한국수소 및 신에너지학회 논문집(2006.9), 제17권 제3호
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society (2006.9), Vol. 17, No. 3, pp. 279~285

개발 비용 감소를 위한 연료전지용 이젝터의 설계 및 성능평가

김민진*, 김동하, 유상필*, 이원용*†, 김창수***
*한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단, **경북대학교 기계공학과

Design and Performance Test for a Fuel Cell Ejector to Reduce its Development Cost

Minjin Kim*, Dong-Ha Kim, Sang-Phil Yu*, Won-Yong Lee*†, Chang-Soo Kim***
**PEFC Research Group, New Energy Department, Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon, 305-343, Korea*
***Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.*

ABSTRACT

Recirculation for the unreacted fuel is necessary to improve the overall efficiency of the fuel cell system and to prevent fuel starvation since the fuel cell for a vehicle application is a closed system. In case of the automotive fuel cell, the ejector which does not require any parasitic power is good for the performance improvement and easy operation. It is essential to design the customized ejector due to the lack of the commercial ejector corresponding to the operating conditions of the fuel cell systems. In this study, the design methodology for the ejector customized to an automotive fuel cell is proposed. The model based sensitivity analysis prevents the time-consuming redesign and reduces the cost of developing ejector. As a result, the customized ejector to meet the desired performance within overall operating range has developed for the PEMFC automotive system.

KEY WORDS : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), ejector(이젝터), cost reduction(비용 감소), design(설계), automotive fuel cell(자동차 연료전지)

기 호

A : 면적, m^2
a : 음속, m/s
C_p : 정압비열, kJ/kg,K
C_v : 정적비열, kJ/kg,K
M : 마하 수
P : 압력, kPa
R : 기체상수, kJ/kg,K
T : 온도, ℃
V : 유체 속도, m/s
$\dot{m}$: 질량 유량, kg/s
γ : 비열비, C_p/C_v

†Corresponding author : wy82lee@kier.re.kr

ω : 순환율

하 첨 자

e : 이젝터 출구
m : 혼합 유동
p : 1차 유동
pl : 노즐 출구
py : 단면 y-y에서의 1차 유동
s : 2차 유동
sy : 단면 y-y에서의 2차 유동
t : 노즐 목
y : 2차 유동의 쵸킹 영역
1 : 노즐 출구
3 : 일정면적부의 출구

1. 서 론

이젝터는 기생전력을 필요로 하지 않고 매우 간단한 기계적 구조를 가지기 때문에 시스템 효율, 운용, 유지 등의 관점에서 자동차 연료전지 재순환 시스템에 이젝터를 사용하는 것은 매우 유용하다. 지금까지는 냉각 시스템, 흡수 시스템 등의 이젝터 설계에 대한 연구가 수행되어 왔다[1-4]. 게다가, 산화물 연료전지(SOFC)에 이젝터를 적용시키는 연구가 진행되고 있다[5-6]. 그러나 자동차 PEMFC에서 이젝터 기술의 적용과 기존의 이젝터 사이에는 많은 차이가 있다.

자동차 PEMFC를 위한 이젝터의 경우에, 순환율의 성능은 연료전지 시스템의 작동 조건에 의존한다. 대표적인 조건들은 다음과 같다. 1) 이젝터의 1차 유동 유량은 자동차 연료전지에서 요구하는 다양한 부하에 따른다. 2) 이젝터의 출구 압력은 PEMFC 스택의 입구압력인 3.00 bara로 해야 한다. 3) 재순환 유동에서 흡입 압력은 스택 내 anode영역의 압력 감소로 2.77 bara 로 떨어져야 한다. 4) 1차 유동과 2차 유동의 온도는 응축기의 작동 온도에 의해 변한다. 그러나 상업용 이젝터는 자동차 PEMFC가 운전하는 동안의 이젝터 성능 필요조건을 만족하지 못한다. 따라서 연료전지 시스템에서 맞춤형 이젝터를 설계하는 것은 필수적이다. 맞춤형 이젝터의 설계와 제어를 위해서 다양한 목 면적과 다중 이젝터를 사용하는 몇몇 연구가 소개되어왔다[7]. 그러나 이러한 방법은 이론적으로 좋은 성능을 보인다고 하더라도 연료 누출, 구조적인 복잡함, 빈번한 장비 오류와 같은 실용적인 한계를 가지고 있다.

이 연구에서는 자동차 PEMFC를 위한 맞춤형 이젝터의 설계와 성능 테스트의 방법론이 제안되었다. 제안된 방법으로 일정한 목과 혼합 영역을 가지는 맞춤형 이젝터는 전체 작동 영역이 아닌 실제 작동 영역에서 이용 가능하다. 이젝터 설계의 주요 목표는 실제 수용 가능한 작동 영역에서 순환율 0.33 이상을 유지하는 것이다. 최적의 맞춤형 이젝터를 얻기 위해서는 실험적인 검증이 매우 중요하다. 다양한 작동 조건을 가지는 경우에 수많은 경험적인 테스트와 평가가 필요하고, 그것들은 매우 많은 시간을 소비하게 되며, 그에 따른 개발 비용도 매우 높아진다. 개발 시간과 비용을 감소시키기 위해서 이젝터의 성능에 주로 영향을 주는 주요 요소(작동 조건)들은 민감도 분석에 의해 확인하게 된다[8]. 그리고 몇몇 경우는 확인된 주요 요소들에서 다른 작동 조건을 기초로 하여 목표로 하는 이젝터가 설계되었다. 최적 설계는 실제 작동 영역 내에서 실험적인 테스트에 의해서 결정된다. 일반적으로, 이젝터와 같은 주변 장치(BOP)들의 실험적인 검증은 실제 스택이 매우 비싸고, 임계점에서 실험하는 동안에 손상을 입을 수 있기 때문에 여전히 몇 가지 문제들이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 이 연구에서는 실험적인 비용을 줄이기 위해 실제 스택을 대신하는 실험 장치를 설계하게 되었다.

2. 설계 방법론

Fig. 1은 제안된 설계 방법론의 절차를 보여준다. 첫 번째 단계에서, 자동차 PEMFC 이젝터의 이론적인 설계 절차는 임계모드 운용에서 1차원 모델을 기초로 제안되었다. 이것은 이론적인 것들

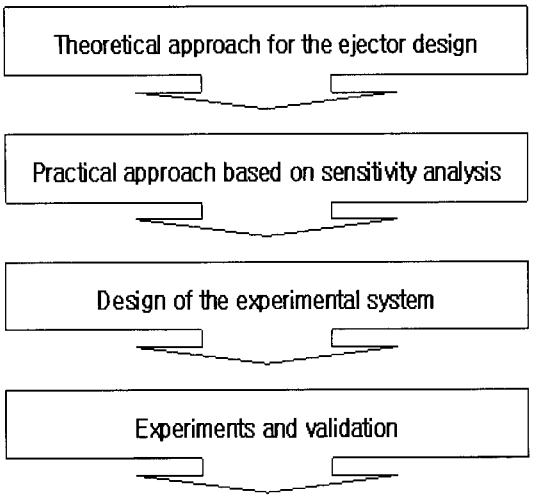

Fig. 1 The procedure of the proposed design methodology

로부터 다른 실제 유체의 거동을 이해하는데 도움이 된다. 주어진 작동 조건에서 노즐 목과 혼합 면적의 최적 설계 값이 결정된다. 두 번째 단계에서, 주요한 요소가 민감도 분석을 기초로 선정되고 각 요소에서 다른 작동 조건을 가지는 다양한 설계가 수행된다. 우리는 주요 요소로 설계 조건을 변화시킴으로써 실제 운전 범위 내에서 가장 수용할 만한 설계 값을 선택한다. 세 번째 단계에서, 실험 장치는 실험 비용과 시간을 줄이도록 설계된다. 연료의 가변 공급, 채널에서의 압력 강하, 스택 입구 압력과 같은 주요 조건을 모사하는 실험 장치는 실제 스택을 대신하여 도입하게 된다. 마지막 단계에서, 최적의 이젝터는 다양하게 설계된 이젝터 중에서 실험적인 이젝터 성능을 근거로 선택하게 되었다.

3. 사례 연구

3.1 이젝터 설계를 위한 이론적 접근

PEMFC 시스템 이젝터의 설계 절차는 임계모드 운용에서 1차원 모델을 기초로 제안된다. B.J. Huang 등은 임계모드에서 1차원 모델을 사용한 냉각 시스템 이젝터의 성능 분석을 수행했다. 그들은 경험적인 계수를 사용하는 1차원 분석이 정확하게 이젝터의 성능을 예측할 수 있음을 보여주었다. 이 논문에서는 몇몇 가정과 함께 그들의 1차원 모델을 사용함으로써, 유체의 거동을 직관적으로 이해하는데 유용하며 이론적인 거동과 이젝터 제조 후에 얻은 실험적인 결과의 차이를 나타낸다. 주요 가정들은 다음과 같고, 다른 것들은 B.J. Huang의 논문을 참조한다. 1) 작동 유체는 일정한 상태량 C_p와 γ를 가지는 이상기체이다. ; 2) 이젝터 내부의 흐름은 정상 상태이고 1차원적이다. 2) 1차와 2차 흡입구의 내부와 디퓨저 출구의 운동에너지는 무시한다. 3) 이젝터의 내부 벽은 단열된다.

Table 1 Ejector design condition

최대 출력 (kW)		40
1차 유동	압력 (bara)	-
	온도 (K)	343
2차 유동	압력 (bara)	2.77
	온도 (K)	323
전체 유량 (SLM)		600
이젝터 출구압력 (bara)		3.00

제안된 설계 절차는 Fig. 2와 같다. 이젝터는 Table 1에 보이는 설계 조건을 만족하고 순환율이 최대인 지점에서 설계되고, 이때 1차 유동과 2차 유동은 초킹된다. 우선 1차 유동의 온도와 2차 유동의 압력은 임의로 초기화된다. 그리고 노즐 목과 일정 면적부의 크기는 1차원 모델에 의해 계산된 이젝터 출구 압력이 대략 설계 값과 같아질 때까지 반복적으로 계산되었다. 그리고 테스트 결과는 실제 실험들과의 차이를 보상하기 위한 손실계수를 결정하기 위해 사용된다.

3.2 이젝터 설계를 위한 실제 접근

이젝터의 설계 조건은 Table 1에 보이는 바와 같이 PEMFC 시스템으로부터 결정된다. 이젝터 출구 압력은 anode 채널에서 효율적으로 물을 관리하기 위해 설계된 스택 입구 압력과 같다. 채널을 통한 최대 압력 강하 값이 0.23 bara이기 때문

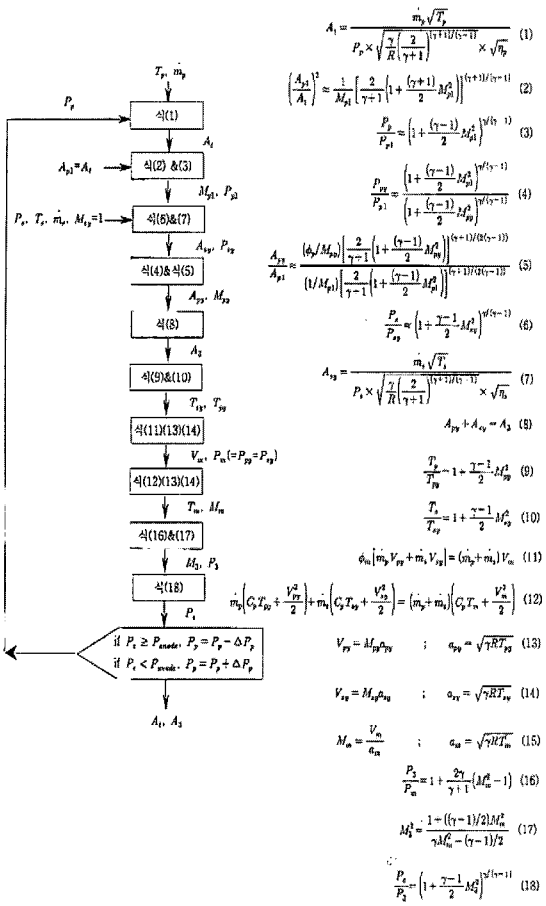

Fig. 2 The proposed design procedure

에 2차 유동의 압력은 2.77 bara 이상이 된 이젝터의 작동 조건은 Table 2에서 보이는 바와 같이 연료전지 시스템의 작동 조건 중의 하나에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 이젝터 성능과 순환율을

Table 2 Changeable operating conditions: PEMFC vs. ejector

번호	PEMFC 운전조건	이젝터 운전조건
1	필요 연료량	1차 유동
2	스택 입구 압력	이젝터 출구 압력
3	채널 내 압력강하	2차 유동 압력
4	연료 예열	1차 유동 온도
5	재순환 연료 냉각	2차 유동 온도

Table 3 Results of the sensitivity analysis

인자		반응 변수 (mm)			
		노즐 목		일정면적 부	
구분	구간	구간	차이	구간	차이
1차 유동 온도 (K)	305-320	1.65-1.68	0.03	2.52-2.55	0.03
1차 유동 유량 (SLM)	60-400	0.70-2.00	1.3	2.1-2.75	0.65
2차 유동 압력 (bara)	2.7-3.0	1.6-1.7	0.1	2.53-2.52	-0.01
2차 유동 온도 (K)	325-340	1.70-1.71	0.01	2.55-2.56	0.01
이젝터 출구 압력 (bara)	2.8-3.1	1.7-1.66	-0.04	2.6-2.55	-0.05

자동차 PEMFC의 작동 조건의 변화에 따라 변하는 경향이 있다. 일정 목과 혼합 영역을 가지는 이젝터는 작동 조건이 바뀔 때 최고의 성능을 유지하는 것이 중요하다. 그러나 이젝터가 항상 최대의 성능을 유지하지는 않는다.

그러므로 실제적으로는 작동 영역 내에서 수용할 만한 성능을 유지하도록 하는 것이 최적의 설계이다.

실질적인 최적의 설계를 결정하기에 앞서 이젝

Table 4 Results of the multiple designs obtained by the change of the major factor

다중 설계	1차 유동 유량 = 300 (SLM)		1차 유동 유량 = 400 (SLM)	
	노즐 목 (mm)	일정면적 부 (mm)	노즐 목 (mm)	일정면적 부 (mm)
2차 유동 압력 = 2.7 (bara)	1.4	2.8	1.8	2.9
2차 유동 압력 = 3.0 (bara)	1.6	2.6	2.0	2.8

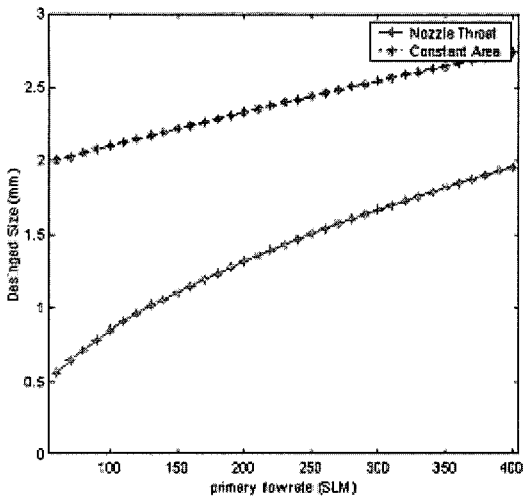

Fig. 3 The results of the sensitivity analysis for the primary flow rate

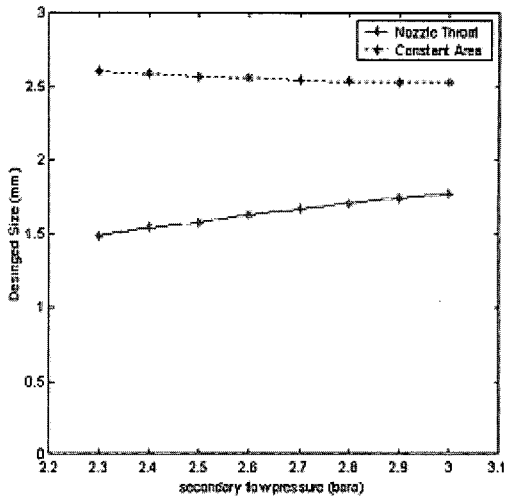

Fig. 4 The results of the sensitivity analysis for the secondary flow pressure

터 성능에 상당히 영향을 주는 주요한 요소들이 민감도 분석에 의해 결정되어야 한다. 즉, 타당한 작동 범위 내에서 이젝터 입력 변수들의 조건을 변화시킴으로써 설계된 목과 혼합 영역의 면적이 계산된다. 민감도 분석의 결과는 Table 3과 같다. 1차 유동 유량과 2차 유동 압력의 검정 통계량은 유의수준 5%의 기각임계치보다 크므로 주요한 요소로 선별되며, 그것들에 의한 목과 혼합면적의 차이는 0.1보다 크다. 두 요소로 인한 민감도 분석의 세부적인 결과는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. 특히, 부하의 변화에 따라 발생하는 1차 유동 유량의 변화는 노즐 목과 혼합 영역의 면적에 큰 영향을 준다. 결과적으로, 4가지 설계 값들을 Table 4에 나타내었다.

3.3 이젝터 성능평가 장치의 설계

Fig. 5는 테스트 장비의 윤곽도를 나타낸다. 붉은 점의 박스들은 다음의 실제 스택의 기능들을 설명한다. 1차 유동의 압력과 유량은 각각 압력 레귤레이터 1과 비례 제어 밸브에 의해서 맞춰진다. 압력 레귤레이터 2는 anode 유동의 압력 강하로 인한 2차 유동 압력을 감소시키는 역할을 한다. 스택 입구 압력은 볼 밸브를 통해 조절된다. 모든 측정과 제어는 상용 제어 프로그램인 Labview™를 사용한다.

제조된 이젝터의 성능을 검증하는 데는 두 가지 방법론이 있다. 그 중 하나는 전력 부하의 실제 범위에서 이젝터 순환율의 수용할 만한 범위를 조사하기 위해 비례제어 밸브를 사용하여 1차 유동 유량을 최대에서 최소량까지 조절하는 것이다. 또 다른 방법은 이젝터 순환율에서 스택 압력 강하의 영향을 조사하기 위해 압력 레귤레이터 2를 사용

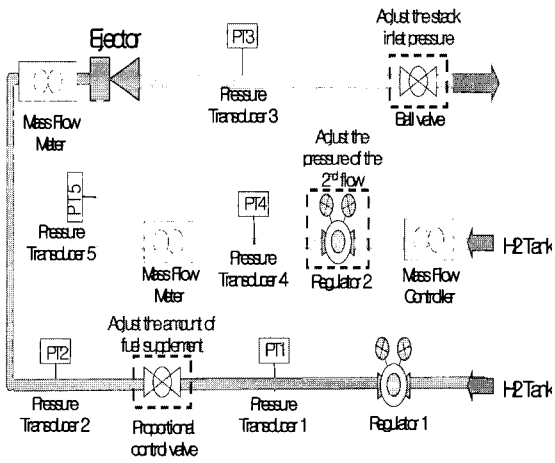

Fig. 5 The outline of the test equipment

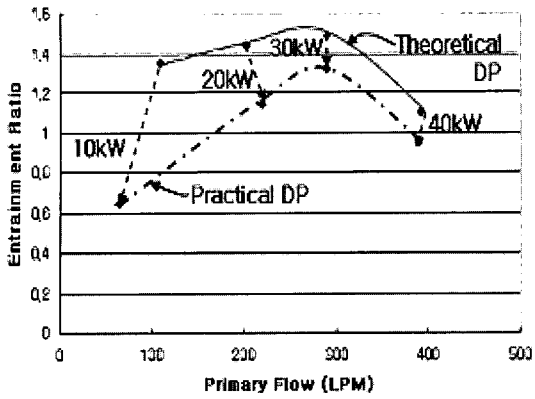

Fig. 6 The result of the load change experiment

하여 스택 입구 압력과 2차 유동의 압력 사이에 압력강하를 두는 것이다.

3.4 실험과 검증

자동차 PEMFC 부하의 변화에 의해 요구되는 전력은 10~40 kW이다. Table 5는 자동차 PEMFC에 의해 요구되는 전력 변화에 의한 실험적인 조건들을 보여준다. 조건들은 다양한 전력 요구에 따른 필요한 수소 유량과 이론적/경험적 압력 강하를 계산하는 것에 의해 결정된다. 이론적인 압력 강하는 anode 채널에서의 단순한 압력 감소만을 의미한다. 반면에 경험적인 압력 강하는 anode 채널과 함께 응축기, 관, 압력 변환기 등을 포함하는 전체적인 압력 강하를 의미한다.

Fig. 6은 부하 변화 실험의 결과를 나타낸다. 순환율의 타당한 범위는 이론적인 압력 강하에서는 1.10에서 1.49이고, 경험적인 압력 강하에서는 0.64에서 1.32이다. 그러므로 제안된 방법론에 의해 설계된 이젝터는 anode 채널에서 압력 강하를 감안한 실제 작동 범위에서 연료 이용률 75%에 해당하는 0.33 이상의 순환율을 보이므로 충분히 이용 가능하다.

4. 결 론

이 논문에서는 PEMFC에 적용되는 연료 재순환 시스템으로서 이젝터를 설계하는 방법론이 제시되었다. 40 kW 자동차 PEMFC 이젝터는 제안된 방법으로 설계되었고, 실제 작동 가능한 전 영역에서 성능이 검증되었다. 제안된 설계 방법론은 고압의 수소/산소 탱크를 이용한 연료전지의 다양한 운전 조건에 맞는 이젝터를 효율적으로 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 5 Experimental conditions of the hydrogen flow rate and pressure drop in anodic channel by changing the required power

전력 (KW)	수소 유량 (SLM)	수소극 이론적 압력강하 (bara)	수소극 경험적 압력강하 (bara)
10	72	0.014	0.059
20	143	0.028	0.113
30	214	0.042	0.150
40	286	0.056	0.230

설계된 이젝터는 다음과 같은 장점이 있다.

1) 연료 재순환 시스템을 작동하기 위한 추가적인 전력이 없으므로 PEMFC 시스템의 성능이 향상된다.
2) 압축기, 송풍기, 펌프 등과 같은 다른 재순환 시스템과 달리 이젝터는 작동과 유지가 쉽다.
3) 민감도 분석에 따른 주요 요소들을 선택함으로써 개발 비용과 시간이 크게 감소된다.

참 고 문 헌

1) E. D. Rogdakis and G. K. Alexis, "Investigation of Ejector Design at Optimum Operating Condition", Energy Conversion & Management, Vol. 41, 2000, pp. 1841-1849.
2) S. K. Chou, P. R. Yang and C. Yap, "Maximum Mass Flow Ratio due to Secondary Flow Choking in an Ejector Refrigeration System", I. J. of Refrigeration, Vol. 24, 2001, pp. 486-499.
3) A. Levy, M. Jelinek and I. Bored, "Numerical Study on the Design Parameters of a Jet Ejector for Absorption Systems", Applied

Energy, Vol. 72, 2002, pp. 467-478.

4) R. Yapici and H. K. Ersoy, "Performance Characteristics of the Ejector Refrigeration System based on the Constant Area Ejector Flow Model", Energy Conversion & Management, Vol. 46, 2005, pp. 3117-3135.
5) F. Marsano, L. Magistri and A. F. Massardo, "Ejector Performance in Fluence on a Solid Oxide Fuel Cell Anodic Recirculation System", J. Power Source, Vol. 129, 2004, pp. 216-228.
6) M. L. Ferrari, A. Traverso, L. Magistri and A. F. Massardo, "Influence of the Anodic Recirculation Transient Behaviour on the SOFC Hybrid System Performance", J. Power Source-press.
7) A. Y. Karnik, "Modeling and Control of an Ejector based Anode Recirculation System for Fuel Cells", Proceedings of FUELCELL2005, May 23-25, 2005, Ypsilanti, Michigan.
8) J. C. Principe, N. R. Euliano and W. C. Lefebvre, "Neural and Adaptive Systems Fundamentals Through Simulations, first ed.", John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 270-273.
9) B. J. Huang, J. M. Chang, C. P. Wang and V. A. Petrenko, "A 1-D Analysis of Ejector Performance, Int.", J. Refrigeration, Vol. 22, 1999, pp. 354-364.