

## 다공성 실리콘막을 포함한 전기침투 방식 펌프에서의 비대칭적인 유동

김대중\* · Juan G. Santiago\*\*

### Asymmetric Flows for Porous Silicon Electroosmotic Pumps

Daejoong Kim\* and Juan G. Santiago\*\*

**Keywords :** *Electrokinetics(동전기 현상), Micropumps(마이크로펌프), Porous silicon(다공성 실리콘)*

#### Abstract

We fabricated and tested porous silicon-based electroosmotic pumps. Compared to other pumping media, porous silicon is beneficial for obtaining comparable flow rates with much lowered electric potential, while maintaining enough mechanical properties. We fabricated porous silicon with two sided-reactive etching processes. We found higher flow rate per electric potential (consistent with previous studies) and we also found asymmetric flow rates for different pumping directions. We plan to utilize this asymmetry for AC pumping applications.

#### 1. 서론

전기침투 방식 펌프 (electroosmotic pump)<sup>1</sup>는 기계적인 작동 부분이 없이 동전기 현상 (electrokinetic phenomena)의 일종인 전기침투 현상을 이용하여 작동하는 마이크로 펌프이다. 이와 같은 펌프는 작은 크기임에도 상당한 유량과 압력을 얻을 수 있는 것이 장점으로 다양한 휴대용 응용 분야로의 활용이 연구되고 있다 [1]. 그 기본적인 구조는 전기침투 현상을 유발하는 다공성막 (예를 들어 다공성 유리막이나 다공성 고분자막)과 그 막의 양쪽에 전극을 걸어 줄 수 있는 두 전극 그리고 액체를 담은 챔버로 이루어진 비교적 간단한 구조이다. 본 연구는 참조문헌1에서 연료전지 등의 응용을 위해 요구되는 단위 전류량당 최대 유량을 위해 개발된 다공성 유리막을 포함한 전기침투 방식 펌프의 성능 향상을 위해 다공성 실리콘막을 포함한 펌프의 개발과 그 성능에 대해 다루고 있다.

다공성 실리콘막은 실리콘 양자선 (quantum wire)이나 연료전지의 전해질막 등으로의 응용이 활발히 연구되고 있는 재료로서 Yao et al. [2]에 의해 전기침투 방식 펌프로의 응용이 연구된 바 있다. 그들의 연구에 이용된 다공성 실리콘막은 양극산화법 (anodization) 등에 의해 가공되는 것으로 원통형의 기공을 가지고 있다. 이와 같은 기공은 그 직경이 비교적 일정하고 일직선 형태이어서 전기침투 방식 펌프에의 활용에 큰 이점을 가지고 있다.

본 논문은 먼저 다공성 실리콘막의 이온건식식각 (reactive ion etching)에 의한 가공 과정과 다공성 실리콘막을 포함한 전기침투 방식 펌프를 이용한 실험 과정에 대해 간략하게 소개하고 그 펌프의 성능에 대해 보고한다. 특기할 만한 결과로 이와 같은 펌프에서의 비대칭적인 유량을 발견하였다는 것과 마지막으로 이와 같은 비대칭성을 이용한 향후의 연구 방향에 대해 간략하게 논의하고 있다.

#### 2. 재료 및 실험 과정

본 연구에 사용된 다공성 실리콘 막은 일본 혼다 자동차에 의해 2단계 이온건식식각 공정에 의해 제작된 것이다. 첫째로 DRIE 공정으로 그림1 오른쪽 그림에서 보이는 2-5 마이크로 사이즈의 기공을 만들고 둘째로 뒷면으로부터 일반적인 이온건식식각 공정으로 육각형 모양의 창을 만들며 기공이 완전히 열리도록 하였다. 이와 같은 육각형 모양의 리브는 기계적인 안정성을 위한 구조이다. 식각 공정 이후 열적 산화막을 키웠다. 실리콘 자체만으로는 전기침투 현상을 유발할 수 없기에 이와 같은 산화 공정을 거친다.

전기침투 방식 펌프의 구조는 참조문헌1의 구조와 대체로 같으며 다음 그림2에서와 같이 유량 측정을 위한 멤브레인 유량계와 압력 측정을 위한 압력계 그리고 배압 조절을 위한 밸브로 구성된 실험 장비로 실험을 수행하였다.



Figure 1 Direct image of porous silicon membrane and SEM image for pore distribution

\* 서강대학교 기계공학과, daejoong@sogang.ac.kr  
\*\* Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering,  
juan.santiago@stanford.edu

1. 제1저자는 electroosmotic pump 를 전기침투 방식 펌프라 해석하였다.

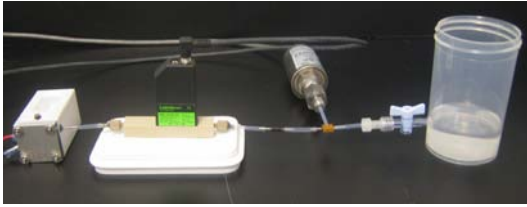


Figure 2 Experimental setup

### 3. 결과 및 토의

그림3은 아세톤을 작동 액체로 사용하여 얻은 유량과 단위 전류량당 유량의 결과이다. 본 실험에는 기공의 직경이 2 마이크로와 5 마이크로인 실리콘막이 사용되었다.

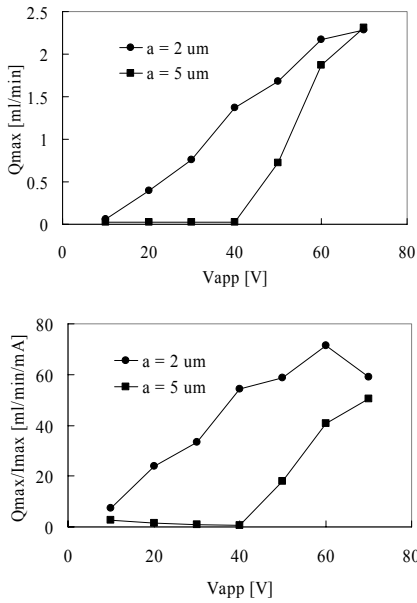


Figure 3 Flow rate and flow rate per current. Acetone used as a pumping liquid. Porous silicon samples with  $\phi 2\mu m$  and  $\phi 5\mu m$  pore diameter.

2마이크론 기공의 다공성 실리콘막으로 된 펌프의 경우 그 유량이 전위차 또는 전기장과 이론적으로 예상되는 관계인 선형 관계를 이루었으나 5마이크론 기공의 경우 낮은 전위차(< 40 V)에서는 전혀 펌프로서의 작동이 이루어지지 않았다. 이는 기공의 크기가 커서 배압을 이겨낼 만큼의 충분한 압력을 펌프가 제공하지 못해서 생긴 것으로 보인다 [1]. 같은 이유로 단위전류량당 유량도 2마이크론 기공의 경우가 5마이크론 경우보다 크게 된 것으로 보인다.

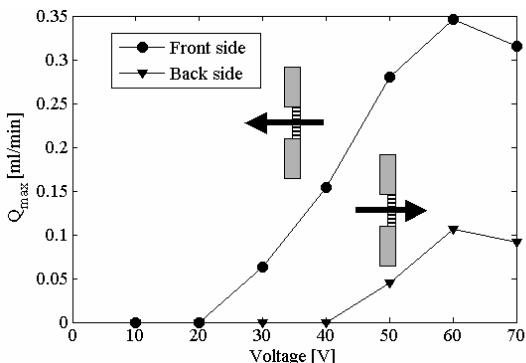


Figure 4 Different flow rates for forward and backward pumping.

실험을 수행하며 특기할 만한 점은 사용된 다공성 실리콘 막 중 일부에서 그림4와 같은 비대칭적인 펌프 작동 결과를 얻은 점이다. 즉 앞면 (여기서 앞면은 리브 구조가 없고 기공만 존재하는 면을 말한다) 으로부터 유동이 있을 때 그 반대의 경우보다 두 배 이상 유량이 많음을 볼 수 있었다. 이는 그림5에서 보이 듯이 기공 형상 자체의 비대칭성에 기인한다고 보인다. 이러한 비대칭성은 두번째 식각 공정에서 충분히 식각이 이루어 지지 못했거나 잔류 응력에 의해 실리콘 샘플이 왜곡되며 생긴 것으로 예상된다.

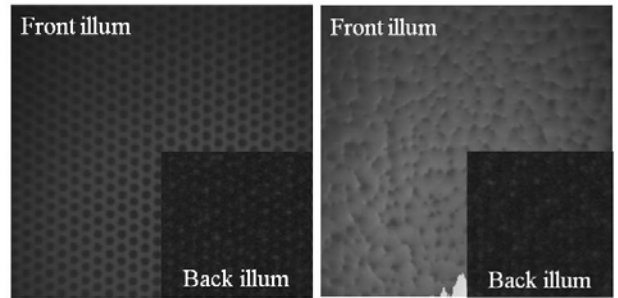


Figure 5 Front (left) and back side imaging

앞면과 뒷면의 비대칭적인 기공 패턴은 그림6에서 보듯이 일종의 밸브와 같은 작용을 일으켜서 의해 뒷면으로부터의 유동이 방해받아서 그 유량이 반대 경우의 유량보다 작아지는 것이다.

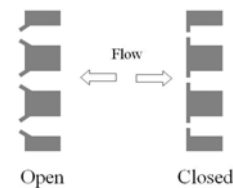


Figure 6 Hypothetical schematic of valving action.

### 4. 결론

다공성 실리콘막을 포함한 전기침투 방식 펌프를 제작하고 그 성능을 보고하였다. 또한 공정 중의 미비함에 의해 생긴 펌프 작동의 비대칭성을 보고하였다. 본 연구에서 얻어진 비대칭성은 비록 공정 중 우연히 발생한 것이나 제어되는 방식으로 반복적으로 할 수 있다면 전기침투 방식 펌프의 큰 단점 중의 하나인 전기 분해에 의한 기포 발생을 줄일 수 있는 교류 방식에서의 응용에 사용할 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 제1저자가 미국 스탠포드 대학 소속 당시 이루어 졌던 연구로 당시 지도 교수인 제2저자의 동의 하에 본 학술대회에 발표됨을 밝힌다.

### 참고문헌

[1] D. Kim, J. D. Posner, and J. G. Santiago, Sens. Actuat. A 141, 201 (2008).  
 [2] S. Yao, A. M. Myers, J. D. Posner, K. A. Rose, and J. G. Santiago, J. Microelectromech. Syst. 15, 717 (2006).