

< 논문 >

부하추종 운전방법에 따른 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 동력 시스템의 부분부하 성능특성

김재훈* · 양진식* · 손정락† · 노승탁**
(2005년 3월 10일 접수, 2006년 2월 19일 심사완료)

Part-load Performance Characteristics of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power System Operating with Various Load-following Operation Modes

Jae Hoon Kim, Jin Sik Yang, Jeong Lak Sohn and Sung Tack Ro

Key Words : Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid Power System(하이브리드 동력 시스템), Part-load Performance(부분부하 성능), Efficiency(효율), Power(동력)

Abstract

The purpose of this study is to compare the part-load performance of a SOFC/GT hybrid power system with three different kinds of load-following operation modes. The primary mode for the part load operation of a hybrid power system is the reduction of supplied fuel (e.g., fuel control mode) to the hybrid system. The other two options, i.e., variable speed and VIGV controls, are related to the reduction of supplied air simultaneously with the reduction of supplied fuel to the system. With the performance analysis of a SOFC/GT hybrid power system, it is concluded that the variable speed control mode provides the best performance for the part-load operations. It is also found that the VIGV control mode, with its better performance behavior than the fuel control mode, can be used as an important option for the part-load operation especially in case that the variable speed control mode can not be adopted.

기호설명

<p>A : 반응 면적[m²] E : 활성화에너지[kJ/mol] F : Faraday 상수[=96,485 C/mol] G : 유량 함수 j : 전류밀도[A/m²] k : 반응계수[A/m²] LHV : 저위발열량[kJ/kg] \dot{m} : 질량 유량[kg/s] N : 회전수[rpm] p : 압력[Pa]</p>	<p>PR : 압력비 R : 기체상수[kJ/kgK] r : 비저항[Ω·m²] TIT : 터빈입구온도[°C] V : 전압[V] \dot{W} : 출력[kW] \dot{z} : 전기화학 반응량[kmol/s]</p> <p style="text-align: center;">하첨자</p> <p>a : 공기 혹은 연료극 act : 활성화 손실 c : 연료전지 혹은 공기극 $comp$: 압축기 d : 설계점 e : 전해질 FC : 연료전지 GT : 가스터빈 $Hybrid$: 하이브리드 동력 시스템</p>
--	---

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : jlsohn@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7434 FAX : (02)889-6205

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

- int : 연결자(interconnector)
- oc : 개방회로전압
- ohm : 저항손실
- turb : 터빈
- 0 : 기준상태

그리스 문자
 η : 효율

1. 서론

최근 들어 환경 및 에너지에 관한 문제가 부각되면서 효율이 높으면서도 환경오염이 적은 새로운 동력 시스템에 대한 요구가 증대되고 있다. 이와 관련하여 연료전지는 환경오염이 적고 다른 열 시스템에 비하여 효율이 매우 높아 차세대 동력 시스템으로 부각되고 있다.⁽¹⁾ 특히, 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)와 같은 고온형 연료전지의 경우 고온 작동 특성으로 인하여 가스터빈과의 연계를 통하여 추가적인 효율 상승을 도모할 수 있어 고체산화물 연료전지/가스터빈(SOFC/GT) 하이브리드 동력 시스템의 개발이 최근 들어 활발히 진행되고 있다.⁽²⁾

일반적으로 동력 시스템은 고정된 부하 조건에서와 같은 설계점(Design Point) 조건에서만 운전되는 것이 아니라 사용자가 요구하는 각종 부분부하(Part-load) 조건에 따른 탈설계(Off-design) 영역에서 운전되는 경우가 많다. 따라서 동력 시스템의 성능은 설계점 조건에서는 물론 탈설계 영역에서도 최적으로 유지되어야 한다.

SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 설계점 및 부분부하 조건에서의 성능해석과 관련된 연구는 과거 수년에 걸쳐 세계적으로 활발하게 진행되어

왔다.⁽³⁻⁷⁾ 그 중에서도 특히 설계점에서의 성능특성과 관련된 연구는 SOFC와 가스터빈의 구성 및 운전방법에 따른 최적 시스템 형상 도출에 주로 적용되어 왔다. 반면에 부분부하 조건에서의 성능특성과 관련된 연구는 부하 변동 시 시스템의 효율을 최대로 유지할 수 있는 방법에 관한 연구가 주종을 이루고 있다. 부분부하 조건에서의 성능특성과 관련된 지금까지의 대부분의 연구는 요구 부하의 변동에 따른 하이브리드 시스템의 출력 제어를 (1) 연료량 제어, (2) 연료량과 함께 가스터빈의 회전수 제어(가변 회전수 제어)를 함으로써 공급 공기량을 함께 제어하는 가변 회전수 제어 방법에 관한 것이다. 위의 두 가지 방법 중 일반적으로 가변 회전수 제어의 경우가 부분부하 조건에서 상대적으로 높은 효율을 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다.^(3,4)

그러나 가변 회전수 제어가 가능한 가스터빈은 고속 발전기(High Speed Generator)의 활용이 가능한 수백 kW 이하 출력의 마이크로 터빈으로 제한될 수 밖에 없다. 최근에 개발되고 있는 SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템은 수십 kW 출력의 마이크로 터빈을 활용한 수백 kW급의 초소형이 주종을 이루고 있지만,^(3,8,9) 향후 MW 이상의 고출력 시스템에 적용될 경우에는 가변 회전수 제어에 의한 부분부하 운전이 사실상 불가능하며, 이 경우에는 대부분의 발전용 가스터빈에서 적용하는 가변 안내깃(Variable Inlet Guide Vane, VIGV) 제어 방식을 채택하여야 한다.

본 연구에서는 SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 여러 가지 부하추종 운전방법에 따른 부분부하 성능특성에 대해서 고찰하였다. 이를 위해서 선행 연구⁽¹⁰⁾를 통해 설계점 성능 분석이 이루어진 220 kW급 시스템에서 세 가지 부하추종 운전방법인 공급 연료량 제어(Case 1), 가변 회전수 제어(Case 2), 그리고 VIGV 제어(Case 3)에 따른 부분부하 성능특성을 비교 분석하였다.

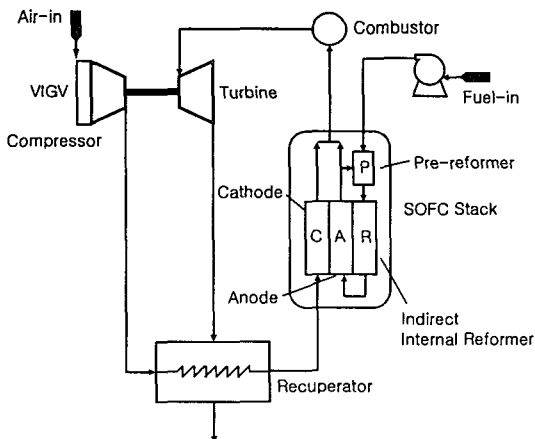


Fig. 1 Schematic configuration of a SOFC/GT hybrid power system

Table 1 Specification of a SOFC/GT hybrid system at a design-point condition⁽⁹⁾

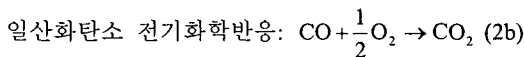
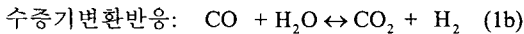
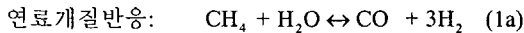
Hybrid System	Ambient conditions	15°C 1 atm
	System power	220 kW
SOFC	Steam-carbon ratio	2.5
	Fuel utilization factor	0.85
	Average current density	3200 A/m ²
	Fuel inlet temperature	15°C
GT	Pressure ratio	2.9
	Turbine inlet temperature	840°C
	Compressor efficiency	78%
	Turbine efficiency	82%
	Reciprocator effectiveness	89%

2. 시스템 구성 및 수학적 모델

Fig. 1과 Table 1은 본 연구에서 고찰하고자 하는 SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 구성도와 설계점에서의 주요 사양을 보여주고 있다. Fig. 1의 하이브리드 동력 시스템은 크게 재생(Recuperated) 가스터빈 사이클과 개질(Reforming)이 가능한 SOFC로 구성되어 있다.

공급된 연료(메탄)는 외부 개질기(Pre-reformer)와 내부 개질기(Indirect Internal Reformer)를 거쳐 SOFC에서의 전기화학반응이 가능한 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)로 개질되어 고체산화물 연료전지의 연료극(Anode)으로 공급된다. 반면에 대기로부터 공급된 공기는 압축기로부터 가압되어 열교환기(Recuperator)에서 터빈출구가스에 포함된 고열의 도움으로 가열된 상태에서 SOFC의 공기극(Cathode)으로 공급된다. SOFC 내부에서는 전기화학반응을 통하여 전력이 생산되고, 이 과정 중 발생한 열을 이용하여 내부 개질기에서의 개질반응을 활성화시키게 된다.

여기서 내·외부 개질기에서의 화학적 반응은 연료 개질반응과 수증기 변환반응으로써 개질을 위해서는 수증기의 공급이 필요한데, Fig. 1에서는 이를 외부에서 공급하는 대신 SOFC내에서의 수소의 전기화학반응을 통하여 생성된 물(수증기)을 재순환시키는 방식을 채택하였다. SOFC내부에서의 개질 반응과 전기화학반응 식들은 아래와 같다. 본 연구에서는 연료 개질 및 수증기 변환 반응으로 구성된 개질 반응이 이 평형상태에서 일어난다고 가정하였다.



대부분의 연료전지는 출구 부근에서의 연료 고갈에 따른 전압손실을 방지하기 위하여 공급 연료의 일부분(예를 들어 80%)만을 소모시키고, 나머지는 출구로 버리게 되는데, 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 SOFC출구에 설치된 연소기를 이용하여 SOFC로부터 버려지는 연료를 연소시켜 터빈에 공급되는 가스의 온도를 추가적으로 상승시키게 된다. 터빈에서의 팽창과정을 통하여 생성된 축동력 중 일부는 압축기 구동에 사용되고, 나머지

는 발전기를 거쳐 전력으로 변환된다. 터빈출구에서의 고온가스는 재생기에서 압축기를 통하여 공급된 공기를 예열시키는데 활용된다.

본 연구에서 고찰하고자 하는 하이브리드 동력 시스템은 Table 1에서와 같이 전체 출력이 220kW 급인 비교적 소형 시스템이며, 그 중에서도 가스터빈은 출력이 40kW인 마이크로 터빈으로서 원심형 압축기와 구심형 터빈으로 구성되어 있다.

연료전지의 출력과 효율은 아래의 식과 같이 정의된다.

$$\dot{W}_{FC} = V_c j A_c \quad (3)$$

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{m}_{\text{CH}_4} (\text{LHV})_{\text{CH}_4}} \quad (4)$$

여기서, 연료전지의 단위 반응면적(A_c) 당 전류로 정의되는 전류밀도(j)는 아래와 같이 전기화학 반응에 참여한 연료 유량의 함수로 표현할 수 있다.

$$j = 2F (\dot{z}_{\text{H}_2} + \dot{z}_{\text{CO}}) / A_c \quad (5)$$

셀 전압 V_c 는 개방회로전압과 전압손실의 차이이며, 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$V_c = V_{oc} - \Delta V_{loss} \quad (6)$$

여기서, ΔV_{loss} 는 연료전지에서 비가역적인 전압손실에 해당하는 활성화 손실, 저항손실, 농도손실 등의 전압손실의 합이다. 본 연구에서는 비교적 고 전류밀도 연료전지에서의 중요한 전압손실의 요인이 되는 농도 손실은 무시하였다.^(4,11)

$$\Delta V_{loss} = \Delta V_{act} + \Delta V_{ohm} \quad (7)$$

전해질과 전극의 접촉면에서 일어나는 전기화학 반응을 느리게 하는 주 요인이 되는 활성화 손실(ΔV_{act})은 연료극과 공기극에서의 활성화 손실의 합으로 표현할 수 있으며, 각 전극에서의 활성화 손실은 아래와 같이 Achenbach⁽¹²⁾에 의해 제안된 식을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{act} &= \Delta V_{act,a} + \Delta V_{act,c} \\ &= j r_c + j_{\text{H}_2} r_{a,\text{H}_2} = j r_c + j_{\text{CO}} r_{a,\text{CO}} \end{aligned} \quad (8a)$$

여기서,

$$\frac{1}{r_c} = \frac{4F}{RT} k_c \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right)^m \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \quad (8b)$$

$$\frac{1}{r_{a,H_2}} = \frac{2F}{RT} k_{a,H_2} \left(\frac{P_{H_2}}{P_0} \right)^m \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (8c)$$

$$\frac{1}{r_{a,CO}} = \frac{2F}{RT} k_{a,CO} \left(\frac{P_{CO}}{P_0} \right)^m \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (8d)$$

한편, 전자와 이온의 이동을 방해하는 전기저항으로 인해 발생하는 저항손실(ΔV_{ohm})은 다음과 같이 연료극, 공기극, 연결자(interconnector)에서의 전자이동에 따른 손실과 전해질에서의 이온이동에 의한 손실로 나타내어진다.

$$\Delta V_{ohm} = \Delta V_{ohm,a} + \Delta V_{ohm,c} + \Delta V_{ohm,e} + \Delta V_{ohm,int} \quad (9)$$

여기서, 각 부위에서의 전압손실 값은 해당 소재 및 형상 특성과 밀접한 관련이 있으며, 본 연구에서는 선행 연구⁽⁹⁾에서 적용한 수학적 모델을 활용하였다.

가스터빈의 출력이란 터빈을 통해서 생성된 출력 중 압축기 구동에 소모되는 동력을 제외한 잉여 출력으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{W}_{GT} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp} \quad (10)$$

위의 식 (3)과 (10)을 이용하여 SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 출력과 효율은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\dot{W}_{Hybrid} = \dot{W}_{FC} + \dot{W}_{GT} \quad (11)$$

$$\eta_{Hybrid} = \frac{\dot{W}_{Hybrid}}{\dot{m}_{CH_4} (LHV)_{CH_4}} \quad (12)$$

본 연구에서는 각종 부하추종 운전방법에 따른 시스템의 부분부하 성능특성을 위의 식들을 이용하여 해석적으로 분석하였으며, 이를 위해서 화학 공정 시스템 성능해석 전문 상용 프로그램인 Aspen Plus⁽¹³⁾를 기본으로 활용하였다.

3. 부분부하 성능특성 해석 결과

3.1 가스터빈 단독 운전 부분부하 성능특성

SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 성능특성을 분석하기에 앞서 가스터빈 및 SOFC의 단독 운전 시 성능특성에 대해서 먼저 고찰하였다. 가스터빈은 Fig. 1과 같이 구성된 전체 시스템에서 차지하는 출력의 비중이 SOFC에 비하여 상대적으로 낮지만, 부분부하 시 고유의 성능거동 특성으로 인하여 전체 시스템의 부분부하 특성을 제한하는 중요한 요인이 된다.

앞서 기술한 바와 같이 부하 변동에 따른 가스터빈의 운전방법은 공급 연료량 제어, 가변 회전수 제어, 그리고 VIGV 제어 방법 등이 있을 수 있다. 가스터빈의 출력은 공급 연료량에 비례하므로 운전 시 요구 부하가 감소하게 될 경우, 단순히 공급 연료량을 줄임으로써 출력을 감소시킬 수 있다. 그러나 이 경우 터빈입구온도의 감소로 인하여 가스터빈의 효율이 급격하게 떨어지게 되므로 부분부하 운전 영역에서 성능이 나빠지게 된다. 이를 방지하기 위해서는 공급 연료량을 줄임과 동시에 공급 공기량도 함께 줄임(이하 ‘공급 공기량 제어’라고 칭함)으로써 부하 변동 시의 공연비(Air-Fuel Ratio)를 가능하면 설계점 조건과 유사하게 유지시켜 터빈입구온도의 하락을 방지하여야 한다.

공급 공기량을 제어하는 가장 간단한 방법은 가스터빈의 회전수를 제어하는 방법이지만, 정속(Constant Speed) 운전이 필요한 대부분의 발전 설비의 특성상 이를 적용하는 데는 한계가 있을 수 있다. 공급 공기량 제어를 위한 또 다른 방법은 압축기 입구에 설치된 VIGV를 이용하는 방법으로써 대부분의 대형 가스터빈 발전 시스템에 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 대형 가스터빈의 축류 압축기에 적용되는 VIGV에 의한 압축기 성능 변화 관계식⁽¹⁴⁾을 소형 가스터빈에 주로 활용되는 원심형 압축기에 적용 가능하도록 수정하여 사용하였다. Fig. 2는 이를 적용하여 계산한 VIGV 각도에 따른 원심압축기 성능특성 결과로써 VIGV 각도가 변함에 따라 흡입 공기량의 변화에 따른 압력비와 압축기 효율이 심하게 변함을 알 수 있다.

Fig. 3은 가스터빈 단독 운전 시의 부분부하 성능특성을 나타내고 있다. 회전수가 고정된 상태에서 공급 연료량을 줄일 경우 터빈입구온도가 감소하면서 효율의 급격한 감소를 확인할 수 있다. 가변회전수 제어 방법은 공급 연료량 제어에 비해 넓은 부하영역에서도 높은 효율을 유지하고 있다.

VIGV 제어의 경우는 공급 연료량을 제어하는 경우보다 모든 부하 영역에서 효율이 높지만, 동일한 터빈입구온도를 유지하는 조건에서의 가변 회전수 제어보다는 낮음을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서와 같이 VIGV 작동에 따른 압축기 입구 속도 각의 변화에 의한 탈 설계 영역에서의 압축기 효율의 급격한 감소 때문이다. 그러나 VIGV 제어의 경우가 가변 회전수 제어보다 부분부하 영역에서 효율이 낮음에도 불구하고 MW급 이상의 가스터빈과 같이 가변 회전수 제어가 불가능한 경우에는 공급 연료량 제어보다 우수한 성능을 유지할 수 있는 유일한 대책이 될 수 있다.

3.2 SOFC 단독 운전 부분부하 성능특성

SOFC 단독 운전 시 부하추종 운전방법은 아래의 두 가지 경우를 고려할 수 있다.

(1) 공급 연료량 제어 방법

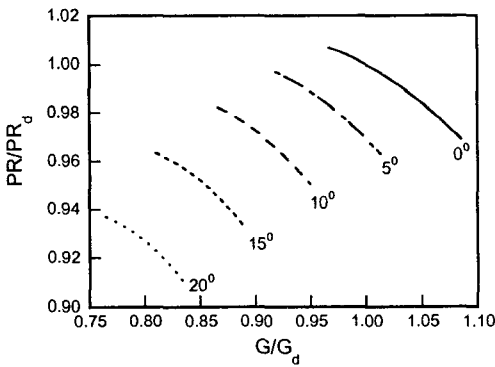
공급 공기량을 고정된 상태에서 연료 이용률을 일정하게 유지하면서 공급 연료량을 줄여 SOFC에서 반응하는 연료량을 감소시켜 출력을 줄이는 방

법이다. 이 경우에는 공급 공기유량이 일정한 상태에서 SOFC에서의 반응 연료량의 감소에 따른 반응 산소량의 감소로 산소 이용률이 줄어들기 때문에 과잉 공기량으로 인하여 셀 온도는 내려가게 된다. 이와 함께, 반응 연료량의 감소는 전류밀도의 감소로 이어지고 그로 인해 전압손실이 작아져 비가역적인 열 발생이 줄어드는 것 또한 셀 온도 저하에 영향을 미친다.

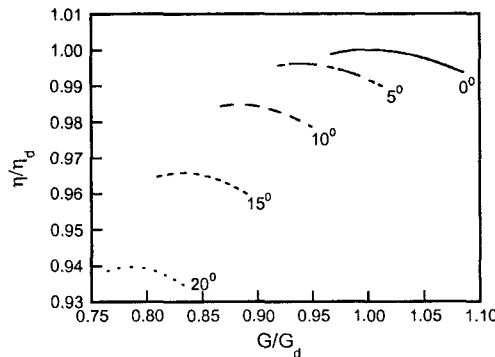
(2) 공급 공기량 제어 방법

공급 연료량을 줄이면서 산소 이용률을 일정하게 유지하는 상태로 공급 공기량을 함께 제어하는 방법으로써 SOFC에서의 과잉 공기량을 줄여 셀 온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 방법이다.

Fig. 4는 부분부하 운전 영역에서의 SOFC 단독 운전 시의 성능특성 결과를 보여 주고 있다. 셀 온도는 모든 부하 영역에서 공급 공기량 제어의 경우가 공급 연료량 제어보다 높으며, 전류 밀도는 반대로 공급 공기량 제어의 경우가 더 낮음을 알 수 있다. 그 결과 셀 전압이 공급 공기량 제어의 경우가 상대적으로 큼을 알 수 있는데, 이는

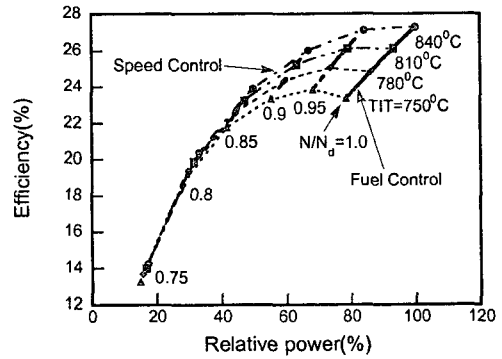


(a) Total pressure ratio

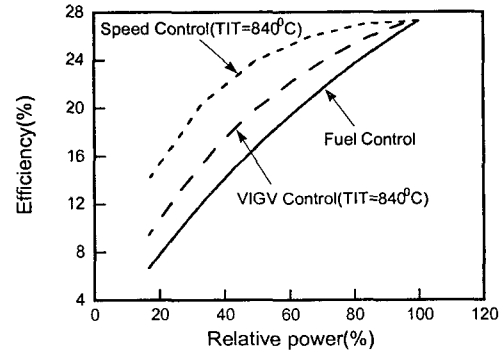


(b) Isentropic compressor efficiency

Fig. 2 Characteristics of the centrifugal compressor with various VIGV angles



(a) Fuel control and variable speed control modes



(b) Three different control modes

Fig. 3 Comparisons of the gas turbine performance with different operation modes

셀 온도가 높고 전류 밀도가 낮을수록 전압 손실량이 작아지는 연료전지의 일반적인 성능특성 때문이다. 특히, 공급 공기량 제어의 경우에는 부분부하 상태에서의 전압이 설계점 상태보다 큼을 알 수 있으며, 이러한 경향은 공급 공기량 제어의 경우 부분부하 상태에서 오히려 SOFC 효율이 상승하는 원인이 된다.

3.3 SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템 부분부하 성능특성

앞 절에서 기술한 가스터빈과 SOFC 단독 운전의 경우, 부분부하 상태에서의 부하추종 운전방법은 크게 나누어 공급 연료량을 제어하는 방법과 공급 연료량과 함께 공급 공기량을 함께 제어하는 방법으로 구분된다. 공급 공기량은 Fig. 1에서와 같이 하이브리드 동력 시스템 중 외부로부터 공기를 흡수하는 압축기에서 결정되므로 가스터빈에서의 공급 공기량 제어 방법이 전체 시스템의 공급 공기량을 지배하게 된다. 뿐만 아니라, 가스터빈에서의 공급 공기량의 변화는 SOFC에서의 산소 이용률의 제어 여부에도 직접적으로 영향을 미치게

되므로 SOFC성능을 지배하는 중요한 요인이 되기도 한다. 따라서 본 절에서는 하이브리드 동력 시스템의 부분부하 상태에서의 부하추종 운전방법을 가스터빈 단독 운전의 경우와 동일한 세 가지 방법에 대하여 고찰하였다.

Fig. 5는 세 가지 운전방법에 따른 SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 성능을 비교한 결과이다. 전반적으로 Fig. 3의 가스터빈 단독 운전의 경우보다 세 가지 경우 모두 효율이 월등히 상승되었음을 알 수 있다. 공급 연료량 제어에 따른 터빈입구 온도의 감소는 하이브리드 시스템의 경우에도 부분부하 운전 시 가장 심각한 성능 감소의 원인을 알 수 있다. 반면에 가변 회전수 제어의 경우에는 부분부하 운전 영역에서의 성능이 설계점 성능보다 향상됨을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 5(c)에서와 같이 공급 공기량과 연료량의 동시 제어에 따라 셀 온도가 상대적으로 높게 유지되면서 전류 밀도의 감소에 따른 셀 전압은 상승[Fig. 5(d)]하였기 때문이다. VIGV 제어 방법은 동일한 터빈입구 온도 조건에서의 가변 회전수 제어의 경우보다는 효율이 낮지만 공급 연료량 제어보다는 부분부하

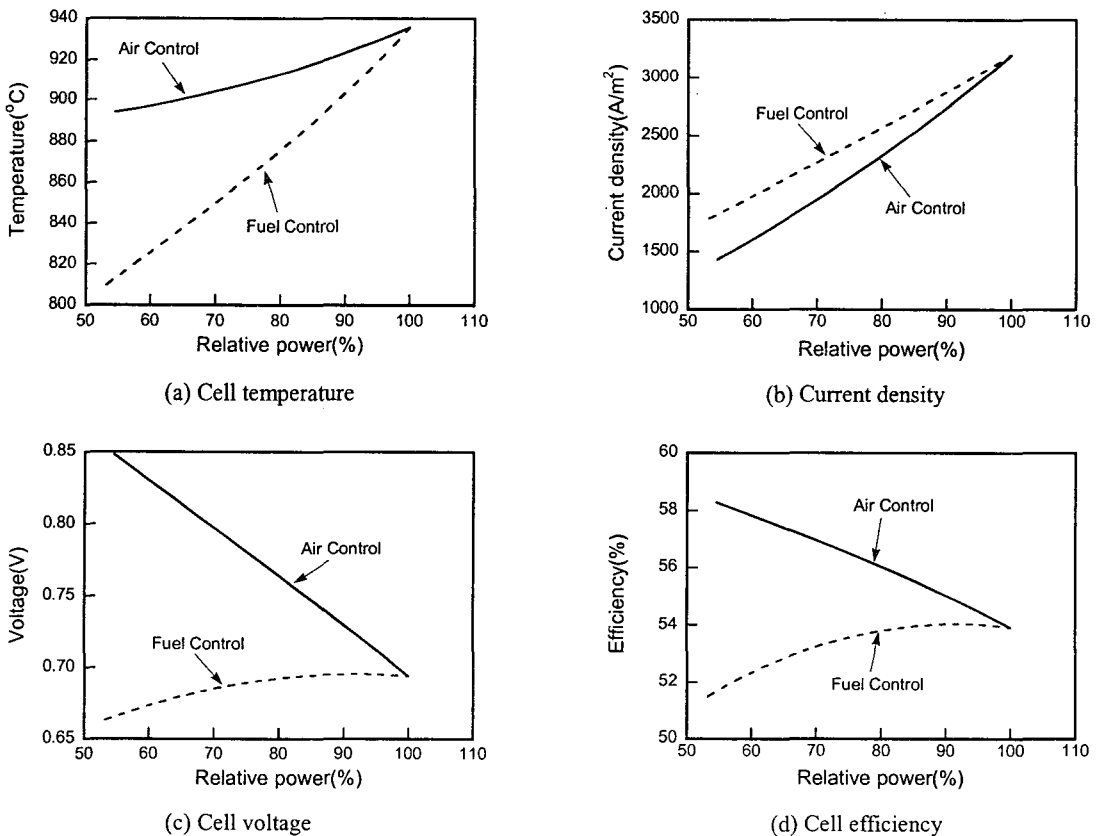
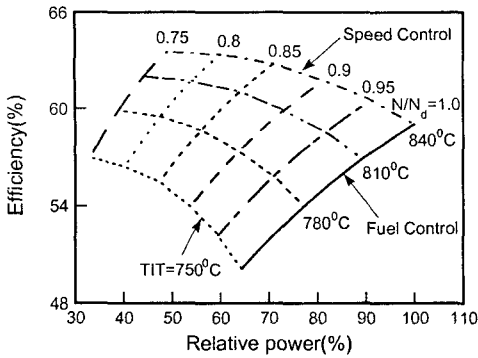
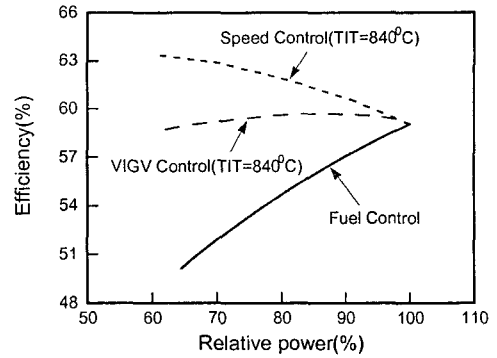


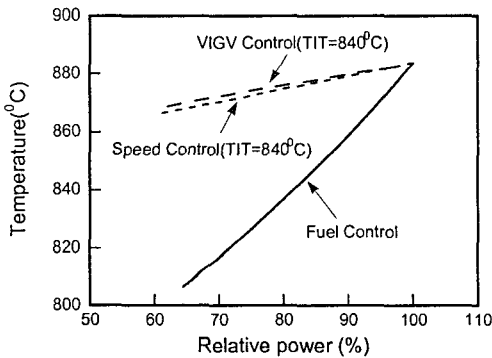
Fig. 4 Comparison of the SOFC performance with different operation modes



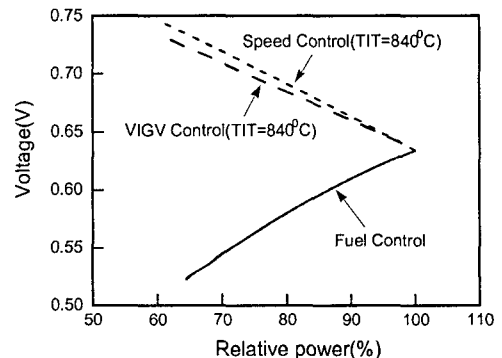
(a) Efficiency of fuel control and variable speed control modes



(b) Efficiency of hybrid system



(c) Cell temperature



(d) Cell voltage

Fig. 5 Comparisons of the SOFC/GT part-load performance with different operation modes

운전 시 우수한 성능을 확보할 수 있음을 볼 수 있다. 다만, 하이브리드 시스템의 경우에는 VIGV 제어 시에는 가변 회전수 제어에서와 같은 부분부하 상태에서 설계점보다 우수한 성능 확보는 불가능한데, 이는 VIGV에 의한 가스터빈 압축기 탈설계 운전 성능저하가 매우 심각하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

SOFC/GT 하이브리드 동력 시스템의 부하추종 운전방법에 따른 부분부하 성능특성을 해석적인 방법으로 고찰한 결과 다음과 같은 주요 결론들을 도출할 수 있었다.

- (1) 부분부하 운전 시 공급 연료량만을 제어하는 방법보다는 공급 공기량을 함께 제어하여 SOFC의 셀 온도와 가스터빈의 터빈입구온도를 높게 유지하는 것이 부분부하 성능 향상에 유리하다.
- (2) 공급 공기량을 제어하는 경우 가변 회전수 제어가 VIGV 제어의 경우보다 성능 향상 측면에서 유리하다. 특히, 가변 회전수 제어의 경우에는

SOFC에서의 일정한 공기 이용률의 유지에 따른 셀 온도의 감소량 축소와 이에 따른 전압의 상승으로 부분부하 영역에서의 성능이 설계점 성능보다 우수함을 알 수 있었다.

(3) VIGV 제어의 경우는 가변 회전수 제어보다는 부분부하 성능이 나쁘지만, 공급 연료량 제어의 경우보다는 훨씬 우수하다. 따라서, 가변 회전수 제어가 불가능한 MW급 이상의 가스터빈을 이용한 하이브리드 시스템에서의 부분부하 성능 향상을 위해서 충분히 적용 가능한 운전방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd., England.
- (2) George, R. A., 2000, "Status of Tubular SOFC Field Unit Demonstrations," *J. Power Sources*, Vol. 86, pp. 134~139.
- (3) Campanari, S., 1999, "Full-load and Part-load Performance Prediction for Integrated SOFC and Microturbine Systems," ASME Paper 99-GT-65.

- (4) Costamagna, P., Magistri, L. and Massardo, A. F., 2001, "Design and Part-Load Performance of a Hybrid System Based on a Solid Oxide Fuel Cell Reactor and Micro Gas Turbine," *J. Power Sources*, Vol. 96, pp. 352~368.
- (5) Palsson, J. and Selimovic, A., 2001, "Design and Off-design Predictions of a Combined SOFC and Gas Turbine System," ASME Paper 2001-GT-0379.
- (6) Kimijima, S. and Kasagi, N., 2002, "Performance Evaluation of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System," ASME Paper GT-2002-30111.
- (7) Chan, S. H., Ho, H. K. and Tian, Y., 2003, "Modeling for Part-load Operation of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid Power Plant," *J. Power Sources*, Vol. 114, pp. 213~227.
- (8) 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," ASME Paper 2000-GT-550.
- (9) 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," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 6, pp. 722~729.
- (10) Song, T. W., 2004, Performance Analysis of the SOFC-Gas Turbine Hybrid System with a Quasi-2D Model, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- (11) Bae, B. H., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2003, "Thermodynamic Modeling and Performance Analysis of a Power Generation System Based on the Solid Oxide Fuel Cell," ASME Paper FUELCELL2003-1735
- (12) Achenbach, E., 1994, "Three-Dimensional and Time-Dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," *J. Power Sources*, Vol. 49, pp. 333~348.
- (13) Aspen Plus™, User Guide, Aspen Technology Inc., 2001.
- (14) Kim, J. H., 2000, Analysis on Transient Behavior of Gas Turbines for Power Generation, Ph.D. Thesis, Seoul National University.