EO2-03

# 미니버스용 PEMFC 시스템의 수소 재순환 장치 설계

김민진, 김동하, 이원용, 김창수
한국에너지기술연구원

# Design of the hydrogen recirculation system in polymer electrolyte membrane fuel cell system for a mini-bus

Minjin Kim, Dogn-Ha Kim, Won Yong Lee, Chang Soo Kim
*Korea Institute of Energy Research*

## 1. 서 론

연료전지에서 수소를 전혀 배출하지 않는 방법으로 PEMFC의 anode 출구를 차단하여 수소 연료전지가 dead end 시스템으로 운용되도록 하여 에너지 효율을 향상시키는 방법이 있기는 하나 가습조건과 등의 문제로 인해 장시간 운전 시 성능이 저하된다.[1] 따라서 미반응 수소의 효과적인 처리 방법으로 순환 시스템을 사용할 수 있는데, 스택과 물 분리 트랩을 지나면서 저하된 압력을 회복하기 위해 펌프나 이젝터를 사용하게 된다. 펌프는 추가적인 동력이 요구되기 때문에 연료전지에 의해 생성된 전력을 소모하여 전체적인 효율을 떨어뜨리게 된다. 그래서 기생 전력이 요구 없이 에너지 변환에 의해 유동을 순환시킬 수 있는 이젝터를 도입하게 되었다.

이젝터는 크게 1차 유동이 가속되는 노즐 부분과 2차 유동이 흡입되는 혼합실 그리고 1, 2차 유동이 혼합되어 일정 압력을 유지하는 일정면적부(constant-area) 및 압력 회복을 위한 디퓨저로 구성된다. **Fig. 1**에서처럼 이젝터는 1차 유동이 노즐을 통해 제트 유동으로 분사되는데 이 때 압력에너지가 운동에너지로 변함에 따라 저에너지의 2차 유체가 흡입되는 장치이다.

연료전지에서는 스택에서의 총 유량, 스택 입구 압력, 스택 내부에서의 압력 손실과 순환 경로의 압력 손실 등의 운전조건을 만족시키는 맞춤형 이젝터의 설계가 요구된다. 기존의 이젝터 설계 방법을 바탕으로 연료전지 맞춤형 이젝터의 설계 방안을 제안하였으며, 실험 및 검증을 위해 연료전지 스택의 특징을 대체하는 실험 장치를 고안하였다.

## 2. 이젝터 설계

### 2.1 관련 연구

이젝터 설계는 노즐의 위치에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 노즐 출구가 일정 면적(constant-area)에 위치하여 1차 유동과 2차 유동의 혼합이 일정 면적(constant-area)에서 발생하며 이는 일정 면적(constant-area mixing ejector) 혼합 이젝터이다. 두 번째는 노즐 출구가 흡입실(suction chamber)에 위치하는 것으로 이는 일정-압력 혼합 이젝터(constant-pressure mixing ejector)라 한다. 이 이젝터는 1차 유동과 2차 유동의 혼합이 단일하거나 일정한 압력에서 흡입실에서 발생한다고 가정한다. 이 일정압력 이젝터 모델과 일정면적 이젝터 모델이 Keenan[2]에 의해 수립되었고, Shushin[3]은 일정면적혼합모델을 이용하여 아음속 및 초음속 유동의 이젝터의 유동 계산과 실험 결과를 비교하였고 Huang[4]는 일정압력모델과 일정면적모델을 혼합하여 새로운 모델을 개발하였다 본 연구에서는 이 모델을 기반으로 이젝터를 설계하고 평가하였다.

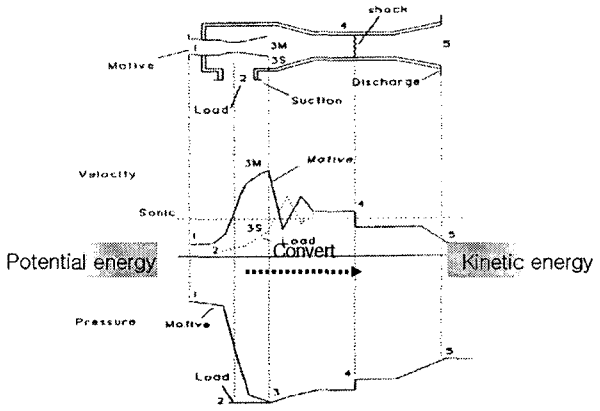


**Fig. 1** Velocity and pressure distribution in ejector

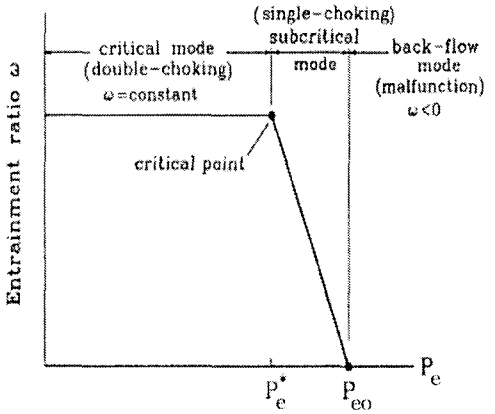


**Fig. 3** Operational mode of ejector

2.2 연구 방법

연료전지 스택의 발생 전력과 이용률 등을 고려하여 연료전지 스택 입구의 유량을 구하고 이에 따라 이용률에 따른 요구 흡입율(ω)을 결정하였다. 1차 유동의 공급조건과 압력 강하를 고려한 스택 후단에서 순환된 2차 유동 조건을 가정하고 최대 유량 조건에서 더블 초킹이 되면서 요구되는 스택 입구압력이 되도록 1차원적으로 설계하였다.

이젝터를 통한 모든 유체과정은 등엔트로피 과정으로 가정하였고, 1차 유동 및 2차 유동은 상온의 순수 수소로 가정하였다. 실제로는 2차 유동이 스택에서 나온 유체라 스택운전온도만큼 상승되고 수분을 포함하고 있지만 본 연구에서는 1차 유동과 같은 온도와 물성이 같은 수소로 가정하였고 실험 또한 실제 스택 없이 순환 되도록 하여 실험 하였다.

2.3 유량 계산

이용률 50%로 셀 전압 0.7V에서 30kW출력을 내는 연료전지의 수소 유량은 다음처럼 계산하였다.

1A당 수소소모량은 다음 식 1로부터 계산할 수 있다.[5]

$$\dot{Q}_{H_2} = \frac{1\,C/\sec}{1\,A}\,\frac{1\,Ne}{96485\,C}\,\frac{1\,gmolH_2}{2\,Ne}\,\frac{22.4\,L}{1\,gmolH_2}\,60\,\sec/\min \qquad (1)$$

30kW 전력을 내기 위해 필요한 전류를 계산 할 수 있고 이로부터 필요한 수소 유량을 계산 할 수 있다.

$$I = 30000\ W/0.7\ V = 42857\ A \qquad (2)$$

$$H_2 = 42857 \times 0.00697 = 299\,(SLPM) \qquad (3)$$

이용률이 50%이므로 실제로 스택 입구에서 필요한 유량은 약 600 SLPM이다. 스택에서 요구되는 조건들을 종합하면 **Table 1**과 같다.

2.4 설계

실제로 이젝터 성능에서 두 번의 초킹 현상이 존재한다. 하나는 노즐을 통한 주 유동의 초킹이고 다른 하나는 유입 유동에서이다. 이는 유입 유동의 정체상태에서부터 흡입구를 지나 일정 면적(constant-area)부까지 초음속 유동으로 가속되는 과정에서 발생한다. **Fig. 2**는 고정된 흡입 압력(suction pressure, $P_s$)과 고정된 1차 압력(primary pressure, $P_p$)에서 디퓨저 출구 압력(back pressure, $P_e$)에 따른 흡입율(entrainment ratio, ω)의 변화를 보여준다. 이젝터 성능은 디퓨저 출구 압

력(back pressure, $P_e$)에 따라 세 가지 운용 모드로 나눌 수 있다.

**Table 1** Design condition

| | | |
|---|---|---|
| Power(KW) | | 30 |
| Operating fluid | | Gas H2 |
| Primary | Pressure(MPa) | 0.4(abs.) |
| | Temperature(K) | 343 |
| Secondary | Pressure(MPa) | 0.29(abs.) |
| | Temperature(K) | 323~343(allow for cooling) |
| Total flow rate(SLPM) | | 600 |
| Stack inlet pressure(MPa) | | 0.3(abs.) |
| Flow entrainment ratio | | 1 |

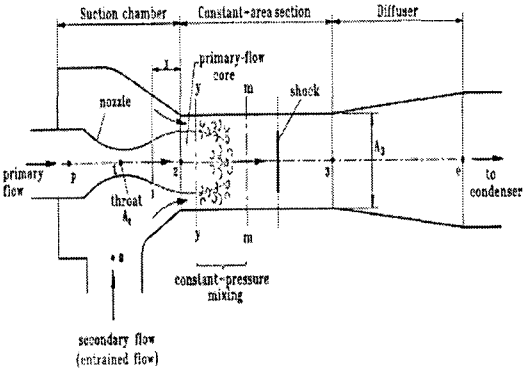


**Fig. 3** Name of each part in ejector

1. $P_e \leq P_e^*$ : double-choking이나 critical mode - 1차 유동과 2차 유동 모두 초킹되고 흡입율은 일정하다. ex) ω=constant

2. $P_e^* < P_e < P_{eo}$ : single-choking 또는 subcritical mode - 1차 유동만 초킹되고 후류압력(back pressure, $P_e$)에 따라 흡입율 ω는 변한다.

3. $P_e \geq P_{eo}$ : back-flow 또는 malfunction mode - 1차 유동과 2차 유동 모두 초킹되지 않고 2차 유동은 역회전된다.(malfunction) ex) $\omega \leq 0$

본 연구에서는 요구되는 최대 유량에서는 더블 초킹 모드가 되도록 설계하였고 시험을 통해 더블 초킹 모드가 되는 부분을 판별하여 시험결과와 설계를 비교하여 손실 계수를 결정하였다.

2.4.1 이젝터 설계를 위한 가정

본 연구에서는 가상의 목은 일정면적부에서 발생한다고 가정하였다. 그래서 두 유체의 혼합은 일정면적에서 동일압력으로 혼합된다. **Fig. 3**은 두 유체의 혼합 과정을 보여주는 도면이다.

분석을 위해 다음의 가정들이 적용되었다.

1. 작동 유체는 이상적 가스로 상수 물성치 $C_p$, γ를 갖는다.
2. 이젝터 내부 유동은 정상상태이고 1차원이다.
3. 1차 유동 입구와 흡입구 그리고 디퓨저 출구에서의 운동에너지는 무시한다.
4. 1차원 모델로 단순화하기 위해 등엔트로피 관계를 사용하였다. 그러나 비가역적 과정을 고려하면 마찰과 혼합 손실의 효과들은 등엔트로피 관계식에 몇 몇 계수를 사용함으로써 고려할 수 있다. 이런 계수들은 등엔트로피 효율과 관련되고 실험적으로 결정된다.
5. 노즐에서 배출된 후 1차 유동은 일정면적부의 단면 y-y (가상의 목)까지 2차 유동과 혼합되지 않고 부채꼴을 그리고 흘러간다.
6. 두 유동은 단면 y-y(가상의 목)에서 동일 압력( $P_{py} = P_{sy}$)으로 혼합되기 시작하고 단면서 충격파가 발생한다.
7. 2차 유동은 단면 y-y(가상의 목)에서 초킹 된다.
8. 이젝터의 내벽은 단열된다.

2.4.2 지배방정식

- 1차 유동 코어 ( 단면 1-1부터 y-y까지)

노즐 끝 단면 1-1에서 두 유동은 혼합되지 않는다. 이것은 단면 1-1에서 이차 유동은 여전히 아음속이고 반면 1차 유동은 초음속 유동이기 때문에 전단 혼합층이 형성된다. 이 전단 혼합층이 두 흐름 사이의 질량과 운동량 교환을 막는 역할을 하기 때문에 두 유동은 분리되고 두 유동의 경계층에서는 전단 혼합층에서 점성에 의한 손실이 발생하게 된다.

단면 y-y에서 일차 유동은 등엔트로피 과정을 따른다.

$$\frac{P_{py}}{P_{p1}} \approx \frac{\left(1+\frac{(\gamma-1)}{2}M_{p1}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}}{\left(1+\frac{(\gamma-1)}{2}M_{py}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}} \qquad (4)$$

- 단면 y-y를 통한 2차 유동

가정 6으로부터 2차 유동은 y-y에서 초킹 조건 ( $M_{sy}=1$)에 도달한다. 2차 유동의 유량은

$$\dot{m}_s = \frac{P_s A_{sy}}{\sqrt{T_e}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{R}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \times \sqrt{\eta_s} \quad (5)$$

$\eta_s$는 2차 유동의 등 엔트로피 효율과 관계된다.

- 단면 y-y 면적

단면 y-y에서의 형상 면적은 $A_3$로 1차 유동의 면적 $A_{py}$와 2차 유동의 면적 $A_{sy}$의 합과 같다.

$$A_{py}+A_{sy}=A_3 \qquad (6)$$

- 충격파 전의 단면 m-m에서의 혼합 유동

두 유동은 단면 y-y에서 혼합되기 시작하며 단면 s-s에서 충격파가 발생된다. 운동량 보전관계로부터 다음 식을 이끌어 낼 수 있다.

$$\Phi_m\left[\dot{m}_p V_{py}+\dot{m}_s V_{sy}\right]=(\dot{m}_p+\dot{m}_s)V_m \quad (7)$$

여기서 $V_m$은 혼합된 유동의 속도이고 $\Phi_m$은 마찰 손실에 따른 계수이다. 유사하게 에너지 보존 관계식을 사용하여 다음 식도 유도할 수 있다.

$$\dot{m}_p\left(C_p T_{py}+\frac{V_{py}^2}{2}\right)+\dot{m}_s\left(C_p T_{sy}+\frac{V_{sy}^2}{2}\right) = (\dot{m}_p+\dot{m}_s)\left(C_p T_m+\frac{V_m^2}{2}\right) \qquad (8)$$

여기서 $V_{py}$와 $V_{sy}$는 단면 y-y에서의 1차 및 2차 유동의 속도로 다음과 같다.

$$V_{py}=M_{py}a_{py};\ a_{py}=\sqrt{\gamma RT_{py}} \qquad (9)$$

$$V_{sy}=M_{sy}a_{sy};\ a_{sy}=\sqrt{\gamma RT_{sy}} \qquad (10)$$

- 단면 m-m에서부터 다면 3-3까지 충격파를 지나는 혼합 유동

초음속 충격파는 단면 s-s에서 발생할 것이다. 충격파를 지난후 혼합유동이 등엔트로피 과정이라고 가정하면 일정면적부 단면 m-m에서 단면3-3사이의 혼합 유동은 단일한 압력 P3를 갖는다.

$$\frac{P_3}{P_m}=1+\frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_m^2-1) \qquad (11)$$

$$M_3^2=\frac{1+((\gamma-1)/2)M_m^2}{\gamma M_m^2-(\gamma-1)/2} \qquad (12)$$

- 디퓨저를 통한 혼합유동

등엔트로피 과정이라고 가정하면 디퓨저 출구에서의 압력은 다음 관계식을 따른다.

$$\frac{P_e}{P_3} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \qquad (13)$$

2.4.3 이젝터 설계 절차

본 이젝터는 연료 이용률이 50%로 50%의 연료는 스택에서 전력 생산에 소모되고 50%는 미반응 수소로 배출되게 된다. 이 배출되는 수소를 순환시키게 되므로 순환율(ω)은 1이 되게 된다. 최대 유량에서는 설계와 해석을 용이하게 하기 위해 더블 초킹 모드로 설계하고 이젝터 후단 압력이 요구 조건이 되며 이젝터 후단 압력으로부터 스택에서의 손실과 순환경로로부터의 손실을 고려하여 흡입되는 유량의 압력도 알 수 있다. 1차 유동 온도( $T_p$) 및 흡입 온도( $T_s$)를 가정하고 앞서 계산된 흡입 압력( $P_s$) 및 유량 값들( $\dot{m}_p$, $\dot{m}_s$)과 이젝터 후단 압력( $P_e$)이 anode입구 압력과 같아지도록 제어 변수인 1차 유동 압력( $P_p$)을 반복 계산을 통해 이젝터 노즐 직경( $D_1$) 및 일정면적부 직경( $D_m$)을 결정한다.

## 3. 실험 장치 구성 및 결과

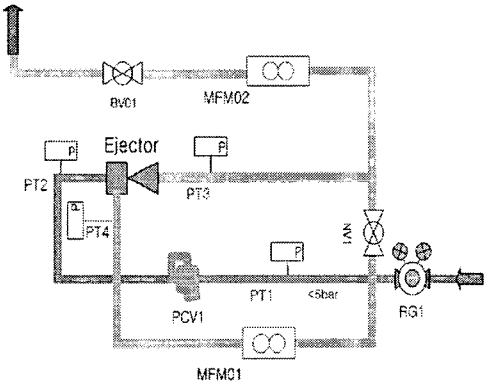


**Fig. 4** Outline of test equipment

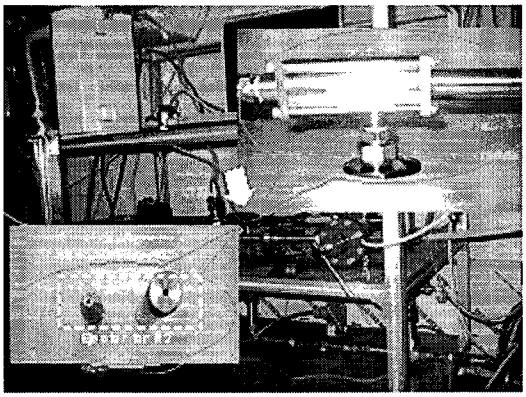

**Fig. 5** Real test equipment

3.1 장치 구성

**Fig. 4**에서 1차 유동 압력은 레귤레이터 밸브를 통해 제어되고, 유량은 비례제어밸브를 통해 제어된다. 이젝터 입구와 출구 압력, 흡입되는 압력 등을 측정하기 위해 압력 센서를 부착했으며, 스택에서 소모되는 양과 순환되는 양을 측정하기 위해서 유량계를 장착하였다. 각 센서의 신호들은 DAQ 장비들을 통해 컴퓨터로 입력 받고 Labview를 이용하여 측정과 제어부분을 작성하였다. **Fig. 5**는 완성된 이젝터 실험 장치이다.

3.2 실험 및 결과

본 실험에서 1차 공급압력과 1차 유량에 따른 순환율을 알아보고자 하였다. 최대 유량 조건에서 최소 유량 조건까지 유량을 감소시키면서 최대 부하 및 낮은 부하 일 때 순환율을 확인하였다. **Fig. 7**에 의하면 최대 출력 조건에서 순환율은 0.83을 나타내며, 최소 유량 조건(최대 유량의 20%)에서는 0.72의 순환율을 보인다.

**Fig. 8**은 압력 강하를 고려한 실험 결과이다. 최소 순환율이 0.54이며, 이는 연료전지 스택의 반응에

**Fig. 7** Entrainment ratio vs. Primary press.

**Fig. 8** Entrainment ratio vs. Delta Press.

충분한 수소의 양을 공급한다.

본 이젝터는 요구 유량과 요구되는 이젝터 후단 압력이 나올 수 있도록 설계하였고 모든 손실 계수들은 1로 설정하였다. 그 결과 순환율은 1이 되도록 하였으나 실험 결과 최대 순환율은 0.83을 보였다. 이는 설계에서 손실 계수를 1로 설정함으로써 손실 계수를 고려하지 않았기 때문이다. 하지만 유체가 노즐을 지나면서 그리고 혼합과정에서 점성이나 마찰에 의해 손실이 발생하게 되며 이런 영향 때문에 실제 실험 결과는 설계 값과 다를 수 있다. 설계 포인트 유량지점의 실험 데이터를 이용하여 각 부분의 손실 계수를 찾았다. (**Table 2**) 실험을 통해 얻어진 손실 계수를 이젝터 설계에 반영한다면 요구사항과 더욱 근접한 실험 결과를 얻을 수 있는 이젝터를 개발할 수 있으리라 본다.

## 4. 결 론

연료전지의 수소 순환용 이젝터를 개발하기 위해 설계절차와 실험을 수행하였다. 연료소모량에 따른 유량 제어를 하기 위해 1차 압력으로 제어 하여야 하며 이는 공급압력은 일정하게 유지 시키고 비례제어 밸브만을 제어하여 1차 압력을 조절할 수 있다. 실험 결과 이젝터의 순환율은 0.54에서 0.83까지 변한다. 1차 압력에 따라 순환율이 변하기 때문에 유량이 줄었을 때는 효율이 떨어질 수도 있다. 보통 연료전지에서 수소 이용률을 70~80%로 보나 현 설계에서는 50%로 보았다. 현재 순환율 0.54~0.83은 이용율 54%~65%에 해당되며, 현재 손실 계수를 고려하지 않고 설계된 이젝터의 사용에 무리가 없을 것으로 보인다. 설계 포인트에서 구한 손실 계수는 $\eta_p$=0.8, $\eta_s$=0.695, $\phi_p$=1.1, $\phi_m$=0.955로 손실 계수를 고려한 이젝터는 더 좋은 순환율과 낮은 수소 이용률 영역에서도 사용할 수 있으리라 본다.

## 참고문헌


(1) Satoru Hikita, Fumihiro Nakatani, Kimitaka Yamanc, Yasuo Takagi, 2002, "Power-generation characteristics of hydrogen fuel cell with dead-end system" JSAE Review, 23, pp. 177-182.

(2) J.H. Keenan, E.P. Neumann, F. Lustwerk, 1950, "An investigation of ejector design by analysis and experiment", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, No. 3, pp. 299-309.

(3) N.A. Shushin, 1999, "On gas ejector calculation", *Izvestiya VUZ Aviatsionnaya Tekhnika*, Vol 42, No. 3, pp.46-50.

(4) B.J. Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, V,A, Petrenko, 1999, "A 1-D analysis of ejector performance", *International Journal of Refrigeration,* 22, pp. 354-364.

(5) EG&G Technical Services, Inc., "Fuel Cell Handbook(Seventh Edition)", *US DOE.*