

셀 입구 예열방법에 따른 고체산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 성능해석

양원준[†] · 김동섭* · 김재환**

Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cell /Gas Turbine Hybrid Systems for 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), Power Ratio(출력비), Reformer(개질기), 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. Three different methods are considered such as a burner in front of the cell, a preheater in front of the cell and recirculation of the cathode exit gas. Analyses are carried out for two maximum cell temperature differences. The greater temperature difference ensures higher efficiency. The cathode exit gas recirculation exhibits better performance than other methods.

기호설명

η 효율

F : Faraday 상수 [96,486 Coulomb/mol]
 FC : 연료전지
 FCT : 연료전지 작동온도 [°C]
 GT : 가스터빈
 HX : 열교환기
 LHV : 저위발열량 [kJ/kg]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 \dot{n} : 몰유량 [kmol/s]
 TIT : 터빈입구온도 [°C]
 V : 전압 [V]
 \dot{W} : 출력 [kW]

1. 서론

최근 전 세계적인 에너지 절약과 환경규제 강화로 발전설비는 고효율이며 친환경적인 에너지 시스템을 요구하고 있다. 이에 다양한 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으며 이 중 특히 연료전지는 그 우수성을 인정 받아 크게 주목 받고 있다. 또한 최근에는 이러한 연료전지에 가스터빈을 결합하여 시너지 효과를 얻을 수 있는 하이브리드 시스템에 대한 연구가 늘고 있다. 이러한 하이브리드 시스템을 이루기 위해서는 작동온도가 높은 고온형 연료전지인 용융탄산염 연료전지(650°C)와 고체산화물 연료전지(700~1000°C)가 적합하다. 특히 최근에는 3세대 연료전지인 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)에 대한 다양한 연구와 분산발전에 대한 관심으로 수십 kW 급의 마이크로 가스터빈과 SOFC를 결합한 하이브리드

그리스 문자

[†] 인하대학교 대학원 기계공학과

* 인하대학교 기계공학과

Email : kts@inha.ac.kr

TEL : 032-860-7307 FAX : 032-868-1716

** 한국항공우주연구원 터보기계연구그룹

시스템에 대한 연구가 선진국을 중심으로 이루어지고 있다.⁽¹⁻²⁾ 현재까지 개발된 SOFC/가스터빈 하이브리드 시스템 중에서는 Siemens-Westinghouse 사의 시스템이 가장 상용화에 근접해 있으며 60% 정도의 목표 열효율을 갖는 것으로 알려져 있다.⁽³⁻⁴⁾ 국내에서도 최근 단기적 성능목표는 낮으나 궁극적으로 소형이면서 고효율의 하이브리드 시스템 개발을 위한 과제가 진행 중⁽⁵⁾이다.

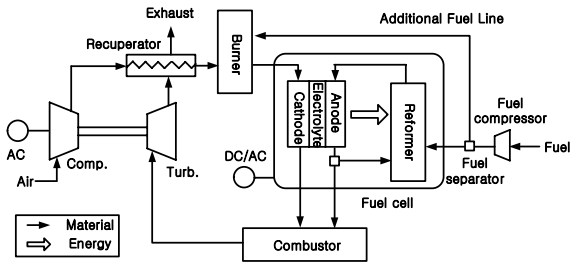
하이브리드 시스템은 다양한 구성이 가능하다. 특히 하이브리드 시스템은 수소를 얻기 위한 개질 과정에 필요한 개질열과 연료전지가 반응에 필요한 온도까지 셀을 예열하는 방법에 따라 다양한 설계가 가능하다. 이 중 개질열 공급 방법에 따른 하이브리드 시스템의 구성과 그 성능이 본 연구진에 의해 연구된 바 있으며,⁽⁶⁾ 또한 시스템 구성시 고려해야 할 제한요소에 대해 개질방법에 따라 연

구하였다.⁽⁷⁾ 이번 연구에서는 선행 연구된 개질열 공급 방법에 바탕을 두고 설계 제한요소인 연료전지 작동온도와 셀입출구 온도차를 고려하여 셀 예열방법을 다양하게 바꾸어 가며 설계하였을 때 각 구성방법에 따른 설계 특성을 알아 보고 성능을 분석하는 것을 목적으로 한다.

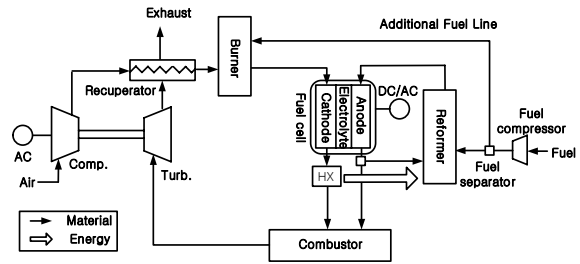
2. 시스템 구성

1.1 시스템 개요

본 연구의 대상인 가압형 하이브리드 시스템은 압축기를 통해 가압된 공기와 연료가 연료전지에서 반응하고 연료전지에서 발생한 고온의 가스와 연료전지에서 반응하지 않은 연료가 연소기에서

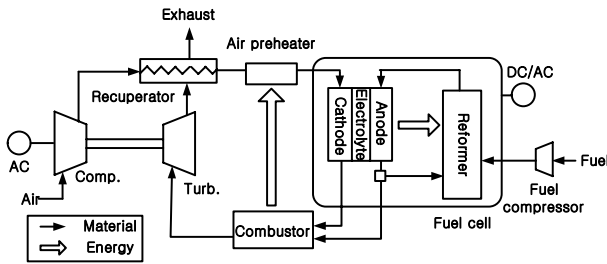


(a) Internal reforming

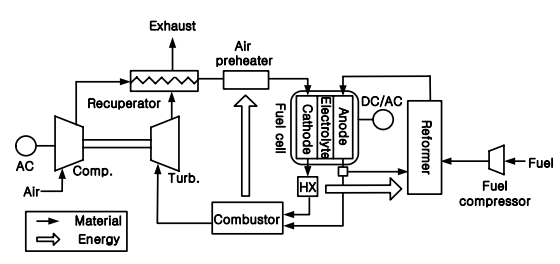


(b) External reforming

Fig. 1 Hybrid system adapting a burner for preheating cell inlet air (case 1).

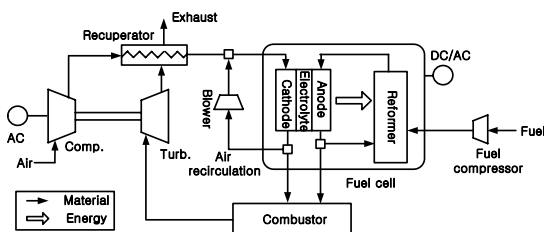


(a) Internal reforming

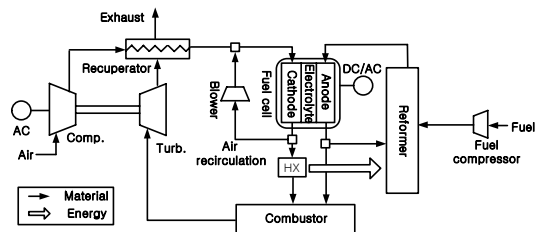


(b) External reforming

Fig. 2 Hybrid system adapting a preheater for preheating cell inlet air (case 2).



(a) Internal reforming



(b) External reforming

Fig. 3 Hybrid system adapting cathode exit recirculation for preheating cell inlet air (case 3).

연소하여 가스터빈을 구동하는 시스템이다. 연료 전지 반응에 필요한 수소를 얻기 위해 수증기 개질법(steam reforming)을 사용하였다. 흡열반응인 수증기 개질법은 개질반응에 필요한 열을 공급 받아야 하며 이는 내부와 외부 개질방법에 따라 다르다. 연료전지 내부에 개질기가 위치한 내부개질의 경우는 발열반응인 연료전지 셀반응에서 발생하는 열을 직접 이용한다. 연료전지 밖에 개질기가 위치한 외부개질의 경우는 다양한 개질열 공급 방법이 있으나 이번 연구에서는 본 연구진이 선행 연구한 결과 가장 성능이 높게 예측된 바 있는 방법을 사용하였다. 즉, 연료전지 공기극에서 나온 고온의 공기로부터 열을 공급 받는다.⁽⁶⁾ 개질에 사용되는 수증기는 내부와 외부개질 모두 연료극 재순환 방법을 사용하였다.

연료전지 반응 후 나온 고온의 가스는 터빈을 구동하고 다시 재생기를 거쳐 셀 입구 온도를 올리는데 이용된다. 셀입구 온도를 높여야 하는 이유는 셀입출구 온도차가 커지면 셀 내부 열응력 증가로 인하여 수명에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 이 온도차가 설계 제한 요소 중의 하나인데, 선행 연구⁽⁷⁾에서 작동온도와 연료전지 입출구 온도차를 고려하였을 때 대체로 재생기만 사용해서는 요구되는 셀 입구 온도까지 상승시키지 못하였다. 따라서 다른 방법을 고려해서 셀입구 온도를 올리는 것을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 셀 입구 공기 예열방법으로 연료전지 앞에 버너를 이용하여 직접 예열하는 방법, 공기 예열기를 이용한 방법, 그리고 마지막으로 공기극을 통해 나가는 고온의 공기를 재순환하여 셀 입구를 예열하는 방법 등을 고려하고자 한다. 시스템의 구성도는 Fig. 1~3 에 나타내었으며 개질방법에 따라 내부개질과 외부개질로 구분하였다. 셀 입출구 온도차의 최대 값을 100, 200°C 두 가지에 대해서 해석한다.

1.2 버너를 이용한 직접 예열(Case 1)

Case 1 은 셀 입구 예열을 위해서 셀 입구에 버너를 설치하고 추가의 연료를 공급하여 직접 셀 입구 온도를 셀 반응에 필요한 온도까지 예열한 시스템이다. 이 시스템의 내부와 외부개질 따른 구성도는 Fig. 1 과 같다.

1.3 연소기의 열교환을 통해 예열(Case 2)

Case 2는 셀 입구 예열을 연소기를 통해 공기 예열기로 예열하는 방법이다. 이 시스템은 추가

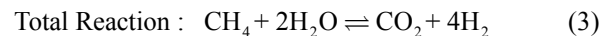
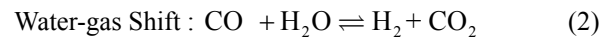
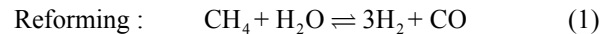
의 연료를 공급하지 않고 연소기 일부의 열을 공기 예열기 통해 열교환하여 필요한 셀입구 온도까지 예열하는 방법이다. 시스템 구성도는 Fig. 2 와 같으며 이 시스템의 내부 개질방법은 상용화에 가장 근접한 Siemens-Westinghouse사의 시스템⁽³⁻⁴⁾과 유사하다.

1.4 공기극 공기 재순환을 통해 예열(Case 3)

Case 3 는 추가의 연료를 공급하지 않고 공기극 출구의 공기를 재순환하여 입구 공기를 예열하는 방법이다. 구성도는 Fig. 3 에 나타내었다.

2. 해석 방법

시스템 성능 해석은 화학반응을 포함한 열시스템 해석이 가능한 상용프로그램⁽⁸⁾을 사용하였다. 연료는 메탄(CH₄)을 사용하며 개질기에서 연료의 1차, 2차 개질반응을 거쳐 수소를 얻는다. 단위 메탄 1몰이 완전 반응을 거친다고 가정하면 아래와 같이 4몰의 수소가 발생하여 연료극에 공급된다.

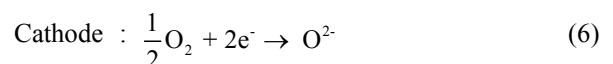


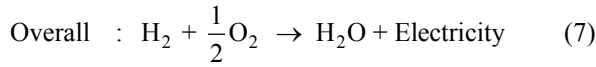
그러나 실제로 반응율은 반응조건에 의존하므로 반응온도와 압력의 함수로 이를 결정하는 평형반응(equilibrium reaction)을 고려하였다.

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

$$S/R = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O, supplied}}}{\dot{n}_{\text{CH}_4}} \quad (4)$$

셀에서는 공기극으로 공급된 공기 중 산소만 이온화되어 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.





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

한편, 식 (7)에 의해 생성된 수소가 모두 산소와 반응하는 것이 아니고 일부는 반응 후 남게 된다. 이를 결정하는 설계 파라미터가 연료이용률 (utilization factor, U_f)로서 본 연구에서는 다음과 같이 정의한다.

$$U_f = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2, \text{reacted}} + \dot{n}_{\text{CO}, \text{reacted}}}{\dot{n}_{\text{H}_2, \text{supplied}} + \dot{n}_{\text{CO}, \text{supplied}}} \quad (8)$$

연료이용률을 제한하는 이유는 이 값이 너무 높을 경우에 셀 말단부에서 연료가 희박해져 셀의 전압 손실이 커질 가능성이 있기 때문이다.⁽⁹⁾

셀반응으로 발생하는 셀전압은 셀의 작동온도에 대한 영향을 고려⁽¹⁰⁾하고 국내에서 1차 목표로 개발 중인 하이브리드 시스템의 설계값인 작동온도 800°C, 압력비 3.5에서 셀전압 0.7V를 기준⁽⁶⁾으로 하여 셀 작동온도 800~1000°C에서 셀전압이 0.7~0.81V 사이에서 변화하게 하였다.

연료전지와 가스터빈의 출력식, 출력비 및 하이브리드 시스템의 효율은 식(9)~(12)로 정의한다.

$$\dot{W}_{FC, AC} = 2(\dot{n}_{\text{H}_2, \text{reacted}} + \dot{n}_{\text{CO}, \text{reacted}}) \times F \times V \times \eta_{\text{inverter}} \quad (9)$$

$$\dot{W}_{GT, AC} = \dot{W}_{GT, \text{Shaft}} \times \eta_{\text{generator}} - \dot{W}_{\text{auxiliary}} \quad (10)$$

$$\text{Power Ratio} = \frac{\dot{W}_{FC, AC}}{\dot{W}_{GT, AC}} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{system}} = \frac{\dot{W}_{GT, AC} + \dot{W}_{FC, AC}}{(\dot{m} \cdot \text{LHV})_{\text{fuel}}} \quad (12)$$

기타 구체적인 시스템 해석 방법과 계산식들은 선행연구⁽⁶⁻⁷⁾와 동일하며 주요 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

3. 해석결과

Fig. 4는 셀 입출구 온도차를 100°C로 제한하였을 때의 각 셀 입구 예열방법에 따른 성능을 나타낸 그림이다. 모든 경우에서 온도차가 최대값인 100°C로 설계되었다. 연료전지의 작동온도를 800~1000°C로 하였을 때 TIT, 출력비 그리고 효율

Table 1 Reference design parameters.

Fuel	Methane
GT parameters	
Pressure ratio	3.5
Compressor efficiency	78 %
Turbine efficiency	85 %
Recuperator effectiveness	83 %
Fuel Cell parameters	
Fuel utilization factor	0.7
Steam/Carbon ratio	3
Inverter efficiency	93 %

을 나타내었다. 연료전지의 작동온도가 증가할수록 모든 Case의 TIT는 증가하였다. 이는 연료전지 출구가스 온도인 연료전지 작동온도가 증가하면 터빈에 공급되는 가스의 온도도 증가하기 때문이다. 예열방법 따라 비교하면 Case 1인 셀 입구 버너에서 직접 예열하는 방법은 다른 Case들과 달리 열교환이나 재순환으로 열회수를 하지 않으므로 가장 높은 TIT를 갖는다. 또 내부개질 시스템이 연료전지 출구 가스를 열교환하여 개질열을 공급하는 외부개질 시스템 보다 터빈에 고온의 가스를 공급하므로 TIT가 더 높다. 연소기를 통해 공기 예열기로 예열하는 방법 중 외부개질방법(Case 2-Ext.)은 셀입구 예열과 개질열 공급을 모두 공기극의 출구가스로 한다. 따라서 터빈 입구에 충분한 양의 고온의 가스를 공급되지 못해 TIT가 매우 낮아져 시스템 설계가 불가능하다. 이 방법은 추후 설명할 셀 온도차 200°C 조건에서도 설계가 불가능한 것으로 해석되었다.

출력비는 FCT가 증가해도 크게 증가하지 않는데 이는 FCT 증가로 셀전압이 증가하여 연료전지의 출력이 높아지나 TIT 증가에 의한 가스터빈의 출력이 그만큼 증가하기 때문이다. Case 2의 내부개질 방법의 경우는 FCT가 800~900°C에서는 TIT가 낮아서 출력비가 크다. Case 3의 공기극 공기 재순환을 통한 예열방법은 공기의 재순환으로 셀 냉각효과가 발생하여 같은 작동온도에서 더 많은 연료가 셀에서 반응하여 연료전지 출력이 증가하고 따라서 Case 1 보다 출력비가 더 크다.

효율은 개질열을 셀 내부에서 직접 공급하여 셀의 냉각효과를 가지는 내부개질 방법이 외부개질 방법 보다 높다. 셀 입구 예열 방법에 따라서는 열교환을 통해 열회수를 하는 Case 2가 직접 예열하는 Case 1 보다 효율이 높고 공기극 재순환을 통해 열회수를 하면서 셀 냉각효과를 내는 Case 3이 Case 2 보다 더 높다.

Fig. 5는 셀입출구 온도차를 200°C로 제한한 경우의 시스템의 성능을 나타낸 것이다. 일반적으로 셀입출구 온도차가 증가할수록 같은 FCT에서 더

많은 연료가 셀에 공급되므로 연료전지의 출력은 증가하고 이로 인해 시스템의 효율도 증가한다. 물론 온도차가 커질수록 열응력이 증가하는 단점

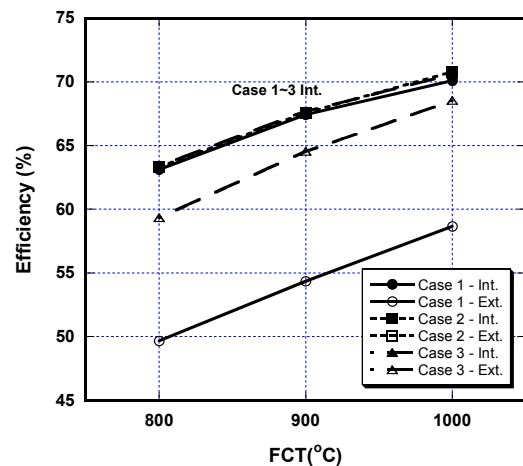
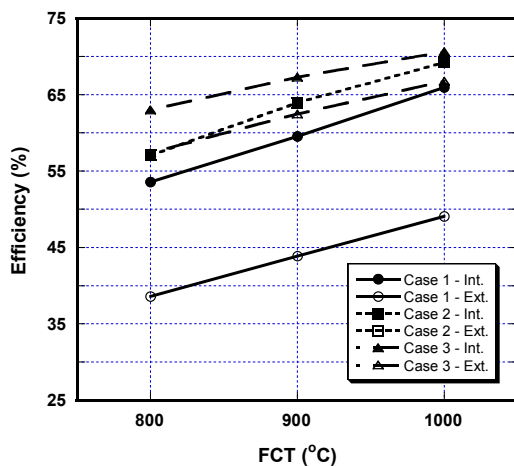
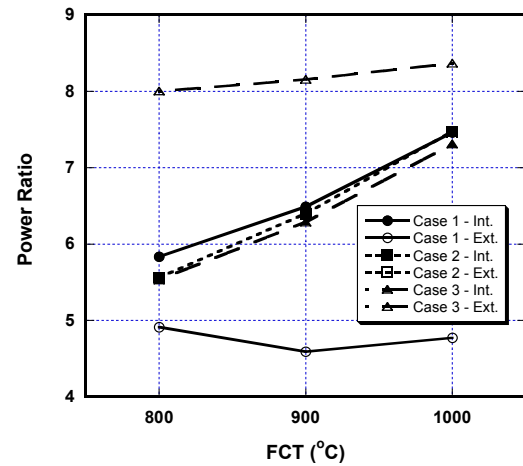
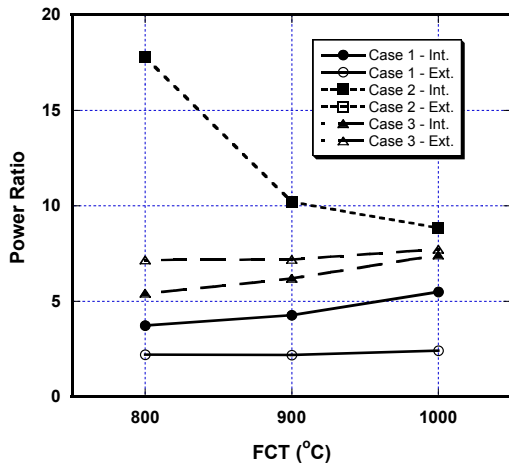
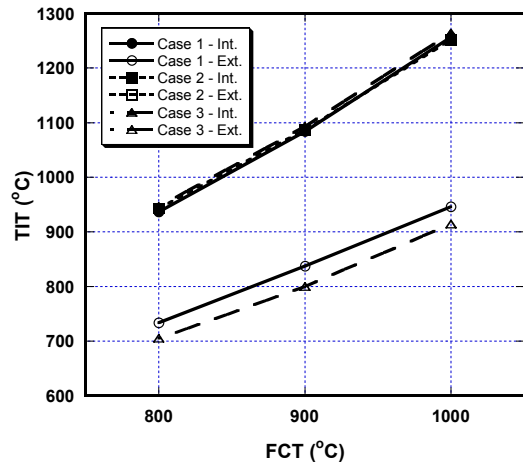
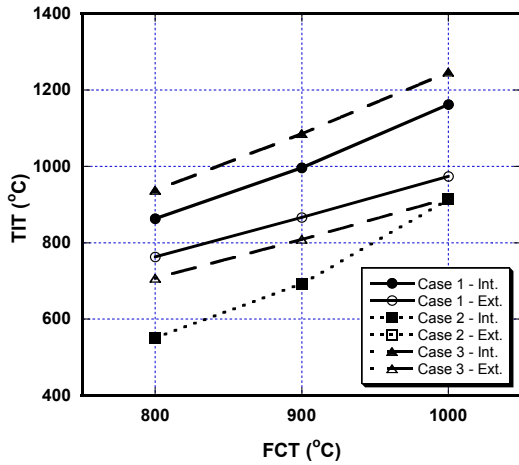


Fig. 4 Performance results for mazimum cell temperature difference (inlet & outlet) of 100°C.

Fig. 5 Performance results for maximum cell temperature difference (inlet & outlet) of 200°C

이 있으나, 기존 연구⁽¹¹⁾를 바탕으로 유추할 때 이 정도 온도차는 가능할 것으로 판단된다.

셀 입출구 온도차를 200°C 이내로 제한하였을 때는 내부개질 시스템은 3가지 예열방법 모두 비슷한 성능을 낸다. 내부개질 시스템은 연료전지 출구가스의 열회수 없이 바로 터빈으로 들어가고 셀입출구 온도차 100°C 보다 더 많은 연료가 공급되므로 연료이용율에 의해 반응하지 않은 연료량이 증가하여 TIT는 더 커진다. 따라서 재생기를 통한 1차 예열만으로도 셀입구 온도가 충분히 높아져서 셀 입출구 온도차가 200°C 보다 작게 설계된다. 따라서 3가지 Case 모두 실제로는 어떠한 2차적인 예열법을 사용하지 않아도 되며, 결과적으로 연료전지의 성능이 동일하다. 시스템의 성능이 정확하게 일치하지 않는 것은 Case 별로 구성방법이 달라서 압력손실 등에 차이가 있기 때문이다.

TIT는 셀입출구 온도차 100°C인 경우 보다 셀에 공급되는 연료량의 증가로 더 높아지나 대체로 비슷한 경향을 나타낸다. 셀 입출구 온도차가 200°C일 때가 100°C일 때 보다 연료전지의 출력이 더 크고 FCT가 증가할수록 연료량 증가도 커서 출력비가 더 높다. 효율은 외부개질 방법보다 내부개질 방법이 더 높게 나왔으며 외부개질 방법 중에서는 공기극 공기 재순환 방법이 가장 높게 나왔다. 또한 셀입출구 온도차의 한계가 200°C일 때가 100°C일 때 보다 연료전지 출력과 TIT증가로 효율이 더 높다.

4. 결 어

고체산화물 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템에서 연료전지 입출구 온도차와 연료전지 작동온도를 고려하여 다양한 셀 입구 예열 방법에 따라 성능해석을 수행하였다. 일반적으로 셀에서 반응하는 연료량이 많은 내부개질 시스템일수록 그리고 셀입출구 온도차가 큰 시스템일수록 시스템의 성능이 높다. 또한 연료전지의 작동온도가 높을수록 셀전압과 TIT가 증가하여 전체시스템의 성능은 증가한다. 셀입구 버너로 직접 예열하는 방법 보다 터빈 입구 연소기로 열교환하여 열을 회수하는 방법의 효율이 더 높다. 그러나 터빈입구 연소기로 통해 열교환 하는 방법은 외부개질 시스템인 경우 TIT가 매우 낮아져 설계가 불가능해지는 문제가 발생할 수 있다. 반면에 공기극 출구공기 재순환 방법은 셀의 냉각효과를 높여 더 많은 연료가 공급되어 높은 연료전지 출

력을 가지면서 하이브리드 시스템의 적당한 TIT를 가능하도록 하여 연소기 열교환 방법이나 셀입구 버너로 직접 셀입구 예열하는 방법 보다 더 높은 효율을 낸다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, <http://www.netl.doe.gov>.
- (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 KSME B*, Vol. 26, No. 11, pp. 1605-1612.
- (5) Korea Aerospace Research Institute, 2003, Development of High Efficiency Gas Turbine/Fuel Cell Hybrid Power Generation System, report to Ministry of Commerce, Industry and Energy.
- (6) 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.
- (7) 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," *Proc. of the SAREK Summer Annual Conference*, pp 980-986.
- (8) Aspen Technology, HYSYS, ver. 3.2.
- (9) Larminie, J. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, Ltd.
- (10) 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.
- (11) 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, GT2003-38566.