〈 논문 〉

셀 입구 예열방법에 따른 가압형 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 성능 비교 해석

양원준* · 김동섭† · 김재환**

(2004년 12월 27일 접수, 2005년 5월 11일 심사완료)

Comparative Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems Considering Different Cell Inlet Preheating Methods

Won Jun Yang, Tong Seop Kim and Jae Hwan Kim

Key Words : Efficiency(효율), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Preheating (예열), Reforming(개질), SOFC(고체산화물 연료전지)

Abstract

Design analysis of the solid oxide fuel cell and gas turbine combined power system is performed considering different methods for preheating cell inlet air. The purpose of air preheating is to keep the temperature difference between cell inlet and outlet within a practical design range thus to reduce thermal stress inside the cell. Three different methods considered are (1) adopting a burner in front of the cell, (2) adopting a preheater (heat transfer from the main combustor) in front of the cell and (3) using recirculation of the cathode exit gas. For each configuration, analyses are carried out for two values of allowable maximum cell temperature difference. Performance characteristics of all cases are compared and design limitations are discussed. Relaxation of the cell temperature difference (larger difference) is proved to ensure higher efficiency. Recirculation of the cathode exit gas exhibits better performance than other methods and this advantage becomes more prominent as the constraint of the cell temperature difference becomes more severe (smaller temperature difference).

기호설명

ER : 외부개질
F : Faraday 상수 [96,486 Coulomb/mol]
FC : 연료전지
FCT : 연료전지 작동온도 [℃]
GT : 가스터빈
HX : 열교환기
$\bar{h}$: 단위 몰당 엔탈피 [kJ/kmol]
IR : 내부개질
LHV : 저위발열량 [kJ/kg]
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
$\dot{n}$: 몰유량 [kmol/s]
PWR : 출력비 [연료전지/가스터빈]
$\dot{Q}$: 열전달율 [kW]
SCR : 증기/연료 비
TIT : 터빈입구온도 [℃]
ΔT_{cell} : 셀 입출구 온도차 [℃]
U_f : 연료이용률
V : 전압 [V]
$\dot{W}$: 출력 [kW]

그리스 문자

η : 효율

하첨자

a : 공기
AC : 교류전류

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

aux : 보조장치
DC : 직류전류
f : 연료
gen : 발전기
HS : 하이브리드 시스템
i : 각 가스 성분
inv : 인버터
P : 생성물
R : 반응물
sh : 가스터빈 출력축

1. 서 론

최근 전 세계적인 에너지 절약과 환경규제 강화로 인하여 고효율이며 친환경적인 에너지 시스템에 대한 요구가 그 어느 때보다 높아졌다. 이에 따라 다양한 에너지 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 주요에너지 소비 분야인 발전설비 분야에서는 연료전지가 크게 주목 받고 있다. 뿐만 아니라 최근에는 연료전지에 가스터빈을 결합하여 시너지 효과를 얻을 수 있는 하이브리드 시스템에 대한 연구가 수행되기 시작하였다. 하이브리드 시스템을 구성하기 위해서는 작동온도가 높은 고온형 연료전지인 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC)와 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)가 적합하다. 특히 최근에는 3 세대 연료전지인 SOFC 에 대한 다양한 연구와 함께 분산발전에 대한 관심으로 수십 kW 급의 마이크로 가스터빈과 SOFC 를 결합한 하이브리드 시스템에 대한 연구가 선진국을 중심으로 이루어지고 있다.[1,2] 현재까지 개발된 SOFC/가스터빈 하이브리드 시스템 중에서는 Siemens-Westinghouse 사의 시스템이 상용화에 가장 근접해 있으며 60% 정도의 목표 열효율을 갖는 것으로 알려져 있다.[3,4] 이 외에도 더욱 저렴하게 SOFC 및 하이브리드 시스템을 상용화하려는 노력도 이루어 지고 있다.[5] 국내에서도 단기적 성능목표는 낮으나 궁극적으로 소형이면서 고효율의 하이브리드 시스템 개발을 위한 과제[6]가 진행 중이다.

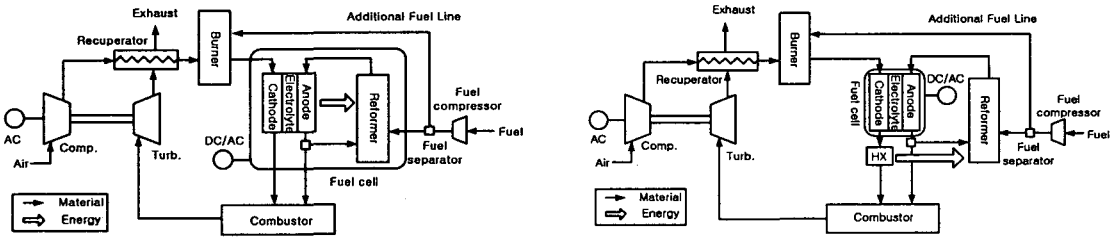
서로 다른 두 시스템을 결합하는 하이브리드 시스템은 주요 구성부의 결합방법에 따라 다양한 구성이 가능하다. 특히, 하이브리드 시스템은 수소를 얻기 위한 개질과정에 필요한 개질열과 연료전지의 셀 반응에 필요한 온도까지 셀을 예열하는 방법에 따라 다양한 설계가 가능하다. 이중 가장 많이 사용하는 수증기 개질(steam reforming)의 경우에 개질열 공급방법은 크게 외부개질(external reforming)과 내부개질(internal reforming)로 나뉘는데 개질 방식 및 시스템에서 이를 어떻게 사용하느냐가 하이브리드 시스템의 성능에 지대한 영향을 미치게 된다.[7,8] 또한 시스템 구성 시 고려해야 할 요소인 셀 작동온도 제한, 셀에서의 과도한 응력 발생을 억제하기 위한 셀 입출구 온도차이의 제한 및 터빈입구온도의 제한 등이 성능에 큰 영향을 미치며, 더욱이 이러한 제한 요소가 미치는 영향의 정도는 개질방법에 따라 다르게 나타남이 알려진 바 있다.[9] 이번 연구에서는 설계 제한요소인 연료전지의 작동온도와 셀 입출구 온도차를 고려하여 다양한 셀 예열방법으로 설계하였을 때 각 구성방법에 따른 설계 특성을 알아 보고 성능을 분석하는 것을 목적으로 한다. 선행연구[8,9]의 개질열 공급방법에 바탕을 두고, 대표적인 외부개질과 내부개질방법을 대상으로 하였다.

2. 시스템 구성

2.1 시스템 개요

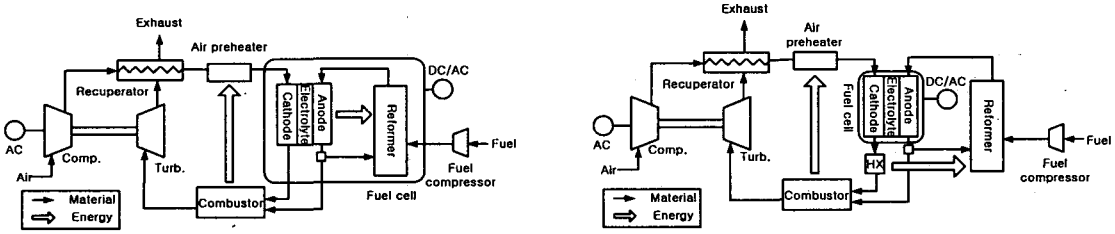
본 연구의 대상인 가압형 하이브리드 시스템은 압축기를 통해 가압된 공기와 연료가 연료전지에서 반응하고, 연료전지 공기극 출구 가스와 연료극에서 미 반응한 연료가 연소기에서 연소한 뒤 가스터빈을 구동하는 시스템이다. 연료전지 반응에 필요한 수소는 수증기 개질법을 이용하여 얻는다. 수증기 개질법은 흡열반응으로써 개질반응에 필요한 열을 공급 받아야 하는데 구체적인 열공급 방법은 내부개질과 외부개질에 따라 다르다. 연료전지 내부에 개질기가 위치한 내부개질의 경우는 발열반응인 연료전지 셀 반응에서 발생되는 열을 직접 이용한다. 연료전지 밖에 개질기가 위치한 외부개질의 경우는 다양한 개질열 공급방법이 있으나 이번 연구에서는 본 연구진이 선행 연구한 결과 가장 성능이 높게 예측된 방법을 사용하였다. 즉, 연료전지 공기극에서 나온 고온의 공기를 열교환하여 개질에 필요한 열을 공급하는 방법[8]을 고려하였다. 또한 개질반응에 필요한 수증기는 내부와 외부개질 모두 수증기를 충분히 함유한 연료극 가스를 재순환(anode gas recirculation)하는 방법을 통하여 공급한다.

연료전지에서 반응한 후 나온 고온의 가스는 터빈을 구동하고 다시 재생기(recuperator)를 거쳐 셀 입구 온도를 올리는데 이용된다. 셀 입구를 예열하는 이유는 셀 반응에 필요한 셀 입구 온도 제한조건과 셀 입출구 온도차 증가로 발생되는 셀 내부의 열응력에 의한 셀 수명의 영향을 고려하였기 때문이다.[10] 그러나 대체로 셀 입구 온도는 재생기를 이용한 1 차 셀 입구 예열방법으로 필요한 셀 입구 온도까지 상승시키지 못한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 2 차적인 셀 입구 공기 예열방법을 적용하여 시스템의 성능특성 비교 해석한다. 사용한 방법은 세가지로서 연료전지 앞에 버너를 이용하여 직접 예열하는 방법(Config. 1), 주연소기의 열을 전달받는 재생기를 통하여 예열하는 방법(Config. 2) 그리고 공기극을 통해 나가는 고온의 가스를 재순환하여 셀 입구를 예열하는 방법(Config. 3) 등이다. 시스템의 구성도는 Fig. 1~3 에 나타내었으며 개질방법에 따라 내부개질과 외부개



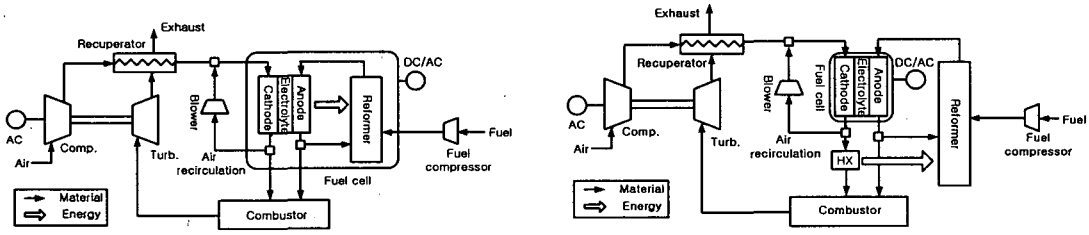
(a) Internal reforming (b) External reforming

Fig. 1 Hybrid system adopting a burner for preheating cell inlet air (Config. 1)



(a) Internal reforming (b) External reforming

Fig. 2 Hybrid system adopting a preheater for preheating cell inlet air (Config. 2)



(a) Internal reforming (b) External reforming

Fig. 3 Hybrid system adopting recirculation of the cathode exit gas for preheating cell inlet air (Config. 3)

질로 구분하였다. 셀 입출구의 허용 가능한 최대 온도차는 100, 200°C 두 가지로 하여 해석함으로써 제한 요소의 심각성에 따른 영향을 분석하고자 한다.

2.2 버너를 이용한 직접 예열(Config. 1)

재생기를 통해 1 차 예열된 공기를 필요한 온도까지 한번 더 예열하기 위하여 셀 입구에 버너를 설치하고 추가의 연료를 공급하여 공기를 2 차 예열한 시스템이다. 이 시스템의 내부와 외부개질에 따른 구성도는 Fig. 1 과 같다. 내부와 외부개질의 기본적인 전열 방법 및 공기극 재순환 방법은 2.1 절에 설명한 시스템을 적용하며 아래의 나머지 두 가지 시스템 형태에도 동일하게 적용된다.

2.3 연소기의 열교환을 통해 예열(Config. 2)

이 시스템은 추가의 연료를 공급하지 않고 연소기 일부의 열을 공기 예열기를 통해 열교환하여 필요한 셀 입구 온도까지 예열하는 방법이다. 시스템 구성도는 Fig. 2와 같으며 이 시스템의 내부개질방법은 상용화에 가장 근접한 Siemens-Westinghouse사의 시스템[3,4]과 유사하다.

2.4 공기극 공기 재순환을 통해 예열(Config. 3)

공기극 출구 가스 온도가 충분히 높다는 점을 이용하여 추가의 연료를 공급하지 않고 공기극 출구의 공기를 재순환시켜 입구 공기를 2 차 예열하는 방법이다. 구성도는 Fig. 3 에 나타내었다.

3. 해석방법

시스템 성능 해석은 화학반응을 포함한 열시스템 해석이 가능한 상용프로그램[11]을 사용하였다. 연료는 메탄(CH_4)을 사용하며 개질기에서 연료의 1차, 2차 개질반응을 거쳐 수소를 얻는다. 메탄 1몰이 완전 반응을 거친다고 가정하면, 아래와 같이 4몰의 수소가 발생하여 연료극에 공급된다.

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

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

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

그러나 실제로 반응률은 반응조건에 의존하므로 반응온도와 압력의 함수로 이를 결정하는 평형반응(equilibrium reaction)을 고려하였다. 개질반응은 흡열반응으로써 다음과 같은 에너지식이 적용된다. R 과 P 는 각각 반응물과 생성물을 의미한다.

$$\sum_R \dot{n}_i \overline{h}_i + \dot{Q} = \sum_P \dot{n}_i \overline{h}_i \text{, 여기서 } \dot{Q} > 0 \tag{4}$$

연료개질을 위하여 공급되는 수증기의 양은 다음 식으로 정의되는 수증기/연료비(steam carbon ratio, SCR)에 따라 정하여진다.

$$SCR = \frac{\dot{n}_{H_2O,supplied}}{\dot{n}_{CH_4}} \tag{5}$$

셀에서는 공기극으로 공급된 공기 중 산소만 이온화되고 이온화된 산소는 전해질을 통해 연료극으로 이동하여 수소 및 개질기에서 개질되지 않고 남은 일산화탄소와 반응한다. 이때 발생된 전자가 공기극으로 이동하면서 전류를 발생시킨다. 수소를 기준으로 한 반응식은 다음과 같다.

$$\text{Anode} \quad : \quad H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^- \tag{6}$$

$$\text{Cathode} \quad : \quad \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-} \tag{7}$$

$$\text{Overall} \quad : \quad H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{Electricity} \tag{8}$$

개질반응에서 생성된 일산화탄소도 연료로 사용되어 수소처럼 1몰당 2몰의 전자가 이동된다.

한편, 식 (8)에 의해 생성된 수소가 모두 산소와 반응하는 것이 아니고 일부는 반응 후 남게 된다. 이를 결정하는 설계 파라미터가 연료이용률(utilization factor, Uf)로서 본 연구에서는 다음과 같이 정의한다.

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2,reacted} + \dot{n}_{CO,reacted}}{\dot{n}_{H_2,supplied} + \dot{n}_{CO,supplied}} \tag{9}$$

연료이용률을 제한하는 이유는 이 값이 너무 높은 경우에는 셀 말단부에서 연료가 희박해져 셀의 전압 손실이 커질 가능성이 있기 때문이다.[12]

셀 반응에서 에너지 보존식은 식 (10)으로 표현된다. 다른 구성부와 마찬가지로 셀도 하나의 검사체적으로서 해석하였으므로 셀의 출구온도가 셀의 작동온도를 의미하고 이 반응식으로부터 구할 수 있다. $\dot{Q}$ 는 외부개질기를 사용하는 경우에는 존재하지 않으며, 내부개질기를 사용하는 경우에는 개질기로 전달되는 열량이다.

$$\sum_R \dot{n}_i \overline{h}_i + \dot{Q} = \sum_P \dot{n}_i \overline{h}_i + W_{FC,DC}$$

여기서 내부개질 : $\dot{Q} < 0$

외부개질 : $\dot{Q} = 0$ (10)

셀 반응으로 발생되는 셀 전압은 셀의 작동온도에 대한 영향을 고려하였다. 국내에서 1차 목표로 개발 중인 하이브리드 시스템의 설계값인 작동온도 800℃, 압력비 3.5에서 셀 전압 0.7V를 기준으로 하며,[6,8] 셀 작동온도가 높아지면 일반적으로 셀 전압이 증가하므로 이러한 현상을 정량적으로 예측하는 상관식[13]을 참고하여 온도의 함수를 만들어 사용하였다. 셀 작동온도 800~1000℃에서 셀 전압이 0.7~0.81V 사이에서 변하게 하였다.

연료전지와 가스터빈의 출력, 출력비 및 하이브리드 출력과 효율은 다음 식 (11)~(15)로 정의한다.

$$\dot{W}_{FC,AC} = 2(\dot{n}_{H_2,\text{reacted}} + \dot{n}_{CO,\text{reacted}}) \times F \times V \times \eta_{inv} \quad (11)$$

$$\dot{W}_{GT,AC} = \dot{W}_{GT,sh} \times \eta_{gen} - \dot{W}_{aux} \quad (12)$$

$$PWR = \frac{\dot{W}_{FC,AC}}{\dot{W}_{GT,AC}} \quad (13)$$

$$\dot{W}_{HS} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} \quad (14)$$

$$\eta_{HS} = \frac{\dot{W}_{GT,AC} + \dot{W}_{FC,AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_f} \quad (15)$$

기타 주요 파라미터는 Table 1에 나타내었다. 공기유량은 모든 경우에 압축기 입구에서 1kg/s로 동일하게 두었다.

4. 해석결과

셀 입출구 온도차(ΔT_{cell})를 100℃로 제한하였을 때의 결과를 먼저 분석하고, 이어서 200℃로 완화한 경우에 대하여 분석한다. Fig. 4에 ΔT_{cell} 이 100℃인 경우에 세가지 셀 입구 예열방법에 따른 성능을 나타내었다. 연료전지의 작동온도 범위를 800~1000℃로 두고 TIT, 출력비, 출력 그리고 효율 변화를 나타내었다. 연료전지의 작동온도가 증가할수록 모든 경우에서 TIT는 증가한다. 연료전지 작동온도가 증가하면 터빈에 공급되는 가스의 온도도 증가하기 때문이다. 예열방법에 따라 비교하면 Config. 1인 셀 입구 버너에서 직접 예열하는 방법은 다른 시스템 형태와 달리 열교환이나 재순환으로 열회수를 하지 않으므로 대체로 높은 TIT를 갖는다. 또 연료전지 출구 가스를 열교환하여

Table 1 Reference design parameters

Ambient condition	15℃, 101.3 kPa
Air flow rate	1 kg/s
Fuel	Methane
GT parameters	
Pressure ratio	3.5
Compressor efficiency	78 %
Turbine efficiency	85 %
Recuperator effectiveness	83 %
Fuel Cell parameters	
Cell Voltage	0.7~0.81V @ 800~1000℃
Fuel utilization factor	0.7
Steam/Carbon ratio	3
Inverter efficiency	93 %

개질열을 공급하는 외부개질 시스템보다 내부개질 시스템이 터빈에 고온의 가스를 공급하므로 TIT가 더 높다. 연소기를 통해 공기 예열기로 예열하는 방법 중 외부개질방법(Config. 2- ER)은 셀 입구 예열과 개질열을 모두 공기극의 출구가스의 열교환으로 공급한다. 따라서 터빈 입구에 충분한 양의 고온의 가스를 공급하지 못해 TIT가 매우 낮아지므로 시스템 설계가 불가능하다. 이 방법은 추후 설명할 셀 온도차 200℃ 조건에서도 설계가 불가능한 것으로 해석되었다. 따라서 각 경우의 성능을 나타낸 Fig. 4와 Fig. 5에는 Config. 2의 외부개질 시스템에 대한 해석은 나타내지 않았다. 이러한 시스템이 설계 가능하기 위해서는 터빈 입구 연소기에 추가의 연료를 공급하여 TIT를 높여야 가능하다. 그러나 선행연구 결과[9]를 참조하면 연료전지에 공급되는 연료 이외에 연소기에 직접 공급되는 연료량이 증가할수록 시스템의 성능은 낮아질 것으로 예상된다.

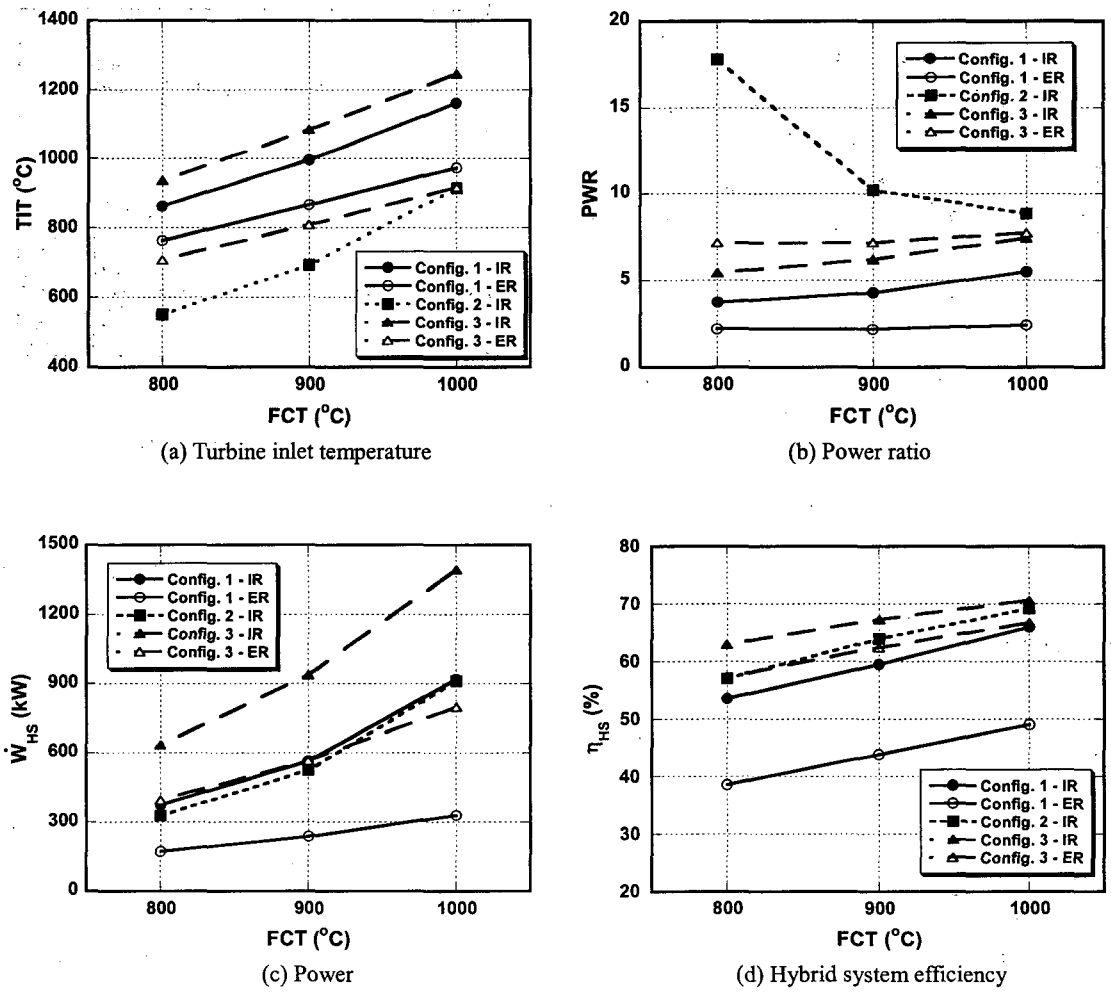
출력비는 FCT가 증가해도 크게 증가하지 않는데 이는 FCT 증가로 셀 전압이 증가하여 연료전지의 출력이 높아지지만 TIT 증가로 인해 가스터빈의 출력도 그만큼 증가하기 때문이다. Config. 2의 내부개질 방법의 경우 800~900℃의 FCT에서는 TIT가 낮아서 상대적으로 연료전지의 출력이 가스터빈의 출력보다 크기 때문에 출력비가 크다. Config. 3의 공기극 공기 재순환 방법을 사용하면 셀의 공기극으로 공급되는 공기의 유량이 증가하게 된다. 이로 인해서 원하는 FCT를 얻기 위해서 연료 고급 유량도 증가해야 하며, 결과적으로 연료전지의 출력이 커지게 된다. 공급 연료 유량이 커지면 연료전지 출구에서 남는 연료량, 즉 연소기에서의 연료량도 증가하여 TIT가 높아진다. 이

는 터빈출력을 증가시키는 요인이다. Config. 3의 출력비는 Config.1 과 Config. 2의 중간 정도이다.

FCT가 증가함에 따라 TIT도 함께 증가하고, 이에 따라 하이브리드 시스템의 성능이 향상되어 출력은 높아진다. 또한, Config. 1과 2보다는 Config. 3이 앞서 설명한 바와 같이 셀로 공급되는 연료량이 더 커서 더 높은 출력이 가능하다. 물론 이 경우에는 단위 셀의 설계 기술이 동일하다면 재순환하는 공기 유량이 큰 만큼 연료전지의 셀 반응 면적, 즉 사이즈를 크게 설계해야 할 것이다.

효율은 개질열을 셀 내부에서 직접 공급하여 자연적인 셀 냉각효과를 가지는 내부개질방법이 상대적으로 더 많은 공기를 공급해 주어야 하는 외부개질 방법보다 높다. 셀 입구 예열방법에 따라 비교하면 열교환을 통해 열회수를 하는 Config. 2가 직접 예열하는 Config. 1보다 효율이 높고 공기극 재순환 방법인 Config. 3이 Config. 2보다도 더 높게 나타났다.

Fig. 5는 ΔT_{cell}의 제한을 200℃로 완화한 경우의 시스템 성능을 나타낸 것이다. FCT가 동일하면 ΔT_{cell}이 증가할수록 더 많은 연료가 셀에서 반응하므로 연료전지의 출력은 증가하고 이로 인해 시스템의 효율도 증가한다. 물론, 온도차가 커질수록 열응력이 증가하는 단점이 있으나, 기존 연구[7,10]를 바탕으로 유추할 때 이 정도 온도차는 가능할 것으로 판단된다.



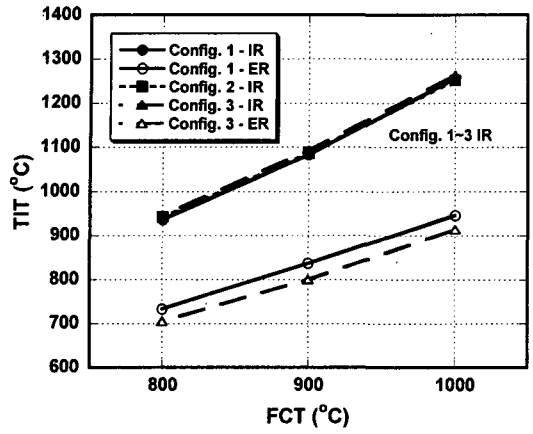
(a) Turbine inlet temperature

(b) Power ratio

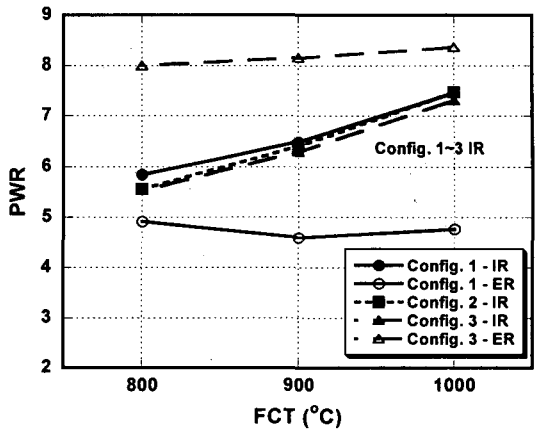
(c) Power

(d) Hybrid system efficiency

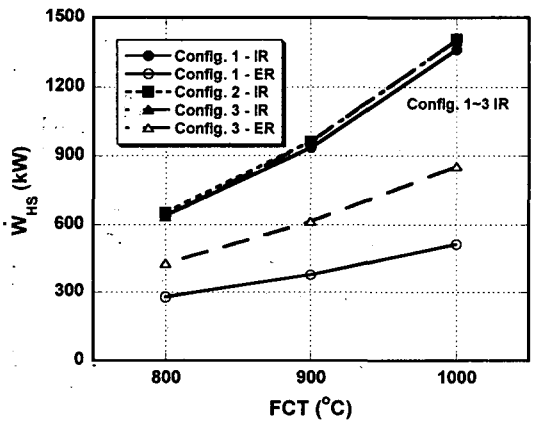
Fig. 4 Performance results for maximum ΔT_{cell} of 100℃



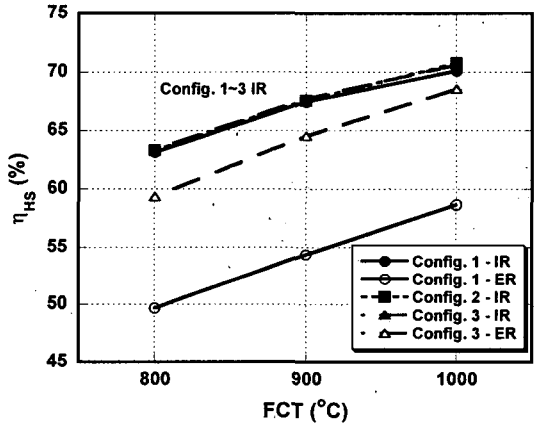
(a) Turbine inlet temperature



(b) Power ratio



(c) Power



(d) Hybrid system efficiency

Fig. 5 Performance results for maximum ΔT_{cell} of 200℃

ΔT_{cell} 를 200℃ 이내로 제한하면서 내부개질을 사용하면 3가지 예열방법 모두 비슷한 성능을 낸다. 내부개질 시스템은 연료전지 출구가스의 열회수 없이 바로 터빈으로 들어가고 온도차가 100℃인 경우 보다 더 많은 연료가 공급된다. 그러므로 연료전지 내에서 미 반응한 연료량이 증가하여 TIT는 더 높다. 따라서 재생기를 통한 1차 예열만으로도 셀 입구 온도가 충분히 높아져서 ΔT_{cell} 가 허용 최대값인 200℃보다 작게 설계된다. 따라서 3가지 Config. 모두 실제로는 어떠한 2차 예열법을 사용하지 않아도 되며, 결과적으로 연료전지의 성능이 동일하다. 시스템의 성능이 정확하게 일치하지 않는 것은 각 시스템 별로 구성방법이 달라서 압력손실 등에 차이가 있기 때문이다.

ΔT_{cell} 가 100℃인 경우보다 200℃일 때에 셀에서 반응하는 연료량이 증가되어 TIT는 더 높아지나 경향은 대체로 비슷하다. ΔT_{cell} 가 200℃일 때가 100℃일 때보다 연료전지의 출력이 더 크고 FCT가 증가할수록 셀에서 반응하는 연료량 증가도 커서 출력비가 크다.

출력은 ΔT_{cell} 가 100℃인 경우와 마찬가지로 내부개질 시스템이 더 크고 외부개질 시스템 경우는 Config. 3이 더 크다. 효율은 역시 외부개질 방법보다 내부개질 방법이 더 높으며 외부개질방법 중에서는 공기극 공기 재순환 방법이 가장 높다. 또한, ΔT_{cell} 의 한계가 100℃일 때보다 상대적으로 연료전지 출력 증가와 TIT증가로 인한 가스터빈 성능의 증가로 전체 시스템 효율이 더 높다.

5. 결 론

고체산화물 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템에서 연료전지 입출구 온도차를 고려하여 다양한 셀 입구 예열방법에 따라 성능해석을 수행하였으며, 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 셀에서 반응하는 연료량이 많은 내부개질 시스템에서 그리고 셀 입출구 온도차가 큰 시스템일수록 시스템의 성능이 높다. 또한, 연료전지의 작동온도가 높을수록 셀 전압과 TIT가 증가하여 전체시스템의 성능은 증가한다.

(2) 셀 입구 버너로 직접 예열하는 방법보다 터빈입구 연소기로 열교환하여 열을 회수하는 방법의 효율이 더 높다. 그러나, 터빈입구 연소기로 통해 열교환하는 방법은 외부개질 시스템인 경우 TIT가 매우 낮아져 설계가 불가능해지는 문제가 발생할 수 있다.

(3) 반면에 공기극 출구공기 재순환 방법은 셀에 공급되는 공기량이 다른 경우에 비해 크고, FCT가 동일하다면 연료 공급량 역시 많다. 이로 인해 연료전지 출력이 상대적으로 크며, 효율도 더 높을 것으로 예측되었다. 물론 단위 셀의 설계 기준이 동일하다면, 더 커진 공기량과 연료량을 처리하기 위해서 연료전지의 사이즈도 커져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대신기술 사업으로 수행되는 "가스터빈/연료전지 혼합형 고효율 발전시스템 개발" 과제의 연구 결과물이며, 연구를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Dennis, R., Burch, G., Williams, M., Hoffman, P., Gross, R. and Samuelsen, S., 2003, "Hybrid Power: A 2003 Perspective for the Decade," ASME paper GT2003-38950.

(2) Williams, M.C., Strakey, J.P. and Singhal, S. C., 2004, "U.S. Distributed Generation Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 79~85.

(3) Veyo, S. E., Lundberg, W. L., Vora, S. D. and Litzinger, K. P., 2003, "Tubular SOFC Hybrid Power System Status," ASME paper GT2003-38943.

(4) Jeong, Y. H., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2002, "Performance Design Analysis of a Pressurized Hybrid System Combining Gas Turbine and Solid Oxide Fuel Cell," *Trans. of the KSME B*, Vol. 26, No. 11, pp. 1605~1612.

(5) Agnew, G. D., Townsend, J., Moritz, R. R., Bozzolo, M., Berenyi, S. and Duge, R., 2004, "Progress in the Development of a low cost 1MW SOFC Hybrid," ASME paper GT2004-53350.

(6) Kim, J. H., Yang, S. S. and Lee, D. S., 2005, "Development of High Efficiency Gas Turbine/Fuel Cell Hybrid Power Generation System," *The Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, March 20 -23, Jeju, Korea, KJ08.

(7) Liese, E. A. and Gemmen, R. S., 2003, "Performance Comparison of Internal Reforming Against External Reforming in a SOFC, Gas Turbine Hybrid System," ASME Paper GT 2003-38566.

(8) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2004, "Performance Characteristics Analysis of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid Systems," *Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 615~622.

(9) Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2004, "Analysis of Performance Characteristics of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid Systems Considering Limiting Design Factors," *Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 1013~1020.

(10) Singhal, S. C. and Kendall, K., 2003, *High Temperature Solid Oxide Feul Cells: Fundamentals, Design and Applications*, Elsevier Ltd., Chapter 13.

(11) Aspen Technology, HYSYS, ver. 3.2.

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

(13) Massardo, A. F. 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.