

## 5kW 용융탄산염 연료전지 이젝터 설계 및 시험

\* \*\*김범주, 김도형, 이정현, 정상천, 이성윤, 강승원, 임희천

### The Ejector Design and Test for 5kW Molten Carbonate Fuel Cell

\* \*\*Beomjoo Kim, Dohyung Kim, Junghyun Lee, Sangchun Jung, Sungyoon Lee,  
Seungwon Kang, Heechun Lim

**Key words** : Ejector(이젝터), Molten Carbonate Fuel Cell(용융탄산염 연료전지), Entrainment Ratio (구동유량과 이차유량의 비), Hydrogen Recirculation(수소 재순환), Pressure Coefficient (압력계수), Mach Number(마하수), Diffuser(디퓨저), Nozzle(노즐)

**Abstract** : An ejector is a fluid machinery to be utilized for mixing fluids , maintaining vacuum, and transporting them. The Ejector is applied for a variety of industrial fields such as refrigerators and power plants. It is adopted to recycle anode off gas safely in 5kW Molten Carbonate Fuel Cell system of KEPRI(Korea Electric Power Research Institute). The ejector is placed at mixing point between the anode off gas and the cathode off gas or the fresh air. In this study, the entrainment ratio is measured according to the diametrical ratio of nozzle to throat. In addition, the performance curve of the ejector and the differential pressure in diffuser is observed.

#### Nomenclature

Er :entrainment ratio  
Pr : pressure ratio  
Cp: pressure coefficient  
 $\dot{m}$ : mass flux [g/s]  
M: mach number  
D: diameter [mm]  
L: length [mm]  
 $\rho$ : density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\eta$ : efficiency of ejector  
 $\omega$ : the diametrical ratio of nozzle to throat  
 $\lambda$ : the ratio of diameter to length in throat  
 $\gamma$ : specific heat ratio  
V: velocity [m/s]  
A: Area [m<sup>2</sup>]

#### subscript

p : primary  
s : secondary  
N: nozzle  
T: throat  
D: diffuser  
T: total

#### 1. 서론

이젝터는 고압의 유체를 노즐에서 고속으로 분출시켜 구동유체가 가지고 있는 압력에너지를 속도에너지로 변화시켜 주변의 저압 유체와 운동량을 교환하여 저압의 유체를 흡입, 수송하는 장치이다. 이젝터는 노즐, 목, 혼합부, 디퓨저 등으로 구성되어 있다. 이젝터는 회전부분 및 전원 연결 부분이 없으므로 고장이 적다. 이젝터는 펌프에서 치명적인 고장을 일으키는 공동현상(Cavitation)도 일어나지 않고, 위험을 수반하지 않으므로 유독·위험물질 등을 취급하기에 적당한 유체기기이다. 이젝터 자체의 효율은 낮으나, 전체 시스템으로 보았을 때는 별도의 동력이 추가되지 않았으므로 시스템 전체 효율이 증가하는 특성을 가지고 있다.

이젝터는 구동 유체 및 2차 유체의 마하수(M)에 따라 아음속, 음속, 초음속 이젝터 등으로 나뉘어 지고, 노즐과 목의 위치에 따라 Constant Pressure 이젝터, Constant Area 이젝터 등으로

나누기도 한다.

용융탄산염 연료전지는 580~650℃의 온도에서 작동하고 전해질로 용융탄산염을 이용하며, 차세대 분산형 전원으로 상용화에 근접한 연료전지이다. 고온의 수소를 재순환하기 위해서 송풍기와 같은 회전기기를 이용하게 되면 본질 안전 방폭 구조로 만들어야 하여 비용 증가, 제작의 어려움, 위험 요인이 수반되지만, 이젝터를 이용하면 별도의 회전기기 도움이 없으므로 안전하고, 누설의 위험도 줄게 된다.

## 2. 작동 원리와 구조

### 2.1 5kW 연료전지 시스템의 구조

5kW급 용융탄산염 연료전지 시스템의 구조는 Fig.1과 같다. 연료전지의 Anode극에는 수소가 공급되고, Cathode극에 공기와 이산화탄소가 공급되며, Cathode의 폐가스는 Recycle Blower를 통해 상온의 공기와 합류되어 이젝터의 구동 유체(Primary Flow)로 작용되고, Anode의 폐가스(Secundary Flow)를 흡입, 혼합하여 촉매연소기에서 연소 반응을 거친 후 Cathode 입구로 들어가는 과정을 반복하게 된다.

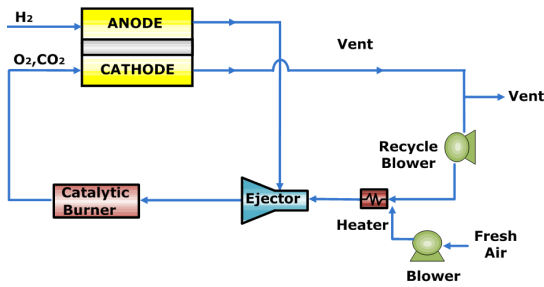


Fig. 1 Schematic Diagram of MCFC system

### 2.2. 이젝터의 원리 및 해석

#### 1) 원리

이젝터는 같이 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 ⑥내의 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 압력 에너지로 변환시킨 후 ⑤로 송출시킨다.

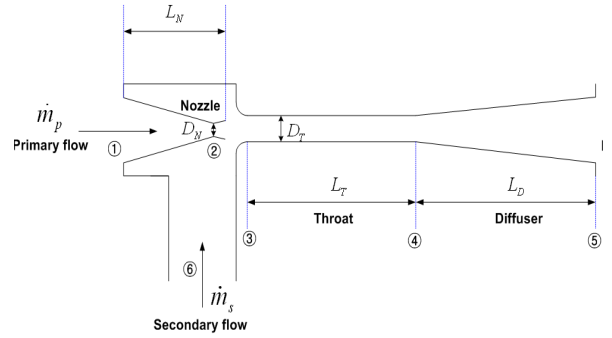


Fig. 2 Schematic Diagram of Ejector

#### 2) 가정

- ① 구동 유체의 노즐에서 팽창과정 및 Throat, Diffuser에서 유체의 압축, 팽창 과정은 등엔트로피이다.
- ② 일정한 등엔트로피 팽창 지수를 가지며 이상 기체의 특성을 가진다.
- ③ 유동은 단열이다
- ④ 이젝터 흐름은 1차원이고 정상 상태라고 가정한다.

#### 3) 지배 방정식

이젝터에 사용되는 압축성 유체역학의 지배방정식들은 다음과 같으며, 구동 유체(Primary Flow)와 흡입 유체(Secundary Flow)에 모두 적용된다.

$$M_{p2}^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_{Tp}}{P_{p2}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$T_{p2} = \frac{T_{Tp}}{\left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{p2}^2 \right)}$$

$$\rho_{Tp} = \frac{P_{Tp}}{RT_{Tp}}$$

$$\rho_{p2} = \frac{\rho_{Tp}}{\left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_{p2}^2 \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}}$$

$$V_{p2} = M_{p2} \sqrt{\gamma_{p2} RT_{p2}}$$

$$A_{p2} = \frac{\dot{m}_p}{\rho_{p2} V_{p2}}$$

#### 4) 성능해석

##### ① 혼입비(Entrainment Ratio)

이젝터의 성능은 이젝터의 노즐부를 통과하는 구동 유체와 흡입부를 통과하는 흡입 유체의 비에 의해 결정된다.

$$Er = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p}$$

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

##### ② 효율

이젝터의 효율은 1차 유동에 소요된 에너지와 2차 유동의 유인된 에너지의 비로 정의

되는데 이것은 Er과 Pr의 곱으로 다시 쓸 수 있다.

$$\eta = \frac{\dot{m}_s (P_1 - P_5)}{\dot{m}_p (P_6 - P_5)} = Er Pr$$

### ③ 압력계수 ( $C_p$ )

디퓨저에서 압력계수를 계산하여 설계값으로 활용하도록 한다. 압력계수는 디퓨저에서 유량이 흐를 때 정압과 동압의 비로 나타낼 수 있다.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

## 3. 실험 장치 및 방법

Fig.3에서 Blower의 출력을 조절하여 공기의 유량을 주입하였으며 이젝터에 따라 입구, 출구에서 압력, 유량, 온도를 측정하였다. 실험 장치는 Fig.4~Fig.5에 나타나 있다. 노즐을 구경에 따라 7종류, Throat를 길이와 구경에 따라 9종류를 만들어서 이 조합에 의해 실험을 진행하였다.  $\omega$ 는 0.16~0.53의 범위에서 형성되었고  $\lambda$ 는 0.4, 8이 되도록 설계를 하였다. 노즐과 Throat의 지름비에 따른 Entrainment Ratio와 Throat의 구경과 길이비에 따른 Entrainment Ratio를 중점으로 각 구간에서 측정된 값을 바탕으로 데이터를 분석하였다.

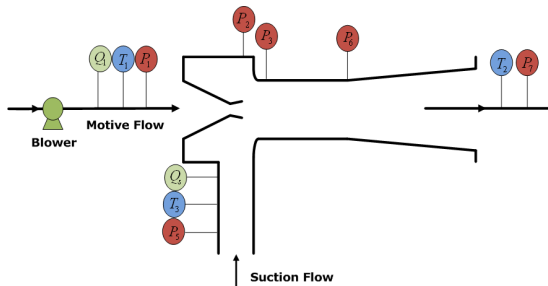


Fig. 3 Schematic Diagram of Ejector Setup

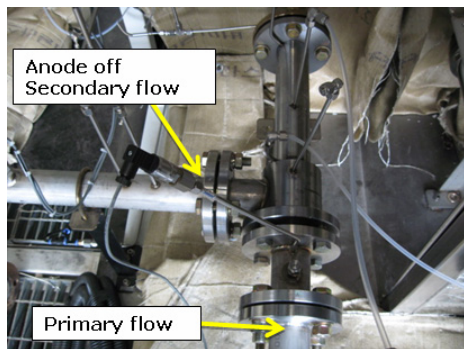


Fig. 4 Ejector Setup 1

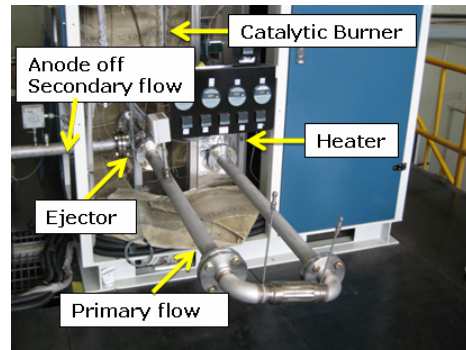


Fig. 5 Ejector Setup 2

## 4. 결과

Fig.6은 노즐과 Throat의 지름비에 따른 Entrainment Ratio를 나타낸 것이다.  $\omega$ 가 작을수록 구동 유량이 적어도 흡입되는 유량이 많고,  $\omega$ 가 커질수록 구동 유량이 많아도 흡입되는 유량은 적음을 알 수 있다.  $\omega$ 를 더 키우면 흡입이 되지 않음을 관찰할 수 있었다.

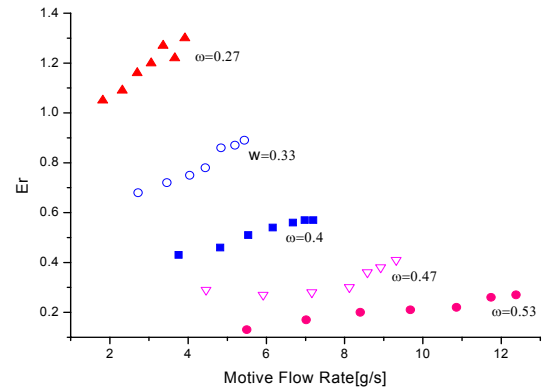


Fig. 6 Entrainment Ratio According to  $\omega$  ( $\lambda=4$ )

Fig.7은  $\omega$ 이 0.4,  $\lambda$ 가 4일 때 이젝터의 특성 곡선을 나타낸 것이다. 이젝터의 효율은 2.2절에서 설명했듯이 Pr과 Er의 곱이다. 압력비는 Entrainment Ratio가 증가함에 따라 감소하였고 전형적인 펌프의 특성곡선처럼 중간 유량에서 최대 효율 15%정도를 가졌다.

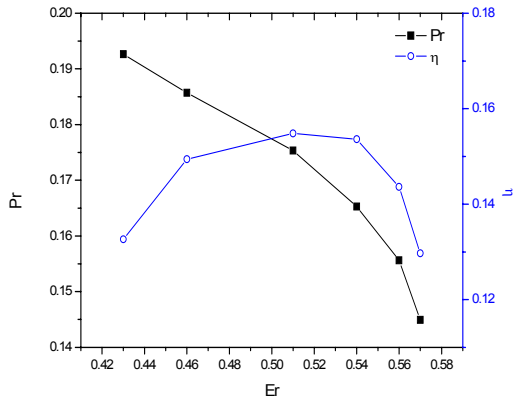


Fig. 7 Performance Curve( $\omega=0.4, \lambda=4$ )

Fig.8은  $\omega$ 이 0.4,  $\lambda$ 가 4일 때 디퓨저에서 압력계수( $C_p$ )와 압력차이( $\Delta P$ )를 나타낸 것이다. Entrainment Ratio가 증가할 수록  $C_p$ 와  $\Delta P$ 가 감소하였다. Entrainment Ratio의 증가로 동압이 증가하였기 때문에 풀이된다.

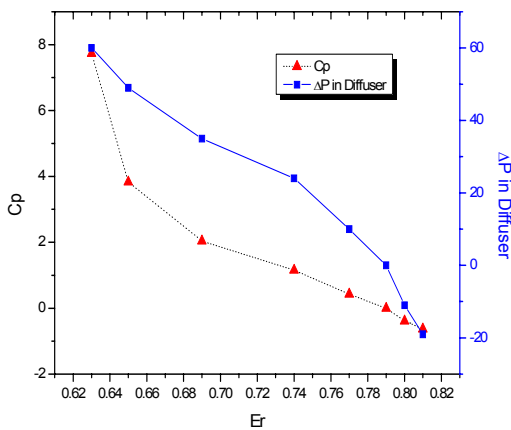


Fig. 8  $C_p$  &  $\Delta P$  Curve ( $\omega=0.4, \lambda=4$ )

## 5. 결론

본 연구에서 설계된 이젝터는 전, 후단에 걸리는 압력차이가 크지 않고 절대압이 작으므로 Entrainment Ratio가 작고 설계의 견실성도 크지 못한 것이 당연하다. 하지만, 유량에 따른 최적의 기하학적인 형상을 찾아낸다면 성능이 좋은 이젝터를 설계할 수도 있다. Cathode의 가스 조성 과 촉매연소기에서 소요되는 수소량을 계산하여, Entrainment Ratio가 0.2의 값을 가지는 모델이 5kW MCFC에 적합함을 알 수 있었다. 온도, 가스 조성에 따른 Entrainment Ratio 보정 값에 대한 실험을 추가하고, 75kW 및 250kW MCFC급 ejector 설계에 응용하고자 한다. 대용량 이젝터의 설계시에는 기하학, 운동학적, 역학적 상사를 모두 만족시켜서 Scale Up을 할 수 없으므로 안

전을 충분히 둘 필요성이 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 “250kW급 열병합 용융탄산염 연료전지 Proto Type 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] H. El-Dessouky, H.Ettouney, I. Alatiqi, G. Al-Nuwaibit, 2002, "Evaluation of steam jet ejectors", Chemical Engineering and Processing 41 (2002) 551-561.
- [2] Y. Zhu, W. Cai, C. Wen, Y. Li, 2007, "Fuel ejector design and simulation model for anodic recirculation SOFC system", Journal of Power Sources 173(2007) 437-449
- [3] Keenan, J.H., Neumann, E.P. and Lustwerk. F.,1950, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment", Journal of Applied Mechanics. Vol.17, No.3, pp.299-309.
- [4] M.T.Kandakure, V.G. Gaikar, A.W. Patwardhan, 2005, "Hydrodynamic aspects of ejectors", Journal of Chemical Engineering Science 60 (2005) 6391-6402.
- [5] R.Yapici, H.K. Ersoy, 2005, "Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model", Journal of Energy Conversion & Management 46(2005) 3117-3135.