한국에너지공학회지(1993), 제2권 제1호
Energy Engg. J (1993), Vol. 2, No. 1 pp. 75~82

천연가스를 사용하는 50 kW 인산형 연료전지 시스템의 전산모사

서정원 · 김성준 · 설용건 · 이태희
연세대학교 공과대학 화학공학과

Simulation of a 50 kW Phosphoric Acid Fuel Cell System Using Natural Gas

Jung Won Seo, Sung Joon Kim, Yong Gun Shul and Tae Hee Lee
Department of Chemical Engineering, Yonsei University

요 약

상용 모사기인 ASPEN PLUS를 이용하여 천연가스를 사용하는 50 kW 인산형 연료전지시스템의 정상상태 전산모사를 실시하였다. 연료전지 본체의 모사를 위하여 USER 블럭과 FORTRAN 블럭을 작성하였다. 여러가지 조업조건에 따른 수소의 수율 변화를 살펴봄으로써 개질기의 효율을 최대로 하는 조업범위를 찾았고, 실제 경우와 근사한 결과를 얻었다. 이로부터 향후 실용화될 국내의 연료전지시스템에 대한 기본 자료와 최적조건을 제시할 수 있다. 기존의 발전효율을 얻기 위하여는 수소이용률이 50% 이상으로 유지되어야 하며, 고온으로 조작되는 개질기와 연료전지 본체에서 발생되는 고온의 열을 효율적으로 회수하여 이용함으로써 공정의 에너지효율을 높일 수 있다.

Abstract—A 50 kW phosphoric acid fuel cell(PAFC) system using natural gas was simulated for steady state with the commercial software, ASPEN PLUS. The USER block and the FORTRAN block were prepared to simulate the cell. The changes of hydrogen yield according to the variation of several operating conditions were examined and the operating conditions to maximize hydrogen yield were obtained. The simulation results agree with the real data, which can be used to prepare the basic process data and the optimal conditions for the domestic commercial fuel cell system. H_2 utilization rate over 50% should be maintained to achieve the efficiency of the conventional electricity generation. Energy consumption can be reduced by utilizing the heat released from the reformer and the cell which are operated at high temperatures.

1. 서 론

연료전지는 2개의 전극과 그 사이의 전해질로 구성되어 있는 전기화학반응 장치이다. 일반적으로 연료전지는 작동 온도에 따라 저온(상온~100℃), 중온(300℃ 이하) 또는 고온(300℃ 이상)전지로 구분하며, 전해질에 따라 수용액(산, 알칼리), 용융염 또는 고체전지로 분류하기도 한다. 이 중에서 가장 활발히 개발되고 있는 것은 인산형전지로 상업화의 가능성이 가장 크다. 인산형 연료전지는 보통 140~200℃에서 운전하고 메탄 또는 석탄 등의 탄화수소를 개질한 수소를 연료로 사용하며 전환효율은 약 40% 정도이다.

인산형 연료전지는 미국과 일본에서 독자적으로 연구가 진행되어 실용화 단계에 들어갔다. 일본의 경우 1987년에 1,000 kW 발전 플랜트를 설계 제작하여 이를 시운전하였으며, 연료전지 본체의 개발과 동시에 천연가스에서 수소를 생성시키는 연료개질장치 등에 관한 기술을 개발하였다. 이것은 신에너지종합개발기구(NEDO)가 주체가 되어 전력용을 목표로 도시내 분산배치형인 저온저압형(190℃, 4 atm에서 작동)과 화력발전 대치용인 고온고압형(205℃, 6 atm에서 작동)의 두 가지 방식을 병행하여 진행하였다. 이 개발계획에는

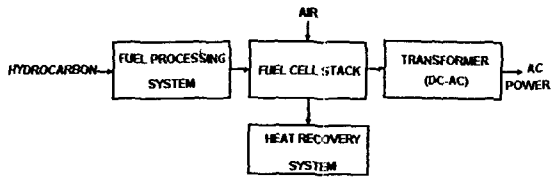

Fig. 1. Schematic diagram of fuel cell system

40% 이상의 발전효율, 6.5 mg/W 이하의 촉매백금 사용량 그리고 40,000 시간의 수명을 목표로 하여 4개의 전력회사가 참가하였다.

1967년 시작된 미국의 TARGET 계획에서는 1972~1973년에 PC-11(12.5 kW) 64기를 39개소에서 운전하여 각각 발전시간 3,000 시간이라는 실적을 남겼고, 1977년 GRI 계획에 흡수되었다. GRI 계획에서는 1983~1984년에 PC-18(40 kW) 49기를 46개소에서 시운전하여 훌륭한 성과를 얻었다[1].

본 연구에서는 상용 모사기인 ASPEN PLUS로 현재 개발되어 있는 50 kW 인산형 연료전지 공정시스템에 대한 열 및 물질수지를 취하여 조업조건에 따른 수소 생성량 및 전력변화를 알아보고, 이 결과로부터 실제 발전에 수소의 이용률(utilization rate)에 대한 정보를 구하였다.

2. 연료전지 시스템

인산형 연료전지 발전시스템은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연료처리장치, 연료전지본체 및 전력변환장치 등으로 구성되어 있다.

연료처리장치는 천연가스, 나프타, 석탄 등으로부터 황화합물을 제거하는 탈황기, 탈황된 가스로부터 수소와 일산화탄소로 만드는 개질기(reformer) 그리고 일산화탄소를 이산화탄소로 만드는 일산화탄소 전환기(shift reactor) 등으로 이루어진다. 경우에 따라서는 탈황과 동시에 탈산소 및 탈올레핀이 필요하다.

연료전지본체는 연료전극(anode), 산화전극(cathode) 및 이온전도성 전해액으로 구성된 단위전지를 쌓은 스택(stack)으로 이루어진다. 스택은 연료전지 내의 반응이 발열반응이므로 스택내의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각수나 냉각 공기의 공급이 가능하도록 되어 있다. 일반적으로 전지에서 발생된 직류는 전력변환장치를 통하여 교류로 바꾸어 사용한다.

2-1. 개질 반응기

개질법에는 탄화수소에 수증기를 가하여 수소와 일산화탄소로 변환시키는 수증기 개질법과 탄화수소의 일부를 연소시켜서 수소와 일산화탄소를 얻는 부분연소법이 있는데, 탄화수소를 C_nH_m으로 나타낼 때 주반응은 각각 다음과 같다[2].

(수증기 개질)

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n+\frac{m}{2})H_2 \quad (1)$$

(부분산화)

$$C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \rightarrow nCO + \frac{m}{2}H_2 \quad (2)$$

일산화탄소의 일부는 다음과 같이 반응한다.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

$$CO + 3H_2O \rightarrow CH_4 + H_2O \quad (4)$$

이들 반응은 평형을 유지하며 진행된다.

반응 (1)은 흡열반응이고 다른 반응들은 발열반응이다. 따라서 반응 (1)에서는 외부에서 가열하여 주어야 한다. 800~900℃ 의 온도에서는 반응 (3) 및 반응 (4)가 별로 진행되지 않는다. 반응 (2)에서는 탄화수소의 일부를 다음과 같이 연소시킨다.

$$C_nH_m + (n+\frac{m}{4})O_2 \rightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O \quad (5)$$

이 연소에너지로 반응 (1) 및 다음 흡열반응에 필요한 에너지를 공급한다.

$$C_nH_m + nCO_2 \rightarrow 2nCO + \frac{m}{2}H_2 \quad (6)$$

이 때 산소 대신에 공기를 사용하면 질소가 따라 들어가서 좋지 않다. 반응 (1)은 외부 가열이 필요하므로 외열식, 반응 (2)는 내열식이라 하나, 앞의 방식이 많이 채용된다.

이처럼 개질기에서 배출되는 가스중에는 많은 양의 일산화탄소가 포함되고 이것이 인산 연료전지의 촉매 독이 되므로, 일산화탄소 전환기를 사용하여 반응 (3)을 진행시키므로써 일산화탄소의 잔존량을 감소시킨다. 이 전환반응은 주로 값싼 철-크롬계 촉매를 사용하여 350~370℃ 에서 진행시키는데 이를 고온 전환(hot shift)이라 한다. 이 때 아직도 일산화탄소가 존재하므로 구리-아연계의 촉매를 사용하여 다시 저온 전환(cold shift)을 진행시켜 잔존 일산화탄소의 농도를 허용범위내로 감소시킨다.

2-2. 연료전지

연료전지에서는 기본적으로 다음의 반응이 일어난다.

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad (7)$$

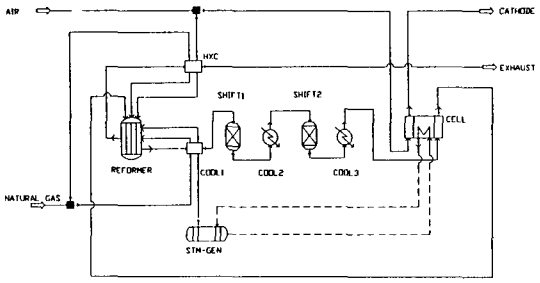

Fig. 2. Fuel cell system

이 반응이 25℃에서 진행될 경우 엔탈피 변화와 Gibbs 자유에너지 변화는 고발열량(HHV : Higher Heating Value)을 기준으로 하면 다음과 같다[3].

$$\Delta H^0 = -286 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^0 = -237 \text{ kJ/mol} \quad (8)$$

즉, 25℃에서 반응이 일어날 경우 반응계 밖으로 286 kJ/mol의 열이 방출된다. 전기화학에서, 가역과정인 경우 반응이 진행될 때, $\Delta H = 286$ kJ/mol중 237 kJ/mol이 전기 에너지가 되고, 나머지 49 kJ/mol은 열로 방출된다. 따라서 전기에너지로 전환가능한 이론효율인 $\Delta G/\Delta H$은 83%가 된다.

자유에너지 변화량 ΔG는 전기에너지로 변환 가능한 양이며 다음과 같이 나타낼 수 있다[2,3].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (9)$$

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (10)$$

여기서, T는 온도, ΔS는 엔트로피 변화, n은 반응에 관계하는 전자수, F는 Faraday상수(96,487 coulomb/mol), ΔE는 전위차이며, 25℃에서 $\Delta E^\circ = 1.23$ V이다.

2-3. 기타 시스템

연료전지 공정에서 열공급 시스템은 주로 전지의 폐열(70℃의 온수 및 150℃ 정도의 수증기)을 이용한다. 또 연료전지의 발생전력이 직류이므로 전력교환 조정장치가 필요하다. 즉, 전기분해용 전력으로 사용하려면 직류출력의 전압조절을 위한 단속기(chopper)가 필요하며, 일반적으로 쓰이는 교류 전력 계통에 접속하려면 사이리스터 인버터(thyristor invertor)가 필요하다.

3. 모사방법

본 연구에서 다룬 실제 50 kW 연료전지 발전시스템은 Fig. 2와 같다[2,4,5]. 이 시스템은 크게 연료개질부분과 연료전지로 나눌 수 있다. 각 단위공정은 ASPEN

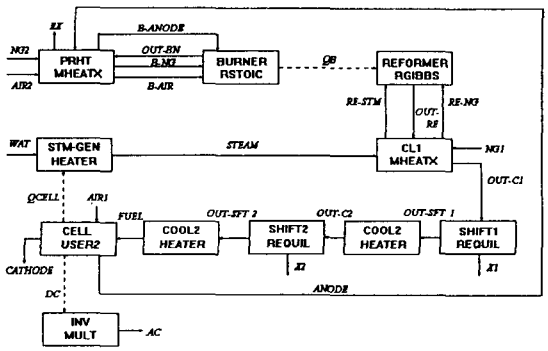

Fig. 3. ASPEN PLUS block diagram

Table 1. Feed streams (composition, temperature, and flow rate)[8]

Composition (mol %)	Natural Gas	Air	Water
CH_4	94.95	0.00	0.00
C_2H_6	3.90	0.00	0.00
C_3H_8	0.15	0.00	0.00
CO_2	0.20	0.00	0.00
N_2	0.79	79.00	0.00
O_2	0.00	21.00	0.00
H_2O	0.00	0.00	100.00
Temperature (℃)	25	25	25
Flow rate (kmol/hr)	0.37	12.10	1.00

PLUS에서 적절한 모델을 취하여 모사하였으며[6], 연료전지(cell)는 USER 모델[7]과 FORTRAN 블럭을 이용하여 간단한 algorithm으로 작성하였다. 이에 대한 block diagram은 Fig. 3과 같으며, 여기에 각 블럭의 이름과 ASPEN PLUS의 모델명 그리고 각 흐름의 이름과 연결상태를 나타내었다. 원료로 사용한 천연가스의 조성을 Table 1에 나타내었으며[8], 각 단위공정의 조작조건은 Table 2에 나타내었다[2,4].

3-1. 개질부분 모사

개질부분은 개질기로 반응열을 공급해 주는 연소기, 개질기, CO 전환기 등으로 구성하여 모사하였다. 개질반응이 흡열반응이므로 공급되는 탄화수소의 일부와 연료전지에서 반응하지 않고 배출되는 음극가스를 연소시켜 개질기에 반응열을 공급하였다. 이 때 ASPEN PLUS의 DESIGN SPEC 기능을 이용하여 연소기로 공급되는 탄화수소의 양이 최소가 되도록 하였다.

원료중에는 메탄외에도 에탄, 프로판 등이 있으므로 연소기에서의 반응은 식 (5)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Conditions of each block [2,4]

HEAT EXCHANGER 1 : MHEATX	
Cold side outlet temperature (℃)	600
Cold side outlet pressure (atm)	2
HEAT EXCHANGER 2 : MHEATX	
Hot side outlet temperature (℃)	247
Hot side outlet pressaure (atm)	1
BURNER : RSTOIC	
Outlet temperature (℃)	800
Outlet pressure (atm)	1
REFORMER : RGIBBS	
Outlet temperature (℃)	700
Outlet pressure (atm)	1
S/C ratio	2.8
CO CONVERTER (High temp.) : REQUIL	
Reaction:	$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$
Outlet temperature (℃)	350
Outlet pressure (atm)	1
CO CONVERTER (Low temp.) : REQUIL	
Reaction:	$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$
Outlet temperature (℃)	200
Outlet pressure (atm)	1
PRODUCT COOLER 1 : HEATER	
Outlet temperature (℃)	165
PRODUCT COOLER 2 : HEATER	
Outlet temperature (℃)	190
FUEL CELL STACK : USER2	
Reaction:	$H_2+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
Outlet temperature (℃)	190
H_2 utilization (%)	80
Voltage efficiency (%)	70
INVERTER : MULT	
Efficiency (%)	98
STEAM GENERATOR : HEATER	
Saturated pressure (atm)	2

$$CH_4+2O_2 \rightarrow 2H_2O+CO_2$$

$$2C_2H_6+7O_2 \rightarrow 6H_2O+4CO_2 \quad (5')$$

$$C_3H_8+5O_2 \rightarrow 4H_2O+3CO_2$$

$$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (11)$$

연소기에서의 반응은 주어진 양론비대로 반응하여 완전연소가 이루어진다고 가정하였으며, 이에 대한 모사는 ASPEN PLUS의 RSTOIC모델을 이용하였다.

개질기에서의 반응혼합물은 8가지 성분(H_2, CO, CO_2, H_2O, CH_4, C_2H_6, C_3H_8, N_2)으로 이루어지며, 평형조성은 이 혼합물의 Gibbs 자유에너지가 최소인 상태일 때 얻어진다. 따라서 평형에 도달한다는 가정하에 ASPEN PLUS의 반응기 모델 중의 하나인 RGIBBS모델을 이용하여 개질기를 모사하였다. 개질반응에서의 중요한 조업 변수는 온도, 압력, 수증기/탄화수소 비(S/C ratio) 등인데 이들의 영향을 ASPEN PLUS의 SENSITIVITY 기능을 이용하여 살펴보았다.

전환기에서는 식 (3)의 반응이 평형에 도달한다고 가정하여 ASPEN PLUS의 REQUIL 모델을 이용할 수 있다. 이 때 연료전지 촉매의 피독작용을 방지하기 위하여 전환기로부터 나오는 가스 중 CO의 양을 1% 미만으로 유지하도록 하였다[9].

3-2. 연료전지 모사

연료전지내에서는 개질기를 거친 가스와 공기가 도입되어 190℃, 1 atm에서 식 (7)의 반응이 일어나도록 하였다. 물질수지를 계산하고 열역학적인 관계로부터 출력 전기에너지와 발생되는 열을 계산하였다. 50 kW에 대하여 전압효율은 70%($\Delta E=0.8$ V) 그리고 수소이용률은 80%로 하였으며, 전압효율과 수소이용률을 변화시켜가며 5가지 다른 경우에 대하여 모사하여 보았다. 이상의 계산과정은 ASPEN PLUS의 USER 모델과 FORTRAN 블럭을 이용하였다.

이 때 계산되는 전력은 직류이므로 이를 직류-교류 변환기를 통하여 교류로 바꿔주어야 한다. 이를 위하여 ASPEN PLUS 모델 중 물질 및 정보 흐름을 조작하는 MULT를 이용하여 효율 98%의 변환기를 모사하였다.

3-3. 기타 단위공정 모사

개질기로부터 나오는 고온의 가스와 연료전지에서 나오는 가스는 열교환을 통하여 효율적으로 이용할 수 있다. 이를 위하여 다중 열교환기를 2개 설치하였으며 ASPEN PLUS의 MHEATX 모델을 이용하여 모사하였다. 또한 HEATER 모델을 이용하여 연료전지에서 생성되는 열은 2 atm의 포화수증기를 발생시키도록 모사하였다.

3-4. 효율 계산

연료전지의 열효율은 다음과 같다.

$$\varepsilon_T=\frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (12)$$

식 (12)로부터 190℃, 1 atm에서의 연료전지의 이상적 열효율을 계산하면 90.7%가 된다. 그러나, 실제 연료전지에서는 표준 기전력보다 낮은 전압이 얻어지고 수소 이용률이 100%가 되지 못하므로 다음과 같이 효율(전기화학적 효율 ε_E)을 계산한다[2,3,10].

$$\varepsilon_E = \varepsilon_T \cdot \varepsilon_V \cdot U \tag{13}$$

여기서, ε_V는 전지내부의 전압강하를 고려한 전압효율이고 U는 수소 이용률이다.

식 (13)은 연료가 전지반응에 대하여 활성이 있는 가스만으로 되어 있을 때에 한하여 성립된다. 불활성 가스가 공존할 때에는 열량효율(heating value efficiency) ε_H를 결정하여야 한다. 일반 연료를 개질하여 만드는 연료전지용 가스는 수소가 많이 들어 있기는 하지만 정제하지 않는 한 메탄 등의 탄화수소와 일산화탄소가 섞여 있기 마련이다. 이들은 인산형 연료전지 반응에 있어서 불활성이나 연소열이 있으므로 식 (12)에서 분모는 연료가스의 총 연소열 Q_T로 나타내어야 한다. 따라서 연료전지 반응에 관여하는 연료가스만의 연소열을 Q라 한다면, 열량효율 ε_H는 다음과 같다[2,10].

$$\varepsilon_H = \frac{Q}{Q_T} \tag{14}$$

이 연료전지의 열효율 ε_{FC}는 전기화학적 효율 ε_E와 열량효율 ε_H에 의하여 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_{FC} = \varepsilon_E \cdot \varepsilon_H \tag{15}$$

연료전지 발전시스템 전체에 대한 효율은 원료인 천연가스의 연소열과 공정에서 얻어지는 교류전력을 이용하여 다음과 같이 계산하였다[10].

$$\varepsilon_{AC} = \frac{\text{AC energy out}}{\text{HHV of raw fuel into fuel processor}} \tag{16}$$

4. 결과 및 고찰

우선 50 kW 인산형 연료전지 시스템에 대하여 모사를 실시하였고, 수소 이용률과 전압효율을 바꾸어 5가지 경우에 대해서도 실시하여 보았다. 또한 수소를 공급하는 개질공정이 중요하므로 이에 대한 작업변수의 영향도 알아보았다. 모사결과의 신뢰성을 알아보기 위하여 개질된 가스의 조성을 문헌값과 비교하였다. 보다 많은 전력을 얻으려면 수소를 많이 생성시켜야 하는데, 이에 대한 적절한 조업조건을 찾을 수 있었다.

Table 3. Comparison of simulation results with practical data (feed: methane, reformer temperature : 1000 °C, S/C ratio : 1.57)[2]

	Practical Data (mol %)	Simulation Results (mol %)
H_2	66.5	67.6
H_2O	11.0	10.0
CH_4	1.0	0.0
CO	18.5	20.6
CO_2	2.8	1.7
N_2	0.2	0.2

Table 4. Comparison of simulation results with practical data (feed : methane, reformer temperature : 684 °C, S/C ratio : 2.5) [11]

	Practical Data (mol %)	Simulation Results (mol %)
H_2	72.04	75.91
CH_4	1.96	1.68
CO	15.17	13.77
CO_2	10.82	8.64

4-1. 연료전지 시스템 모사 결과

모사의 타당성을 검증하기 위하여 개질가스의 조성을 실제 운전되고 있는 각기 다른 조건의 공정들[2,11]과 비교하여 보았다. Table 3은 개질기의 온도를 1000℃로 하고 S/C 비는 1.57로 유지한 경우로서 개질기 출구 가스의 조성을 모사 결과와 실제값을 비교하여 나타낸 것이다. 이 때 원료 중에는 미량의 질소가 함유되어

Table 5. Composition of Gas (reformer temperature : 700°C, S/C ratio : 2.8)

Stream ID comp. (mol %)	OUT-RE	OUT-SFT1	OUT-SFT2	FUEL	ANODE	CATHODE
H_2	57.35	64.97	67.35	67.35	29.21	0.00
CO	10.33	2.72	0.34	0.34	0.74	0.00
CO_2	6.80	14.41	16.79	16.79	36.42	0.00
H_2O	24.83	17.21	14.83	14.83	32.17	9.48
CH_4	0.67	0.67	0.67	0.67	1.45	0.00

Table 6. Case study of fuel cell process

Case No.	1	2	3	4	5	6
H_2 Utilization (%)	100	80	60	50	10	80
Cell Efficiency (%)	64	51	38	32	6	44
Natural gas Consumption (kmol/hr)	0.45	0.37	0.35	0.35	0.35	0.37
AC Power (kW)	61	50	38	32	9	43
Heat (Btu/hr)	27,877	32,515	36,190	37,850	43,199	36,190
AC Efficiency (%)	54	54	43	37	10	43

있다. Table 4는 온도를 684℃로 하고 S/C 비는 2.5로 하여 운전한 결과를 나타낸 것이며, 원료로는 순수 메탄만을 사용하였다. 여기에서는 물을 제외한 mol%를 기준으로 나타내었다. 모사결과와 실제값이 거의 일치함을 알 수 있으며, 약간의 차이가 나는 이유는 본 모사가 완전한 평형을 가정하였기 때문이다.

50 kW 연료전지 시스템에 대한 모사 결과로부터 얻은 주요 흐름의 조성은 Table 5와 같다. 수소이용률을 80%로 고정시켰을 경우 연료전지의 전기화학적 효율은 51%, 시스템 효율은 54%로 계산되었다. 이 때 개질기에서 나온 수소의 순도는 전환기를 거친 후 57.35 mol%에서 67.35 mol%로 증가하였고, 촉매에 영향을 미치는 일산화탄소의 경우는 10.33 mol%에서 0.34 mol%로 감소하였다.

Table 6에는 수소이용률과 전압효율을 변화시켜 모사한 결과를 나타내었다. Case 1부터 Case 5는 전압효율을 70%로 고정하고 수소이용률을 변화시키면서 모사한 결과이고, Case 6은 수소이용률이 80%이고 전압효율이 60%일 경우의 결과이다. 개질기의 조건은 Table 2에서 나타낸 바와 같다. 50 kW에 대한 모사결과는 Case 2이다. 수소이용률에 따라 전력에 현저한 영향을 미치는데 기존의 발전 효율보다 높아지기 위해서는 수소이용률이 50%이상 되어야 함을 알 수 있다. 따라서 연료전지의 성능을 향상시키는 것이 중요하다.

4-2. 개질기 조작변수의 영향

Fig. 2에는 개질기의 온도를 800℃, S/C 비는 3으로 하여 1~50 atm 사이의 압력에 대한 수소 순도의 변화를 나타내었는데, 압력이 증가함에 따라 수소 순도가 감소한다. 따라서 개질기의 압력을 상압으로 조작하여도 됨을 알 수 있다. 현재 외국에서 실용화된 공정에서도 상압조작을 하고 있다[4,12]. 상압에서 S/C 비를 3으로 한 경우 500~1500℃ 사이의 개질기 온도에 대한 수소 순도의 영향은 Fig.5에 나타내었다. 온도가 증가할수록 수소 순도가 증가하며 800℃ 이상에서는 변화가 없다. 따라서 지나치게 고온에서 조작할 필요가 없음을 알 수 있다. Fig. 6은 상압에서 개질기 온도를 800℃로 하였을 때 수소 순도를 최대로 하는 S/C 비의 영역(1.5~2.5)이 존재함을 보여준다.

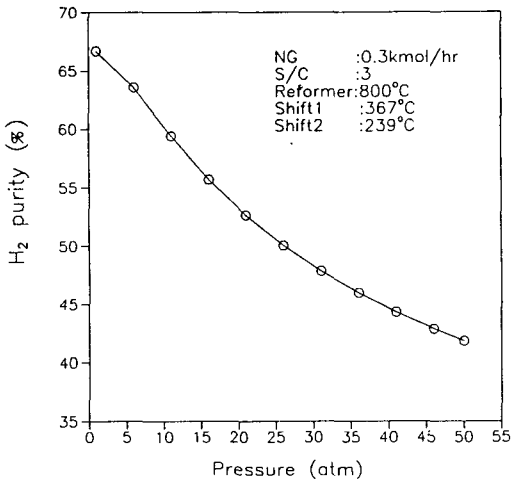

Fig. 4. Effect of pressure on H_2 purity in reformer

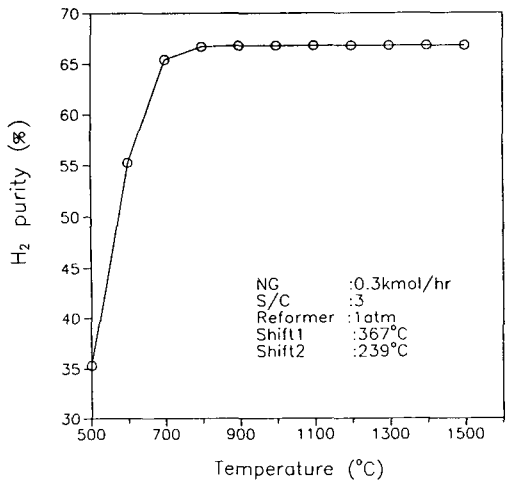

Fig. 5. Effect of temperature on H_2 purity in reformer

Fig. 7 및 Fig. 8에는 각 단위공정을 거치면서 변화

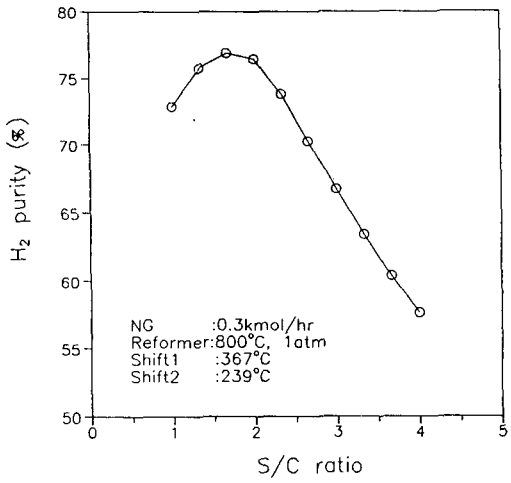

Fig. 6. Effect of ratio on H_2 purity in reformer

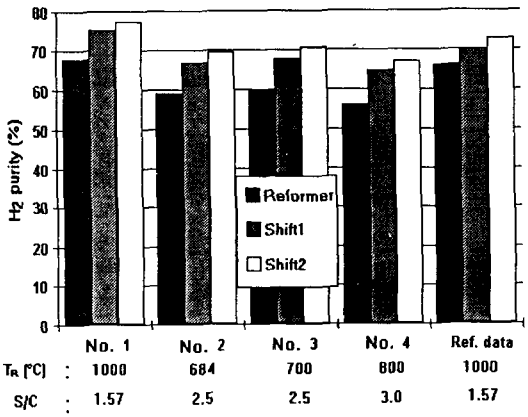

Fig. 7. H_2 purity of each unit

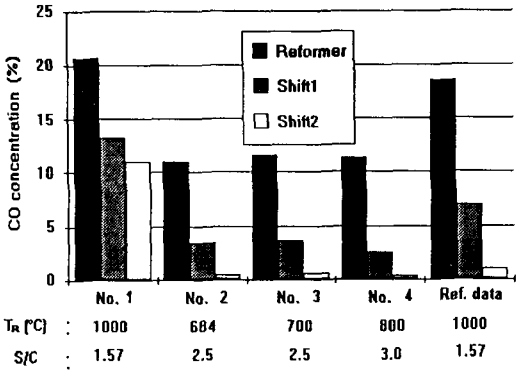

Fig. 8. CO concentration of each unit

하는 수소와 일산화탄소의 농도를 여러 경우의 개질기 온도와 S/C 비에 대하여 나타내었다. 첫번째 경우가

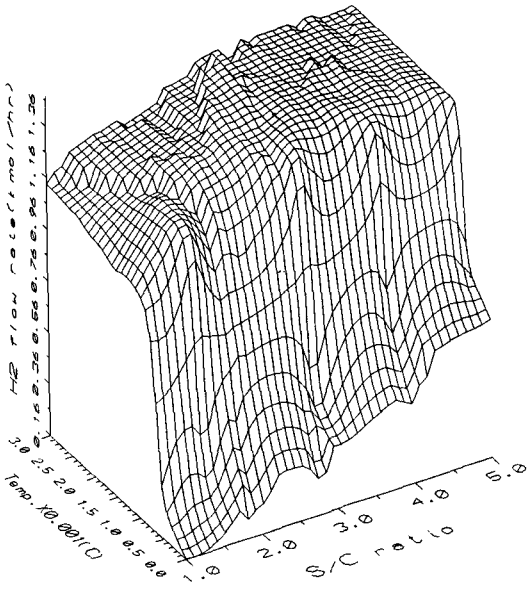

Fig. 9. Effect of temperature and S/C ratio on H_2 flow rate at 1 atm.

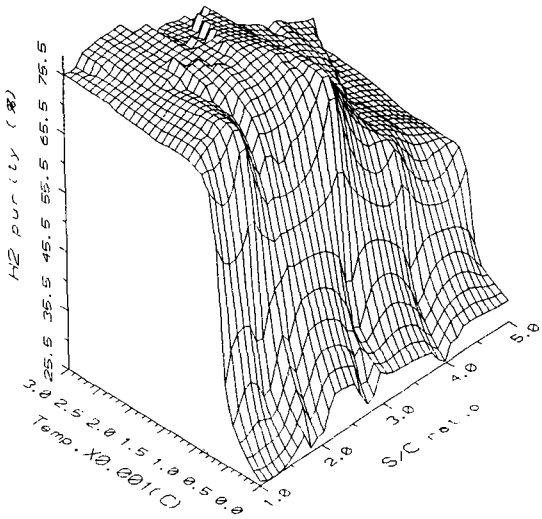

Fig. 10. Effect of temperature and S/C ratio on H_2 purity at 1 atm

수소의 순도는 가장 높으나 일산화탄소의 함량은 높게 나타났는데, 이는 S/C 비가 낮아 일산화탄소 전환반응이 충분히 일어나지 못하기 때문이므로 전환기에 수증기를 공급하여야 한다. 나머지 경우는 특정 온도에서 S/C 비를 높여주었을 때 일어나는 반응 결과를 나타낸 것으로서 일산화탄소의 농도가 현격히 감소하였음을 알 수 있다. 따라서 적절한 수소 순도를 얻는 동시에 일

산화탄소의 농도를 감소시키는 조업조건을 유지하도록 하여야 한다.

상압하에서 온도와 S/C 비를 동시에 변화시켜 모사하여 얻은 수소 유량의 변화를 3차원 공간에 나타내면 Fig. 9와 같다. 여기서는 더 넓은 작업영역을 알아보기 위하여 온도는 3000℃ 까지, S/C 비는 1부터 5까지 변화시켜 보았다. Fig. 10에는 역시 같은 조건에서의 수소 순도 변화를 나타내었다. 이로부터 원하는 수소유량이나 순도를 구하기 위한 작업영역을 알 수 있다. 즉 50 kW 연료전지 공정은 개질기로부터 순도 65 mol%이상과 1.3 kmol/hr이상의 유량을 갖는 수소를 얻기 위하여, 상압에서 S/C 비가 2.5~3, 온도는 650~900℃ 의 범위에서 운전하여야 한다.

5. 결 론

천연가스를 사용하는 50 kW 인산형 연료전지 발전 시스템을 상용모사기인 ASPEN PLUS를 이용하여 모사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 개질기 모사 결과 문헌이나 실제 외국에서 실용화된 공정과 근사한 값을 얻었으며, 이로부터 향후 실용화될 국내의 연료전지용 개질공정에 대한 기본 자료를 제시할 수 있다.

2. 여러가지 조업조건을 변화시킴으로써 수소를 최대로 얻을 수 있는 조업범위을 알 수 있으며, 이는 상압에서 S/C 비가 2.5~3, 온도는 650~900℃ 정도이다.

3. 기존 발전소의 발전효율을 얻기 위하여는 수소이용률이 50% 이상 유지되어야 한다. 이는 전적으로 연료전지의 성능에 의하여 좌우되므로, 보다 효율적인 연료전지의 개발여부에 따라 발전설비의 실용화가 좌우된다.

감 사

본 연구의 수행을 위하여 연구비를 지원하여 주신 (주) 유공에 감사드립니다.

사용기호

ΔE : potential difference [V]
ΔE^0 : standard potential difference [V]
F : Faraday constant, 96,487 [coulomb/mol]
ΔG : Gibbs free energy change [kJ/mol]
ΔG^0 : standard Gibbs free energy change [kJ/mol]
ΔH : enthalpy change [kJ/mol]
ΔH^0 : standard enthalpy change [kJ/mol]
n : mole number of electron [mol]
ΔS : entropy change [kJ/mol · K]
T : temperature [K]
T_R : reformer temperature [K]
U : H_2 utilization [dimensionless]
Q : combustion heat of species involved in electrochemical reaction [kJ/mol]
Q_T : heat energy available by combustion of fuel [kJ/mol]

그리이스 문자

ε_{AC} : system efficiency (without waste heat utilization) [dimensionless]
ε_E : electrochemical efficiency [dimensionless]
ε_{FC} : fuel cell efficiency [dimensionless]
ε_H : heating value efficiency [dimensionless]
ε_T : thermal efficiency [dimensionless]
ε_V : voltage efficiency [dimensionless]

참고문헌

1. 노용우, 설용건, 이태희 : 화학공업과 기술, 6(1), 66 (1988).
2. 高橋武彦 : "燃料電池", 公立出版社, 東京 (1986).
3. 燃料電池發電システム編集委員會 : "燃料電池發電システム", オ-ム, 東京, 日本 (1992).
4. Yanagino, T., Matsumoto, H., Kariya, B., Kadoya, N. and Yoshino, E. : International Fuel Cell Conference Proceedings, II-D, p. 79, Japan (1992).
5. Ikeda, M., Iwasa, N., Yoshida, H. : International Fuel Cell Conference Proceedings, II-F, p. 121, Japan (1992).
6. ASPEN PLUS$_{TM}$ User Guide, Aspen Technology, Inc. (1988).
7. ASPEN PLUS$_{TM}$ Notes on Interfaces and User Models, Aspen Technology, Inc. (1988).
8. Martyn, V. T. : "Catalyst Handbook", 2nd ed., Wolfe Publishing Ltd., Frome, England (1989).
9. 김동현 등 : "연료개질기 개선 연구 최종보고서", 동력자원부 (1991).
10. Kinoshita, K., McLarnon, F. R., Cairns, E. J. : "Fuel Cells-A Handbook", U.S. Dept. of Energy, WV (1988).
11. Iwasa, N., Okada, O. : International Fuel Cell Conference Proceedings, II-D, p. 83, Japan (1992).
12. Hashimoto, N., Tsushi, I., Iwasa, N., Sawada, Y., Ide, R. : International Fuel Cell Conference Proceedings, II-F, p. 125, Japan (1992).