

Synthetic Jet 마이크로 에어펌프의 개발

최종필¹· 김광수¹· 서영호¹· 구보성²· 장재혁²· 김병희[#]

Development of Synthetic Jet Micro Air Pump

J. P. Choi, K. S. Kim, Y. H. Seo, B. S. Ku, J. H. Jang, B. H. Kim

(Received September 10, 2008)

Abstract

This paper presents a micro air pump based on the synthetic jet to supply reactant at the cathode side for micro fuel cells. The synthetic jet is a zero mass flux device that converts electrical energy into the momentum. The synthetic jet actuation is usually generated by a traditional PZT-driven actuator, which consists of a small cylindrical cavity, orifices and PZT diaphragms. Therefore, it is very important that the design parameters are optimized because of the simple configuration. To design the synthetic jet micro air pump, a numerical analysis has been conducted for flow characteristics with respect to various geometries. From results of numerical analysis, the micro air pump has been fabricated by the PDMS replication process. The most important design factors of the micro air pump in micro fuel cells are the small size and low power consumption. To satisfy the design targets, we used SP4423 micro chip that is high voltage output DC-AC converter to control the PZT. The SP4423 micro chips can operate from 2.2~6V power supply(or battery) and is capable of supplying up to 200V signals. So it is possible to make small size controller and low power consumption under 0.1W. The size of micro air pump was $16 \times 13 \times 3 \text{ mm}^3$ and the performance test was conducted. With a voltage of 3V at 800Hz, the air pump's flow rate was 2.4cc/min and its power consumption was only 0.15W.

Key Words: Micro Fuel Cell, Micro Air Pump, Synthetic Jet Actuator(SJA), Polydimethylsiloxane(PDMS), Computational Fluid Dynamics(CFD)

1. 서론

현재 노트북, 휴대폰, PDA, PMP 등의 모바일 디바이스들은 복수의 기능을 하나의 단말기로 구현하는 디바이스의 컨버전스(convergence) 형태로 진화하고 있다. 디지털카메라, 음악 및 동영상 재생 등은 아주 일반화 되어 있으며 DMB, 네비게이션, 무선인터넷 등 기능에 대한 집적도는 빠르게 증가하고 있다. 이러한 다양한 기능을 갖춘 모바일 디바이스들은 그 기능에 비례하여 더욱 높은 에너지밀도를 갖는 전원장치를 필요로 하고 있고,

현재의 2차 전지로는 전원수요를 따라가지 못하고 있으며, 고 용량화에 따른 여러 가지 부작용을 낳고 있다[1~4]. 2차 전지를 대체할 새로운 대안으로 가장 각광받고 있는 연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 전환하는 에너지 전환장치로서 전환효율이 매우 높고 친환경적이며 다양한 연료의 사용이 가능하다는 장점이 있다. 특히 고분자 전해질 연료전지(proton exchange membrane fuel cell)의 경우 작동온도가 낮고, 출력밀도가 높으며, 구조가 단순하여 소형 이동전원으로 제작이 가능하다는 특징을 가지고 있다[5~8].

1. 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

2. 삼성전기㈜

교신저자: 강원대학교 기계메카트로닉스공학부,

E-mail: kbh@kangwon.ac.kr

고분자 전해질 연료전지는 반응물질인 산소 혹은 공기의 공급방식에 따라 자연대류방식과 펌프 또는 블로워(blower)를 통해 강제로 공기극(cathode)에 공급하는 강제공급방식으로 구분할 수 있다. 자연대류방식의 경우 별도의 공기 공급을 위한 부가장치가 필요 없어 구조가 단순하며 시스템 소형화에 유리하지만 강제공급방식에 비해 출력밀도가 낮고 사용 환경에 따라 성능 변화의 폭이 크다. 이에 반해 강제공급방식은 연료전지에서 만들어 낸 전력의 일부를 공기 공급장치에 사용해야 하므로, 소비전력이 증가하며 시스템이 복잡하다는 단점을 지니고 있으나, 자연대류방식보다 출력밀도가 월등히 높다는 장점을 지니고 있다. 또한 공기극에 생성되는 물의 관리가 가능하다는 측면에서 자연대류방식에 비해 좀더 안정적이며 효율적인 시스템을 구현할 수 있다.

본 연구에서는 마이크로 연료전지용 공기공급장치 개발을 위하여, PZT 박막을 이용한 SJ 기반의 마이크로 에어펌프를 설계 및 제작하였다. 또한 제작된 마이크로 에어펌프를 통한 유량 및 펌핑 압력에 대한 성능 실험이 수행되었다.

2. 마이크로 에어펌프의 설계

2.1 Synthetic jet 액추에이터

SJA는 전기 에너지를 운동 에너지로 변환시키는 장치로, 입구를 통해 들어온 양과 나가는 양이 같아 영의 질량 유량을 가지는 장치로 주로 항공기의 공기유동 제어 장치 및 소형 전자기기의 열관리 장치, 마이크로 펌프 등에 사용되고 있다[9].

Fig. 1은 SJA의 기본구조와 작동원리를 보여주고 있다. SJA는 입구와 출구 역할을 동시에 수행하는 오리피스(orifice)와 챔버(chamber), PZT 박막으로 구성되어 있다. PZT 박막의 상하 반복 운동에 의해 공기가 오리피스를 통해 챔버 내부로의 공급과 같은 오리피스를 통해 다시 외부로 분사됨으로써 공기의 유동을 발생시키게 된다. 이러한 SJA의 주요 설계 및 구동 조건으로는 PZT 박막의 변위와 구동 주파수 그리고 입구, 챔버 형상 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 SJA의 최적 형상을 설계 및 제작을 위하여 설계 인자들을 선정 및 변화에 따른 전산유체해석을 수행하였으며, 제작된 마이크로 에어펌프를 이용하여 주파수 변화에 따른 유동 특성 및 압력 실험을 수행하였다.

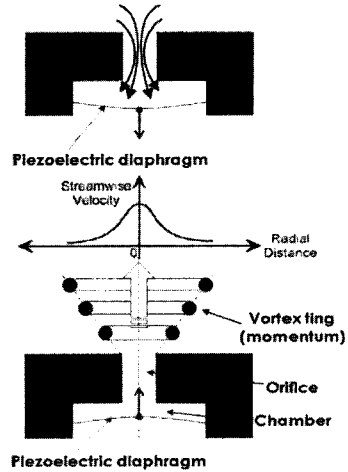


Fig. 1 Schematic of synthetic jet actuator

2.2 전산유체해석

Synthetic jet 기반의 마이크로 에어펌프 형상설계를 위하여 상용 전산유체해석 프로그램인 CFD-ACE+를 활용하여 모델링 및 유동 해석을 수행하였다. 특히 CFD-ACE+의 전처리 프로그램인 CFD-GEOM과 스크립트인 Python을 이용하여 에어펌프 내부의 치수 변화에 따른 유동 특성을 2D 해석을 통해 그 현상을 파악하였다.

Fig. 2는 전산유체해석에 사용된 해석 도메인 및 형상 변수들을 보여주고 있다. 기존 SJA는 하나의 오리피스가 입구와 출구 역할을 동시에 수행하였으나, 본 논문의 마이크로 펌프는 하나의 오리피스를 가지는 것은 동일하나 입구와 출구를 따로 두어 흡입과 펌핑 모드 시 발생하는 간섭을 최소화 시키기 위한 형상으로 모델링을 수행하였다. 오리피스는 유동 에너지 손실이 적은 디퓨저(diffuser)형상을 도입하였으며, 입구의 폭과 출구의 폭, 챔버의 폭 등을 변화 시키며 유동해석을 수행하였다. Table 1은 전산유체해석을 통해 수행된 각 형상 변수들의 보여주고 있으며, 볼드체는 각 형상의 기본값을 나타낸다.

SJ 마이크로 에어펌프 내의 전산유체해석을 수행하기 위하여 질량보존식과 운동량보존식이 사용되었으며, PZT의 변형을 구현하기 위하여 그리드변형(grid deformation) 모델을 적용하여 챔버의 부피가 변화하도록 모델링을 수행하였다. 이때 발생하는 PZT의 변형은 사인파 형태로 발생하며, 실제 PZT에 의해 발생하는 변위를 그대로 구현하였다. 식 1~5는 해석에 사용된 지배방정식을 나타

내고 있으며, Table 2에 마이크로 에어펌프 전산유체해석에 사용된 경계조건을 보여주고 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

질량보존식 (1)은 해석 도메인의 시간(t)에 따른 질량 변화율은 같은 도메인 내의 전체 질량 유동과 같다는 사실을 기본으로 한다. 좌항의 첫 번째 항(term)은 단위 부피당 질량, 즉 밀도의 시간 변화율을 나타내며, 두 번째 항은 전달항이라 부르는 해석 도메인의 경계를 통과하는 전체 질량 유동이다. 여기서 ρ 는 유체의 밀도, V 는 속도장을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}u) = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}v) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}w) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4)$$

뉴턴의 제2법칙인 유체 요소의 시간에 따른 운동량의 변화는 요소에 대해 미치는 힘의 합과 같다는 사실에 기초하고 있다. 유체 요소에 미치는 힘은 표면력(surface force)과 물체력(body force)으로 구분할 수 있으며, 표면력은 압력과 점성력(viscous force)이 포함되며 물체력은 중력, 원심력과 전자기력이 포함된다. 본 논문의 해석에서는 표면력만을 적용하여 운동량보존식을 적용하였다. 여기서 p 는 정적 압력이며, S_{Mi} 는 표면력, ij 는 점성력을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + dy(x, t) = A_{0(c)} \left[1 - \left(\frac{x}{X} \right)^2 \right]^2 \quad (5)$$

그리드변형 모듈은 도메인 내에서 움직이는 경계가 존재할 때, 변형에 대해 자동으로 격자를 생성한다. 이러한 그리드 변형 모듈은 사인파형으로 표현되며, A_0 는 변형의 진폭을 나타낸다. 특히 경계에 분포하는 노드들의 움직임을 바탕으로 내부 노드들의 분포를 결정하기 위한 방법으로 유한보간법(transfinite interpolation scheme)이 사용된다. 이 방법은 오직 직각격자구조에서만 사용되며, 복합도메인이나 반복적인 경계조건을 포함하는 도메인에서는 사용될 수 없다.

Table 1 Geometrical parameters

Parameter	Symbol	Value (mm)
PZT disc diameter	D	9
Chamber thickness	T	1, 2, 3
Diffuser length	dh	1
Diffuser throat(in) width	d1	0.1, 0.2, 0.3
Diffuser throat(out) width	d2	0.3, 0.4, 0.5
Inlet width	d3	0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4
Block width	d4	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Outlet width	D6	0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2

Table 2 Boundary conditions and air properties

Condition	Symbol	Value
Air density	ρ	1.1614 kg/m ³
Air viscosity	μ	1.846e-5 g/m-s
In/outlet Pressure	P	100000N/m ²
Membrane Amplitude	A	30 μ m
Oscillation Freq.	f	100Hz

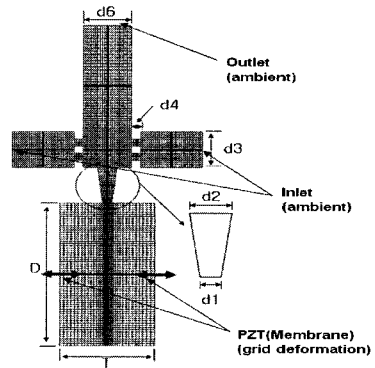


Fig. 2 2D computational domain and geometrical parameters

Fig. 3은 기준모델의 공급과 펌핑 모드 시 발생하는 속도장의 해석 결과를 나타내고 있다. PZT의 변형에 의해 챔버 내에서 압축과 팽창을 반복하게 된다. 펌핑 모드 시, PZT에 의해 압축된 공기는 오리피스를 통과하며 출구방향으로 이동하게 된다. 이러한 이동과정에서 속도가 급격히 증가하게 되며, 증가된 유속으로 인해 공기 유동에 관성이 발생하게 된다. 이러한 공기 유동의 관성으로 인하여 공급모드 시에는 출구로부터 역류되는 공기흐름이 대부분 차단되며, 챔버 내부로 유입되는

공기는 입구로부터만 공급된다. 따라서 에어펌프 내의 공기 유동은 PZT 박막의 구동에 의해 출구 방향으로 순 공기의 유동 및 유속이 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 에어펌프의 형상 변수들에 따른 해석 결과를 보여주고 있다. 1초 동안 에어펌프의 출구로부터 토출되는 공기의 유량을 보여주고 있으며, 각 형상 변수에 따른 공기 유량의 범위 및 팔호 안에 최대 유량에 대한 형상 수치를 보여주고 있다. 또한 기본모델과의 결과 비교를 통해 각 형상 변수들이 펌프 특성에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 이러한 에어펌프 변수들에 있어 디퓨저 부분의 d1, d2 및 입구의 폭 변화가 에어펌프의 유량에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 해석결과를 바탕으로 마이크로 에어펌프의 형상 설계를 수행하였다. Table 3에 마이크로 에어펌프 제작에 적용된 형상 변수들을 보여주고 있다.

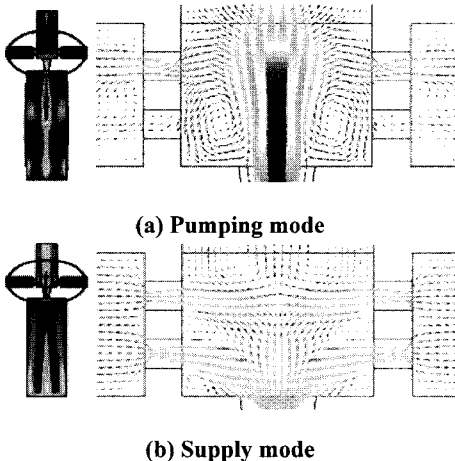


Fig. 3 Velocity vector maps of CFD analysis

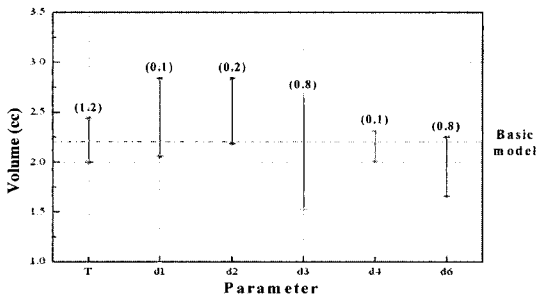


Fig. 4 Pumping volume of micro air pump according to geometrical parameters

Table 3 Dimension of synthetic jet air pump

Parameter	D	T	dh	d1	d2	d3	d4	D6
Value(mm)	9	2	1	0.1	0.2	0.8	0.1	0.8

3. 마이크로 에어펌프의 제작

전산유체해석을 통해 얻은 데이터를 기반으로 마이크로 에어펌프를 제작하였다. 본 논문의 마이크로 에어펌프는 PDMS(polydimethylsiloxane)를 이용하여 제작하였으며 Fig. 5는 PDMS를 이용한 마이크로 에어펌프의 제작 공정을 보여주고 있다.

PDMS 중간판을 제작하기 위하여, 0.5mm 실리콘 웨이퍼에 DRIE(deep Reactive Ion Etching)공정을 이용하여 실리콘 마스터를 제작하였다. 실리콘 마스터는 마이크로 에어펌프 형상을 제작하기 위한 PDMS 복제 몰드(mold)로 사용된다.

제작된 실리콘 마스터는 PDMS와의 원활한 이형을 위해 진공 데시케이터 안에서 실렌(silane)처리를 수행하였다. 사용된 PDMS는 폴리머와 경화제의 비율을 10:1로 혼합하여 실리콘 마스터 위에 2mm 두께로 도포한 후, 진공 챔버를 이용하여 혼합과정에서 발생한 기포를 완전히 제거하였다. 도포된 PDMS는 80°C에서 3시간 가량 경화시킴으로써 PDMS 몰드를 완성하게 되며, 이는 양각 형상이기 때문에 마이크로 에어펌프 제작을 위해 또 한번의 복제를 수행하였다.

제작된 PDMS 몰드에 복제될 PDMS와의 원활한 이형을 위해 플라즈마 표면 처리를 수행한 후 폴리머와 경화제가 10:1로 혼합된 PDMS를 도포, 80°C에서 3시간 가량 경화 시켜 PDMS 마이크로 에어펌프 패턴을 제작하였다.

이렇게 제작된 PDMS 패턴과 PZT 박막의 접합을 통해 마이크로 에어펌프 제작이 완성되었다. PDMS 패턴과 PZT 박막과의 접합은 에폭시 및 접합제를 사용하였으며, PZT 박막을 챔버 양면에 접합한 듀얼타입과 하나의 PZT 박막만을 사용하고 한면은 유리를 접합한 싱글타입의 두 가지 형태의 에어펌프를 제작하였다.

Fig. 6에 이러한 공정을 거쳐 제작된 실리콘 마스터와 PDMS 패턴을 보여주고 있다. 또한 Fig. 7은 완성된 싱글 및 듀얼 타입의 SJ 마이크로 에어펌프를 형상을 보여주고 있다. 에어 펌프의 전체 크기는 16×13×3mm³이며, 12mm 직경의 PZT 박막을 사용하여 제작하였다.

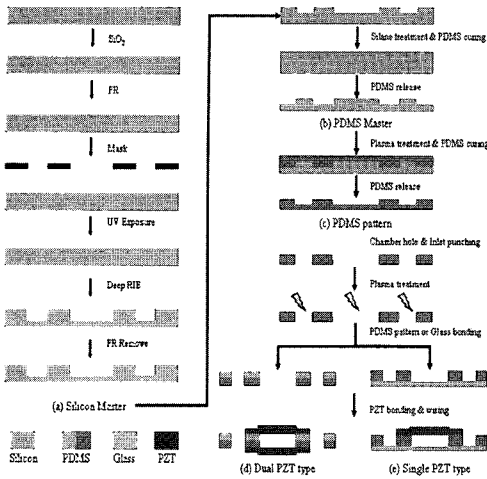
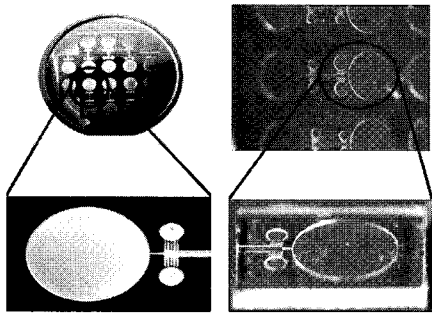
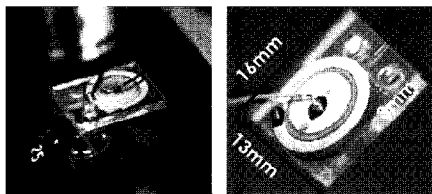


Fig. 5 Fabrication process of micro air pump



(a) Silicon master (b) PDMS pattern

Fig. 6 Photo of fabricated air pump components



(a) Single type (b) Dual type

Fig. 7 Photo of synthetic jet micro air pump

4. 실험 및 토의

제작된 마이크로 에어펌프의 성능평가를 위해 유량 및 펌핑 압력에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 8은 마이크로 에어펌프의 유량 측정을 위한 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 측정에 사용된 센서 (Schiltknecht Messtechnik, ThormoAir3)는 0.01~5m/s

의 측정 범위(1m/s range±1%, 5m/s range±0.2)를 가지며 주변 공기 유동에 대한 영향을 최소화하기 위해 폴리머 챔버 내에 설치하였다. 또한 DAQ 보드 및 Labview를 이용하여 센서의 출력신호(0~1 VDC) 변환을 통한 유량을 측정하였다.

Fig. 9는 싱글 타입 마이크로 에어펌프의 유량 측정 결과를 보여주고 있다. 주파수 증가에 따라 마이크로 에어펌프의 유량도 선형적으로 증가하였으며, 80Hz에서 2.4cc/min의 최대 유량이 측정되었다. 이후 점차적으로 감소하여 250Hz 이상에서는 더 이상 유량이 발생하지 않음을 확인하였다. 이때 인가된 전압은 DC 3V의 입력 전압을 AC 200V 전압으로 전환시켜주는 EL(Electro Luminescent) 램프 구동용 드라이버(Sipex, SP4423)를 사용하여 제작된 마이크로 컨트롤러를 사용하였다. 따라서 마이크로 에어펌프 구동을 위해 0.15mW의 소비전력만을 사용하였다.

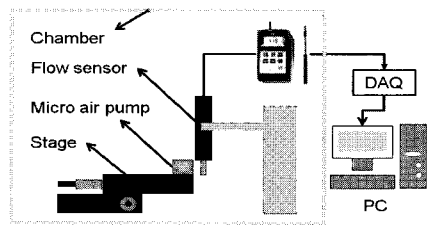


Fig. 8 Schematic of experimental setup

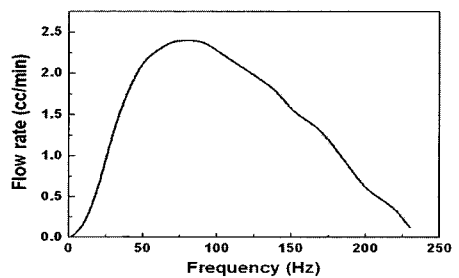
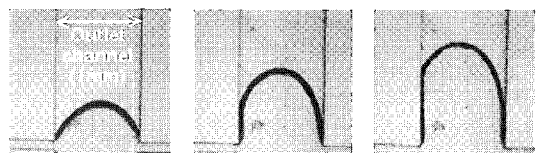


Fig. 9 Flow rate of synthetic jet micro air pump



(a) 0 sec (b) 10 sec (c) 20 sec

Fig.10 Flow of water in outlet channel by synthetic jet micro air pump

Fig. 10은 제작된 SJ 마이크로 에어펌프의 작동에 의한 물의 유동을 보여주고 있다. 제작된 마이크로 에어펌프의 출구 측 채널(1mm)에 물을 채우고 에어펌프 구동에 따른 물의 유동 특성을 광학현미경으로 관찰 및 시간에 따른 이동 거리를 측정하였다. 1mm 채널 내의 물을 펌핑하기 위해서는 물의 표면장력으로 인해 약 435Pa 이상의 펌핑압력이 요구 된다. 따라서 본 논문에서 제작된 마이크로 에어펌프는 435Pa 이상의 배압 하에서도 펌핑이 가능함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통해 소형 연료전지에 공기 공급을 위한 SJ 기반의 마이크로 에어펌프를 제작하였다.

(1) 전산유체해석 수행을 통해 마이크로 에어펌프의 설계변수 도출 및 최적 유량을 위한 형상설계를 수행하였다. 이때 펌프의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수는 디퓨저 부분의 형상과 입구 형상임을 확인하였다.

(2) 실리콘 DRIE 및 PDMS 복제 공정을 이용하여 마이크로 에어펌프 패턴을 제작하였으며, PZT 박막과의 접합공정을 거쳐 싱글 및 듀얼 타입의 마이크로 에어펌프를 제작하였다.

(3) 마이크로 에어펌프 유량 측정을 위한 실험장치를 구성하였으며, EL 램프 구동 칩인 SP4423을 이용하여 저전력 소모의 마이크로 컨트롤러를 제작하였다. 마이크로 컨트롤러 구동에 사용된 전압은 3 DCV 이며, 80Hz에서 2.4cc/min의 최대 유량이 측정되었다. 또한 제작된 마이크로 에어펌프는 435Pa 이상의 펌핑 압력이 발생함을 확인하였다.

추후, SJ 에어펌프의 유량 및 펌핑 압력 향상을 위해, PZT 자체의 변위 증폭을 위한 PZT 설계 및 제작에 관한 연구가 진행될 예정이며, 특히 휴대전자기기용 전원장치에 적용하기 위해 PZT 구동시 발생하는 소음 저감을 위한 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 성장동력, 중기거점/차세대 신기술개발 사업 중 “고기능 초미세 광열유체

마이크로 부품사업”으로 수행된 “마이크로 모바일 발전장치 개발”의 세부과제로 수행 중이며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 “2단계 BK21사업”의 지원을 받습니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Voss, J. Huff, 1997, Portable fuel cell power generator, *Journal of power source*, Vol.65, pp. 155~158.
- [2] P. B. Koeneman, I. J. Busch-Vishniae, K. L. Wood, 1997, Feasibility of micro power supplies for MEMS, *J. Microelectromech. Syst.* Vol.6, pp. 355~362.
- [3] S. C. Kelley, G. A. Deluga, W. H. Smyrl, 2000, A miniature methanol/air polymer electrolyte fuel cell, *Electrochem. Solid-State Lett.* Vol.3, pp. 407~409.
- [4] H. J. Maynard, J. P. Meyers, 2003, Miniature fuel cells for portable power : design considerations and challenges, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.20, pp. 1287~1287.
- [5] L. Wang, A. Husar, T.Zhou, H. Liu, 2003, A parametric study of PEM fuel cell performance, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 1263~1272.
- [6] S. J. Lee, A. Chang-Chien, S. W. Cha, R. O'hayre, Y.I. Park, Y. Saito, P. B. Prinz, 2002, Design and fabrication of a micro fuel cell array with flip-flop interconnection, *J.PowerSources*, Vol.112, pp. 410~418.
- [7] G. Mozsgai, J. Yeom, B. Flachsart, M. Shannon, 2003, A silicon microfabricated direct formic acid fuel cell, *Tech. Digest, 12th Intl. Conf. SolidState Sensors, Actuators and Microsystems*, Vol.2, pp. 1738~1741.
- [8] G. Hoogers(Ed.), 2003, *Fuel Technology Handbook*, CRC Press, Boca Raton.
- [9] X. Yang, Z. Zhou, H. Cho, X. Lou, 2006, Study on a PZT-actuated diaphragm pump for air supply for micro fuel cells, *Sensors and Actuators A*, Vol. 130-131, pp. 531~536.