

1차원 표면 패터닝 기법을 통한 마이크로-나노 유체 에너지 변환 소자 시스템

김상희, 이정훈
광운대학교 전기공학과

Micro/Nano fluidic energy conversion system using 1D surface patterning technique

Sang Hui Kim, Jeong Hoon Lee
Electrical Engineering, Kwangwoon University, KOREA

Abstract - 최근 에너지에 대한 관심의 증대 및 센서 노드로의 개발을 위해 무전원 동력 장치(sustainable energy conversion system)에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 본 연구에서는 수압(hydraulic pressure)을 이용하여 전기를 발생시키는 새로운 개념의 나노유체 에너지 변환 시스템에 대한 연구를 진행하였다. 표면 패터닝 기법을 통해 제작된 나노 채널 및 일차원 마이크로 유체 기반의 플루이드 소자를 이용하여 외부저항, 버퍼용액의 농도, 압력에 따른 streaming potential을 구하였다. electrokinetic 현상과 이에 따른 유체의 streaming potential을 이용하여 압력(pressure)을 전기적으로 변환시키는 에너지 변환용 나노 유체 시스템을 본 논문을 통해 제안하고자 한다.

$$P_{out} = \Delta\phi I \tag{2}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{3}$$

여기서 식 (1)은 압력에 의해 생산되는 에너지를 인가 전력으로 계산한 값이고, 식 (2)은 스트리밍 포텐셜과 스트리밍 전류에 의해 생산되는 전력을 계산한 식이다. 이를 통해 생산되는 전력을 인가전력으로 나누어 주면 이론적으로 효율을 추론할 수 있다.

그림 1은 1차원 표면 패터닝 법을 이용한 마이크로-나노 유체 소자의 등가회로 및 모식도를 보여주고 있다. 등가회로 및 이론적 수식을 통하여 임피던스 매칭을 통한 최대 효율의 표현이 가능하며, 로드 저항을 수식적으로 표현하여 $R_L = R_{ch} / \sqrt{1-\alpha}$, $\alpha \equiv S_{str}^2 Z_{ch} R_{ch}$ 로 나타낼 수 있고 여기서 R_{ch} 는 그림1을 보면 $R_{micro} + R_{nano} + R_{micro}$ 나타낼 수 있다. 이러한 수식을 정리를 하면 가장 높은 효율일 때를 수식적으로 표현할 수가 있게 되는데 $e_{max} = \alpha / (\alpha + 2\sqrt{1-\alpha} + 1 - \alpha)$ 로 표현된다.

1. 서 론

최근 무전원 동력 장치(sustainable energy conversion system) 및 신재생 에너지에 대한 연구가 크게 각광받고 있으며 발전 효율을 높이고, 손실 없이 에너지를 활용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마이크로 스케일의 에너지 변환 소자는 크게 마이크로 열엔진, 마이크로 연료전지, MEMS 압전기 및 광전효과 태양전지 등이 제안되었으나, 실제 응용에 있어서 많은 문제점이 제기 되었다.

나노 유체 에너지 변환 소자 시스템은 압력과 스트리밍 전류(streaming current)를 이용하여 전기적인 에너지로 변환 시키는 원리를 기반으로, 단지 나노 스케일의 채널(channel)과 유체, 압력만 있으면 에너지를 변환 할 수 있음을 장점으로 한다. 기본적인 원리는 유체를 압력을 통해 나노채널에 흘려주면 전기 이중층(electric double layer)으로 인하여 스트리밍 전류를 만들게 되며, 이 전류를 외부저항(External load)을 통하여 전기적인 에너지로 변환하게 됨을 기반으로 한다.

이러한 스트리밍 전류와 스트리밍 포텐셜을 랩온어칩(lab-on-chip)소자에 응용하고자 하는 연구가 최근들어 시작되었으며, 최근 Yang과 연구진들은 스트리밍 전류와 스트리밍 포텐셜(streaming potential)을 이용하여 배터리 사용을 하는 기술을 제안 하였고 이론적인 모델과 근접한 실험 결과를 보고하였다[1]. 또한 Fan등은 길이 1-20 μm 의 직경 5-100 nm의 실리카 나노튜브(silica nanotubes)를 사용하여 Debye length를 작게 하여, slip length를 작게 함으로서 효율을 올릴 수 있는 방법에 대한 연구를 진행하였다[2]. 또한 나노채널의 이론 효율은 네덜란드의 델프트 대학의 연구 그룹에 의해 제안되었으며, 500 nm 사이즈의 나노채널에서 12%의 효율을 낼 수 있음을 이론적인 계산을 통해 제안하였다.

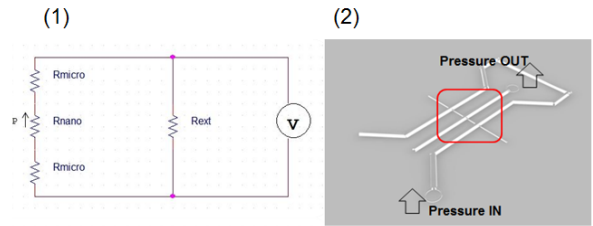
최근의 연구를 통해 이루어진 실험적 효율은 3% 내외로 보고되었으며[3], 본 논문에서는 기존의 나노채널 및 이를 이용한 한계를 극복하기 위해 선택적 이온 투과가 가능한 멤브레인의 표면 패터닝법을 이용하여 나노채널을 제작하였다. 이러한 방법을 통해 일차원 플루이드 네트워크를 이용하여 나노플루이드 에너지 변환 시스템을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

에너지 변환 효율은 입력된 파워에 대한 출력 파워의 비로 표현되며, 수식적으로 아래와 같이 표현된다.

$$P_{in} = \Delta p \int_{-L/2}^{L/2} u(y) dy \tag{1}$$



<그림 1> (1) 1차원 표면 패터닝 마이크로-나노 유체 소자의 회로도 (2) 1차원 표면 패터닝 마이크로-나노 유체 소자의 모식도

2.2 소자 제작

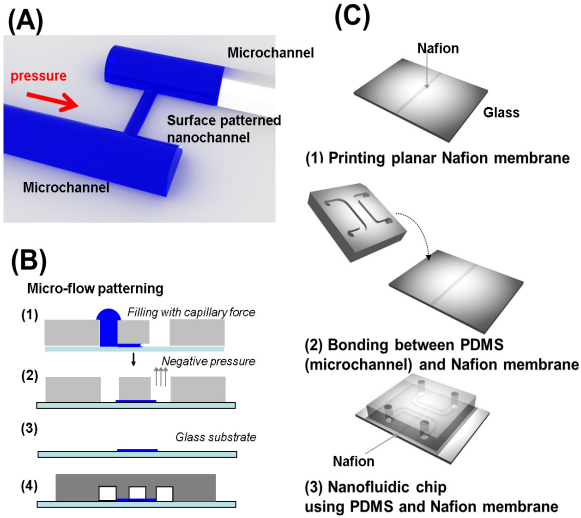
본 논문에서 사용되는 마이크로/나노 에너지 변환 소자는 Nafion membrane을 이용한 표면 패터닝 법을 통해 1차원으로 글래스 웨이퍼 위에 형성되었으며, 약 200 nm의 두께를 가지는 안정적인 표면 형성이 가능하였다. PDMS를 이용해 제작된 마이크로 플루이드 채널과의 플라즈마 본딩을 통해 안정적인 동작이 가능한 소자를 제작하였으며, 그 제작 공정을 그림 2에 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2011-0004785)

[참고 문헌]

- [1] Yang, J.; Lu, F.; Kostiuk, L. W.; Kwok, D. Y. J. *Micromech. Microeng.* 2003, 13, 963-970.
- [2] Fan, R.; Li, D.; Majumdar, A.; Yang, P. J. *Am. Chem. Soc.* 2003, 125, 5254-5255.
- [3] F. H. J. van der Heyden, D. J. Bonthuis, D. Stein, C. Meyer and C. Dekker, *Power Generation by Pressure-Driven Transport of Ions in Nanofluidic Channels*, *Nano Lett.*, 2007, 7(4), 1022 - 1025.



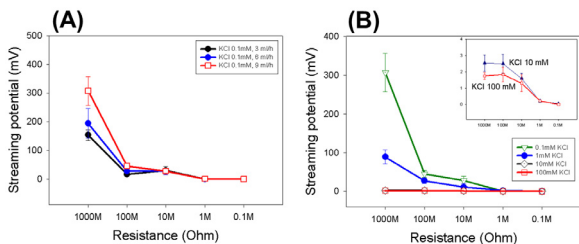
<그림 2> 1D 나노 유체 에너지 변환 시스템 소자의 개념도 (a) 나노 채널로 이어져 있는 마이크로 채널의 네트워크. (b) 마이크로 유체를 나노 채널에 흘리는 기술 (c) 소자 생산 과정

2.3 실험결과

스트리밍 포텐셜 및 압력, zeta-potential의 관계식을 식4에 나타내었다.

$$V_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\sigma \eta} \Delta P \quad (4)$$

식 4에 의해 전해질의 농도, 압력의 변화에 따른 V_s 의 변화값을 측정하였다. 또한 임피던스 측정에 의한 최적화된 streaming potential 및 구하였으며, 임피던스 변화는 외부저항을 0.1 MΩ, 1 MΩ, 10 MΩ, 100 MΩ, 1000 MΩ로 변화시켜가면서 조사하였다. 버퍼용액은 KCl을 사용하였고, 0.1mM, 1mM, 10mM, 100mM로 각각 변수를 조절하였다. 선형적인 에너지 변환의 관계를 고찰하기 위해 인가 압력은 3ml/h, 6ml/h, 9ml/h로 조절하였으며, 그 결과를 그림 3a에 나타내었다. 압력이 증가함에 따라 스트리밍 포텐셜은 비례하여 증가하였으며, 외부 저항이 증가함에 따라 또한 증가함을 보여 주고 있다. 1000 MΩ의 외부임피던스 및 9 ml/h의 압력 인가시 스트리밍 포텐셜은 약 300 mV의 값을 보였다. 그림 3b는 버퍼의 농도 및 저항의 변화에 따른 스트리밍 포텐셜을 보여주고 있으며, 버퍼의 농도가 감소함에 따라 스트리밍 포텐셜은 증가하고 있으며, 외부 저항이 증가함에 따라 그 값이 증가함을 볼 수 있다.



<그림 3> 스트리밍 포텐셜과 외부저항. (a) 서로다른 압력의 변화에 따른 스트리밍 포텐셜의 변화 (b) 서로다른 전해질의 농도에 따른 스트리밍 포텐셜의 변화

3. 결 론

본 연구는 1차원 표면 패터닝 기술을 이용한 나노플루이드 에너지 변환 시스템을 구현하였으며, 이를 통해 1000 MΩ의 외부임피던스 및 9 ml/h의 압력 인가를 통해 약 300 mV의 스트리밍 포텐셜을 구현 하였다. 본 연구는 이후 zeta potential의 제어 및 slip condition의 조절을 통해 실험적 효율의 증가를 통해 압력을 전기로 변환하는 고효율의 에너지 변환 시스템이 구현될 것으로 기대된다.