

두 종류의 다공성 유리막을 이용한 전기삼투 펌프의 비교 연구

권길성* · 박철우* · 김대중*†

* 서강대학교 기계공학과

Comparison of Electro-Osmotic Pumps with Two Different Types of Porous Glass Frits

Kilsung Kwon*, Chul-Woo Park* and Daejoong Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received September 8, 2010 ; Revised October 28, 2010 ; Accepted January 19, 2011)

Key Words: Electro-Osmotic Pump(전기삼투 펌프), Porous Glass Frits(다공성 유리막), Thermodynamics Efficiency(열역학적 효율)

초록: 본 연구에서는 두 종류의 다공성 유리막을 이용하여 전기삼투 펌프를 제작하였다. 전기삼투 펌프의 성능은 탈이온수와 1 mM 나트륨 테트라붕산염 데카수화물 완충액을 이용하여 최대유량, 최대전류 그리고 최대압력의 향으로 표현하였다. 최대유량과 최대전류는 ROBU 사의 다공성 유리막의 높은 공극률에 기인하여 DURAN 사의 다공성 유리막 보다 높은 값을 가졌다. 그러나 최대압력은 비슷하였다. 열역학적 효율은 ROBU 사의 다공성 유리막이 DURAN 사의 다공성 유리막보다 2 배 정도 높은 값을 가졌으며, 최대유량당 최대전류 역시 ROBU 사의 다공성 유리막이 높은 값을 가졌다. 그러나 최대압력당 최대전류는 DURAN 사의 다공성 유리막에서 더 높은 값을 가졌다. 본 연구에서는 ROBU 사의 다공성 유리막은 낮은 출력으로 높은 유량을 구현할 수 있고, DURAN 사의 다공성 유리막은 낮은 출력으로 높은 압력을 구현할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: Electro-osmotic pumps were fabricated by using two types of porous glass frits. The performance of these pumps was characterized in terms of maximum flow rate, current, and pressure using deionized water and 1 mM sodium tetraborate decahydrate buffer. Maximum flow rate and current when ROBU porous glass frits were used were higher than those when DURAN porous glass frits were used because of the high porosity of the ROBU glass frits. However, the maximum pressure when ROBU glass frits were used was similar to that when DURAN glass frits were used. The thermodynamic efficiency of a pump with ROBU porous glass frits is approximately twice that of a pump with DURAN porous glass frits. Further, the maximum flow rate at maximum current in the case of ROBU porous glass frits is high. However, it is lower than the maximum pressure at maximum current in the case of DURAN porous glass frits. Further, in this study, we also verified the effectiveness of ROBU glass frits when high flow rate is required and of DURAN glass frits when a high pressure is required.

- 기호설명 -

A : 다공성 유리막의 표면적 [m^2]
 I : 전류 [A]
 L : 다공성 유리막의 두께 [m]
 Q : 유량 [mL/min]
 V : 전압 [V]
 p : 압력 [Pa]
 a : 다공성 유리막의 세공크기 [m]

ϵ : 유전율 [F/m]
 ζ : 제타전위 [V]
 η : 열역학적 효율 [%]
 μ : 점성 [Pa-s]
 τ : 굴곡률
 ψ : 공극률
 σ : 이온 전도도 [S/m]

1. 서론

† Corresponding Author, daejoong@sogang.ac.kr
 © 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

최근 랩온어칩(lab-on-a-chip) 등의 다양한 마이크로 유체 시스템(microfluidic system)의 개발로 높은 유량

과 압력을 발생할 수 있는 마이크로펌프가 요구되고 있다.⁽¹⁾ 전기삼투 펌프(electro-osmotic pump)는 작은 체적에서 높은 유량과 압력을 동시에 발생할 수 있다는 점과 전압의 변화로 쉽게 유량 및 유동 방향을 조절할 수 있다는 점 그리고 기계적 구동부가 없다는 점 때문에 마이크로유체 시스템의 유체공급장치로 주목을 받고 있다.⁽²⁾ 그러나 전기분해에 의한 기포 발생 및 낮은 효율 등의 문제점들을 가지고 있다. 위와 같은 문제점들의 개선을 위해 현재 다양한 연구가 진행되고 있으며 Wang 등⁽³⁾에서는 위와 관련된 다양한 연구를 보고하였다.

전기삼투 펌프는 금속산화물이나 고분자 등 고체 표면에 극성 용액(polar solutions)이 접촉할 때 자발적으로 유한한 표면 전하를 가지게 되는 동전기적(electrokinetic) 현상 중 전기삼투 현상을 이용한다.⁽⁴⁾ 전기삼투 펌프는 전기삼투 현상을 가능하게 하는 마이크로채널(microchannel)이나 마이크로미터 크기의 세공(pore)을 가진 다공성 물질(porous media)을 이용하여 제작된다. 특히, 다공성 물질의 경우 마이크로채널의 네트워크 구조로 다공성 유리막(porous glass frits),⁽⁵⁾ 다공성 실리콘막(porous silicon membrane),^(1,6,7) 다공성 산화 알루미늄막(porous anodic alumina membrane),⁽⁸⁻¹⁰⁾ 등의 적용이 보고되고 있다. 본 연구에서는 전자칩의 냉각,⁽¹¹⁾ 연료전지의 물 관리(water management)⁽¹²⁾와 연료 및 공기 공급 장치^(13,14) 등의 응용 분야들에 가장 활발히 적용되고 있는 다공성 유리막을 이용하여 전기삼투 펌프를 제작하였다. 또한, 두 종류의 작동유체(탈이온수(deionized water), 1 mM 나트륨 테트라보산염 데카수화물 완충액(sodium tetraborate decahydrate buffer))를 사용하여 성능을 측정하였고, 열역학적 효율(thermodynamic efficiency), 최대유량당 최대전류 그리고 최대압력 당 최대전류로 두 종류의 다공성 유리막을 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1 다공성 유리막 비교

본 연구에서 사용한 두 개의 다공성 유리막의 특성은 Table 1 에서 확인할 수 있다. 막의 지름과 두께는 버니어캘리퍼스(Mitutoyo)를 이용하여 측정하였다. 두 다공성 막의 지름과 두께는 큰 차이를 보이지 않았다. 무게는 0.01 mg 의 정밀도를 가지는 전자저울(METTLER TOREDO, AB-265)을 사용하여 측정하였고, DURAN 사의 다공성 유리막이 0.8 g 더 무거웠다. 다공성 유리막의 공극률(porosity)은 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 먼저, 탈이온수를 이용하여 막이 젖은 상태일 때의

Table 1 Characteristics of DURAN and ROBU porous glass frits

Specification	DURAN	ROBU
Diameter [mm]	40	40
Thickness [mm]	4.1	4.2
weight [g]	8.1	7.3
Porosity	0.24	0.34
Pore size [μm] ^(15,16)	1.0~1.6	0.9~1.4

무게를 측정하고, 24 시간 동안 상온에서 막을 건조시킨 후 건조 상태일 때의 무게를 측정하였다. 그 후 젖은 상태와 건조 상태일 때 무게의 차이 값과 상온에서의 물의 밀도 그리고 전체 막의 부피 값을 이용하여 계산하였다. 공극률은 ROBU 사의 다공성 유리막이 대략 1.5 배 높은 값을 가졌다. 화학적 조성비의 경우 두 개의 막에서 큰 차이를 보이지 않았다.^(15,16) 다만 ROBU 사의 다공성 유리막에는 Fe_2O_3 , CaO , MgO 그리고 C 가 1 %미만으로 포함되었고, DURAN 사의 다공성 유리막에는 포함 여부를 확인할 수 없었다.

2.2 실험 장치 구성

전기삼투 펌프의 구조는 Fig. 1 과 같다. 펌프 하우징은 용매에 대한 내성이 좋은 폴리염화비닐(PVC)로 제작하였고, 실험의 용이성을 위해 총 세 개의 부분으로 분리하였다. 다공성 유리막은 범용 에폭시(epoxy, 3M DP190)를 이용하여 하우징에 접착하였다. 분리된 하우징 사이에는 에틸렌프로필렌고무(EPDM) 개스킷을 삽입하여 유체의 누수를 방지하였고, 결합은 총 7 개의 볼트를 이용하였다. 펌프 외부로의 유체 이동을 위해 외경이 1.5 mm 인 스테인리스 관(Scanivalve Corporation)을 사용하였고, 전기삼투 펌프의 전기장 인가를 위하여 순도 99.99 %의 백금선(지름 0.03 mm, 길이 200 mm)을 사용하였다. 백금선은 효과적인 전기장 인가를 위하여 나선형 모양으로 하였다.

Fig. 2 는 펌프의 성능을 측정하기 위한 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 전기삼투 펌프의 전압 인가 및 전류의 측정은 소스 미터(sourceter, Keithley, 2410)를 이용하였다. 유량 측정은 액체 메니스커스의 이동을 유관으로 관찰함을 통하여 실시하였고, 압력 측정은 압력센서(Omega, PX303-015G5V)를 이용하였다. 압력 센서의 신호처리는 DAQ 보드와 Labview 9.0 을 이용하였다.

다공성 유리막은 실험을 수행하기 전 초음파 세척기를 이용하여 1 시간 동안 세척을 하였고, 세척 후 6 시간 이상 탈이온수를 이용하여 펌핑하였다.

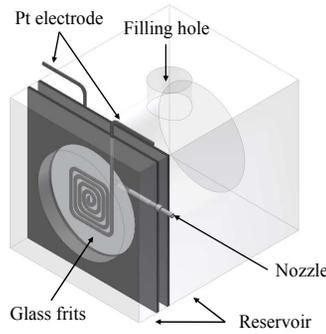


Fig. 1 Schematic of electro-osmotic pump

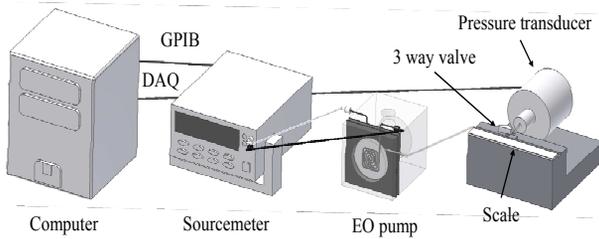


Fig. 2 Schematic of experimental setup

매 성능 측정 전 실험의 에러를 최소화하기 위하여 10 분간 추가적인 세척을 하였다

3. 실험 결과

Fig. 3 은 전압의 변화에 따른 두 종류의 다공성 유리막의 성능(최대유량, 최대전류 그리고 최대압력)을 두 종류의 유체를 이용하여 각각 측정한 결과이다. 탈이온수에서는 10 V 씩 전압을 증가시켜 가며 최대 100 V 까지 실험을 수행하였고, 1 mM 나트륨 테트라붕산염 데카수화물 완충액에서는 소스미터의 출력한계에 의해 최대 50 V 전압까지 실험을 수행하였다. 실험은 다공성 유리막과 유체에서 각각 5 회 이상 반복 수행하였다. 반복 수행한 결과는 Fig. 3 의 에러 바를 통해 확인할 수 있다.

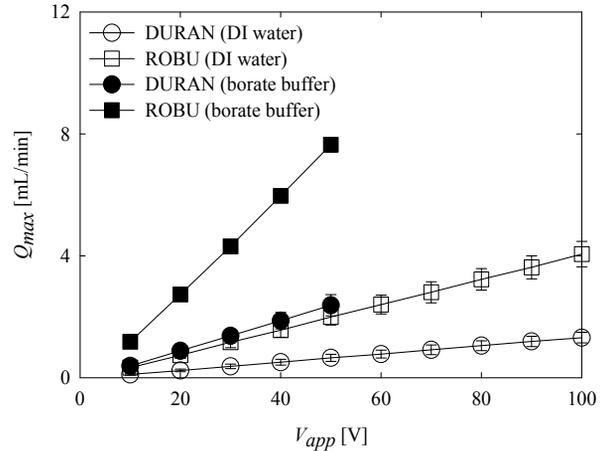
전기삼투 펌프의 성능은 Yao 와 Santiago⁽⁴⁾에서 이론적으로 정립되었다. 이론 식에서 최대유량, 최대전류 그리고 최대압력은 식 (1), (2), (3)과 같이 표현되었다.

$$Q_{max} = -\psi \varepsilon \zeta A V_{eff} / \tau \mu L \quad (1)$$

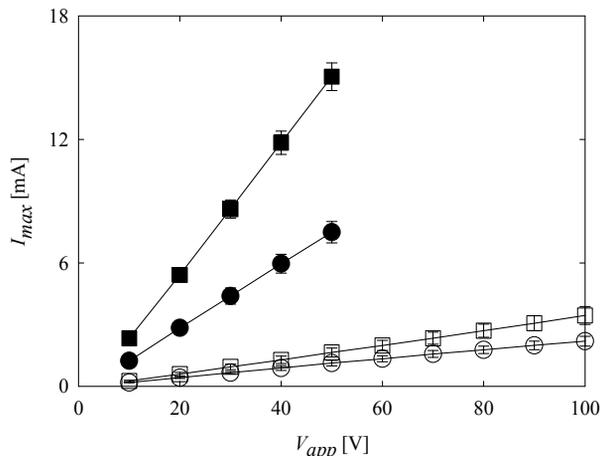
$$I_{max} = \sigma \infty \psi A V_{eff} / \tau L g \quad (2)$$

$$\Delta p_{max} = -8 \varepsilon \zeta V_{eff} / a^2 \quad (3)$$

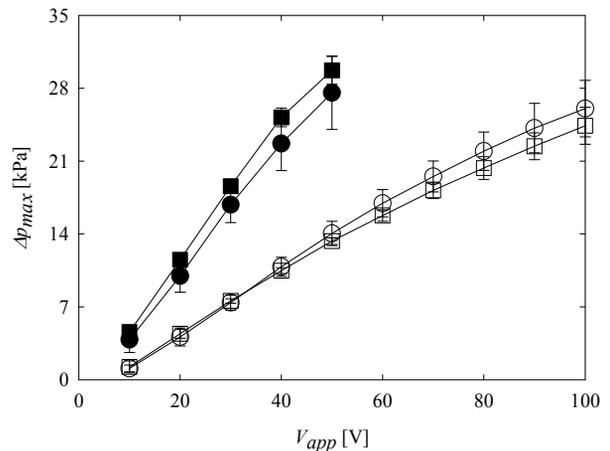
전기삼투 펌프의 성능은 이론 식에서와 같이 전압의 증가에 의해 선형적으로 증가하였다. 최대유량은 ROBU 사의 다공성 유리막이 DURAN 사의



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 (a) Maximum flow rate, (b) maximum current, and (c) maximum pressure versus applied voltage

다공성 유리막보다 두 작동유체 모두에서 대략 3 배 높은 값을 가졌다. 최대 전류 역시 대략 2 배 높은 값을 가졌다. 위와 같은 결과는 최대유량과 최대전류의 식에 포함된 공극률에 의한 영향으로 생각된다. 이는 식 (1)과 (2)에서 실험에 사용된 작동유체는 동일하기 때문에 유체와 관련된 항인

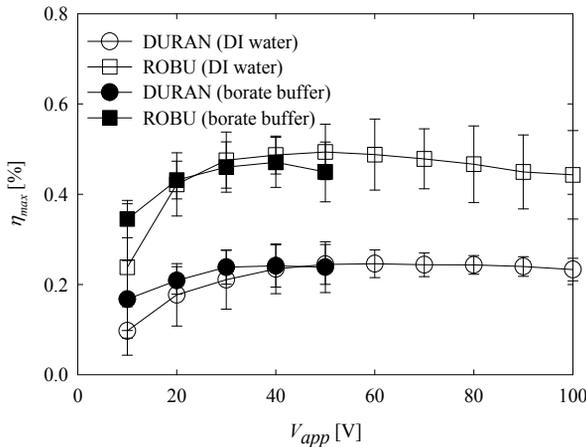


Fig. 4 Maximum thermodynamic efficiency versus applied voltage.

유전율, 점성 그리고 이온 전도도 등은 동일하다고 할 수 있고, Table 1 에서 확인할 수 있듯이 막의 두께와 표면적에 대한 영향도 무시할 수 있다. 또한, 유리막과 작동 유체와 관계된 항인 제타포텐셜(zeta potential) 역시 막의 성분에 차이가 없기 때문에 비슷한 값을 가진다고 할 수 있다. 그러므로 공극률이 성능 실험에서 주된 변수로 작용하였다고 할 수 있다. 최대압력은 두 다공성 유리막에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 이론식에서 주된 변수로 작용하는 세공 크기가 큰 차이를 보이지 않았기 때문이다.

전기삼투 펌프의 모델 식을 조합하면 전기삼투 펌프의 비교를 위한 다양한 성능 계수들을 유도할 수 있다. 다양한 성능 계수들 중 최대 열역학적 효율은 전기삼투 펌프의 근본적인 요소로서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\eta_{max} \approx Q_{max} \Delta p_{max} / 2I_{max} V_{eff} = 8\varepsilon^2 \zeta^2 fg / \mu \sigma \infty a^2 \quad (4)$$

Fig. 4 는 전압 변화에 따른 두 개의 다공성 유리막의 열역학적 효율을 비교한 결과이다. 열역학적 효율은 두 유체에서 비교적 비슷한 값을 가졌다. 그러나 ROBU 사의 다공성 유리막이 DURAN 사의 다공성 유리막보다 대략 2 배 높은 값을 가졌다. 열역학적 효율은 10 V 에서 가장 낮은 효율을 가졌고, 20 V 이상에서는 오차 범위 내로 거의 일정한 값을 가졌다.

전기삼투 펌프에서 열역학적 효율은 위에서 언급했듯 근본적인 성능 계수라고 할 수 있다. 그러나 열역학적 효율만으로 전기삼투 펌프의 성능을 모두 평가할 수는 없다. Kim 등⁽¹⁷⁾에서는 전기삼투 펌프의 성능 계수로 전기삼투 펌프의 전류 당 유

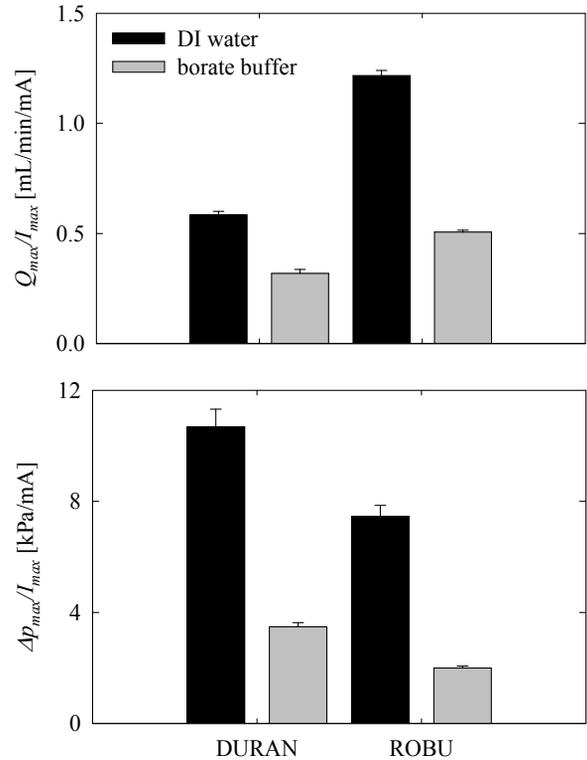


Fig. 5 Comparison of maximum flow rate and pressure per maximum current between ROBU and DURAN porous glass frits

량의 중요성에 대해 설명하였다. 이는 전기삼투 펌프가 소비출력 당 얼마만큼의 유동능력을 보일 수 있는지를 확인하는 항으로 본 연구에서는 두 종류의 다공성 유리막의 최대유량당 최대전류와 최대압력당 최대전류를 각각 비교하였다.

Fig. 5 는 두 개의 다공성 유리막 전기삼투 펌프에서의 최대유량당 최대전류와 최대압력당 최대전류를 비교한 결과로, 모두 최대전류가 낮았던 탈이온수에서 1 mM 나트륨 테트라 붕산염 데카수화물완충액보다 높은 값을 가졌다. 최대유량당 최대전류는 ROBU 사의 다공성 유리막이 DURAN 사의 다공성 유리막보다 대략 2 배 높은 값을 가졌다. 그러나 최대압력당 최대전류는 DURAN 사의 다공성 유리막이 ROBU 사의 다공성 유리막보다 높은 값을 가졌다. 이는 최대압력당 최대전류의 경우 공극률의 항이 분모항에 위치하게 되고 그로 인해 공극률의 차이가 최대압력당 최대전류의 항의 값의 차이를 가져왔다. 위의 결과로 본 연구에서는 높은 유량을 요구하는 환경에서는 ROBU 사의 다공성 유리막 전기삼투 펌프가 효과적이고, 높은 압력을 요구하는 환경에서는 DURAN 사의 다공성 유리막이 훨씬 더 효과적임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 ROBU 사와 DURAN 사의 다공성 유리막을 이용하여 전기삼투 펌프를 제작하였고, 성능을 측정하였다. ROBU 사의 다공성 유리막은 DURAN 사의 다공성 유리막보다 최대유량과 최대전류는 높은 값을 가졌고, 최대압력은 비슷하였다. 두 다공성 유리막의 비교를 위하여 전기삼투 펌프의 성능계수인 열역학적 효율과 최대유량당 최대전류 그리고 최대압력당 최대전류를 이용하였다. 열역학적 효율은 ROBU 사의 다공성 유리막이 DURAN 사의 다공성 유리막보다 2 배정도 큰 값을 가졌으며, 최대유량당 최대전류 역시 높은 값을 가졌다. 그러나 최대압력당 최대전류의 경우 DURAN 사의 다공성 유리막이 ROBU 사의 다공성 유리막보다 높은 값을 가졌다. 위의 결과로 전체적인 성능과 높은 유량을 요구하는 환경에서는 ROBU 사의 다공성 유리막 전기삼투 펌프가 효과적이고, 높은 압력을 요구하는 환경에서는 DURAN 사의 다공성 유리막 전기삼투 펌프가 효과적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 국방 기초/특화분야 국제공동사업(과제번호: 2009-0067345) 지원과 2008 년도 서강대학교 교내연구비(과제번호: 200810026) 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Wallner, J. T., Nagar, N., Friedrich C. R. and Bergstrom, P. L., 2007, "Macro Porous Silicon as Pump for Electro-Osmotic Pumps," *Physica Status Solidi (a)*, Vol.204, No.5, pp.1327~1331.
- (2) Laser, D. J. and Santiago, J. G., 2004, "A Review of Micropumps," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.14, No.6, pp.R35~R64.
- (3) Wang, X., Cheng, C., Wang, S. and Liu S., 2009 "Electroosmotic Pumps and Their Applications in Microfluidic Systems," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol.6, No.2, pp.145~162.
- (4) 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.
- (5) Yao, S., Hertzog, D. E., Zeng S., Mikkelsen, J. C. 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.
- (6) 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.
- (7) Kwon, K. and Kim, D., 2010, "Development of Porous Silicon Electro-Osmotic Pumps for High Flow Rate per Current Flow Delivery of Organic solvents," *Transactions of the KSME (B)*, Vol.34, No.2, pp.105~111.
- (8) 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.
- (9) Chen, Y. F., Hu, Y. H., Chou Y. I., Lai S. M. and Wang C. C., 2010, "Surface Modification of Nano-Porous Anodic Alumina Membranes and Its Use in Electroosmotic Flow," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol.145, No.1, pp.575~582.
- (10) Vajandar, S. K., Xu, D., Markov D. A., Wikswo J. P., Hofmeister, W. and Li, D., 2007, "SiO₂-Coated Porous Anodic Alumina Membranes for High Flow Rate Electroosmotic Pumping," *Nanotechnology*, Vol.18, No.27, pp.275705
- (11) Jiang, L., Mikkelsen, J., Koo, J. M., Huber, D., Yao, S., Zhang, L., Zhou P., Maveety, J. G., Prasher, R., Santiago, J. G., Kenny, T. W. and Goodsen K. E., 2002, "Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.25, No.3, pp.347~355
- (12) Buie, C. R., Posner, J. D., Fabian, T., Cha, S. 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.
- (13) Buie, C. R., Kim, D., Liester, S. and Santiago, J. G., 2007, "An Electro-Osmotic Fuel Pump for Direct Methanol Fuel Cells," *ElectroChemical and Solid-State Letters*, Vol.10, No.11, pp.B196~B200
- (14) Kwon, K. and Kim, D., 2010, "Air Pumps for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 34, No. 7, pp. 715~720.
- (15) <http://www.duran-group.com/>
- (16) <http://www.robuglas.com/>
- (17) Kim, D., Posner J. D. and Santigo 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.