

<논문 or 기술논문>

스팀분사를 고려한 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 설계 성능
비교 분석

박성구[†] · 김동섭^{*}

**Design Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine
Hybrid Systems Considering Steam Injection**

Sung Ku Park, Tong Seop Kim

Key Words: Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Steam Injection(스팀분사), Hybrid System(하이브리드 시스템), Ambient Pressure System(상압형 시스템), Pressurized System(가압형 시스템)

Abstract

This study aims to analyse the influence of steam injection on the performance of hybrid systems combining a solid oxide fuel cell and a gas turbine. The steam is generated by recovering heat from the exhaust gas. Two system configurations, with difference being the operating pressure of the SOFC, are examined and effects of steam injection on performances of the two systems are compared. Two representative gas turbine pressure ratios are simulated and a wide range of both the fuel cell temperature and the turbine inlet temperature is examined. Without steam injection, the pressurized system generally exhibits better system efficiency than the ambient pressure system. Steam injection increases system power capacity for all design cases. However, its effect on system efficiency varies much depending on design conditions. The pressurized system hardly takes advantage of the steam injection in terms of the system efficiency. On the other hand, steam injection contributes to the efficiency improvement of the ambient pressure system in some design conditions. A higher pressure ratio provides a better chance of efficiency increase due to steam injection.

기호설명

FC : 연료전지
F : 패러데이 상수(98,486C/mol)
FCT : 연료전지 작동온도
GT : 가스터빈

HX : 열교환기
I : 전류
PR : 압력비
PF : 출력비중
SCR : 수증기/연료 비
TIT : 터빈입구온도
 U_f : 연료이용율
V : 전압

[†] 인하대학교 대학원 기계공학과

^{*} 인하대학교 기계공학과

E-mail : kts@inha.ac.kr

TEL : (032)876-7308 FAX : (032)868-1716

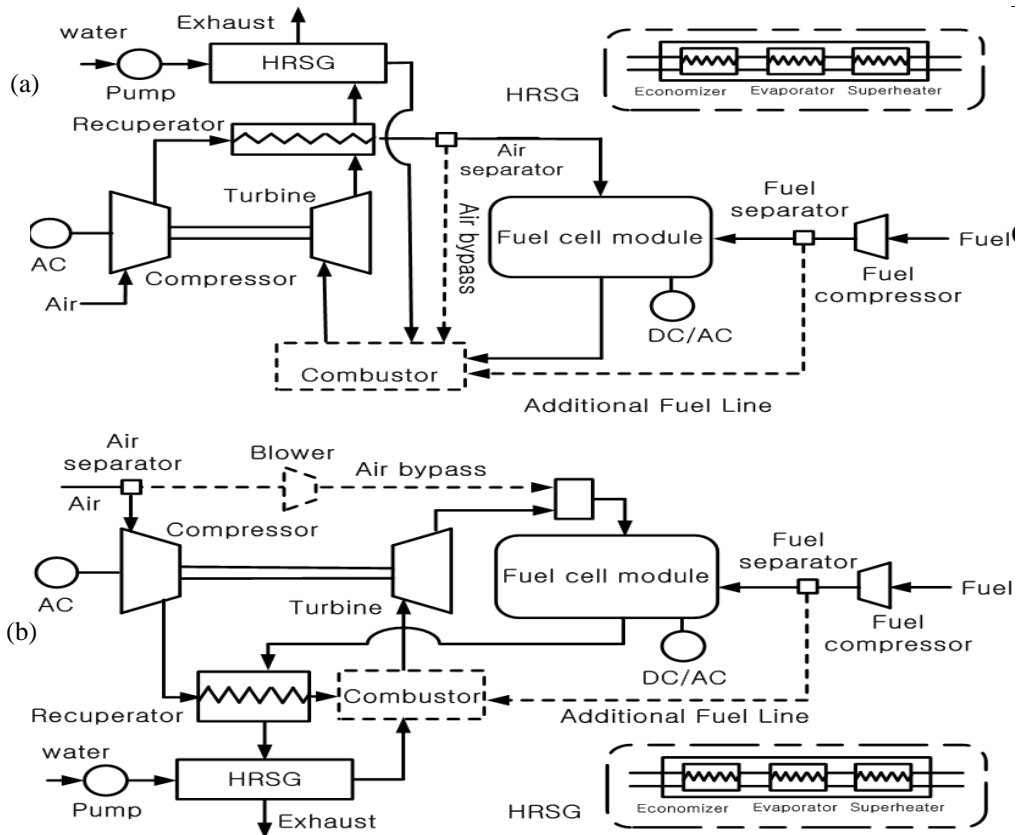


Fig.1 SOFC/STIG GT Hybrid systems. (a) Pressurized system (b) Ambient pressure system

화석 에너지 고갈과 환경 문제가 대두되면서 전 세계적으로 대체에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 발전설비 분야에서는 에너지 효율이 높고 공해물질 배출이 적은 발전시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서 연료가 가진 화학에너지를 전기화학반응에 의해 전기에너지로 얻을 수 있어 고효율이며 환경문제가 적은 연료전지와 환경 친화적이며 다른 발전설비에 비해 상대적으로 신뢰도가 높은 가스터빈이 많은 연구의 대상이 되고 있다. 특히, 연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템의 경우 시너지 효과를 기대할 수 있으며, 선진국에서는 분산발전을 위한 연구가 진행 중에 있다.^(1,2)

이러한 하이브리드 시스템에서 개질방법과 개질에 필요한 수증기 공급방법 그리고 연료전지 작동압력에 따른 시스템의 구성은 시스템 성능에 영향을 주는 중요한 요소이고^(3,4,5), 선행연구를 통해 위와 같은 요인을 고려한 하이브리드 시스템의 성능을 분석하였다.⁽⁶⁾

하지만 이러한 하이브리드 시스템의 배출가스는 여전히 고온으로 방출되게 된다. 가스터빈의

경우 고온의 배출가스 열회수를 이용한 스팀 생산 및 분사를 통한 시스템 성능향상에 대한 연구가 진행되어 왔으며,^(7,8) 하이브리드 시스템의 경우도 여러 가지 열회수 방법을 통하여 시스템의 성능을 개선하려는 연구가 진행되어 왔다.^(9,10)

본 연구에서는 연료전지 작동온도(FCT), 셀 입출구 온도차이(ΔT_{cell}) 그리고 터빈입구온도(TIT)를 설계 제한조건으로 하는 하이브리드 시스템에서 배출가스 열회수를 통해 스팀을 재생하고 가스터빈 연소기에 분사하였을 때의 시스템 설계 성능을 해석하여 HRSG가 없이 재생기를 통과한 가스가 바로 대기로 방출되는 기존의 하이브리드 시스템의 설계 성능⁽⁶⁾과 비교 분석하였다.

2. 시스템 구성

Fig.1 에 작동압력이 서로 다른 가압형(a)과 상압형(b) 하이브리드 시스템을 나타내었다. 연료전지는 개질기(Reformer)와 Cell stack, 예열기(Preheater) 그리고 후연소기(Afterburner)로 구성된

다. 상압형과 가압형 하이브리드 시스템은 개질기의 위치와 개질반응에 필요한 수증기를 공급하는 방식에 따라 여러 가지 구성이 가능하지만, 이번연구에서는 개질기가 연료전지 내부에 위치하여 개질반응에 필요한 열을 연료전지 내에서 자체적으로 공급하게 되는 내부개질(Internal reforming)방식을 사용하였고, 개질반응에 필요한 수증기는 연료전지 연료극 출구가스를 재순환하여 공급하는 방식(Anode recirculation)을 사용하였다. 고온의 배출가스(가압형의 경우 터빈 출가스, 상압형의 경우 연료전지 출가스)는 재생기(Recuperator)를 통과하며 압축기를 통과한 가압공기에 의해 열이 회수되고, 다시 HRSG(Hest Recovery Steam Generator)로 유입되어 스팀을 생성한 후 방출되게 된다. HRSG는 액상열교환기(일반적인 보일러의 절탄기, Economizer), 증발기(Evaporator), 과열기(Superheater) 세 가지 열교환기로 구성된다. 연료는 개질기로 유입되어 개질된 후 연료전지로 유입되어 반응하게 되는데, 연료 이용율(U_f)에 따라 연료전지 출구가스에는 미반응 연료가 남아있게 되고, 이러한 미반응 연료는 연료전지 후연소에서 연소하게 되고, 이 때 발생하는 열을 사용하여 연료전지 입구공기를 예열하게 된다. 그림에 나타난 점선은 추가적으로 공급되는 연료와 바이패스 되는 공기를 나타낸 것이다. 이것은 설계제한조건을 맞추기 위해 사용되며, 가압형의 경우 두 가지 모두 터빈입구온도를 맞추기 위해 사용되고, 상압형의 경우 추가적인 연료의 공급은 터빈입구온도를 맞추기 위해 공기의 바이패스는 셀 입출구 온도차이를 맞추기 위해 사용된다. HRSG가 없는 기본적인 하이브리드 시스템의 구성에 대한 자세한 설명(터빈입구온도와 셀온도, 셀 입출구 온도차 등을 맞추어 설계하기 위한 바이패스 및 연료 추가 공급 등 포함)과 모델링은 선행 연구⁽⁶⁾를 참고할 수 있다.

3. 해석 방법

시스템을 구성하는 각각의 구성요소는 하나의 검사체적으로 가정하여 모델링하였다. 연료전지 작동온도는 공기극 출구온도로 가정하였고, 셀 입출구 온도차이는 200℃로 제한하였다. 가스터빈의 입구온도는 현재 개발 중이거나 상용화된 가스터빈의 온도를 적용하였다.

대기 조건은 15℃, 1atm으로, 시스템에 공급되는 공기의 양은 1kg/s으로 가정하였다. 시스템에 공급되는 연료는 순수 메탄이며, 개질기로 공급되어 평형반응으로 가정한 steam reforming반응과 water gas shift반응을 통해 개질되어 연료극으로 공급된다. 개질에 필요한 수증기의 양은 SCR(Steam Carbon Ratio)에 의해 결정되며, 연료극 출구가스가 순환하여 공급된다. 연료이용율은 공급된 연료와 반응한 연료의 비로 정의한다.

연료전지의 전압은 문헌을 토대로 하여 연료전지 작동온도와 작동압력의 함수로 표현하여 사용하였고, 압력비 3.5, 연료전지 작동온도 800℃일 때 0.7V를 기준값으로 하였다.⁽¹¹⁾

셀반응으로 발생하는 직류 전력은 셀전압을 토대로 계산되고, 교류 전력은 변환효율과 재순환 블로워의 전력과 같은 보조전력을 고려하여 계산된다.

$$\dot{W}_{FC,DC} = VI = V \cdot (\dot{n}_{H_2} + \dot{n}_{CO})_{reacted} 2f \quad (1)$$

$$\dot{W}_{FC,AC} = \dot{W}_{FC,DC} \cdot \eta_{conv} - \dot{W}_{AUX} \quad (2)$$

가스터빈의 출력은 기계적 효율과 발전효율, 그리고 압축기전력과 같은 보조전력을 고려하여 계산되고, 가스터빈의 출력비중은 아래와 같이 정의하였다.

$$\dot{W}_{GT,AC} = (\dot{W}_T \cdot \eta_m - \dot{W}_C) \eta_{gen} - \dot{W}_{AUX} \quad (3)$$

$$PF_{GT} = \frac{\dot{W}_{GT,AC}}{\dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC}} \quad (4)$$

따라서, 하이브리드 시스템의 총출력과 효율은 아래와 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{HS} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} \quad (5)$$

$$\eta_{HS} = \frac{\dot{W}_{HS}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{CH_4}} \quad (6)$$

HRSG에서 Pinch temperature와 Approach temperature는 각각 절탄기 고온부입구 온도와 저온부출구 온도의 차이, 과열기 고온부 입구온도와 저온부 출구온도이며 공급되는 스팀의 양은

Table 1 System design parameter.

Gas Turbine	
Pressure Ratio	3.5 and 8.5
TIT range	750 °C ~ 1150 °C
Compressor efficiency	78%
Turbine efficiency	85%
Recuperator efficiency	≥ 83%
Mechanical efficiency	96%
Generator efficiency	93%
Fuel Cell	
FCT	700 °C and 900 °C
Utilization factor	0.7
SCR	3.0
Conversion efficiency	93%
HRSG	
Pinch temperature	10 °C
Approach temperature	10 °C

에너지 균형식을 사용하였다.

$$\dot{m}_h(h_i - h_o)_h = \dot{m}(h_o - h_i)_c \quad (7)$$

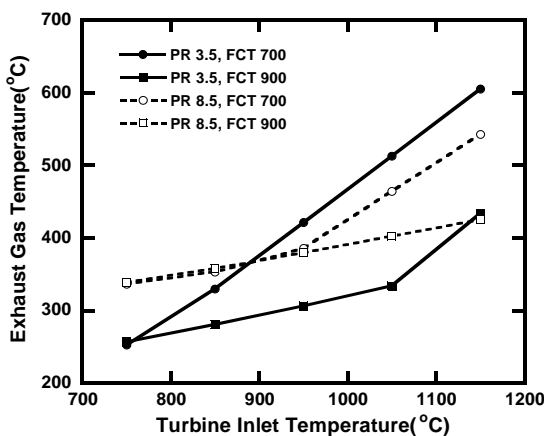
Table 1에 시스템 설계에 사용된 주요 파라미터들을 나타내었다. 재생기의 효율은 83%를 기준으로 하지만 가압형의 경우 셀 입출구 온도차이, 상압형의 경우 터빈입구온도와 같은 설계제한 조건을 만족하도록 재생기 효율을 조절하여 설계하였다.

각 구성요소에서 0.5~3%의 압력손실이 일어난다고 가정하였으며, 시스템 해석을 위해 상용프로그램인 HYSYS⁽¹²⁾를 사용하였다.

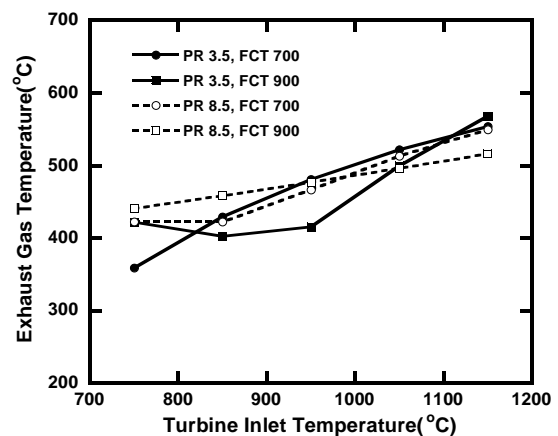
4. 해석결과 및 검토

Fig.2 에 HRSG가 없는 기존의 하이브리드 시스템의 시스템 출구가스의 온도를 나타내었다. 낮은 FCT조건인 시스템에서 TIT가 높아질수록 가압형의 경우 셀 입구온도 차이를 주어진 조건에 맞추기 위해 재생기 효율을 감소시켜 EGT가 크게 증가하는 구간이 존재하고, 상압형의 경우 연료전지 후연소기로부터 셀 입구공기를 예열하기 위해 전달되는 열량이 감소하여(재생기 고온부 입구온도가 증가하여) EGT가 증가하는 구간이 존재하게 되지만, 모든 조건에서의 EGT는 대략 250 °C~600 °C의 고온으로 방출됨을 계산을 통해 확인하였다. 가압형 시스템의 경우 고온의 연료전지 출구가스가 터빈에서 팽창하고 재생기에 유입되지만, 상압형 시스템의 경우 고온의 연료전지 출구가스가 재생기로 바로 유입되므로, 동일한 연료전지 작동온도와 터빈입구온도를 갖는 시스템에서 상압형 시스템의 출구가스 온도가 가압형 시스템의 출구가스 온도보다 많은 경우 높게 나타나게 된다.

이러한 고온의 출구가스가 가진 열을 회수하여 HRSG를 통해 스팀을 재생하여 가스터빈 연소기에 분사하여 주었을 때 하이브리드 시스템의 성능과 가스터빈 출력비율을 기존의 하이브리드 시스템과 비교하여 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다. Fig.3은 압력비가 3.5와 8.5일 경우의 가압형 하이브리드 시스템의 해석결과를 나타낸 것이다. 가압형의 경우 공급된 스팀은 연소기를 통과하여 터빈으로 공급되므로, 연료전지의 출력에는 영향

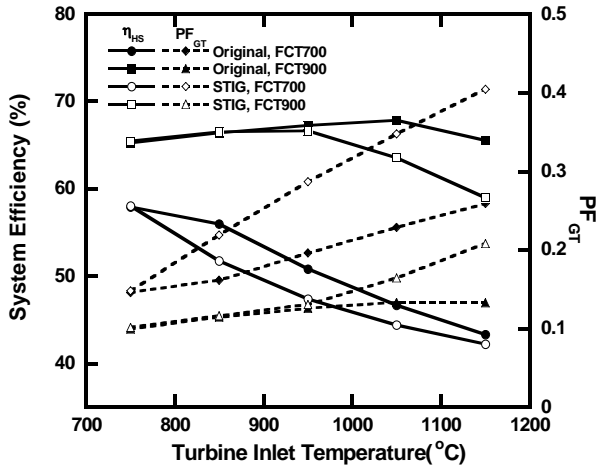


(a) Pressurized system.

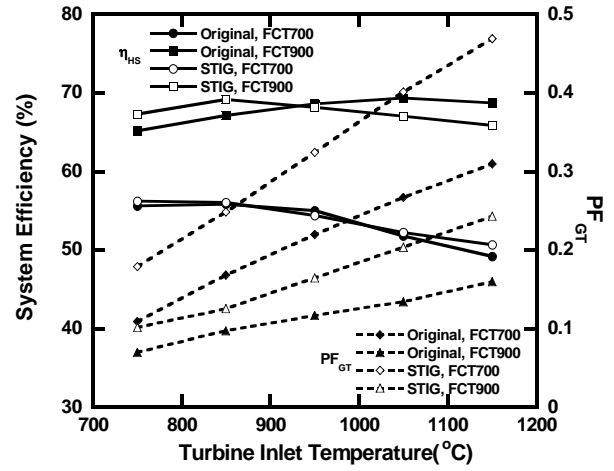


(b) Ambient pressure system.

Fig. 2 Exhaust Gas Temperature of Original Hybrid systems.

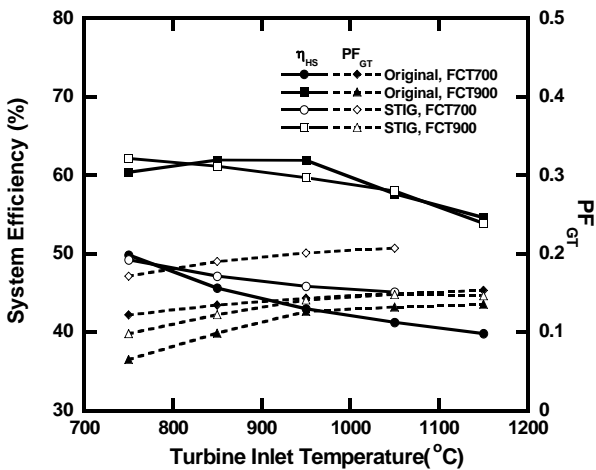


(a) Pressure ratio 3.5

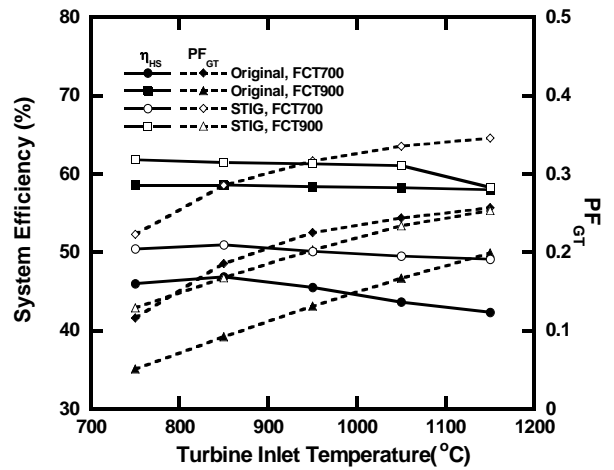


(b) Pressure ratio 8.5

Fig. 3 System efficiency and GT power fraction of the pressurized hybrid system.



(a) Pressure ratio 3.5



(b) Pressure ratio 8.5

Fig. 4 System efficiency and GT power fraction of the ambient pressure hybrid system..

을 미치지 않는다. 따라서 가스터빈의 출력비중은 기존의 하이브리드 시스템에 비해 커진다. 하지만 많은 설계 조건에서 효율은 기존의 시스템에 비해 작게 나타나는데, 이것은 상대적으로 온도가 낮은 스팀이 연소기에 공급되어 주어진 TIT를 맞추기 위해서 추가적으로 공급되는 연료의 양이 증가하기 때문이다. 스팀분사를 통해 가스터빈의 출력은 증가하였지만 터빈출력의 증가로 인한 시스템출력의 증가비율보다 추가적인 연료공급으로 인한 연료량의 증가비율이 크게 되어 효율은 감소하게 된다. 하지만, 높은 FCT와 낮은 TIT조건에서 공기를 바이패스하여 TIT를 맞춰주던 시스템에서는 스팀분사를 통해 바이패스되는 공기의 양을 줄일 수 있어 시스템효율이 기존의

시스템과 비교하여 거의 같거나 약간 높은 값을 나타낸다. 압력비가 큰 기존의 하이브리드 시스템에서의 가스터빈 출력비중은 일정 TIT이후에는 압력비가 낮은 시스템에 비해 높은 값을 가지게 되고 따라서 압력비가 높은 하이브리드 시스템에서는 TIT를 맞추기 위해 추가적인 연료공급이 효율 감소에 미치는 영향이 작게 나타난다.

Fig.4는 상압형 하이브리드 시스템의 해석결과이다. 상압형의 경우, 공급된 스팀은 연소기를 통해 터빈으로 유입되어 팽창하고 연료전지로 공급된다. 따라서 가스터빈의 출력뿐만 아니라 연료전지의 출력도 증가하게 되고, 가스터빈의 출력비중 상승이 가압형에 비해 작게 나타나게 된다. 상압형 시스템도 가압형과 마찬가지로 상대적으

로 온도가 낮은 스팀을 분사하게 되면 TIT를 주어진 조건에 맞추기 위해 추가적인 연료를 공급 해주어야 한다. 하지만, 스팀을 분사하면 터빈과 연료전지의 출력이 같이 증가하게 되고, 추가적인 연료공급으로 인한 연료량의 증가비율보다 시스템 출력증가 비율이 크게 되어 효율은 기존의 시스템보다 높은 값을 나타낸다. 또한, 가압형 시스템과 마찬가지로 압력비가 높은, 가스터빈의 출력비중이 높은 조건에서 스팀분사를 통한 효율 상승의 효과가 크게 나타난다.

스팀을 분사한 시스템에서 FCT 700℃, TIT 1150℃인 경우는 연소기에 공급되는 산소가 충분하지 않아 TIT를 원하는 값으로 설계할 수 없어서 연구결과에서 제외하였다.

4. 결론

연료전지와 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템의 배기가스를 이용해 스팀을 재생하고 가스터빈 연소기에 분사한 경우의 시스템 성능을 해석하여 기존의 시스템과 비교분석 하였다.

(1) 가압형 시스템의 경우 가스터빈의 출력은 증가하지만, 추가적으로 공급해야 하는 연료의 양이 증가하여 시스템 효율은 크게 개선되지 않는다.

(2) 상압형 시스템의 경우 가스터빈과 연료전지의 출력이 동시에 증가하게 되어, 시스템 효율이 기존 하이브리드 시스템에 비해 증가하는 경향을 나타낸다.

(3) 압력비가 낮은(터빈의 출력비중이 낮은) 시스템보다 압력비가 높은(터빈의 출력비중이 높은) 시스템에서 스팀분사로 인한 시스템 효율 상승이 크게 나타난다.

참고문헌

(1) National Energy Technology Laboratory, USA, Department of Energy
 (2) Williams, M. C., Strakey, J. P., Surduval, W, A., 2005, "The Department of Energy, Office of Fossil Energy Stationary Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 143, pp. 191-196.
 (3) Liese, E. A., Gemmen, R. S., 2003, "Performance Comparison of Internal Reforming

Against External Reforming in a SOFC, Gas Turbine Hybrid System," *ASME paper*, GT2003-38566.

(4) Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S., Kim, J. H., Sohn, J. L., Ro. S, T., 2006, "Design Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems Considering Temperature Constraints," *Journal of Power Sources*, Vol. 160, pp. 462-473.
 (5) Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S., 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.
 (6) Park, S. K., Kim, T. S., 2006, "Comparison Between Pressurized Design and Ambient Pressure Design of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Systems," *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp. 490-499.
 (7) Fischer, A. C., Frutschi, H. U., Haselbacher, H., 2001, "Augmentation of Gas Turbine Power Output by Steam Injection," *ASME paper*, 2001-GT-0107.
 (8) Nishida, K., Takagi, T., Kinoshita, S., 2003, "Performance Analysis of Regenerative Steam Injection Gas Turbine(RSTIG) Systems," *ASME paper*, GT2003-38823.
 (9) Kuchonthara, P., Bhattacharya, S., Tsutsumi, A., 2003, "Energy Recuperation in Solid Oxide Fuel Cell(SOFC) and Gas Turbine(ST) Combined System.," *Journal of Power Sources*, Vol. 117, pp. 7-13.
 (10) Basurto, M. T., Pilidis, P., Hales, R., 2001, "Optimization Assessment of Hybrid MCFC-Gas Turbine Cycle," *ASME paper*, 2001-GT-0090.
 (11) Massardo, A. F., Lubelli, F., 2000, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel-Gas Turbine Combined Cycles(IRSOFC-GT) : Part A-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," *ASME J. Eng, Gas Turbine Power*, Vol. 122, pp. 27-35.
 (12) Aspen Technology, HYSYS, ver. 2004.2