

마이크로 연료전지용 강제 호흡형 공기 공급 모듈에 관한 연구

*황준영¹⁾, 윤효진²⁾, 이상호²⁾, 강희석²⁾, 강경태²⁾

A Study on Forced Aspirating Air Supplying Module for Micro Fuel Cell

*Jun Young Hwang, Hyo Jin Yun, Sang-Ho Lee, Heui-Seok Kang, Kyuntae Kang

Key words : Micro Fuel Cell(마이크로 연료전지), Air Supplying Module(공기 공급 모듈), Forced Aspiration (강제호흡), Linear Actuator(선형 모터)

Abstract : The present study conducts a series of experiments to develop a novel air supplying module for a micro fuel cell using piezoelectric linear actuator. An intermittently and operating air breathing module with reciprocating motion of the linear actuator has been suggested in the present study. A test bench for a micro fuel cell system has been constructed to estimate performance of the active fuel cell system using the air supplying module. With the stroke and operating duty as main control parameters, the optimal operating method of the air supplying module has been discussed.

Nomenclature

A : moving area, m^2
 ΔL : reciprocal stroke, m
 Q_{air} : air supplying rate, m^3/s
 u : moving speed, m/s
 η : moving duty
 τ : reciprocal period, s
 τ_o : waiting time, s

1. 서 론

주로 모바일 전자제품의 전원 등으로 사용되는 소형 연료전지에 있어서, 공기 공급장치에 요구되는 조건은 매우 까다롭다. 첫째, 유량대비 소비전력이 작아야 한다. 공기를 공급함으로써 증가되는 연료전지 출력에 비하여 소비전력이 충분히 작아야 전력 이득을 기대할 수 있기 때문이다.¹⁾

둘째, 공기 공급 압력이 변화해도 정량의 유량을 공급할 수 있어야 한다. 공기 공급 유로는 생성되는 물로 인한 유로 단면 변화, 유로 막힘 등의 현상이 발생한다. 이처럼 생성되는 물이 유로 내 공기 흐름에 영향을 주게 되면, 압력 손실이 크게 증가하게 되며, 이로 인하여 유로 압력 손실 계수가 연료전지 출력 또는 물 생성량에 따라서 변화할 뿐만 아니라, 운전 중에 불규칙하게 변화하기도 한다.^{1,2)} 그러므로 공기 공급 장치는 상대적으로

커다란 토출 압력에서도 기능을 발휘해야 하는 동시에, 토출 압력이 큰 폭으로 변화하는 상황에서도 정량을 공급할 수 있는 수단을 확보하고 있어야 한다.

셋째, 공기 공급 유량에 대한 운전 범위가 넓어야 한다. 연료전지에 필요한 공기 공급량은 연료전지 출력에 따라 변화한다. 효율적인 운전을 위하여, 필요한 공기 공급량에 맞추어 공급량을 조절할 필요가 있다.³⁾ 따라서, 광범위한 유량 범위에서 동작이 가능해야 하며, 유량을 용이하게 제어할 수 있어야 한다. 결국, 앞서 살펴본 요구조건들과 결합하여 생각하면, 광범위한 압력 및 유량 범위에서 최소한의 전력소모로 정밀하게 운전할 수 있는 공기 공급 장치가 필요하다는 말로 압축할 수 있는데, 이는 어쩌면 영원히 만족할 수 없는 제품을 기대하고 있다는 말로 바꾸어 말할 수 있을 것이다.

그밖에, 경제성과 내구성 및 신뢰성이 커야 할 것이다. 공기 공급 장치는 능동형 연료전지 시스템의 핵심 부품이다. 가격적인 면에서도 전체 시스템 비용의 커다란 부분을 차지하는 부품일 뿐만 아니라, 능동형 시스템에서 공기 공급 장치의 기능이 정지하면, 시스템 전체의 기능이 정지하게 되는 고신뢰성이 요구되는 부품이다.

1) 한국생산기술연구원 마이크로시스템팀
E-mail : jyhwang@kitech.re.kr
Tel : (041)589-8424 Fax : (041)589-8400
2) 한국생산기술연구원 마이크로시스템팀
E-mail : jyhwang@kitech.re.kr
Tel : (041)589-8424 Fax : (041)589-8400

아쉽게도, 지금까지 살펴본 까다로운 요구조건을 모두 만족시킬 만한 소형 공기 공급 장치에 최적화된 구동 방식을 제시한 모델이나 연구결과가 발표되지 않고 있다. 이는 액체 연료용 공급 장치에 적용할 수 있는 다양한 구조와 구동 방식의 마이크로 펌프가 제안된 것과 비교할 때 매우 대조적이다. 이러한 현황은, 기존의 회전 운동에 기반한 컴프레서나 블로워가 소형화됨에 따라 발생하는 효율 감소 문제를 해결할 수 있는 신개념의 기체 공급 방식을 개발하는 것에 대한 기술적 중요성을 강조하고 있다.

본 연구에서는 압전 방식의 선형 액추에이터를 이용하여 새로운 개념의 마이크로 연료전지용 공기 공급 모듈을 개발하는 것을 목적으로 일련의 연구를 수행하였다. 선형 액추에이터의 왕복 운동을 이용하여, 들숨-날숨 방식의 간헐적인 공기 공급 모듈을 제안하였으며, 상기 공급 모듈을 이용한 강제 흡배기 방식의 능동형 마이크로 연료전지 시스템을 구성하고 성능시험 수행함으로써, 수동형 시스템 대비 성능 개선 효과를 평가하고 및 최적 운전 조건 도출하기 위한 방안을 제시하였다.

2. 실험

2.1 공기 공급모듈

본 연구에서 고안한 강제 호흡형 공기 공급 장치의 구조와 작동원리는 매우 간단하다. Figure 1은 강제 호흡형 공기 공급 장치의 구조를 나타낸 개념도이다. 연료전지를 둘러싼 하우징의 한쪽 면에 통기 구멍(Vent)을 설치하고 반대쪽 면에 신축성이 있는 유연한 멤브레인 벽을 설치한다. 하우징에 고정된 지지대에 피스톤 모양의 구조물과 일체화된 선형 액추에이터가 설치되어 왕복 운동을 하도록 설계되었으며, 여기서 피스톤 헤드에 해당하는 부분은 멤브레인에 부착되어 있다.

Figure 2는 강제 호흡형 공기 공급 장치의 작동 원리를 설명하기 위한 그림이다. Figure 2(a)와 같이 액추에이터가 우측 또는 멤브레인측으로 이동하면 통기구멍을 통하여 증가되는 하우징의 체적만큼 외기가 유입된다. 반대로 Figure 2(b)와 같이 액추에이터가 좌측 또는 멤브레인의 반대측으로 이동하면 다시 변화되는 하우징의 체적만큼 내부의 공기가 통기구를 통하여 외기로 배출된다. 이때 액추에이터의 왕복 주기와 스트로크로 단위 시간에 유입 및 배출되는 공기의 양을 조절할 수 있다.

이처럼, 인간의 호흡법과 동일한 원리로 작동되는 강제 호흡형 공기 공급 모듈은 밸브를 사용하지 않으므로 가장 간단한 구조로 공기 공급 기능을 구현할 수 있으며, 1 Hz 이하의 낮은 주파수로 피스톤의 왕복운동이 이루어지므로, 소음이나 내구성 측면에서 유리하다. 또한 구동 주기와 구동 스트로크를 변화시킴으로써 별도의 전력 제어 없이 손쉽게 공급 유량을 제어할 수 있다. 뿐만 아니라, 체적 변화 방식의 정량 공급 방식이므로, 압력 변동에 따른 유량 변화를 최소화할 수 있다.

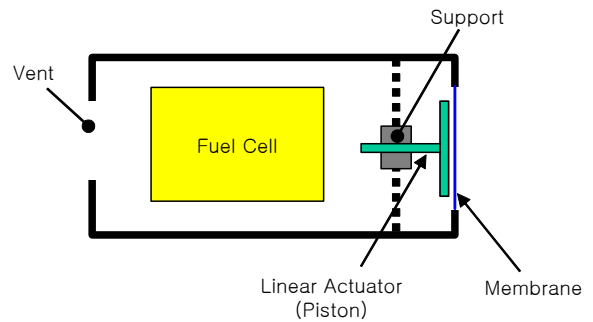
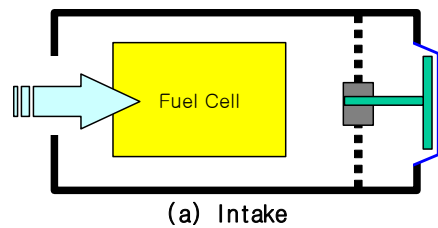
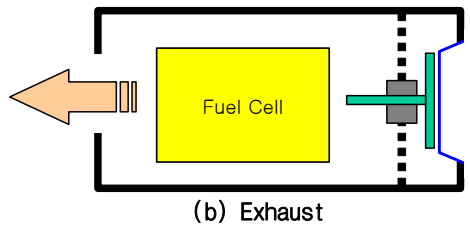


Fig. 1 A schematic of an active fuel cell with forced aspiration module.



(a) Intake



(b) Exhaust

Fig. 2 Operating principle of forced aspiration module.

모듈 구성에 사용된 Piezoelectric 방식 선형 액추에이터의 구조 및 작동 원리는 Figure 3에 보인 바와 같다.⁴⁾ 탄성판의 양면에 압전층이 부착되어 있고 그중 한 면에는 다시 구동축이 부착되어 있다. 양면의 압전층에 순차적으로 전압을 가하여 탄성판의 수직방향 변형을 유발한다. 이때 구동축 부착면 방향(상방향)으로의 변형과 반대 방향(하방향) 변형의 동특성이 서로 차이가 나도록 제어함으로써, 구동부의 관성력과 구동축을 지지하고 있는 지지부의 마찰력의 차이를 통하여 방향성을 갖는 운동을 구현한다.

본 연구에서는 Piezoelectric Technology사에서 개발한 선형 액추에이터인 TULA50-165 모델을 사용하였다. TULA50 계열의 경우, 구동주파수는 65 ~ 75 kHz, 구동 전압은 15 ~ 40 V이며, 구동시 소비전력은 피에저 구동 전압과 듀티에 따라 다르나, 최대 400 mW 이하이다.

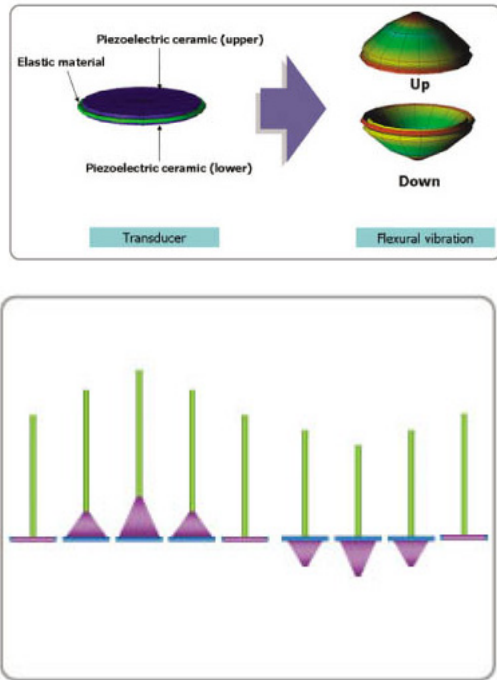


Fig. 3 Operating principle of a piezoelectric linear actuator. ⁴⁾

2.2 실험 장치 및 방법

연료 및 공기 공급량에 따른 능동형 DMFC의 출력을 측정함으로써, 능동형 시스템의 성능을 평가하기 위한 실험 장치를 구성하였으며, 이를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4에 나타낸 바와 같이 실험 장치는 연료전지 모듈, 연료 공급 모듈, 공기 공급 모듈, 온도 측정 장치 및 전력 측정기로 구성된다.

연료 공급 장치로서는 Scientific Systems Inc. 사의 크로마토그래피용 마이크로 정량펌프인 Series III 펌프를 사용하였으며, 이를 이용하여 0.5 ~ 2.0 M 농도의 메탄올 수용액을 연료로서 정량 공급하였다. 배출되는 메탄올 수용액은 가스 샘플링 백을 이용하여 수거하였다.

공기 공급 모듈은 필요에 따라 모두 3 가지 방식을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 공기 공급 장치 이외에, 공기량에 따른 연료전지 성능변화를 알아보기 위하여 압축 공기와 MFC로 구성된 정량 공급 모듈을 사용하였으며, 공기 공급 장치의 상대적인 성능을 비교하기 위하여 마이크로 웬 (D1804, Activa Inc)을 이용한 공기 공급 장치를 추가로 구성하여 시험하였다.

연료전지는 2 W 급 준능동형 DMFC (ADM-10, Antig)를 사용하였으며, DMFC 모듈 표면의 온도를 측정하기 위하여 RTD 센서를 부착하였다. 연료전지의 출력을 측정하기 위하여 프로그래밍이 가능한 다기능 전기 부하 (PLZ 164WA, Kikusui) 를 사용하였으며, 정전류 모드 하에서 출력 전압을 측정하고 이로부터 출력을 산출하였다. 온도와 출력 전압은 고속 데이터 측정기 (2645A, Fluke) 를 사용하여 10 Hz의 측정 속도로 PC에 저장하였다.

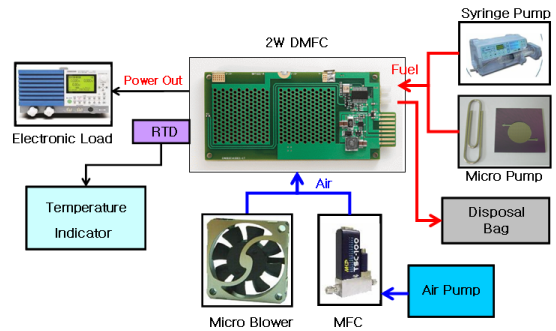


Fig. 4 Experimental apparatus for evaluation of an active DMFC system.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 새로운 개념의 강제 호흡형 공기 장치를 고안하였다. 성형 액추에이터를 이용하여 하우징의 내적을 변화시킴으로써 동일한 통기구통을 통하여 외기를 흡입한 후 배출하는 방식으로 연료전지에 주기적으로 공기를 공급하였다. 이때, 연료전지에 공급되는 평균 공기 유량은 구동 듀티 h_{mv} 와 왕복 행정길이 DL 및 선형 구동 속도 u 의 함수로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{Q}_{air} = \eta_{mv} \left(1 - \frac{V_o}{\Delta LA} \right) \frac{Au}{2} \quad (1)$$

여기서, 구동 듀티 h_{mv} 는 구동주기 t 에서 구동 대기시간 t_o 을 뺀 실제 구동 시간이 차지하는 비율로서 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{mv} = \frac{\tau - \tau_o}{\tau} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_o u}{2\Delta L}} \quad (2)$$

윗 식으로부터, 동일한 속도 u 로 구동되는 선형 액추에이터를 이용한 공기 공급 장치의 제어 인자는 구동 대기시간과 왕복 행정길이임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 구동 제어 인자에 대한 연료전지 출력 성능 특성을 알아보기 위한 일련의 실험을 수행하였다. 각 실험 시, 앞선 실험 조건들과 마찬가지로, 연료는 2 M 농도의 메탄올을 0.5 sccm 의 유량으로 공급하였으며, 부하는 5 Ω 이다.

Figure 5 는 구동 대기시간 없이 지속적인 흡입과 배출을 반복하였을 때 ($\tau_o=0$), 서로 다른 왕복 행정길이에 대하여 연료전지 출력 및 성능계수를 나타내었다. 그림에서, 4.0 mm 이하의 상대적으로 작은 행정길이에서는 행정길이 증가에 따라 연료전지 출력 증가가 급격히 증가하는 반면, 상대적으로 큰 행정길이에서는 출력 증가율이 점점 완만해짐을 알 수 있다. 이는 구동 듀티 η_{mv} 가 일정하더라도 행정길이가 작을 경우, 실효 공기 공급율이 감소하는 식 (1)의 관계에 기인한다. 즉, 단위 행정 당 유입량이 작으면 공기가 하우징 내부

깊숙이 도달하지 못하고, 따라서 연료전지 셀 표면에 충분히 공급되지 못하기 때문이다.

한편, 행정길이가 변화하여도 장치의 구동 전력 소모는 일정하므로, 연료전지 출력이 증가하면 성능계수도 역시 증가한다. 그러나 행정길이가 어느 이상 증가하면 출력 증가는 줄어드는 반면, 출력 변동은 늘어나므로, 적적할 행정길이로써 공기 공급 장치를 운전하는 것이 바람직할 것이다.

왕복 행정길이 ΔL 가 일정한 경우, 식 (1)으로부터, 공기 공급율은 구동 대기시간 t_0 또는 구동 듀티 η_{mv} 의 함수임을 알 수 있다. Figure 6은 7.5 mm의 동일한 행정길이로써 운전되는 공기 공급 장치에 대하여 구동 듀티를 바꾸었을 때의 연료전지 출력 특성을 나타낸다.

구동 듀티를 40% 까지 줄였으나, 연속적으로 구동하였을 경우($\eta_{mv} = 100\%$)에 비하여 약 10% 정도의 출력 감소만 발생함을 알 수 있다. 구동 듀티를 더욱 줄이면 공기 공급량의 절대적인 부족 현상으로 연료전지 출력이 급격히 감소하기 시작한다. 반면에, 구동장치 소비전력은 구동 듀티에 비례하기 때문에, COP는 구동 듀티가 40%로 감소할때까지 지속적으로 증가한다. 이러한 결과를 종합하면, 요구되는 연료전지 출력에 따라서 최적의 구동 듀티로 운전함으로써, 시스템을 효율적으로 운전할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압전 구동방식의 마이크로 선형 액추에이터를 이용하여, 밸브가 필요 없는 왕복 구동 방식의 강제 호흡형 공기 공급장치를 개발하였으며, 이를 소형 DMFC 시스템에 적용하여 그 운전 특성 및 연료전지 출력성능 특성을 알아보기 위한 일련의 실험을 수행하였다. 운전 변수와 공기공급량의 관계식을 정립하였으며, 이를 이용하여 공급장치의 제어 변수에 대한 연료전지 응답특성을 예측하고 실험 결과 해석에 활용하였다.

공기 공급장치의 행정길이와 구동 듀티 변화에 따른 연료전지 출력 특성을 살펴보았다. 행정길이가 증가할수록 연료전지 출력과 성능계수가 증가하는 경향을 확인하였다. 그러나 행정길이가 어느 이상 증가하면 출력 증가율은 점차 줄어드는 반면, 주기적인 출력 변동은 늘어나므로, 적적할 행정길이로써 공기 공급 장치를 운전하는 것이 바람직함을 알 수 있었다. 구동 듀티와 관련하여서는, 구동 듀티를 감소시킬수록 연료전지 출력이 감소하는 반면, 시스템 성능계수는 증가함을 알 수 있었다. 또한, 상대적으로 충분한 공기공급이 이루어지고 있는 상태에서는 구동 듀티가 증가하여도 연료전지 출력 증가가 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 요구되는 연료전지 출력에 따라서 최적의 구동 듀티와 행정길이로 공기 공급장치를 운전함으로써, 시스템의 효율성을 높일 수 있는 방안을 제시하였다.

후기

본 연구는 지식경제부의 신재생에너지기술개발사업 중 “모바일기기용 마이크로 연료전지 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

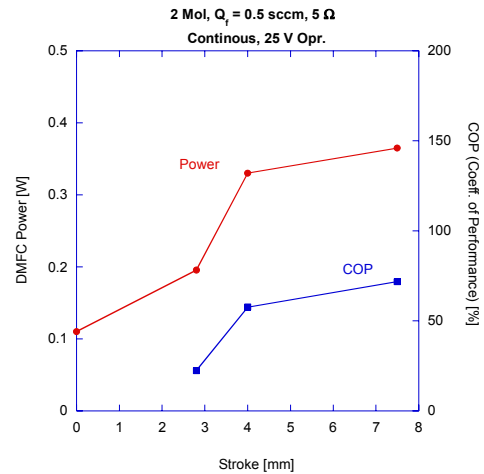


Fig. 4 Power output and COP of the forced aspirating fuel cell system as a function of moving stroke.

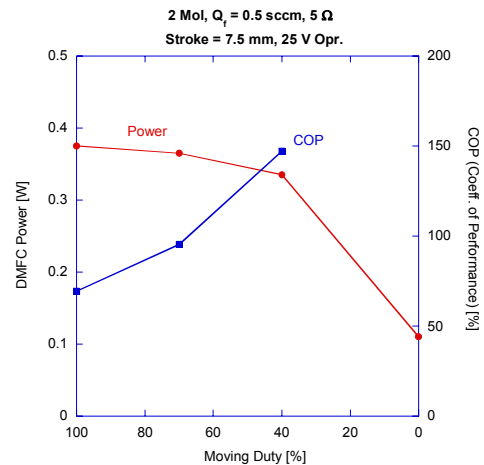


Fig. 4 Power output and COP of the forced aspirating fuel cell system as a function of moving duty.

References

- [1] Wang, Y. Basu, S., Wang, C., "Modeling two-phase flow in PEM fuel cell channels," J. of Power Source, Vol. 179, pp. 603-617, 2008.
- [2] Blunier, B., Miraoui, A., "Optimization and air supply management of a polymer electrolyte fuel cell," Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference
- [3] Larminie, J., Dicks, A., 2003, "Fuel Cell Systems Explained; Second Edition," John Wiley & Sons.
- [4] <http://www.piezo-tech.com>