

상압형 MCFC/가스터빈 하이브리드 시스템의 구성방법에 따른 설계성능 분석

오 경 석, 김 동 섭**

인하대학교 대학원, *인하대학교 기계공학부

Effect of System Configuration on Design Performance of Atmospheric Pressure MCFC/Gas Turbine Hybrid Systems

Kyong Sok Oh, Tong Seop Kim**

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

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

(Received July 13, 2004; revision received August 30, 2004)

ABSTRACT: Design performances of various configurations of hybrid systems combining an atmospheric pressure molten carbonate fuel cell and a gas turbine have been analyzed. Two different fuel reforming methods (internal and external reforming) were considered. Influences of turbine inflow heating method, location of fuel combustor and associated component arrangements were investigated. In general, internal reforming leads to higher system efficiencies. The optimum design pressure ratio varies among different system configurations. In particular, the design point selection is closely related to the allowable turbine inlet temperature. Configurations with direct heating of turbine inlet flow may realize both higher efficiency and higher specific power than those with indirect heating.

Key words: MCFC(용융탄산염 연료전지), Gas turbine(가스터빈), Atmospheric pressure hybrid system(상압형 하이브리드 시스템), Reformer(개질기), Efficiency(효율)

기 호 설 명

F : Faraday 상수 [96,500 C/mol]

HRU : 열회수기

\bar{h} : 단위 몰당 엔탈피 [kJ/kmol]

LHV : 저위 발열량 [kJ/kg]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

\dot{n} : 몰유량 [kmol/s]

PR : 압력비

\dot{Q} : 열전달률 [kW]

SCR : 수증기/연료 비

TIT : 터빈입구온도 [°C]

U_f : 연료 이용률

V : 전압 [V]

\dot{W} : 출력 [kW]

그리스 문자

† Corresponding author

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

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

η : 효율

하첨자

AC : 교류
DC : 직류
FC : 연료전지
GT : 가스터빈

1. 서 론

환경 문제와 에너지 수급문제로 인하여 저공해 고효율 발전시스템의 필요성이 부각되고 있다. 이러한 요구로 인하여 연료전지와 가스터빈에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 특별히 연료전지와 가스터빈을 결합하여 하이브리드 시스템을 구성하는 문제에 대한 연구가 최근 각광을 받고 있다. 분산발전 시스템의 주 동력원으로 고온형 연료전지가 유망한 가운데,⁽¹⁾ 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)와 더불어 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell) 및 이를 이용한 하이브리드 시스템이 선진국을 중심으로 개발중이며,⁽²⁾ 국내에서도 연구가 진행중이다.⁽³⁻⁴⁾ MCFC의 개발현황과 기술적 특성은 문헌에 요약되어 있다.⁽⁵⁾ MCFC의 작동온도는 650°C 내외로 국한된다.⁽⁶⁾ 이처럼 좁은 온도범위를 가지는 MCFC는 셀 자체 성능의 향상에 의한 것보다는 시스템 구성 최적화에 의한 성능향상 효과가 더 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 MCFC와 가스터빈의 하이브리드 시스템에서 설계방식에 따른 성능특성을 알아보고자 다양한 시스템 형태에 대한 해석을 수행한다.

2. 시스템 구성

본 연구에서는 상압형 MCFC/가스터빈 하이브리드 시스템을 해석하였다. 하이브리드 시스템의 구성부는 크게 가스터빈, 연료전지, 그리고 열교환기로 나누어진다. 연료전지는 연료를 수소로 변환시키는 개질기와 수소와 산소간의 반응이 일어나는 셀로 나눌 수 있다. 연료전지는 수소로 작동하는 장치이지만, 수소를 직접 공급하기 어렵기 때문에 탄화수소를 이용하여 수소를 생산하는 개질기가 요구된다. 따라서 개질기는 연료전지 및 하이브리드 시스템의 필수 구성부이며 개질방법에

따라 성능에 큰 차이를 줄 수 있다. 본 연구에서는 외부개질형 두 가지, 내부개질형 네 가지 모델을 계산하였으며, Fig. 1에 구성도를 나타내었다.

(1) Case 1

외부개질형의 기본 구성으로서 연료는 배기가스와 열교환 후 개질기로 유입된다. 개질에 필요한 열은 개질기 버너를 통해 공급한다. 개질과정을 거친 연료는 셀의 연료극으로 유입된다. 연료전지에서 미반응된 연료는 공기극 입구의 연소기에서 연소된 후 셀에 유입된다. 압축공기는 셀 배기가스와 열교환 후 터빈에 공급되며, 터빈 출구가스는 연소기에서 미반응 연료와 연소한다.

(2) Case 2

Case 1을 내부개질형으로 변환한 것이다. 개질기는 셀 내부에 위치하고, 개질과정에 필요한 열은 셀 내부에서 공급된다.

(3) Case 3

이 시스템은 상용화에 가장 근접한 미국의 Fuel Cell Energy사에서 개발하고 있는 모델과 유사한 형태이다.⁽⁷⁾ HRU를 두 부분으로 나누고 두 개의 HRU 사이에 연소기가 위치하도록 시스템을 구성한다. 압축공기가 일차적으로 셀의 출구가스와 열 교환한 후, 다시 연소기 출구가스와 열 교환한 뒤 터빈으로 유입된다.

(4) Case 4

터빈에 유입되는 압축공기를 직접 가열하는 형태로 구성하였다. 이를 위하여 상압에서 작동하는 연료극 가스를 상대적으로 압력이 높은 연소기에 유입하기 위한 압축기가 추가된다.

(5) Case 5

Case 4에서 연료극 출구가스 압축기가 고온에서 작동하므로 이를 보완하여 개질기에 유입되는 연료와 물로 열 교환하여 온도를 낮추도록 한 시스템이다.

(6) Case 6

Case 5를 외부개질형으로 변환한 것으로 개질기에 필요한 열을 개질기 버너를 사용하지 않고, 주 연소기에서 직접 받아들이는 형태이다.

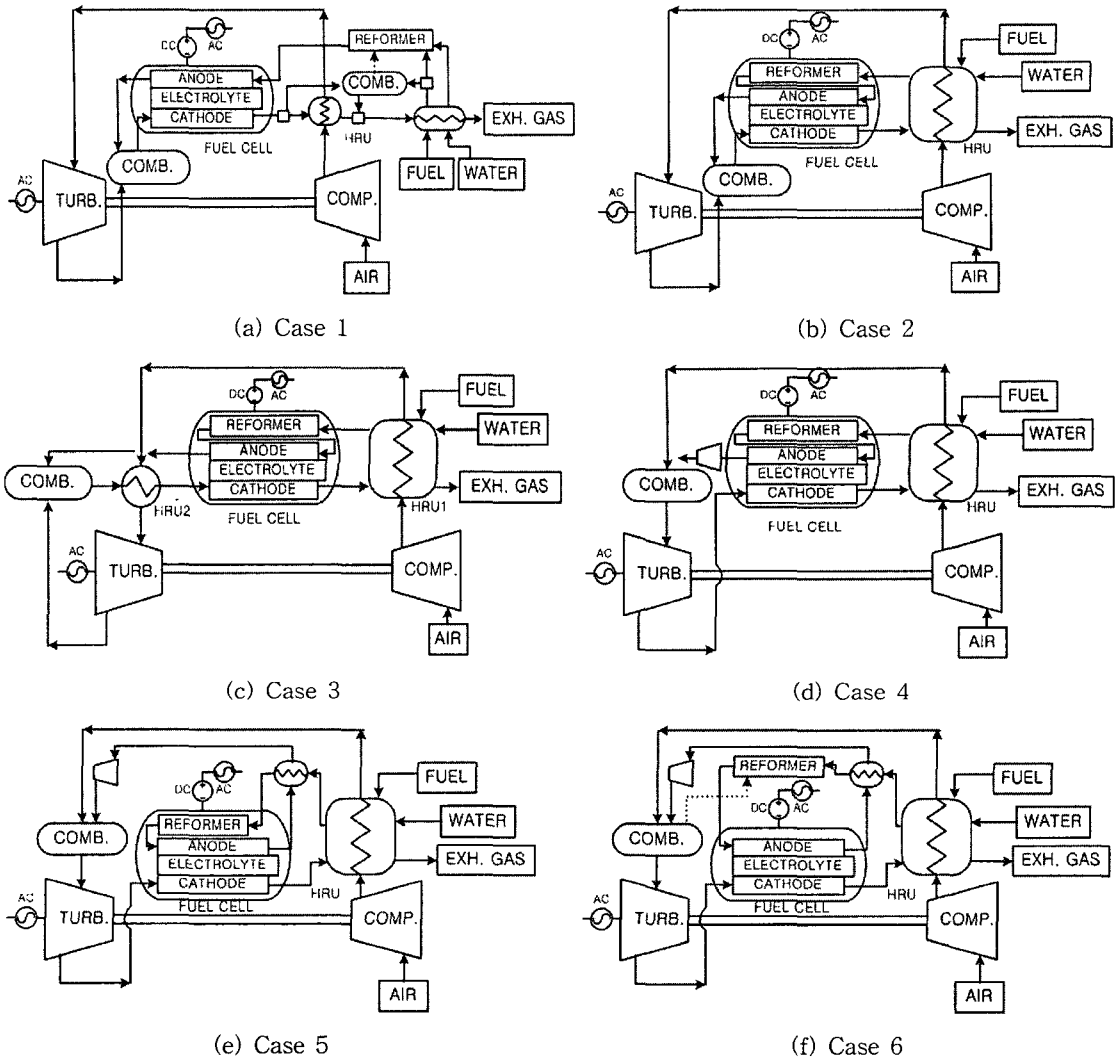
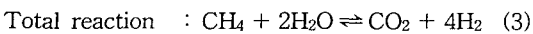
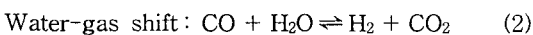
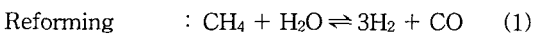


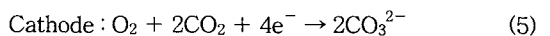
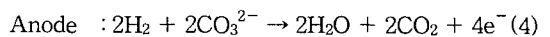
Fig. 1 Various hybrid system configurations.

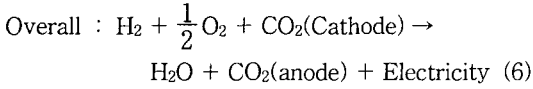
3. 해석방법

다양한 시스템을 대상으로 하여 효과적으로 계산을 수행하기 위하여 화학반응을 포함한 열시스템 해석이 가능한 상용프로그램(8)을 이용하였다. 개질기에서는 1몰의 메탄이 2몰의 물과 1차(reforming), 2차(water-gas shift) 반응을 통하여, 1몰의 이산화탄소와 4몰의 수소를 발생한다.



셀에서는 공기극으로 공급된 가스성분 중 산소와 이산화탄소가 반응하여 탄산이온이 생성된다. 탄산이온은 전해질을 통해 교환되어 연료극의 수소와 반응하게 되는데 이때 전기가 발생되고 연료극에서 수증기가 배출된다. MCFC는 일산화탄소도 연료로 사용한다. 일산화탄소는 화학반응에서 수소 역할을 대신하며, 반응결과 이산화탄소가 생성된다. 셀 내부에서의 수소를 기준으로 한 전기화학반응은 다음과 같다.





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

$$\text{SCR} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}}{\dot{n}_{\text{CH}_4}} \quad (7)$$

한편, 개질과정을 거친 연료가 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.

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

셀반응에서 에너지보존식은 식(9)로 표현된다. 셀의 온도는 출구온도를 의미하며 이 반응식으로부터 구할 수 있다. \dot{Q} 는 외부개질기를 사용하는 경우에는 존재하지 않으며, 내부개질기를 사용하는 경우에는 개질기로 전달되는 열량(음수)이다. 이때 개질기의 온도는 셀온도와 동일한 650°C로 두었다.

$$\sum_P \dot{n}_i \bar{h}_i + \dot{Q} = \sum_R \dot{n}_i \bar{h}_i + \dot{W}_{FC, DC} \quad (9)$$

시스템으로 유입되는 연료의 유량이 정해지면 발생하는 전류가 결정되고, 연료전지에서 발생하는 직류출력은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{FC, DC} = 2(\dot{n}_{\text{H}_2, \text{reacted}} + \dot{n}_{\text{CO, reacted}}) \times F \times V \quad (10)$$

연료전지에서 발생한 직류출력은 DC/AC 변환 효율(0.98)을 사용하여 교류출력으로 환산하였다.

하이브리드 시스템의 전체 출력과 효율은 다음과 같이 계산된다.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{total, AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{fuel}} \quad (11)$$

Table 1 Main parameters for analysis

Turbine efficiency	0.90
Compressor efficiency	0.85
HRU effectiveness (water & fuel)	0.78
HRU effectiveness (air)	0.86
HRU2 effectiveness	0.89
U_f	0.78
SCR	2.5
Cell operating temperature	650°C
Cell voltage	0.8 V

$$\dot{W}_{total, AC} = \dot{W}_{FC, AC} + \dot{W}_{GT, AC} \quad (12)$$

계산에 사용된 주요 파라미터들은 상용화에 근접한 시스템⁽⁷⁾의 데이터를 근거로 정하였으며, 그 값은 Table 1에 요약하였다.

4. 결과 및 토의

압력비를 변수로 각 시스템을 해석하였으며, 그 결과는 Fig. 2~5에 나타내었다. Fig. 2~4는 성능을 나타내고, Fig. 5는 중요한 설계인자인 터빈 입구온도(TIT)를 보여준다. 비출력(specific power)은 압축기 입구공기 단위유량당 출력을 의미한다.

하이브리드 시스템의 출력은 셀의 출력과 같은 경향을 가진다. 이는 시스템 출력의 대부분이 셀에서 발생하기 때문이다. 반면 효율 특성은 가스 터빈의 출력변화와 유사하게 나타난다. 가스터빈 출력은 도시하지 않았으나, 계산한 압력비 범위 내에서 최대값을 가진다. 하이브리드 시스템에서 가스터빈은 셀에서 반응 후 나오는 열의 일부를 동력으로 전환하는 역할을 담당한다. 터빈출력의 증가는 효과적으로 열을 회수한 것을 의미하고, 이것이 시스템 효율의 향상으로 나타난다. 그 결과 전체 시스템 효율은 적정 압력비에서 최대값을 가진다.

외부개질형인 case 1과 case 6의 출력이 내부개질형 모델에 비하여 현저하게 낮게 나타난다. 그 이유는 셀 출력값이 작기 때문이다. 셀 출력은 전기화학반응에 참가하는 연료의 양으로 결정된다. 외부개질기를 사용하면 셀이 단열상태에서 작동하고, 내부개질기를 사용하면 셀에서 발생한 열의 일부가 개질반응을 위하여 개질기로 전달된

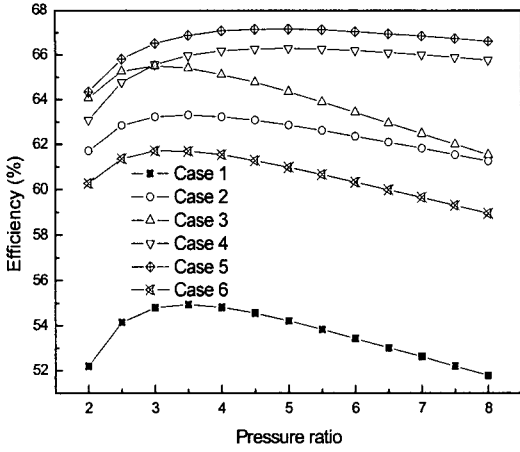


Fig. 2 Variations in system thermal efficiency.

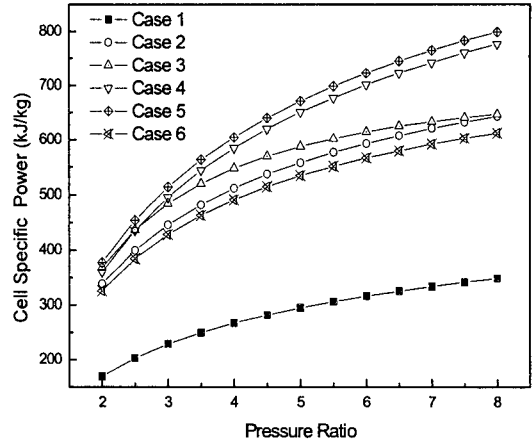


Fig. 4 Variation in fuel cell specific power.

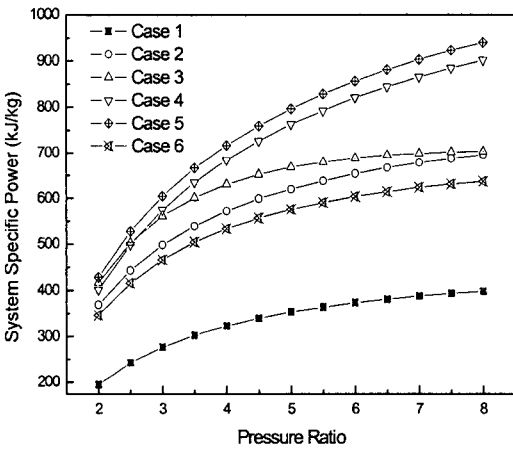


Fig. 3 Variation in system specific power.

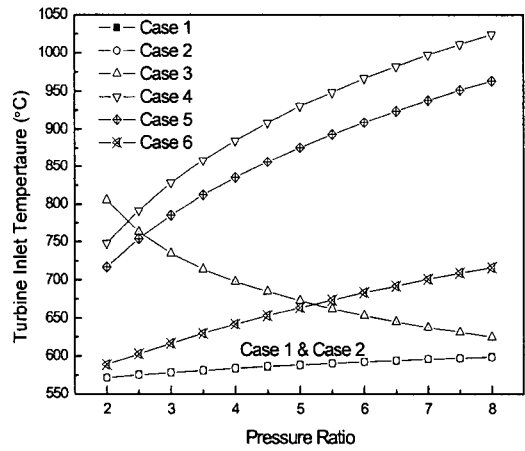


Fig. 5 Variation in turbine inlet temperature.

다. 따라서 외부개질형 시스템에서는 셀온도를 유지하기 위하여 필요한 연료량(연료/공기비)이 적고, 반대로 내부개질형 시스템의 셀은 개질기의 열전달이 존재하므로 상대적으로 많은 연료가 반응하며 셀의 출력이 더 크다.

시스템의 효율도 내부개질형 모델이 외부개질형 모델보다 높게 나타난다. 외부개질 시스템은 개질과정에 필요한 열을 외부에서 직접 공급받는다. 이는 시스템에 추가적으로 연료가 공급되어야 함을 의미하고, 시스템 효율을 저하시키는 원인이 된다. Case 6의 경우 추가적인 연료의 공급은 없지만, 연소기에서 발생한 열을 개질기로 공급함으로써, TIT는 낮아지고 터빈에서의 열회수가 어려워진다. 그 결과 시스템의 효율이 저하된다.

Case 1은 기본적인 외부개질형 상압형 하이브리드 시스템 모델이다. 외부 개질기를 사용함으로써 개질과정에 필요한 열을 개질기 버너로부터 받아들인다. 개질과정에 필요한 열을 공급하기 위하여 추가적인 연료공급이 필요로 하며, 이는 효율이 낮아지는 원인이 된다.

Case 2는 case 1에 상응하는 내부개질형 모델로서 개질과정에 필요한 열을 외부에서 추가로 공급하지 않지 않는다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 셀 내부에서 개질과정에 필요한 열을 흡수하기 때문에 더 많은 연료공급이 가능하여 성능이 향상된다.

Case 3은 압축공기를 셀의 출기가스와 연소기 출기가스로 두 번 열교환을 하여, case 2의 경우

보다 TIT를 상승시켜 시스템의 효율이 향상된다. 하지만 압력비가 증가함에 따라 TIT가 감소하는 경향을 나타낸다.

Case 4는 터빈에 유입되는 공기를 직접 연소하여 사용하므로 아주 낮은 압력비를 제외하면 case 3에 비하여 TIT가 더 높으며, 연료전지에 상대적으로 더 많은 연료가 공급되어 출력이 더 크다. 이러한 경향은 압력비가 높을수록 두드러진다. 따라서 압력비가 높아질수록 case 3에 비해 효율이 향상된다. 한편, 공기극 미반응 연료를 연소기에 공급하기 위하여 압축기(보조압축기)가 사용되며, 이때 추가적으로 동력이 필요하다. 또한 이 압축기의 입구온도가 셀 출구온도인 650°C에서 작동해야 하므로 현실적인 어려움이 따른다.

Case 5에서는 case 4에서 현실적으로 문제가 될 수 있는 고온의 보조압축기의 작동온도를 낮추기 위하여 개질기로 유입되는 상대적으로 저온인 연료(실제적으로는 연료/물 혼합물)와 열교환시킨다. 이 열교환을 통하여 case 4에 비하여 200°C 이상 보조압축기 입구온도를 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 연소기에 유입되는 연료의 온도도 낮아지고, TIT도 case 4와 비교하여 다소 감소하게 된다. 출력과 효율은 case 4에 비해 소폭 상승한다.

Case 6은 case 5에 상응하는 외부개질형 시스템으로서 일반적인 외부개질형 시스템과 달리 개질과정에 소요되는 열을 주연소기에서 공급받는다. 개질반응에 필요한 열이 주 연소기에서 발생하고, 개질기로 전달되므로 개질기에 필요한 열을 공급하기 위한 개질기 버너는 사용되지 않고, 추가연료의 공급이 없다. 이러한 이유로 인하여 이 시스템은 비록 외부개질기를 사용하지만 기본적인 외부개질형인 case 1에 비하여 출력과 효율이 월등히 높고 내부개질형 시스템들의 성능에 근접한다.

한편 내부개질형 시스템들(case 2~5)은 터빈 입구공기를 간접 가열한 시스템들(case 2, 3)과 직접 가열(연소)한 시스템들(case 4, 5)로 분류할 수 있다. Case 2, 3은 압력비가 상대적으로 낮은 수준에서 최고 효율점을 가지고, case 4, 5는 높은 압력비에서 최고 효율점을 가진다.

Case 2, 3에서는 공기극 입구가스(유입 이전에 일부 연소)가 가열되어 유입되므로 온도가 높고, 반대로 case 4, 5에서는 터빈팽창 후에 바로 유

입되므로 온도가 상대적으로 낮다. 이로 인하여 case 4, 5에서 셀에 더 많은 연료공급이 가능하고 따라서 셀 출력이 증가한다. 이에 더하여 TIT가 더 높기 때문에 가스터빈 출력도 더 크다. 이러한 경향은 압력비가 높을수록 두드러진다. 따라서 상대적으로 높은 압력비에서 최고 효율점이 존재하고 case 2, 3에 비해 효율이 더 높다. 결과적으로 실현 가능한 터빈 입구온도가 높을수록 터빈 입구에 연소기를 위치시키는 방법(case 4, 5)을 사용하고 가스터빈의 압력비를 높게 설정하는 것이 하이브리드 시스템의 출력과 효율을 높게 설계하는 방법이라 판단된다.

5. 결 어

상압형 MCFC/GT 하이브리드 발전시스템의 설계 형태에 따른 성능차이를 비교 분석하였다. 서로 다른 연료개질방법(내부, 외부 개질), 터빈에 공급되는 공기의 가열방법 등에 따라 6가지의 시스템 형태를 설계하여 해석하였다.

내부개질형 시스템은 외부개질형 시스템보다 높은 출력과 효율을 가진다. 하지만 외부개질형 시스템도 구성방법에 따라 내부개질 시스템에 근접한 성능설계가 가능하다. 터빈 입구공기를 직접 가열하는 방법을 사용하면 간접 가열하는 방법을 사용하는 경우보다 연료전지, 가스터빈 모두의 출력을 크게 설계할 수 있다. 이를 위해서 상대적으로 더 높은 터빈 입구온도가 필요하며, 압력비를 높일수록 더 높은 터빈 입구온도가 요구된다. 그러나 상당히 높은 압력비에서도 터빈 입구온도가 900°C를 넘지 않는 것으로 분석되어 실현 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 최적 효율점 부근에서 효율이 압력비 변화에 따라서 크게 변하지 않으므로 최적 효율설계에 유리하다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원(R05-2001-000-01128-0)으로 수행되었음.

참고문헌

1. 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.
2. National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, <http://www.netl.doe.gov>.
 3. Kang, B.S., Koh, J.H. and Lim, H.C., 2001, Effects of system configuration and operating condition on MCFC system efficiency, Journal of Power Sources, Vol. 108, pp. 232-238.
 4. Jeong, Y.H. and Kim, T.S. 2003, Performance design analysis of hybrid systems combining atmospheric pressure molten carbonate fuel cell and gas turbine, Trans. of KSME B, Vol. 27, No. 10, pp. 1361-1369.
 5. Vielstich, W, Lamm, A. and Gasteiger, H. A., 2003, Molten carbonate fuel cells and systems (MCFC), Handbook of Fuel Cells, John Wiley & Sons, Vol. 4, Part 7.
 6. Larminie, J. and Dicks, A., Fuel Cell System Explained, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 146-164.
 7. Ghezel-Ayagh, H, Daly, J.M. and Wang, Z. H., 2003, Advances in Direct Fuel Cell/Gas Turbine Power Plant, ASME paper GT2003-38941.
 8. Aspen Technology, 2004, HYSYS, ver. 3.2.