

## 원통형 다공성 유리막을 이용한 전기삼투 펌프의 연구

권길성\* · 김대중\*\*

\* 서강대학교 기계공학과

### Characteristics of Electroosmotic Pump with Cylindrical Porous Glass Frits

Kilsung Kwon\* and Daejoong Kim\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received December 28, 2011 ; Revised March 27, 2012 ; Accepted March 28, 2012)

**Key Words:** Cylindrical Electroosmotic Pump(원통형 전기삼투 펌프), Porous Glass Frits(다공성 유리막), Nafion Tube(나피온 튜브)

**초록:** 본 논문에서는 원통형 다공성 유리막을 이용한 전기삼투 펌프의 실험적 연구를 수행하였고, 장시간 작동을 평가하였다. 전기삼투 펌프의 성능은 탈이온수와 1 mM 붕산염 완충액을 이용하여 최대유량, 최대전류, 그리고 최대압력으로 표현하였다. 최대유량, 최대전류, 그리고 최대압력은 모두 이론에서 예측하는 것과 같이 전압이 증가할 때 선형적으로 증가하였다. 최대유량을 유체의 펌핑면적과 적용 전압으로 나눈 표준화 유량을 사용하여 원통형 다공성 유리막을 이용한 전기삼투 펌프와 평면형 다공성 유리막을 이용한 전기삼투 펌프의 성능을 비교하였다. 표준화 유량은 원통형 다공성 유리막을 이용할 때 평면형 다공성 유리막보다 대략 1.5 배 높은 값을 가졌고, 이는 원통형 다공성 유리막과 평면형 다공성 유리막의 기하학적 부분의 차이에 의한 것으로 판단되었다. 표준화 유량 값을 이용하여 동일한 전기삼투 펌프 부피에서 두 다공성 막을 비교하면, 원통형 전기삼투 펌프는 평면형 전기삼투 펌프에 비해 최대 원주율만큼의 펌핑면적을 증가할 수 있으므로 5 배 높은 유량을 얻었다. 원통형 전기삼투 펌프의 내부 전극에서 전기분해에 의해 발생하는 가스들은 나피온 튜브를 통하여 효과적으로 배출되었고, 이로 인해 3 시간 이상의 작동에서 성능의 감소는 발생되지 않았다.

**Abstract:** In this study, we demonstrated the operation of an electroosmotic pump with cylindrical porous glass frits and evaluated its long-term operation. The performance of this electroosmotic pump was characterized in terms of maximum flow rate, current, and pressure using deionized water and 1 mM borate buffer. The maximum flow rate, current, and pressure linearly increase with voltage. The maximum flow rate is normalized by the pumping area and voltage for comparison of the performance between the electroosmotic pumps with cylindrical and planar frits. The normalized maximum flow rate of the cylindrical-type pump is higher than that of the planar-type pump because of their different geometries. The cylindrical-type electroosmotic pump has five times better performance than the planar-type electroosmotic pump for a given pump package volume. It can operate stably for over 3 hours.

- 기호설명 -

$A$  : 다공성 유리막의 표면적 [ $m^2$ ]  
 $I$  : 전류 [A]  
 $L$  : 다공성 유리막의 두께 [m]  
 $Q$  : 유량 [mL/min]  
 $V_{app}$  : 적용 전압 [V]  
 $V_{EOP}$  : 전기삼투 펌프의 체적 [ $m^3$ ]  
 $p$  : 압력 [Pa]

$t$  : 시간 [s]  
 $a$  : 다공성 유리막의 세공크기 [m]  
 $\epsilon$  : 유전율 [F/m]  
 $\zeta$  : 제타 전위 [V]  
 $\mu$  : 점성 [Pa·s]  
 $\tau$  : 굴곡률 [-]  
 $\psi$  : 공극률 [-]  
 $\sigma_{\infty}$  : 전도도 [S/m]

### 1. 서론

† Corresponding Author, [daejoong@sogang.ac.kr](mailto:daejoong@sogang.ac.kr)  
 © 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

등과 같은 다양한 휴대용 장치들의 개발을 위한 마이크로유체(microfluidic) 기술들이 계속적으로 발전되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 마이크로유체 시스템에서 마이크로펌프(micropump)는 유체를 이동시키는 중요한 역할을 수행한다. 그러므로 압전소자(piezoelectric)를 이용한 왕복운동식(reciprocating) 펌프, 전기수력학적(electrohydrodynamic) 펌프, 전기삼투(electroosmotic) 펌프 등의 다양한 기술들이 연구되고 있다. Ashraf 등<sup>(4)</sup>에서는 최근 개발되고 있는 마이크로 펌프 기술들을 정리하였다.

전기삼투 펌프는 작은 체적에서 높은 유량과 압력을 동시에 발생할 수 있고, 전압의 조절만으로 쉽게 유량 및 유동방향을 조절할 수 있으며 구동부가 없기 때문에 소형화에 유리하다는 장점을 가진다. 그러므로 마이크로칩(microchip)의 냉각,<sup>(5)</sup> 직접메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell)의 연료 공급 장치,<sup>(6)</sup> 고분자 전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)의 공기 공급 장치,<sup>(7)</sup> 약물 전달(drug delivery) 장치<sup>(8)</sup> 등과 같은 다양한 마이크로유체 시스템에 적용이 연구되고 있다.

전기삼투 펌프 전기삼투 유동을 가능하게 하는 마이크로채널(microchannel) 또는 다공성 물질에 의하여 제작된다. 특히, 다공성 물질의 경우 마이크로채널의 네트워크 구조를 가지기 때문에 효율적으로 유량을 증가시킬 수 있다. 그러므로 다공성 유리막(porous glass frits),<sup>(9-11)</sup> 다공성 고분자막

(porous polymer membrane),<sup>(12)</sup> 다공성 산화 알루미늄 나막(porous anodic alumina membrane),<sup>(13)</sup> 다공성 실리콘막<sup>(14)</sup>을 이용한 연구가 보고되었다. 본 연구에서는 가격적으로 경쟁력이 있고, 안정적인 제타 전위(zeta potential)로 인하여 훌륭한 펌핑 특성을 가지는 다공성 유리막을 이용한 연구를 수행하였다. 특히, 기존 전기삼투 펌프들의 연구가 평면형의 다공성 막을 이용하고 있다는 점에 착안하여, 동일한 펌프 부피에서 넓은 펌핑 면적을 가질 수 있는 원통형 구조의 전기삼투 펌프에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 장시간 동안의 작동을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

원통형 전기삼투 펌프는 Fig. 1 과 같이 유체가 담긴 통에 직접 담가 사용할 수 있는 구조로 제작되었다. 전기삼투 펌프의 하우징은 가공이 용이한 아크릴로 제작되었고, 유체의 펌핑을 위한 원통형 다공성 유리막 (ROBU, Micro filter candle)은 하우징 사이에 위치되었다. 하우징과 원통형 다공성 유리막은 범용 에폭시(3M, DP190)를 사용하여 결합되었다. 펌프 외부로의 유체 이동을 위해 외경이 1.5 mm 인 스테인리스 관(Scanivalve Corporation)이 사용되었고, 전기삼투 펌프의 전기장 인가를 위하여 지름 0.3 mm 의 백금선(Nilaco Corporation,

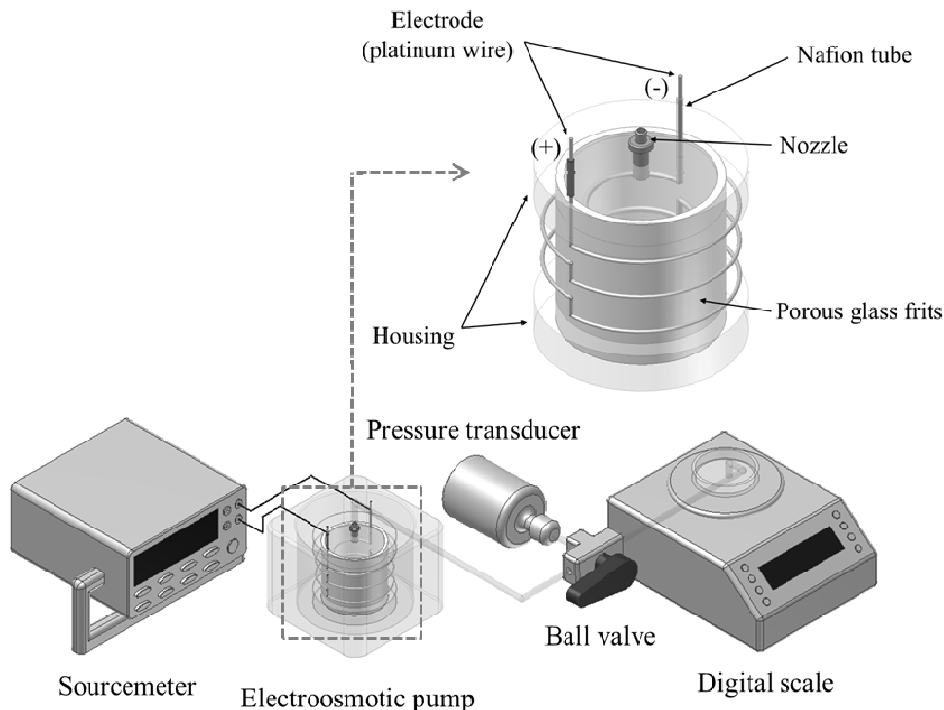


Fig. 1 Schematic of the cylindrical porous glass electroosmotic pump and experimental setup

PT351325, 99.98%)이 사용되었다. 펌프 챔버 내부의 기포가 생성되는 것을 막기 위하여 백금전극은 가스를 투과시키지 않는 나피온 튜브 (Perma Pure LLC)에 삽입된 후 위치되었다

원통형 다공성 유리막의 특성은 버니어캘리퍼스 (Mitutoyo)와 0.1 mg 의 정밀도를 가지는 전자저울 (Ohaus, VPG213C)을 이용하여 측정되었다. 원통형 다공성 유리막의 내경, 외경, 높이는 각각 13.02 mm, 5.92 mm, 19.8 mm 로 측정되었다. 원통형 다공성 유리막의 공극률(porosity)은 건조된 상태와 젖은 상태일 때의 무게 차이, 물의 밀도, 전체 막의 부피 값을 이용하여 계산되었다. 위와 같이 계산된 원통형 다공성 유리막의 공극률은 40%였다.

Fig. 1 는 펌프의 성능 측정을 위한 실험 장치 구성의 개략도이다. 전기삼투 펌프의 전압 인가 및 전류의 측정은 소스 미터(Keithley, 2410)가 이용되었다. 유량은 전자저울을 이용하여 5 초 간격으로 측정되었고, Balancetalk(Ohaus) 를 이용하여 컴퓨터에 데이터로 저장되었다. 압력은 압력센서 (Omega, PX303-015G5V)를 이용하여 측정되었고, 측정된 신호는 DAQ 보드(National Instrument, PCI 6220)를 이용하여 컴퓨터로 입력된 후, Labview 9.0 을 이용하여 압력 값으로 변환 및 저장되었다.

원통형 다공성 유리막은 실험을 수행하기 전 초음파 세척기를 이용하여 30 분 동안 세척되었고, 초음파 세척 후 12 시간 이상 탈이온수를 이용하여 펌핑되었다. 위와 같은 초기 세척 과정은 다공성 유리막의 제작과정에서 들어갈 수 있는 이물질들을 제거하여 실험 오차를 최소화했다. 다공성 유리막은 항상 마른 상태에서 보관되었으며, 실험 시작 전에 작동 유체를 주입하였다

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 원통형 전기삼투 펌프의 성능

Fig. 2 는 전압의 변화에 의한 원통형 전기삼투 펌프의 성능(최대유량, 최대전류, 그리고 최대압력)을 탈이온수와 1 mM 붕산염 완충액(buffer)을 이용하여 측정한 결과이다. 실험에서 전압은 10 V 씩 증가시켜 가며 최대 50 V 까지 적용하여 수행하였고, 각각의 전압에서 실험은 5 회 이상 반복 수행되었다. 실험 오차는 Fig. 2 의 에러바를 통해 확인할 수 있다.

전기삼투 펌프의 성능은 다양한 연구자들에 의하여 이론적으로 모델링 되었다.<sup>(15-17)</sup> 특히, Yao 와

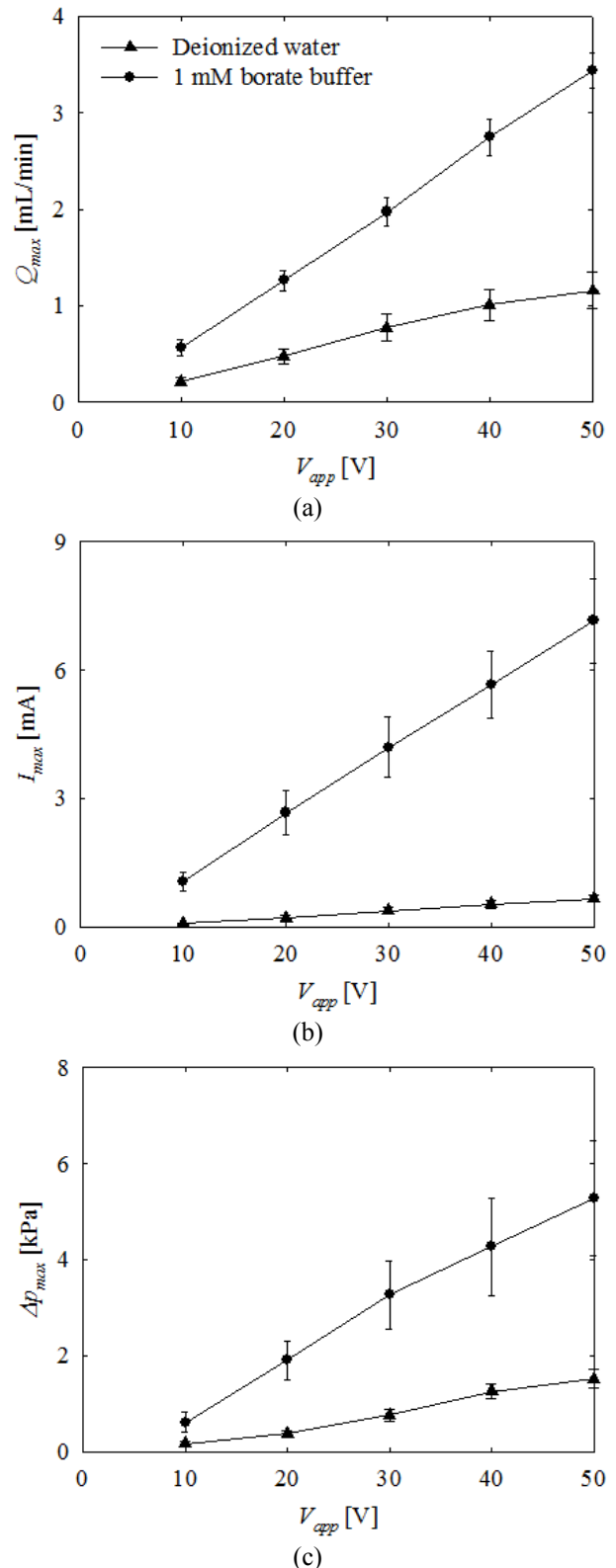


Fig. 2 Measured value of (a) Maximum flow rate, (b) maximum current, and (c) maximum pressure as a function of voltage ranged from 10 V to 50 V with an interval of 10 V

Santiago<sup>(16)</sup>에서는 다공성 물질의 세공을 크기가

동일한 원통형의 마이크로채널로 가정하여 분석용 모델을 제시하였다. 위 모델에서 최대유량, 최대전류 그리고 최대압력은 아래와 같이 표현되었다.

$$Q_{\max} = -\frac{\psi\epsilon\zeta AV_{\text{eff}}}{\tau\mu L} f \quad (1)$$

$$I_{\max} = -\frac{\sigma_{\infty}\psi AV_{\text{eff}}}{\tau Lg} f \quad (2)$$

$$\Delta p_{\max} = -\frac{8\epsilon\zeta V_{\text{eff}}}{a^2} f \quad (3)$$

전기삼투 펌프의 성능은 위에 제시된 이론 식에서와 같이 전압의 증가에 의하여 선형적으로 증가하였다. 1 mM 붕산염 완충액을 작동 유체로 사용할 때 최대유량, 최대전류, 최대압력이 탈이온수를 사용할 때 보다 높은 값을 가졌다. 이는 이론식에서 다공성 물질과 관련된 항을 제외한  $\epsilon$ (유전율),  $\sigma_{\infty}$  (이온전도도), 전기이중층의 두께와 관련된 상

관 계수(correlation factor)  $f$ ,  $g$ , 그리고  $\zeta$ (제타전위) 항들이 1 mM 붕산염 완충액에서 더 높은 값을 가지기 때문이다.

원통형 전기삼투 펌프의 실제 효율성을 확인하기 위하여 기존 평면형 다공성 유리막을 이용한 전기삼투 펌프의 실험 결과<sup>(18)</sup>와 비교해 보았다. 성능 비교는 먼저 최대유량을 표면적과 전압으로 나눈 표준화 유량(normalized flow rate)을 비교하였으며, 그 결과를 이용하여 동일한 전기 삼투 펌프의 부피로 환산한 결과와 비교하였다. Fig. 3 에서 표준화 유량과 동일한 펌프 부피로 환산한 비교 결과를 보여주고 있다. 표준화된 유량은 원통형 다공성 유리막이 평면형 다공성 유리막보다 1.5 배 높은 값을 가졌다. 이는 원통형 다공성 유리막과 평면형 다공성 유리막의 두께, 공극률, 굴곡률

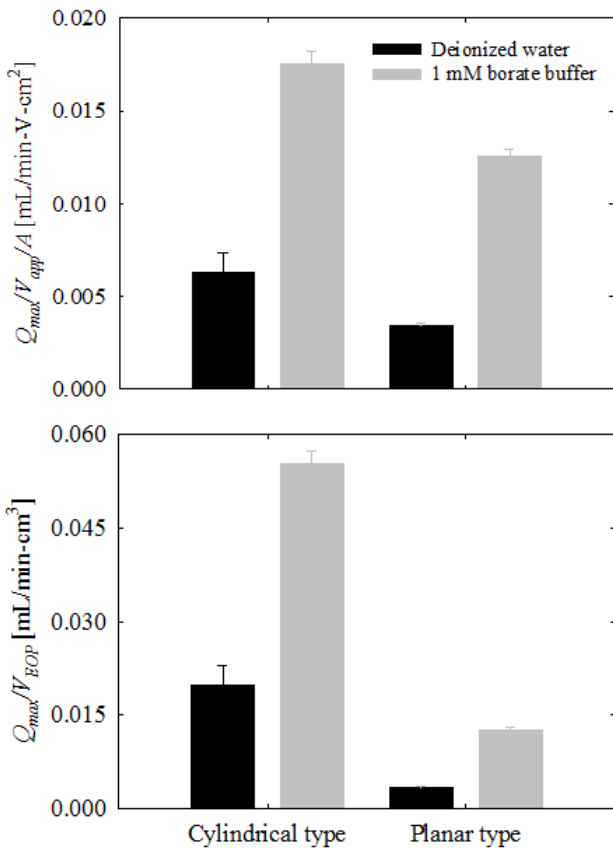


Fig. 3 Comparison of (a) the normalized flow rate (b) flowrate per the volume of the electroosmotic pumps between cylindrical porous glass frits and planar porous glass frits

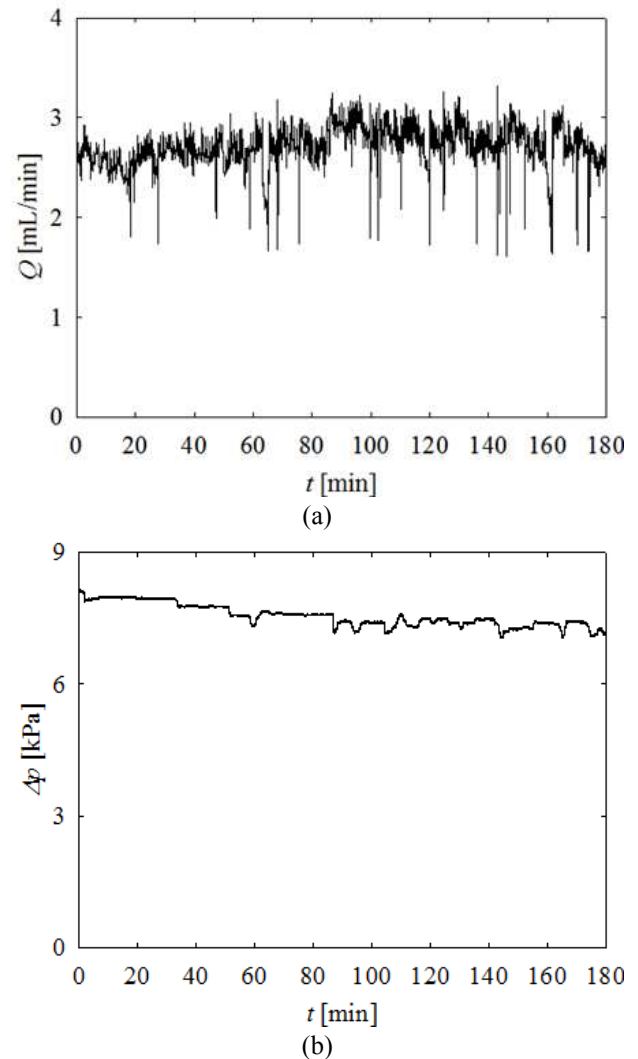


Fig. 4 Measured (a) Flow rate and (b) pressure a function of time for the cylindrical electroosmotic pump with 1 mM borate buffer at an applied voltage of 50 V

(tortuosity) 등과 같은 기하학적 부분의 차이에 의한 것으로 판단되었다. 전기삼투 펌프의 부피를 동일하게 가정하여 최대유량을 계산하였다. 그림에서와 같이 최대유량은 원통형 다공성 유리막에서 평면형 다공성 유리막보다 대략 5 배 증가하였다. 이는 동일한 부피에서 원통형 다공성 유리막의 펌핑 면적이 최대 원주율 만큼 증가할 수 있기 때문이다.

### 3.2 장시간 작동 안정성

Fig. 4는 1 mM 붕산염 완충액을 작동 유체로 하여 적용 전압이 50 V 일 때 유량과 압력을 3 시간 동안 측정한 결과이다 유량의 측정은 전자저울 대신 높은 정밀도를 가지는 유량센서(Sensirion, ASL1640)를 이용하였고, 유량센서의 하단부를 유체 저장함에 직접 연결하여 유체 수위가 변화하지 않도록 하였다. Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이 유량은 시간의 변화에 의하여 변동을 하지만, 실제 성능은 감소하지 않았다. 압력은 유량과 비교할 때 시간에 따른 변동폭이 크지 않았고, 거의 일정한 값을 가졌다. 이와 같은 안정적인 작동은 전기삼투 펌프의 내부 전극이 나피온 튜브에 삽입되기 때문에 전극 부분에서 전기분해에 의해 발생하는 가스들이 펌프 내부 공간에 갇히지 않고 외부로 효과적인 제거가 이뤄졌다고 판단하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 원통형 다공성 유리막 전기삼투 펌프의 제작 및 성능 평가를 수행하였다. 원통형 다공성 유리막 전기삼투 펌프의 성능은 이론식에서 예측하는 것과 같이 전압의 증가에 의하여 거의 선형적인 증가를 하였다. 1 mM 붕산염 완충액에서 높은 유전율과 이온 전도도 등에 의하여 탈이온수 보다 높은 성능을 보였다. 표준화 유량을 이용하여 기존 평면형 전기삼투 펌프와의 비교하였고, 형상적인 차이에 의하여 1.5 배 높은 값을 가졌다. 또한, 동일한 전기삼투 펌프의 부피에서는 원통형 다공성 유리막을 사용할 때 대략 5 배 정도의 유량 증가를 할 수 있음을 확인하였다. 그러므로, 원통형 다공성 유리막을 이용할 때 기존 평면형 다공성 유리막 보다 소형화에 유리할 것으로 예상하였다. 최종적으로 원통형 전기삼투 펌프의 장시간 안정성에 대한 평가를 수행하였다. 유량 및 압력 모두 3 시간 이상 거의 일정한 값을 유지하였다. 이는 원통형 전기삼투 펌프의 내부의 전극을 나피온 튜브에 삽입하여 전극 부분에서 발생

하는 가스들이 효과적으로 제거되었기 때문이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 일반연구자지원사업(기초) (과제번호: 2011-3103801)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- (1) Kundu, A.M., Jang, J. H., Gil, J. H., Jung, C. R., Lee, H. R., Kim, S. H., Ku, B., Oh, Y. S., 2007, "Micro-Fuel Cells- Current Development and Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 170, No. 1, pp. 67~78.
- (2) Lueke, J. and Moussa, W. A., 2011, "MEMS-Based Power Generation Techniques for Implantable Biosensing Applications," *Sensors*, Vol. 11, No. 2, pp. 1433~1460
- (3) Dutse, S. W. and Yusof, N. A., 2011, "Microfluidics-Based Lab-on-a-Chip Systems in DNA-Based Biosensing: An Overview," *Sensors*, Vol. 11, No. 6, pp. 5754~5768.
- (4) Ashraf, M. W.M., Tayyaba, S. and Afzulpurkar N., 2011, "Micro Electromechanical Systems (MEMS) Based Microfluidic Devices for Biomedical Applications," *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 12, No. 6, pp. 3648~3704.
- (5) Jiang, L., Mikkelsen, J., Koo J. M., Huber, D., Yao, S., Zhang, L., Zhou, P., Maverty, J. G., Prasher, R., Santiago, J. G., Kenny, T. W. and Goodson, K. E., 2002, "Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 25, No. 3, pp. 347~354.
- (6) Buie, C. R., Kim, D., Liester, S. and Santiago, J. G., 2007, "An Electro-Osmotic Fuel Pump for Direct Methanol Fuel Cells," *Electro Chemical and Solid-State Letters*, Vol. 10, No. 11, pp. B196~B200.
- (7) Kwon, K. and Kim, D., 2010, "Air Pumps for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Transactions of KSME (B)*, Vol. 34, No. 7, pp. 715~720.
- (8) Litster, S., Suss, M. E. and Santiago, J. G., 2010, "A Two-Liquid Electroosmotic Pump Using Low Applied Voltage and Power," *Sensors and Actuators A: Physics*, Vol. 163, No. 1, pp. 311~314.
- (9) Yao, S., Hertzog, D. E., Zeng, S. and Santiago, J. G., 2003, "Porous Glass Electroosmotic Pumps: Design and Experiments," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 268, No. 1, pp. 143~153.
- (10) Kim, D., Posner J. D. and Santiago, J. G., 2008, "High Flow Rate per Power Electroosmotic Pumping

- Using Low Ion Density Solvents,” *Sensors and Actuators A: Physics*, Vol. 141, No. 1, pp. 201~212.
- (11) Kwon, K. and Kim, D., 2011, “Characterization of Electroosmotic Pumps Using Methanol/Water Mixtures with Various Compositions,” *Sensors and Actuators A: Physics*, Vol. 166, No. 1, pp. 88~93.
- (12) Zeng, S., Chen, C. H., Santiago, J. G., Chen, J. R., Zare, R. N., Tripp, J. A., Svec, F. and Frechet, J. M., 2002, “Electroosmotic flow pumps with polymer frits,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 82, No. 2-3, pp. 209~212.
- (13) 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,” *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 6, No. 2, pp. 145~162.
- (14) Yao, S., Myers, A. M., Posner, J. D., Rose, K. and Santiago, J. G., 2006, “Electroosmotic Pumps Fabricated from Porous Silicon Membranes,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 717~728.
- (15) Zeng, S.M Chen, C. H., Mikkelsen, J. C. and Santiago, J. G., 2002, “Fabrication and Characterization of Electroosmotic Micropumps,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 79, No. 2-3, pp. 107~114.
- (16) Yao, S. and Santiago, J. G., 2003, “Porous Glass Electroosmotic Pumps: Theory,” *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 268, No. 1, pp. 133~142.
- (17) Griffiths, S. K. and Nilson, R. H., 2005, “The Efficiency of Electrokinetic Pumping at a Conditions of Maximum Work,” *Electrophoresis*, Vol. 26, No. 1, pp. 351~361.
- (18) Kwon, K., Park, C. W. and Kim, D., 2011, “Comparison of Electro-Osmotic Pumps with Two Different Types of Porous Glass Frits,” *Transactions of KSME (B)*, Vol. 35, No. 4, pp. 379~383.