

연료전지 하이브리드 자동차의 고효율 수소 재순환 시스템의 개발

김민진*, 손영준*, 김경연*, 이원용*[†]

*한국에너지기술연구원 연료전지연구단

Development of the Hydrogen Recirculation System for Fuel Cell Hybrid Vehicle

Minjin Kim*, Young-Jun Sohn*, Kyoungyoun Kim*, Won-Yong Lee*[†]

*Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research,
71-2, Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

ABSTRACT

For the hydrogen recirculation system of the PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell), the ejector is useful to improve the efficiency of the fuel cell system. However, conventional ejector does not keep its entrainment ratio good when the various power duties is required by the fuel cell system. In this study, the variable multi-ejector acceptable in the whole duty range required from the fuel cell hybrid mini-bus is developed. Consequently, the performance of the developed ejector is verified by the experiments based on the real operating conditions.

KEY WORDS : fuel cell(연료전지), hydrogen recirculation system(수소 재순환 시스템), fc hybrid vehicle(연료전지 하이브리드 자동차), design(설계), control(제어)

기 호

P : 전기부하, W
 ω : 이젝터 순환율
 $\hat{\omega}$: 이젝터 예측 순환율

하 첨 자

FC : 연료전지
de : 복식 이젝터
est : 모델기반 예측치
me : 실제 측정치
se : 개별 이젝터

[†]Corresponding author : wy82lee@kier.re.kr

1. 서 론

수소의 재순환 시스템은 연료전지 시스템 효율을 향상시키기 위한 중요한 이슈 중 하나이다. 과거에는 펌프나 블로워와 같은 동력을 사용하는 장치를 연료전지의 수소 재순환 시스템으로 활용해 왔다¹⁾. 이들 동력 장치에 비하여 이젝터는 기생전력을 사용하지 않고 기계적 구조가 매우 간단하기 때문에 시스템의 효율 측면에서 매우 유리할 뿐만 아니라 운전 및 유지보수가 매우 간편하다²⁾. 하지만 연료전지 하이브리드 자동차에 적용된 고분자 연료전지 (PEMFC)와 같이 필요로 하는 전기 부하가 크고 주행 패턴에 따라 전기 부하가 수시로 변하는 경우 이젝터의 적용이 그리 간단하지는 않다. 이럴 경우 고정노즐 이젝터를 수소재순환시스템에 활용하면 사용가능한 운전 영역이 전기 부하 변동 영역에 비해 좁다는 단점을 보인다. 왜냐하면 고정노즐 이젝터는 설계점을 중심으로 전기부하가 변하면 순환율이 떨어지기 때문이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 가변노즐 이젝터 또는 동력 장치와의 하이브리드 재순환시스템 등이 제안되었다³⁻⁵⁾. 그러나 이들 제안에도 누수, 기계적 복잡성, 기생전력 사용, 잦은 설비 오작동 등의 실질적 한계가 여전히 존재한다.

본 연구에서는 2개의 고정노즐 이젝터와 하나의 밸브로 구성된 가변적 복식 이젝터를 제안한다. 제안된 이젝터는 실제 연료전지 하이브리드 자동차의 전기 부하 변동 영역에서 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 제안된 가변적 복식 이젝터의 성능은 정해진 전기 부하의 전 영역에서 사용가능한 것으로 검증되었다.

2. 가변적 복식 이젝터

Fig. 1은 연료전지 미니버스 시스템에 고정노즐 이젝터를 적용하여 실험으로 얻어낸 데이터로서, 연료전지 전기부하 변동에 따른 고정노즐 이젝터의 순환율을 나타낸다. 이결과를 통해 고정노즐 이

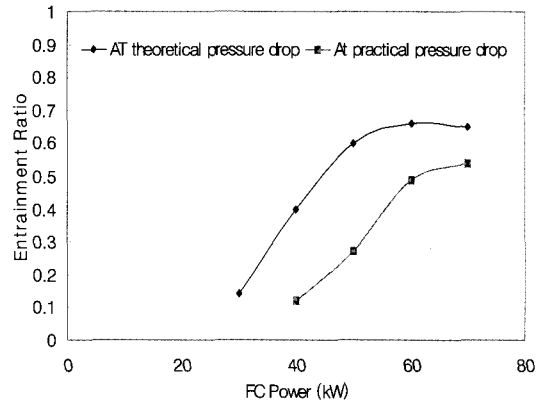


Fig. 1 Experimental entrainment ratio of the constant nozzle ejector by changing the required fuel cell power

젝터는 실제 값에서 최고의 순환율을 보이지만 연료전지 부하가 변동함에 따라 그 성능을 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 때문에 하나의 단일 고정노즐 이젝터를 미니버스와 같이 대용량 연료전지에 적용하면 이젝터의 순환율이 부족한 운전 영역이 생기게 되어, 순환율이 부족한 부분을 보충할 대안이 필요하게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 가변적 복식 이젝터를 제안한다. 가변적 복식 이젝터는 Fig. 2에서와 같이 2개의 이젝터와 하나의 on/off 밸브로 구성된다. 2개의 이젝터는 대상 연료전지 미니버스 시스템의 총 연료전지 부하의 절반씩을 각각 감당하도록 설계하였다. 연료전지의 높은 부하 운전영역에서는 연료전지의 요구 부하에 따라 연료가 공급되고 on/off 밸브를 열어 공급된 연료를 2개의 이젝터 1차 유동으로 각각 분리되어 공급된다. 이로 인해 2개의 이젝터가 발생시키는 흡입력에 의해 연료전지 스택 후단의 미사용 연료는 순환하게 된다. 반면 연료전지의 낮은 부하 운전영역에서는 on/off 밸브를 닫아 2개의 이젝터 중 하나만을 선별적으로 사용하게 된다. 가변적 복식 이젝터는 이와 같은 작동을 통해 누설의 문제를 피하면서 부하에 따라 노즐을 변동시켜주는 가변노즐 이젝터를 적용한 효과를 발휘한다. 결

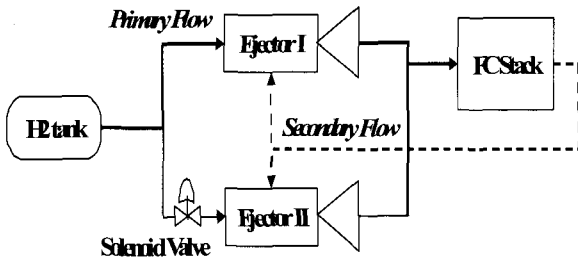


Fig. 2 Construction of the proposed variable multi-ejector

국 연료전지 미니버스에 적합한 가변적 복식 이젝터를 개발하였고 이는 이젝터가 감당할 수 있는 유효 운전 구간을 극대화시켜주는 것은 물론, 시스템의 복잡도와 기생전력은 최소화시켜준다.

가변적 복식 이젝터의 개발 단계는 다음과 같다. 첫째, 각 개별 이젝터는 대상 연료전지 용량 절반의 60%에 맞춰 설계한다. 둘째, 설계 결과에 의해 제작된 이젝터를 대상으로 부하변동에 따른 연료 유량 변동과 스택에 의한 차압을 고려하여 성능평가를 수행한다. 셋째, 개별 이젝터의 성능평가 결과를 바탕으로 연료전지 부하와 이젝터 순환을 사이의 이젝터 성능 예측 모델을 구축한다. 넷째, 성능 예측 모델을 기반으로 on/off 밸브의 동작을 포함한 가변적 복식 이젝터의 실시간 제어 로직을 개발한다. 각 단계의 상세 내용은 다음과 같다.

2.1 개별 이젝터 설계

먼저, 개별 이젝터 설계 조건은 대상 연료전지 시스템의 운전조건을 기반으로 정해진다⁶⁻⁷⁾. 또한 주어진 이젝터의 설계 조건으로부터 이젝터 1, 2차 유동의 압력, 온도, 유량 등이 정해진다. 정해진 이젝터 운전조건에 의해 이젝터의 출구 압력이 계산되고 이 값이 요구 설계 값과 특정 신뢰성 내에서 일치할 때까지 반복적으로 계산한다. 그리고 이 때 결정된 이젝터 출구 압력과 이젝터 1차 유동의 압력간의 상관관계가 유효할 때까지 이젝터 2차 유동의 마하수를 변화시켜가며 다시 반복 계산을 수행한다. 이들 두 가지 조건을 모두

Table 1 Single ejector design condition

| Name | Unit | Value |
|----------------------------------|------|-------|
| Mini-bus Fuel Cell Maximum Power | kW | 50 |
| Primary Flow Pressure | bara | 1~4 |
| Primary Flow Temperature | K | 288 |
| Secondary Flow Pressure | bara | 1.26 |
| Secondary Flow Temperature | K | 343 |
| Hydrogen Stoichiometry | - | 1.5 |
| Total Hydrogen Flow Rate | SLPM | 420 |
| Ejector Exit Pressure | bara | 1.3 |

만족할 때의 이젝터 노즐 목 직경과 혼합부의 직경이 최종적으로 원하는 이젝터 설계 조건이 된다. 개별 이젝터의 보다 자세한 설계 방법은 (7)을 참고한다.

대상 연료전지 미니버스 시스템으로부터 구해진 이젝터의 설계 조건은 Table 1에서 볼 수 있다. 이를 기반으로 수행한 개별 이젝터의 설계결과를 이젝터 노즐 목 직경이 1.5 mm, 혼합부 직경이 4.1 mm이다.

2.2 개별 이젝터 성능 평가

대상 연료전지 미니버스 시스템의 전기 부하는 10 - 50 kW까지 변한다. Table 2는 이와 같은 전기 부하의 변화에 따른 실험 조건을 보여준다. 대상 시스템은 2개의 개별 이젝터를 사용하므로 하나의 이젝터 실험 조건은 전체 부하의 절반인 5 - 25 kW까지 변화도록 결정하였다. 이들 실험 조건은 요구되는 부하 변동에 따른 수소의 유량 변화에 대하여 발생하는 연료전지 스택 내에서의 이론적, 실제적 차압을 계산한 결과이다. 이론적 차압은 단지 연료전지 스택의 수소극 채널에 의한 마찰손실만을 고려한 것이고 실제적 차압은 이론적 차압에 응축기, 배관, 압력계 등의 시스템에 존재하는 부수적 영향도 함께 반영하여 계산된 것이다. 각 부하별 실험 조건에 대하여 개별 이젝터의 순환율을 조사하였다.

Table 2 Experimental Conditions of the Hydrogen Flow Rate and Pressure Drop in Anodic Channel by Changing the Required Power

| Power (kW) | Hydrogen Flow Rate (SLPM) | Theoretical Pressure Drop (bara) | Practical Pressure Drop (bara) |
|------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 5 | 135 | 0.010 | 0.015 |
| 10 | 285 | 0.020 | 0.030 |
| 15 | 420 | 0.030 | 0.045 |
| 20 | 570 | 0.040 | 0.060 |
| 25 | 705 | 0.050 | 0.075 |

부하변동에 따른 개별 이젝터의 성능은 Fig. 3 과 같다. 연료전지 수소 이용률의 설계 값은 50% 이므로 이젝터의 순환율은 0.5 이상이어야 한다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 제안된 방법론에 의해 설계된 이젝터의 순환율은 실제적 차압을 감안하여 0.61에서 1.07 사이 값을 나타낸다. 그러므로 제안된 개별 이젝터는 대상 시스템의 운전영역 내에서 그 성능이 유효함을 알 수 있다.

2.3 이젝터 성능 예측 모델

Fig. 4와 같이 일반적인 고정 노즐 이젝터의 순환율은 그의 설계 값에서 최고의 값을 갖고 그의 운전영역에서는 서서히 감소하는 특징을 보인다. 그러므로 이젝터의 순환율 예측 모델은 2차 함수를 기반으로 구성하였다. 대상 모델은 실험데이터를 기반으로 최소자승법을 이용하여 구성되었다. Fig. 4는 개별 이젝터와 멀티 이젝터를 대상으로 연료전지 전기 부하 변동 시 이젝터의 순환율에 대한 실험데이터를 보여준다. 그리고 이 데이터를 기반으로 구성된 이젝터 순환율 예측 모델을 함께 나타낸다. 이들 예측 모델은 각각 91%, 92%의 높은 정확도를 가지며 아래 Eq. 1, 2는 그 예측 모델의 수식이다.

$$\widehat{\omega}_{se} = -0.0026P_{FC}^2 + 0.0907P_{FC} + 0.2693 \quad (1)$$

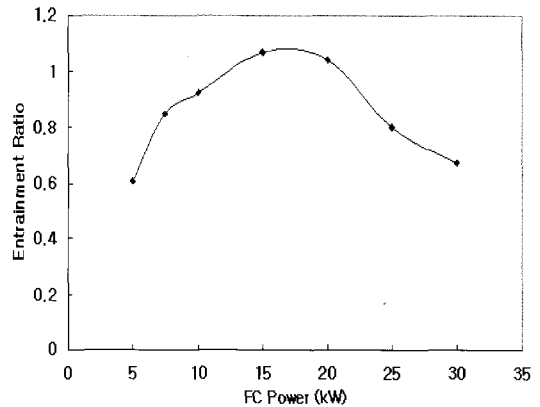


Fig. 3 Experimental entrainment ratio of the single ejector by changing the required fuel cell power

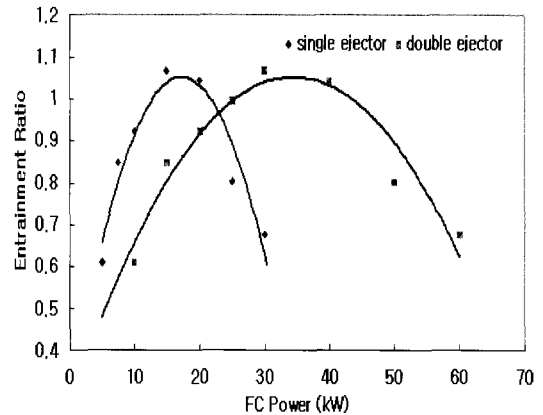


Fig. 4 Experimental entrainment ratio of the single and double ejector by changing the required fuel cell power and their estimation models

$$\widehat{\omega}_{de} = -0.0007P_{FC}^2 + 0.0454P_{FC} + 0.2688 \quad (2)$$

2.4 가변적 복식 이젝터의 제어

가변적 복식 이젝터를 제어하기 위해서는 연료전지의 요구 전기 부하의 변화에 따라 실시간으로 운전모드를 선택하는 것이 필수이다. 운전모드는 개별 이젝터 하나를 작동하는 개별모드와 2개의 이젝터를 동시에 작동하는 복식모드로 구분된다. Fig. 5는 가변적 복식 이젝터의 제어알고리즘을 보여준다.

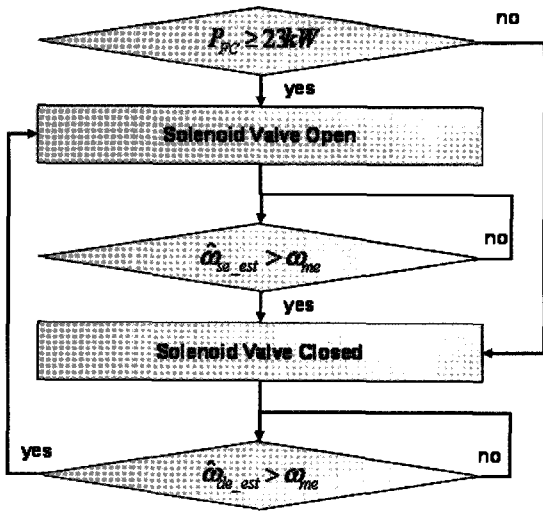


Fig. 5 Control procedure of the variable multi-ejector

먼저, 연료전지 운전 전기 부하가 23kW를 기준으로 그 이하 이면 개별 모드로, 그 이상이면 복식모드로 운전을 시작한다. 여기서 23kW는 개별 이젝터와 복식 이젝터의 성능이 교차하는 지점으로 대상 시스템의 실험에 의해 결정된 값이다. 이는 대상시스템에 따라 그 값을 실험에 의해 결정해주어야 한다. 연료전지가 운전되는 동안 이젝터의 실제 순환율을 지속적으로 측정한다. 이젝터 순환율의 측정치와 현재 부하에서의 이젝터 순환율 예측치를 실시간으로 비교하여 측정치가 예측치보다 낮으면 운전 모드를 전환한다. 운전 모드의 전환은 on/off 밸브의 개폐로 조절된다.

3. 결과 및 토의

Fig. 6은 제안된 가변적 복식 이젝터를 실제 연료전지 미니버스에 적용하여 얻은 실험 결과이다. 미니버스를 연료전지 스택의 실제 전기 부하는 10kW에서 50kW사이가 된다. 수소의 이용률이 50%이므로 전 운전 구간에서 이젝터가 만족시켜야 할 최소 순환율은 0.5가 된다. 실험은 이론적 차압과 실제적 차압의 두 가지 조건을 기반으로 수행되었다. 이론적 차압 적용 시 가변적 복식 이젝터의 순환율은 최소 0.72를, 실제적 차압 적용 시

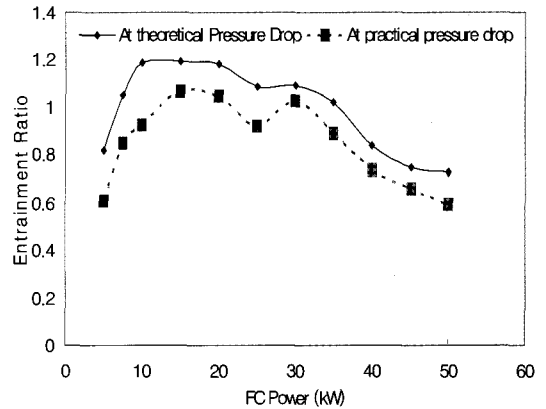


Fig. 6 Experimental entrainment ratio of the proposed variable multi-ejector by changing the required fuel cell power

가변적 복식 이젝터의 순환율은 최소 0.61을 보였다. 이는 전 운전영역에서 제안된 이젝터가 그 성능 기준을 만족함을 의미한다. 결국, 아무런 동력 사용 장치의 도움 없이 기생전력을 사용하지 않는 이젝터만으로 구성된 가변적 복식 이젝터는 연료전지 미니버스의 수소 재순환 시스템으로 채택하였다.

4. 결론

이 논문에서는 연료전지 미니버스의 미사용 수소를 재순환시키기 위한 가변적 복식 이젝터를 제안하였다. 제안된 방법론에 의해 제작된 이젝터는 실제 미니버스의 전 운전영역에서 그 성능이 유효한 것으로 검증되었다. 제안된 이젝터는 연료전지 미니버스의 전기 부하가 변하는 동안 아무런 기생 전력도 사용하지 않고 수소 재순환의 역할을 수행하였다. 제안된 이젝터는 기생전력을 소모하지 않아 전체 시스템의 효율을 향상시키는데 도움이 되는 장점 이외에도 장치의 복잡도가 높지 않아 누설 문제가 없고 운전과 유지보수가 용이하다는 장점도 함께 가진다. 제안된 설계 방법론은 연료전지 미니버스 이외에도 고분자연료전지를 기반으로 한 대용량 수송용 연료전지 시스템 전반에 걸쳐 적용 가능한 기술이며, 본 연구에서 다루었다 수소는 물

론 고압 탱크를 이용해 순수 산소를 연료로 사용하는 이동용 장치의 경우에도 확장성이 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 교육과학부의 후원으로 이뤄졌다.

참 고 문 헌

- 1) P. Rodatz, A. Tsukada, M. Mladek, and L. Guzzella, Proceedings of the 15th IFAC Triennial World Congress, IFAC, (2002).
- 2) M. Kim, D.-H. Kim, S.-P. Yu, W.-Y. Lee, C.-S. Kim, Trans. of the Korea Hydrogen and New Energy Society, Vol. 17, No. 3, 2006, pp. 279-285
- 3) F. Marsano, L. Magistri, and A.F. Massardo, J. Power Source, Vol. 129, 2004, pp. 216-228
- 4) M.L. Ferrari, A. Traverso, L. Magistri, A.F. Massardo, J. Power Source, Vol. 149, 2005, p. 22
- 5) A.Y. Karnik, Proceedings of FUELCELL2005, Ypsilanti, Michigan, (2005).
- 6) B.J. Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, V.A. Petrenko, Int. J. Refrigeration, Vol. 22, 1999, p. 354
- 7) M. Kim, Y.-J. Sohn, C.-W. Cho, W.-Y. Lee, C.-S. Kim, J. Power Source, Vol. 176, 2008, p. 529