

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.11.849

하이브리드형 고분자전해질 연료전지 시스템의 부분부하 성능해석

지승원* · 유병준* · 김동섭† · 손정락** · 이영덕*** · 안국영***
(2008년 5월 26일 접수, 2008년 10월 6일 수정, 2008년 10월 13일 심사완료)

Analysis of Part Load Performance of a Hybrid PEMFC System

Seung Won Ji, Byung June You, Tong Seop Kim, Jeong Lak Sohn,
Young Duk Lee and Kook Young Ahn

Key Words: PEMFC(고분자전해질연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Part Load Performance(부분부하성능), Steam Reforming(수증기개질)

Abstract

The paper addresses modeling and analysis of the part load performance of a hybrid fuel cell system integrating a polymer electrolyte membrane fuel cell(PEMFC) and a gas turbine(GT). The system is a pressurized one where the working pressure of the PEMFC is higher than the ambient pressure. In addition to the two major components, the system also includes auxiliary parts such as a steam reformer, a humidifier, and afterburner and so on. Based on design analysis, component off-design models are incorporated in the analysis program and part load operation is simulated. The mode for the part load operation of the PEMFC/GT hybrid system is a variable rotational speed operation. The operating characteristics and variations in the system efficiency and component performance parameters at part load are analyzed.

———— 기호설명 ————

ECO : 예열기
EVA : 증발기
GT : 가스터빈
 I : 전류
LHV : 저위발열량
 \dot{m} : 질량유량
 \dot{n} : 몰유량
 P : 압력

PR : 압력비
PEMFC : 고분자전해질 연료전지
SCR : 수증기/연료비
SH : 과열기
 T : 온도
TIT : 터빈 입구 온도
 U_f : 연료이용률
 V : 전압
 \dot{W} : 출력
 η : 효율

* 인하대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부
E-mail : kts@inha.ac.kr
TEL : (032)876-7307 FAX : (032)868-1716
** 서울대학교 기계항공공학부
*** 한국기계연구원

하첨자
AC : 교류
AUX : 보조장치
C : 압축기
d : 설계집

- DC : 직류
- FC : 연료전지
- GT : 가스터빈
- HS : 하이브리드 시스템
- in : 입구
- ref : 기준상태(상압)
- stack : 연료전지 스택
- T : 터빈

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈과 환경오염 문제로 인하여 저공해, 고효율 발전시스템의 필요성이 증가되고 있는 상황에서 연료전지가 여러 분야에서 각광을 받고 있고 실용화를 위한 활발한 연구⁽¹⁾가 이루어지고 있다. 그 중 저온형 연료전지인 PEMFC의 경우도 소규모 차세대 전력공급원으로써 상용화를 위한 성능향상 연구⁽²⁾ 및 생산비용 절감을 목표로 한 10kW급의 연료전지 개발⁽³⁾도 이루어지고 있다. 한편, 최근에는 연료전지와 가스터빈을 결합하여 성능을 향상시키기 위한 시스템이 각광을 받고 있으며, 성능 향상정도는 시스템 구성 및 설계조건에 따라서 차이가 나는 것으로 알려지고 있다.⁽⁴⁾ 현재 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템의 연구는 주로 고온형 연료전지인 SOFC 그리고 MCFC와의 하이브리드 시스템에 대해서 집중되고 있지만,⁽⁵⁾ 최근에 저온형 연료전지인 PEMFC의 경우에도 가스터빈과의 하이브리드 시스템을 구성하기 위한 기초 연구들을 수행하여 여러 가지 구성을 가지는 하이브리드 시스템의 설계성능에 대한 연구⁽⁶⁾가 진행되었

다.

한편 발전시스템은 항상 설계부하로만 운전되는 것이 아니라 상황에 따라서 부분부하 상태로 운전되는 경우도 있기 때문에 부분부하의 성능도 중요하다. 최근 고온형 연료전지와 가스터빈을 이용한 하이브리드 시스템의 운전방법에 따른 부분부하 성능해석에 대한 연구^(7,8)가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 저온형 연료전지인 PEMFC와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템을 대상으로 부분부하 성능해석을 위한 구성부 모델링을 수행하고, 가스터빈 축의 가변회전수 운전방식에 따른 하이브리드 시스템의 부분부하 성능을 해석하였다.

2. 시스템의 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

연료는 순수한 메탄을 사용하였고 메탄의 개질 방법으로는 수증기개질을 고려하였다. 본 논문에서는 연료전지가 가스터빈의 압축기에 의해 가압된 공기를 공급받는 가압형 연료전지를 고려한 하이브리드 시스템을 연구대상으로 하였으며 Fig. 1에 개략도를 나타내었다. 압축기와 펌프를 통해 가압상태의 연료와 물이 개질기에 공급되어 개질 반응을 통해서 순수한 수소를 포함한 가스를 생성되어 연료극으로 공급된다. 가스터빈의 압축기에 의해 가압된 공기는 막가습기를 통과한 후 상대습도 100% 상태로 공기극에 공급이 된다. 연료전지에서는 연료극의 수소와 공기극의 산소가 전기화학반응을 일으켜서 전기를 발생하게 된다.

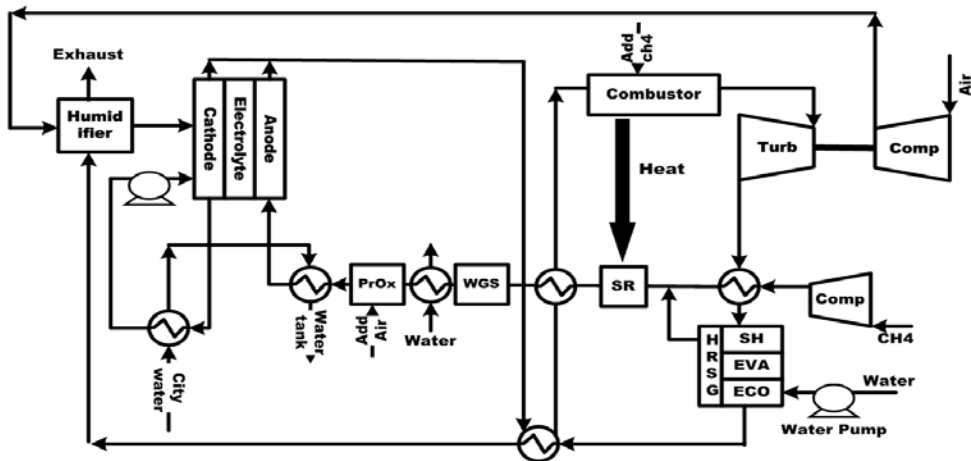


Fig. 1 Configuration of PEMFC/GT Hybrid system

연료전지의 출구가스는 1차로 HRSG (Heat Recovery Steam Generation)의 배출가스와의 열교환을 통하여 예열을 한 후 수증기 개질기의 배출가스와 2차로 열교환을 하여 가열을 한 후 연소기로 공급된다. 연소기에서는 터빈의 입구온도를 맞추기 위해 추가로 연료를 공급하게 된다. 터빈의 출구가스는 먼저 열교환기를 통하여 연료를 예열시키고 HRSG를 통해 개질기로 공급되는 물을 수증기 상태로 만들고 연료전지의 출가스와 열교환 후 배출된다. 터빈 출가스에 의해 가열된 수증기와 연료의 혼합물이 개질반응에 이용되는 것이다. 연료전지 스택의 냉각방식으로는 물을 이용하여 냉각하는 방식을 고려하였고 냉각수는 펌프를 통하여 순환되어진다. 냉각용으로 사용되는 물은 스택에서 배출되어진 냉각수와 열교환으로 냉각수 온도를 낮추고, 다시 개질기 출가스와 열교환하여 개질기 출가스 온도를 연료전지 작동온도까지 냉각하는 역할을 한다. 하이브리드 시스템의 압력비는 대기압과 연료전지 입구압력을 기준으로 정의하였다.

2.2 시스템 모델링

2.2.1 PEMFC 모델링

PEMFC 시스템은 연료전지, 공기의 상대습도를 맞추기 위한 가습기, 그리고 연료(CH₄)를 이용하여 수소를 생성하기 위한 개질기로 구성된다. 본 논문에서는 설계점에서 개질기 입구 연료의 온도는 300°C로 설정하였다. 개질기에 공급되는 연료와 물의 몰비(SCR)는 다음과 같이 정의하였다.

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

개질기는 수증기 개질반응(SR, Steam Reforming Reaction), 수성가스화반응(WGS, Water Gas Shift Reaction)으로 이루어져 있으며, CO를 제거하기 위한 선택적 산화반응(PrOx, Preferential Oxidation Reaction)도 포함되어 있다. 각각의 반응들은 평형반응으로 가정하였다. 각 반응온도는 SR는 750°C, WGS는 230°C, PrOx는 180°C로 설정하였다.

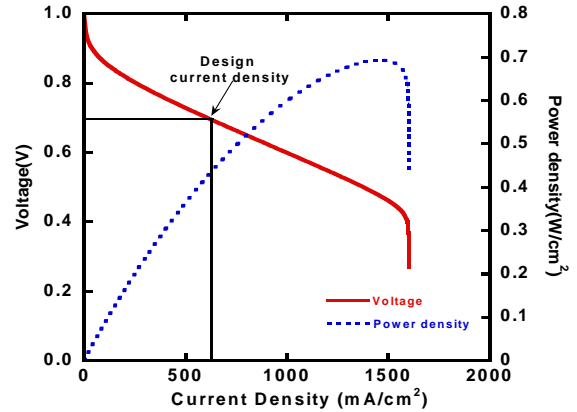
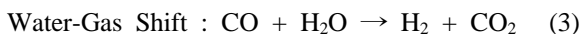
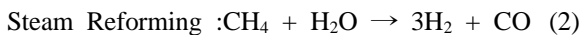
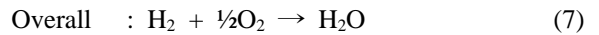
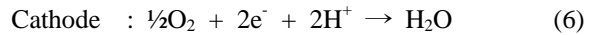
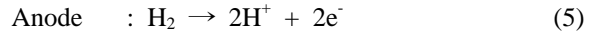


Fig. 2 Cell performance characteristic at atmospheric pressure

연료전지는 연료극, 공기극, 전해질로 나뉘어 지는데, 연료극에는 수소가 포함된 개질기의 출가스가 공급되고, 공기극에는 막가습기로부터 수분과 열을 공급받아 상대습도 100%상태의 공기가 공급된다. 연료전지 내부에서는 다음과 같은 화학반응을 한다.



상압(P_{ref})으로 작동할 때의 전압-전류밀도 관계를 상관식⁽⁹⁾을 사용하여 Fig. 2와 같이 모델링한 뒤, 압력증가에 따른 전압 상승효과는 다음 식⁽¹⁰⁾을 사용하여 모델링하였다.

$$\Delta V = 0.06 \ln(P / P_{ref}) \quad (8)$$

연료이용률(U_f)은 다음과 같이 정의하였다. 그 값은 0.7로 설정하였고, 부분부하시에도 동일하게 운전되도록 가정하였다.

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2,reacted}}{\dot{n}_{H_2,supplied}} \quad (9)$$

설계계산에서 연료전지의 면적을 결정하기 위해서 설계 전류밀도 값인 600mA/cm²가 되도록 발전용량에 따른 연료전지 면적을 계산하였다. 부분부하해석에서는 계산된 연료전지 면적을 고정한 후 연료전지 반응연료량 변화에 따라서 연료전지 전류밀도가 변하도록 모델링 하고, 이를 바탕으로 Fig. 2, 식 (8)을 이용하여 작동 전압을

계산하도록 하였다. 연료전지에서 발생하는 직류 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{FC, DC} = V \cdot I \quad (10)$$

연료전지 스택효율은 셀에 공급되는 수소의 발열량을 기준으로 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{stack} = \frac{\dot{W}_{FC, AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{H_2, supplied}} \quad (11)$$

연료전지에서 발생하는 직류를 교류로 변환시키는 변환효율(η_{conv})은 95%로 가정하였고, 블로워의 등엔트로피 효율은 70%, 펌프는 60%, 모터 효율은 85%로 설정하였다. 연료전지의 교류 출력은 블로워와 펌프 같은 보조동력을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{W}_{FC, AC} = \dot{W}_{FC, DC} \cdot \eta_{conv} - \dot{W}_{AUX} \quad (12)$$

2.2.2 가스터빈 모델링

연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템에서 연료전지에 필요한 공기는 가스터빈의 압축기가 공급해준다. 그리고 연료전지 출구에서 연소기를 거친 고온, 고압의 가스가 터빈을 구동하게 된다. 설계계산에서 구해진 설계 파라미터들을 기준으로 압축기와 터빈의 탈설계 모델링을 통해서 부분부하 해석을 하게 된다. 압축기의 탈설계 특성은 축 회전수(각 선들의 숫자는 상대적인 회전수를 나타냄)에 따른 무차원유량과 압력비의 관계를 나타내는 Fig. 3의 성능선도로서 모델링하였다. 그림에 보인 작동선은 해석의 결과이며 추후 결과에서 논의될 것이다. 터빈은 다음의 Stodola 식으로 작동특성을 모델링 하였다.⁽¹¹⁾

$$\frac{\dot{m} \sqrt{T_{in}/P_{in}}}{(\dot{m} \sqrt{T_{in}/P_{in}})_d} = \frac{\sqrt{1 - (P_{out} - P_{in})^2}}{\sqrt{1 - (P_{out} - P_{in})_d^2}} \quad (13)$$

부분부하 해석에서 열교환기는 유량의 변화에 따른 총합 열전달계수가 변화하는 것으로 가정하여 계산하였으며 식은 다음과 같다.

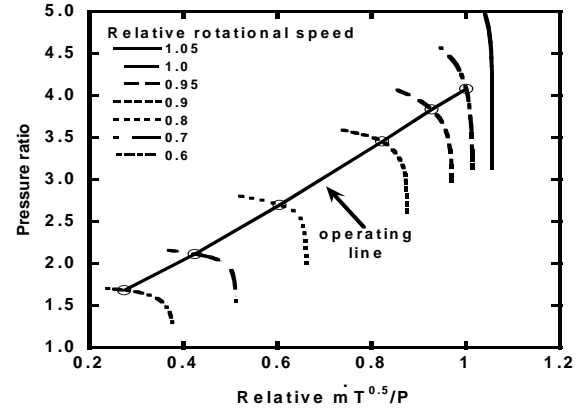


Fig. 3 Compressor map

$$\frac{U}{U_d} = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_d} \right)^z \quad (14)$$

지수 z 는 1보다 작은 값을 지니며, 유량이 줄어들수록 효율은 증가한다. z 값은 기존의 열교환기의 성능결과 분석⁽¹²⁾에 기초하여 0.3으로 가정하였다.

가스터빈의 출력은 발전기에서 발생하는 교류 출력으로 계산하였다. 이전 연구⁽¹³⁾에서 30kW급의 소형 마이크로터빈의 경우에 압축기와 터빈의 등엔트로피 효율은 약 80~85%를 가지게 되는데, 본 논문의 가스터빈은 이에 비해서도 상당히 소형이므로 터빈과 압축기의 효율은 더 낮은 값을 사용하였다. 압축기와 터빈의 설계 등엔트로피 효율은 각각 70%, 압축기의 기계효율(η_m)은 99%, 발전기의 발전효율(η_{gen})은 98%로 가정하였다. 가스터빈 출력은 다음 식으로 계산된다.

$$\dot{W}_{GT} = (\dot{W}_T - \dot{W}_C / \eta_m) \cdot \eta_{gen} \quad (15)$$

하이브리드 시스템의 출력과 열효율은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{HS} = \dot{W}_{FC, AC} + \dot{W}_{GT} \quad (16)$$

$$\eta_{HS} = \frac{\dot{W}_{HS}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{CH_4}} \quad (17)$$

상용프로그램⁽¹⁴⁾을 사용하여 시스템을 모델링하고 해석하였다.

3. 해석결과

하이브리드 시스템에서 부분부하 운전방식으로 는 연료만의 제어, 가변회전수 제어, 가변안내깃 을 사용하는 방법등이 가능하다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 부분부하 운전방식으로는 가스터빈의 압축기와 터빈을 연결한 축의 회전수가 변하는 가변회전수 제어에 의한 방식을 선택하였다. 연료만의 제어를 하면 가스터빈의 출력이 급속히 감소하는데,⁽⁸⁾ 본 연구에서 다루는 PEMFC 하이브리드 시스템의 경우에는 사실상 가스터빈의 출력비중이 매우 작기 때문에 연료만 제어할 경우에 운전 범위가 작아서 실제적이지 못한 방식이 된다.

본 시스템에서 연료만을 제어하는 고정회전수 부분부하 운전시 결과를 Fig. 4에 예시하였는데, 상대 출력으로 98%까지 밖에 감소시킬 수 없었다. 설계점의 98%이하의 출력을 내는 경우에 가스터빈의 출력이 음수가 나오면서 가스터빈이 오히려 동력을 소모하게 되었다. 또한 소형 가스터빈에서 입구 안내깃의 사용 또한 현실적이지 못하다. 따라서 가변회전수 운전만을 해석의 대상으로 하였다.

Table 1에는 해석 대상 시스템의 주요 설계파라미터들과 설계성능을 나타내었다. 연료전지의 순출력은 10kW인데 기생전력인 BOP(Balance of Plant) 출력이 0.07kW가 소모되어 실제 연료전지의 출력은 9.93kW이고 가스터빈의 출력은 0.07kW이다. 이 시스템은 가스터빈의 터빈입구 온도가 낮기 때문에 가스터빈은 사실상 순출력을 발생하지 않는다. 그러나 가압에 의하여 연료전지 전압을 높여주고 압축기동력은 터빈이 감당해

주기 때문에 연료전지만 상압으로 운전하는 경우에 비해서는 효율 향상이 가능하다. 연료전지로 공급되는 공기량과 연료량을 변화시키고 터빈 입구온도가 일정하게 유지되도록 연소기에 추가로 공급되는 연료량을 변화시켜 가면서 부분부하 해석을 수행하였다.

Fig. 5에서는 가스터빈의 회전수 변화에 따른 공기, 연료, 추가연료의 질량유량을 나타내었고, Fig. 6에 회전수 변화에 따라서 PEMFC와 가스터빈이 발생시키는 출력변화를 나타내었다. 회전수가 줄어들면서 작동점 변화는 앞선 Fig. 3에 나타나있다. 가스터빈의 회전수가 감소할수록 연료전지에 공급되는 공기의 유량이 줄어들게 된다. 연료전지에서 반응하는 산소와 수소의 몰비를 맞추어 준다고 (연료이용률이 일정하게 유지됨) 가정하였고, 이로 인해서 공기의 유량이 변함에 따라서 연료의 유량 역시 줄어들게 된다. 결과적으로 회전수가 줄어들면 연료전지의 출력이 감소한다. 최대출력에서 회전수가 감소하면서 추가로 공급

Table 1 Design parameters and performances of hybrid systems

Power (kW)	10
Pressure ratio	4
SCR	3.5
Turbine inlet temperature (°C)	600
Design Current density (mA/cm ²)	600
Fuel cell voltage(V)	0.78
U_f (fuel utilization)	0.7
FC power (kW)	9.93
GT power (kW)	0.07
Efficiency (%)	37.64

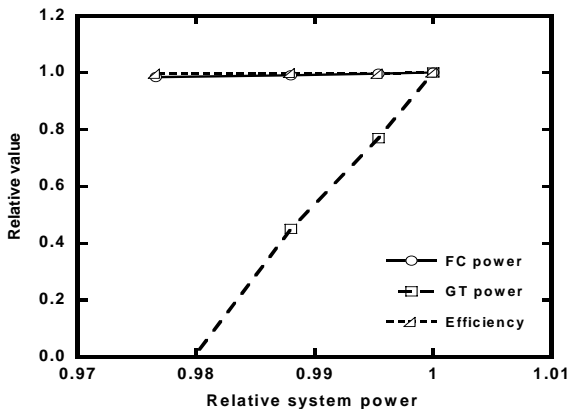


Fig. 4 Variation of PEMFC and GT powers and efficiency in a constant speed control

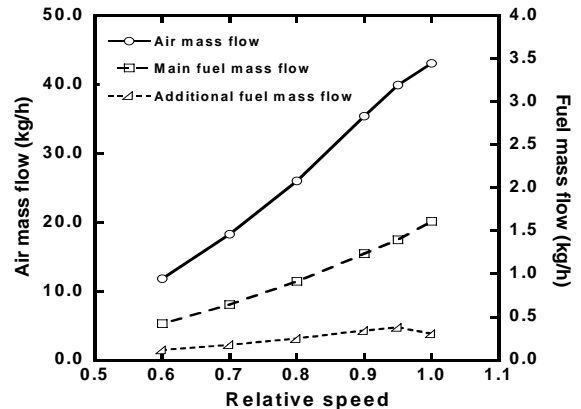


Fig. 5 Variation of air and fuel mass flow with gas turbine shaft speed

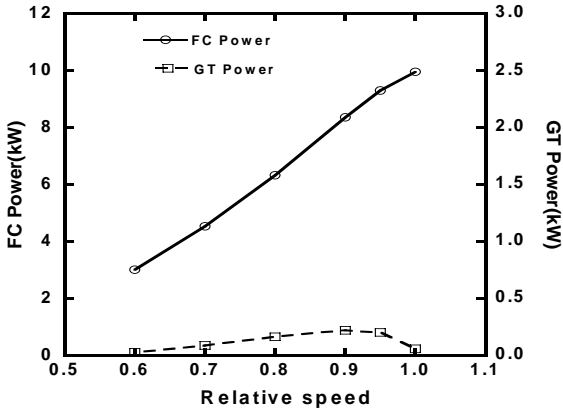


Fig. 6 Variation of PEMFC and GT powers in a variable speed control

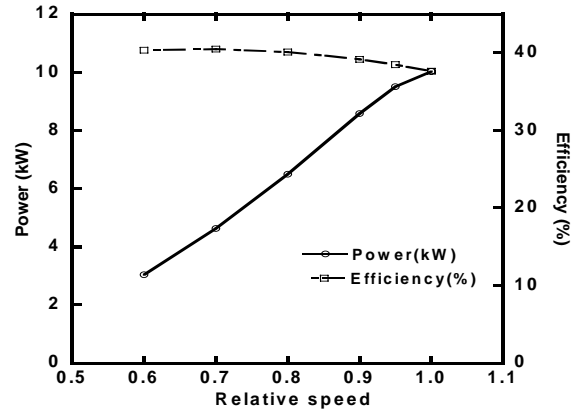


Fig. 8 Variation of power and efficiency with gas turbine shaft speed in a variable speed control

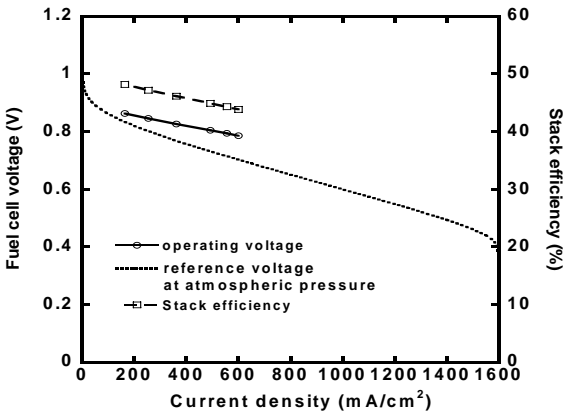


Fig. 7 Variation of the FC voltage and stack efficiency in a variable speed control

되는 연료의 양이 다소 증가하는 구간이 생기는데, 이는 수증기개질기의 작동압력의 감소와 개질기의 반응온도가 증가함으로 인해서 수증기 개질기의 개질물이 상승하게 되어 연료전지에서 반응하고 남은 잔여 CH_4 가 적어지기 때문에 터빈 입구온도를 유지하기 위해서 추가로 공급되는 연료의 양이 증가하는 것이다. 회전수가 설계치의 60%일 때 시스템의 출력은 설계출력에 비해서 약 30%까지 감소하였다. 터빈은 연료전지에 공급되는 공기를 가압하는데 사용되는 압축기의 일을 보상하는 정도의 출력을 발생하고 순출력은 거의 없다.

Fig. 7에는 가변회전수 운전에 따른 연료전지 셀 전압과 연료전지 스택의 효율을 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 회전수가 줄어들면 공급되는 공기의 양이 감소하고 연료전지로 들어오는 연료의 양도 줄어들게 된다. 결과적으로 동일한 셀 면적에서 반응이 덜 일어나게 되므로 전류밀

도가 감소하게 된다. 연료전지의 운전특성에 의해서 전류밀도가 감소하게 되면 셀 전압은 상승하게 되고 결국 연료전지 스택의 효율은 상승하게 된다. 가스터빈의 회전수가 줄어들게 되면 연료전지에 공급되는 압력이 감소하기 때문에 부분부하 운전시에 연료전지의 가압에 의한 셀 전압 상승효과는 줄어들게 되지만, 이에 불구하고 전류밀도 감소에 의한 전압상승효과가 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 8에는 하이브리드 시스템의 효율과 출력 변화를 나타내었다. 가스터빈의 회전수가 감소할수록 하이브리드 시스템의 효율은 증가하고 출력은 감소하였다. 본 논문의 하이브리드 시스템은 연료전지 출력의 비중이 가스터빈 출력의 비중보다 월등하게 크기 때문에 전체 시스템의 성능은 연료전지의 성능특성에 좌우된다. 따라서 부분부하 운전 시에 Fig. 7의 스택효율 상승효과가 지배하게 되어 시스템효율이 상승하게 된다.

4. 결론

가스터빈과 결합된 하이브리드형 PEM 연료전지 시스템에 대해서 탈설계 모델링을 통해서 부분부하 해석을 수행하였다. 가스터빈의 회전수를 일정하게 유지하는 방식은 운전범위가 너무 작아서 제외하였으며, 가스터빈축의 회전수를 변화하는 가변회전수 운전을 부분부하 운전 방식으로 삼았다. 부하가 줄면서 연료전지의 전류밀도가 감소하면서 스택 효율이 설계점에 비하여 상승하였으며, 하이브리드 시스템의 효율도 설계점 대

비 상승하였다. 시스템출력은 상대회전수 60%까지 감소시킬 때까지 터빈의 출력이 압축기의 출력을 보상할 수 있었고 그때의 시스템의 출력은 설계출력의 30%까지 감소시킬 수 있었다. 가스터빈 작동면에서는 터빈이 압축기의 동력을 보상하는 정도로서 가스터빈의 순출력은 모든 부하 구간에서 연료전지에 비하여 매우 작았다. 본 연구에서 구축된 탈설계 모델링은 추후 유사한 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 부분 부하 운전과 성능 예측에 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국 기계연구원 기본사업의 지원으로 이루어진 결과임

참고문헌

- (1) Williams, M. C., Strakey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cells Progeam," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
- (2) Mehta, V. and Smith Cooper, J., 2003, "Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing," *Journal of Power Sources*, Vol. 114, pp. 32~53.
- (3) Scholta, J., Berg, N., Wilde, P., Jorissen, L. and Garche, J., 2004, "Development and Performance of a 10kW PEMFC Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 127, pp. 206~212.
- (4) 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.
- (5) Dennis, R., Williams, M., Gross, F., Burch, G., Hoofman, P. and Samuelsen, S., 2003, "Hybrid Power: A 2003 Perspective for the Decade.," *ASME paper* GT2003-38950.
- (6) You, B. J., Kim, T. S., Lee, Y. D. and Ahn, K. Y., 2007, "Design Parametric Analysis of PEM Fuel Cell and Hybrid Systems," *Trans. KSME(B)*, Vol. 31, No. 5, pp. 448-456.
- (7) Costamagna. P., Magistri. A., Massardo. A. F., 2001, "Design and Part-load Performance of a Hybrid System Based on a Solid Oxide Fuel Cell Reactor and a Micro Gas Turbine," *Journal of Power Sources*, Vol. 96, pp. 352~368.
- (8) Yang, J. S., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2007, "Performance Characteristics of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System with Various Part-load Control Modes," *Journal of Power Sources*, Vol. 166, pp. 155~164.
- (9) Frano, B., 2005, "PEM Fuel Cell," Elsevier Inc., pp. 50~52.
- (10) Larmine, J. and Dicks, A., 2003, "Fuel Cell Systems Explained," *John Wiley & Sons, Ltd.*, pp. 105.
- (11) Dixon, S. L., 1978, "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery.," 4th ed., *Pergamon Press.*, PP. 120~122
- (12) Kim, T. S. and Hwang, S. H., 2006, "Part Load Performance Analysis of Recuperated Gas Turbines Considering Engine Configuration and Operating Strategy," *Energy*, Vol. 31, pp. 260~277.
- (13) Lee, J. J., 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.
- (14) Aspen Technology Incorporate, Aspen one HYSYS, ver. 2006. 05.