우수한 신뢰성과 환경친화성을 갖고 있으면서 크기에 비하여 큰 출력이 가능한 가스터빈이 고효율 발전시스템에 적합한 것으로 판단되고 있다. 나아가 두 시스템을 결합한 혼합형(hybrid) 발전설비를 구성할 경우엔 두 시스템의 장단점을 상호 보완하여 매우 높은 열효율이 가능하므로 그 활용 가능성이 높게 평가되고 있다. 특히 현재 세계적으로 분산발전에 대한 관심이 고조되면서 하이브리드 발전시스템이 주목을 받고 있다.[1]

가스터빈은 비교적 소형에서도 안정적인 설계, 제작 기술이 확보되어 있으며, 연료전지 및 하이브리드 시스템 분야에서는 미국을 중심으로 국가적인 프로젝트로서 상용화에 대한 연구 개발이 활발히 시작되고 있는 단계이다.[2] 연료전지는 사용되는 전해질에 따라 여러 가지가 존재하나, 가스터빈과 함께 하이브리드 시스템을 이루기 위해서는 높은 작동온도가 요구되기 때문에 고온형으로 분류되는 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)와 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC)가 개발의 대상이 되고 있다. 한편 하이브리드 시스템은 연료전지의 작동압력에 따라서 가압형(pressurized)과 상압형(atmospheric)으로 구분되는데, 현재 상용화에 가장 근접해 있는 시스템은 SOFC를 이용한 가압형 시스템[3] 과 MCFC를 이용한 상압형 시스템[4] 이다. 현재 효율 수준은 시험중인 플랜트에서 50%를 상회하고 있으며, 머지 않아 60%, 더 나아가 궁극적으로 70%대의 효율도 예상되고 있다.

본 연구는 현재 개발중인 시스템들 중에서도 가장 상용화가 빠를 것으로 판단되는 소형 가스터빈과 SOFC의 가압형 하이브리드 시스템을 대상으로 하여 가스터빈과 연료전지의 특성에 따른 전체 시스템성능을 파악하는 것을 목적으로 한다. 연구의 내용은 연료전지의 주요한 설계인자인 전류밀도, 수증기/연료비 그리고 연료이용률 등과 가스터빈의 주요 설계변수인 압축비, 터빈입구온도 등 주요 설계 변수의 변화에 따른 하이브리드 시스템의 성능 특성을 해석하는 것이다.

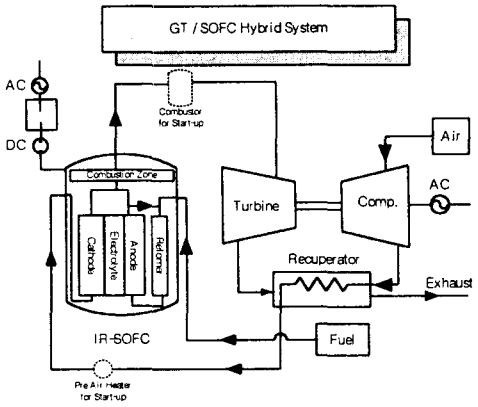


Fig. 1 Pressurized GT/SOFC hybrid system

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성 및 개요

연구의 대상은 가압형 가스터빈/SOFC 하이브리드 시스템으로서 구성도는 Fig. 1에 나타나 있다. 하이브리드 시스템의 구성에 있어서는 다양한 방법이 가능하지만, 이 시스템은 앞서 언급한 바와 같이 가장 상용화에 근접해 있는 실제 시스템[5,6]을 모델링한 것으로서 현재 일부 연구자들에 의하여 벤치마킹 되어 이론적 연구에 사용되고 있다.[7,8] 공기를 가압하는 이유는 연료전지의 성능이 향상됨[9]과 동시에 고압을 이용하여 터빈에서 추가로 출력 생산이 가능하기 때문이다.

가압된 공기는 재생기에서 터빈출구 가스의 열을 흡수하여 예열되어 공기극(cathode)으로 공급되고, 연료(천연가스)는 셀 내부에 있는 개질기(internal reformer)에서 수소로 개질되어 연료극(anode)으로 공급된다. 연료극의 수소와 공기극의 산소가 전해질을 사이에 두고 이온을 교환하며 전자의 이동을 통하여 전기를 발생시킨다. 연료극에서 공기와 반응하고 나오는 가스중 일부가 개질과정에 필요한 수증기 공급을 위해 개질기로 재순환되며, 개질기의 흡열반응에 필요한 열은 셀의 전기화학반응시 발생되는 열로부터 얻는다. 반응하고 나온 가스중 여분의 연료는 연소구역(combustion zone)에서 모두 연소된다. 모든 화학반응을 마친 가스는 터빈에서 팽창한다. Fig.1에서 점선으로 표시된 것은 공기예열기와 연소기로서, 정상 운전 상태에서는 연료가 공급되지 않고 시동

시에만 시스템 예열을 위하여 연료가 공급된다.

2.2 모델링

공급되는 연료는 메탄(CH_4)으로 생각한다. 연료전지내부는 연료를 수소로 변환시키는 개질기와 수소와 산소간의 반응이 일어나는 셀로 나눌 수 있다. 셀은 연료극(anode), 공기극(cathode) 및 전해질(electrolyte)의 세 층으로 이루어진다. 개질기에서는 다음 식들과 같이 1차, 2차 반응을 거쳐 수소와 이산화탄소가 발생된다. 식에서 알 수 있듯이 완전한 개질이 이루어진다고 가정한다.

$$\text{Reforming}: \quad CH_4+H_2O \rightarrow 3H_2+CO \tag{1}$$

$$\text{Water-gas Shift}: \quad CO+H_2O \rightarrow H_2+CO_2 \tag{2}$$

$$\text{Total Reaction}: \quad CH_4+2H_2O \rightarrow CO_2+4H_2 \tag{3}$$

공기극으로 공급된 공기 성분 중 산소만이 연료극의 수소와 반응하여 전기를 발생시키며 연료극에서 수증기가 배출된다. 셀 내부에서의 순수 전기화학반응은 다음과 같다.

$$\text{Anode}: \quad H_2+O^{2-} \rightarrow H_2O+2e^-$$

$$\text{Cathode}: \quad O_2+2e^- \rightarrow O^{2-}$$

$$\text{Overall}: \quad H_2+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{Electricity} \tag{4}$$

개질과정에 필요한 수증기를 공급하기 위해서 연료극 배출가스 중 일부를 개질기로 재순환시킨다. 따라서 수증기/연료비 (steam carbon ratio, S/C)가 중요한 설계 파라미터로서 개질기에 공급되는 (연료극에서 재순환되어 공급) 수증기와 공급된 연료(메탄) 사이의 비로 식 (5)로 정의된다. 이것이 결정되면 연료극 출구 유량중 재순환되는 유량의 비로서 식 (6)으로 정의되는 재순환비 (recirculation ratio, α)가 정해진다.

$$S/C = \frac{\dot{n}_{H_2O,\text{recirculated}}}{\dot{n}_{CH_4}} \tag{5}$$

$$\alpha = \frac{\text{recirculated flow}}{\text{anode exit total flow}} \tag{6}$$

식 (3)에서 보듯이 이론적으로는 메탄 한 몰당 수증기 2몰이 필요하지만, 현실적으로 이보다는 높은 값을 유지해야 개질이 충분히 일어날 것이다. 한편, 식 (3)에 의해 생성된 수소가 모두 산소와 반응 하는 것이 아니고 일부는 반응 후 남게 된다. 이를 반영하는 설계 파라미터가 연료이용률 (Utilization factor, U_f)로서 본 연구에서는 다음과 같이 정의한다.

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2,\text{reacted}}}{\dot{n}_{H_2,\text{supplied}}} \tag{7}$$

연료이용률을 제한하는 이유는 이 값이 너무 높을 경우에 셀 말단부에서 연료가 희박해져서 셀 전압 손실이 커질 가능성이 있기 때문이다.[9] 또 하나의 중요한 연료전지 설계 파라미터는 전류밀도(Current density, J)로서 셀을 통하여 발생되는 전류를 셀의 면적으로 나눈 것이다. 이 파라미터가 높을수록 셀을 콤팩트하게 설계할 수 있지만, 전압손실 또한 커져서 성능에 영향을 주므로 적절한 값의 선택이 필요하다.

Nernst식에 의한 이론적인 셀 전압을 계산한 뒤, 셀 내부에서의 전압 손실 모델을 적용하여 실질적인 셀의 발생전압을 구한다.[9] 이론적인 Nernst 포텐셜은 다음 식과 같이 계산된다.

$$E_N = E^\circ + \frac{RT}{2F}\ln\frac{P_{H_2}\cdot P^{1/2}_{O_2}}{P_{H_2O}}$$

$$\text{여기서} \quad E^\circ = -\Delta G^\circ/2F \tag{8}$$

ΔG° 는 표준상태(1기압)에서의 생성물과 반응물 사이의 Gibbs 자유에너지 차이로서 셀의 작동온도(T_c)가 주어지면 이상기체 물성치로부터 구해진다. F는 패러데이상수, R은 기체상수이며 P는 각 성분의 분압을 의미한다. 식 (8)의 2는 수소 1분자당 2개의 전자가 발생함을 의미한다.

연료극, 전해질 및 공기극 각각에서의 내부저항 (ohmic resistance)과 전기분극(polarization)에 의하여 전압손실이 발생한다.[9] 손실이 보정된 실질적인 셀 전압은 다음 식으로 계산된다.

$$V = E_N - E_P - J(\rho_a L_a + \rho_e L_e + \rho_c L_c) \tag{9}$$

여기서 J는 전류밀도이며, L은 셀내부 각층의 두께이다. 극성손실은 다음식[7,10]에 의하여 구한다.

$$E_p = \left(V_a \frac{\ln(J_c/J_o)}{\ln(1+J_c/J_o)}\right)\ln(1+J/J_o)$$

$$\text{여기서} \quad J_o = 10^{(-7520/T_c+4.51)}, V_a = 0.074(T_c/1273),$$
$$J_c = 0.4\text{A/cm}^2 \tag{10}$$

셀 내부의 저항은 다음 식[7,11]들로 계산한다.

Anode : $\rho_a = 0.00298e^{(-1392/T_c)}$ (11a)

Cathode : $\rho_c = 0.008114e^{(600/T_c)}$ (11b)

Electrolyte : $\rho_e = 0.00294e^{(10350/T_c)}$ (11c)

저항 계산을 위해서는 셀의 작동온도(T_c)가 필요하며, 이 작동온도는 연료전지 전체에 대한 에너지 보존식으로부터 구할 수 있다. 셀의 작동온도는 가스출구(연소구역 이전)에서의 값으로 대표된다고 가정한다. 에너지 식은 다음과 같다.

$$\sum_R \dot{n}_i \bar{h}_i = \sum_P \dot{n}_i \bar{h}_i + \dot{W}_{FC,DC} \quad (12)$$

여기서 R과 P는 각각 반응물과 생성물들을 의미하고 $\dot{n}_i$은 각 성분의 몰유량을 나타낸다. 시스템으로 유입되는 연료의 유량이 정해지면 발생 전류가 결정되고 (전류밀도가 주어져 있으므로 셀의 면적도 결정됨), 연료전지에서 발생되는 직류출력이 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{FC,DC} = VI = VJA \quad (13)$$

연료전지의 잉여 연소성분(H_2)은 연소구역에서 연소되며, 연소가스는 터빈에서 팽창하여 동력을 생산한다. 따라서 시스템의 최고온도는 연소후의 온도 즉 터빈입구온도(TIT)이다. 따라서 이 온도가 원하는 온도가 되도록 연공비(F/A)를 바꾸가며 계산하게 된다. 하이브리드 시스템의 전체 출력과 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{total,AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{fuel}}, \quad \dot{W}_{total,AC} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} \quad (14)$$

계산에 필요한 모든 열역학적 물성치는 이상기체 물성치[12]를 사용하였다.

Table 1 Reference design parameters

Fuel	Methane
GT parameters	
Compressor inlet temperature	15 °C
Turbine inlet temperature	840 °C*
Pressure ratio	2.9*
Compressor efficiency	0.78
Turbine efficiency	0.82
Recuperator efficiency	0.87
Fuel Cell parameters	
Fuel utilization factor	0.85
Steam/Carbon ratio	3.0
Current density	320 mA/cm²*
Performance data	
Air flow rate	0.534 kg/s
Fuel/air ratio	0.01374
Cell voltage	0.582 V (0.610 V)**
Cell area	104 m² (96 m²)**
GT power (AC)	41 kW
FC power (AC)	184 kW
Total power (AC)	225 kW
Specific power	422 kJ/kg (378kJ/kg)**
Efficiency	61 % (57%)**

* data given for analysis
** data from manufacturer

3. 해 석

3.1 개요

본 연구의 시스템은 현재 시험 단계에 있는 Siemens-Westinghouse사의 220kW급 하이브리드 시스템을 모사한 것으로서 최근에 주요 설계 파라미터들과 성능 자료들이 발표되고 있다.[3,5,6] 본 계산에서도 이러한 자료들을 바탕으로 기본이 되는 설계 성능을 계산하였으며, Table 1에 예를 들었다. 가스터빈 각 요소에서의 압력손실 및 발전기 손실과 연료전지에서의 직교류 변환손실 등도 적절히 포함되었다. 터빈입구온도, 압력비, 전류밀도 등은 발표되고 있는 값으로 설정하고, 출력이 220kW급이 되도록 공기유량을 정하였다. 비출력과 효율이 제작사자료에 비하여 다소 높게 예측되었으나, 이 시스템이 아직 개발 단계에 있으며, 발표되는 자료들이 아직 완전히 실증된 것들이 아니고 설계 목표이거나 예상 값일 가능성이 높다는 점을 감안한다면 대체로 만족할 만한 결과로 풀이된다.

시스템 성능의 특징은 연료전지의 출력이 월등히 높다는 것이다. 그러나 주의할 점은 비록 가스터빈의 출력 비중이 작으나 50% 미만에 그치는 연료전지의 효율이 가스터빈과의 하이브리드 시스템으로 인하여 60%대의 효율이 가능하다는 점이다. 이러한 기본 자료를 바탕으로 본 연구에서는 가스터빈 및 연료전지에서 가장 기본이 되는 설계 파라미터들에 따른 시스템의 성능 변화를 해석하여 결과를 제시하고자 한다. 앞으로 예시될 해석들에서 각 파라미트릭 해석의 대상이 되지 않는 다른 파라미터들은 특별한 언급이 없는 한 Table 1의 값들을 사용한다.

3.2 파라메트릭 해석

먼저 시스템의 가장 기본이 되는 파라미터인 터빈입구온도, 즉 시스템 최고온도와 압력비에 따른 설계 성능 변화를 Fig. 2에 비출력-효율 선도로서 나타내었다. 먼저 주어진 시스템 최고온도에서 압력비가 상승할수록 출력이 증가한다. 이러한 압력비 증가에 따른 비출력 증가는 Fig. 3를 통하여 이해할 수 있다. 가스터빈의 비출력(비록 재생가스터빈이라 하더라도)이 적정한 압력비에서 최대값을 가지는 것은 자명한 사실이다. 반면에 연료전지의 출력은 압력비가 높아지면 증가한다. 이러한 현상에는 본 시스템에서 채용하고 있는 재생기가 지대한 역할을 한다. 즉, 압력비가 높아지면 터빈출구의 온도가 낮아지게 되고 이는 재생효과를 감소시켜서 연료전지로 들어가는 공기의 온도가 낮아지고 결과적으로 연료의 양이 증가한다. 따라서 연료전지의 출력은 연료량에 비례하여 증가한다. 결과적으로 시스템의 설계 비출력은 압력비가 높아질수록 커진다. 반면에 일정 압력비(대체로 낮음) 이상에서는 압력비 상승에 따른 연료량의 증가율이 출력 상승율보다 커져서 효율은 감소한다. 효율이 가장 높은 압력비는 재생가스터빈 단독 설계시의 최적효율 압력비와 거의 일치하였다.

이러한 출력과 효율의 변화양상은 연료전지와는 다른 하이브리드 시스템의 독특한 것으로 풀이된다. 즉, 연료전지만의 시스템에서는 압력비가 증가하면 연료전지의 발생전압이 증가하여[9] 출력이 상승하지만 이는 매우 미미한 정도로서 실질적으로 연료전지의 출력과 효율은 거의 일정한 것이나 다름 없다. 본 계산조건하에서 연료전지만의 단독운전을 고려한 결과 효율은 50%에 다소 못 미치는 것으로 계산되었다. 따라서, 하이브리드 시스템에서는 연료전지와 재생기를 포함한 가스터빈의 적절한 상호작용에 의하여 연료전지에 비하여 효율이 10% 이상 향상되고, 설계 성능특성도 변화되는 것이다.

터빈입구온도가 높아질수록 성능이 향상되며, 재생기를 사용하는 관계로 낮은 압력비에서 효율이 최대가 되는 재생 가스터빈 사이클의 특성이 나타나고 있다. 한편 터빈입구온도가 낮을수록 최고 효율 압력비를 지나면 효율이 급격히 감소한다. 앞서 Table 1에서 살펴본 Siemens-Westinghouse사의 시스템에서 설정한 압력비 2.9가 840°C 조건에서 본 계산의 최고 효율점(압력비 3.5)에 근접한 것을 알 수 있으며, 이 회사의 설계점 선정이 효율 최적화 설계에 바탕을 두었다고 가정할 때 본 계산결과가 비교적 타당한 것으로 판단 할 수 있다. 한편 터빈입구온도가 변해도 최고효율 압력비는 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 터빈

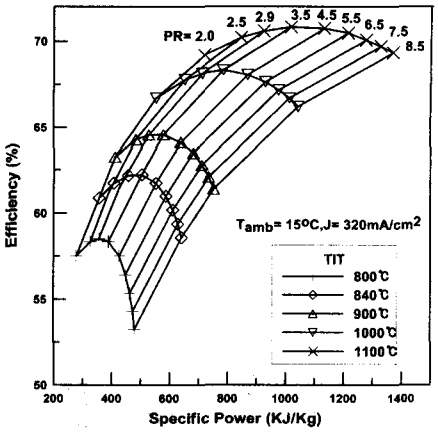


Fig. 2 Design performance map of the hybrid system

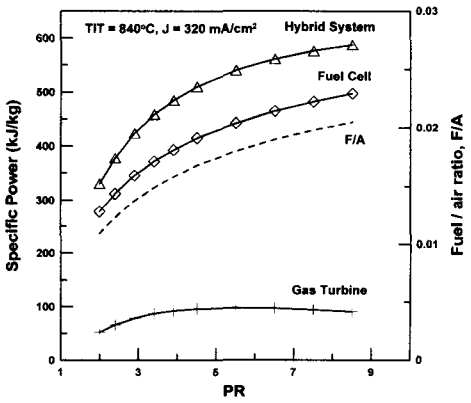


Fig. 3 Variations in specific power and fuel/air ratio of the hybrid system

입구온도가 높아지면 최고효율점 부근에서 효율 변화가 완만한 반면에 압력비를 높이면 비출력이 상당히 증가하므로 현재보다 터빈입구온도를 높이는 경우에는 압력비를 다소 높게 설계하는 것이 합리적이라고 판단된다. 단, 현재 수명을 고려한 일반적인 터빈재질의 설계 운전온도가 800°C를 조금 상회하는 정도임[13]을 고려하면 제작사가 정한 터빈입구온도는 냉각 없이 터빈을 설계할 수 있는 한계로 풀이된다. 따라서 실제로 금속 재질을 유지하면서 그 이상 온도를 올리려면 터빈 냉각이 수반되어야 할 것이고, 이러한 냉각이 성능에 미치는 영향이 추가로 분석되어야 할 것이다. 그러나 현재 100 kW 미만인 마이크로터빈에서는 경제성 등을 감안하여 반경류 압축기와 터빈이 사용되므로 터빈냉각은 사실상 힘들다. 따라서 온도를 더 올리려면 세라믹 재질의 사용이 더 합리적이라고 판단할 수도 있다. 한편 Fig. 4에 나타난 바와 같이 터빈입구온도가 높아지면서 연료전지가 차지하는 비중이 증가하는 것으로 나타났다.

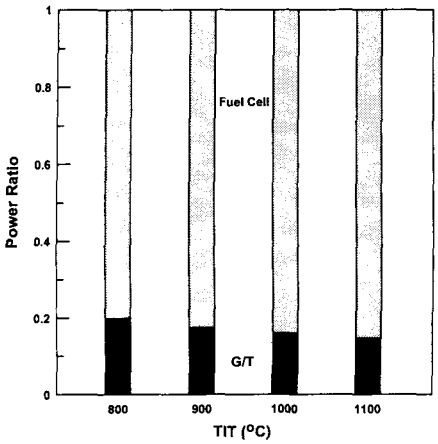


Fig. 4 Effect of turbine inlet temperature on power distribution (PR=2.9)

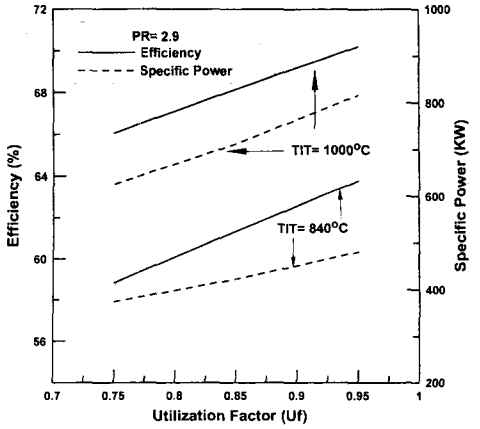


Fig. 5 Effect of fuel utilization factor on system performance

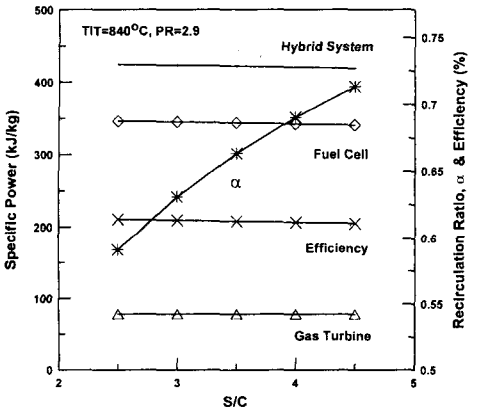
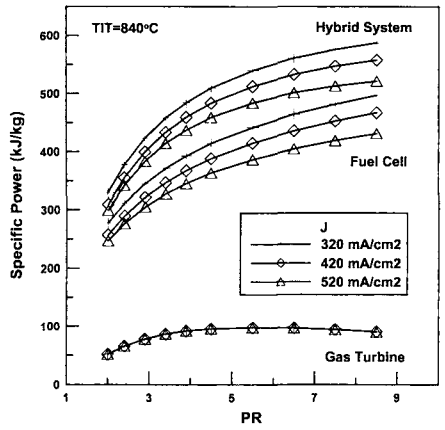


Fig. 6 Effect of steam/carbon ratio on system performance

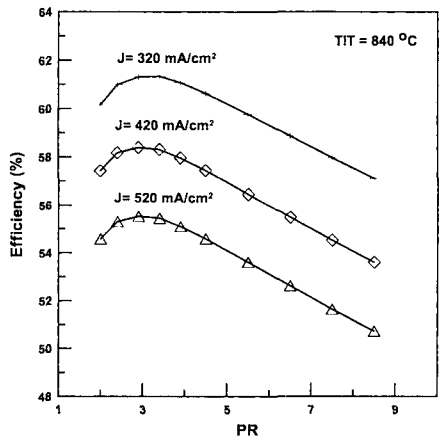
이번에는 연료전지 내부 설계 파라미터들의 영향을 살펴본다. Fig. 5에는 연료이용률(U_f)의 영향을 나타내었다. 본 연구에서 U_f 는 식 (7)과 같이 셀 내부에서 공급된 수소 중에 산소와 반응하는 수소의 비율로 정의한다. U_f 값이 커질수록 연료전지에서 수소/산소 사이의 전기화학반응이 많이 일어나므로 출력이 증가한다. 터빈입구온도가 일정하면 가스터빈출력에는 변화가 거의 없으므로 결과적으로 효율이 향상된다. 이 결과는 가스터빈 보다는 상대적으로 효율이 높은 연료전지에 연료가 많이 공급될수록 전체 시스템의 성능이 향상된다는 것을 의미한다. 연료이용률이 증가하면 셀내부에서 희박한 연료농도로 인한 부가적인 손실이 존재 하는 것으로 알려져 있으므로[9] 추후 이에 대한 적절한 모델링이 추가 되어야 더욱 정확한 정량적 계산이 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 6에는 수증기/연료비 (*S/C*)의 영향을 보였다. *S/C* 를 증가시키려면 연료극 출구 유량중에서 더 많은 양을 개질기를 통하여 재순환시켜야 한다. 터빈입구온도는 일정하게 두었으므로 가스터빈의 출력에는 변화가 없다. 결국 *S/C*가 커지면 전체출력이 다소 감소한다. 효율은 거의 영향을 받지 않으나 매우 작은 감소를 가져온다.

다른 중요 설계 변수이자 제작기술 수준을 나타내는 파라미터는 셀 단위면적당 전류량인 전류밀도로서, 이 파라미터가 성능에 미치는 영향을 Fig. 7에 보였다. 터빈입구 온도가 일정하면 전류밀도에 상관없이 가스터빈의 출력은 변화가 거의 없으나 전류밀도가 높을수록 연료전지의 출력이 감소하여 전체출력과 효율이 감소한다. 전류밀도가 높으면 전압손실이 커지는 것이 (전류밀도가 높을수록 셀저항이 커짐, 식 (7), (8) 참조) 주 원인이다. 그러나 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 전류밀도가 높을수록 연료전지 셀 크기가 감소하게 되어 결과적으로 경제성의 척도가 될 수 있는 출력밀도 (power density)가 높아지게 된다. 따라서 실제 개발시에는 설계성능과 제작비 등을 고려한 적절한 경제성 분석이 요구된다.

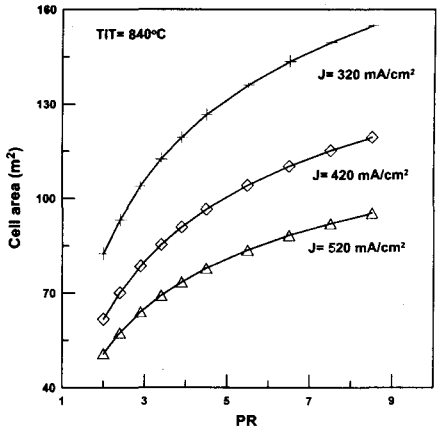


(a) Specific power

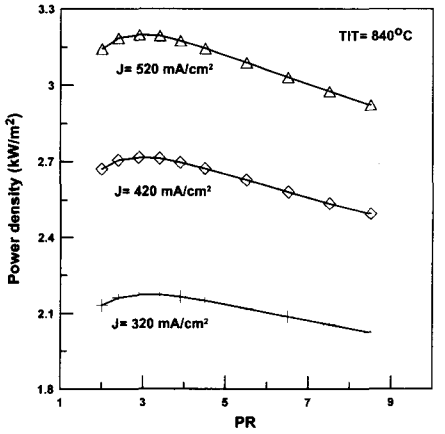


(b) Efficiency

Fig. 7 Effect of current density on system performance



(a) Cell area (air flow = 0.534 kg/s)



(b) Power density

Fig. 8 Effect of current density on cell area and power density

이번에는 연료전지에 공급되는 공기를 예열하는 재생기의 효율이 미치는 영향을 살펴본다. 해석 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 앞서 Fig. 2, 3에서 재생기의 중요성을 설명한 바 있다. 마찬가지의 맥락에서 재생기 효율의 영향을 이해할 수 있다. 즉, 재생기효율이 증가하면 공급되는 연료량이 줄어서 연료전지의 출력은 감소하고 가스터빈의 출력에는 변화가 없으므로(재생 사이클 가스터빈의 출력은 재생기 효율에 무관함을 상기할 것), 전체 시스템 출력은 감소한다. 그러나 연료 감소율이 출력의 감소율보다 더 크므로 효율은 향상된다.

하이브리드 시스템의 성능이 외기온도에 영향을 받는 정도를 파악하는 것도 필요하다. Fig. 10에는 압축기입구 유입공기 온도의 영향을 예시하였다. 입구공기온도가 높아질수록 출력과 효율이 감소하는 가스터빈의 성능특성이 반영되고 있다. 압력비가 높을수록 입구공기온도의 영향이 커진다.

4. 결 어

상용화에 근접하여 있는 가스터빈과 고체산화물 연료전지의 하이브리드 발전시스템을 대상으로 기본적인 파라미터들을 정하고, 이들의 변화에 따른 설계성능의 변화를 분석하였으며, 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 하이브리드 시스템은 가스터빈과의 결합과 재생기의 영향에 의하여 독특한 설계성능 특성, 즉 압력비에 따른 출력의 큰 변화, 낮은 압력비에서 효율의 최적화 등을 보인다.

(2) 터빈입구온도 800 ~ 1000 °C 범위일 때 압력비 3~4에서 최고 효율을 나타내었으나 온도가 높은 경우 비출력 증가를 위해서 다소 높은 압력비로 설계가 가능할 것으로 나타났다.

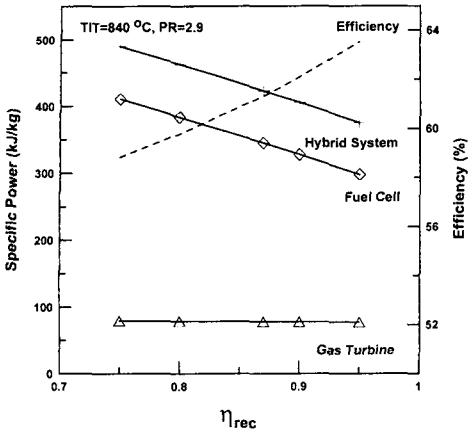


Fig. 9 Effect of recuperator efficiency

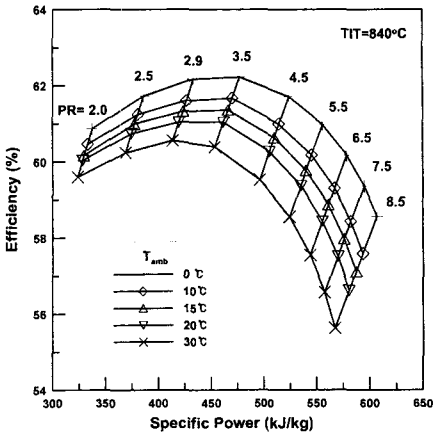


Fig. 10 Effect of ambient temperature

(3) 터빈입구온도를 유지하면서 가능하면 연료전지 셀에 많은 연료가 공급될수록 성능이 향상되는 것으로 나타났다.

(4) 전류밀도는 낮을수록 성능이 높으나 셀 크기가 증가하므로 적절한 설계기준이 필요할 것으로 보인다.

(5) 재생기 효율이 높을수록 연료전지의 출력이 감소하지만 하이브리드 시스템의 효율은 향상된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원(R05-2001-000-01128-0)으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Kim, J. H., Sohn, J. L., Ro, S. T. and Kim, T. S., 2001, "Gas Turbine and Fuel Cell Hybrid System for Distributed Power Generation," *Proc. of the KFMA Annual Meeting*, pp. 354~360.

(2) Layne, A., Williams, M. and Holcome, N., 2001, "Hybrid Fuel Cell Heat Engines: Recent Efforts," ASME paper 2001-GT-0588.

(3) Barker, T., 2000, "Technologies Converge: Fuel Cell Meets Gas Turbine," *Turbomachinery International*, September/October, pp. 19~21.

(4) Leo, A. J., Ghezel-Ayagh and Sanderson, R., 2000, "Ultra High Efficiency Hybrid Direct Fuel Cell/Turbine Power Plant," ASME paper 2000-GT-0552.

(5) George, R. A., 2000, "Status of Tubular SOFC Field Unit Demonstration," *Journal of Power Sources*, Vol. 86, pp. 134~139.

(6) Veyo, S. E., Shockling, L. A., Dederer, J. T., Gillett, J. E. and Lundberg, W. L., 2000, "Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power Systems – Status," ASME paper 2000-GT-550.

(7) Kim, J. H. and Suzuki, K, 2001, "Performance Analysis of SOFC/MGT Hybrid System," *Proc. of KSME Spring Annual Meeting D*, pp. 703~707.

(8) Uechi, H., Kimijima, S. and Kasagi, N., 2001, "Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System," ASME paper JPGC2001/PWR-19171.

(9) Larminie, J. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell Systems Explained*, Jonn Wiley & Sons, Ltd.

(10) Nagata, S., Kasuga, Y., Momma, A. and Kato, T., 1996, "Simulation of Temperature Distribution of Tubular Solid Oxide Electrolysis Cell," *Trans. IEE of Japan*, Vol.116-B, No.8,pp. 918~922.

(11) Massardo, A. and Lubelli, F., 1998, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycle(IRSOFC-GT) : Part A - Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," ASME paper 98-GT-577.

(12) Sonntag, R. and Van Wylen. G.,1991, *Introduction to Thermodynamics*, 3rd ed., Jonn Wiley & Sons, Ltd.

(13) Kim, T. S. and Ro, S. T., 1996, "Program Development for Design and Part Load Performance Analysis of Single-Shaft Gas Turbine," *Trans. of KSME B*, Vol. 20, No. 7, pp. 2409~2420.