

고체산화물 연료전지/마이크로 가스터빈 하이브리드 시스템의 성능 해석

양진식¹⁾, 송태원²⁾, 김재훈³⁾, 손정락⁴⁾, 노승탁⁴⁾

Performance Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid System

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

Key words : Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), Micro Gas Turbine(마이크로 가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Power(출력), Efficiency(효율)

Abstract : Performance analysis of a solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid system is conducted at design-point and part-load conditions and its results are discussed in this study. With detailed considerations of the heat and mass transfer phenomena along various flow streams of the SOFC, the analysis based on a quasi-2D model reasonably predicts its performance at the design-point operating conditions. In case of part-load operations, performance of the hybrid system to three different operation modes(fuel only control, speed control, and VIGV control) is compared. It is found that the simultaneous control of both supplied fuel and air to the system with a variable MGT rotational speed mode is the optimum choice for the high performance operation. And then, the dynamic characteristics of a solid oxide fuel cell are briefly introduced.

Nomenclature

A : active area, m^2
 η : efficiency
 j : current density, A/m^2
 LHV : low heating value
 \dot{m} : mass flow rate, kg/s
 V : voltage, V
 \dot{W} : power, kW

Subscript

c : cell
 FC : fuel cell
 GT : gas turbine
 $Hybrid$: hybrid system

다. 그 중에서도 고체산화물 연료전지와 같은 고온형 연료전지의 경우 가스터빈과의 연계를 통해 추가적인 효율 상승을 도모할 수 있어 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드(SOFC/MGT) 시스템의 개발이 최근 들어 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾ 그 중에서도 Harvey 등⁽²⁾이 처음으로 연료전지와 가스터빈을 결합하는 하이브리드 시스템을 제안하였다. 그 후 Siemens-Westinghouse 사가 220 kW의 하이브리드 시스템 개발을 시작하여 현재는 상용화를 위한 필드 테스트를 진행 중에 있다.⁽³⁾

타 열기관과 마찬가지로 고체산화물 연료전지와 가스터빈도 주어진 사양에서의 작동 조건인 설계점에서 주로 운전되도록 개발되지만, 부하변동이 심할 경우 설계점을 벗어난 탈설계점에서의 운전이 불가피하다. 특히, 고온에서 작동하는 고

1. 서론

연료전지는 연료의 화학적 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 직접 에너지 변환시스템으로서 기존의 열기관보다 효율이 높고, 오염물질 배출이 적어 미래의 동력원으로 부각되고 있

1) 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 E-mail : indawn22@snu.ac.kr
 Tel : (02)880-7119 Fax : (02)883-0179
 2) 삼성중합기술원
 3) 현대자동차
 4) 서울대학교 기계항공공학부

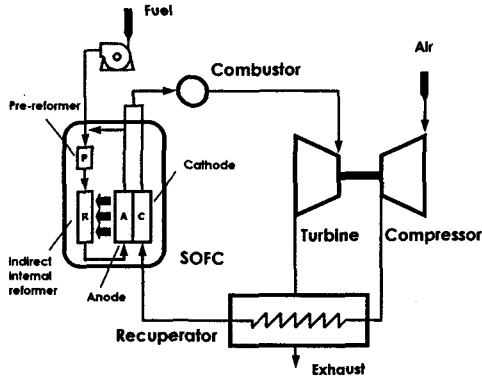


Fig. 1 Schematic diagram of a SOFC/MGT hybrid system

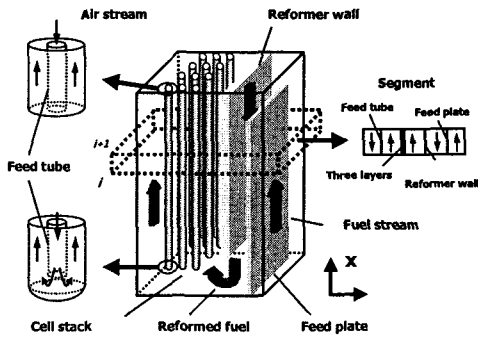


Fig. 2 Quasi-2D model of a solid oxide fuel cell

체산화물 연료전지의 경우 동적 성능 변화에 따른 작동 온도의 변화는 전해질 및 전극에서의 열피로에 의한 수명 저하의 주요 요인이 되고 있다.

본 연구에서는 준이차원 모델을 고려한 고체산화물 연료전지/마이크로 가스터빈 하이브리드 시스템의 설계점, 부분부하 성능 해석을 수행한다. 부분부하 성능 해석 시, 여러 가지 부하 추종 방법에 따른 부분 부하 성능 특성에 대해서 고찰하고, 고체산화물 연료전지의 동적 거동 특성에 대해서도 분석한다.

2. 시스템 구성 및 수학적 모델

Fig. 1과 Table 1은 본 연구에서 고찰하고자 하는 SOFC/MGT 하이브리드 시스템의 구성도와 설계점에서의 주요 사양을 보여주고 있다. Fig. 1의 하이브리드 시스템은 개질이 가능한 고체산화물 연료전지와 재생 가스터빈 사이클로 구성되어 있다. 연료(메탄)는 개질기를 거쳐 연료전지 스택에서 전기화학반응이 가능한 수소와 일산화탄소로 개질되어 연료극으로 공급되고, 공기는 가스터빈의 압축기를 거쳐 재생기에서 예열되어 연료전지

Table 1 Specification of a SOFC/MGT hybrid system at a design-point condition⁽⁴⁾

Hybrid System	Ambient conditions	
		15°C
	System power 220 kW	
SOFC	S/C ratio	2.5
	Fuel utilization factor	0.85
	Average current density	3200 A/m ²
	Fuel inlet temperature	15°C
MGT	Pressure ratio	2.9
	Turbine inlet temperature	840°C
	Compressor efficiency	78%
	Turbine efficiency	82%
	Recuperator effectiveness	89%

의 공기극으로 공급된다. 연료전지 내부에서는 전기화학반응을 통하여 전력이 생산되고, 이 과정에서 열이 발생하여 고온의 가스가 배출된다. 이 고온의 가스는 터빈으로 공급되어 발전기를 구동시켜 전력을 생산하는 열원이 된다.

하이브리드 시스템의 성능 해석을 위해서는 시스템을 구성하는 각 구성요소들이 적절하게 모델링 되어야 한다. Fig. 1의 마이크로 가스터빈은 단단의 원심형 압축기와 반경형 터빈으로 이루어져 있어 압축기와 터빈을 하나의 해석대상으로 간주하는 lumped 모델 방법의 적용이 가능하다. 고체산화물 연료전지도 가스터빈과 마찬가지로 lumped 모델로 간주하여 해석을 수행할 수 있으며, lumped 모델과 같은 일차원 모델로는 예측하기 힘든 연료전지 내부 현상을 예측하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 고체산화물 연료전지를 길이방향으로 나누고 각각의 나뉜 부분들(control volume)이 전기화학반응과 관련된 여러 물리화학적 반응들에 대해서 물질 및 에너지 보존을 만족하도록 하는 준이차원 모델을 도입할 수 있다.⁽⁴⁾ 준이차원 모델을 이용하면 좀더 구체적으로 연료전지 내부의 화학반응들을 모델링 할 수 있어 연료전지 내부 현상들을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 전체적인 시스템 성능 또한 보다 정확히 예측할 수 있다.

연료전지의 출력과 효율은 아래의 식으로 정의된다.

$$\dot{W}_{FC} = V_c j A_c \quad (1)$$

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC}}{\dot{m}_{CH_4} (LHV)_{CH_4}} \quad (2)$$

여기서, V_c 는 셀 전압을 나타내며, 개방회로 전압과 전압손실의 차이이다. j 는 연료전지의 전류밀도이고, A_c 는 연료전지의 반응면적이다. 가

Table 2 Predicted data of a SOFC/MGT hybrid system by the performance analysis at a design-point condition

Parameter	Siemens-Westinghouse ⁽¹⁾	Predicted data
Current density, A/m ²	3200	3200
Cell operating voltage, V	0.610	0.613
Pressure ratio	2.9	2.9
Air mass flow rate, kg/s	0.5897	0.5867
TIT, °C	840	840
SOFC DC power, kW	187	185.0
SOFC AC power, kW	176	175.7
GT AC power, kW	47	45.9
Net AC power, kW	220	220
System efficiency, %	57	60.2
Cell active area, m ²	96	94.3

*Bold characters are given values

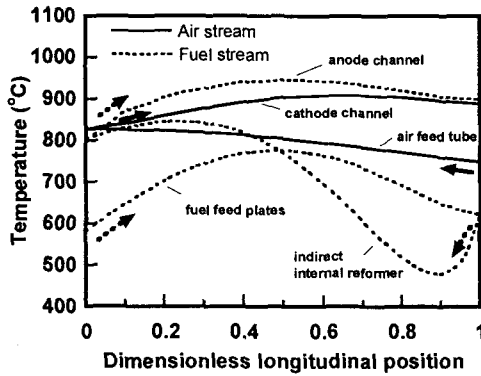


Fig. 3 Temperature distribution along flow streams in the SOFC module

스터빈에서의 출력을 포함한 하이브리드 시스템의 출력과 효율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

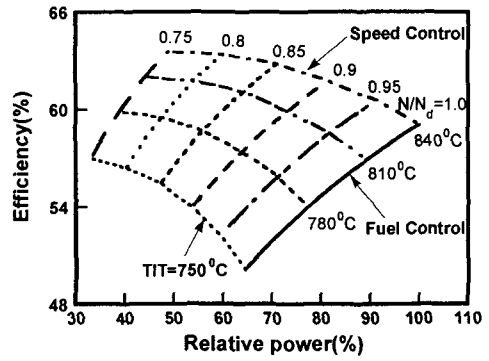
$$\dot{W}_{Hybrid} = \dot{W}_{FC} + \dot{W}_{GT} \quad (3)$$

$$\eta_{Hybrid} = \frac{\dot{W}_{Hybrid}}{\dot{m}_{CH_4} (LHV)_{CH_4}} \quad (4)$$

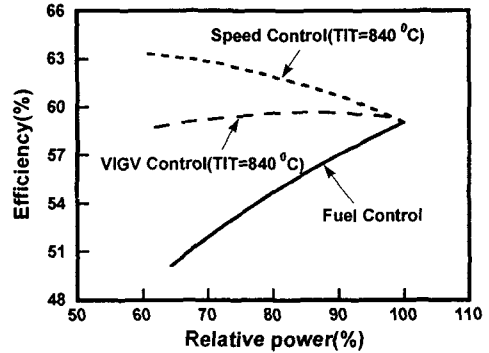
3. 결과 및 고찰

3.1 설계점 성능 해석 결과

SOFC/MGT 하이브리드 시스템의 설계점 성능 해석을 위해서는 연료전지에서 전기화학반응과 개질반응, 열 및 물질 전달현상을 정확히 모델링하는 것이 필수적이다. Fig. 3은 앞에서 설명한 것처럼 고체산화물 연료전지를 Fig. 2와 같은 준



(a) Fuel control and variable speed control modes



(b) Three different operation modes

Fig. 4 Comparisons of the SOFC/MGT part-load performance with different operation modes

이차원 모델을 사용한 연료전지 내부에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 연료극으로부터 공기극으로 열전달이 일어나기 때문에 공기는 유동 방향에 따라서 온도가 증가하게 된다. 반면에 연료극에서는 연료의 개질반응과 전기화학반응이 함께 일어나기 때문에 공기 흐름보다 연료의 흐름이 복잡하다. 연료의 개질반응은 흡열반응이고, 전기화학반응은 발열반응이므로 이 반응들의 영향에 따라 온도의 증감이 발생한다. 이렇게 예측된 연료전지의 온도는 하이브리드 시스템의 설계점에서의 성능 해석에 이용된다. Table 1의 설계점 조건을 기준으로 해석을 수행하여 예측된 결과를 Siemens-Westinghouse 사의 자료와 함께 Table 2에 나타내었다.

3.2 부분부하 성능 해석 결과

두 개의 서로 다른 시스템의 결합으로 인해 부분부하 운전 시 하이브리드 시스템의 성능 특성은 매우 복잡하다. 부분부하 조건에서 출력을 줄이기 위해서는 시스템에 공급된 연료의 양을 감소시켜야 한다. 반면에 시스템 성능을 고효율 상태로 유지하기 위해서는 연료전지의 온도 혹은 마이크로 가스스터빈의 터빈입구온도를 높게 유지

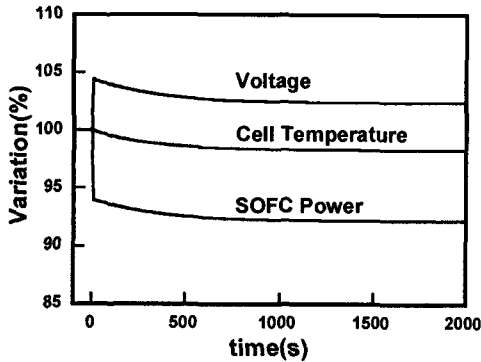


Fig. 5 Dynamic behavior of a SOFC with 10% stepwise load decrease

해야 한다. 따라서 공급된 연료량과 공기량이 동시에 적절하게 제어되어야 한다.⁽⁵⁾ 이러한 목적으로 본 연구에서는 부분부하 운전을 위해 공급 공기량 제어, VIGV 제어, 가변 회전수 제어 등의 세 가지 운전 방법들을 고려한다.

Fig. 4는 이러한 세 가지 운전 방법에 따른 SOFC/MGT 하이브리드 시스템의 성능을 비교한 결과이다. 공급 연료량 제어에 따른 터빈입구온도의 감소는 하이브리드 시스템의 성능 저하의 원인이 되고, 가변 회전수 제어는 부분부하 운전 영역에서의 성능이 설계점 성능보다 향상됨을 볼 수 있다. 이는 연료전지에 공급되는 공기량 조절로 인한 셀 온도와 셀 전압의 상승에 기인한 것이다. VIGV 제어는 가변 회전수 제어보다는 성능이 낮지만, 공급 연료량 제어 방법보다는 우수한 성능을 확보할 수 있는 방법이다.

3.3 고체산화물 연료전지의 동특성

시간에 따른 시스템의 동적 거동은 위에서 언급한 부분부하로 운전점에 도달할 때까지의 과정을 나타낸다. 하이브리드 시스템의 동적 거동은 연료전지와 가스터빈의 여러 운전 변수, 공급된 연료량, 공급된 공기량, 터빈입구온도, 연료이용률, 터빈 회전수 등에 따라 복잡하게 제어되어야 한다. 본 연구에서는 이에 앞서 기초적인 연구로 연료전지 시스템만의 동적 거동 특성을 먼저 살펴보았다. 고체산화물 연료전지만을 동적 성능 분석 대상으로 할 경우 그 거동 특성은 Fig. 5에 나타낸 것과 같은 경향을 보인다. 정상상태 운전 조건에서의 부하변동은 고체산화물 연료전지가 포함된 동력 시스템의 제어장치로부터 공급 연료의 제어로 이어진다는 가정 하에 부하변동을 공급 연료량의 변동으로 가정하였다. 이때, 공급 공기량은 일정하게 유지되며, 연료전지의 전류밀도는 공급 연료량에 비례하도록 제어하여 연료전지 내부에서의 연료이용률을 일정하도록 유지하였다. 공급 연료량을 정상상태에서 90%로 감소시

킬 경우 연료전지의 동특성은 Fig. 5에서 보는 것처럼 연료전지 온도의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 현재는 연료전지의 온도가 거의 정상상태에 도달하는데 1000초 이상이 소요되지만, PID 제어 등의 제어 로직을 도입한다면 좀더 짧은 시간에 정상상태에 도달할 수 있으리라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 고체산화물 연료전지/마이크로 가스터빈 하이브리드 시스템의 설계점, 부분부하 성능 특성을 차례로 분석하였다. 하이브리드 시스템의 부분부하 성능 해석을 수행함으로써 하이브리드 시스템 운전 시 터빈의 가변 회전수 제어 방법이 최적의 운전 방법임을 알 수 있었다. 또한, 부하변화에 따른 고체산화물 연료전지의 동특성을 파악함으로써 제어를 위한 기초 자료를 얻을 수 있었다. 앞으로는 하이브리드 시스템의 동특성을 파악하여 시간에 따른 적절한 제어 방법을 개발할 계획이다.

References

- [1] George, R. A., 2000, "Status of Tubular SOFC Field Unit Demonstrations," *J. Power Sources*, Vol. 86, pp. 134-139
- [2] Harvey, S. P. and Richter, H. J., 1994, "Gas Turbine Cycles with Solid Oxide Fuel Cells-Part I: Improved Gas Turbine Power Plant Efficiency by Use of Recycled Exhaust Gases and Fuel Cell Technology," *ASME J. Energy Resources Technology*, Vol. 116, pp. 305-311.
- [3] Veyo, S. E., Shockling, L. A., Dederer, J. T., Gillett, J. E. and Lundberg, W. L., 2002, "Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power Systems: Status," *ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, pp. 845-849.
- [4] Song, T. W., Sohn, J. L., Kim, J. H., Kim, T. S., Ro, S. T. and Suzuki, K., 2005, "Performance analysis of a tubular SOFC/MGT hybrid power system based on a quasi-2D model", *J. Power Sources*, Vol. 142, pp. 30-42.
- [5] Kim, J. H., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2005, "Analysis of the part-load operation of SOFC/MGT hybrid power system operating with variable inlet guide vanes," Submitted to *KSME Journal*.