

## 75kW급 연료전지 시스템의 이젝터 설계 및 시험

김범주<sup>†</sup>, 김도형\*, 임희천\*

\*한국전력공사 전력연구원 녹색성장연구소

## The Design and Test of Ejectors for a 75-kW Fuel Cell System

BEOMJOO KIM<sup>†</sup>, DOHYEONG KIM\*, HEECHUN LIM\*

\*Green Growth Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

### ABSTRACT

An Ejector enhances system efficiency, are easily operated, have a mechanically simple structure, and do not require a power supply. Because of these advantages, the ejector has been applied to a variety of industrial fields such as refrigerators, power plants and oil plants. In this work, an ejector was used to safely recycle anode tail gas in a 75-kW Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) system at KEPCO Research Institute. In this system, the ejector is placed at mixing point between the anode tail gas and the cathode tail gas or the fresh air. Commercial ejectors are not designed for the actual operating conditions for our fuel cell system. A new ejector was therefore designed for use beyond conventional operating limits. In the first place, a few sample ejectors were manufactured and the entrainment ratio was measured at a dummy stack. Through this experiment, the optimum ejector was chosen. The 75-kW MCFC system equipped with this optimum ejector was operated successfully.

**KEY WORDS** : Ejector(이젝터), Molten carbonate fuel cell(용융탄산염 연료전지), Entrainment ratio(흡인비), Hydrogen recirculation(수소 재순환)

### Nomenclature

Er : entrainment ratio(흡인비)  
 $\dot{m}$  : mass flux [g/s]  
D : diameter [mm]  
L : length [mm]  
 $\omega$  : the diametrical ratio of nozzle to throat

### Subscripts

p : primary (motive)  
s : secondary (suction)  
n : nozzle  
t : throat

## 1. 서 론

연료전지는 수소, 일산화탄소, 메탄올, 에탄올, 글루코스 또는 다른 탄화수소와 같은 화학 물질의 전

<sup>†</sup>Corresponding author : bjkim@kepri.re.kr

[ 접수일 : 2011.8.12 수정일 : 2011.10.14 게재확정일 : 2011.10.21 ]

기적인 산화를 통해 전력을 발생시킨다. 연료전지의 효율은 카르노 사이클에 제한을 받지 않고 전통적인 발전시스템 보다 더 높은 효율을 얻을 수 있다. 이러한 높은 효율 때문에 연료전지는 가까운 미래의 전력공급에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다<sup>1)</sup>. 용융탄산염 연료전지는 연료전지 중에서 분산형 전원으로 적합하며, 운전온도는 650°C 내외이므로 폐열을 이용한 복합발전에도 유리하다<sup>2)</sup>. 한국전력공사 전력연구원에서는 단위전지 스케일에서 시작하여 125kW급 용융탄산염 연료전지 시스템까지 개발하여 왔다. 이러한 규모의 연료전지를 개발하는데 있어서 콤팩트하게 제작하는 것도 연료전지의 보급에 있어서 중요한 요소로 작용한다. 용융탄산염 연료전지 시스템을 콤팩트하게 제작하기 위해서 전력연구원에서는 5kW 시스템부터 이젝터 및 촉매연소기를 설계하여 적용시켰으며 75kW급과 125kW급 용융탄산염 연료전지에도 설치하였다<sup>3)</sup>. 연료전지를 단순하게 만들기 위해서는 이젝터에 공기를 과량으로 통과시켜 애노드의 폐가스와 혼합시켜 촉매연소기에서 수소 및 탄화수소를 연소시키고, 캐소드 입구로 재순환하는 사이클을 채택하였다. 이젝터는 고압의 유체를 노즐에서 고속으로 분출시켜 유체의 압력에너지가 속도에너지로 변화시켜 주변의 저압 유체와 운동량을 교환하여 저압의 유체를 흡입하는 장치이다. 이젝터는 노즐, 목, 혼합부, 디퓨저 등으로 구성되어 있다. 이젝터는 회전부 및 전원 연결 부분이 없으므로 고장이 적다. 이젝터는 전통적으로 화학 공정, 냉동 산업, 발전소에서 적용 및 연구되어 왔으나<sup>4,5)</sup> 수소 리사이클링용으로는 많은 연구가 진행되지 않았으며, 전통적인 산업에서 적용되는 것과는 많은 차이가 있다<sup>6,7)</sup>. 전력연구원에서 개발한 이젝터 설계의 주요 목적은 연료전지의 작동 범위 내에서 최적의 흡인비(entrainment ratio) 및 이젝터와 연료전지 스택사이에서 차압을 유지하는 것이다. 본 논문에서는 75kW 용융탄산염 연료전지를 위해 설계·제작된 이젝터에 대해서 논하고자 한다.

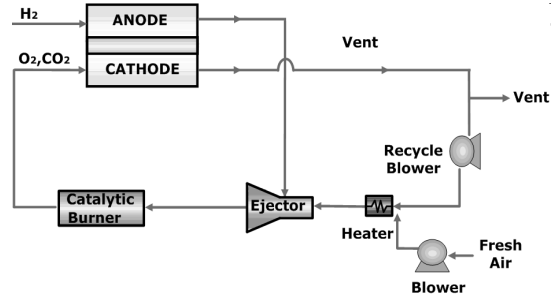


Fig. 1 LSchematic of MCFC system

## 2. 작동 원리와 구조

### 2.1 용융탄산염 연료전지 시스템의 구조

용융탄산염 연료전지 시스템의 구조는 Fig. 1에 제시되어 있다. 이것은 크게 개질기, 연료전지 스택, 이젝터, 촉매연소기 등으로 구성된다. 우선, 외부개질기에서 천연가스와 물이 수소, 일산화탄소, 이산화탄소로 변환된다. 이 가스와 수증기는 애노드로 가고, 캐소드에는 공기와 이산화탄소가 공급이 된다. 애노드로 공급된 수증기와 일산화탄소는 전해질로부터 탄산염 이온을 소비하고 전극에서 자유전자를 생성시키면서 스택에서 전기화학적 반응이 일어난다. 애노드 출가스는 개질되지 않은 가스와 개질된 생성물, 산화물로 구성된다. 이 가스는 이젝터에서 공기와 혼합되고 촉매연소기로 들어가서 연소되고 난 후 캐소드 입구로 흘러간다. 여기서 이산화탄소와 산소는 전해질로부터 새로운 탄산염 이온을 만들고 캐소드로부터 전자를 소비하면서 전극에서 반응한다. 이젝터 주변의 상황을 다시 살펴보면, 공기 블로워와 리사이클링 블로워가 이젝터에 primary flow로 공급된다. 스택에서 나온 애노드 폐가스는 secondary flow로 작용한다. 이젝터에서 애노드 폐가스와 공기, 캐소드 폐가스가 혼합을 하게 되어 촉매연소기로 들어가서, 연소 후 캐소드로 다시 들어가는 과정을 반복하게 된다. 75kW MCFC 설계 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 75kW MCFC design conditions

Power [kW]	75
Electrode area [cm <sup>2</sup> ]	9600
Current density [mA/cm <sup>2</sup> ]	80
Utilization of the anode gas	0.7
Utilization of the cathode gas	0.4

## 2.2 이젝터의 원리

이젝터는 고압의 구동유체를 노즐로 분출시켜 속도에너지를 증가시키고 압력에너지를 낮추어서 노즐출구에서 저압의 유체를 흡입하여 이송하는 장치로써 회전 또는 운동하는 부분이 없는 장치이다. Fig. 2와 같이 ①로부터 보내지는 고압의 유체가 노즐로부터 목을 향하여 고속으로 분출시키면 분류의 압력은 저압이 된다. 따라서 ②주위에 있던 흡입관(⑥)내의 유체가 Throat로 분출된다. Throat 내에서는 구동 유체와 흡입 유체가 혼합하고, 에너지 교환이 이루어져서 두 유체의 속도는 같게 된다. Throat내의 흐름은 고속이므로 이를 Diffuser에서 감속시켜 일부를 압력에너지로 변환시킨 후 ⑤로 송출시킨다<sup>8)</sup>.

## 2.3 이젝터의 설계

우선 cathode 입구가스, 촉매연소기 입구가스, fresh air 유량, 애노드 폐가스의 조성구 유량 등의 운전 조건을 결정한다. 그리고, 시스템의 유량 조건에 맞게 이젝터의 nozzle throat area 및 secondary flow area, throat area 등을 결정한다.

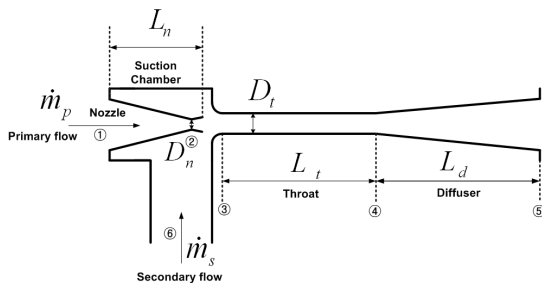


Fig. 2 Schematic of the ejector

Table 2 75kW MCFC normal operating conditions

	$\dot{m}$ [g/s]	T [K]	P [Pa abs.]	Chemical composition (wt. %)	
Anode inlet	9.85	885	104,604	H <sub>2</sub>	14.9
				CO <sub>2</sub>	46.8
				H <sub>2</sub> O	38.3
Cathode inlet	120.9	880	104,669	Air	73.3
				CO <sub>2</sub>	26.7
Anode outlet (Secondary flow)	40.7	814	101,325	H <sub>2</sub>	1.1
				CO <sub>2</sub>	66.9
				H <sub>2</sub> O	32
Primary flow	238.5	484	118,734	Air	100

본 연료전지 시스템에서 이젝터 설계시에는 primary flow와 secondary flow가 모두 아음속인 경우의 조건을 적용하였다. 그리고, 이젝터 내부에서 등압조건아래에서 흡입이 일어난다고 가정하였다<sup>4)</sup>. 특히, 저압의 유체여서 흡입을 유도하기 위한 설계에 주의를 기울일 필요가 있다.

이젝터의 유동 방정식은 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존 식을 포함하기 때문에 매우 복잡하다. 마찰손실이 없다면 다음 가정을 통해 해석을 단순화 할 수 있다<sup>9)</sup>.

- 작동유체는 벽 내부에서 단열이며, 비열상수는 일정한 이상(ideal) 유동이다.
- 이젝터 내에서 primary flow는 반경방향으로 일정하게 분포되어 있다.
- secondary flow의 압력과 온도는 반경방향으로 일정하게 분포되어 있다.
- 흡입 챔버에서 secondary flow의 압력은 일정하게 분포되어 있고, 입구 압력과 동일하다.
- primary flow와 secondary flow는 정상(steady)이다.

실제 시스템에 적용하기 전에 실제 운전환경과 비슷한 온도와 압력에서 몇 개의 샘플을 만들어서 실험을 계획하였는데, 실험 변수를 줄이기 위해서 secondary flow는 모두 공기라고 가정하였고, 용융탄산염 연료전지와 관계된 화학 방정식에 기반해서

Table 3 75kW MCFC normal operating conditions

		$\dot{m}$ [g/s]	DAE $\dot{m}$ [g/s]
Anode outlet (Secondary flow)	Steam	27.7	33.2
	Gas	13	23.6
	Sum	40.7	56.8
Primary flow		238.5	259.2

가스 조성, 유량, 온도, 압력이 계산되었다. 75kW 설계 운전 조건이 Table 2에 정리되었다. Table 3은 Table 2를 기준으로 하여 DAE<sup>10)</sup> (Dry Air Equivalent)으로 환산한 것이다. DAE는 온도와 가스의 분자량에 따라 상온에서의 등가 공기로 환산한 양으로, 실험에서는 상온에서 공기로 적용할 수 있는 장점이 있어서 이것을 적용하였다. DAE 변환된 유량이 Table 3에 제시되었다. 이 양을 기준으로 이젝터 설계조건 및 흡인비 등을 산정하였다.

한편, 흡인비는 이젝터의 성능을 나타내는 가장 중요한 기준으로써 이젝터의 노즐부를 통과 하는 구동 유체와 흡입부를 통과하는 흡입유체의 비인 흡인비(entrainment ratio)가 있는데 다음 식(1)에 의해 결정된다.

$$Er = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{m}_s$ 와  $\dot{m}_p$ 는 각각 흡입유체와 구동유체의 질량 유량을 의미한다.

Table 4 The dimension of ejector samples

Parameters	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
$\frac{D_s}{D_i} (\omega)$	0.24	0.37	0.48	0.57
$\frac{D_i}{L_d}$	0.04	0.06	0.08	0.1
$\frac{L_i}{D_i}$	8			
$\frac{D_i}{L_d}$	0.07			

### 3. 실험

공정 조건과 지배 방정식을 이용하여 이젝터에서 가장 중요한 Nozzle 및 Throat, Diffuser의 치수를 계산하여 Table 4에 실험에 사용될 4개 이젝터 샘플의 주요치수들을 나타내었다.

실제 스택이 고가이므로, 우선 dummy stack을 설치하고 이젝터를 Case 1~4 바꿔가면서 이젝터 실험설비에 장착하고 실험을 한 후, 이 중에서 실제 설비의 공정 조건을 최적으로 만족시키는 이젝터를 선정하여 실제 스택에 적용하여 성능을 확인하였다.

이젝터 실험설비의 개략도는 Fig. 3과 같고, 그림과 같은 지점에서 압력(P), 온도(T), 유량(Q)이 측정되었다. 공기가 안전 및 편의상 실험 유체로 이용되었다. 블로워에 의해 공급된 primary flow는 Fig. 1에서 주어진 anode flow를 공기압축기로 주입하여 0Nm<sup>3</sup>/hr에서 300Nm<sup>3</sup>/hr로 변경시켜 실험을 진행하였다. 이 때, anode outlet gas는 이젝터로 흘러 들어가고, vent는 잠그어 놓고 실험을 하였다. 실제 실험장치 Fig. 4에 제시되었다. 이 중에서 최적으로 판단된 이젝터를 Fig. 5의 실제 스택에 설치하고 실험을 진행하였다.

### 4. 결 과

우선 dummy stack을 설치하고 이젝터를 Case 1~4로 바꿔가면서 anode inlet flow를 DAE기준에서 0~300Nm<sup>3</sup>/hr로 변화시키면서 primary mass flow rate를 증가시키면서 anode outlet 압력을 측정할 결과가 Fig. 6에서 Fig. 9까지 도시되었다. Anode

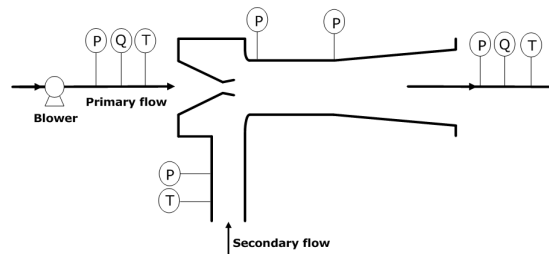


Fig. 3 Measuring points in the ejector



Fig. 4 Schematic of the ejector apparatus

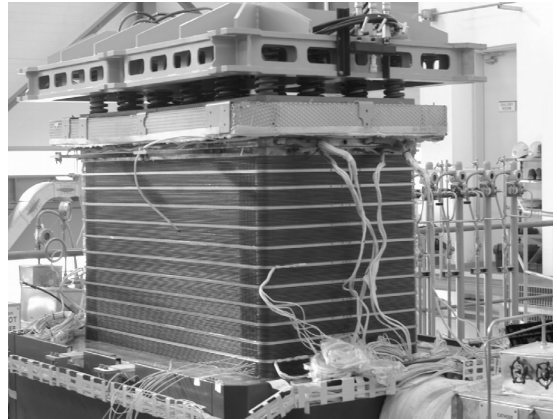


Fig. 5 The exterior of the MCFC Stack

outlet 압력은 이젝터의 혼합부에서 압력을 의미하는 것으로, 여기서 압력이 낮을수록 진공분위기가 강하여 흡입이 유리한 것을 의미한다. Case 1은 노즐구경이 작아서 진공분위기가 유리할 수 있으나, 절대적인 구동유체의 양이 작아서 압력이 높았으며, case 2와 case 3에서 낮은 압력이 발생하여 진공분위기가 강하게 발생하여 유량을 흡입할 수 있는 것으로 관측되었다. Case 4도 비교적 노즐 구경이 크지만, 진공의 분위기를 유도하여 흡입이 발생한다는 것을 보여주고 있다. 전체적으로 anode

inlet에 공급되는 유량이 많을수록 anode outlet에 걸리는 압력이 높아지고 있음을 알 수 있다. 이 압력으로부터 이젝터의 혼합부 및 디퓨저를 지나 이젝터 출구에서 걸리는 압력을 예측해 볼 수 있다. 4개의 case가 공정의 압력조건을 수용할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 10에서 Fig. 13까지는 더미 스택에서 고정된 nozzle throat diameter에 대해 primary mass flow rate에 따른 흡인비를 보여준다. 이 결과는 anode inlet 유량에 대해 노즐 지름과 흡인비를 최적화하

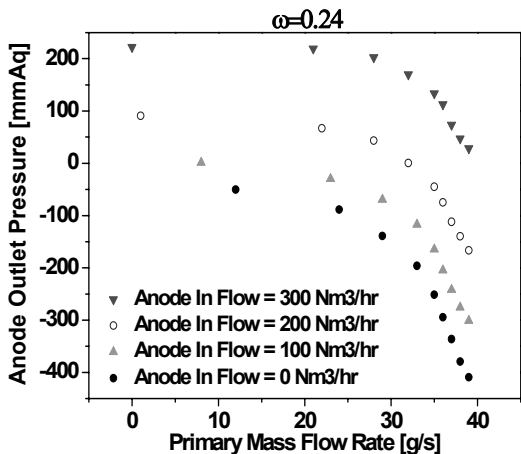


Fig. 6 Primary flow rate vs. anode outlet pressure for case 1

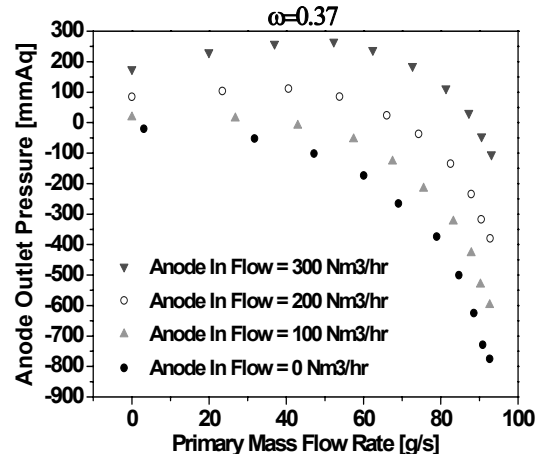


Fig. 7 Primary flow rate vs. anode outlet pressure for case 2

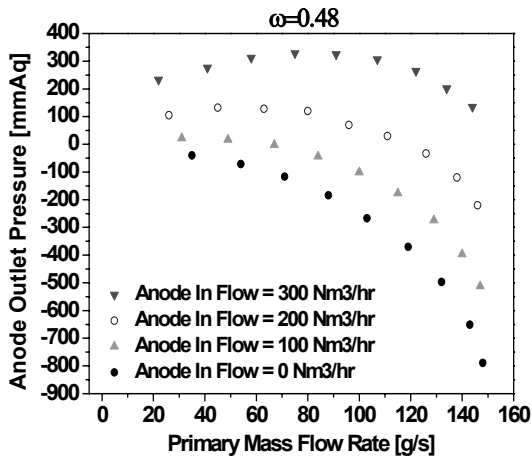


Fig. 8 Primary flow rate vs. anode outlet pressure for case 3

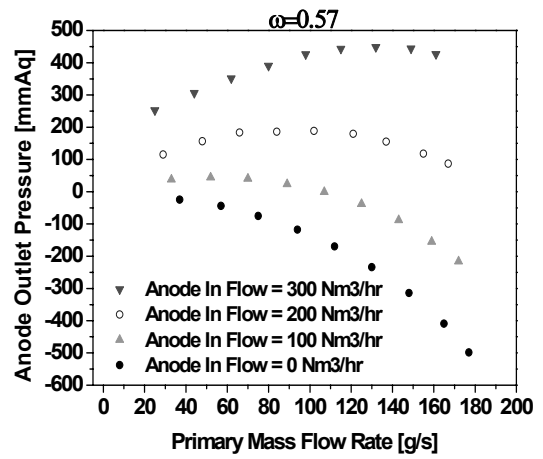


Fig. 9 Primary flow rate vs. anode outlet pressure for case 4

는데 기준을 제시한다. 흡인비는 흡입된 유량과 이젝터와 스택 사이의 차압에 영향을 받는 값이고, nozzle throat diameter와 anode inlet 유량은 흡인비를 효과적으로 제어하기 위해서 다양하게 조절될 수 있는 변수이다.

Fig. 10에서 anode inlet flow가 0Nm<sup>3</sup>/hr인 경우는 유량계의 계측범위에서 벗어나 정확한 유량을 계측할 수 없었다. 또한 anode inlet flow가 100 Nm<sup>3</sup>/hr인 경우에도 primary flow rate이 적은 경

우는 유량계가 계측을 하지 못하였다.

Fig. 10의 case1에서 anode inlet 유량이 클수록 스택 후단에서 anode outlet으로 공급되는 유량이 많아져서 흡인비가 높았으며, Fig. 10에서 Fig.13 까지 비교하여 보면 노즐의 구경이 커질수록 primary mass flow rate는 증가하게 된다. 그리고, primary mass flow rate의 증가에 따른 흡인비는 감소하는 경향을 나타내었다. 흡인비가 1보다 큰 수치가 관측되는 것은 더미 실험에서 스택 및 배관

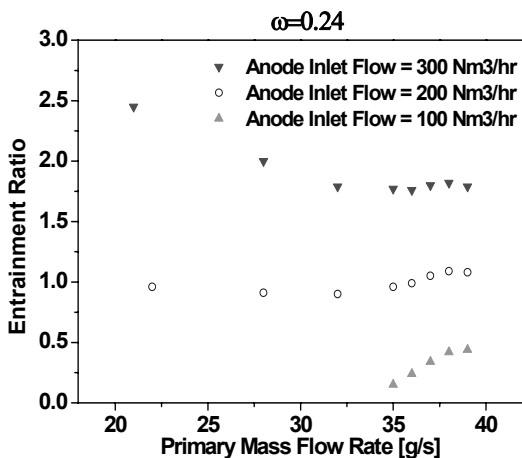


Fig. 10 Primary flow rate vs. entrainment ratio for case 1

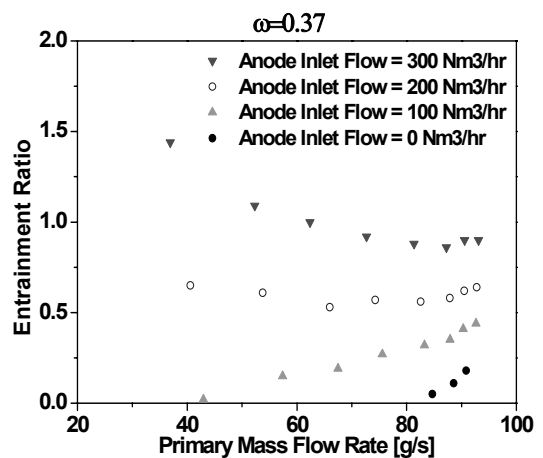


Fig. 11 Primary flow rate vs. entrainment ratio for case 2

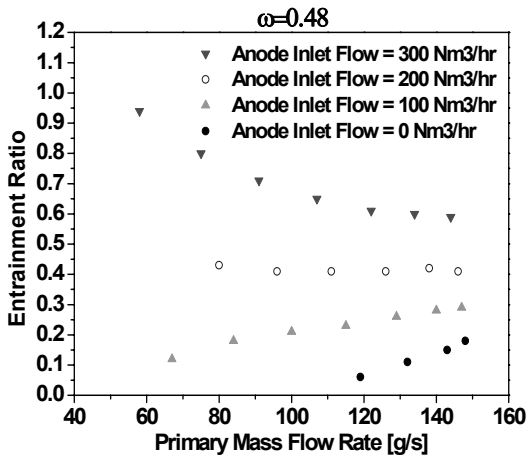


Fig. 12 Primary flow rate vs. entrainment ratio for case 3

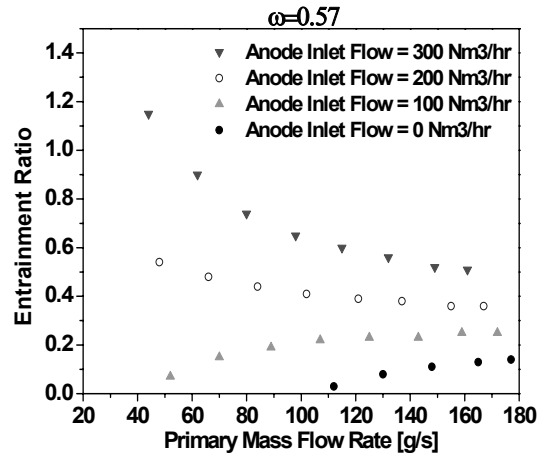


Fig. 13 Primary flow rate vs. entrainment ratio for case 4

의 vent를 모두 닫아놓고 수행되어 anode inlet 유량의 양이 모두 이젝터 쪽으로 넘어 오게 되어 suction에 의해 흡인되는 유량이외에 더 하여져서 나타난 현상으로 볼 수 있다. Table 3에서 제시된 primary flow rate이 259.2g/s, secondary flow rate이 157.9Nm3/hr이고, 최적의 흡인비를 0.22정도로 볼 때, 외삽법을 통해서 Fig. 13으로부터 case 4가 4개의 샘플중에 가장 최적의 것으로 판명되었다.

Case 4의 이젝터를 실제 75kW MCFC 시스템에

설치하여 운전한 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 도시하였다. 먼저 Fig. 14는 스택이 75kW 출력을 낼 때 이젝터의 위치, 즉, 혼합부, 디퓨저 입구, 디퓨저 출구에서 압력을 측정된 평균값을 나타낸 것이다. mixing chamber에서 압력은 anode outlet 압력과 같은 곳에서 측정된 압력이며 Fig. 9와 비교하여 보았을 때 primary flow rate이 259.2g/s, secondary flow rate이 157.9 Nm3/hr의 영역에서 예측된 값과 유사하게 관측되었으며, 디퓨저 후단에서도 700mmAq

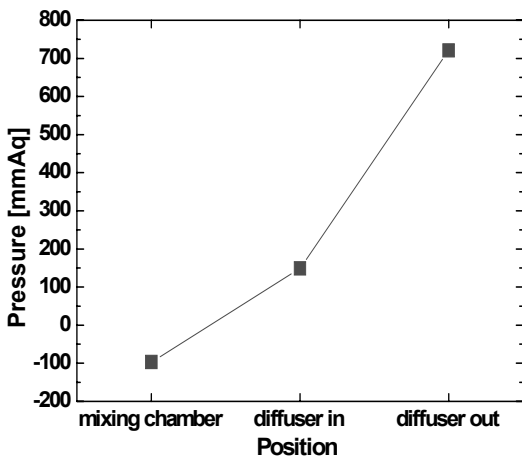


Fig. 14 Mean pressure distribution according to the ejector position at the real stack

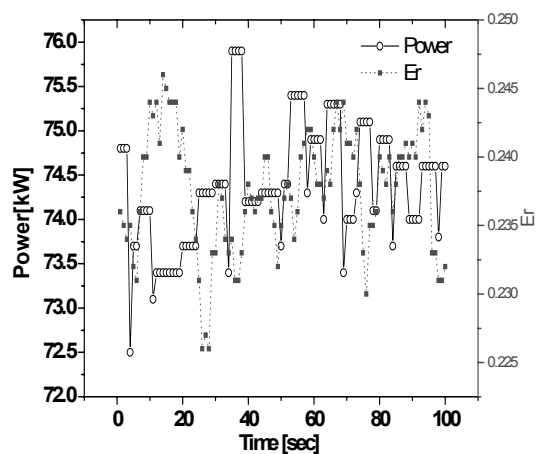


Fig. 15 Power and Er according to time at the real stack

의 압력으로 원활한 공정 조건을 만족시켰다. Fig. 15는 MCFC 시스템에 실제 스택을 장착하여 75kW 출력을 내고 있을 때 흡인 비를 측정한 값이다. 설계값인 0.22와 거의 일치함을 알 수 있다. 약간의 오차는 실제 시스템에서 발생하는 유량과 온도, 압력, 화학적 조성의 차이, 일부 유량의 vent, primary flow rate의 맥동에 의해 발생한 것이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 75kW MCFC 시스템에 대한 공정 조건이 설정되고 여기에 준해서 저압 조건에서 이젝터를 설계·제작하였으며, 이것을 더미 스택과 실제 스택에서 시험하여 검증을 하였다. 비교적 저압에서 흡입을 해야하는 가혹조건이었으므로 4개의 노즐을 제작하여, 더미스택에서 실험을 해보고, 최적의 이젝터를 실제 75kW 스택에 적용하여 운전을 하였다. 이젝터 설계시에는 “constant-pressure mixing” model 및 primary flow와 secondary flow가 아음속인 모델을 적용하였다. 더미스택을 설치하고 이젝터를 case 1~4로 바꾸면서 anode inlet의 유량의 변화에 따라 anode outlet pressure와 entrainment ratio를 측정하였다. 여기서 최적으로 판정된 case 4모델을 실제 스택에 적용하여 정상 구동 조건을 맞추어 75kW 출력을 내는데 성공하였다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제 “250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 Proto Type개발”의 연구결과입니다.(No. R-2004-1-142-01)

## 참 고 문 헌

1) Sundmacher, K., Kniele, A., Pesch, H. J.,

- Berndt, J. F., and Huppmann, G., 2007, *Molten Carbonate Fuel Cells*, Wiley-VCH, Weinheim
- 2) Blomen, L. J. M. J. and Mugerwa, M. N., eds., 1993, *Fuel Cell Systems*, Plenum, New York.
- 3) 김범주, 김도형, 강승원, 이정현, 김의환, 임희천, “5kW 용융탄산염 연료전지(MCFC) 이젝터 설계 및 시험”, 한국수소 및 신에너지학회논문집 제20권, 제1호. pp.31~37
- 4) Keenan, J. H., Neumann, E. P., and Lustwerk, F., 1950, “An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment,” *ASME J. Appl. Mech.*, 17(3), pp. 299-309.
- 5) El-Dessouky, H., Ettouney, H., Alatiqi, I., and Al-Nuwaibit, G., 2002, “Evaluation of Steam Jet Ejectors,” *Chem. Eng. Process.*, 41, pp. 551-561.
- 6) Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., and Li, Y., 2007, “Fuel Ejector Design and Simulation Model for Anodic Recirculation SOFC System,” *J. Power Sources*, 173, pp. 437-449.
- 7) Kim, M., Sohn, Y.-J., Cho, C.-W., Lee, W.-Y., and Kim, C.-S., 2008, “Customized Design for the Ejector to Recirculate a Humidified Hydrogen Fuel in a Submarine PEMFC,” *J. Power Sources*, 176, pp. 529-533.
- 8) H. El-Dessouky, H.Ettouney, I. Alatiqi, G. Al-Nuwaibit, “Evaluation of steam jet ejectors”, *Chemical Engineering and Processing* 41 (2002) 551-561.
- 9) Sun, D.-W., and Eames, I. W., 1995, “Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors – Review,” *J. Inst. Energy*, 68, pp. 65-79.
- 10) Heat Exchange Institute, Inc., 2007, *Standards for Steam Jet Vacuum Systems*, 6th ed., Heat Exchange Institute, Inc., Cleveland, OH.