

부탄 개질기 운전조건에 따른 SOFC 시스템 효율에 대한 연구

김선영* · 백승환* · 배규종* · 배중면*†

* KAIST 기계공학과

Parametric Study of SOFC System Efficiency Under Operation Conditions of Butane Reformer

Sunyoung Kim*, Seungwhan Baek*, Gyujong Bae* and Joongmyeon Bae*†

* Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

(Received June 26, 2009 ; Revised February 1, 2010 ; Accepted February 11, 2010)

Key Words : SOFC(고체산화물연료전지), SOFC System(SOFC 시스템), System Efficiency(시스템 효율), Steam Reforming(수증기 개질), Pre-Reforming(예개질), Butane(부탄)

초록: 본 연구에서는 부탄 개질기 운전조건에 따른 SOFC 시스템 효율을 모델링을 통해 분석하였다. SOFC 시스템은 크게 개질기, SOFC, 폐열 회수 장치로 구성하였다. 탄화수소 개질 반응으로 선택한 수증기 개질 반응은 흡열반응인 데에 반해 SOFC 에서 일어나는 전기화학반응은 발열반응이다. 따라서 시스템의 열관리 방법에 따라 효율이 크게 달라진다. 세부적으로 수증기 개질 반응은 운전 온도에 따라 수증기 개질 반응과 예개질 반응으로 분류되는데, 해석 결과 예개질 반응을 적용한 SOFC 시스템의 경우 더 높은 효율을 나타내었다. 시스템의 효율은 SOFC 온도 유지를 위한 열량과 온수로 회수되는 열량에 따라 달라지는데, 예개질 반응을 적용할 경우, 열관리가 더욱 효율적이어서 높은 효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

Abstract: In this study, the efficiency of a solid-oxide fuel cell (SOFC) system with a steam reformer or prereformer was analyzed under various conditions. The main components of the system are the reformer, SOFC, and water boiling heat recovery system. Endothermic and exothermic reactions occur in the reformer and SOFC, respectively. Hence, the thermal management of the SOFC system greatly influences the SOFC system efficiency. First, the efficiencies of SOFC systems with a steam reformer and a prereformer are compared. The system with the prereformer was more efficient than the one with steam reformer due to less heat loss. Second, the system efficiencies under various prereformer operating conditions were analyzed. The system efficiency was a function of the heat requirement of the system. The efficiency increased with an increase in the operating temperature of the prereformer, and the maximum system efficiency was observed at 450°C for a S/C of 2.0.

- 기호설명 -

- BOP(Balance of Plant) : 주변장치
- BUR : 후단 연소기
- HX : 열교환기
- η_p : 시스템 전력 효율 (%)
- η_{total} : 폐열 회수를 고려한 시스템 효율(%)
- S/C : 수증기와 연료의 비
- P_{SOFC} : SOFC 의 생산하는 전력
- P_{BOP} : BOP 에서 소모하는 전력
- $Q_{required}$: SOFC 의 온도 유지를 위한 공급열
- Q_{LOSS} : SOFC 에서 발생하는 폐열
- $Q_{recovered}$: 온수로 회수되는 열량

- REF : 개질기
- SOFC : 고체산화물 연료전지

1. 서론

SOFC(고체산화물 연료전지)는 고효율 에너지 변환 장치로 연료와 공기를 이용해 물과 전기를 생산하는 발전 장치이다. 고온에서 작동하는 SOFC 는 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에 가정용 소형 열병합발전 을 목적으로 하는 kW 급 시스템에 적합하다. SOFC 의 주 연료는 H₂ 이지만, 현재의 기술로는 H₂ 를 안정적으로 공급하고 저장할 수 없기 때문에⁽¹⁾ 부탄과

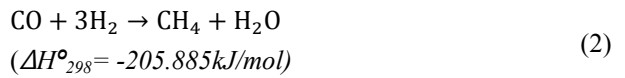
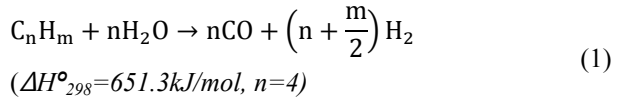
† Corresponding Author, jmbae@kaist.ac.kr

같은 탄화수소를 개질(reforming)하여 생성 가스를 SOFC로 공급하는 방법을 택하고 있다.

탄화수소를 개질하는 방법은 일반적으로 부분산화 반응(POX), 수증기 개질 반응(SR), 자열개질 반응(ATR) 등 크게 세 가지이다. SOFC 시스템 운전을 위해서는 다양한 탄화수소 개질 반응 중 상대적으로 안정한 수증기 개질 반응이 가장 일반적이나, 다른 개질 반응과 달리 흡열반응이라 외부에서 에너지를 공급해야 한다는 단점이 있다.⁽²⁾ 반면 SOFC 내부에서는 전기화학적으로 산화반응이 일어나 발열반응이 일어나며 대부분의 열이 시스템 내부에 폐열(heat loss)로 방출된다. 따라서 수증기 개질 반응을 이용한 SOFC 시스템의 경우 열관리 방법에 따라 시스템의 효율이 크게 달라진다. 따라서 본 연구에서는 부탄을 연료로 하는 SOFC 시스템에서 수증기 개질기의 운전조건이 효율에 미치는 영향을 수치해석을 통해 연구하였다.

부탄 수증기 개질 반응은 운전 온도에 따라 세부적으로 두 가지로 분류할 수 있다. 일반적인 수증기 개질 반응은 700~900°C 에서 일어나는 반응을 의미하지만, 400~550°C 에서도 개질 반응이 일어나는데

이를 특별히 예개질 반응이라 한다.⁽³⁾ 탄화수소가 수증기와 반응할 경우 아래와 같은 반응들이 일어나는데 수증기 개질 반응의 경우 대부분의 생성물이 H₂ 와 CO 인 것에 비해 예개질 반응의 경우 반응 온도가 낮아 열역학적으로 CH₄ 생산량이 증가한다.



개질 가스 내에 포함된 CH₄, CO 등은 SOFC 내에서 위와 같은 반응들을 통해 H₂로 변환된 후에 연료로 사용된다.⁽⁴⁾ 따라서 예개질 반응의 경우 SOFC 내에서 CH₄의 수증기 개질 반응을 통해 열을 흡수하기 때문에 폐열을 이용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 예개질 반응과 수증기 개질 반응을 이용한

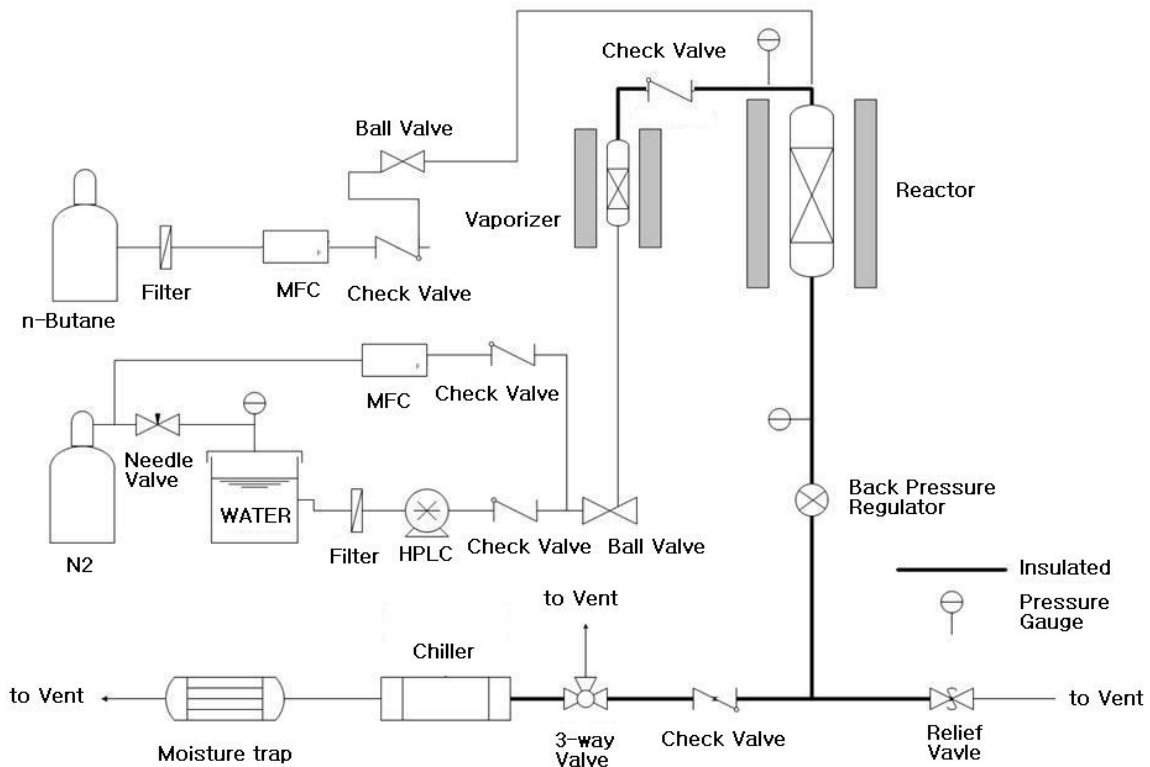


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Properties of C11-PR

Form	Nickel	MgO	Al ₂ O ₃	Promoter
Tablets	45 wt. %	10 wt. %	10 wt. %	Confidential

SOFC 시스템의 효율을 비교하였으며, 두 가지 개질 반응 중 시스템의 효율이 높은 예개질 반응을 택하여 운전조건에 따른 시스템의 효율 변화를 관찰하였다.

2. 실험

본 연구에서는 부탄(n-Butane)을 연료로 하는 SOFC 시스템에서 개질기의 운전조건에 따른 시스템 효율 변화를 분석하였다. 따라서 운전조건에 따른 개질기의 성능이 중요한 변수이다. 이를 현실적으로 모사하기 위하여 다양한 조건에서 개질 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 수치해석에 적용하였다.

2.1 실험방법

수증기 개질 실험과 예개질 실험에서 사용한 장치의 구성은 Fig. 1 과 같다. 반응기에 공급되는 기체는 연료인 부탄, 수증기, 질소 세 가지이다. 액체상태의 물은 HPLC 펌프를 통해 유량을 제어하였으며, 기화기(Vaporizer)를 통해 수증기로 변환한 후 반응기로 공급하였다. 기체 상태의 부탄과 질소는 MFC(mass flow controller)를 이용해 제어하였다. 질소는 액체상태의 물을 운반하기 위한 운반기체(carrier gas) 및 비활성기체(inert gas)의 용도로 사용되었으며, HPLC 펌프 후단으로 공급되어 물과 함께 기화기를 거쳐 반응기로 공급된다. 반응기에 공급되는 세 가지 기체는 반응기 전단에서 합쳐져 반응기로 공급된다. 반응기를 거쳐 생성된 기체는 냉각기(chiller)를 거친다. 이를 통해 생성물에 포함된 수분을 응집하고, 흡습기(moisture trap)를 통해 수분이 제거된 생성물은 분석장치로 공급된다. 분석장치는 Agilent 사의 6890N GC(Gas Chromatography)를 사용하였으며, 이를 통해 각 성분의 조성을 분석하였다.

2.2 수증기 개질 실험

부탄 수증기 개질 실험을 수행하기 위하여 촉매를 선정하였다. 수증기 개질 촉매로 니켈 촉매가 일반적이나 탄소침적 등의 문제로 인해 귀금속 촉매로 대안으로 제시되고 있다.⁽⁵⁾ 이에 본 연구에서는 0.5wt.% Rh/CGO 를 수증기 개질 촉매로 사용하였다. 예개질 반응과의 효율 비교를 위하여 일반적인 수증기 개질 반응 조건인 750°C 에서 S/C=3.0 으로 운전하였다.

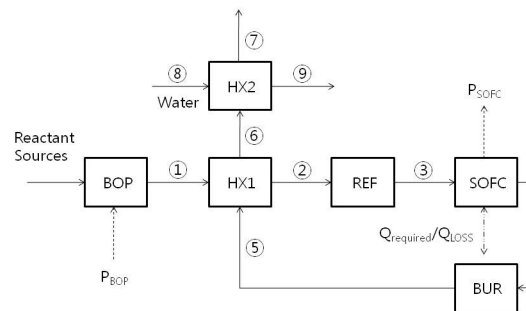


Fig. 2 Flow sheet of the SOFC system

2.3 예개질 실험

부탄 예개질 실험을 수행하기 위하여 촉매를 선정하였다. 앞 절에서 설명하였듯이 Rh 과 같은 귀금속 촉매는 수증기 개질 시 탄소침적에 대한 내성이 있지만, 예개질 반응 조건에서는 반응성이 좋지 않기 때문에⁽⁶⁾ 니켈 촉매를 사용하였다. 실험에서 사용된 촉매는 Süd-Chemie 사에서 개발한 C11-PR 촉매로 성분 조성은 아래 Table1 과 같다. 촉매는 H₂/N₂ = 1:1 분위기, 650°C 에서 9 시간 동안 환원 처리 후에 사용하였다.

예개질 실험은 온도와 S/C 를 변화시켜가며 수행하였다. 첫 번째는, 일정한 S/C 에서 온도변화에 따른 생성물 조성의 변화를 관찰하기 위해 S/C 를 2.0 으로 고정한 상태에서 온도를 350°C 에서 450°C 까지 변화시켰다. 두 번째는, 일정한 온도에서 S/C 에 따른 생성물 조성의 변화를 관찰하기 위해 온도를 450°C 로 고정한 상태에서 S/C 를 1.5 에서 3.0 까지 변화시키며 실험을 수행하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 시스템 모델링

시스템 모델링은 공정모사 소프트웨어인 Aspen HYSYS 를 이용하였다.⁽⁷⁾ SOFC 시스템은 SOFC 와 SOFC, 개질기, BOP(Balance of Plant)의 세 부분으로 구성하였다. BOP 는 시스템에 작동유체를 주입하기 위한 펌프나 컴프레서를 의미한다. SOFC 는 운전 온도를 800°C 로 가정하였으며, MATLAB 을 이용한 코드로 모사하였다. SOFC 의 전기화학적 특성은 선행 연구를 참고하였으며,^(8,9) 물성치는 타 문헌을 참고하였다.^(10,11) SOFC 모사하기 위해 아래와 같은 가정을 사용하였다.

- 입구 가스는 CH₄, CO₂, CO, H₂O, H₂, N₂ 으로 구성되어 있으며, 출구 가스는 화학적 평형 상태이다.
- 공기는 N₂ -79%와 O₂ -21%로 구성되어 있다.

- SOFC 는 정상상태에서 운전되고 있다.
- 입구 또는 출구 연료극과 공기극의 온도는 같다.
- SOFC 는 입·출구 가스의 평균온도에서 운전된다.
- SOFC 내부에서 H₂ 만 전기화학적으로 반응한다.
- CO 는 WGS 반응을 통해 CO₂, H₂ 로 변환된다.
- 접촉저항 및 복사에 의한 열전달은 무시한다.

SOFC 입구와 출구에서의 열평형은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{in} = H_{out} + IV(T) + Q_{Loss} \quad (4)$$

Aspen HYSYS 에서 지원하는 반응기 모델은 각 온도에서의 화학평형을 기본으로 하는 이상적인 반응기이기 때문에 개질기는 실험 결과를 적용해 모사하였다. 실험에서의 반응물과 생성물의 조성을 모델에 적용하였으며, 개질기에 공급할 열량은 입구와 출구에서 화학종의 조성과 온도 변화를 이용해 계산하였다.

3.2 시스템 구성

시스템 구성은 아래 Fig. 2 와 같다. 부탄과 수증기는 BOP 를 통해 공급되며 반응물 공급을 위해 필요한 전력(P_{BOP})을 계산하였다. 개질 반응에 필요한 열을 공급하기 위하여 반응물은 후단 연소기에서 발생한 열을 이용해 일정한 온도로 가열한 후 개질기에 공급하였다. 개질가스는 SOFC 에서 반응하여 전력(P_{SOFC})과 폐열(양수일 경우 Q_{LOSS} - SOFC 의 반응열, 음수일 경우 Q_{required} - SOFC 의 운전 온도 유지를 위해 필요한 열)을 생산하고, 남은 연료는 후단 연소기를 통해 H₂O 와 CO₂로 전환된다. 열교환기를 지난 배출가스의 폐열을 흡수하기 위해 70°C 의 온수를 생산하였다. 시스템 효율은 온수로 회수한 열(Q_{recovered})을 고려한 경우(η_{total})와 고려하지 않은 경우(η_p), 두 가지로 평가하였으며, 각각의 정의는 아래와 같다.

$$\eta_p = \frac{P_{SOFC} - P_{BOP} - Q_{required}}{LHV_{C_4H_{10}} \times \dot{m}_{C_4H_{10}}} \quad (5)$$

$$\eta_{total} = \frac{P_{SOFC} + Q_{recovered} - P_{BOP} - Q_{required}}{LHV_{C_4H_{10}} \times \dot{m}_{C_4H_{10}}} \quad (6)$$

시뮬레이션에 이용된 SOFC 시스템의 구속조건의 Table 2 에 나타내었으며, Stream 번호는 Fig. 2 를 참고하면 된다. SOFC 시스템은 약 1kW 급으로 가정하여 분당 0.0941 mol 의 연료를 주입하였다. 시스템의 각 구성요소들은 단열조건을 만족한다고 가정하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 부탄 개질 실험 결과

부탄 수증기 개질 실험 수행 결과를 열역학 조

Table 2 Temperature and species composition for system

Stream	Temperature (°C)	Species Composition
1	25	Given (S/C=1.5~3.0)
2	350~450, 750	Given (S/C=1.5~3.0)
3	Calculated	Experimental data
4	Calculated	Equilibrium
5	Calculated	H ₂ O, CO ₂ only
6	Calculated	H ₂ O, CO ₂ only
7	Calculated	H ₂ O, CO ₂ only
8	25	H ₂ O only
9	70	H ₂ O only

Table 3 Comparison of steam reforming and pre-reforming for SOFC system

	Pre-reforming	Steam reforming
Operating temp.(°C)	450	750
S/C	3.0	3.0
P _{SOFC} (kW)	1.388	1.384
P _{BOP} (kW)	0.002	0.002
Q _{LOSS} (kW)	0.054	0.587
Q _{recovered} (kW)	2.574	2.155
η _p (%)	30.29	30.21
η _{total} (%)	86.55	77.31

성과 비교해 Fig. 3 에 나타내었다. 생성 가스의 조성은 열역학적 화학평형 조성에 가까웠으며, 그 결과를 수증기 개질기 모사에 이용하였다.

운전조건에 따른 예개질 실험 수행 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 온도는 350~450°C, S/C=1.5~3.0 의 범위에서 변화하였다. 운전 조건에 따른 반응 가스의 조성 변화는 열역학적 경향과 비슷하였다. 온도 또는 S/C 가 증가할수록 H₂ 생산량은 증가하였으나, CH₄ 생산량은 감소하였다. 반면, 운전 조건에 따른 CO, CO₂ 생산량은 비교적 일정하였다. 또한, 모든 운전 조건에서 열역학적 조성에 비해 CH₄의 농도가 높고 H₂, CO₂의 농도는 낮았다.

4.2 개질기와 예개질기 시스템의 효율 비교

앞의 실험결과와 같이 예개질 반응의 경우, 생성물의 조성이 열역학적 화학평형과 다르기 때문에 Aspen HYSY 에서 지원하는 화학평형 반응기를 적용할 수 없다. 특히, 시스템의 열효율에 중요한 화학종인 H₂와 CH₄의 조성이 열역학적 화학평형과 크게 다르다. 이에 개질 실험 결과를 개질기 모델에 적용하여 개질기 운전 조건에 따른 SOFC 시스템의 효율을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 5 와 Table 3 에 나타내었다.

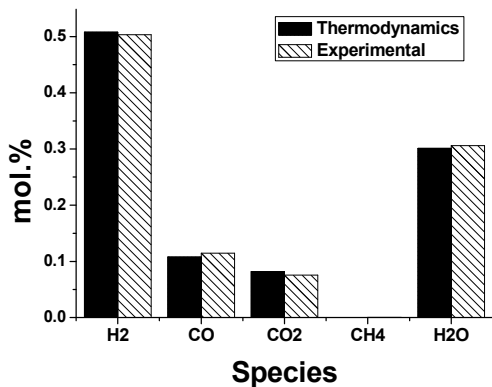


Fig. 3 Gas composition of steam reforming

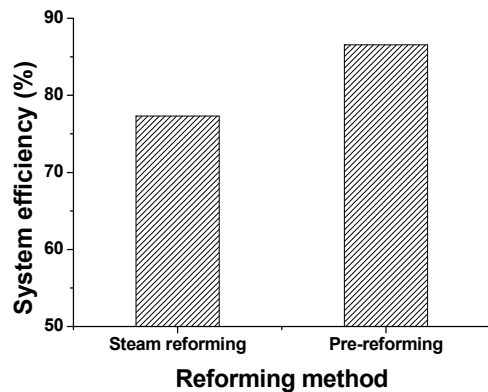
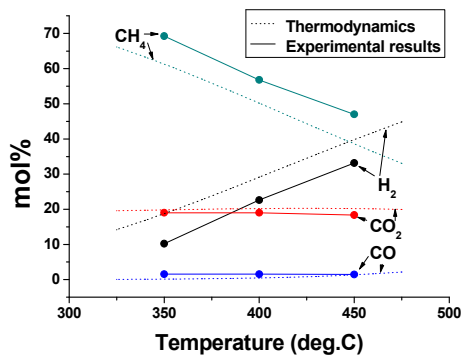
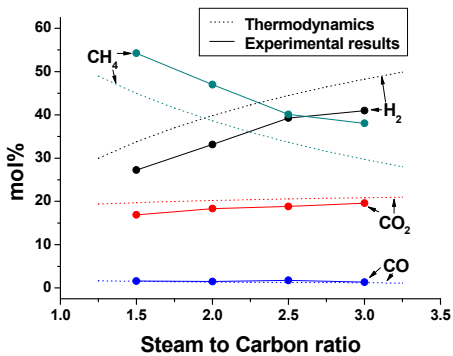


Fig. 5 Comparison of system efficiency



(a) The effect of temperature (S/C=2.0),



(b) The effect of S/C (Temp.=450°C)

Fig. 4 Gas composition of pre-reforming

계산 결과 수증기 개질 반응과 예개질 반응을 적용했을 때 SOFC 에서 생산할 수 있는 전력량은 비슷하나, 폐열(Q_{LOSS})의 열량이 수증기 개질기를 사용했을 경우에 예개질기를 사용한 경우보다 10 배 이상이었다. 따라서, 예개질기를 이용한 SOFC 시스템의 효율(η_{total})이 약 9% 정도 더 높았다. 이는 Table 3 에서와 같이 SOFC 에서 발생하는 폐열량(Q_{LOSS})이 작기 때문이다. 예개질기를 사용하는 경우, 생산되는 CH_4 의 농도는 높아지고, H_2 의 농도는 낮아진다. CH_4 은 SOFC 내부에서 H_2 로 전환된

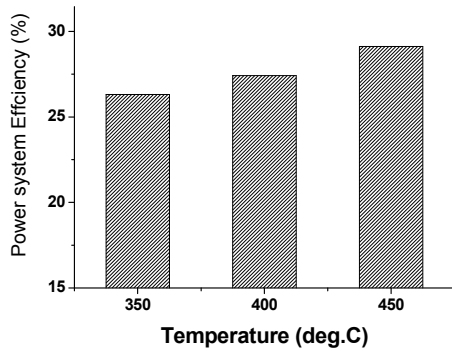
후 연료로 사용되는데, 이 때 일어나는 반응이 흡열반응이기 때문이다. 수증기 개질기를 시스템에 적용하였을 경우에는 개질기에서 H_2 가 많이 생산된다. 생산된 H_2 는 SOFC 내부에서 발열반응을 통하여 전력을 생산하게 된다. 이때 나타나는 발열량은 Table 3 에 나타나 있다. 이때 발열량이 적절하게 회수되지 못하게 되며, SOFC 의 폐열(Q_{LOSS})이 증가하게 되는 것이다. 이러한 결과로 회수될 수 있는 열량은 상대적으로 감소하게 된다.

즉, 시스템을 전체적으로 고려했을 때 예개질기를 이용하면 개질기에 필요한 열량이 줄고, 줄어든 열량만큼 SOFC 의 폐열을 흡수하기 때문에 전체적인 시스템의 효율이 증가하는 것이다.

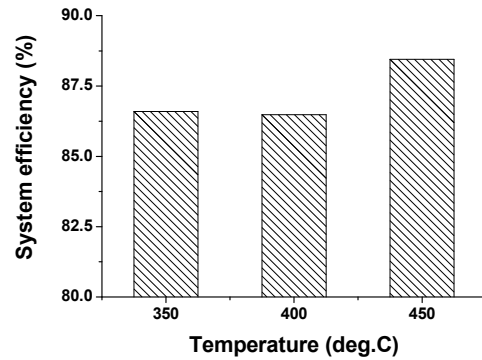
4.3 예개질기 운전조건에 따른 효율 비교

4.3.1 SOFC 의 전기효율(η_p) 분석

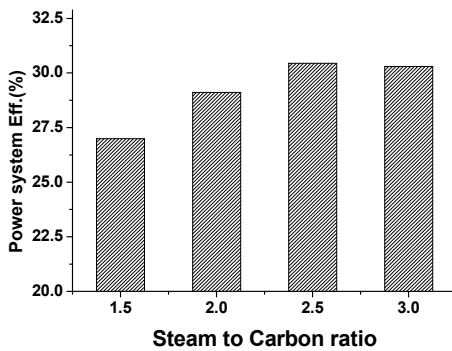
시스템의 전기 효율(η_p)을 계산한 결과를 Fig.6 에 나타내었다. 시스템의 전기 효율은 SOFC 의 전력과 입구 가스의 조성에 영향을 받는다. 예개질기의 운전 온도가 증가함에 따라 생성 가스 내 H_2 의 농도가 증가하는 반면, CH_4 의 농도는 감소한다. SOFC 에 주입된 CH_4 은 식 (1)과 같이 흡열반응을 통해 H_2 로 변환되기 때문에 SOFC 온도가 감소한다. 본 연구에서 수행한 시뮬레이션의 구속 조건으로 SOFC 의 운전 온도를 800°C 로 일정하게 가정하였기 때문에 CH_4 의 농도가 높은 경우 SOFC 의 온도를 유지하기 위해 열($Q_{required}$)을 공급 해주어야 한다. 온도가 상승하면 CH_4 가 줄고 $Q_{required}$ 가 감소하여 식 (5)에 따라 η_p 는 증가한다(Fig. 6). S/C 에 의한 전기 효율의 변화도 온도에 따른 변화가 비슷한 경향을 보인다. S/C 가 증가할수록 생성 가스 내 H_2 의 농도가 증가하고, 전기 효율이 증가한다. 그러나 S/C 가 증가할수록 생성



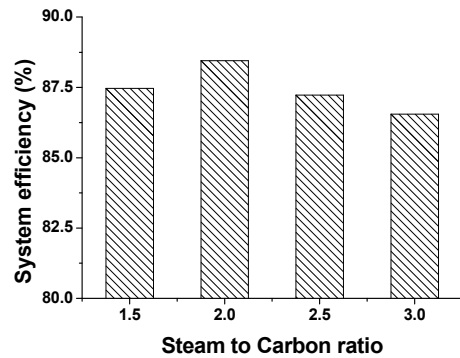
(a) The effect of temperature of pre-reformer (S/C=2.0)



(a) The effect of temperature of pre-reformer (S/C=2)



(b) The effect of S/C of pre-reformer (Temp.=450°C)



(b) The effect of S/C of pre-reformer (Temp.=450°C)

Fig. 6 Comparison of Power system efficiency (η_p)

Fig. 7 Comparison of Total system efficiency (η_{total})

가스 내 미반응 H_2O 의 농도가 증가하기 때문에 SOFC 에서 생성되는 전력량이 작아진다.⁽¹²⁾ 두 가지 상반되는 효과의 영향으로 인해 S/C 가 2.5 일 때 최대 전력 효율을 갖는다.

4.3.2 시스템 효율(η_{total}) 분석

시스템의 시스템 효율(η_{total})을 계산한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 시스템 효율은 SOFC 에서 생산되는 전력뿐만 아니라 온수를 통해 회수되는 열량을 고려하였다. 온도에 따라 회수되는 열량의 차이가 크지 않아 시스템 효율(η_{total})은 전기효율(η_p)과 같이 온도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 운전 온도가 350°C 일 때 400°C 일 때와 비교해서 회수되는 열량의 증가가 SOFC 에 필요한 열량의 증가에 비해 크기 때문에 전력 효율과 달리 400°C 에서 시스템 효율이 가장 낮다.

SOFC 시스템의 각 구성요소가 단일조건을 만족한다고 가정할 때, 시스템의 효율은 예개질기의 운전조건에 따라 크게 변화하였다. 예개질기의 운전온도와 반응물의 S/C 가 낮을수록 개질기에 공

급해 주어야 하는 열량이 작아져 온수로 회수되는 열량이 커졌으나, 생성 가스 내 CH_4 의 농도가 증가해 SOFC 운전 온도를 유지하기 위한 열량 공급이 필요하였다. 따라서, 예개질기 반응물에 공급해 주어야 하는 열량, SOFC 운전 온도 유지를 위해 공급 또는 방출하는 열량, 온수로 회수되는 열량이 균형을 이룰 때 시스템 효율이 최대가 되었다.

5. 결론

부탄을 연료로 하는 SOFC 시스템에서 개질기의 운전조건에 따른 시스템 효율을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 부탄의 수증기 개질 및 예개질 실험을 수행하였으며, 이를 시스템 모델링에 반영하였다. 개질기와 예개질기를 적용한 시스템을 비교한 결과, 예개질기를 적용한 시스템의 효율이 크게 높았다. 이는 예개질 반응 가스 내 포함된 CH_4 가 SOFC 내에서 흡열반응을 통해 폐열을 흡수하기 때문이다. 다양한 예개질 반응 조건에서 시스템의 효율 변화를 분석하였다. 전력 효율과 시스

템 효율은 예개질기 반응물에 공급해주어야 하는 열량, SOFC 운전 온도를 유지하기 위해 공급 또는 방출하는 열량, 온수로 회수되는 열량 값에 크게 영향을 받았다. 예개질기의 운전 온도와 반응물의 S/C 를 변화시켜가며 분석한 결과, 최대의 전력 효율과 시스템 효율을 갖는 운전 조건이 달랐다. 시스템 전력 효율은 예개질기의 운전 조건이 450°C, S/C=2.5 일 때 최대의 효율을 나타내었으나, 시스템 효율은 450°C, S/C=2.0 일 때 최대였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업과 EU FP 참여활동비 지원사업, 대경광역경제권 선도산업육성사업의 일환이며 KAIST BK21 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Park, J., Lee, S., Lim, S., Bae, J., 2009, "Numerical Study on Operating Parameters and Shapes of a Steam Reformer for Hydrogen Production from Methane," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 33, No. 1, pp. 60~68.
- (2) Lee, S., Bae, J., Lim, S., Park, J., 2008, "Improved Configuration of Supported Nickel Catalysts in a Steam Reformer for Effective Hydrogen Production from Methane," *Journal of Power Sources*, Vol. 180, pp.506~515.
- (3) Christensen, T. S., 1996, "Adiabatic Prereforming of Hydrocarbons – an Important Step in Syngas Production," *Applied Catalysis A: General*, Vol. 138, pp.285~309.
- (4) Kang, Y., Lim, S., Bae, J., Yoo, Y., Park, J., 2007, "A Study on the Suppression of Carbon Deposition in Solid Oxide Fuel Cells Through Methane Internal Reforming," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 31, No. 5, pp.473~481.
- (5) Carvalho, L. S., Martins, A. R., Reyes, P., Oportus, M., Albonoz, A., Vicentini, V., Carmo Rangel, M., 2009, "Preparation and Characterization of Ru/ MgO-Al₂O₃ Catalysts for Methane Steam Reforming," *Catalysis Today*, Vol.142, pp.52~60.
- (6) Suzuki, T., Iwanami, H. I., Iwamoto, O., Kitahara, T., 2001, "Pre-Reforming of Liquefied Petroleum Gas on Supported Ruthenium Catalyst," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, pp.935~940.
- (7) Baek, S., Yoon, S., Bae, J., 2007, "System Simulation of Solid Oxide Fuel Cell System with Diesel Fuel Processor Using Aspen HYSYS" *KSME 2007 Fall Annual Meeting*, Th11E054.
- (8) Calise, F., Palombo, A., Vanoli, L., 2006, "Design and Partial Load Exergy Analysis of Hybrid SOFC-GT Power Plant," *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 225~244.
- (9) Colpan, C. O., Dincer, I., Hamdullahpur, F., 2007, "Thermodynamic Modeling of Direct Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell Operating with Syngas," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 787~795.
- (10) Costamagna, P., Selimovic, A., Borghi, M., Agnew, G., 2004, "Electrochemical Model of the Integrated Planar Solid Oxide Fuel Cell [IP-SOFC]," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 102, pp. 61~69.
- (11) Hussain, M. M., Li, X., Dincer, I., 2006, "Mathematical Modeling of Planar Solid Oxide Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 161, pp. 1012~1022.
- (12) Eguchi, K., Kunisa, Y., Adachi, K., Arai, H., 1996, "Effect of Anodic Concentration Overvoltage on Power Generation Characteristics of Solid Oxide Fuel Cells," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 143, pp.3699~3703.