

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.105

# 단위전류당 고유량 유기용매 이송을 위한 다공성 실리콘막 전기침투 펌프의 개발

권길성\* · 김대중\*\*

\* 서강대학교 기계공학과

## Development of Porous Silicon Electro-osmotic Pumps for High Flow Rate Per Current Flow Delivery of Organic Solvents

Kilsung Kwon\* and Daejoong Kim\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received May 11, 2009 ; Revised December 2, 2009 ; Accepted December 5, 2009)

**Key Words :** Electroosmotic Pump(전기침투 펌프), Porous Silicon Membrane(다공성 실리콘막), Organic Solvent Pumping(유기용매 이송)

**초록:** 양극산화법과 DRIE 법으로 제작된 다공성 실리콘막을 이용하여 두 종류의 전기침투 펌프를 제작하였다. 펌프의 성능은 유기용매를 이용하여 유량과 단위전류당 유량으로 측정하였다. 두 종류 펌프 모두 기존의 다공성 유리막으로 제작된 전기침투 펌프보다 성능이 우월했다. 특히 DRIE 법으로 제작된 다공성 실리콘막은 유량과 단위전류당 유량이 모두 월등한 성능을 보였다. DRIE 법은 널리 알려진 방법이기 때문에 이와 같이 제작된 펌프는 다양한 응용 분야에 비교적 쉽게 적용될 것으로 기대된다.

**Abstract:** Two types of electro-osmotic pumps were prepared: with anodized and DRIE porous silicon. The pump performance was characterized for both types in terms of flow rate and flow rate per current using organic solvents. Both types of electro-osmotic pumps showed a better performance compared to porous glass electro-osmotic pumps. The DRIE porous silicon electro-osmotic pump especially demonstrated an excellent flow rate and flow rate per current performance. The DRIE porous silicon electro-osmotic pump is expected to help in the development of electro-osmotic pumps and micropumps in general due to the recently widespread availability of DRIE processes.

- 기호설명 -

### 1. 서론

- A : 다공성 실리콘막의 단면적(m<sup>2</sup>)
- L : 다공성 실리콘막의 두께(m)
- a : 다공성 실리콘막의 세공 크기(m)
- Q : 유량(ml/min)
- V : 전압(V)
- I : 전류(A)
- P : 압력(Pa)
- μ : 점성계수(Pa·s)
- ε : 액체의 유전률(F/m)
- σ : 전기전도도 (S/m<sup>2</sup>)
- ζ : 제타포텐셜(V)
- ψ : 공극률 (-)
- τ : 굴곡률 (-)

최근 마이크로펌프(micropump)는 다양한 바이오 기술, 전자칩 냉각, 그리고 연료 전지 등에 응용될 수 있는 연구 분야로서 주목을 받고 있다.<sup>(1)</sup> 마이크로 펌프는 크게 기계적인 구동부를 가지고 있는 펌프와 아닌 펌프로 나뉜다. 기계적인 구동부를 가지고 있는 펌프의 대표적인 예는 피에조 펌프(piezoelectric micropump)로서 피에조 막의 양 방향 운동을 일 방향 운동으로 전환하는 데에 이용되는 체크 밸브와 같은 기계적인 구동부를 가지고 있다.<sup>(2)</sup> 기계적 구동식 펌프의 단점은 소음이나 진동이 발생한다는 점과 마이크로 스케일에서 특히 그 중요성이 큰 마찰이나 마모와 같이 시스템의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있는 요소들 가지고 있다는 점을 들 수 있다.<sup>(3)</sup> 반면에 전기침투

† Corresponding Author, daejoong@sogang.ac.kr

펌프(electroosmotic pump)와 같이 전기적 에너지를 운동에너지로 직접 변환함으로써 기계적인 구동부를 필요로 하지 않는 방식의 펌프는 이러한 단점을 피할 수 있다.<sup>(4)</sup> 본 논문은 이러한 전기침투 펌프에 대하여 보고한다.

전기침투 펌프의 가장 큰 장점은 단위 체적 당 높은 유량을 발생할 수 있다는 점이다.<sup>(6)</sup> 또한 전기침투 펌프는 소형화된 구조에서도 1 기압 이상의 상당한 압력을 발생할 수 있고 대개 수십에서 수백 볼트의 비교적 낮은 전압에서 작동한다. 이러한 장점에 의하여 전자칩의 냉각,<sup>(6)</sup> 액체 크로마토그래피 장치,<sup>(7)</sup> 약물 전달(drug delivery) 장치,<sup>(8)</sup> 마이크로밸브<sup>(9)</sup> 그리고 연료전지의 물 관리<sup>(10)</sup> 등의 응용 분야를 위하여 전기침투 펌프가 연구, 개발되고 있다. 이와 같은 여러 장점과 다양한 응용 가능성에도 불구하고 전기침투 펌프는 작동과정에서의 기포 발생으로 인한 유동의 불안정성 문제와 물이나 알코올과 같은 극성 유체에 적용이 가능하다는 단점이 여전히 있다. 또한 펌프의 효율이 비교적 낮은 단점이 있어 이들을 개선하기 위한 여러 연구들(본 논문 포함)이 진행 중에 있다.

전기침투 펌프의 주요 부품은 전기침투 현상을 가능하게 하는 마이크로미터 크기의 세공(pore)을 가진 다공성 물질(porous media)이나 마이크로채널(microchannel)이다. 최초의 전기침투 펌프는 1-20 $\mu\text{m}$ 의 이산화규소와 붕소 유리 입자들의 소결(sintering)과 패킹(packaging)에 의해 제작되었다.<sup>(7,8,11~14)</sup> 이후 유리 또는 실리콘 기판에 평면상의 마이크로 가공을 사용하여 전기침투 펌프가 제작되었다.<sup>(15,16)</sup> 또한 전기침투 펌프는 다공성 유리<sup>(17)</sup>와 Nafion 과 같은 이온교환막<sup>(18,19)</sup> 그리고 다공성 알루미늄나막<sup>(20)</sup> 등을 이용하여서도 제작되고 있다. 본 연구에서는 다공성 실리콘막을 이용하여 전기침투 펌프를 제작하였다.

다공성 실리콘막은 최근 연료전지의 전해질막이나 실리콘 양자선(quantum wire) 등 광범위한 응용 가능성 때문에 그 관심이 증가하고 있다.<sup>(21-23)</sup> 다공성 실리콘막은 다른 다공성 막과 비교하여 세공 모양이 원통형에 가깝고 굴곡이 거의 없으며 각 세공 사이가 대체로 촘촘한 편이다.<sup>(5)</sup> 양극산화법(anodization)으로 제작된 다공성 실리콘막은 Yao et al 에 의하여 전기침투 펌프로 활용되었고,<sup>(5)</sup> 본 논문에서는 이들과 같은 양극산화법에 의한 다공성 실리콘막과 깊은 반응성 이온 식각법(DRIE, deep reactive ion etching)으로 제작된 다공성 실리콘막의

두 가지를 전기침투 펌프에 적용하여 실험을 수행하였다. 또한 작동 유체로 유기용매인 메탄올과 아세톤을 사용하여 펌프의 성능 계수 중 하나인 단위 전류당 유량을 극대화할 수 있는 전기침투 펌프를 개발하였다. 다공성 실리콘막을 이용한 실험 결과를 기존의 다공성 유리를 이용한 실험 결과와 비교하여 그 장단점에 대하여 고찰하였다.

## 2. 전기침투 펌프의 작동 원리

금속 산화물이나 고분자 등 많은 고체 표면에 극성 용액(polar solution)이 접촉할 때 자발적으로 유한한 표면 전하를 가지게 되는데 이와 관련된 여러 유체 현상을 동전기(electrokinetic) 현상이라고 한다.<sup>(24)</sup> 특히 고체가 정적이고 유체가 동적으로 움직일 때를 가리켜 전기침투 유동(electroosmotic flow)이라 한다. 예를 들어 유리 표면이 물과 같은 극성 용액과 접촉을 하게 되면 표면에 있는 Silanol group 이 산화되어 음의 표면 전하를 띠게 된다. 대전된 표면은 같은 극의 음이온에는 척력을 작용하고 같은 극의 양이온에는 인력을 작용하여 표면 주위에는 주로 양이온으로 구성된, 소위 전기이중층(EDL, electric double layer)이 형성되게 된다. 이 때 외부의 전기장이 고체의 표면에 수평하게 인가되면, 전기이중층의 양전하들은 전기장의 방향으로 움직이게 된다. 이 이동하는 이온들은 물체력(body force)으로 작용하여 유체의 흐름을 발생시키게 된다. 이러한 유동을 전기침투 유동이라고 한다.

전기침투 펌프는 전기침투 유동을 활발하게 일으키기 위하여 흔히 다공성 물질을 포함하게 된다. 이 때 다공성 물질 내의 세공을 통한 전기침투 유동은 원통형 마이크로 채널에서 동일한 구멍 크기로 모델링될 수 있다. 그리하여 전기침투 펌프의 성능은 다공성 물질의 전체 크기, 세공 크기(pore size), 굴곡률(tortuosity), 공극률(porosity) 등을 사용하여 모델화 할 수 있다. 유량은 적용된 전압과 압력에 대하여 다음과 같은 식으로 표현된다.<sup>(24)</sup>

$$Q = \frac{\psi}{\tau} \left[ -\frac{PAa^2}{8\mu L} - \frac{\epsilon\zeta AV_{eff}}{\mu L} f \right] \quad (1)$$

본 연구에서 사용된 다공성 실리콘막의 세공은 똑바른 원통형에 가까우므로 굴곡률을 1로 볼 수 있다. 또한 배압이 걸리지 않은 상태에서 실험을 수행하였으므로 본 연구에서 유량과 전류는 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>(17)</sup>

$$Q = -\psi A \epsilon \zeta V_{eff} f / (\mu L) \quad (2)$$

$$I = \psi A \sigma V_{eff} f / (Lg) \quad (3)$$

특히 본 연구에서는 단위 전류당 유량을 극대화하기 위한 다공성 실리콘막과 유기 용매의 활용하였는데 이때 단위 전류당 유량은 아래와 같이 표현된다.

$$Q/I = -\epsilon \xi g / (\mu) \quad (4)$$

### 3. 실험 방법

#### 3.1 다공성 실리콘막의 제작

양극산화법 다공성 실리콘막은 Yao et al의 논문에서 쓰인 다공성 실리콘막과 동일하다.<sup>(5)</sup> 그 제작 과정은 Fig. 1(a)와 같다. 첫째 양극산화법에 의하여 실리콘막에 3 $\mu\text{m}$  크기의 세공을 형성하고 둘째 0.5 $\mu\text{m}$  두께의 폴리 실리콘을 증착하여 그 세공 크기를 줄임과 동시에 세공 표면을 부드럽게 만들고 셋째 산화 과정을 통하여 단열을 위한 실리카막을 형성시킨다. 전체적인 다공성 실리콘막의 두께는 350 $\mu\text{m}$  이며 세공크기는 2 $\mu\text{m}$  이고 평균적인 공극률은 0.45 이다.

본 연구에서는 또한 깊은 반응성 이온 식각법(DRIE)을 이용하여 다공성 실리콘막을 제작하였다. 이러한 DRIE 다공성 실리콘막은 우선 표준 MEMS 공정을 이용하여 제작할 수 있다는 장점과 막 자체의 두께를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그 제작은 Fig. 1(b)에서 보는 것과 같이 양면 식각법(double-sided etching)을 바탕으로 이루어졌다. 표준 포토리소그래피(photolithography) 기술을 이용하여 각 세공의 패턴을 감광액(photoresist)에 형성하고 DRIE 공정을 실시하여 20-100 $\mu\text{m}$  깊이의 막힌 세공을 우선 만든다. 다음 단계로 뒷면(back side)에 표준 포토리소그래피 기술과 RIE 공정을 실시하여 세공을 열어 주게 된다. 이때의 패턴은 세공보다 훨씬 큰 크기로 하여 앞면과 뒷면의 정렬(alignment)문제가 없도록 하며 특히 이 패턴은 육각형 형태의 구조(Fig. 1(c)에서 벌집 모양의 패턴)를 만들어 기계적인 성질을 좋게 하였다. 마지막 공정은 산화 공정으로 세공 표면에 실리카막을 형성하여 단열층을 만들었다. DRIE 다공성 실리콘막은 세공 크기를 2 $\mu\text{m}$  와 5 $\mu\text{m}$  의 두 가지가 되게 제작하였고 그 두께는 20-40 $\mu\text{m}$  이다. 식각이 전혀 안 이뤄진 rib 부분의 두께는 원래 실리콘 웨이퍼의 두께로 200 $\mu\text{m}$  이다. Fig. 2(c)는 전자현미경(SEM)을 이용해 촬영된 실리콘막의 정면과 단면의 모습이다. 오른쪽 그림에서 세공들은 길이방향으로 굴곡이 거의 없음을 확인할 수 있다.

#### 3.2 실험 장치 구성

전기침투 펌프의 구조는 Fig. 2 와 같다. 전체적인

펌프 하우징은 유기 용매에 안전한 테플론으로 만들었다. 하우징은 세 개의 테플론 틀로 구성되어 그 중 가운데 틀에 다공성 실리콘막을 특수 에폭시(3M 2216)를 사용하여 접착시켰다. 세 테플론 틀은 EPDM 개스킷을 매개로 조립되었으며 하우징의 양 끝에는 알루미늄 판을 덧대고 너트를 체결하여 하우징을 완성하였다. 이 알루미늄 판은 특히 테플론이 쉽게 변형될 수 있는 점을 고려하여 완벽한 sealing 을 위

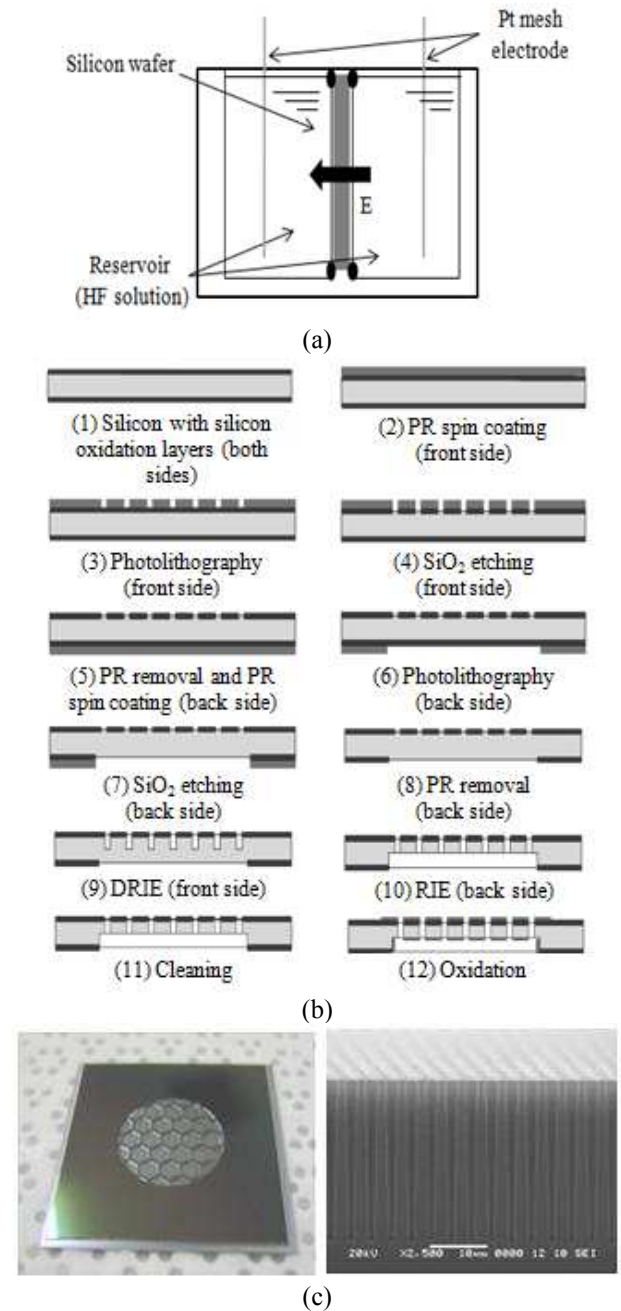


Fig. 1 (a) Fabrication process of anodized porous silicon membranes. (b) Fabrication process of DRIE porous silicon membranes and (c) SEM images of DRIE porous silicon membranes

하여 추가되었다. 펌프 외부로 유체가 이동할 노즐은 스테인리스 관(Scanivalve Corporation)을 에폭시를 이용하여 테플론 하우징에 접착하였고, 나선형 모양으로 만든 백금전극을 하우징 내부에 삽입하여 전기침투 펌프에 전기장을 인가할 수 있도록 하였다.

Fig. 3 은 펌프의 유량과 전류를 측정하기 위한 실험 장치의 구성을 보여 주고 있다. 전기침투 펌프의 구동은 가변 전압 신호 생성을 위한 DAQ card (National Instruments PCI-6220)와 실제 필요 전력 생성을 위한 전압 증폭기(Trek PZD350)를 이용하여 이루어 졌다. 유량의 측정은 튜브 내의 액체의 meniscus 의 이동을 유관으로 관찰함을 통하여 실시하였다. 전류의 측정은 펌프의 전원 공급선에 매우 작은 크기의 전기저항을 직렬 연결하고 이 전기저항에서의 전위차를 DAQ card 를 이용하여 계측함을 통하여 이루어 졌다. 최초의 실험을 수행하기 전에 증류수를 이용하여 24 시간 이상 다공성 실리콘막을 세척해주었고 이후 매번 새로운 작동 유체로 실험을 수행할 때는 10 분 정도의 세척 과정을 실행한 후에 계측을 실시하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 절연 파괴

다공성 실리콘막의 세공 표면의 실리카막 즉 절

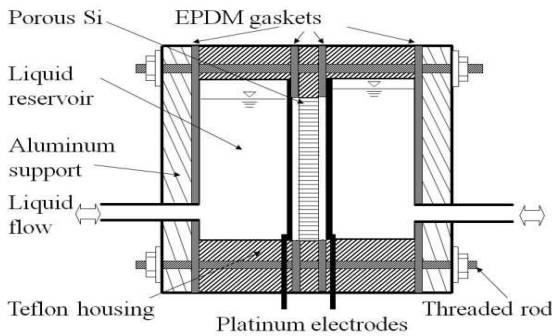


Fig. 2 Structure of porous silicon electroosmotic pumps

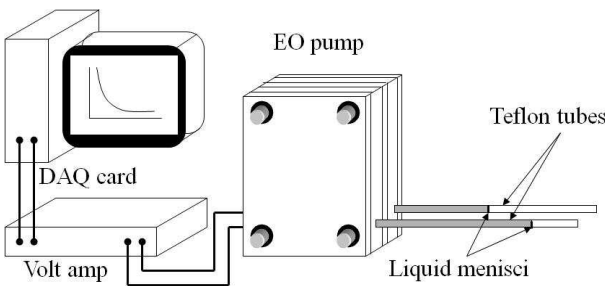


Fig. 3 Schematic of experimental setup for flow rate and current measurements

연층은 지나치게 높은 전압이 인가될 때 파괴된다. 이와 같은 다공성 실리콘막의 절연 강도는 전압-전류 곡선에서 전류가 급격하게 상승하는 시점의 전압으로 정의될 수 있다.<sup>(6)</sup> 즉 전압을 증가시키며 전류를 모니터링하다가 어느 전압에서 전류가 급격하게 상승하는 시점을 절연층이 파괴되는 시점으로 삼는 것이다.

본 연구에서 사용된 양극산화법으로 제작된 실리콘막과 같은 실리콘막을 사용한 Yao et al 의 논문에서는  $Na_2B_4O_7$  버퍼 용액을 이용하여 실험을 수행하였고 이들은 약 400V 정도에서 절연파괴가 일어나는 것으로 관찰하였다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 이들과 달리 작동 유체로 메탄올과 아세톤과 같은 유기 용매를 사용하였고 절연 강도가 Yao et al 의 결과보다 낮음을 관찰하였다. Fig. 4 은 작동 유체로 메탄올을 사용하였을 때의 전압-전류 곡선이다. 그래프에서 보면 인가 전압이 80V 에서 90V 로 증가했을 때 전류가 급격하게 상승하고 특히 90V 에서 100V 로 증가했을 때는 더욱 가파르게 상승함을 확인할 수 있었다. 이는 Yao et al 의 결과와 비교할 때 1/4 정도의 전압에서 절연층이 파괴된다는 의미로써 유기 용매에서 절연층이 더 취약함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

한편 본 연구에서 양극산화법 실리콘막과 함께 사용된 DRIE 실리콘막의 절연 강도도 별도로 측정되었다. 절연 강도는 마찬가지로 전압-전류 곡선에서 결정되었고 DRIE 실리콘막의 경우 실험 장치의 인가 전압 한계인 200V 내에서 절연 파괴 현상은 일어나지 않았다. 즉 DRIE 실리콘막이 양극산화법 실리콘막보다 절연 강도가 좋음을 발견하였다. 절연층 파괴 현상에 대한 자세한 논의는 Harrison et al 의 논문에서 살펴 볼 수 있다.<sup>(25)</sup>

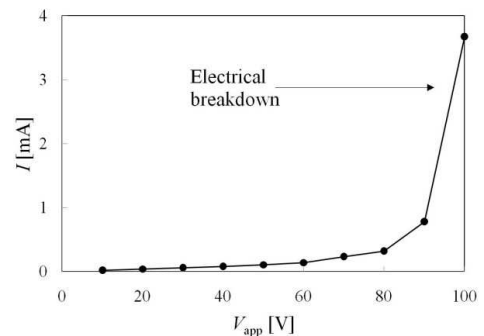


Fig. 4 Electrical breakdown of porous silicon electroosmotic pumps with 2µm pore size and methanol

4.2 유량과 전류 측정

Fig. 5은 2 $\mu\text{m}$  세공 크기의 양극산화법 실리콘막을 이용하고 메탄올과 아세톤을 작동 유체로 하여 절연 파괴가 이루어지기 전까지(80V 까지) 전압을 증가시켜 가며 수행한 실험 결과이다. 전기침투 펌프 작동 부분(2 질)에서처럼 유량과 전류는 메탄올과 아세톤 두 유체 모두에서 전압의 증가에 따라 모두 대체로 선형적으로 증가하였다. 80V 에서 유량은 메탄올의 경우 2.3ml/min, 아세톤의 경우 1.7ml/min 을 기록하였다. 전류의 경우 60-70V 부근부터 선형성에서 이탈하는 것을 볼 수 있다. 이는 이 시점부터 절연 파괴가 시작되는 것으로 이해된다.

Fig. 5(b)은 (a)에 나타낸 유량과 전류를 나누어 구한 단위 전류당 유량을 인가 전압에서 대하여 나타낸 결과이다. 전기침투 펌프 이론에 따르면 단위 전류당 유량은 전압에 무관한 일정한 값을 가져야 하지만 특히 메탄올의 경우 20V 에서 24.4ml/min-mA 였던 값이 80V 에서는 3.73ml/min-mA 까지 큰 폭으로 하락함을 볼 수 있었다. 이는 절연 파괴와 관련되는 것으로 보인다. 한편 아세톤의 경우는 대체로 일정한 단위전류당 유량을 유지함을 관찰하였다.

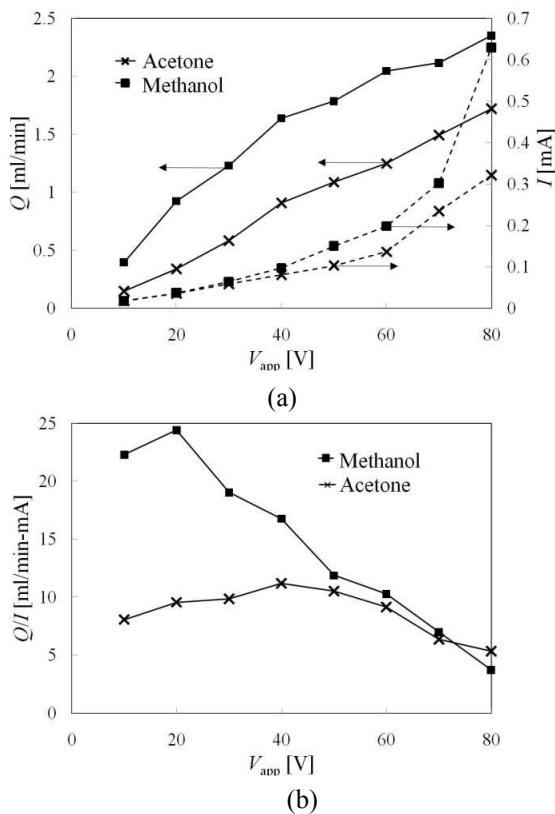


Fig. 5 (a) Flow rate and (b) flow rate per current versus applied voltage for anodized porous silicon electroosmotic pumps with 2  $\mu\text{m}$  pore size

Fig. 6 에는 DRIE 다공성 실리콘막 전기 침투 펌프를 이용하고 작동 유체를 메탄올로 하여 유량과 전류를 측정된 결과를 나타내었다. 두 개의 세공 크기(2 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ )를 가진 실리콘막을 이용한 결과를 나타내었다. 특히 두 개의 세공크기(2 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ )를 가진 실리콘막을 이용한 결과를 각각 나타내었다. Fig. 6(a)에서 보여지듯 두 가지 세공 모두 유량과 전류가 전압에 따라 상승하였지만 그 양상은 이론에 의해 예측된 선형성과는 차이를 보였다. 특히 낮은 전압(40V 까지)에서 5 $\mu\text{m}$  의 세공을 가진 실리콘막 펌프는 거의 출력 유량이 없었다. 이는 낮은 전압에서 출력 압력이 충분하지 않아서 적은 배압(예를 들어 유관 유량 측정을 위한 테플론 소재 튜브 내의 점성력)도 이기지 못하기에 생기는 현상으로 짐작된다.<sup>(17)</sup> 즉 출력 압력은 세공 크기의 제곱에 반비례하는데 2 $\mu\text{m}$ 에서 5 $\mu\text{m}$ 로 세공 크기가 2.5 배 커지며 출력 압력은 6 배 가량 떨어지게 되면서 낮은 전압에서는 충분한 출력 압력을 생성하지 못하기에 생기는 것으로 짐작된다. Fig. 6(b)는 두 가지 세공 크기에 대한 단위 전류당 유량을 나타내고 있다. 이 값은 전기침투 펌프 이론에 따르면 인가 전압에 무관하게 일정한 값을 보여야 하나 실험 결과는 전혀 다르게 나왔음을

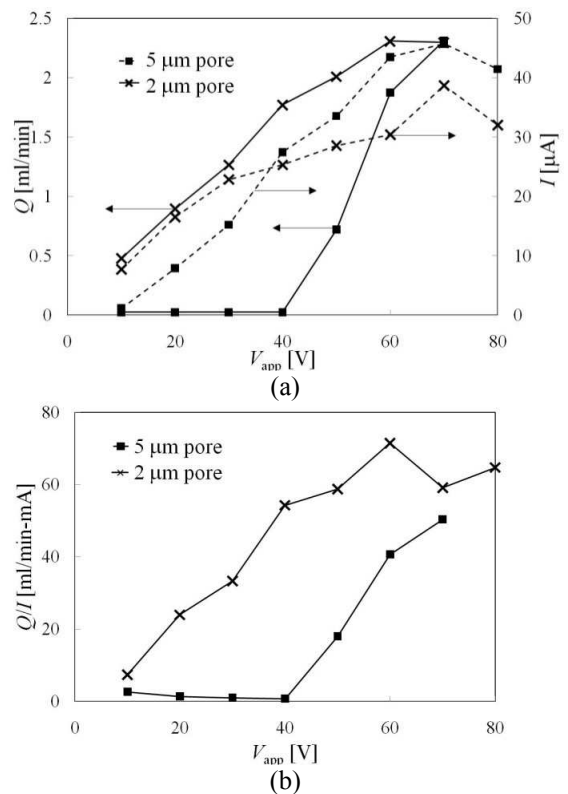


Fig. 6 (a) Flow rate and (b) flow rate per current versus applied voltage for DRIE porous silicon electroosmotic pumps with 2  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$  pore sizes

알 수 있다. 두 가지 세공 모두 인가 전압이 증가함에 따라 단위전류당 유량이 상승하였다. 이러한 예측하지 못한 실험 결과에 대한 설명으로 우선 앞 단락에서 논의한 충분하지 않은 압력을 꼽을 수 있을 것이다. 즉 낮은 전압에서는 출력 압력이 배압에 비해 충분하지 않아서 출력 유량이 이론으로 예측한 값보다 덜 나온다는 것이다. 그에 비해 소비 전류는 배압과 상관 없이 인가 전압에 정비례하게 상승하고 이에 따라 단위전류당 유량은 이론과 달리 인가 전압과 상관 관계를 갖게 되는 것이다. 그러나 이러한 충분하지 않은 출력 압력만으로 실험 결과를 완전히 설명하기에는 부족한 것으로 보이며 이에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.3 실리콘막과 다공성 유리막의 성능 비교

본 연구에서 사용된 두 가지 종류의 실리콘막 즉 양극산화법 실리콘막과 DRIE 실리콘막을 이용한 펌프 성능과 기존의 다공성 유리를 이용한 펌프 성능<sup>(26)</sup>을 비교하였다. 펌프의 성능은 단위전압당 유량과 단위전류 당 유량으로 평가하였다.

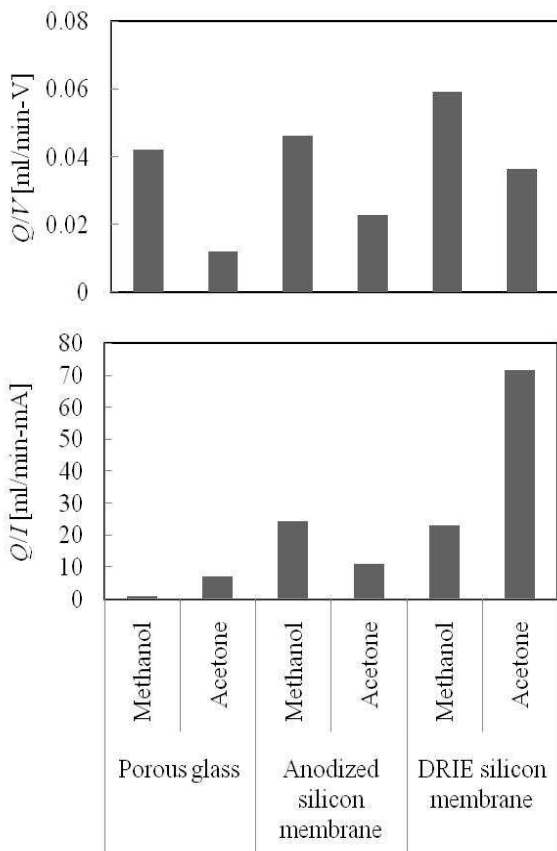


Fig. 7 Comparison of three types of electroosmotic pumps in terms of flow rate per voltage and flow rate per current using methanol and acetone

아세톤은 세 가지의 전기침투 펌프에서 모두 메탄올보다 단위전압당 유량이 낮았으나 단위전류당 유량은 높았다. 세 가지 종류의 펌프의 성능을 비교하면 DRIE 실리콘막 펌프가 단위전압당 유량과 단위전류당 유량 모두 다른 두 종류에 비해 좋았다. 본 연구의 목적인 단위전류당 최대 유량의 구현은 DRIE 실리콘막과 아세톤을 이용한 전기침투 펌프를 이용하여 얻을 수 있었다.

전체적으로 종합해 볼 때 기존의 다공성 유리 전기침투 펌프 보다 두 가지 다공성 실리콘막 전기침투 펌프가 더 훌륭한 성능을 보였다. 첫 번째 이유는 기존의 다공성 유리보다 훨씬 얇은 두께의 다공성 실리콘막을 제작할 수 있기에 같은 인가 전압에서 전기장이 증가할 수 있었다는 점을 들 수 있다. 둘째로 굴곡률면에서도 기존의 다공성 유리는 높은 굴곡률을 가졌지만 다공성 실리콘막의 경우는 굴곡률이 1 에 가까웠기에 다공성 유리보다 우수한 성능을 낼 수 있었던 점을 꼽을 수 있다.

5. 결론

양극산화법과 DRIE 법으로 제작된 다공성 실리콘막 전기침투 펌프에서의 메탄올과 아세톤의 단위전류당 고유량 유동에 대해 연구하였다. 실리콘막은 고전압에서의 절연 파괴와 같은 단점이 있었다. 양극산화법 실리콘막은 90V 근처에서 절연 파괴가 일어났으나 DRIE 실리콘막을 이용하여 이 절연 파괴 전압을 200V 이상으로 높일 수 있었다. 기존의 다공성 유리와 비교하여 실리콘막을 이용함으로써 단위전압당 유량과 단위전류당 유량은 모두 향상시킬 수 있었고, 특히 아세톤과 DRIE 실리콘막을 이용하여 단위전류당 유량을 수십배 정도로 향상시킬 수 있었다. 이러한 다공성 실리콘막 전기침투 펌프의 우수한 성능은 다공성 유리 전기침투 펌프와 비교하여 1 에 가까운 굴곡률과 얇은 두께 때문인 것에 기인한 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2008 년도 서강대학교 교내연구비(과제번호: 200810026) 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

(1) Berroche, Y., Avenas, Y., Schaeffer, C., Wang, P. and



- Chang, H. -C., 2008, "Optimization of High Flow Rate Nanoporous Electroosmotic Pump," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, pp. 081604-1~081604-7
- (2) Junwu, K., Zhigang, Y., Taijiang, P., Guangming, C. and Boda, W., 2005, "Design and Test of a High-Performance Piezoelectric Micropump for Drug Delivery," *Sensors and Actuators A: Physical*, 121, pp. 156~161
- (3) Iverson, B. D. and Garimella, S.V., 2008, "Recent Advances in Microscale Pumping Technologies: a Review and Evaluation," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, Issue. 2, pp. 145~174
- (4) Wang, X., Wang, S., Gendhar, B., Cheng, C., Byun, C. K., Li, G., Zhao, M. and Liu, S., 2009, "Electroosmotic Pumps for Microflow Analysis," *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 28, No. 1, pp. 64~74
- (5) Yao, S., A. Myers, 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
- (6) Jiang, L., Mikkelsen, J. C., Koo, J.-M., Huber, D., Yao, S., Zhang, L., Zhou, P., Maveety, J.G., Prasher, R., Santiago, J. G., Kenny, T. W. and Goosen, 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
- (7) Pretorius, V., Hopkins, B. J. and Schieke, J. D., 1974, "Electro-osmosis a new concept for high-speed liquid chromatography," *Journal of Chromatography*, 99, pp.23~30
- (8) Theeuwes, F., 1975, "Elementary Osmotic Pump," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 64, No. 12, pp. 1987~1991
- (9) Kirby, B. J., Shepodd, T. J. and Hasselbrink, E. F., 2002, "Voltage-Addressable on/off Microvalves for High-Pressure Microchip Separations," *Journal of Chromatography A*, 979, pp. 147~154
- (10) Buie, C., 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
- (11) Gan, W., Yang, L., He, Y., Zeng, R., M. Cervera, L. and Guardia de la, M., 2000, "Mechanism of Porous Core Electroosmotic Pump flow Injection System and its Application to Determination of Chromium(VI) in Waste-Water," *Talanta*, Vol. 51, pp. 667~675
- (12) Paul, P. H. and Rakestraw, D. J., 2000, "Electrokinetic High Pressure Hydraulic System," U.S. Patent 6 019 882
- (13) Zeng, S., Chen, C. H., Santiago, J. G., Chen, J., Zare, R. N., Tripp, J. A., Svec, F. and Frechet, J., 2001, "Electroosmotic Flow Pumps with Polymer Frits," *Sensors and Actuators B Chemistry*, Vol. B82, No. 2-3, pp. 209~212
- (14) Zeng, S., Chen, C.H., Mikkelsen, J. C., and Santiago, J. G., 2001, "Fabrication and Characterization of Electroosmotic Micropumps," *Sensors and Actuators B Chemistry*, Vol. B79, No. 2~3, pp. 107~114
- (15) Chen, C. and Santiago, J. G., 2002, "A Planar Electroosmotic Micropump," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 672~683
- (16) Laser, D. Yao, J., S., Chen, C. H., Mikkelsen, J. C., Goodson, 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
- (17) 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, pp. 143~153
- (18) 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
- (19) P. Prakhar, M. D. Grissom, A. L. Zydney, 2006, "Development of an Electroosmotic Pump for High Performance Actuation," *Journal of Membrane Science*, 386, pp. 153~160
- (20) 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," *Microfluid Nanofluid*, 5, pp 234~244
- (21) H. Foll, M. Christophersen, J. Cartensen, and G. Hasse, 2002, "Formation and Application of Porous Silicon," *Materials Science and Engineering*, Vol. 39, Issue 4, pp. 93~141
- (22) Canham, L.T., 1990, "Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers," *Applied Physics Letters*, Vol. 57, pp. 1046~1048
- (23) Presting, H., Konle, J., Starkov, V., Vyatkin, A. and Konig, U., 2004, "Porous Silicon for Micro-Sized Fuel Cell Reformer Units," *Materials Science and Engineering B*, Vol. 108, No. 1-2, pp. 162~165
- (24) Yao, S. and Santiago, J. G., 2003, "Porous Glass Electroosmotic Pumps: Theory," *Journal of Colloid Interface Science*, Vol. 268, pp. 133~142
- (25) Harrison, D. J., Glavina, P. G. and Manz. A., 1993, "Toward Miniaturized Electrophoresis and Chemical Analysis Systems on Silicon: An Alternative to Chemical Sensors," *Sensors and Actuators B Chemistry*, Vol. B10, pp. 107~116
- (26) 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: Physical*, Vol. 141, pp. 201~212