

125 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템의 이젝터 설계 및 시험

김범주¹ · 박수만¹ · 송오섭^{2,†}

¹한국전력공사 전력연구원, ²충남대학교 기계공학과

The Ejector Design and Test for 125 kW Class Molten Carbonate Fuel Cell System

BEOMJOO KIM¹, SOO-MAN PARK¹, OH-SEOP SONG^{2,†}

¹Korea Electric Power Corporation Research Institute, 105 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding author :
songos@cnu.ac.kr

Received 29 January, 2018

Revised 25 April, 2018

Accepted 30 April, 2018

Abstract >> Korea Electric Power Research Institute (KEPCO RI) had developed molten carbonate fuel cell (MCFC) system since 1993. Finally, KEPCO RI developed and operated a 125 kW MCFC system in 2010. To make MCFC system compact, it is indispensable to install an ejector in this system where the anode off gas, the cathode off gas, and fresh air are mixed before flowing to the catalytic burner. KEPCO RI had developed various ejectors for MCFC system since 2006. The 125 kW MCFC system built with the developed ejector was operated successfully in Boryeong Thermal Power Plant in 2010. This 125 kW MCFC ejector was designed on the basis of the experimental results of 5 kW and 75 kW MCFC ejectors. The main goal of ejector design in our MCFC system is to maintain the entrainment ratio and the pressure between fuel cell stack and catalytic burner within the operating range. In this paper, the design results of the ejector are presented based on the 125 kW MCFC system operating conditions. In addition, a designed ejector was manufactured and installed in the MCFC system. As the fuel cell is under load operation, the pressure surrounding the ejector was measured to ensure that the fuel cell system is operating smoothly.

Key words : Molten carbonate fuel cell(용융탄산염 연료전지), Ejector(이젝터), Entrainment ratio(흡인비), Nozzle(노즐)

Nomenclature

A : area [m^2]

\dot{m} : mass flow rate [g/s]

Q : flow rate [m^3/s]

V : velocity [m/s]

D : diameter [mm]

L : length [mm]

P : pressure [Pa]

T : temperature [K]

- R : universal gas constant $[8.314 \frac{J}{mol K}]$
- ρ : density $[\frac{kg}{m^3}]$
- Er : entrainment ratio $= \frac{m_s}{m_p}$
- M : Mach number
- DAE : Dry Air Equivalent
- K : ratio of mixing area to total area of primary and secondary throats
- F : entrainment ratio correction factor
- k : specific heat ratio of gas
- ϕ : mixing coefficient

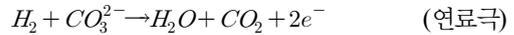
Subscripts

- n : nozzle
- p : primary (motive) flow
- s : secondary (suction) flow
- m : mixing flow, (ejector outlet)
- pt : primary (nozzle) throat
- st : suction throat
- t : throat (mixing throat)
- d : diffuser
- $totp$: primary total
- $tots$: secondary total
- T : temperature
- MW : molecular weight

1. 서론

전력에 대한 수요가 꾸준히 증가되면서 분산전원에 대한 관심도 높아지고 있다. 분산전원에 적용 가능한 기술로는 가스터빈, 가스엔진, 태양광, 풍력, 연료전지 등이 있다. 여기서, 연료전지는 수소, 일산화탄소 및 탄화수소 등을 연료로 하여 전기화학적으로 발전을 하는 시스템이다. 연료전지의 효율은 카르노 사이클에 의해 제한을 받지 않고, 전통적인 화력발전 플랜트 보다 높은 효율을 얻을 수 있다. 이러한 고효율로 인한 장점 때문에 연료전지는 미래의 핵심적인

발전 수단이 될 것으로 예측된다¹⁾. 용융탄산염 연료전지는 연료극(anode)에 수소가 공급되어 탄산염이온과 결합하여 물, 이산화탄소 및 전자가 생성된다. 그리고 공기극(cathode)에 이산화탄소와 산소가 들어가서 탄산염이온이 생성되고, 탄산염이온은 전해질을 통해 연료극으로 이동한다. 이렇게 생성된 전자의 흐름에 의해 전력이 생산되는 것이다.



용융탄산염 연료전지는 연료전지 중에서 고체산화물 연료전지와 함께 분산전원으로 적합하고, 운전온도는 580-650°C 정도이며, 스택에서 방출되는 폐열을 이용한 복합발전에도 유리하다.

한국전력공사 전력연구원에서는 1990년대부터 용융탄산염 연료전지 개발을 수행하여 왔으며, 2000년대에 들어서면서 5 kW, 25 kW, 75 kW, 125 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템을 제작하여 운전하였다^{2,3)}. 전력연구원에서는 용융탄산염 연료전지를 컴팩트하게 설계하기 위해서, 스택의 연료전지 반응 후, 연료극 출구의 가스를 이젝터를 이용하여 촉매연소기로 이동시켜 연소 후 스택의 공기극 입구로 가스를 공급하는 방식을 적용하였다. 이젝터에 공기를 과량으로 유입시켜 스택에서 연료극 출구로 나오는 가스를 이젝터에서 공기와 혼합시켜 촉매연소기로 이송하여 수소를 연소시키고, 연소 후 가스를 공기극 입구로 재순환하는 시스템을 구현하였다.

본 논문에서는 이러한 시스템을 완성하기 위하여 핵심적인 역할을 하는 이젝터의 설계와 시험에 대해서 고찰한 내용을 정리하였다.

2. 시스템 개요

2.1 용융탄산염 연료전지 시스템 구성

용융탄산염 연료전지 시스템의 개략도는 Fig. 1에 제시되어 있다. 용융탄산염 연료전지는 개질기, 연료

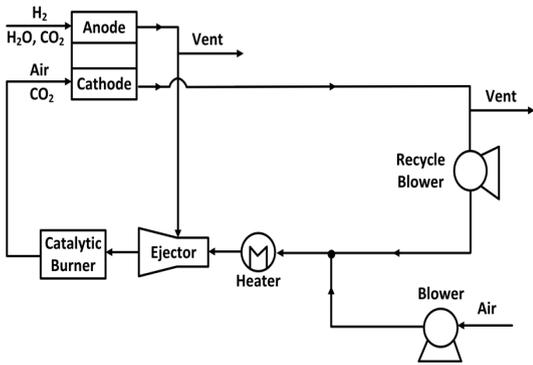


Fig. 1. Schematic of MCFC system

Table 1. The specifications of 125 kW MCFC system

Parameter	Value
Rated power (kW)	125
Effective cell area (cm ²)	9,600
Current density (mA/cm ²)	80-100
Utilization of anode gas	0.6-0.8
Utilization of cathode gas	0.3-0.4
Number of cells	185

전지 스택, 이젝터, 촉매연소기, 블로워 등으로 구성된다. 우선, 외부 개질기에서 천연가스와 물이 수소, 일산화탄소, 이산화탄소로 변환된다. 여기서 발생한 가스는 연료극으로 이동되고, 공기극에는 공기와 이산화탄소가 공급되어, 스택에서 전기화학 반응이 일어나서 발전을 하게 된다. 연료극에서 전기화학 반응에 참여하지 않은 출구가스는 이젝터에서 공기와 혼합되고 촉매연소기로 이동되어 연소반응이 끝난 후, 공기극 입구로 흘러간다. Fig. 1을 살펴보면, 공기 블로워와 리사이클링 블로워가 이젝터에 1차 유동(primary flow)으로 공급된다. 스택에서 나온 연료극 출구가스는 2차 유동(secondary flow)으로 작용한다. 즉, 이젝터는 공기(1차 유동[primary flow])와 연료극 출구 가스(2차 유동[secondary flow])를 혼합하여 촉매연소기로 공급하는 장치이다.

125 kW MCFC 시스템의 사양은 Table 1과 같다. 스택은 반응면적 9,600 cm² 크기의 전극(연료극, 공기극), 전해질, 매트릭스와 내부 매니폴드 형태의 분리판으로 이루어진 단위전지를 기본으로 구성되어 있다.

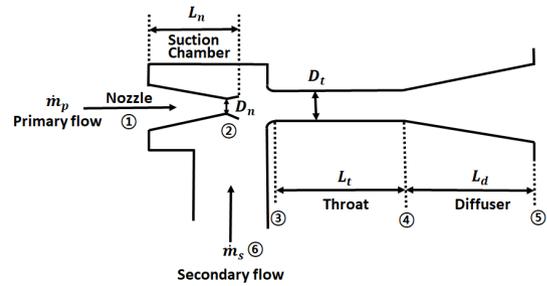


Fig. 2. Schematic of the ejector

2.2 이젝터 개요

2.2.1 이젝터의 원리

이젝터는 고압의 구동유체를 노즐로 분출시켜 속도를 증가시키고 압력을 낮추어서, 노즐 출구에서 저압의 유체를 흡입시켜, 고압의 구동 유체와 혼합 및 이송을 유발하는 장치이다. Fig. 2와 같이 ①로부터 공급되는 고압의 유체(1차 유동[primary flow])가 노즐 목(nozzle throat)을 향하여 고속으로 분출되면, 흡입챔버 내부는 저압이 형성되고 ⑥에 있던 유체가 ②를 거쳐 ③으로 분출되면서, 고압의 유체와 혼합된다. 목(throat)으로 보내진 혼합 유체는 디퓨저(diffuser)를 지나면서 압력이 회복되어 ⑤로 토출된다⁴⁾.

한편, 흡인비(entrainment ratio)는 이젝터의 성능을 나타내는 가장 중요한 기준으로써 이젝터의 노즐부를 통과하는 구동유체 질량과 흡입부를 통과하는 흡입유체 질량의 비로 정의된다.

2.2.2 이젝터 설계

2.2.2.1 공정 조건 설정

125 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템의 이젝터 설계는 5 kW, 75 kW MCFC 시스템에서 설계되었던 방식과 유사하게 진행되었다⁵⁻⁷⁾.

가. 125 kW MCFC 시스템의 정상 운전조건(유량, 온도, 압력, 가스 조성 등)을 설정한다(Table 2).

나. 이젝터의 흡인비(여기서는 연료극 출구 DAE 질량유량과 motive DAE 질량유량의 비)를 구한다. 흡인비를 구하기 위하여 우선 정상 운전조건을 이용

Table 2. 125 kW MCFC normal operating conditions

	\dot{m} [g/s]	T [K]	P [Pa abs.]	Chemical composition (wt %)	
Anode inlet	28.5	873	105,000	H ₂	12.9
				CO ₂	71.0
				H ₂ O	16.1
Cathode inlet	283.6	873	105,000	AIR	89.6
				CO ₂	10.4
Secondary flow (anode outlet)	72.7	684	100,734	H ₂	3.0
				CO ₂	72.4
				H ₂ O	24.6
Primary flow	379.2	474	126,136	AIR	100

Table 3. DAE conversion

		\dot{m} [g/s]	DAE \dot{m} [g/s]	Entrainment ratio correction factor	
				F_{MW}	F_T
Secondary (anode outlet)	Gas	54.8	56.8	1.16	0.83
	Steam	17.9	29.2	0.80	0.77
	Sum	72.7	86.0	-	-
Primary flow		379.2	404.5	1	0.94

하여 dry air equivalent (DAE)를 구한다. Table 3은 Table 2를 기준으로 하여 유량을 DAE 기준으로 환산한 것이다⁸⁾. DAE는 유체의 온도와 분자량에 따라 상온에서의 등가 공기로 환산한 양을 의미한다. 온도와 분자량에 따른 흡인비 보정계수(entainment ratio correction factor)는 Fig. 3과 Fig. 4를 참고하면 된다⁸⁾. Fig. 3은 온도에 따른 흡인비를 보정할 수 있는 정보를 제공하며, steam에 대해서는 별도의 기준 흡인비를 표시하였다. 한편, Fig. 4는 유체의 분자량에 따른 흡인비 보정을 할 수 있는 정보를 제공하고 있다. 그리고 편의상 연료극 출구 흐름을 2차 유동(secondary flow)이라고 정의하였고, 블로워로 유입되는 공기를 1차 유동(primary flow)으로 정의하였다. Table 3의 DAE 값을 기준으로 125 kW MCFC 시스템 이젝터의 흡인비는 0.18이 된다. Table 2와 Table 3을 기준으로 2.2.2.3절에서 이젝터 상세 설계가 이루어진다.

2.2.2.2 이젝터 모델

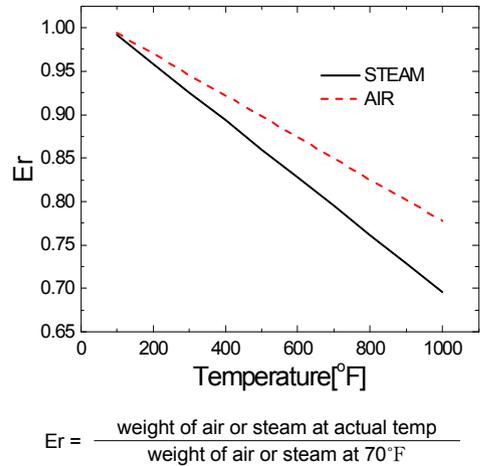


Fig. 3. Temperature entrainment ratio curve

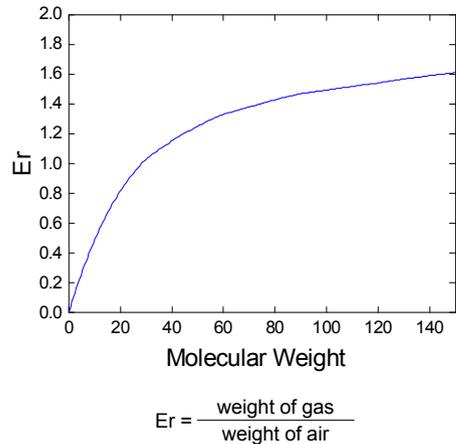


Fig. 4. Molecular weight entrainment ratio curve

가. Flow regime

이젝터 설계에 영향을 주는 유동은 세 가지로 구분될 수 있다. 1차와 2차 유동이 모두 아음속(subsonic)인 경우, 1차 유동(primary flow)은 초음속(supersonic)이고 2차 유동(secondary flow)은 아음속인 경우, 1차와 2차 유동이 모두 초음속인 경우로 구분된다. 본 논문의 이젝터는 1차와 2차 유동이 모두 아음속으로 가정하였다.

나. 노즐 위치

노즐 위치에 따라 이젝터 모델이 두 가지로 나뉜다⁹⁾. 노즐의 출구가 이젝터의 등면적 구간(constant-

Table 4. Ejector model

	Constant area	Constant pressure
Subsonic-subsonic (primary-secondary)	Constant area subsonic-subsonic	Constant pressure subsonic-subsonic
Supersonic-subsonic (primary-secondary)	Constant area supersonic-subsonic	Constant pressure supersonic-subsonic
Supersonic-supersonic (primary-secondary)	Constant area supersonic-supersonic	Constant pressure supersonic-supersonic

area section) 내부에 위치할 때, 1차와 2차 유동의 혼합은 등면적 구역에서 일어나고, “등면적 혼합 이젝터(constant-area mixing ejector)”라고 일컫는다. 한편, Keenan과 Neumann¹⁰⁾은 1차와 2차 유동의 혼합이 노즐출구와 등면적 구간 입구 사이에서 등압 조건으로 일어난다고 가정하였다. Keenan 등¹¹⁾에 의해 발전된 “constant-pressure ejector(등압 이젝터)” 이론은 constant-pressure ejector(등압 이젝터)의 해석에 널리 활용되어 왔다. Keenan 등¹¹⁾은 노즐 출구에서 1차와 2차 유동의 압력이 일정하다고 가정하였다. 노즐 출구가 등면적 구간 앞에서 흡입 챔버에 위치할 때, 그 이젝터는 “등압 혼합 이젝터(constant-pressure mixing ejector)”로 정의한다. 본 논문에서 설계된 이젝터는 등압 분위기의 흡입 챔버에서 1차와 2차 유동의 혼합이 일어난다고 가정하였다. 일반적으로 등압력 혼합 이젝터(constant-pressure mixing ejector)가 등면적 혼합 이젝터(constant-area mixing ejector)보다 성능이 좋은 것으로 알려져 있다^{10,12)}.

"가. Flow Regime"와 "나. 노즐 위치"에 있는 이젝터 모델은 Table 4와 같이 정리될 수 있다. 본 논문에서 선택한 이젝터 모델은 등압(constant pressure)과 아음속-아음속(subsonic-subsonic)이다.

2.2.2.3 이젝터 상세 설계

가. 가정

이젝터의 유동 방정식은 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존식을 포함한다. 마찰손실이 없다면 다음 가정을 통해 해석을 단순화할 수 있다⁹⁾.

- 작동유체는 벽 내부에서 단열이며, 비열비가 일정한 이상(ideal) 유동이다.
- 이젝터 내에서 1차 유동은 반경방향으로 일정하게 분포된다.
- 2차 유동의 압력과 온도는 반경방향으로 일정하게 분포된다.
- 흡입 챔버에서 2차 유동의 압력은 일정하게 분포되어 있고, 입구 압력과 동일하다.
- 1차와 2차 유동은 정상 상태(steady state)이다.

나. 경계 조건

이젝터에서 마찰손실은 없고, 이젝터의 노즐과 디퓨저의 효율은 1로 가정하였으며, 이젝터 설계를 위한 공정 조건들은 Table 2와 Table 3에 정리되어 있다.

다. 1차 유동 노즐 목(nozzle throat) 직경

Fig. 2에서 1차 유동의 노즐 목(위치②)을 계산하기 위하여 위치①에서 위치③까지 질량 및 에너지가 보존 방정식이 성립한다고 가정한다. 압력은 Fig. 2의 위치①에서 측정된다. 입구 배관의 길이가 노즐 목에 비하여 충분히 크다고 가정하면, P_{totp} 의 값은 입구배관에서 측정된 압력값과 동일하다고 가정한다. 위치①에서 정압은 식 (1)으로부터 구할 수 있다.

$$P_{pt} = P_{totp} - \frac{1}{2} \rho_{pt} V_{pt}^2 \tag{1}$$

따라서, 위치②에서 마하수는 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$M_{pt} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_{totp}}{P_{pt}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \tag{2}$$

Total temperature는 위치①에서 온도와 유량으로부터 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$T_{totp} = T_p + \frac{k-1}{kR} \frac{V_p^2}{2} \tag{3}$$

노즐 목에서 온도는 위치①에서 측정된 온도와 유량으로부터 식 (4)를 이용해 구할 수 있다.

$$T_{pt} = \frac{T_{totp}}{1 + \frac{k-1}{2} M_{pt}^2} \quad (4)$$

위치②에서 마하수와 온도로부터 속도를 구할 수 있다.

$$V_{pt} = M_{pt} \sqrt{kRT_{pt}} \quad (5)$$

1차 유동 노즐 목 직경은 아래 제시되는 일련의 식들로부터 구할 수 있다.

$$\rho_{totp} = \frac{P_{totp}}{RT_{totp}} \quad (6)$$

$$\rho_{pt} = \frac{\rho_{totp}}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{pt}^2\right)^{1/(k-1)}} \quad (7)$$

$$D_{pt} = \sqrt{\frac{4Q_p}{\pi \rho_{totp} V_{pt}}} \quad (8)$$

라. 2차 유동 목(secondary flow throat) 면적(A_{st})

1차 유동의 노즐 목 위치에서 사용된 방법과 마찬가지로 2차 유동에서 P_{st} 를 가정하고, M_{st} , T_{st} , ρ_{st} , ρ_{st} 와 V_{st} 를 구할 수 있으며, 식 (9)를 통해서 2차 유동 목 면적을 구할 수 있다.

$$A_{st} = \frac{Q_s}{V_{st}} \quad (9)$$

마. 목(throat) 직경

여기서의 목은 1차와 2차 유동이 혼합되어 흘러들어가는 mixing throat를 의미한다. 1차 유동 목(primary flow throat) 면적과 2차 유동 목(secondary flow throat)의 면적을 고려하여, 식 (10), 식 (11)을 이용하여 목 직경을 구할 수 있다.

$$K = \frac{\frac{\pi}{4} D_t^2}{\left(A_{st} + \frac{\pi}{4} D_{pt}^2\right)} \quad (10)$$

$$D_t = \sqrt{\phi \left(A_{st} + \frac{\pi}{4} D_{pt}^2\right)} \quad (11)$$

여기서, ϕ 는 혼합 계수(mixing coefficient)이며, 혼

Table 5. The ejector dimension of 125 kW MCFC

Parameters		Value
D_n [mm]	Nozzle diameter	46
D_t [mm]	Throat diameter	54
L_n [mm]	Nozzle length	315.5
L_t [mm]	Throat length	437
L_d [mm]	Diffuser length	728
Pipe size (inch) (primary, secondary, diffuser)		6
Entrainment ratio		0.18

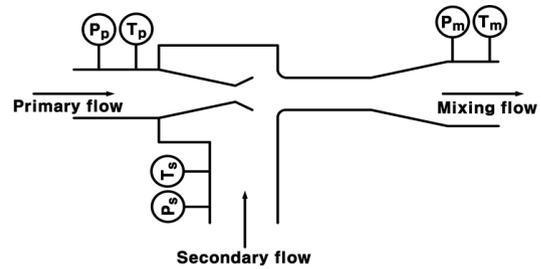


Fig. 5. Measuring points in the ejector

합 구간에서 1차 유동과 2차 유동 면적의 손실에 대한 정보를 제공한다⁷⁾.

바. 목(throat) 길이, 디퓨저 길이, 디퓨저 각도

5 kW, 75 kW 용융탄산염 연료전지 시스템의 이젝터 설계값을 참고하여 설정하였다⁵⁻⁷⁾.

“가-바”의 과정을 거쳐 도출된 125 kW급 MCFC 시스템 이젝터의 주요 설계값은 Table 5와 같다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 125 kW MCFC 시스템 운전

125 kW 용융탄산염 연료전지 시스템은 3,000시간 이상 운전되었다. 최대 출력은 125 kW, 누적 발전량은 65 MWh을 기록하였다. 이젝터와 촉매연소기를 이용하여 연료극 출구가스를 재순환시켜 시스템을 운전하였다³⁾(Fig. 5).



Fig. 6. 125 kW MCFC system



Fig. 7. The ejector for 125 kW MCFC system

3.2 이젝터 시험

125 kW 용융탄산염 연료전지 시스템용 이젝터가 제작되어 현장에 설치되었다(Fig. 6 and Fig. 7). 이젝터 시험을 위해서 설치된 센서의 종류와 위치는 Fig. 5에 제시되어 있다. 본 논문에서 다루고 있는 이젝터의 1차 유동과 2차 유동이 모두 게이지 압력으로 20,000 Pa 이하가 되는 저압 유체이다. 저압의 유체에서 이젝터를 설계할 때는 주의를 기울일 필요가 있다. 저압 유체의 이젝터 설계가 어려운 이유는 1차 유동이 저압일 경우 1차 유동이 이젝터에서 진공 분위기를 만들어 내지 못하여 2차 유동을 이젝터로 끌어 와서 혼합되지 못하고, 오히려 2차 유동이 흘러오는 방향으로 1차 유동이 흘러갈 수 있기 때문이다. 그래서 5 kW, 75 kW MCFC 시스템에서는 여러 이

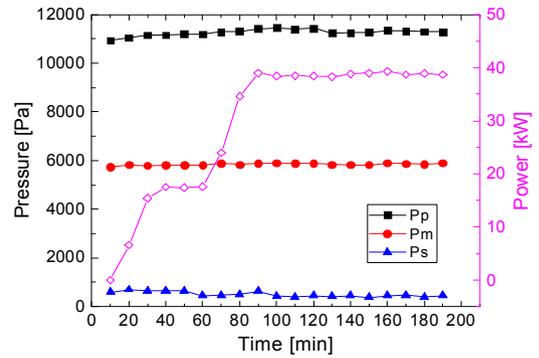


Fig. 8. Fuel cell power and pressure around the ejector (1)

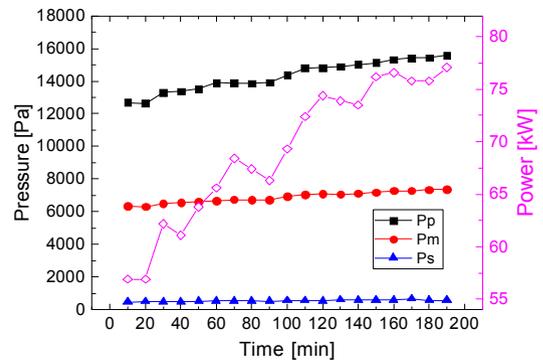


Fig. 9. Fuel cell power and pressure around the ejector (2)

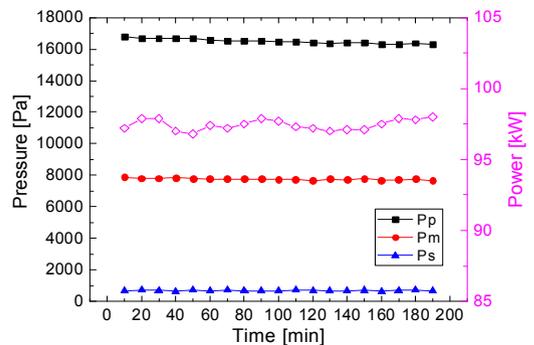


Fig. 10. Fuel cell power and pressure around the ejector (3)

젝터를 설계·제작하여 상온의 공기를 이용하여, 성능을 검증하였고, 이 중 최적 설계값을 연료전지 실증 시험에 적용하였다⁵⁻⁷⁾. 5 kW와 75 kW에서 이미 설계 절차가 검증되었으므로, 125 kW MCFC 시스템에서는 제작된 이젝터를 바로 연료전지 시스템에 설치

Table 6. Mean pressure according to fuel cell power

Power (kW)	Mean Pressure [Pa]		
	P_p	P_s	P_m
0-40	11,268	500	5,845
56-77	14,308	539	6,884
97-98	16,495	677	7,757

하여, 운전을 하였다. 계측기의 물리적인 크기로 인해 이젝터 내부에 설치하기 곤란하였고, 계측기를 설치할 경우 발생될 수 있는 이젝터와 연료전지 시스템의 성능 저하를 우려하여, 이젝터의 주요 설계점에 계측기를 설치할 수는 없었다. 따라서, Fig. 5와 같이 이젝터의 입·출구에서 압력을 측정하여 이젝터의 역할이 수행되고 있는지 확인하였다.

연료전지 스택이 무부하 상태에서 40 kW까지 출력을 발생하는 3시간 동안 평균적으로 P_p (primary flow 압력)은 11,268 Pa, P_s (secondary flow 압력)는 500 Pa, P_m (mixing flow 압력)은 5,845 Pa를 유지한다(Fig. 8). 이 때, 이젝터는 진공 분위기를 형성하며 연료극 출구 가스를 이젝터로 흡입하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 9는 연료전지 스택의 출력이 56 kW에서 77 kW까지 변할 때, 이젝터 압출구의 압력값을 보여준다. 평균적으로 P_p 은 14,308 Pa, P_s 는 539 Pa, P_m 는 6,884 Pa를 유지한다. Fig. 10은 연료전지 스택의 출력이 97-98 kW를 유지할 때, P_p 은 16,495 Pa, P_s 는 677 Pa, P_m 는 7,757 Pa 값을 보인다(Table 6).

연료전지 스택의 출력이 올라가면서 소요 공기와 가스의 유량이 많아지므로 이젝터의 1차 유동 압력(P_p)과 이젝터 출구 압력(P_m)은 비례하여 증가한다. 반면, 2차 유동 압력(P_s)은 1차 유동 압력과 이젝터 출구 압력에 비하여 거의 일정한 수준으로 유지된다. 결국, P_p 가 커질수록 P_p 과 P_s 의 차이는 증가되고, 이젝터 흡입 챔버의 진공 분위기는 강화되어, 이젝터로 2차 유동이 지속적으로 유입됨을 관측할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 125 kW 용융탄산염 연료전지 시스템

의 공정 조건을 설정하고, 연료전지의 연료극 출구 가스를 촉매연소기로 순환시키기 위한 이젝터를 설계하여 시험한 결과를 분석한 것이다. 한전은 5 kW, 75 kW 용융탄산염 연료전지 시스템을 위한 이젝터를 설계하였고, 이를 설계제작시험한 결과를 바탕으로 125 kW 용융탄산염 연료전지 시스템의 이젝터를 설계하여 시험을 하였으며 아래의 결론을 도출하였다.

1) 125 kW 용융탄산염 연료전지 시스템은 3,000 시간 이상 운전되었다. 최대 출력은 125 kW, 누적 발전량은 65 MWh을 기록하였다. 여기에 설치된 이젝터는 스택의 출력이 0 kW에서 125 kW까지 변하는 동안 연료극 출구가스와 공기를 효과적으로 촉매연소기로 공급하는 역할을 하였다.

2) 상압에서 운전되는 용융탄산염 연료전지를 위한 이젝터는 1차 유동이 저압 유체이므로, 흡입 챔버에서 진공 분위기를 형성하여 유체를 혼합하기 위해 이젝터 설계에 주의를 기울일 필요가 있다.

3) 저압의 유체조건인 이젝터를 설계하기 위해서 이젝터 모델을 등압력 혼합(constant-pressure mixing) 및 1차 유동과 2차 유동이 모두 아음속인 모델을 적용하였다.

4) 125 kW 용융탄산염 연료전지 시스템의 정상 운전 조건을 설정하고, 유체의 온도와 분자량을 기준으로 유량을 DAE로 환산하여, 이젝터의 기준 흡인비를 0.18로 설계하였다.

5) 연료전지 스택의 출력이 올라가면서, 소요 공기와 가스의 유량도 많아지므로, 1차 유동과 이젝터 출구의 압력도 비례하여 증가된다. 반면, 2차 유동 압력은 1차 유동의 압력에 비하여 거의 일정한 수준으로 유지된다. 1차 유동 압력과 2차 유동 압력 차이가 커질수록 이젝터 흡입 챔버의 진공 분위기는 강화되고, 이젝터로 2차 유동이 지속적으로 유입됨을 확인할 수 있었다.

References

1. K. Sundmacher, A. Kniele, H. J. Pesch, J. F. Berndt, and G. Huppmann, "Molten Carbonate Fuel Cells", Wiley-VCH, Weinheim, 2007, pp. 11-14.
2. S. W. Kang, B. Kim, D. H. Kim, J. Lee, E. H. Kim, and H. C.

- Lim, "The Operating Results of the 75kW MCFC Stack", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 202-207.
3. B. Kim, D. H. Kim, J. Lee, S. W. Kang, and H. C. Lim, "The operation results of a 125 kW molten carbonate fuel cell system", *Renewable Energy*, Vol. 42, 2012, pp. 145-151.
 4. H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, G. and Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 41, 2002, pp. 551-561.
 5. B. Kim, D. H. Kim, S. W. Kang, J. Lee, E. H. Kim, and H. C. Lim, "The Ejector Design and Test for 5kW MCFC System", *Proceedings of the Korean Society for New and Renewable Energy 2008 Spring Conference*, 2008, pp. 53-56.
 6. B. Kim, D. H. Kim, and H. C. Lim, "The Design and Test of Ejectors for a 75-kW Fuel Cell System", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 5, 2011, pp. 678-685.
 7. B. Kim, D. H. Kim, J. Lee, S. W. Kang, and H. C. Lim, "The Ejector Performance of a 75kW Molten Carbonate Fuel Cell System", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 8, No. 1, 2011, p. 014503.
 8. Heat Exchange Institute, Inc., "Standards for Steam Jet Vacuum Systems", 6th ed., Heat Exchange Institute, Inc., Cleveland, 2007, pp. 29-31.
 9. D. W. Sun and I. W. Eames, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors—Review", *J. Inst. Energy*, Vol. 68, 1995, pp. 65-79.
 10. H. Keenan and E. P. Neumann, "A Simple Air Ejector", *ASME Trans. J. Appl. Mech.*, Vol. 69, 1947, pp. A317-A336.
 11. J. H. Keenan, E. P. Neumann, and F. Lustwerk, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment", *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 17, No. 3, 1950, pp. 299-309.
 12. E. Greitzer, C. S. Tan, and M. B. Graf, "Internal Flow, concept and application", Cambridge University Press, 2004, pp. 549-564.