

# 휴대용 고분자전해질막 연료전지의 산화제 공급을 위한 전기침투 현상 기반의 공기펌프의 개발

권길성\* · 김대중\*†

\* 서강대학교 기계공학과

## Air Pumps for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells

Kilsung Kwon\* and Daejoong Kim\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received January 7, 2010 ; Revised June 1, 2010 ; Accepted June 4, 2010)

**Key Words :** Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells(고분자전해질막 연료전지), Electroosmosis-Based Air Pump(전기침투현상 기반 공기펌프)

**초록 :** 본 논문은 고분자전해질막 연료전지의 공기 공급을 위해 전기침투현상에 기반을 둔 공기 공급 방법을 제안하고 이를 실험적으로 평가하였다. 작동 유체의 구동을 위해서 전기침투펌프를 낮은 주파수의 교류 전기장에서 사용하였다. 작동 유체는 유연한 막에 의해 막 밀봉하였고, 막의 움직임에 의해 연료전지 내로 공기를 공급하였다. 본 연구에서는 전기침투현상 기반 공기펌프를 사용하여 연료전지의 공기 공급을 성공적으로 설명하였다. 펌프의 출력은 연료전지에서 생성되는 출력을 초과하였지만, 본 논문에서는 펌프의 출력 당 연료전지의 출력비를 줄이기 위한 몇 가지 방법들에 대해 설명하였다.

**Abstract:** We propose an electroosmosis-based air delivery scheme for polymer electrolyte fuel cells and experimentally investigate its feasibility. An electroosmotic pump under a low-frequency AC electric field is used to displace initially a volume of pump working liquids. This working liquid is then pumped into a space enclosed by a flexible membrane and the movement of the membrane delivers air to a fuel cell. We successfully demonstrated the operation of a forced-convection fuel cell using this technique. In this preliminary study, however, the power consumption of the pump exceeds the power generated by the fuel cell. We conclude this paper with a discussion of several ways to reduce the pump-to-fuel cell power ratio.

### - 기호설명 -

- $V_{air,disp}$  : 공기의 체적 변화 ( $m^3$ )
- $p_{half}$  : 진동 주기의 반 (s)
- $I_{rms}$  : 실효치 전류 (A)
- $V_{FC}$  : 연료전지의 전압 (V)
- $P''_{FC}$  : 출력 밀도 ( $W/cm^2$ )
- $j$  : 전류 밀도 ( $A/cm^2$ )

### 1. 서론

최근 휴대용 전자 장비(노트북, 휴대폰, PDA 등)

들의 전원으로 연료전지가 주목을 받고 있다.<sup>(1)</sup> 휴대용 전자 장비를 위한 연료 전지는 사용되는 연료에 의해 직접 액체 연료전지(direct liquid fuel cell)와 고분자전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)로 구분된다.<sup>(2)</sup> 직접 액체 연료전지는 연료로 사용되는 메탄올, 에탄올 등이 높은 에너지 밀도를 가지기 때문에 적은 양의 연료로 장시간 작동이 가능하다. 그러나 연료의 크로스오버(crossover) 현상으로 인한 출력 손실 문제와 부산물(이산화탄소)의 생성 문제를 가지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 반면에 고분자전해질막 연료전지는 기체연료인 수소를 사용하기 때문에 위와 같은 문제점들을 가지지 않는다.<sup>(3)</sup>

휴대용 연료전지의 성능 향상을 위해 현재 다양

† Corresponding Author, daejoong@sogang.ac.kr

한 연구가 진행되고 있다.<sup>(4)</sup> 그 중 산화제 공급 방식은 휴대용 연료전지의 주요 연구 분야 중 하나이다. 예를 들어 연료전지 내에 너무 과다한 공기가 공급되면 펌프 등의 출력 손실이 발생하게 되고 반대로 공기의 공급이 부족해지면 연료전지 자체의 성능이 감소하거나 작동이 중단될 수 있다. 이러한 이유로 효율적인 공기의 공급은 휴대용 연료전지 개발에 있어 중요하다고 할 수 있다.

휴대용 연료전지에서의 공기 공급은 자연적으로 공기를 공급하는 자연대류(*free convection*) 방식과 펌프 또는 팬과 같은 외부장치를 사용한 강제대류(*forced convection*) 방식으로 구분된다.<sup>(5)</sup> 자연대류 방식은 추가적인 외부장치 없이 공기를 공급하는 방법으로 소형화에 유리한 측면이 있고 외부장치로 인한 출력 손실이 발생하지 않는다.<sup>(6)</sup> 그러나 연료 전지에 원활한 공기 공급이 어려워 비교적 낮은 출력밀도(*power density*)를 갖게 된다.<sup>(7-9)</sup> 강제대류 방식은 외부장치를 사용하여 공기를 공급하는 방법으로 외부장치의 작동을 위해 연료전지의 출력의 일부가 이용되는 단점이 있다. 또한 무엇보다도 휴대용으로 적용이 가능한 마이크로펌프가 많지 않다는 단점이 있다. 그러나 효율적이고 휴대 가능한 크기의 외부장치가 있다면 연료 전지에 원활한 공기 공급이 가능해져서 높은 출력 밀도를 갖게 되는 것은 명확하다. 현재 소형 연료전지에 공기를 공급하는 방법으로 이 두 방식이 모두 연구되고 있고 그 최대 출력밀도는 각각  $360\text{mW}/\text{cm}^2$ 와  $450\text{mW}/\text{cm}^2$ 으로 강제대류 방법이 25% 가량 더 높은 것으로 보고되고 있다.<sup>(7-9)</sup>

본 논문에서 휴대용 연료전지에의 적용이 유리한 새로운 방식의 공기 공급 방식을 제안하고 이러한 방식을 구현하기 위하여 전기침투현상(*electroosmosis*)을 기반으로 제작된 공기펌프를 이용한 연료전지의 공기 공급에 대해 연구하였다. 본 논문은 크게 펌프 자체의 공기 공급 성능을 측정한 결과와 고분자 연료전지에 전기침투 공기펌프를 적용하여 측정한 결과를 보고한다.

## 2. 작동 이론

Fig. 1은 휴대용 연료전지의 산화제 공급을 위한 전기침투 현상 기반의 공기펌프의 동작원리를 보여주고 있다. 신축성 있는 막으로 둘러싸인 내부의 전해질에 교류전압을 인가시켜 주면 변화하는 전압의 방향을 따라 전해질의 유동 방향이 변화하게 된다. 전해질의 유동 때문에 신축성 있는 막은 주기적인 변위를 일으키게 되고 이에 따라

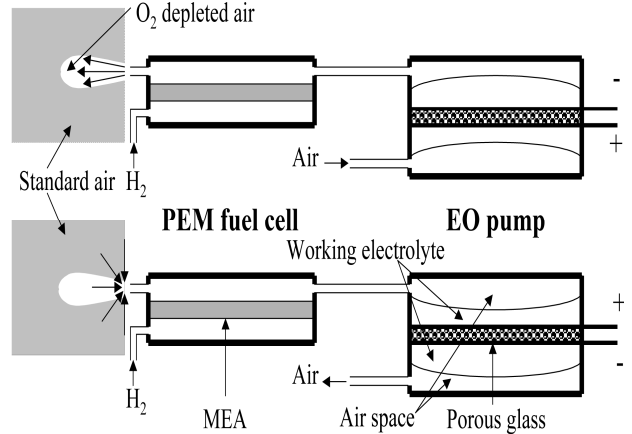


Fig. 1 Air displacement operation of an EO membrane pump to deliver air to a PEM fuel cell

공기실의 수축과 팽창을 반복하게 된다. 즉 막이 수축될 때 연료전지의 내부로 주변의 산소를 포함한 공기가 흡입 되고 막이 팽창될 때는 연료전지의 공기극(*cathode*)에서의 반응 때문에 산소가 소진된 공기가 배기 된다. Fig. 1에서는 연료전지 하나만 표현되어 있으나 막의 양쪽으로 두 개의 공기실로 제작하게 되면 막의 움직임이 두 개의 공기실에 교환적으로 수축과 팽창을 발생시켜 두 개의 연료 전지에 공기를 공급하는 것도 가능하게 된다.

본 연구에서는 공기의 유동을 일으키는 전해질의 유동을 위해 전기침투현상(*electroosmosis*)을 이용하였다. 전기침투현상은 산화물이나 고분자 등의 고체 표면에 물과 같은 극성 용액이 접촉할 때 자발적으로 고체 표면이 유한한 전하를 가지게 되는 동전기(*electrokinetic*) 현상 중 하나로 고체가 정적이고 유체가 동적일 경우를 말한다.<sup>(10)</sup> 전기침투펌프는 전기침투현상을 가능하게 하는 마이크로 채널 또는 마이크로미터 크기의 세공을 다공성 물질(*porous media*)를 이용 제작된다.<sup>(11-16)</sup> 전기침투펌프는 움직이는 부분이 없어 소음 및 진동이 발생하지 않고 낮은 전압에서 높은 압력과 유량을 동시에 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 전압의 변화로 쉽게 유량을 제어할 수 있어서 직접 메탄올 연료전지의 연료 공급, 고분자 전해질막 연료전지의 물 관리(*water management*), 전자 장비의 냉각, 그리고 고성능 크로마토그래피(*HPLC*) 등에의 적용이 연구되고 있다.<sup>(17-20)</sup>

본 연구에서는 교류전압을 이용한 전기침투현상과 신축성 있는 막을 이용하여 양방향운동이 가능하도록 하여 공기공급이 가능한 펌프를 제작하여 휴대용 연료전지에 산소를 공급할 수 있었다.

### 3. 실험 방법

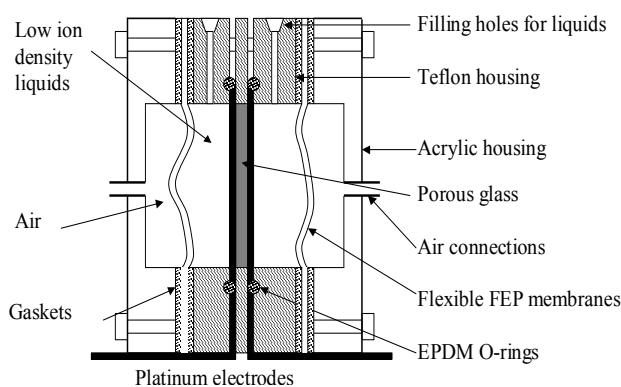
#### 3.1 제작 방법

실험에 사용한 고분자전해질막 연료전지의 상세 사양은 Table 1 에 정리되어 있다. 연료전지의 MEA(membrane electrolyte assembly) 는 전해질막으로 Nafion 112 와 촉매 그리고 가스 확산 영역으로 구성 하였고 그 활성 영역(active layer)은 0.6cm<sup>2</sup> 으로 제작하였다. 가스 확산 영역은 연료극과 공기극 모두 350 $\mu$ m 의 두께의 carbon cloth 로 제작하였고, 촉매는 모두 백금을 사용하였다. 연료극과 공기극의 백금 로딩량은 각각 0.6mg 으로 하였다

Fig. 2 는 전기침투현상 기반의 공기펌프의 개략도이다. 전기침투현상 기반의 공기펌프는 두 개의 불화 에틸렌 프로필렌(FEP, fluorinated ethylene propylene)막으로 분리되어 액체 유동공간과 공기 유동공간으로 구성되었다. 액체 공간의 전기침투 유동을 일으키기 위한 다공성 물질은 지름 40mm, 두께 1.3mm 의 다공성 유리막(Ultrafine frit, ROBU Glasfilter-Geraete GnbH, Hattert, Germany)이 사용되었다. 펌프의 틀(housing)은 용액에 대한 내구성이

**Table 1** Hydrogen proton exchange membrane fuel cell parameters

Parameter	Value
Fuel cell electrolyte	Nafion 112
Gas diffusion layer	350 $\mu$ m E-teck anode and cathode
Active area	0.6 cm <sup>2</sup>
Anode and cathode channel dimensions	1 mm*60 mm*1.1 mm
Catalyst loading	1 mg/cm <sup>2</sup> Pt
Anode gas	H <sub>2</sub> (>99.995%)

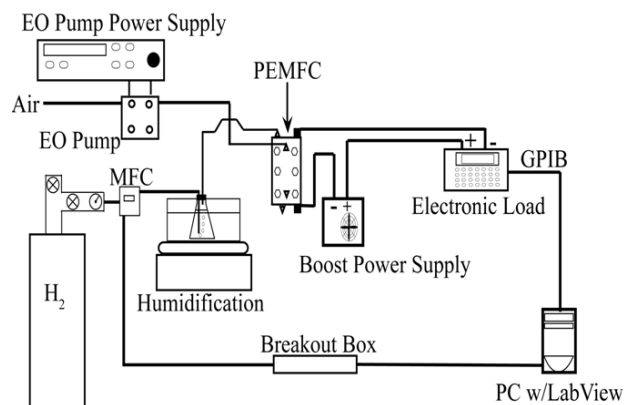


**Fig. 2** Schematic of electroosmotic air pump

좋은 PTFE(poly-tetra-fluoro-thylene)을 사용하여 다양한 액체의 실험이 가능하도록 하였다. 작동 유체의 누수를 막기 위해 EPDM(ethylene propylene diene M-class) 가스켓을 사용하였고, PTFE 틀과 유리막의 접착에는 PTFE 에 대해 접착성이 좋은 에폭시(3M 2216, St. Paul, MN)를 사용하였다. 액체 유동공간의 작동 유체로 본 연구에서는 메탄올(Methanol, Sigma-Aldrich with reported purity > 99.9%)을 사용하였다. 액체 유동공간의 작동 유체로는 메탄올을 포함한 낮은 전도도의 액체가 사용될 수 있다. 교류 전압은 백금 전극을 통해 인가하였고 사각파(square wave)를 사용하였다

#### 3.2 실험 방법

Fig. 3 은 연료전지의 실험구성도이다. 연료전지에는 전기침투 공기펌프, 수소 공급 장치, 부스트 전원공급장치(boost power supply, Acopian W3.3MT65, Easton, PA) 그리고 전자 부하기(electric load, Agilent N3100A)를 연결하였다. 전자 부하기는 연료 전지와 부스트 전원공급장치에 직렬로 연결된 소스 와이어(source wire)와 연료 전지에 직접 연결된 센스 와이어(sense wire)로 작동하였고, Labview 와 GPIB 카드(National Instruments, Austin, TX)를 이용하여 제어 및 측정을 수행하였다. 수소의 유량 제어와 측정은 질량 유량 조절기(mass flow rate controller, Alicat Scientific, Tucson, AZ)를 사용하였고 실제 데이터 수집에는 Labview 와 IO 자료 수집 카드를 사용하였다. 수소 가스는 압축된 가스 실린더로부터 시스템에 공급되었고 시스템으로 공급된 수소 가스는 자체 제작한 향온 수소 분사 장치(water-bath sparging unit)를 사용하여 60°C 온도를 유지한 상태로 가습하였다. 향온 수소 분사 장치를 통과한 수소 가스는 0.5m 길이의 테플론(teflon) 관을 통과하면서 상온(25°C)으로 냉각되었고, 최종



**Fig. 3** Schematic of the fuel cell experimental setup

적으로 연료전지에 상대습도 100%, 온도 25°C 상태로 공급되었다. 공기의 공급을 위한 전기침투 공기펌프는 외부의 전원장치를 이용하여 작동되었고, 공급 되는 공기는 추가적인 가습 과정을 거치지 않았다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 전기침투현상 기반 공기펌프의 성능

전기침투현상 기반 공기펌프의 산소 공급 메커니즘을 이해하기 위해 연료전지에 연결하지 않은 상태에서 실험을 수행하였다. Fig. 4는 전기침투현상 기반 공기펌프 출구에서의 유동을 가시화한 결과이다. 유동 가시화를 위하여 마이크로입자(microparticle)와 헬륨-네온 레이저(Melles-Griot He-Ne laser)를 사용하였다. Fig. 4(a)는 전기침투현상 기반의 공기펌프에서 공기가 배출되는 모습이고 (b)는 전기침투현상 기반의 공기펌프에서 공기가 흡입되는 모습이다. Fig. 4(a)와 (b) 모두 전기침투현상 기반의 공기펌프는 오른쪽에 위치하였다. Fig. 4(a)에서 공기의 배출 부분은 마이크로입자들이 없는 어두운 영역으로 확인할 수 있고 (b)에서는 마이크로입자들이 미세하게 선을 이루는 모양

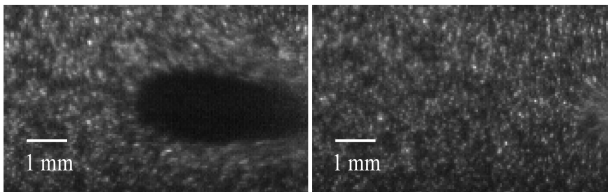


Fig. 4 Visualization of air flows near the outlet of an EO membrane pump with incense smokes as seeding particles. (a) air rejection (b) air inhalation

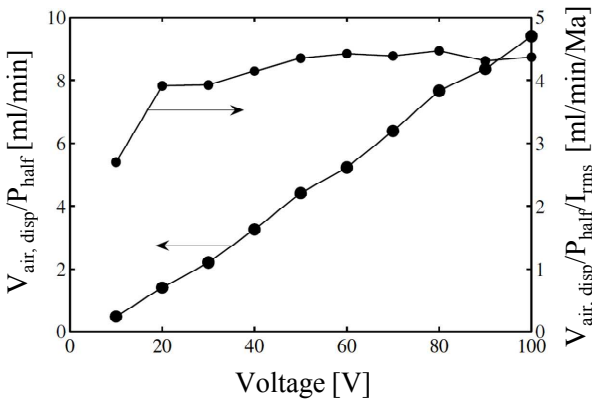


Fig. 5 Performance of a porous glass EO pump (a) air displacement volume divided by half period versus applied voltage (b) displacement flow rate parameter normalized by rms current versus applied voltage

으로 공기가 흡입되는 것을 확인할 수 있다 Fig. 4를 통하여 전기침투현상 기반의 공기펌프 출구에서 공기의 흡입과 배기가 원활하게 이루어는 것을 확인할 수 있다

전기침투 현상 기반의 공기펌프의 성능을 유량과 같은 차원을 가지는  $V_{air,disp}/P_{half}$  와 이 유량을 소비 전류로 나눈 단위 전류당 유량인  $(V_{air,disp}/P_{half})/I_{rms}$  를 사용하여 측정하였다.  $V_{air,disp}$  는 공기실의 수축과 팽창을 한 주기로 하였을 때 반 주기 동안의 공기 유동 공간 내 공기의 체적 변화량이고,  $P_{half}$  는 진동 주기의 반이다.  $I_{rms}$  는 교류 전압에서 실효치 전류 값이다. Fig. 5는 전압의 증가에 따른 유량과 단위전류당 유량 결과값이다. 교류전압의 주파수는 0.5Hz로 고정하였고, 전압은 최대 100V 까지 실험하였다. Fig. 5(a)에서  $V_{air,disp}/P_{half}$  는 전기침투현상 기반 공기펌프에서의 유량이 선형적으로 증가함을 관찰하였다. Fig. 5(b)에서  $(V_{air,disp}/P_{half})/I_{rms}$  값은 10V를 제외하고 비교적 일정한 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 유량과 단위전류당 유량 변화 경향은 전기침투 펌프에서 가장 흔하게 발견되는 것으로 여러 참고문헌에서 보고된 바와 같다.<sup>(10,12,14-16,21)</sup> 이를 통하여 본 실험에 이용된 전기침투현상 기반의 공기펌프가 올바르게 작동함을 확인할 수 있다.

##### 4.2 연료전지의 성능

휴대용 연료전지의 성능은 전기침투현상 기반의 공기펌프에 350V, 주기 2.5s의 교류 전압을 인가하여 측정하였다. 연료전지의 성능은 분극곡선(polarization curve)과 출력 밀도로 Fig. 6과 같이 나타냈다. 연료전지의 개회로전압(OCV, open circuit voltage)은 0.95V로 측정되었고, 최고출력은 0.28W로 측정되었다. 이러한 연료전지의 성능은 일반적인 강제대류 방식의 연료전지에서 얻을 수 있는

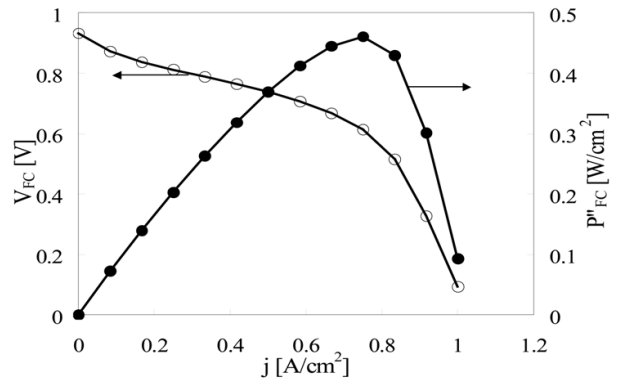
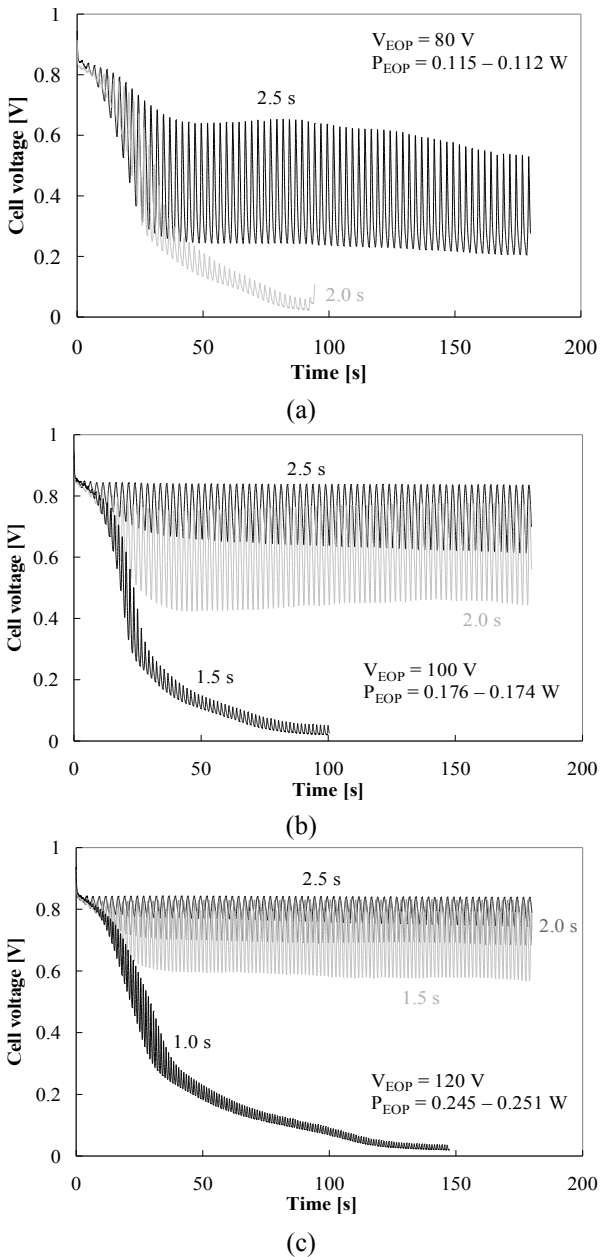


Fig. 6 Polarization curve of the fuel cell with air delivery via methanol EO pumping



**Fig. 7** Galvanostatic measurements for a fixed fuel cell current at  $0.17 \text{ A/cm}^2$  with varying pump voltages and periods

성능으로<sup>(7-9)</sup> 본 연구에서 제안한 공기 공급 메커니즘이 제대로 작동함을 보여준다.

Fig. 7 은 휴대용 연료전지의 정전류(Galvanostatic) 측정 결과이다. 연료전지의 전압의 진동하는 이유는 전기침투현상 기반의 공기펌프에 교류 전압이 적용되어 공기의 유동의 변화에 따름이다. Fig. 7 에서 주기가 길어질수록 진동 폭은 줄고, 성능은 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 낮은 주기에서는 시간의 경과에 따라 연료전지의 전압이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 위와 같은

결과는 작은 주기로 전기침투현상 기반의 공기펌프가 작동할 때는 연료 전지 내에서 산소를 소모한 공기를 제대로 배출하지 못한 것으로 생각하고, 높은 주기로 전기침투 현상 기반의 공기펌프가 작동할 때는 원활한 공기 공급 및 배출이 이루어지는 것으로 생각한다. 그러나 막이 움직일 수 있는 변위는 일정이 되면 제한이 되기 때문에 계속적인 주기의 증가가 연료전지의 성능을 향상시키지 못했고 대략 2.5s 주기 내에서 최적의 값을 가졌다. 이번 정전류(galvanostatic)실험에서 전기침투현상 기반의 공기펌프는 100V의 전압과 2.5s의 주기에서 최적의 성능을 보였고, 이 때 전기침투현상 기반의 공기펌프와 연료전지의 출력비는 2.4로 얻어졌다. 다만 앞서 2 장의 작동이론에서 논의된 바와 같이 한 전기침투현상 기반의 공기펌프가 두 개의 연료전지를 구동할 수 있기 때문에 출력비는 1.2 정도라고 할 수 있다. 그러나 펌프의 소비전력이 연료전지의 생산전력보다 여전히 크다는 점은 본 실험에서 사용된 전기침투현상 기반 공기펌프의 성능이 향상되어야 함을 보여주는 결과라 하겠다. 본 연구에서 우선 새로운 방식의 공기 공급이 작동하는 것을 확인할 수는 있었으나 출력비 향상의 향후 연구에서 진행되어야 할 최우선 과제가 될 것이다.

## 5. 결론

이번 연구에서 전기침투현상 기반의 공기펌프를 이용한 새로운 방식의 휴대용 연료전지 공기 공급 방법을 제안하였다. 전기침투현상 기반의 공기펌프는 FEP 막을 사이로 액체로 채워진 부분과 공기의 유동이 이루어지는 부분으로 구분되었고 막의 수축과 팽창과정에 의한 공기의 흡입과 배기로 동작하였다. 가시화 과정을 통해 전기침투현상 기반의 공기펌프가 연료전지에 공기를 원활히 흡입 및 배출할 수 있음을 확인하였고 연료전지 작동과 관련하여 다음과 같은 결과를 정리할 수 있었다.

(1) 전기침투현상 기반의 공기펌프가 100V의 전압과 2.5s의 주기에서 작동할 때 최적의 연료전지 성능을 보였다.

(2) 전기침투현상 기반 공기펌프의 최적화된 작동조건에서 전기침투현상 기반의 공기펌프와 연료 전지의 출력비는 2.4를 기록하였고, 두 개의 연료전지에 공급 할 때를 가정하면 출력비는 1.2 정도로 줄일 수 있다.

위 실험 결과를 바탕으로 향후 전기침투현상 기반의 공기펌프와 연료전지의 출력비를 줄일 수 있

는 추가적인 실험을 진행할 것이고 실제 두 개의 연료전지에 공급 할 경우의 성능에 대해서도 연구 할 것이다

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 국방 기초/특화분야 국제공동연구사업(과제번호: UD080050GD) 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- (1) Lu, G. Q., Wang, C. Y., Yen, T. J. and Zhang, X., 2004 "Development and Characterization of a Silicon-Based Micro Direct Methanol Fuel Cell," *Electrochimica Acta*, Vol. 49, No. 5, pp. 821~828
- (2) Lu, G. Q. and Wang, C. Y., 2005 "Development of Micro Direct Methanol Fuel Cells for High Power Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 144, No. 1, pp. 141-145
- (3) Choi, J. and Son, G., 2008, "Numerical Study of Droplet Motion in a Microchannel with Different Contact Angles," *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol. 22, pp. 2590~2599
- (4) Liu, H., Song, C., Zhang, L., Zhang, J., Wang, H. and Wilkinson, D. P., 2006 "A Review of Anode Catalysis in the Direct Methanol Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 155, No. 2, pp. 95~110
- (5) Dyer, C. K., 2002, "Fuel Cells for Portable Applications," *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2002, No. 3, pp. 8~9
- (6) Li, P. -W., Zhang, T., Wang, Q. -M., Schaefer, L. and Chyu, M. K., 2003, "The Performance of PEM Fuel Cells Fed with Oxygen Through the Free-Convection Mode," *Journal of Power Sources*, Vol. 114, No. 1, pp. 63~69
- (7) Morner, S. O. and Klein, S. A., 2001, "Experimental Evaluation of the Dynamic Behavior of an Air-Breathing Fuel Cell Stack," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 225~231
- (8) Hottinen, T., Mikkola, M. and Lund, P., 2004, "Evaluation of Planar Free-Breathing Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Design," *Journal of Power Sources*, Vol. 129, No. 1, pp. 68~72
- (9) Bernardi, D. M. and Verbrugge, M. W., 1992, "Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 139, No. 9, pp. 2477~2491
- (10) Yao, S., Santiago, J. G., 2003, "Porous Glass Electroosmotic Pumps: Theory," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 268, No.1, pp. 133~142
- (11) Laser, D. J., Yao, S., Chen C. H., Mikkelsen, J. ., Goodsen, K. E., Santiago J. G., and Kenny, T. W., 2001, "A Low Voltage Silicon Micromachined Parallel-Plate Electrokinetic Pump," in Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conference. *Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '01)*, Munich, Germany
- (12) Yao, S., Hertzog D. E., Zeng, S., Mikkelsen J. C., and Santiago J. G., 2003, "Porous Glass Electroosmotic Pump: Design and Experiments," *Journal of Colloid Interface Science*, Vol. 268, No. 1, pp. 143~153
- (13) Prakash, P., Grissom, M. D. and Zydney, A. L., 2006, "Development of an Electroosmotic Pump for High Performance Actuation," *Journal of Membrane Science*, Vol. 286, No. 1~2, pp. 153~160
- (14) Yao, S., Myers, A. M., Posner, J. D., Rose, K. A. and Santiago, J. G., 2006, "Electroosmotic Pumps Fabricated from Porous Silicon Membranes," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 717~728
- (15) Chen, Y. F., Li, M. C., Hu, Y. H., Chang, W-J. and Wang, C. C., 2008, "Low-Voltage Electroosmotic Pumping Using Porous Anodic Alumina Membranes," *Microfluidic Nanofluid*, Vol. 5, No.2, pp. 234~244
- (16) Brask, A., Kutter, J. P. and Bruus, H., 2005, "Long-term Stable Electroosmotic Pump with Ion Exchange Membrane," *Lab on a Chip*, 5, pp. 730~738
- (17) Yang, B., Zhang, F., Liang, X., Dasgupta, P. K. and Liu, S., 2009, "Ion Exchange Resin Bead Decoupled High-Pressure Electroosmotic Pump," *Analytical Chemistry*, Vol. 81, No. 12, pp. 5102~5106
- (18) Wang, X., Wang, S., Gendhar, B., Chang, C., Chang, B. K., Li, G. and Zhao, M., 2009 "Electroosmotic Pumps for Microflow Analysis," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 28, No. 1, pp. 64~74
- (19) Buie, C. R., Kim D., Litster, S. and Santiago, J. G., 2007, "An Electro-osmotic Fuel Pump for Direct Methanol Fuel Cells," *Electrochemical and Solid-state Letters*, Vol. 11, No.11, pp. B196-B200
- (20) Buie, C. R., Posner, J. D., Fabian, T., Cha, T. W., Kim, D., Prinz, F. B., Eaton, J. K. and Santiago, J. G., 2006, "Water Management in Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using Integrated Electroosmotic Pumping," *Journal of Power Sources*, Vol. 161, No. 1, pp. 191-202
- (21) Chen C. and Santiago, J. G., 2002, "A Planar Electroosmotic Micropump," *Journal of Microelectromechanic Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 672~683.