

〈 논문 〉

PEM 연료전지 및 하이브리드 시스템의 설계변수 해석

유병준* · 김동섭[†] · 이영덕** · 안국영**
(2006년 12월 27일 접수, 2007년 4월 19일 심사완료)

Design Parametric Analysis of PEM Fuel Cell and Hybrid Systems

Byung June You, Tong Seop Kim, Young Duk Lee and Kook Young Ahn

Key Words: PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Gas Turbine(가스터빈), Hybrid System(하이브리드 시스템), Steam Reforming(수증기개질), Autothermal Reforming (자열개질)

Abstract

Performance of PEM fuel cell systems and hybrid systems combining a PEMFC with a gas turbine have been evaluated. Two different reforming methods(steam reforming and autothermal reforming) were considered. Performances of fuel cell systems with two reforming methods were compared and effects of various design parameters on the system performance were investigated. Configurations of PEM fuel cell systems with two reforming methods have been revised to accommodate a gas turbine, resulting in PEMFC/GT hybrid systems. Performance of the hybrid systems were analyzed and compared with those of PEM systems. Influences of major design parameters on the hybrid system performance were also investigated.

기호설명

ATR	: 자열개질
GT	: 가스터빈
I	: 전류
LHV	: 저위발열량
\dot{m}	: 질량유량
\dot{n}	: 물유량
OCR	: 산소/연료비
PR	: 압력비
PEMFC	: 고분자 전해질 연료전지
POX	: 부분산화
SCR	: 수증기/연료비
SR	: 수증기 개질

TIT	: 터빈 입구 온도
U_f	: 연료이용률
V	: 전압
\dot{W}	: 출력
η_{conv}	: 변환효율
η_{gen}	: 발전기효율
η_m	: 기계효율
η_{th}	: 열효율

하침자

AC	: 교류
DC	: 직류
f	: 연료
FC	: 연료전지
GT	: 가스터빈
HB	: 하이브리드

* 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : kts@inha.ac.kr

TEL : (032)876-7307 FAX : (032)868-1716

** 학생 회원, 인하대학교 대학원

*** 한국 기계 연구원

1. 서 론

최근 에너지 부족과 환경오염 문제로 인하여

저공해, 고효율 발전시스템의 필요성이 증가되고 있다. 특히 연료전지가 여러 분야에서 각광을 받고 설용화를 위한 활발한 연구가 이루어지고 있는 가운데,⁽¹⁾ 저온형 연료전지인 PEMFC의 상용화를 위한 연구도 여러 분야에서 이루어지고 있다.⁽²⁾ 특히 소규모 차세대 전력공급원으로서 연료전지의 필요성이 증가되고 있으며 PEMFC 시스템의 상용화를 위한 기술, 성능향상 연구⁽³⁾ 및 생산비용 절감을 목표로 한 10kW급의 연료전지 개발⁽⁴⁾도 이루어지고 있다. 연료전지를 운전하는데 필요한 수소를 만드는 연료개질 방법에는 수증기 개질(Steam Reforming, SR), 부분산화개질(Partial Oxidation, POX), 자열개질(Auto-thermal Reforming, ATR)이 있다. ATR은 SR과 POX와의 조합으로 인한 개질 방법으로써 개질기 외부로부터 열의 출입이 없는 특징이다. 또한 ATR은 다른 개질기에 비해 빠른 응답성과 작은 부피로 제작할 수 있어서 소규모 발전시스템에 적합하다. 본 연구에서는 PEMFC을 기반으로 두 가지 개질방법(SR, ATR)으로 설계되는 10kW급의 소형 발전시스템을 모델링하여 주요 설계파라미터 변화에 대한 시스템의 성능을 비교 해석하였다.

한편, 최근에는 연료전지와 기존 열기관들을 결합하여 성능을 향상시키기 위한 하이브리드 시스템에 대한 연구도 활발하게 진행 중이다. 특히 SOFC(고체산화물 연료전지), MCFC(용융탄산염 연료전지) 등 고온형 연료전지에서는 연료전지에 가스터빈을 결합한 하이브리드 시스템(hybrid system)이 각광 받고 있다. 하이브리화를 통하여 효율향상이 가능하며, 항상 정도는 시스템 구성에 따라 차이가 나는 것으로 알려지고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 PEMFC에서 하이브리드화에 의한 성능향상 여부를 확인하기 위한 해석도 수행하였다. SR, ATR을 이용한 각 PEMFC에 가스터빈을 추가로 결합하여 PEMFC/GT 하이브리드 시스템을 구성하고 성능을 해석하여 PEMFC 만의 시스템과 비교하였다.

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 PEMFC 시스템 구성 및 개요

연료는 메탄(CH₄)을 개질방법으로는 SR, ATR 두 가지를 고려하였다. SR-PEMFC 시스템(Fig. 1)에서는 개질기에 연료와 물이 공급되고 수증기

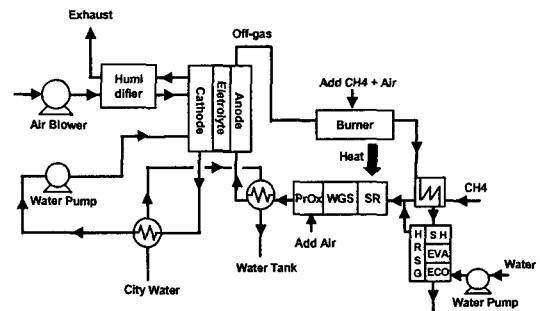


Fig. 1 Atmospheric SR-PEMFC system

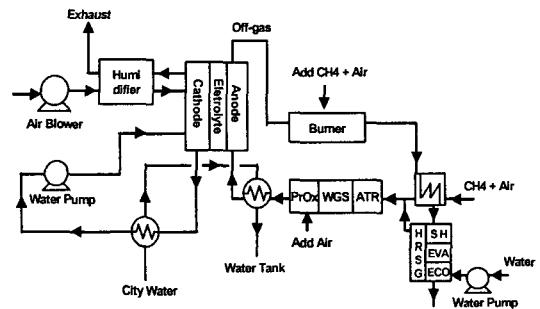


Fig. 2 Atmospheric ATR-PEMFC system

개질 반응을 통해 수소가 생성된 후 연료극에 공급된다. 공기는 막 가습기를 통과한 후 상대습도 100% 상태로 공기극에 공급되고 연료전지에서는 연료극의 수소와 공기극의 산소가 전기화학 반응을 통해 전기를 발생시킨다. 연료극에서 배출된 미반응 연료에는 메탄과 공기를 추가로 공급하고 버너에서 연소시켜 수증기 개질에 필요한 열을 공급한다. 버너 출구가스는 열교환기를 통해 개질기로 공급되는 연료와 물을 예열시킨 후 배출된다. ATR-PEMFC 시스템(Fig. 2)에서는 개질기에 연료, 물, 공기가 공급되고 개질기 외부에서의 개질열 공급 없이 자열개질 반응을 통해 수소가 생성된 후 연료극에 공급된다. 공기는 막 가습기를 통과한 후 상대습도 100% 상태로 공기극에 공급된다. 연료극에서 배출된 미반응 연료에 공기만을 추가로 공급하여 버너에서 연소시킨다. 버너 출구가스는 열교환기를 통해 개질기로 공급되는 연료, 물, 공기를 예열시킨 후 배출된다.

SR, ATR-PEMFC 시스템 모두 연료전지 스택 냉각은 수냉 방식을 사용하였고, 냉각수는 펌프를 통하여 순환되어진다. 냉각용으로 사용되는 물(City water)은 스택에서 배출되어진 냉각수와 열교환을 하여 냉각수 온도를 낮추고, 다시 개질

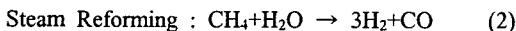
기 출구가스와 열교환을 하여 개질기 출구가스 온도를 연료전지 작동온도까지 냉각하는 역할을 한다.

2.2 PEMFC 시스템 모델링

PEMFC 시스템은 크게 연료전지, 개질기, 가습기로 나눌 수 있다. 개질기에 공급되는 연료와 물의 몰비(SCR)는 다음과 같이 정의된다.

$$SCR = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (1)$$

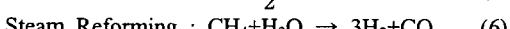
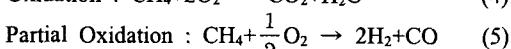
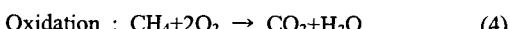
SR-PEMFC 시스템에서는 수증기 개질기 입구 온도를 300°C, 수증기개질 온도를 750°C로 설정하였다. 수증기개질의 화학반응식은 식 (2)와 같으며 평형반응으로 가정하였다. 수증기 개질은 흡열반응이므로 개질에 필요한 열은 버너에서 공급하는 것으로 모델링하였다.



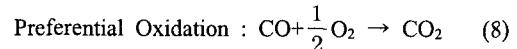
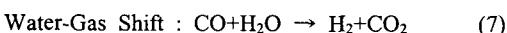
ATR-PEMFC 시스템에서는 자열개질기 입구온도를 600°C로 설정하였다. 개질기에 공급되는 연료와 산소의 몰비(OCR)는 다음과 같이 정의된다.

$$OCR = \frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (3)$$

자열개질의 화학반응식은 식 (4)~(6)을 고려하였으며, 세 가지 화학반응의 반응율을 조합하여 반응온도가 750°C가 되도록 모델링하였다.

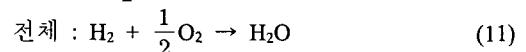
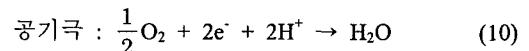
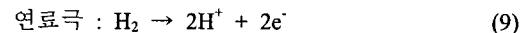


SR, ATR-PEMFC 시스템 모두 개질 후에는 식 (7)의 수성가스반응을 고려하였으며 반응온도는 230°C로 설정하였다. 그리고 공기를 추가로 공급하여 식 (8)의 선택적 산화반응을 고려하였으며, 반응온도는 180°C로 설정하였다. 식 (7), (8) 모두 평형반응으로 가정하였다.



연료전지는 연료극, 공기극, 전해질로 나눌 수 있으며 연료극에는 수소가 포함된 개질기 출구가스가 공급되고, 공기극에는 막 가습기로부터 수분과 열을 공급받아 상대습도 100% 상태의 공기가 공급된다. 연료전지 스택온도는 냉각수의 유량을 조절하여 설정한 연료전지 스택온도를 유지하도록 모델링하였다.

연료전지에서 수소이온은 전해질을 통해 공기극으로 이동하여 산소와 반응한다. 이때 전기가 발생되고 공기극에서는 물이 배출된다. 연료전지 연료전지 내부에서의 화학반응은 다음과 같다.



연료 이용률(U_f)은 다음과 같이 정의된다.

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2, reacted}}{\dot{n}_{H_2, supplied}} \quad (12)$$

연료전지에서 발생되는 직류 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{W}_{FC, DC} = V \cdot I \quad (13)$$

연료전지에서 발생되는 직류를 교류로 변환시키는 변환효율(η_{conv})은 95%로 가정하였고, 시스템의 교류출력과 열효율은 블로워와 펌프 같은 보조동력을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{W}_{FC, AC} = \dot{W}_{FC, DC} \cdot \eta_{conv} - \dot{W}_{AUX} \quad (14)$$

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

상용 프로그램을⁽⁹⁾ 사용하여 시스템을 모델링하고 해석을 수행하였다. 기준 설계성능 계산에서는 연료전지 작동온도 70°C, 셀전압 0.7V, 연료

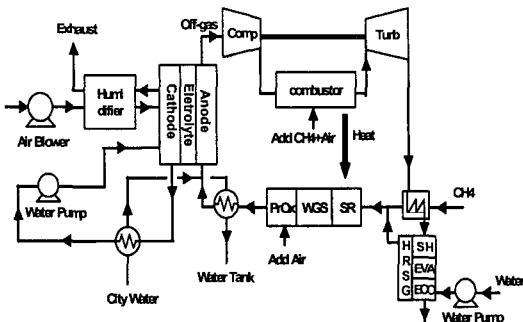


Fig. 3 Atmospheric SR-hybrid System

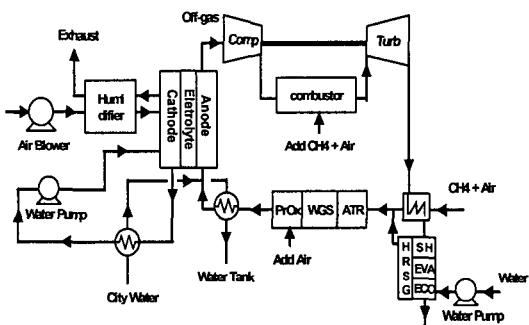


Fig. 4 Atmospheric ATR-hybrid System

이용율 0.7로 설정하여 기준 설계성능을 구하였으며, 주요 설계파라미터들의 값들을 변화시키면서 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 단, 본 논문에서 수행한 파라미터 계산은 모두 독립적인 설계성능이다. 즉, 하나의 파라미터가 변하더라도 다른 파라미터는 기준 성능계산시의 값으로 일정하게 두었다. 예를 들어, 공급되는 연료유량이 변하더라도 셀전압은 기준 설계 값으로 설계된다고 가정한다. 본 논문에서의 설계파라미터 변화는 기준설계 상태에서 운전조건이 변할 때의 성능해석이 아닌, 설계파라미터가 변할 때마다 각기 다른 설계성능의 구성부를 가지는 시스템 성능을 예측한 것이다. 즉, 각각의 경우가 독립적인 설계에 해당한다.

2.3 하이브리드 시스템 개요 및 모델링

두 가지 개질방법을 가지는 PEMFC 시스템에 가스터빈을 결합하여 PEMFC/GT 하이브리드 시스템을 구성하였다. SR(Fig. 3), ATR(Fig. 4) 하이브리드 시스템 모두 연료극 출구가스에 추가로 공기를 공급하여 압축한 후 연소기로 공급한다. 연소기에는 추가로 연료를 공급, 연소시킨 후 터

Table 1 PEMFC system reference design parameter

Reforming methods	SR	ATR
U_f	0.7	
SCR	3	1.6
OCR	-	0.52
Power(kW)	10	
Fuel mass flow(g/s)	0.617	0.665
Air mass flow(g/s)	13.8	13.8
$\eta(\%)$	32.35	30.05

빈을 구동한다. SR, ATR 하이브리드 시스템 모두 터빈 출구가스가 개질기 입구 열교환기로 공급된다. 두 시스템 모두 연료전지가 상압에서 작동하는 상압형 시스템(ambient pressure system)이다. 연료전지 출력은 교류를 기준으로 하고 가스터빈의 출력은 발전기에서 발생되는 출력을 기준으로 계산하였다. 본 논문에서의 가스터빈은 현재 발전용으로 사용되고 있는 가스터빈보다 비교적 소형이므로 터빈과 압축기의 효율은 현재 발전용 가스터빈보다 낮은 효율을 사용하였다. 터빈의 등엔트로피 효율은 70%, 압축기 등엔트로피 효율은 70%로 가정하였으며, 압축기 기계효율(η_m)은 99%, 발전기효율(η_{gen})은 98%로 가정하였다. 하이브리드 시스템의 출력과 열효율은 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{W}_{HB,AC} = \dot{W}_{FC,AC} + \dot{W}_{GT,AC} - \dot{W}_{AUX} \quad (16)$$

$$\dot{W}_{GT} = (\dot{W}_T - \dot{W}_C / \eta_m) \cdot \eta_{gen} \quad (17)$$

$$\eta_{th,HB} = \frac{\dot{W}_{HB,AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_f} \quad (18)$$

3. 해석 결과

3.1 PEMFC 시스템

개질기로 공급되는 연료량은 시스템의 주요 설계파라미터 값을 고정시키고 시스템 출력력이 10kW가 되도록 계산하였다. Table 1에는 개질기로 공급되는 연료량을 계산하는데 사용된 주요 설계파라미터 값들과 계산된 연료량을 기준으로 한 설계효율을 나타내었다. 두 시스템의 계산 결과 SR-PEMFC 시스템이 ATR-PEMFC 시스템보다 높은 설계효율을 나타내었다. 수증기 개질은 화학

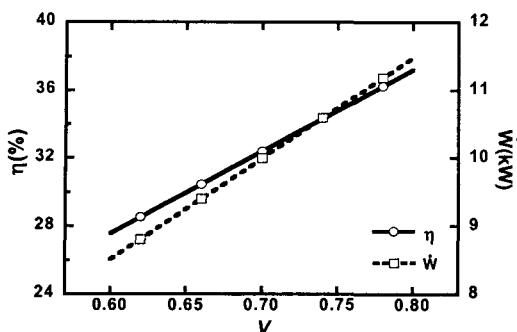


Fig. 5 Effect of cell voltage on the SR-PEMFC system performance

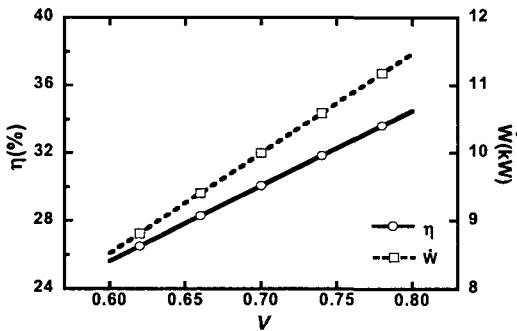


Fig. 6 Effect of cell voltage on the ATR-PEMFC system performance

반응상 자열개질보다 연료변환율이 높아서 자열개질보다 적은 연료량으로 동일한 출력을 얻을 수 있기 때문이다. 본 연구에서의 PEMFC 시스템은 개질기와 버너를 제외한 구성요소들의 작동온도가 70°C 미만이기 때문에 상대적으로 고온인 버너 출구가스의 열회수가 시스템 열효율에 영향을 미친다. SR-PEMFC 시스템은 연료극 미반응연료를 버너에서 연소시키는 것으로는 개질반응에 필요한 열량이 부족하다. 그러므로 버너에 항상 추가로 연료와 공기를 공급하기 때문에 버너 출구가스의 온도를 원하는 값으로 설계할 수 있다. 따라서 개질기 입구 온도가 고정된 상태에서 열교환기효율(heat exchanger effectiveness)을 원하는 값으로 설계하여 버너에 추가로 공급되는 연료량을 최소화 할 수 있다. 반면, ATR-PEMFC 시스템은 연료전지 미반응 연료에 추가로 공기만을 공급하여 버너에서 연소시킨 후 개질기 입구 열교환기로 공급된다. 그러나 연료전지 미반응연료량은 연료전지의 U_f 에 의해 정해지기 때문에 버너 출구가스의 온도를 일정하게 설계할 수 없다. 따라서 개질기 입구온도가 600°C로 고정된 상태에서 버너 출구가스의 온도가 높아질수록 열

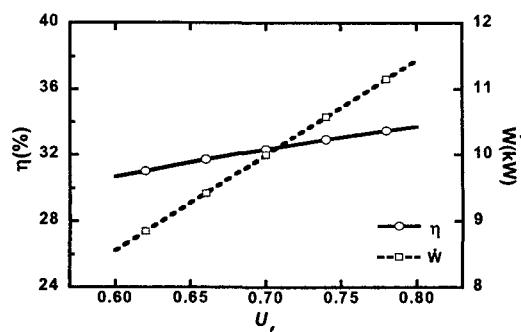


Fig. 7 Effect of U_f on the SR-PEMFC system performance

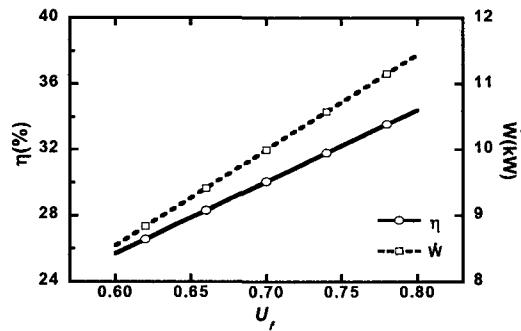


Fig. 8 Effect of U_f on the ATR-PEMFC system performance

교환기의 열회수량이 작아진다.

Fig. 5는 셀전압의 변화에 따른 SR-PEMFC 시스템의 출력과 열효율을 나타내었다. U_f 가 고정된 상태에서 셀전압이 변화하면 시스템의 출력과 열효율이 같이 변화한다. 셀전압이 변하면 시스템의 다른 설계파라미터에 영향을 주지 않고 연료전지 출력이 변화하므로 기준 설계성능에 대한 셀전압의 상대적인 변화량과 시스템의 출력, 열효율의 상대적인 변화량이 거의 동일하다. Fig. 6은 셀전압의 변화에 따른 ATR-PEMFC 시스템의 출력과 열효율을 나타내었다. SR-PEMFC 시스템과 마찬가지로 셀전압의 상대적인 변화량만큼 시스템 출력과 열효율이 변하였다.

Fig. 7은 U_f 의 변화에 따른 SR-PEMFC 시스템의 출력과 열효율을 나타내었다. 셀전압이 고정된 상태에서 U_f 가 증가한 설계에서는 시스템의 출력과 열효율이 높다. U_f 가 증가하면 연료전지 출력이 증가하지만 연료극 출구가스의 미반응연료량이 감소한다. 개질기 입구온도를 300°C, 개질기 입구 열교환기 성능을 일정하게 설계했기 때문에 열교환기로 공급되는 버너 출구가스의 온도를 일정하게 설계해야 한다. 따라서 버너에 추가

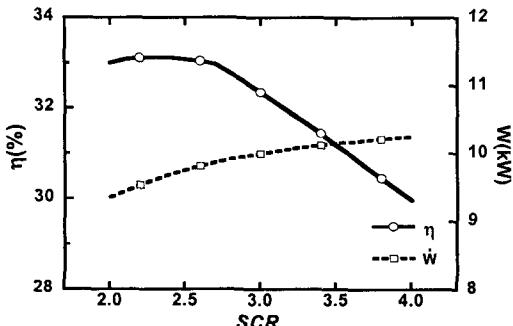


Fig. 9 Effect of SCR on the SR-PEMFC system performance

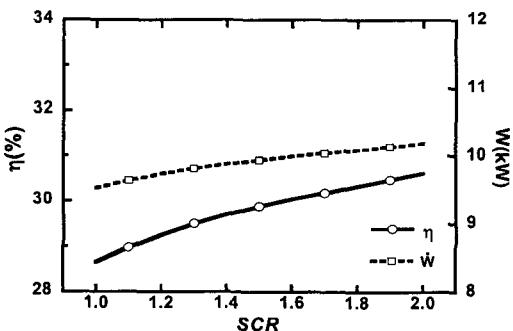


Fig. 10 Effect of SCR on the ATR-PEMFC system performance

로 공급되는 연료량이 증가하지만 증가된 추가 연료량이 U_f 변화에 따른 연료전지 출력증가량보다 적기 때문에 시스템 열효율이 향상되는 결과를 나타냈다.

Fig. 8에는 U_f 의 변화에 따른 ATR-PEMFC 시스템의 출력과 열효율을 나타내었다. U_f 의 변화에 따라서 시스템의 출력 및 열효율이 같이 변화한다. 그리고 열효율의 변화가 SR-PEMFC 시스템보다 크게 나타난다. U_f 가 증가하면 연료전지 출력이 증가하지만 연료극 출구가스의 미반응 연료량이 줄어든다. 하지만 ATR-PEMFC 시스템은 버너에서 개질열을 공급하지 않으므로 U_f 가 0.8일 때 개질기 입구 연료량의 약 5% 정도만 버너에 공급하면 개질기로 공급되는 연료, 물, 공기를 열교환기를 통해서 600°C까지 예열시킬 수 있다. 따라서 연료전지의 상대적인 출력증가량과 비슷하게 열효율도 증가한다. U_f 가 감소하면 연료전지 출력이 감소하지만 미반응 연료가 증가한다. 따라서 버너에 추가로 연료를 공급하지 않아도 개질기로 공급되는 연료, 물, 공기를 설계된 개질기 입구온도까지 예열시킬 수 있는 버너 출구가스 온도를 얻게 되며, 연료전지 출력의 상대적인 감소량만큼 시스템 열효율도 감소하게 된다.

Fig. 9에는 SR-PEMFC 시스템의 SCR에 따른 출력과 열효율을 나타내었다. SCR이 증가하면 개질기 출구의 수소유량이 증가하여 출력이 증가한다. 하지만 열효율은 증가하다가 SCR이 2.8 이상에서는 감소하는 경향을 가진다. SCR이 증가하면 개질기로 공급되는 물의 유량이 많아져 개질반응에 필요한 열이 증가한다. 따라서 개질열을 공급하는 버너에서 추가로 공급하는 연료량이 증가하기 때문에 열효율이 감소한다.

Fig. 10에는 ATR-PEMFC 시스템의 SCR의 변화에 따른 출력과 열효율을 나타내었다. OCR은 개질기 운전범위 내에서 개질기 출구의 수소유량이 최고점을 가지는 0.52로 고정하고 계산하였다. SCR이 증가해도 개질기 외부에서의 열공급 없이 자열개질 반응을 통하여 수소생성이 증가하므로 연료전지 출력이 증가하고 시스템 열효율이 증가한다.

보조기기인 블로워, 펌프의 효율에 따른 PEMFC 시스템의 성능변화는 다른 설계파라미터에 의한 성능변화에 비해 작다. 다만, 블로워의 경우에 효율을 70%로 예상하였으나, 10kW 시스템에 사용되는 블로워의 용량이 0.25kW 내외임을 감안하면 이러한 소형 시스템에서 블로워의 효율이 이보다 훨씬 낮을 가능성은 있다. 효율이 30% 정도로 매우 낮다고 가정하면 70%로 가정한 경우에 비하여 시스템 열효율이 절대 값으로 약 1% (상대적으로 약 3%) 정도 감소하는 것으로 예상된다. 따라서 주변기기의 고성능화도 중요한 시스템 성능향상 인자라 하겠다.

3.2 PEMFC/GT 하이브리드 시스템

하이브리드 시스템에서도 주요 연료전지 파라미터들인 셀전압, U_f , SCR, OCR, 연료전지 작동온도는 앞선 PEMFC 시스템들에서의 값들과 동일하게 두었다. 추가 구성부인 가스터빈에서 압축기와 터빈의 효율은 각각 70%로 설정하였다.

먼저, 추가적인 주요 설계파라미터인 터빈입구온도와 압력비를 고정하고서 하이브리드 시스템의 성능을 예측하였다. Table 2에는 한 예를 보였다. 개질기 입구로 공급되는 연료량은 하이브리드 시스템의 출력이 10kW가 되도록 계산하였다. 하이브리드 시스템의 열효율이 앞서 예측한 연료전지만의 시스템의 열효율에 비하여 크게 개선되지 않거나 오히려 더 낮을 수도 있다.

Table 2 Example of hybrid system performance

Reforming methods	SR	ATR
PR	3	
TIT(°C)	1000	1045
Power(kW)	10	
Fuel mass flow(g/s)	0.654	0.637
Air mass flow(g/s)	13.1	13.2
η (%)	30.57	31.37

Table 2의 설계성능을 기준으로 하여 한 가지 설계파라미터를 변화시키면서 시스템 성능에 미치는 영향을 예측하였다. Fig. 11에는 SR-하이브리드 시스템의 U_f 의 변화에 따른 성능변화를 나타내었다. U_f 가 증가하면 출력과 열효율 모두 증가한다. U_f 가 증가함에 따라 연료전지의 출력이 증가하지만 연료전지 미반응 연료량이 줄어들기 때문에 터빈입구온도를 설계하기 위해서 추가로 연료가 공급된다. 하지만 추가로 연소기에 공급되는 연료량에 비해 연료전지 출력증가가 크기 때문에 시스템 열효율이 증가한다.

Fig. 12에는 ATR-하이브리드 시스템의 U_f 의 변화에 따른 성능변화를 나타내었다. 기준 설계효율을 계산한 U_f 가 0.7일 때에는 연소기에 추가로 연료공급이 없는 상태이다. U_f 가 0.7 이상으로 증가하면 연료전지 출력이 증가하지만, 미반응 연료량이 감소한다. 따라서 충분히 높은 터빈입구온도를 확보하기 위하여 연소기에 추가로 연료가 공급된다. 하지만 추가 연료공급량보다 연료전지 출력증가가 크기 때문에 열효율이 향상되었다. U_f 가 0.7 이하로 감소하면 연료전지 출력이 감소하지만, 미반응 연료량이 증가하기 때문에 터빈입구온도가 기준 설계온도보다 높아진다. 따라서 U_f 가 0.7 이하에서는 터빈입구온도를 일정하게 설계할 수가 없다. 그리고 터빈입구온도가 상승하여 터빈 출력이 증가하지만 연료전지 출력감소량이 더 크므로 시스템 출력이 감소하고 열효율도 감소한다.

Fig. 13에는 SR-하이브리드 시스템의 터빈입구온도와 압력비에 따른 열효율을 나타내었다. 터빈입구온도가 높아지면 전체적으로 열효율이 감소하고, 압력비가 증가하면 전체적으로 열효율이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 터빈입구온도가 높아지면 터빈 출력이 증가하여 시스템 출력이 증가하지만, 이를 위한 추가적인 연료공급의 증가가 더 크기 때문에 열효율은 감소한다.

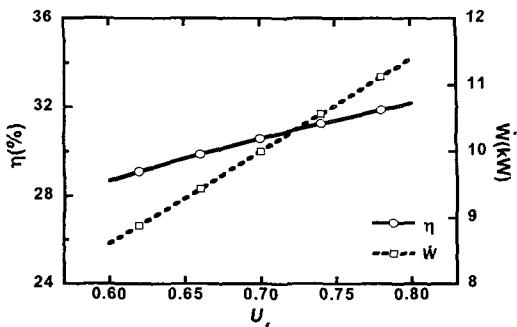
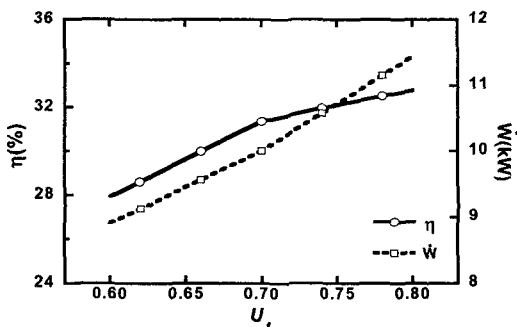
Fig. 11 Effect of U_f on the SR-hybrid system efficiencyFig. 12 Effect of U_f on the ATR-hybrid system efficiency

Fig. 14에는 ATR-하이브리드 시스템의 터빈입구온도와 압력비에 따른 열효율을 나타내었다. ATR-하이브리드 시스템 역시 터빈입구온도가 증가하면 열효율은 감소하고, 압력비가 증가하면 열효율이 증가하는 경향을 보여주고 있다. ATR-하이브리드 시스템은 연소기에서 개질기로 개질열을 공급하지 않는다. 그러므로 연소기에 추가로 연료를 공급하지 않아도 터빈입구온도가 SR-하이브리드 시스템에 비해 상대적으로 높으며, 압력비가 3 이상에서는 터빈입구온도가 1100°C보다 높아야만 설계가 가능하다.

Fig. 15에는 SR-하이브리드 시스템의 터빈입구온도와 압력비에 따른 출력을 나타내었다. 압력비가 증가하면 출력이 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 터빈입구온도가 높을수록 전체적으로 출력이 증가하며 압력비에 따른 출력증가량이 크다.

Fig. 16에는 ATR-하이브리드 시스템의 터빈입구온도와 압력비에 따른 출력을 나타내었다. SR-하이브리드 시스템처럼 압력비가 증가하면 출력이 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 터빈입

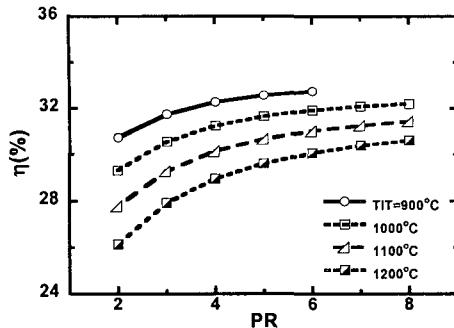


Fig. 13 Effect of TIT and PR on the SR-hybrid system efficiency

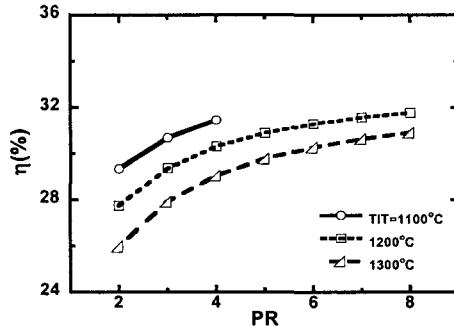


Fig. 14 Effect of TIT and PR on the ATR-hybrid system efficiency

구온도가 높을수록 전체적으로 출력이 증가하며 압력비에 따른 출력증가량이 크다.

이상의 결과, 특히 Fig. 13, 14의 결과를 PEMFC만의 시스템 성능(Table 1)과 비교하면 다음과 같은 결론을 얻게 된다. 먼저, SR-하이브리드 시스템의 설계효율은 SR-PEMFC 시스템의 효율에 비하여 높아지기 힘들다. 오히려 대부분의 설계 범위에서 효율이 감소한다. 연료전지 출구 가스 온도가 70°C로 낮은 상태에서 터빈입구온도를 일반적인 설계 온도 범위인 900°C 이상으로 높게 설계하기 위하여 연소기에 추가로 공급되는 연료량의 부담이 상당히 크기 때문이다. 즉, 연료전지와 가스터빈의 설계 운전온도 차이가 큰 것이 하이브리드 시스템 구성으로 인한 효율 향상 효과가 없는 것의 주원인이다.

ATR-하이브리드 시스템은 ATR-PEMFC 시스템에 비해 다소의 효율 향상효과가 있다. ATR-하이브리드 시스템은 기준 설계조건에서 연소기에 추가로 연료공급 없이 터빈을 구동하여 출력을 얻기 때문에 ATR-PEMFC 시스템과 비교하여 효율이 다소 증가하며, 여러 가지 설계조건에서도 개

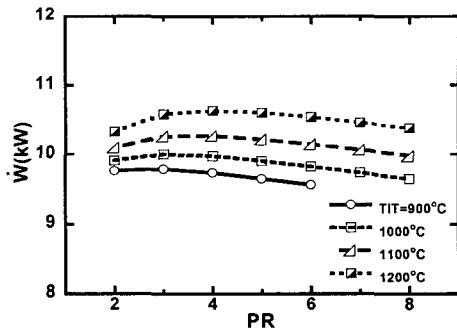


Fig. 15 Effect of TIT and PR on the SR-hybrid system power

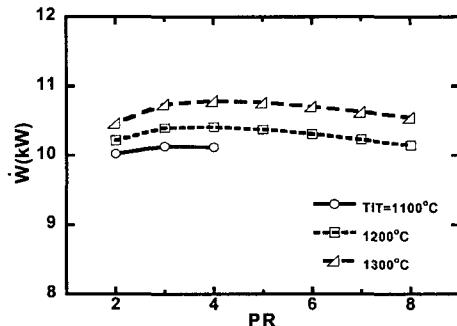


Fig. 16 Effect of TIT and PR on the ATR-hybrid system power

질기로 공급되는 연료량에 비해 상대적으로 적은 추가 연료량으로 터빈을 구동할 수 있다. 그러나 효율 향상 정도는 절대 값으로 1% 내외에 그친다.

MCFC/GT, SOFC/GT 하이브리드 시스템의 경우에는 시스템 형태에 따라서 차이가 있지만, 대체로 하이브리드 시스템 구성으로 인한 효율 향상효과가 10~15%인 것^(6,8)을 감안하면 PEMFC/GT 하이브리드 시스템에서의 효율 향상효과는 상당히 작은 수준임을 알 수 있다. 결국, PEMFC/GT 하이브리드 시스템은 PEMFC와 가스터빈의 운전 온도 차이가 크기 때문에 성능향상을 위한 설계파라미터 선택 범위가 좁고 성능 향상효과도 작다고 판단된다.

4. 결 론

두 가지 개질방법(SR, ATR)의 상압형 PEMFC 시스템과 가스터빈을 결합한 PEMFC/GT 하이브리드 발전시스템의 설계성능 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

PEMFC 시스템에서는 SR-PEMFC 시스템이 ATR-PEMFC 시스템에 비하여 높은 설계효율을 나타낸다. 두 시스템 모두 셀전압의 상대적인 변화량에 대해서 출력과 효율이 같은 변화량을 보이며, U_f 의 변화에 따른 효율은 SR-PEMFC 시스템보다 ATR-PEMFC 시스템이 큰 폭으로 변한다. SCR이 증가하면 SR, ATR-PEMFC 시스템 모두 출력이 증가하며, ATR-PEMFC 시스템은 SCR이 증가함에 따라 효율도 증가한다. 하지만 SR-PEMFC 시스템은 효율이 증가하다가 일정한 SCR 값 이상에서는 감소한다. 블로워와 펌프 효율의 변화에는 SR, ATR-PEMFC 시스템 모두 다른 설계파라미터들에 의해 시스템 성능변화에 영향이 적다.

SR-하이브리드 시스템에서 터빈입구온도를 기존 가스터빈의 설계 값 수준으로 설계하기 위해서는 연소기에 추가로 공급되는 연료량이 증가하여 SR-PEMFC 시스템에 의해 오히려 효율이 저하된다. ATR-하이브리드 시스템에서는 연소기에 추가로 연료가 공급되지 않기 때문에 ATR-PEMFC 시스템에 의해 다소의 효율향상이 가능하다. 하지만 MCFC, SOFC 하이브리드 시스템과 비교해서는 효율 향상효과가 작다. 따라서 가압형 연료전지 시스템 설계 등 다양한 구성방법을 통하여 PEMFC-하이브리드 시스템 최적화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국 기계연구원 기본사업의 지원으로 이루어진 결과임

참고문헌

- (1) Williams, M. C., Strakey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
- (2) Sopian, K. and Wan Daud, W. R., 2006, "Challenges and Future Developments in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 719~727.
- (3) Mehta, V. and Smith Cooper, J., 2003, "Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing," *Journal of Power Sources*, Vol. 114, pp. 32~53.
- (4) Scholte, J., Berg, N., Wilde, P., Jorissen, L. and Garche, J., 2004, "Development and Performance of a 10kW PEMFC Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 127, pp. 206~212.
- (5) Jeong, Y. H. and Kim, T. S., 2002, "Parametric Design Analysis of a Pressurized Hybrid System Combining Gas Turbine and Solid Oxide Fuel Cell," *Trans. KSME B*, Vol. 26, pp. 1605~1612.
- (6) Yang, W. J., Park, S. K., Kim, T. S., Kim, J. H., Sohn, J. L. and 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.
- (7) Park, S. K., Yang, W. J., Lee, J. H. and Kim, T.S., 2007, "Comparative Thermodynamic Analysis on Design Performance Characteristics of Solid Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Power Systems," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 302~313.
- (8) Oh, K. S. and Kim, T. S., 2006, "Performance Analysis on Various System Layouts for the Combination of an Ambient Pressure Molten Carbonate Fuel Cell and a Gas Turbine," *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 455~463.
- (9) Aspen Technology Incorporate, 2004, Aspenone HYSYS, ver. 2004. 02.