

외부 개질형 평판형 고체 산화물 연료전지 시스템 구성법에 따른 효율특성

이강훈* · 우현탁* · 이상민** · 이영덕** · 강상규** · 안국영** · 유상석**†

* 충남대학교 기계공학과, ** 한국기계연구원

A Case Study of Different Configurations for the Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cells with External Reformers

Kang Hun Lee*, Hyun Tak Woo*, Sang Min Lee**, Young Duk Lee**, Sang Gyu Kang**, Kook Young Ahn** and Sang Seok Yu**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

** Korea Institute of Machinery and Materials

(Received November 9, 2011 ; Revised December 6, 2011 ; Accepted December 16, 2011)

Key Words: Solid Oxide Fuel Cell(고체 산화물 연료전지), Steam-to-Carbon Ratio(수증기/탄소의 몰비), Steam Reforming(수증기개질),

초록: 본 연구에서는 외부 개질기에 열원을 공급하기 위한 시스템 내에 가용한 열에너지의 활용 및 확보에 대한 해석을 위해서 외부 개질기를 연계한 평판형 SOFC 시스템의 해석 모델을 구축하고자 한다. 이러한 해석을 위한 모델 구축을 위해 Matlab simulink® 기반의 ThermoLib module을 사용하였으며, 구축된 해석 모델을 통하여 시스템의 성능 향상을 위한 구성 기법에 대해서 연구를 하였다. 시스템 구성 방법은 기존 시스템의 layout을 바꾸기 위해 공기극 출기가스 재순환 및 외부개질기와 촉매연소기를 통합한 개질반응시스템 적용, 개질기에 공급되는 혼합연료의 예열, 연료극 출기가스의 응축을 통한 연료 농도 향상 등을 고려하였다. 시뮬레이션의 해석 결과에서는 SOFC 시스템에 있어서 일반 연소기를 적용한 기존 시스템에 비하여 촉매 연소기를 사용한 시스템의 전기 효율이 12.13% 향상되었으며, 연료극 출기 가스를 응축시켜 버너로 연소시킨 시스템에서는 열효율이 76.12%로 가장 높았다.

Abstract: A planar solid oxide fuel cell (PSOFC) is studied in its application in a high-temperature stationary power plant. Even though PSOFCs with external reformers are designed for application from the distributed power source to the central power plant, such PSOFCs may sacrifice more system efficiency than internally reformed SOFCs. In this study, modeling of the PSOFC with an external reformer was developed to analyze the feasibility of thermal energy utilization for the external reformer. The PSOFC system model includes the stack, reformer, burner, heat exchanger, blower, pump, PID controller, 3-way valve, reactor, mixer, and steam separator. The model was developed under the Matlab/Simulink environment with ThermoLib® modules. The model was used to study the system performance according to its configuration. Three configurations of the SOFC system were selected for the comparison of the system performance. The system configuration considered the cathode recirculation, thermal sources for the external reformer, heat-up of operating gases, and condensate anode off-gas for the enhancement of the fuel concentration. The simulation results show that the magnitude of the electric efficiency of the PSOFC system for Case 2 is 12.13% higher than that for Case 1 (reference case), and the thermal efficiency of the PSOFC system for Case 3 is 76.12%, which is the highest of all the cases investigated.

- 기호설명 -

\dot{n} : 몰 유량(mol/s)

$\dot{Q}_{thermal}$: 배기가스로부터 얻은 열적 에너지(W)

J : 소요 전류량(A)

F : 페러데이 상수(C/mole)

N_{cell} : 적층 셀 수

U_f : 연료극 연료 이용률(%)

U_{air} : 공기극 공기 이용률(%)

P_{AC} : 교류전력(W)

P_{DC} : 직류전력(W)

LHV : 저위 발열량(kJ/kg)

† Corresponding Author, sangseok@cnu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 고체상의 세라믹을 전해질로 사용하여 600°C~1000°C의 고온에서 운전되는 연료전지로서 고효율 발전이 가능하다. 또한, 기존의 발전시스템에 비하여 SO_x와 NO_x, CO₂의 배출량을 현저히 감소시킬 수 있어 친환경적인 저공해 발전이 가능하며, 연료전지의 사용연료를 다양화할 수 있는 장점을 가진다.⁽⁶⁾ 더욱이 전기화학반응의 산물인 고온의 배기가스는 열병합발전(Combined Heat and Power System)의 가능성을 제공해 주고 있으며 이러한 SOFC는 모듈형 발전설비가 가능하여 대량생산이 가능하고 설치 장소 제약이 적기 때문에 전력이 필요한 수요지에 발전소 구축이 가능하다.⁽⁵⁾

SOFC는 전 세계적으로 아직 초기 개발단계이고 실증 수준의 연구가 진행되고 있기 때문에, 문헌상의 자료가 희박할 뿐 아니라, 개발된 시스템의 경우에도 대부분 자세한 자료가 보고되고 있지 않다. SOFC 시스템의 상용화를 위해서는 기초 구성요소부터 모듈, 그리고 시스템에 이르기까지 다양한 분야에서 활발한 연구가 필요하며 특히 시스템 수준의 연구가 실제 시스템의 최종 효율을 결정하고 열병합발전 등 시스템 다양화를 통해 에너지 효율을 극대화 할 수 있기 때문에 이러한 부분에 대한 연구가 매우 중요하다. 최근에는 SOFC 시스템 분야에 대해서 해석 위주의 연구가 진행되고 있으며, 주로 가스터빈 하이브리드에 대한 연구가 진행되었다.^(7,8)

시스템의 동적 거동은 부하 운전 시 특히 중요한 요소이며 동적 거동의 분석을 통해 시스템 운전 전략을 결정할 수 있을 뿐 아니라 단위 구성품인 스택 및 보기계통(Balance of Plant, BOP)의 응답 특성을 이해함으로써 단위 구성품의 설계 자료로 활용 할 수 있다. 대부분의 시스템 관련 해석 연구는 주로 설계점 해석 위주의 정적 거동 해석으로 진행되고 있는 반면, 시스템의 운전과 관련된 발전용 연료전지의 동적 거동과 관련된 연구는 몇몇 선도기관에 의한 연구 내용만이 보고되고 있다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 분산발전용으로 적용이 가능한 대용량 평판형 SOFC 스택과 외부 개질기를 포함하는 시스템에 대한 동특성 모델을 개발하고자

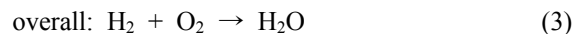
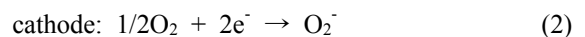
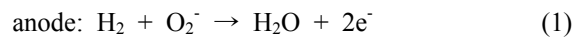
한다. 시스템 동특성을 확인할 수 있는 모델은 EuTech[®]에서 제공하는 Simulink[®] 라이브러리인 ThermoLib Module을 이용하며, 시스템 모델은 스택과 BOP를 포함하여 구성하고, 제어 밸브를 이용해 동적 거동에 대한 응답 특성을 확인할 수 있도록 모델을 구성하고자 한다. 구성된 모델을 이용하여 150kW급 SOFC 시스템 레이아웃에 따른 효율 영향을 비교하고자 하며, 특히 시스템의 경제성 확보를 위한 구성품 요구사항을 검토하고자 한다.

2. 연료전지 시스템 모델

2.1 고체 산화물 연료전지 모델

산소이온 전도체를 이용하는 SOFC는 공기극과 연료극의 산소 분압 차에 의해 공기극에서 전해질을 통해 연료극으로 산소이온이 이동하게 되며, 이때 화학반응의 균형을 맞추기 위해 외부 회로를 통해 연료극의 전자가 공기극로 이동하게 된다. 외부회로를 통해 전자가 이동하기 때문에 부하를 조절하여 원하는 전류를 얻는다. 평판형 SOFC는 원통형이나 평판 일체형에 비해 높은 성능과 전류의 흐름이 구성요소의 면에 수직 방향으로 흐르기 때문에 높은 전력밀도를 보유하고 있다. 또한 개질기와 연동된 SOFC 시스템에서 Braun⁽³⁾는 외부 개질형 SOFC가 내부 개질형 SOFC에 비하여 스택 효율면에서 높은 성능을 보임을 밝혔다.

SOFC 스택 양단의 화학 반응은 다음과 같다.⁽¹⁾



스택 모델은 라이브러리에서 제공하는 모델을 이용해, SOFC의 특징이 반영될 수 있도록 출구단의 열수지 균형을 맞추었으며, 연료극에서 최종 반응물인 증기가 배출이 될 수 있도록 구성하였다.

또한, 외부개질형인 관계로 전기화학반응에 의해 발생하는 폐열은 공기극의 과잉 공기유를 이용해 제어되도록 하였다. 모델에서는 SOFC 스택은 평판형, 운전압력은 1.5bar으로 설정하였고, I-V 커브는 Braun⁽³⁾이 제안한 전압곡선을 따르며 Fig. 1과 같다.

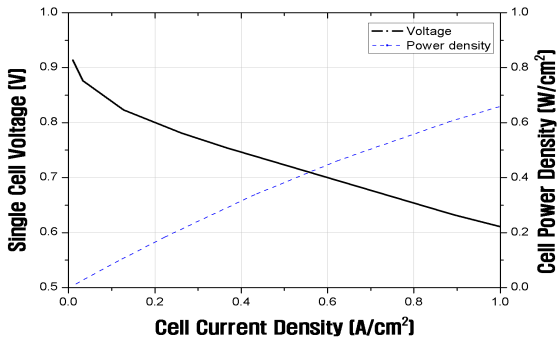


Fig. 1 Voltage-current performance of Solid Oxide Fuel Cell operating at 800°C

2.2 개질기 모델

개질기 모델은 수증기-메탄 개질법(Steam Methane Reforming, SMR)을 가정한 대향류형 평형 반응기 모델을 사용하였다. 개질 반응 시 평형반응 온도는 700°C~800°C의 온도에서 통합 반응기 시스템의 평형이 고려되어 정해지도록 모델링하였다.

개질 반응기 모델에서는 연소기로부터 개질기로, 그리고 개질기 내부 충전층으로 전달되는 열 전달량을 계산하기 위해서 열전달 계수가 중요하며, 이를 계산하기 위한 충전층 반응기(packed bed)에서의 유효 열전달계수는 Dixon과 Cresswell이 제안한 상관 관계식을 통해 이론적으로 계산되어졌다.⁽¹⁰⁾ 또한 반응 온도에 따라 기체 혼합물이 있는 연소층 및 개질층의 유효 열전달 계수는 Ghang⁽²⁾에 의해 연구되었고 Fig. 2와 같다. 이를 통해 개질 반응기 모델의 총합 열전달 계수를 150W/m²K로 설정하였다.

본 연구에서는 수증기 개질반응시스템에 필요한 열원을 효과적으로 공급하면서 SOFC 시스템의 효율 향상 및 경제성을 확보할 수 있는 방안을 도출하기 위해, 개질기에 필요한 열 공급을 일반 연소기를 이용하는 경우와 촉매연소기를 이용하는 경우에 대해 모델링을 구성하고 특성을 비교하였다.

연소기에 공급되는 공기는 연료전지 공기극으로부터 나오는 공기를 재순환시켜 공급하였고 촉매연소기의 반응온도는 촉매의 내구성을 고려하여 850°C~900°C에서 운전되도록 하였다. 일반연소기의 경우, 모델링 방법은 촉매연소기와 동일하나, 연소 최고 온도가 1300°C~1500°C로 유지될 수 있도록 연소기로 공급되는 공기의 유량을 조

Table 1 Amount of fuel energy to be supplied to externally reformed SOFC system

Methane (kW)	Reformer	332
	Burner	133
Steam (mol/s)	Reformer	1.243
SOFC stack (kW)	Hydrogen	334
SOFC system (kW)	465	

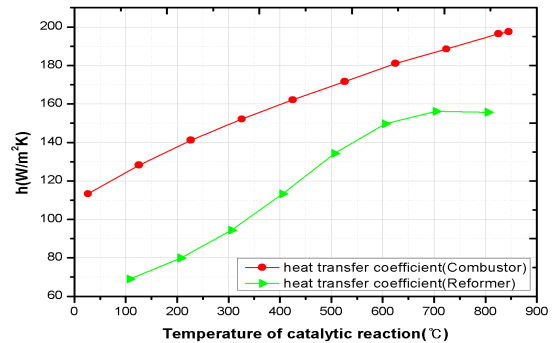


Fig. 2 Prediction of heat transfer coefficient in catalytic reformer and combustor reactor

절하였다.

촉매연소기 모델은 연료전지의 연료극 출구 가스 성분 중 메탄과 수소, 일산화탄소가 이산화탄소 및 수증기로 모두 전환되는 이상적인 모델로 가정하였고 메탄과 수소, 일산화탄소를 연소시키는 각각의 반응기를 직렬로 연결하여 일련의 연소가 진행되는 것으로 모사하였다.

시스템 전체로 볼 때 수증기 개질기 반응기로 유입되는 연료인 메탄(CH₄)과 수증기(H₂O)의 양은 시스템 운전 동력 요구에 의해 결정되어야 하며, 이를 결정하기 위해서는 정격 운전에 필요한 수소의 양이 식 (4)에 의해 먼저 계산되어야 한다. SOFC 시스템 내로 공급되는 연료량은 Table 1과 같다.

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{J}{2F} \times N_{cell} \times \frac{1}{U_f} \tag{4}$$

2.3 연소기 모델

연료전지의 연료극 출구 가스에는 개질과정 및 연료전지 반응에서 발생하는 다량의 H₂O와 CO₂

를 포함하고 있어 연료성분의 농도가 매우 낮아지게 된다. 따라서 연료극 미반응 연료를 완전 연소 시키기 위해서 희박조건에서도 반응성이 뛰어난 촉매연소기의 사용을 선호한다.⁽²⁾

2.4 보조기기 모델

시스템 내에 개질기와 연소기를 제외한 BOP 모델은 열교환기, 혼합기, 3-Way Valve, PID 제어기, 펌프, blower, 기수분리기(steam separator) 등을 이용하여 구성하였다. 열교환기 모델은 대향류형 열교환기로, 열교환이 이루어지는 동안 주변과의 열교환은 없다고 가정하였다. 혼합기 모델 역시 두 유체가 혼합되는 동안 압력강화는 무시하였으며, 열역학 1법칙에 의해 혼합기체의 온도와 압력조건이 결정되도록 되어 있다. 3-Way Valve는 Manual 또는 PID 제어기로부터 Position 값을 입력받아 들어오는 유체를 2방향 나누어서 각각의 유체 유량을 다르게 조절할 수 있는 모델이다. 그리고 PID 제어기 모델은 연료전지의 공기극으로 유입되는 공기의 온도가 일정하도록 제어하며 펌프 및 blower 모델은 연료 및 공기 등 시스템에 필요한 유체를 공급하게 된다. 기수분리기 모델은 응축된 연료전지의 연료극 출구 가스에 포함된 수분을 제거하는 모델이며 통상 범용 기수분리기의 수분 제거율을 고려하여, 제거율은 80%로 설정하였다.

3. 시스템 해석방법 및 구성

3.1 해석방법

시스템의 순 전력 출력은 스택에서 생산되는 전력량 중 BOP소모 기생전력을 차감하고, DC전력을 AC로 변환하는 데 소요되는 효율을 고려하여 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$P_{\text{net}} = [P_{\text{gross}} - \sum P_{\text{BOP}}] \times \eta_{\text{inverter}} \quad (5)$$

각 구성 시스템의 전기효율은 시스템으로 투입되는 전체 연료량과 시스템으로부터 나오는 순 전력 출력량 관계를 이용해 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$\eta_{\text{sys, elec}} = \frac{P_{\text{AC, net}}}{(\dot{n}_{\text{fuel}} \times \text{LHV}_{\text{fuel}})_{\text{sys, in}}} \quad (6)$$

Table 2 Simulation parameters of SOFC system

Parameter	Value
SOFC Stack	
SOFC stack size (cells)	2105
Electroactive area (cm ²)	250
Current density (A/cm ²)	0.38
Cell voltage (V)	0.75
Power density (W/cm ²)	0.285
SOFC fuel utilization (%)	75
SOFC air utilization (%)	13.1
Operating cell temperature (°C)	800
Cathode air temperature rise (°C)	160
Reforming	
Steam-to-carbon ratio	3
Reforming temperature (°C)	800
BOP	
Air blower efficiency (%)	70
Pump efficiency (%)	65
Steam separator efficiency(%)	80
Inverter efficiency (%)	95
Fuel	
Fuel type	CH ₄
LHV(lower heating value, kJ/kg)	50010

시스템의 열병합 효율은 전기효율 결정에 사용된 순 전력 출력량과 열 출력을 이용해 식 (7)과 같이 정의하였다. Table 2에는 계산에 사용된 각종 파라미터를 정리하였으며, \dot{Q}_{thermal} 은 SOFC 시스템의 최종 배기단의 배기가스를 130°C로 고정하고, 배기단 전에 전환 가능한 열에너지와의 온도차를 이용하여 계산하였다.

$$\eta_{\text{sys, CHP}} = \frac{P_{\text{AC, net}} + \dot{Q}_{\text{thermal}}}{(\dot{n}_{\text{fuel}} \times \text{LHV}_{\text{fuel}})_{\text{sys, in}}} \quad (7)$$

Figure 3의 Case 1은 기준시스템으로써 전력 생산부인 SOFC 스택, 연료변환용 개질기, 열원 공급을 위한 버너 및 촉매 연소기, 열교환기, PID제어기, 3-Way 밸브, 혼합기, 공기블로워, 물펌프, 전력변환용 인버터로 구성하였다. 개질기에 공급되는 연료는 상온의 물이 연소기(Burner)의 배가스와 열교환을 통해 증발된 수증기와 혼합되어 개질반응기에 유입된다. 개질반응시스템에서는

연소기를 통해 개질 반응에 필요한 열을 공급하였으며 외부개질기에서 생성된 H₂가 SOFC 스택으로 공급된다. 공기극에 유입되는 공기의 양은 식 (8)에 의해 정의되며 연료전지의 공기극에서의 온도 상승은 160℃로 가정하였다. 스택에 유입되는 공기의 온도 제어는 공기극 입구와 출구 가스의 열교환량을 피드백 제어를 통해 조절하였다. SOFC 스택에서는 공급된 연료(H₂)가 전기화학 반응에 의해서 전력이 생산된다. 구성된 시스템 내에서 연료극 출구 가스 및 연소기 배가스를 통하여 열을 회수하였다.

Figure 4에 제시된 Case 2에서는 기준시스템 (Case 1)에서 촉매 연소기와 외부 개질기를 통합하여 개질에 필요한 열원을 공급하였으며 이를 통해 별도의 연소기(Burner)에 공급되는 연료의 양을 최소화시킴으로써 시스템 효율을 향상 여부를 보고자 한다.

통상 촉매연소기를 사용하는 것이 연료극 출구의 회박 미연 연료의 연소에 유리하다는 것이 알려져 있지만, 촉매연소기 후단의 연소 배가스 온도의 상승이 제한적이기 폐열의 활용도도 떨어지게 된다. Fig. 5의 Case 3에서는 이러한 폐열의 활용도를 높이기 위해 기존의 촉매연소기대신 범용성 연소기를 사용하는 방법에 의해 어떤 이득이 있는지를 보기 위한 시스템 레이아웃을 구성하였다. 연료전지 연료극 출구 가스에서 일부 열을 회수 한 후 기수분리기(Steam separator)를 통해 포함된 수분을 제거하여 화염 연소기(Burner)를 통해 연소가 가능한 수준으로 연료혼합물의 가연한계를 확장시킨 후 이를 연소시켜 개질 반응에 필요한 열을 공급하도록 하였다. 이를 통하여 연료극 출구 가스를 연소시키는 촉매 연소기를 사용한 Case 2와 시스템 효율 향상 여부를 비교하고자 하였다.

$$\text{Air Usage: } \dot{n}_{O_2} = \frac{J}{4F \times 0.21} \times N_{\text{cell}} \times \frac{1}{U_{\text{air}}} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

외부 개질형 SOFC 시스템 해석에 대한 결과와 관련된 각종 파라미터와 출력은 Table 3에 나타내었다.

Case 1(기준 시스템)에서는 시스템 내에 공급되는 전체 연료 중에 71.4%는 수증기와 혼합되어

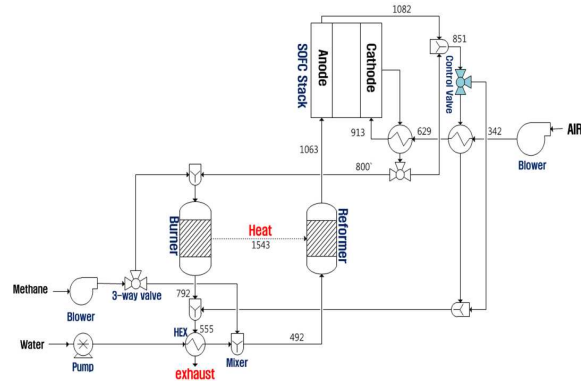


Fig. 3 Case 1 SOFC system: Reference system

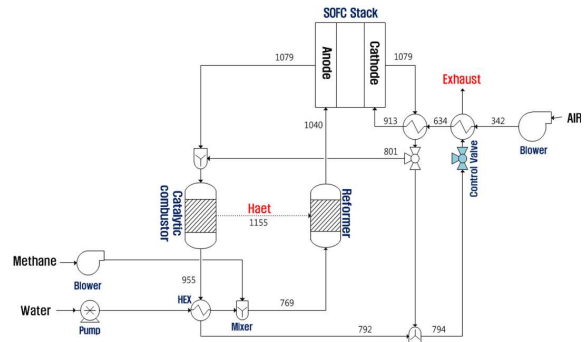


Fig. 4 Case 2 SOFC system: External reformer integrated with catalytic combustor

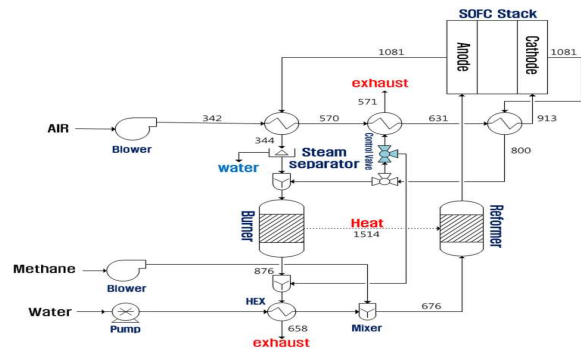


Fig. 5 Case 3 SOFC system: External reformer with water separator, and conventional burner

개질기에 공급되고 연료변환과정을 거쳐 SOFC 스택으로 H₂를 공급하였으며, 28.6%의 연료는 연소기(Burner)에 공급되어 개질에 필요한 열원을 공급하기 위한 수단으로 사용되었다. 개질기에 열원을 공급하고 나온 연소기의 배기가스를 이용하여 상온의 물을 증발시키고 수증기-연료 혼합물의 온도를 높이기 위해 사용되었다. 또한 연료전지 출구 가스를 통하여 공기극에 공급되는 공기를 예열하는데 사용하였다. 이러한 시스템의 전기효율은 25.46%를 나타내었다.

Case 2는 촉매연소기와 외부 개질기를 통합하여

개질반응시스템을 구성함으로써 외부 연소기(Burner)에 공급되는 추가 연료량을 줄일 수 있었고, 개질기에 열원을 공급하고 배출되는 촉매연소기의 다량의 배기가스를 시스템 내에서 사용하고자 하였다. 그 결과 시스템의 전기효율이 12.13% 향상되었다.

Case 3는 기존 시스템에서 외부 연소기(Burner)에 공급되는 추가연료량을 줄이기 위해 연료전지의 연료극 출구가스 중 미반응 연료를 사용하였고 시스템 내에 배기가스를 통해 필요한 열원을 충분히 회수함으로써 촉매연소기를 적용한 Case 2의 경우와 같은 전기 효율을 나타냈으며 열효율은 76.12%로 가장 높았다. 본 연구에서는 시스템 구성의 목표 전력이 150kW이기 때문에, 열활용에 초점을 맞추어 레이아웃을 구성하였고, Case 3의 경우 열효율을 향상 시킬 수 있음을 확인하였으며, 본 시스템을 MW급까지 대형화시키는 것이 가능하다는 전제하에서는, 배기가스의 폐열을 이용해 증기터빈이나 가스터빈을 이용한 추가적인 발전도 기대할 수 있다. 이를 통해 추가적인 전력 상승도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 도표로 정리하면 Fig. 6과 같다. 그림에서 보여지듯이, 동일한 전기효율을 가지는 Case 2와 Case 3의 경우에 있어 가용 열출력을 포함 시킬 경우, 연료전지 연료극 출구의 미연연료의 수분을 제거한 후 일반 연소기를 사용하는 Case 3가 더 효율이 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 해석 결과 중 효율과 연관되는 주요 파라미터를 정리하였다.

모든 시스템으로 150kW의 출력을 생산하기 위한 연료가 공급되며 이 중 외부로부터 추가의 연료량이 공급되는 Case 1은 시스템으로 공급되는 연료가 가장 많았으며 이에 따라서 블로워의 소비전력이 가장 높았다. 또한, 가용적인 열에너지 확보에서는 촉매연소기의 사용으로 다량의 연소 배가스가 배출되는 Case 2가 기존 시스템에 비해 높았으며 연료극 출구가스를 응축시킴으로써 추가의 열을 확보한 Case 3가 가용한 열출력이 가장 높았다.

Fig. 8은 Case 3 시스템의 운전 부하를 100%, 75%, 50%, 25%로 줄여감에 따른 전기효율과 열 효율의 변화를 보여주는 결과이다. 시스템의 부하를 낮추어 운전할수록 전기효율이 증가하였으며, 25%의 경우 전기효율이 다소 감소함을 보였다. 이에 비하여 열효율은 부하를 낮추어 운전할수록 감소하였고 25%일 때 65.7%로 급격히 감소되는 것을 알 수 있었다.

Table 3 Results of performance comparison of different SOFC system configurations

	Case 1	Case 2	Case 3
Cathode off-Gas recirculation	○	○	○
Heating up steam-methane mixture	○	○	○
Excess Air(λ)	2.7	8	2.5
Combustor out temperature(K)	1543	1155	1514
Anode inlet temperature(K)	1063	1040	1056
cathode inlet temperature(K)	913	913	913
cathode outlet temperature(K)	1082	1079	1081
exhaust gas temperature(K)	408	405	406
Fuel supply(CH ₄) (kg/hr)	33.49	23.92	23.92
(W)	465253	332324	332324
SOFC stack power(DC)(W)	150000	150000	150000
Water pump(W)	1.722	1.722	1.722
Cathode Air blower(W)	24500	24500	24500
Fuel blower(W)	802.3	584.7	584.1
Power consume of BOPs(W)	25304	25086	25085
Thermal Power(W)	56200	86110	134300
Net Power(DC)(W)	124696	124914	124913
Efficiency of Inverter(%)	95	95	95
Net Power(AC)(W)	118461	118668	118667
System electric efficiency(%)	25.46	37.59	37.59
CHP efficiency(%)	37.54	61.62	76.12

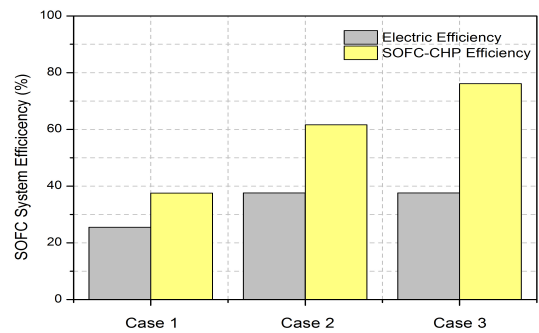


Fig. 6 Comparison of electric and SOFC-CHP efficiency about SOFC system configurations

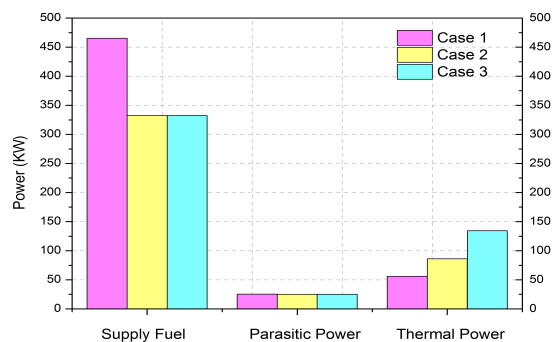


Fig. 7 Comparison of parameter associated with SOFC system efficiency

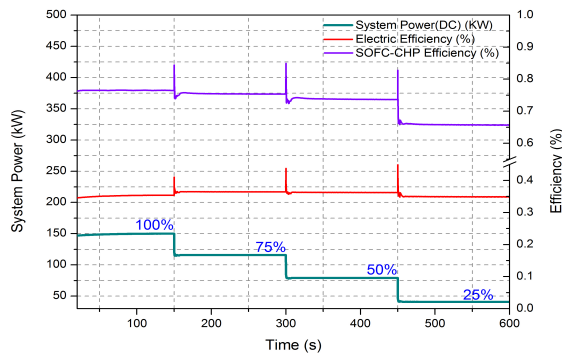


Fig. 8 Variation of Case 3 system of power and efficiency according to system load

4. 결론

외부 개질형 평판형 SOFC 시스템의 구성에 있어 열원 공급을 위한 연소기의 선택방법에 따라 각각의 효율을 비교하고 평가함으로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 외부 개질방식을 채택하는 고체산화물 연료전지 시스템에 있어서 개질기에 열원 공급을 위한 별도의 연소기(Burner)를 사용할 경우 추가공급연료량으로 인해 25.46%의 전기 효율을 나타내며 배열 활용 측면에서도 가장 낮은 효율을 보였다. 이러한 점을 보완하기 위한 Case 2 및 Case 3에서는 시스템으로의 추가공급연료량을 줄임으로써 전기 효율을 Case 1대비 12.13% 향상시켰다.

(2) 기준 시스템(Case 1)의 효율 향상을 위해 촉매 연소기와 외부 개질기를 통합한 개질반응시스템을 적용함으로써, 시스템으로 공급되는 연료량을 최소화시킬 수 있었으며 열효율은 61.62%를 나타내었다.

(3) Case 3과 같이 연료극 출구가스 중 수증기를 응축시켜 연료 농도를 향상시킨 경우에는 응축열을 추가로 활용할 뿐만 아니라, 시스템으로부터 배출되는 배가스의 온도가 높기 때문에 열효율이 Case 2보다 14.5% 향상된다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 주요사업의 지원으로 수행되었으며 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, Fuel Cell Systems

Explained 2nd Edition, John Wiley & Son, Inc.

- (2) Gang, T. G., Yu, S. S., Kim, Y. M. and Ahn, G. Y., 2010, "Experimental Study of Steam Reforming Assisted by Catalytic Combustion in Concentric Annular Reactor," *Trans of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 4, pp. 375~381.
- (3) Costamagna, P., Selimovic, A., Borghi, M. D. and Agnew, G., 2004, "Electrochemical Model of the Integrated Planar Solid Oxide Fuel Cell (IP-SOFC)," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 102, pp. 61~69.
- (4) Braun, R. J., Klein, S. A. and Reindl, D. T., 2006, "Evaluation of System Configuration for Solid Oxide Fuel Cell-Based Micro-Combined Heat and Power Generators in Residential Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 1290~1305.
- (5) Petruzzi, L., Cocchi, S. and Fineschi, F., 2003, "A Global Thermo-Electrochemical Model for SOFC Systems Design and Engineering," *Journal of Power Sources*, Vol. 118, pp. 96~107.
- (6) Komatsu, Y., Kimijima, S. and Szmyd, J. S., 2010, "Performance Analysis for the Part-Load Operation of a Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine Hybrid System," *Energy*, Vol. 35, pp. 982~988.
- (7) Cocco, D. and Tola, V., 2006, "SOFC-MGT Hybrid Power Plants Fuelled by Methane and Methanol," *ASME*, Vol. 1, Paper No. ESDA2006-95482, PP. 137~147.
- (8) Liese, E. A. and Gemmen, R. S., 2005, "Performance Comparison of Internal Reforming Against External Reforming in a Solid Oxide Fuel Cell, Gas Turbine Hybrid System," *ASME*, Vol. 127, Issue. 1, pp. 86~90.
- (9) Yang, W. J., Kim, T. S., Kim, J. H., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2005, "Comparative Performance Assessment of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Systems Considering Various Design Options," *ASME*, Vol. 5, Paper No. GT2005-68533, pp. 241~251.
- (10) Hayes, R. E. and Kolaczkowski, S. T., 1997, "Introduction to Catalytic Combustion," pp. 401~422.
- (11) Bae, B. H., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2002, "Thermodynamic Performance Analysis of the Solid

- Oxide Fuel Cell System Including Reformer," *KSME*, Symposium.
- (12) Mario, L. F., Eric, L., David, T., Larry, L., Alberto, T. and Aristide, F. M., 2007, "Transient Modeling of the NETL Hybrid Fuel Cell/Gas Turbine Facility and Experimental Validation," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol 129, Issue 4, pp. 1012~1019.