

## 고분자 전해질 막 연료전지를 위한 메탄 개질기에서 형상 변화가 개질 성능에 미치는 영향에 대한 연구

서동균\*, 노인규\*\*, 황정호\*\*\*<sup>†</sup>, 최종균\*\*\*\*, 신동훈\*\*\*\*, 김형식\*\*\*\*

\*연세대학교 대학원 기계공학과, \*\*연세대학교 수소연료전지 협동과정,  
\*\*\*연세대학교 기계공학과 및 수소연료전지 협동과정, \*\*\*\*생산기술연구원 고온생산기술연구부,  
\*\*\*\*\*국민대학교 기계공학과, \*\*\*\*\*한국가스공사 신재생에너지팀

## Effect of Tip Size and Aspect Ratio on Reforming Performance in a Methane Reformer for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

DONGKYUN SEO\*, INKYU NOH\*\*, JUNGHO HWANG\*\*\*<sup>†</sup>, JONGKYUN CHOI\*\*\*\*,  
DONGHOON SHIN\*\*\*\*, HYUNGSIK KIM\*\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Grad. School of Yonsei Univ., 134 Shinchon-dong,  
Seodaemoon-gu, Seoul, 120-749, Korea

\*\*Dept. of Fuel Cell Engineering, Grad. School of Yonsei Univ., 134 Shinchon-dong,  
Seodaemoon-gu, Seoul, 120-749, Korea

\*\*\*School of Mechanical Engineering and Hydrogen and Fuel Cell Engineering, Yonsei Univ., 134  
Shinchon-dong, Seodaemoon-gu, Seoul, 120-749, Korea

\*\*\*\*High Temperature Processing R&D Department Korea Institute of Industrial Technology, 35-3  
Hongchon-Ri, Ipchang-Myun, Seobuk-Gu, Chonan-Si, Chungnam, 330-825, Korea

\*\*\*\*\*School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin Univ., 861-1, Jeongneung-dong,  
Seongbuk-gu, Seoul, 136-702, Korea

\*\*\*\*\*KOGAS New Energy & Environment Team, R&D Division, 638-1 Il-dong, Sangrok-gu,  
Ansan-si, 426-791, Korea

### ABSTRACT

Design of a reformer consisting of combustion chamber and reforming chamber was investigated for a 1 kW and a 5 kW polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), respectively, using the computational fluid dynamics (CFD). First, the 1kW reformer was considered to obtain the reliability of the numerical study. It was modeled, calculated and compared with experimental data. Second, the 5kW reformer was considered for a geometric study. Three tip sizes (35, 40, and 45 mm) and five aspect ratios was selected. It was found that the optimum was at tip sizes of 40 and 45 mm, at aspect ratios of -10% and -20% of the standard length.

**KEY WORDS** : Reformer(개질기), Tip size(팁크기), Polymer electrolyte membrane fuel cell(PEMFC), Computational fluid dynamics(CFD)

<sup>†</sup>Corresponding author : hwangjh@yonsei.ac.kr

[ 접수일 : 2010.8.23 수정일 : 2010.10.15 게재확정일 : 2010.10.20 ]

## Nomenclature

- $A_r$  : pre-exponential factor  
 $C_{j,r}$  : molar concentration of species j in reaction r  
 $C_1, C_2$  : realizable  $k-\epsilon$  model constant  
 $D_{i,m}$  : mass diffusion coefficient for species i,  $m^2/s$   
 $E$  : total energy  
 $E_r$  : activation energy of reaction r  
 $G_k, G_b$  : turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients and buoyancy  
 $k$  : turbulence kinetic energy  
 $k_{eff}$  : effective thermal conductivity  
 $k_{f,r}, k_{b,r}$  : forward and backward rate constant for reaction r  
 $K_r$  : equilibrium constant for the  $r^{th}$  reaction  
 $M_{w,i}$  : molecular weight of species i  
 $p$  : static pressure  
 $R$  : universal gas constant  
 $R_i$  : source term of species i  
 $S_h$  : heat sources  
 $S_{ij}$  : mean strain rate  
 $S_k, S_\epsilon$  : generalized source term  
 $Sc_t$  : turbulent schmidt number  
 $T$  : static temperature  
 $u, u_p$  : gas and particle velocity  
 $u_i, u_j$  : mean velocity components  
 $\overline{u_i}, \overline{u_j}$  : fluctuating velocity components  
 $x_i, x_j$  : coordinate of directions  
 $Y_i$  : mass fraction of species i  
 $\Gamma$  : finite rate/eddy dissipation third-body rate  
 $\epsilon$  : turbulence dissipation rate  
 $\eta$  : ratio of turbulence to mean shear time scale  
 $\eta'_{j,r}, \eta''_{j,r}$  : rate exponent for reactant and product species j in reaction r  
 $\mu$  : dynamic viscosity  
 $\mu_t$  : turbulent viscosity  
 $\nu$  : kinematic viscosity  
 $\rho$  : gas density  
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  : yurbulent prandtl numbers for k and  $\epsilon$   
 $(\tau_{ij})_{eff}$  : deviatoric stress tensor

$v'_{i,r}, v''_{i,r}$  : stoichiometric coefficient for reactant and product i in reaction r

## 1. 서 론

현재 화석연료로 인한 이산화탄소 배출량 증가 등 환경오염이 심각한 문제로 대두되고 있으며, 정부의 녹색 성장을 기조로 한 정책 변화 등 대체 에너지 분야에 많은 투자 및 연구가 진행 중이다. 대체 에너지 중 수소는 오염물질을 발생시키지 않고 에너지 밀도가 높다는 특징을 가지고 있다. 특히 이 수소를 연료로 사용하는 연료전지는 수소 경제에 있어서 중요한 에너지 변환장치로 각광받을 것으로 예상되고 있다<sup>1)</sup>.

연료전지의 운용에 있어 연료로 쓰이는 수소를 얻는 방법은 크게 전기분해, 화석연료로부터의 생산, 생물학적 수소생산, 열화학적 수소생산으로 나눌 수 있다<sup>2)</sup>. 연료 개질기는 이 중 화석연료로부터의 생산 방식으로, 화석연료를 촉매 반응 등의 화학적 방법을 활용하여 수소를 생산하는 기술이다<sup>3)</sup>. 이와 같은 개질기는 가정용 PEMFC(polymer electrolyte membrane fuel cell)에 쓰이기 위해 주로 제작된다. PEMFC의 작동온도는 섭씨 100°C도 이하로 가정용 전원에 주로 쓰인다. PEMFC의 연료로 수소가 사용되는데 이 수소를 각 가정에서 생산하거나 각 가정에 공급하는 부분은 현재의 산업인프라에서는 불가능하다. 따라서 각 가정에서 쉽게 구할 수 있는 연료인 도시가스를 이용하여 수소로 개질시켜주는 장치가 필요하다.

화석 연료의 개질에 관한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. Groote 등은 촉매를 이용한 메탄합성가스의 부분산화에 대한 연구를 하였다<sup>4)</sup>. Yu 등은 산업용 열교환기타입의 스팀개질 모델링을 하였다<sup>5)</sup>. Hwang 등은 메탄올 스팀 개질반응을 이용한 마이크로 반응기에서의 촉매 코팅법을 연구하였다<sup>6)</sup>. Yuan 등은 메탄 개질 덕트에서 질량 및 열전달현상 및 화학반응을 분석하는 연구를 수행하였다<sup>7)</sup>. Tonkovich 등은 스팀 메탄 개질기에서 마이크로 채널 반응기(micro channel reactor) 설계에 대하여 연구하였다<sup>8)</sup>.

Xu와 Froment는 실험을 통해 니켈(Ni)계열의 상용 촉매에서의 수증기 메탄 개질반응(steam methane reaction)의 내재적 반응 속도에 대한 모델 및 촉매 질량을 기준으로 정리된 반응계수를 제시하였다<sup>9)</sup>. 국내에서도 개질기에 대한 연구가 진행되고 있다. 신동훈 등은 25kW급 용융탄산염 연료전지용 평판형 개질기에 대한 연구 및 수증기 메탄 개질 반응의 해석 모델에 대한 연구를 수행하였다<sup>10,11)</sup>. 윤왕래 등은 5kW급 FEMFC용 개질기를 설계 및 제작하여 성능특성을 수행하였다. 이 때 개질기의 반응 온도는 600~800°C였다<sup>12)</sup>. 오영삼 등은 5kW급 콤팩트형 개질기를 개발하였고, 수소 스테이션용 20kW급 개질기를 개발하여 3.75의 스팀/카본 비에서 94%이상의 메탄 전환율을 얻을 수 있었다<sup>13,14)</sup>. 양태현 등은 5kW급 주택용 PEMFC용 개질기 연구를 수행하여 2.5의 스팀/카본 비에서 60~69%의 수소 분율을 얻을 수 있었다<sup>15)</sup>.

본 논문에서는 PEMFC용 개질기를 대상으로 해석적 연구를 수행하였다. 일반적으로, 1kW급 개질기는 주택 1가구의 평균기저전력을 위해 현재 상용으로 보급되고 있는 제품이다. 5kW급 개질기는 상가용으로 현재 개발되고 있는 제품이다. 본 연구에는 1kW와 5kW급 개질기 모두 해석대상에 포함시켰다. 1kW급 개질기를 대상으로 화학반응이 포함된 유동 해석에 대한 기초 해석을 수행하였고, 이것을 실험결과와 비교하였다. 이를 기초로, 5kW급 개질기를 대상으로 유동 제어용 팁의 크기와 개질기 길이의 영향을 살펴보았다.

## 2. 기초이론

### 2.1 해석 대상

Fig. 1은 본 연구의 해석 대상 개질기를 나타낸 것이다. 개질기는 개질 반응에 필요한 열량을 공급하는 연소부와 메탄(CH<sub>4</sub>)과 스팀으로부터 수소(H<sub>2</sub>)를 생산하는 개질부로 나눌 수 있다. 개질 반응이 일어나는 촉매층은 강력한 흡열 반응이 일어나는 STR(steam reforming reaction), 고온에서 수성 가

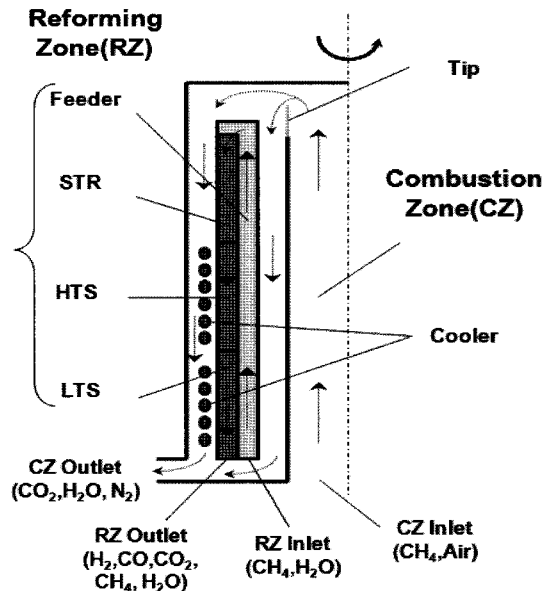


Fig. 1 Schematics of a reformer with a cooler.

스 전환 반응(water gas shift reaction)을 일으키는 HTS(high temperature water gas shift reaction), 저온에서 수성 가스 전환 반응을 일으키는 LTS (low temperature water gas shift reaction)로 구성되어 있다. 냉각부(cooler)는 HTS 및 LTS에서의 수성 가스 전환반응에서 발생하는 열을 냉각시키기 위한 요소이다. 본 연구에서는 연소부에서 개질부의 효과적인 열전달을 위해, 연소가스가 개질부(RZ)를 포함한 공간으로 이동하는 사이에 팁(tip)을 두었고, 이 팁의 크기를 설계 인자로 정하였다.

### 2.2 수치해석

개질기의 형상 생성 및 격자 생성을 위해서 Gambit 2.4.6을 사용하였다. 해석에는 ANSYS®의 FLUENT 6.3.26을 사용하였다. 개질기의 특성을 수치적으로 모사하기 위한 지배방정식은 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존방정식이다. 난류 유동의 모델링을 위해 RNG k-ε 난류모델을 적용하였다. Table 1은 적용된 지배방정식들을 나타낸다. 화학 반응 메커니즘은 총 6가지 기체(O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)로

Table 1 Governing equations

Continuity	$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = m_s$	(1)
Momentum	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) + F_s$	(2)
Energy	$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h$	(3)
Gas species	$\nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot \left( (\rho D_{im} + \frac{\mu_i}{Sc_i}) \nabla Y_i \right) + R_i$	(4)
Turbulence	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \overline{u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k$	(5)
	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon \overline{u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + S_\epsilon$	(6)
	where, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2, C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right), C_2 = 1.9, \eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$	(7)

구성되어있다. 각 기체의 물질 전달은 Table 1에 화학종 보존 방정식(4)을 사용하였다. 화학 반응률을 계산하기 위해 Finite rate 모델을 사용하였고, 이때 화학종 생성율( $R_i$ )은 다음의 식으로 구하였다.

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^N \Gamma(v''_{i,r} - v'_{i,r}) (k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}}) \quad (8)$$

여기서,  $M_{w,i}$ 는 화학종 i의 분자량,  $\Gamma$ 는 Third body 계수,  $C_{j,r}$ 은 화학종의 몰농도,  $\eta'_{j,r}$ 은 정반응 지수,  $\eta''_{j,r}$ 은 역반응 지수를 나타낸다. 정반응 상수 및 역반응 상수는 다음 식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \quad (9)$$

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r} \quad (10)$$

여기서,  $A_r$ 는 Pre-exponential factor,  $\beta_r$ 는 온도의 지수,  $E_r$ 는 활성화 에너지,  $R$ 은 기체상수,  $K_r$ 는 반응식  $r$ 의 평형상수이다. Table 2는 개질기 내의 반응식에 대한 반응상수 및 촉매의 종류를 나타낸 것이다. 개질기와 같은 반응기의 열전달에서 복사가 중요하기 때문에, 비교적 정확한 복사 모델로 알려진 Discrete Ordinate(DO) 모델을 사용하였다.

Table 2 Global reactions and reaction constants for reforming reactions

$k_r = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}$						
Reactor	Reaction	Ar(unit)	$E_r$ (J/kmol)	$\beta_r$	Cata.	Ref.
STR	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$7.75e+14$ ( $m^3/kmol/s$ )	$2.10e+08$	0	Ni	(11)
	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$6.41e+07$ ( $m^3/kmol/s$ )	$2.19e+07$	0	Ni	(11)
	$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$	$4.15e+14$ ( $m^6/kmol^2/s$ )	$2.14e+08$	0	Ni	(11)
HTS	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$5.57e+07$ ( $m^3/kmol/s$ )	$1.00e+07$	0	Fe	(11)
LTS	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$5.57e+07$ ( $m^3/kmol/s$ )	$4.39e+08$	0	Cu	(11)

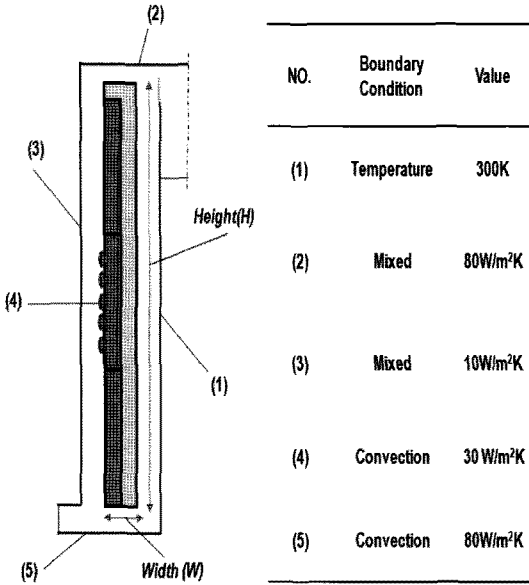


Fig. 2 Wall boundary conditions.

### 3. 경계조건 및 해석조건

해석시간의 단축과 모델링의 간소화를 위해 개질기를 축대칭으로 가정하였다. 이 때 적용된 셀의 개수는 1kW의 경우 약 20,000개, 5kW의 경우 약 33,000 개로 하였다. 개질부는 열전달을 촉진하기 위해 알루미늄 볼로 충전된 공간으로 가정하였고, 유동 및 화학반응 해석을 위해 다공매체(porus media)로 가정하였다. 연소부의 연료는 100%메탄으로 가정하였고 공기와 반응하여 연소 생성물을 발생시키는 것으로 보았다. 연소부 해석을 위해서 주입되는 메탄과 공기를 기초로 단열화염온도 및 이 때의 연소가스 생성물을 구하여 입력조건으로 사용했다. 개질부로 투입되는 연료는 연소 반응물과 동일한 메탄으로 가정하여 수행하였다. Fig. 2는 개질기 해석에 필요한 벽면의 경계조건을 나타낸 것이다. 연소부로 유입되는 관(Fig. 2의 (1))의 입력조건은 상온으로 유입되는 메탄과 공기의 조건인 300K으로 정하였다. 개질기 상부(Fig. 2의 (2))는 설계상 메탄과 물을 예열하는 공간으로 냉각수에 의한 대류 열전달로 가정하였다. 가스 상의 강제대류의 일반적인 열전달 계수(25~250W/m<sup>2</sup>K)를 고려하여, 열전

Table 3 Operating conditions for the 1kW reformer

Zone	Fuel/Oxidizer	Species	Flow rate (l/min)	Temp. (K)
Combustion	Fuel	CH <sub>4</sub>	2.0	300
	Oxidizer	Air	22.9	300
Reforming	Fuel	CH <sub>4</sub>	4.0	300
	Oxidizer	H <sub>2</sub> O	10.9	300

달 계수는 80W/m<sup>2</sup>K으로 하였다<sup>16)</sup>. 개질기의 옆면(Fig. 2의 (3))은 단열재로 보온된 공간으로 자연 대류로 가정하였다. 가스 상의 자연 대류의 일반적인 열전달 계수(2~25W/m<sup>2</sup>K)를 고려하여, 열전달 계수를 10W/m<sup>2</sup>K으로 하였다<sup>16)</sup>. Fig. 2의 (4)로 표시된 냉각관은 상부로부터 가열된 물과 메탄이 개질기의 HTS부를 냉각하기 위한 공간이다. 원형관의 가스 상의 강제대류의 일반적인 열전달 계수(15~50W/m<sup>2</sup>K)를 고려하여, 열전달 계수를 30W/m<sup>2</sup>K으로 하였다<sup>16)</sup>. 개질기 하부(Fig. 2의 (5))는 냉각관을 거치며 가열된 증기와 메탄이 한 번 더 가열되어 개질공간으로 유입되는 공간이다. 가스 상의 강제대류의 일반적인 열전달 계수(25~250W/m<sup>2</sup>K)를 고려하여, 열전달 계수는 80W/m<sup>2</sup>K으로 하였다<sup>16)</sup>. 상온 상압 하에서 운전되는 개질기의 연소부와 개질부에 투입되는 연료와 산화제의 작동 조건은 한국가스공사에서 제공받았으며 1kW급에 대해서 Table 3에 정리하였다. 5kW급의 경우는, 1kW급의 각 입구에서의 유량의 5배로 설정하였다.

### 4. 1kW급 개질기 해석 결과 및 고찰

Fig. 3은 1kW급 개질기에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. 연소부에서 배기가스는 7.4m/s로 유입되었다. 개질부에 열을 공급하는 공간에서의 대부분의 연소가스는 개질부의 외부 채널로 통과하였고, 나머지 연소가스는 개질기 안쪽 채널로 통과하였다. 개질부에서는 개질부의 축매의 다공효과로 유동분포가 관내에서 일정하게 형성되었다. Fig. 4(a)는 개질기 내의 온도분포를 나타낸 것이다. 연료와 산화제가 들어가는 버너 주위에서 약 2000K 정

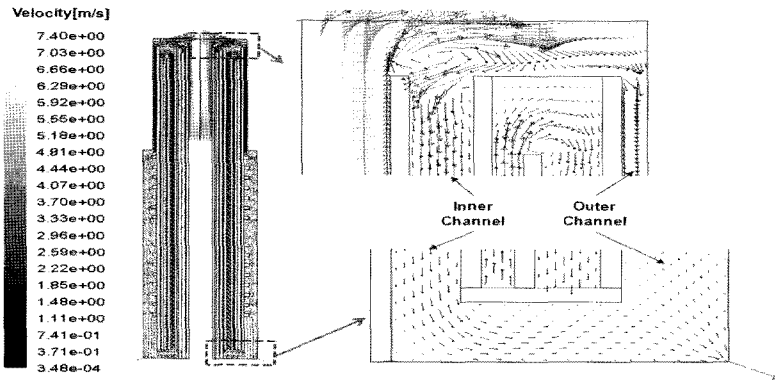
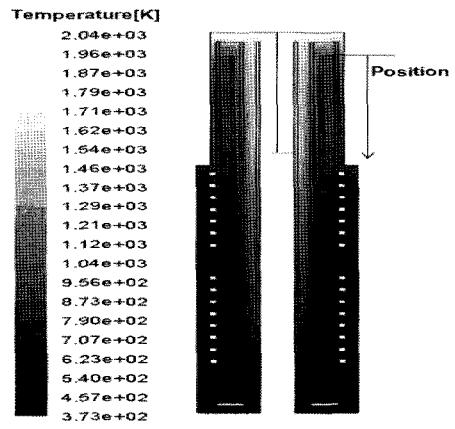


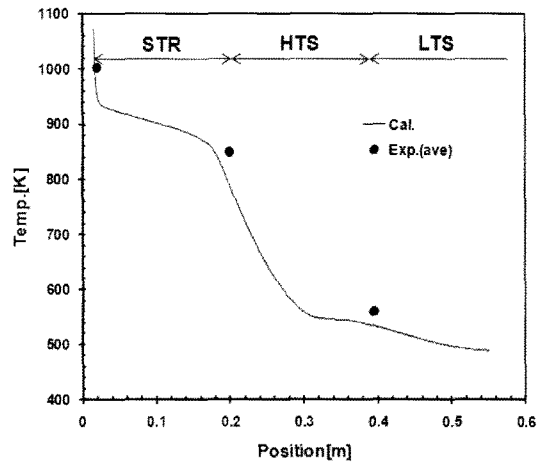
Fig. 3 Distribution of velocity in the 1kW reformer.

도로 가장 높은 온도가 형성되었다. 고온의 연소가스가 상부를 거쳐서 개질부와 접하는 내외부 연소채널을 지나면서 온도는 급격하게 감소했다. 이것은 개질기에서 발생하는 흡열반응으로 인한 열전달 때문이다. Fig. 4(b)는 개질부의 온도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 위치(Position)의 시작점은 개질부가 시작되는 STR의 입구로 정하였다. HTS와 LTS를 지나면서 온도가 지속적으로 감소하였다. 온도 분포를 볼 때, HTS에서 수관의 적용으로 인한 냉각 효과는 매우 효과적인 반면에, LTS에서 수관의 적용으로 인한 냉각 효과는 크지 않았다. Fig. 4(b)에서 알 수 있는 바와 같이 개질기의 주요부의 온도의 해석값과 실험값이 거의 일치하였다.

Fig. 5는 연소부 및 개질부에서 화학종들의 몰분율(mole fraction)을 나타낸 것이다. 개질부 입구에서 유입된 메탄( $CH_4$ )은 알루미늄 볼로 구성된 촉매단을 거치면서 급격히 감소하였다. STR에서 현저히 감소하였고, 그 이후로는 큰 변화가 발생하지 않았다. 수소의 경우는 STR에서 급격하게 생성되었다가 HTS와 LTS에서 완만하게 생성되었다. CO의 경우는 STR에서의 개질반응으로 수소와 함께 생성된 후 HTS와 LTS를 거치면서 그 비율이 줄어들었다. 이와 반대로  $CO_2$ 는 HTS와 LTS를 지나면서 수성가스전환반응으로 인해 증가하였다. Fig. 6은 Fig. 4(a)에서 정의한 position에 따른 각 화학종에 대한 몰분율을 나타낸 그림이다.



(a)



(b)

Fig. 4 Distribution of temperature in the 1kW reformer: (a) distribution, (b) temperature variation against the position of the reforming part.

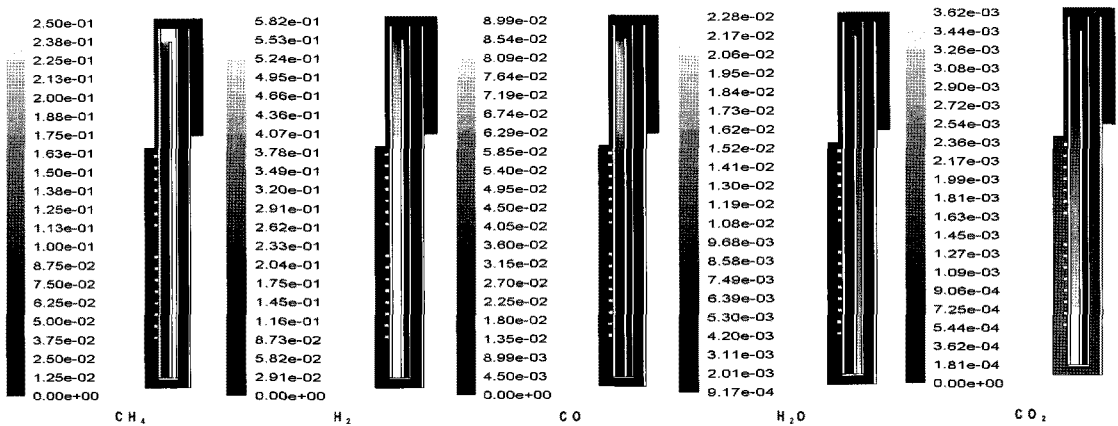


Fig. 5 Mole fraction distributions of various species in the reforming part of the 1kW reformer.

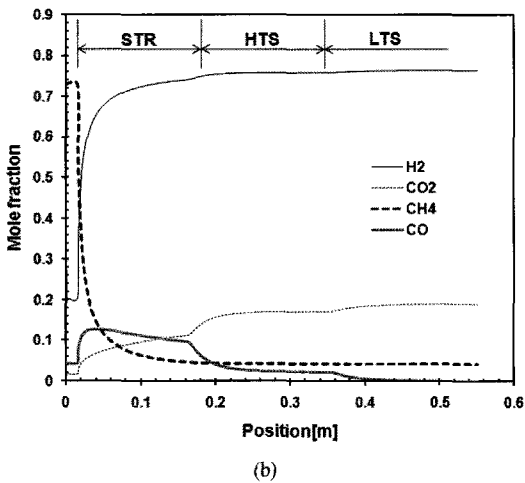
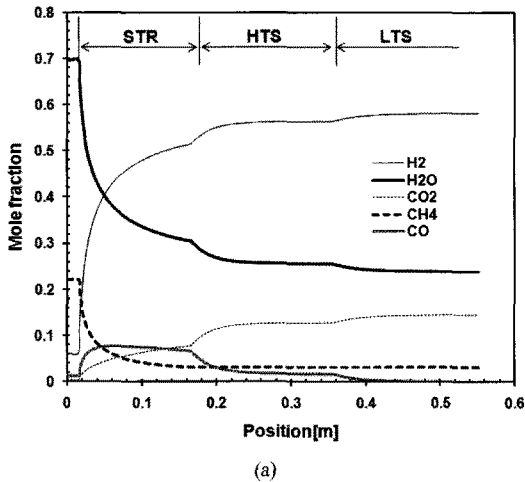


Fig. 6 Mole fraction variations of species in the reforming part of the 1kW reformer: (a) dry, (b) wet.

개질부 출구에서의 각 가스의 조성을 수증기를 제외하고 살펴보면 H<sub>2</sub>: 76.5%, CO<sub>2</sub>: 19.1%, CO: 0.1%, CH<sub>4</sub>: 4.3%로 해석되었다. 이 때 실험값은 H<sub>2</sub>: 77.9%, CO<sub>2</sub>: 18.3%, CO: 0.3%, CH<sub>4</sub>: 0.9%였다.

## 5. 5kW급 개질기 해석 및 고찰

### 5.1 팁(tip) 크기의 영향

1kW급 개질기는 현재 상용화 되고 있을 정도로 이미 많은 연구가 수행되었지만, 5kW급 개질기는 현재 국내에서 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 이에 본 논문에서는 5kW급 개질기를 대상으로, 개질기의 주요 형상 변경이 개질기 특성에 끼치는 영향을 살펴보았다. 이 때 주요 형상 변경은 연소가스가 생성되는 공간에서 개질부를 포함한 공간 사이에 있는 팁(tip)의 크기와 개질기 길이에 해당한다.

기본 모델링은 1kW급 개질기 해석에 적용한 것을 사용하였다. 개질기 내의 각 반응부마다 적정 온도를 유지하여야 그 성능이 극대화 될 수 있다. 연소부에서 발생한 열량을 개질부에 적절히 공급하기 위해서 연소가스의 유동 및 열전달을 고려한 합리적인 설계가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것처럼 연소부와 개질부를 포함한 공간 사이에 팁(tip)을 두었고, 이것을 통해서 연소가스의 분배 및 개질기로의 열전달을 효과적으로 제어하고자

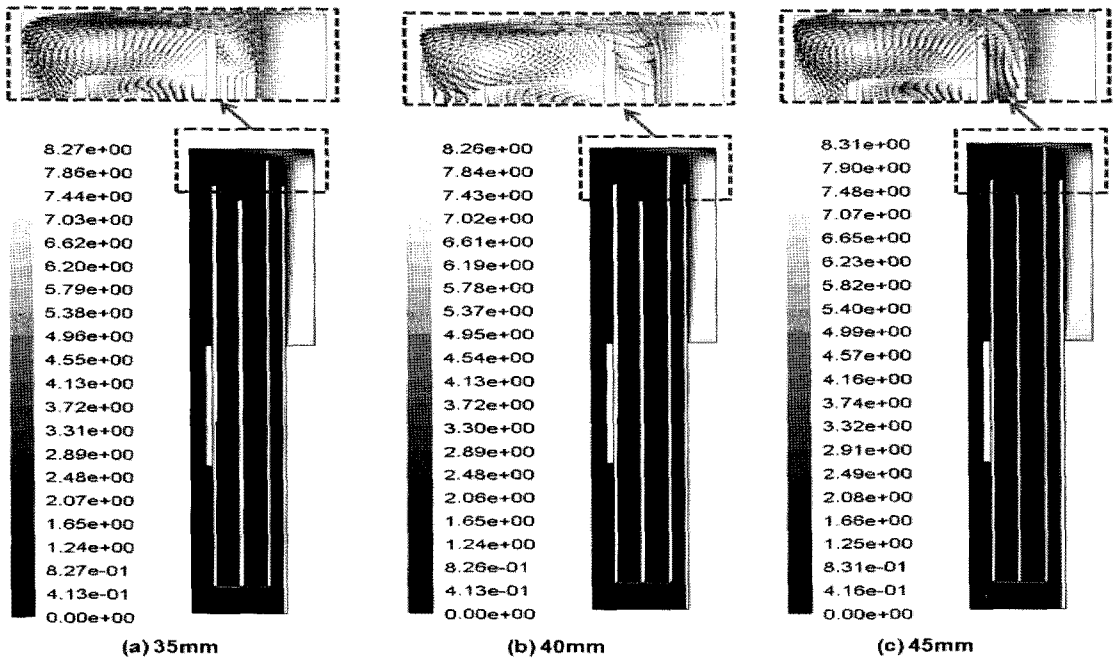


Fig. 7 Effect of tip size on the flow distribution in two channels in the 5 kW reformer: (a) 35 mm, (b) 40 mm, (c) 45 mm.

하였다. 본 장에서는 팁의 크기가 35mm, 40mm, 45mm일 때 개질기의 성능을 비교하였다. Fig. 7은 팁의 크기에 따른 속도장의 변화를 나타낸 것이다. 팁의 크기가 35mm의 경우, 연소실의 내부 채널로 연소가스가 원활하게 통과하지 못하기 때문에 연소실 외부 채널에서 역류가 발생하였다. 이에 반하여, 팁 크기가 40, 45mm인 경우는 이러한 역류가 발생하지 않았다. 또한 팁 크기가 40mm 보다는 45mm일 때 유량 분배 성능이 향상되었다(Table 4). Table 5에서 또한 알 수 있는 바와 같이, 팁의 크기가 35mm일 때는 수소의 출구 몰 비가 64%, 팁의 크기가 40mm일 때는 수소의 출구 몰 비가 63%, 팁의 크기

가 45mm일 때는 수소의 출구 몰 비가 65%를 보였다. 약간의 차이는 있으나 팁의 크기가 수소 개질 성능에 큰 영향을 주지 않았다.

## 5.2 개질기 길이/폭의 영향

개질부에서 촉매 반응에 필요한 열의 공급은 개질기 성능에 중요한 영향은 준다. 전열 면적에 따라 열교환기의 성능이 달라지듯이, 개질기의 성능도 전열 면적에 영향을 받는다. 제작의 용이성 및 설치의 용이성을 동시에 고려하기 위해, 촉매부에 대한 최적화된 형상을 찾을 필요가 있다. 이를 위해 Fig. 8과 같이 개질부의 길이변화에 따른 개질 성능 변화를 살펴보았다. 이때 개질부의 공간부피(STR: 2.00 liter, HTS: 1.65 liter, LTS: 1.65 liter)는 고정하였고, 길이 변화는 -20%, -10%, 0%, +10%, +20%의 5가지 경우를 해석 대상으로 선정하였다. 이 때 길이 변화 0%는 5kW급의 기준 크기에 해당한다. Fig. 8은 5가지 케이스(-20~+20%)에 대한 온도 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 개질기 내부의

Table 4 Outer and inner flow rate and H<sub>2</sub> mole fraction for three tip sizes

Tip size (mm)	Outer flow rate (l/min)	Inner flow rate (l/min)	H <sub>2</sub> mole fraction (%)
35	82.7	17.3	64
40	83.3	16.7	63
45	71.0	29.0	65



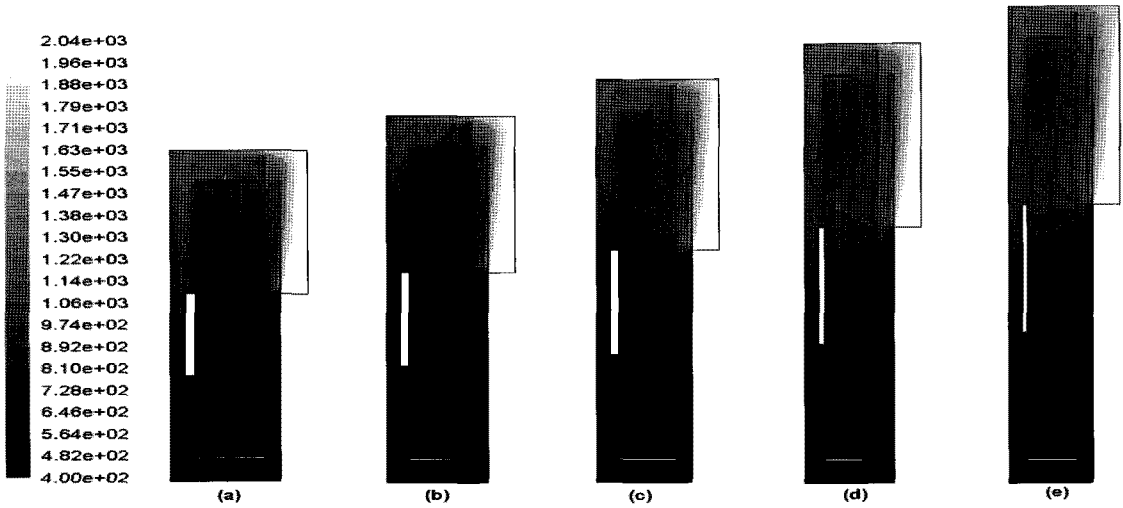


Fig. 8 Effect of length on temperature distribution in the 5kW reformer.

정성적인 특성은 모든 경우에 대해서 1kW의 경우와 대체로 유사하였다. 정량적 비교를 위해 Fig. 9(a)와 같이 5가지 케이스에 대한 연소부 및 개질부의 출구에서의 온도(면적 평균값)를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 길이가 증가함에 따라 연소부의 출구 온도는 574K에서 532K으로 떨어졌고, 개질부의 출구 온도는 530K에서 487K으로 떨어졌다. Fig. 9(b)는 개질부 출구 측에서의 H<sub>2</sub>, CO의 몰분율, 메탄 전환율을 나타내었다. 이 때 메탄 전환율은 아래와 같이 정의한다.

Conversion ratio(%)

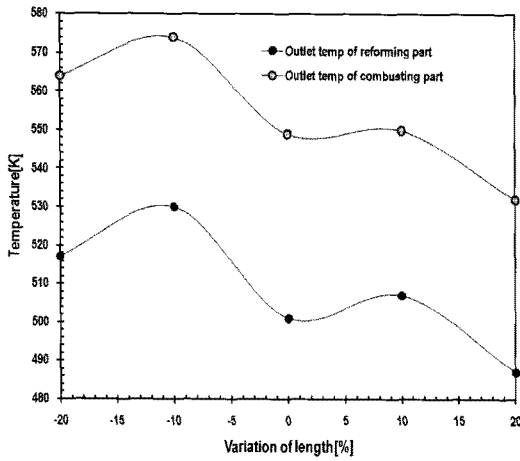
$$= \left( 1 - \frac{CH_{4,outlet}}{CH_{4,inlet}} \right) \times 100 \quad (11)$$

그림에서 알 수 있는 바와 같이 길이 변화가 -20%에서 -10%가 될 때, 출구에서 H<sub>2</sub>의 몰 비와 메탄 전환율은 완만하게 증가하였다. CO의 잔량은 0.50%에서 1.53%를 나타내었고, 길이변화에 따른 경향성은 없었다. 이것은 STR에서의 흡열반응, HTS와 LTS에서의 발열반응 및 전열 면의 변화 등의 복합적인 영향 때문이다.

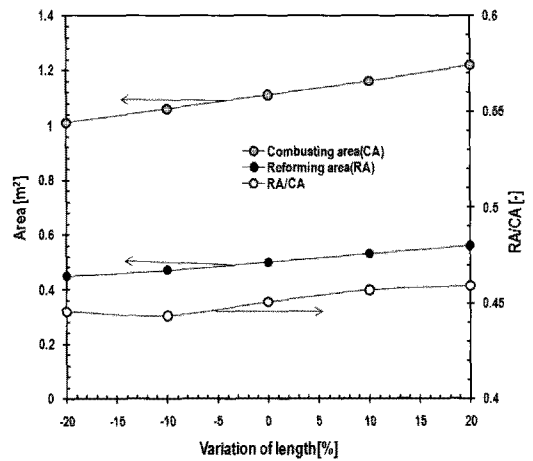
Fig. 10(a)는 길이 변화에 따른 연소부의 면적(CA), 개질부의 면적(RA), 그리고 두 면적의 비(RA/CA)를 나타낸 것이다. 개질기에서 연소부의 역할은 열량을 공급하는 것이고 개질부는 열량을 공급받는 것이다. 연소부 면적이 증가할수록 개질부로 공급 열량과 및 외부로의 열손실이 동시에 증가하고, 개질부의 면적이 증가할수록 개질부로 공급되는 열전달이 증가한다. 본 연구에서는 개질부의 면적을 연소부의 면적으로 나눈 값(RA/CA)은 개질기 면적의 성능지표로 삼았다. 이 지표는 연소부의 동일 입열량에서 개질부에 공급한 열량을 나타낸다. Fig. 10(a)에서 알 수 있듯이, 길이가 증가할수록 개질기의 면적 성능지표가 증가하였다. Fig. 10(b)는 길이가 증가함에 따른 STR, HTS, LTS의 흡열 혹은 발열량 및 흡발열량의 총합을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 길이가 증가할수록, STR의 경우 흡열량이 증가하였고, HTS와 LTS의 경우 발열량이 증가함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

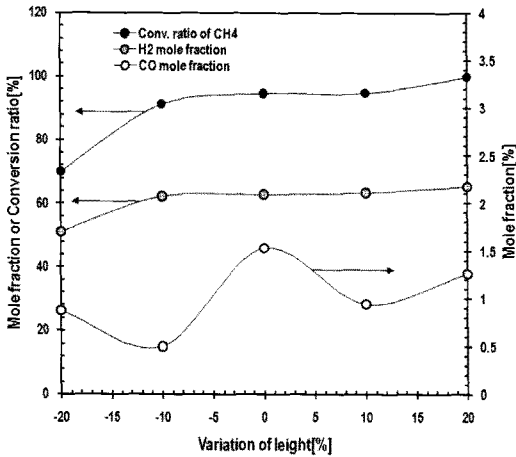
본 연구에서는 1kW급 및 5kW급 연료 전지용 개질기에 대한 수치해석적 연구를 수행하였고, 다음



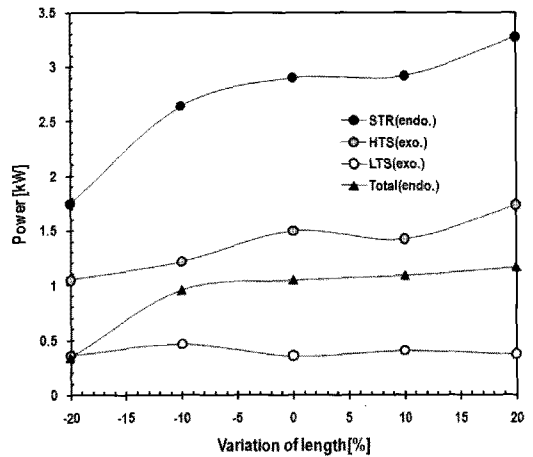
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 9 Effect of the length of the reforming part in the 5kW reformer: (a) temperature (b) H<sub>2</sub>, CO, and conversion ratio of CH<sub>4</sub>.

Fig. 10 Effect of the length of the reforming part in the 5kW reformer: (a) area and RA/CA (b) net powers.

과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 1kW급 개질기 해석을 통해서, 개질기의 주요부의 온도 및 개질부 출구에서 가스조성을 구하였고 이를 실험값과 비교하였다. 이 때 개질기 주요부의 온도, H<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>는 상당히 일치하였고, CH<sub>4</sub>는 다소의 차이가 있었다.
- 2) 5kW급 개질기 해석을 통해서 개질기 내의 팁의 영향을 살펴보았다. 이 때, 팁의 크기가 35mm인

경우, 개질부 내부 채널에서 역류가 발생하였고, 팁의 크기가 40과 45mm경우는 역류가 발생하지 않았다.

- 3) 5kW급 개질기의 동일한 개질부의 부피에 대해서 개질부의 길이의 증감에 따른 개질기 성능을 살펴보았다. 이 때, 대체로 개질기가 길어질수록 열전달 면적이 증가하고, 공급열량이 증가하였다. 그러나 개질기의 길이나 면적이 일정부분 이하가 되었을 경우, 공급열량이 급격히 감소

함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업 및 한국가스공사 대학협력과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 과학기술부, “수소 station용 천연가스 수증기개질 수소 제조 공급시스템 기술 개발”, 2006.
- 2) 최현도, 이민규, 박상욱, “수소 기술-경제 체제로의 이행을 위한 장,단기 시나리오 분석”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 16, No. 3, 2005, pp. 296-305.
- 3) 김성천, 윤문중, 전영남, “일산화탄소 저감을 위한 개질가스의 전이반응 연구”, 대한기계학회 논문집(B), Vol. 31, No. 10, 2007, pp. 855-859.
- 4) A.M.D. Groote, G.F. Froment, “Simulation of the catalytic partial oxidation of methane synthesis gas”, Applied Catalysis A:General, Vol. 138, 1996, pp. 245-264.
- 5) Y.H. Yu, M.H. Sosna, “Modeling for industrial heat exchanger type steam reforming”, Korean J. Chem. Eng., Vol. 18, No. 1, 2001, pp. 127-132.
- 6) S.M. Hwang, O.J. Kwon, J.J. Kim, “Method of catalyst coating in micro-reactors for methanol steam reforming”, Applied Catalysis A: General, Vol. 316, 2006, pp. 83-89.
- 7) J. Yuan, F. Ren, B. Sunden, “Analysis of chemical-reaction-coupled mass and heat transport phenomena in a methane reformer duct for PEMFCs”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, 2007, pp. 686-701.
- 8) A.L.Y. Tonkovich, B. Yang, S.T. Perry, S.P. Fitzgerald, Y. Wang, “From seconds to milliseconds to microseconds through tailored micro channel reactor design of a steam methane reformer”, Catalysis Today, Vol. 120, 2007, pp. 21-29.
- 9) J. Xu, G.F. Froment, “Methane steam reforming, methanation and water gas shift. I, intrinsic kinetics”, AIChE Journal, Vol. 35, No. 1, 1989, pp. 88-96.
- 10) 신동훈, 서혜경, 임희천, 이상득, “용융탄산염 연료전지용 평판형 개질기 열유동 전산유체역학 해석”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 17, No. 4, 2006, pp. 403-408.
- 11) 최종균, 정태용, 남진현, 신동훈, “수증기-메탄개질반응 해석모델의 비교연구”, 대한기계학회 논문집, Vol. 32, No. 7, 2008, pp. 497-503.
- 12) 윤왕래, 박종원, 이영우, 한명완, 정진혁, 박종수, 정현, 이호태, 김창수, “5kW급 고분자연료전지용 천연가스 개질기 시스템 운전특성 연구”, 화학공학학 논문집, Vol. 41, No. 3, 2003, pp. 389-396.
- 13) 오영삼, 백영순, “컴팩트형 수증기 개질장치 효율분석”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 13, No. 4, 2002, pp. 304-312.
- 14) 오영삼, 백영순, “수소스테이션용 20 Nm<sup>3</sup>/hr 급 수소제조장치 개발”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 17, No. 13, 2006, pp. 263-271.
- 15) 양태현, 박구곤, 윤영기, 이원용, 윤왕래, 김창수, “5kW급 주택용 고분자 연료전지 시스템”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 14, No. 1, 2003, pp. 35-45.
- 16) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Wiley Press, 2007.