

# 가스터빈 압력비 변화에 따른 고체 산화물 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템의 설계 성능 해석

박 성 구\*, 김 동 섭\*\*†

\*인하대학교 대학원, \*\*인하대학교 기계공학과

## Design Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems for Various Gas Turbine Pressure Ratios

Sung Ku Park, Tong Seop Kim

Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**ABSTRACT** : This study presents analysis results for the hybrid system combining solid oxide fuel cell and gas turbine. Two different system layouts(an ambient pressure system and pressurized system) are considered and their design performance are comparatively investigated taking into account critical design factor. the most critical parameter such as turbine inlet temperature, gas turbine pressure ratio, temperature difference at the fuel cell and fuel cell operating temperature are considered as design constraints. Performance variations according to system layout and design parameters are examined in energetic view point.

**Key words:** Gas turbine(가스터빈), SOFC(고체 산화물 연료전지), Ambient pressure system(상압형시스템), Pressurized system(가압형 시스템), Design constraints(설계 제한조건), Operating pressure(작동압력)

### 기 호 설 명

- FC : 연료전지
- F : Faraday constant[96,486 C/mol]
- FCT: 연료전지 작동 온도 [°C]
- GT : 가스터빈
- HX : 열교환기
- I : 전류[A]
- PR : 압력비
- PWR: 출력비
- SCR : 수증기/연료비

TIT : 터빈입구온도 [°C]

$u_f$  : 연료이용률

V : 전압

### 1. 서 론

전 세계적으로 환경과 에너지 절약에 대한 관심이 높아지면서 발전설비분야에서는 효율이 높고 공해물질 배출이 적은 발전시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 화학반응을 통해 직접 전기에너지를 얻어 효율이 높고 유해 가스 배출이 거의 없는 친환경적인 시스템인 연료전지와 환경 친화적이고 신뢰도가 높은 가스터빈이 주목을 받고 있다. 연료전지와 가스터빈은 그 각각의 시스템만으로도 우수한 성능을

†Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7307; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: kts@inha.ac.kr

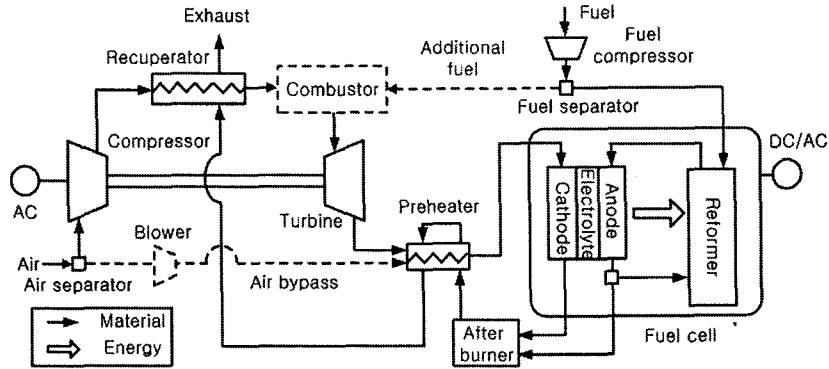


Fig.1 (a) Ambient pressure system

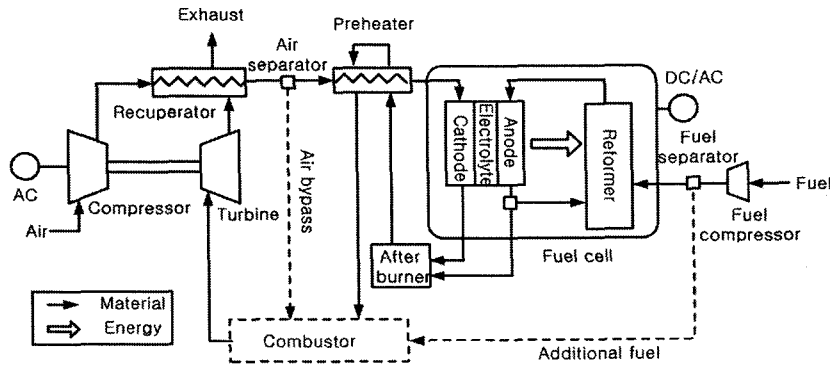


Fig.1 (b) Pressurized system

Fig.1 SOFC/GT hybrid systems layouts.

가지고 있지만, 두 시스템을 결합한 하이브리드 시스템의 경우 시너지 효과를 기대할 수 있어 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 분산발전에 대한 관심이 높아지면서 작동온도가 높은(600°C ~ 1000°C) 고체산화물 연료전지(SOFC)와 마이크로 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템에 대한 연구개발이 전 세계적으로 진행되고 있고,<sup>(1~2)</sup> 상용화를 위한 시스템도 일부 개발 되었고 계속 개발 중이다.<sup>(3~4)</sup>

선행연구에서는 가압형 시스템에서 개질형태, 개질열 및 개질 반응에 필요한 수증기의 공급과 같은 설계조건을 변화한 다양한 구성에 대한 설계 해석<sup>(5)</sup>과, 셀 입구 예열과 같이 두 시스템의 결합시 발생하는 다양한 설계 제한조건에서의 가압형 하이브리드 시스템의 설계해석<sup>(6,7)</sup>, 연료전지/가스터빈 두 시스템의 현실적인 결합을 위해 발생하는 설계제한 요소인 터빈입구온도, 셀 입출구 온도차, 셀 작동온도 및 개질방법을 고려한

가압형 시스템의 설계 성능해석<sup>(8)</sup>과 일부조건에서의 상,가압형의 설계성능 비교분석이 이루어졌다.<sup>(9)</sup>

이번 연구에서는 가스터빈의 압력비가 변화할 때 현실적인 결합을 위해 발생하는 여러 가지 제한조건을 고려한, 상압 및 가압형 하이브리드 시스템의 설계 성능을 비교해석 하였다.

## 2. 시스템 구성

SOFC/GT 하이브리드 시스템은 연료전지 공기극에 터빈 출기가스가 유입되어 상압으로 작동하는 상압형(Fig.1(a))과 압축기를 통과한 가압된 공기가 연료전지의 공기극으로 유입되어 연료전지가 작동하는 가압형(Fig.1(b))으로 구분할 수 있다.

두 가지 시스템 모두 반응에 필요한 수소를 공급하는 개질기의 위치와 개질반응에 필요한 수증

기를 공급하는 방법에 따라 다양한 설계가 가능하다.<sup>(5)</sup> 이번 연구에서는 상압 및 가압형 모두 개질기가 연료전지 내부에 위치하여 개질반응에 필요한 열을 연료전지 내에서 자체적으로 공급하게 되는 내부 개질형을 대상으로 하였으며, 필요한 수증기는 연료전지 연료극 출구 가스를 재순환하는 방식을 사용하였다. 또한 고온의 배출가스(상압형의 경우에는 연료전지 출구 가스, 가압형의 경우에는 가스터빈의 출구 가스)의 열을 회수하여 압축공기의 온도를 상승시키는 재생기를 사용하였다. 연료전지 배출가스는 미반응연료가 남아있으며, 미반응연료는 후연소에서 연소하며 이때 발생하는 열을 이용해 연료전지 입구공기를 예열한다.

Fig.1에 나타나는 점선은 설계제한조건(터빈입구온도(TIT), 셀 입출구 온도차( $\Delta T$ ), 연료전지 작동온도(FCT))를 주어진 조건에 만족시키기 위해 추가적으로 공급하여 주는 연료와 바이패스 되는 공기를 나타낸 것이다. 추가적인 연료의 공급은 상압 및 가압형 모두 터빈입구온도를 조건에 맞추기 위한 목적으로 사용되지만, 바이패스 하는 공기는 상압형에서는 셀 입구온도를 맞추기 위한 목적으로 가압형에서는 터빈입구온도를 맞추기 위한 목적으로 사용된다.

### 3. 해석 방법

시스템 각각의 구성요소는 하나의 검사체적으로 가정하여 모델링하였다. 연료전지의 작동온도는 공기극의 출구온도로 가정하였고 연료전지 입출구 온도차를 200°C로 제한하였다. 셀 입출구 온도 차이와 셀 입구온도의 조절은 셀 입구 공기를 예열하는 방법과 재생기의 효율을 변화하는

방법을 사용하였다. 터빈의 입구온도는 현재 개발 중이거나 상용화되어 있는 마이크로 가스터빈의 입구온도를 적용하였다. 연료전지 작동온도(FCT)와 터빈 입구온도(TIT)를 독립적으로 설정하기 위하여 각각 연료와 공기의 공급이 가능하도록 설계하였다.

시스템에 공급되는 연료는 순수메탄이며, 대기 조건은 15°C, 1atm 으로 설정하였다. SOFC는 수소와 일산화탄소를 반응 연료로 사용하며 이것은 개질기에서 메탄과 수증기가 반응하여 생성된다. 개질기는 셀 내부에 위치고 개질반응에 필요한 열은 연료전지에서 열을 직접 공급받는다. 개질반응은 평형반응(equilibrium reaction)을 사용하였다. SCR(steam carbon ratio)에 의하여 개질반응에 필요한 수증기의 양이 결정되고, 연료 이용률  $u_r$ 는 공급연료량과 반응연료량의 비로 정의한다.

연료전지의 셀 전압은 셀의 재료와 형태, 그리고 작동조건에 따라 변화하지만 본 연구에서는 셀 작동조건이 800°C, 3.5bar일 때 셀 전압 0.7V로 하였고, 여러 문헌<sup>(10,11)</sup>을 토대로 셀 전압을 작동온도와 압력에 비례하는 함수로 표현하여 온도, 압력의 변화에 따른 셀 전압을 예측하였다. 기본적인 반응과 계산들은 선행연구<sup>(5,6,7,8,9)</sup>에 사용된 계산식을 이용하였다.

연료극으로 수소와 일산화탄소가 공급되어 공기와 반응을 하며 전류가 발생된다. 셀 반응을 통하여 발생하는 출력과 변환손실을 고려한 교류 전력은 다음과 같이 계산된다.

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

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

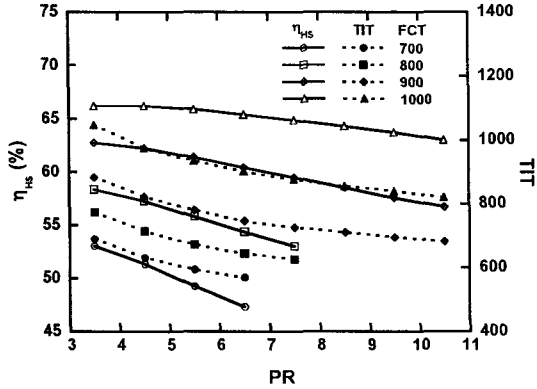
또한, 가스터빈 출력, 연료전지와 가스터빈의 출력의 비, 하이브리드 시스템 효율은 아래와 같이 계산된다.

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

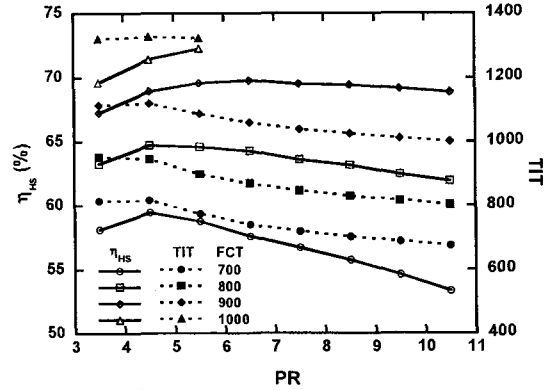
$$PWR = \frac{\dot{W}_{FC,AC}}{\dot{W}_{GT,AC}} \quad (4)$$

Table.1 System design parameters

PR range	3.5~10.5
Compressor efficiency	78%
Turbine efficiency	85%
Recuperator efficiency	<83%
Machanical Efficiency	96%
Generator efficiency	93%
FCT range	700~1000°C
$u_r$	0.7
SCR	3
Conversion efficiency	93%
Air mass flow rate	1kg/s



(a) Ambient pressure system



(b) Pressurized system

Fig. 2 Efficiency and turbine inlet temperature of designs without additional fuel and air supplied

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

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

시스템 해석에 사용된 주요 파라미터들을 Table 1에 나타내었다. 터빈의 입구온도는 850°C로 고정하였고, 재생기의 효율은 83%을 기준으로 하였다. 하지만 상압형에서는 터빈 입구 온도를, 가압형에서는 셀 입구온도를 만족하지 않는 경우에 재생기 효율을 조절하여 조건을 만족하도록 하였다.

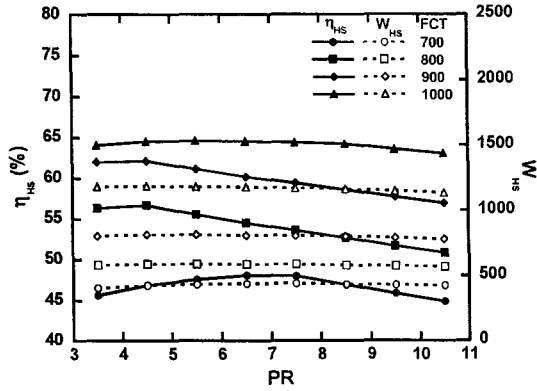
화학반응을 포함한 열역학적 시스템 해석을 위해 상용 프로그램<sup>(12)</sup>을 사용하여 SOFC/GT 하이브리드 시스템의 설계성능을 수행하였다.

#### 4. 해석 결과 및 검토

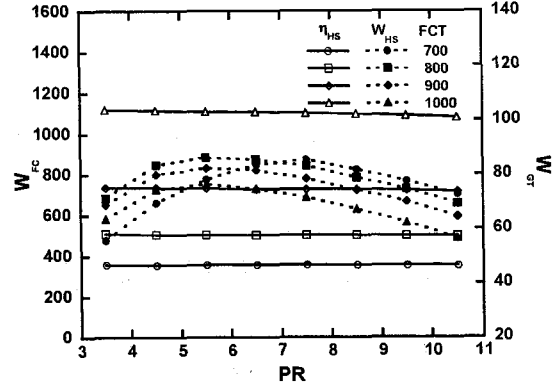
FCT와 ΔT를 제한(FCT = 700°C~1000°C, ΔT = 200°C)하고 TIT를 설정한 조건에 맞게 설계하기 위해서는 추가적인 연료와 공기의 공급이 필요하다. 첫 번째 조건은 TIT를 설정하지 않은 추가적인 연료와 공기의 공급이 없는 하이브리드 시스템, 두 번째 조건은 TIT를 설정한 조건에 맞추기 위해 추가적으로 연료와 공기를 공급해준 하이브리드 시스템으로 이러한 두 가지 조건에 대하여 시스템을 해석하였다.

Fig. 2는 첫 번째 조건에 대해 해석한 결과이다. 가압형의 경우가 상압형에 비해 셀 작동압력이 높아 셀 전압이 상대적으로 높게 유지되어 효

율이 높은 연료전지의 출력비중이 증가하므로 가압형의 시스템효율이 높게 나타나게 된다. 상압형의 경우 FCT를 고정한 상태에서 압력비(PR)를 증가시키면 TIT가 감소하게 된다. 압력비가 증가하게 되면 터빈출구온도가 감소하여 셀 입구온도를 유지하기 위하여 후연소기 출구가스에서 연료전지 유입공기에 공급하는 열량이 증가하여, 재생기 효율이 변함이 없을 경우 TIT가 감소하게 된다. 추가적 연료의 공급이 없으므로 TIT가 감소하면 터빈출력이 감소하여 전체 시스템의 효율도 감소하게 된다. FCT가 700°C와 800°C일 경우 압력비가 높은구간은 TIT가 낮아 가스터빈의 순일이 발생하지 않으므로 설계대상에서 제외하였다. 가압형의 경우 압력비가 증가하면 터빈출구 온도가 낮아지고 재생기를 통해 터빈 출구가스로부터 열을 공급받는 연료전지 입구공기의 온도는 낮아진다. 낮은 압력비에서는 터빈 출구온도가 높아 연료전지 입구공기의 온도가 높기 때문에 재생기의 효율을 낮춰 셀입구 온도를 맞춰준다. 따라서, 압력비가 증가하면서 재생기의 효율이 증가하게 되고 터빈입구온도가 증가하여 가스터빈의 출력이 증가하여 효율도 증가한다. 압력비가 높은 구간에서는 상압형과 마찬가지로 터빈출구 온도가 낮아지면서 셀 입구 온도가 낮아지고 셀 입구온도를 유지하기 위해 후연소기 출구가스에서 연료전지 입구공기에 공급하는 열량이 증가하여 터빈입구온도는 감소하게 된다. FCT 1000°C의 경우는 공기극 출구 가스의 산소분율이 낮아 가연범위를 벗어나서 후연소기에서 연소가 일어나지 않게 되고 이로인해 출구온도가

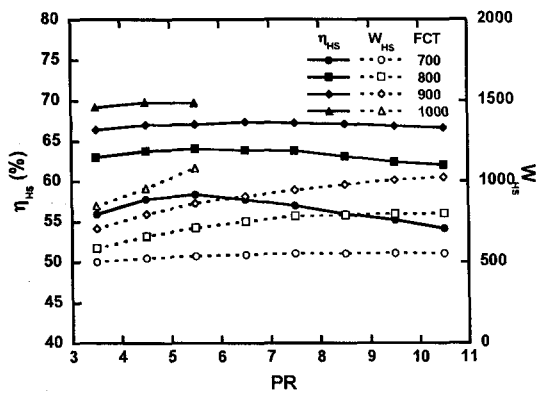


(a) Efficiency and power

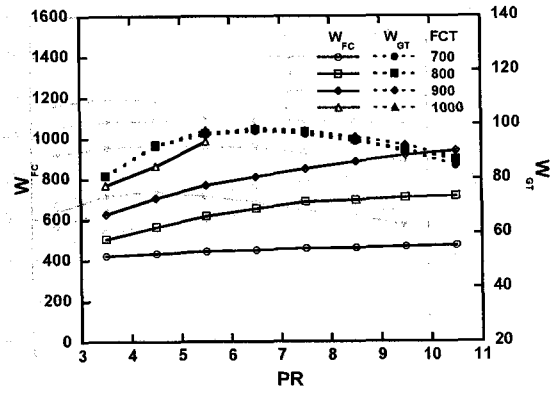


(b) FC power and GT power

Fig. 3 Design performance of the ambient pressure system with additional fuel and air supplied (TIT 850°C)



(a) Efficiency and power



(b) FC power and GT power

Fig. 4 Design performance of the pressurized system with additional fuel and air supplied (TIT 850°C)

크게 감소하여 터빈입구온도가 급격히 감소하게 된다. 따라서 FCT 1000°C일 경우에는 현실적인 설계제한이 따르게 된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 두 번째 조건에 대한 성능 해석 결과이다. Fig.3에 나타난 상압형의 경우 TIT가 너무 낮기 때문에 가스터빈의 순일 발생하지 않아 현실적 설계가 불가능했던 구간까지 설계가 가능하다. 터빈 출구공기가 연료전지에 유입되므로 가스터빈의 압력비에 상관없이 셀 작동압력이 일정하며 셀 전압도 동일한 FCT에서는 일정하게 유지된다. 따라서 동일한 FCT의 경우 연료전지의 출력은 일정하게 유지된다. 하지만 하이브리드 시스템에 1kg/s의 공기가 유입되더라도 제한조건인 셀 입출구 온도차이를 유지하기 위하여 공기는 바이패스하게 되고 그에 따라 터빈에 공급되는 유량이 계속 변화하게 된다. 결국 TIT가 850°C로 유지되더라도 터빈에 공급되는 유량과 압력비가 변화하

게 되므로 가스터빈의 출력은 FCT가 변화에 따라 같이 변화하게 된다.

Fig.4에 나타난 가압형의 경우는 TIT를 고정하지 않았을 경우와 마찬가지로 FCT가 1000°C일 경우는 후연소기에서 공기극 출구가 산소분율이 가용구간을 벗어나 현실적인 설계에 제한이 따르는 구간이다. 가압형은 압축공기가 바로 연료전지로 유입되게 되므로 압력비가 증가하게 되면 연료전지의 작동압력도 증가하게 된다. 따라서 셀 전압이 증가하므로 연료전지의 출력은 압력비가 증가하면 같이 증가하게 된다. 가스터빈의 출력은 모든 조건에서 TIT가 같고 터빈으로 유입되는 유량이 일정하므로 FCT가 변화하더라도 변화하지 않고 압력비의 변화에만 의존하게 된다.

## 5. 결론

제한요소를 고려하고 작동 압력을 변화시킨 하이브리드 시스템의 성능을 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 가압형 시스템의 경우, 셀 작동압력이 상압형에 비하여 높게 유지되어 작동전압 상승으로 셀 출력 비중이 증가하게 되고 따라서 상압형에 비하여 효율이 높은 특성을 가진다.

(2) 연료전지 작동온도와 셀 입출구 온도차이를 고정하면 연료전지 작동압력이 증가할수록 상압형, 가압형 모두 요구되는 터빈입구온도는 감소한다.

(3) 상압형 시스템은 TIT를 고정하지 않는다면 압력비가 높고 FCT가 낮은 구간에서 터빈의 순일이 발생하지 않아 설계의 제한점이 존재하며, 설계제한을 받게되고 가압형 시스템은 TIT에 상관없이 FCT가 1000°C 이상 높은 구간에서는 압력비가 높을 때 연료전지 출구가스의 가연범위를 벗어나 시스템 설계 제한점이 나타나게 된다.

### 참고문헌

1. R. Dennis, G. Burch, M. Williams, P. Hoffman, R. Gross, and S. Samuelsen, 2003, Hybrid Power: A 2003 Perspective for the Decade, ASME paper GT2003-38950.
2. M.C. Williams, J.P. Strakey, and S.C. Singhal, 2004, U.S. Distributed Generation Fuel Cell Program, Journal of Power Sources, Volume 131, Issues 1-2, 14, May, Pages 79-85.
3. S.E. Veyo, W.L. Lundberg, S.D Vora and K.P Litzinger, 2003, Tubular SOFC Hybrid Power System Status, ASME paper GT2003-38943.
4. G. D. Agnew, J. Townsend, R. R. Moritz, M. Bozzolo, S. Berenyi and R. Duge, 2004, Progress in the Development of a low cost 1MW SOFC Hybrid, ASME paper GT2004-53350
5. Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2003, Performance Characteristics Analysis of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid system, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, vol.16, No. 7, pp. 615-622.
6. Yang, W. J., Kim, T. S., Kim, J. H., 2004, Performance Characteristics Analysis of Gas Turbine-Pressurized SOFC Hybrid System Considering Limiting Design Factors, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, vol.16, No. 11, pp. 1013-1020.
7. Yang, W. J., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2005, Comparative Performance Analysis of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems Considering Different Cell Inlet Preheating Methods. Trans. KSME B, Vol. 29. No. 6, pp. 722-729.
8. Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S., Sohn, J. L., Ro, S. T., 2006, Design Performance Analysis of Rressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems Considering Temperature Constraints, Journal of Power Source(in press).
9. Lee, J. H., Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S. and Kim, J. H., 2005, Comparative Analysis on Design Performance of Ambient Pressure and Pressurized SOFC/GT Hybrid Systems, Proc. of the KSME Spring Annual conference, pp. 1943-1948.
10. A.F. Massardo, and F. Lubelli, 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. EG&G Serviced Parson Inc., 2000, Fuel Cell Handbook, 5th Ed, U.S. Department of Energy, USA.
12. Aspen Technology, HYSYS, ver. 3.2.