

전기 삼투를 이용한 미세 유체 소자에서의 유량 제어 기술 개발

최은수*, 정대중, 심원철, 양상식
 아주대학교 전자공학부, 지능형마이크로개발사업단**

Development of electroosmotic flow control technique in micro fluidic devices

Eun-Soo Choi*, Dae Joong Jeong, Won Chul Sim, Sang Sik Yang
 School of Electrical Engineering, Ajou University, Intelligent Microsystem Center**

Abstract - This paper presents the PDMS surface characteristic change after the plasma process and the electroosmotic flow control technique for the two-dimensional focusing in the micro channels made of PDMS and glass. The channels are fabricated by plastic molding and micromachining technique. To observe the surface characteristic change as time elapses, we measure the contact angle of water on the surface and the velocity of the electroosmotic flow in a channel. The electric field adequate for focusing of a core flow in a confluence channel is obtained by the experiment. The computer simulation is performed to obtain the width and the depth of the core flow for several junction angles of the confluence channel.

1. 서론

최근 분석기술의 소형화는 분석기에 관한 주된 연구 분야로 자리잡아 왔다.[1] 소형 유체 분석기의 유체 이송에 필요한 마이크로펌프에는 맥류 펌프와 정상 유동 펌프가 있다. 진동하는 박막이 있는 다이아프램 펌프는 맥류를 유발하나 전기역학을 이용한 펌프로는 정상유동을 얻을 수 있다. 전기역학은 전기영동과 전기삼투로 나뉘어진다. 모세관 전기 영동 방식의 경우는 단백질 분석과 DNA분석에 적합한 것으로 알려져 널리 사용되고 있다.[2,3].

소형 유체 분석기의 유체 이송 기구 및 유로의 재료로 실리콘기판보다는 대량 반복 생산이 가능하고 저렴한 폴리머를 이용하는 경우가 증가하고 있다. 이러한 폴리머 중 가장 대표적인 소재로는 PDMS (polydimethylsiloxane), PMMA(Polymethyl Methacrylate), polyurethane, 실리콘 러버, parylene 등이 있으며 최근 이 소재들을 이용한 약물전달장치, 측정기구 그리고 신체 일부분의 대체 기구 또는 인공 장기 등의 제작이 매우 활발하게 이루어지고 있다.

전기삼투를 이용한 유체 이송 소자는 μ -TAS(micro total analysis systems)와 랩온어칩(lab-on-a-chip)에 매우 유용하다[4]. 본 논문에서는 박막이 없는 전기 삼투 유체 이송 소자를 제작하고 제작과정 중의 플라즈마 공정으로 인한 PDMS의 표면 특성 변화 및 시간의 경과에 따른 표면 특성 변화 및 속도의 변화 추이를 관찰한다.

플라즈마와 유리를 이용하여 μ -FACS* (fluorescence activated cell sorting)에 필요한 전기삼투 미세 유체 소자를 제작하고 샘플 유체의 포커싱을 확인한다. 컴퓨터 시뮬레이션으로는 합류 유로의 적절한 각도를 확인한다.

2. 시간 경과에 따른 표면 특성

Micro-FACS를 구성하는 유체소자를 제작함에 있어 비용을 줄이고, 관찰의 용이성과 반복성을 위해 플라스틱 소재인 PDMS를 사용한다. 하부기판으로는 슬라이드 글라스를 이용하며 이 두 재료의 집합을 위해 각각의 표면에 산소 플라즈마 처리를 한다. 플라즈마 처리는 RIE(Reactive ion etcher)로 하며, 전력은 100W, 산소 양은 25sccm으로 하며 압력은 200mTorr로 하여 수중 동안에 이루어진다. 플라즈마 처리 후에 산소 분자가 radical oxide로 나뉘지면서 PDMS의 표면에 결합한다. 이 산소 홀전자들은 수소와의 결합력이 강해서 표면이 친수성으로 바뀐다. 그러나 이 상태는 안정하지 않아서 시간이 경과함에 따라 radical oxide 등을 다시 잃어버리면서 표면 특성이 변한다.

그림 1은 플라즈마 처리 후의 PDMS 표면의 구조식을 나타낸다. 표면 친수성을 확인하기 위해 그림 2와 같이 접촉각을 측정하였다. 그림 3은 플라즈마 처리 전후의 PDMS 표면의 물방울 사진이다. 플라즈마 처리 전과 후의 접촉각은 각각 85도와 8도로서 플라즈마 처리에 의해 소수성인 표면이 친수성으로 변화하였음을 보여준다. 그

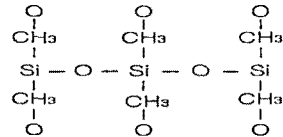


그림 1 플라즈마 가공 후 PDMS의 구조식



그림 2 접촉각 측정

*FACS(fluorescence activated cell sorting): 생체 세포 물질의 조성 및 구조에 따른 분류, 수집, 분석에 사용되는 장비이며 응용의 일 예로 산모의 혈액으로부터 유해적혈구를 검출 및 분석하여 태아의 이상 유무 등에 관한 정보를 얻을 수 있다. 기존 FACS장비의 분석과정은 1개의 chip상에 집적하여 제작 시 구성은 크게 세 부분으로 나뉠 수 있다. 먼저 적혈구 중 유해적혈구를 포착할 수 있도록 분석이 가능하도록 인력으로 이송하는 채널과 레저비로 구성된 기판과 이용되고 있는 적혈구에서 핵을 포함하는 적혈구를 검출하는 부분 그리고, 필요한 유해적혈구를 분리하는 부분으로 구성된다.



(a) 플라즈마 처리 전 (b) 플라즈마 처리 후

그림 3 플라즈마 처리 전후의 표면 사진

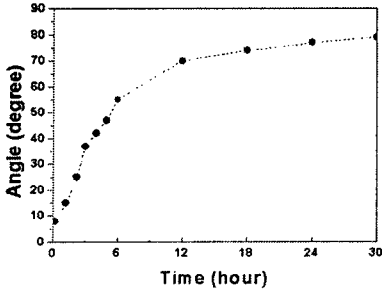


그림 4 시간에 따른 접촉각의 변화

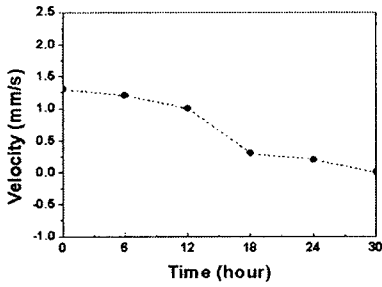


그림 5 시간에 따른 유속의 변화

림 4는 플라즈마 처리 후 경과 시간에 따른 접촉각을 나타낸다. 시간이 지나면서 접촉각이 커지고 친수성이 서서히 소수성으로 변함보여 준다.

플라즈마 처리 후 시간 경과에 따른 유속의 변화를 보기 위하여 깊이가 50 μm , 폭이 25 μm , 길이가 1 cm인 직선 단일 유로를 PDMS와 슬라이드 글라스로 제작하고, 일의의 시간이 경과한 후에 유로에 Sodium Borate($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)를 채우고 전기삼투로 유체를 이송하면서 유속을 측정하였다. 유속 측정을 위하여 입자 크기가 6 μm 인 형광 비드를 유체 내에 넣었다. 한 쪽에는 200V의 전압을 인가하고 다른 한 쪽은 접지하였다. 그림 5는 플라즈마 처리 후 경과 시간에 따른 유속을 나타낸다. 시간이 경과하면서 유속이 작아지는데 이것은 표면이 소수성으로 변화하기 때문이다. 즉, 표면 전하량이 작아지므로 전기삼투에 생기는 힘이 작아져서 유속이 저하된다. 따라서, 전기삼투에 의한 유체 이송은 소자 제작 후 약 12시간 내에 수행되는 것이 바람직하다.

3. 합류 유로 제작 및 측정

폴리머와 유리를 이용하여 $\mu\text{-FACS}^*$ (fluorescence activated cell sorting)에 필요한 전기삼투 미세 유체 소자를 제작한다. 소자는 그림6과 같이 가운데에 중심 유체 유로가 있고 양쪽에서 보호 유체 유로가 합류하는 유로 구조로 되어 있다. 좌우의 유체에 의해 중심 유체가 포커싱이 된다. 또, 합류점 이전의 중심 유로는 다른 유로보다 깊이가 얇게 되어 있어서 합류점 이후에는 중심 유체가 유로바닥에 접하지 않고 보호 유체에 의해 감싸지도록 되어 있다. 그림 7은 전기삼투 유체 이송 유로의 제작 공정도이다. 유로의 깊이를 다르게 제작하기 위해서 SU8-10 코팅 및 현상을 2 회 반복한다. 이때 SU8의 투명성으로 인해 패턴의 정렬이 어려워지므로 실리콘 웨이퍼에 정렬키의 식각을 필요로 한다. Si 기판상에 SU8-10을 30 μm 두께로 스핀 코팅한다. SU8-10을 열

건조 처리하고 마스크를 이용하여 미세 채널을 패터닝한다. SU8 현상액과 IPA를 이용하여 원하는 패턴만 남기고 나머지는 제거한다. 제작된 구조물 위에 PDMS를 붓고 75 $^{\circ}\text{C}$ 에서 3시간동안 열처리를 거치면 상판이 제작된다. 표면 상태의 변화를 위해 산소 플라즈마에 약 20초간 노출시킨 후 하판인 슬라이드 유리와 접합하면 미세 채널을 가지는 유체소자가 제작된다.

그림 9는 배출부를 접지하고 보호 유체, 즉 버퍼 입구에 270 V의 전압을 인가한 상태에서 샘플 유입구에 다양한 전압을 인가했을 때, 중심 유체가 포커싱되는 모습



그림 6 합류 유로의 구조

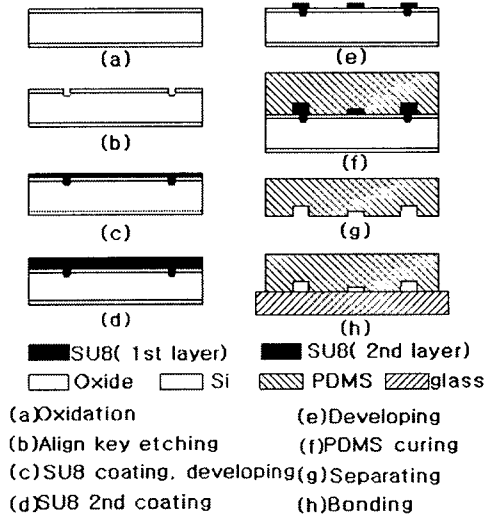


그림 7 제작 공정도

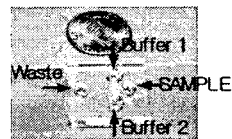
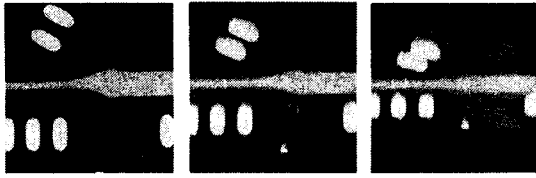


그림 8 제작된 유체 소자



(a) 100V (b) 200V (c) 400V

그림 9 샘플측 전압에 따른 유체 포커싱 사진 (버퍼측: 270V, 배출부: 접지)



(a) 90° 일 때 (b) 60° 일 때 (c) 45° 일 때
그림 10 시각을 변화시키며 얻은 3차원 영상
(영상 레이저 공초점 주사 현미경 사진으로부터 합성)

을 고속카메라로 찍은 사진이다. 샘플로는 검정 잉크를 사용하였고 버퍼액은 전기분해를 고려하여 전도도가 낮은 25mM의 sodium borate($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, pH 9)를 사용하였다[4]. 샘플측의 인가전압이 증가하면 중심 유체의 유동 폭이 커진다. 평면 사진만으로는 깊이에 따른 중심 유동의 폭을 알 수 없으므로 3차원 영상이 필요하다. 이를 위해 일반 현미경 보다 해상도가 높은 공초점 레이저 주사 현미경을 사용한다. 샘플측에 FITC (fluorescein isothiocyanate, excited by a 488-nm laser) 를 채우고 버퍼액으로는 sodium borate를 충전한다. 배출부는 집지하고 샘플측에 200V와 버퍼측에 270V를 인가하였다. $1\mu\text{m}$ 단위로 단층 촬영한 2차원 평면 사진을 적층하여 시각을 바꾸어 가면서 회전시켜 얻은 영상은 그림 10과 같다. 합류점 이후에 좌우측의 보호 유동에 의해 중심 유동의 폭은 $50\mu\text{m}$ 에서 약 $10\mu\text{m}$ 로 줄어든다. 중심 유동이 바닥에 닿지 않고 보호 유체에 의해 보호됨을 볼 수 있다. 버퍼측에 더 높은 전압을 인가하여 실험을 하였으나 중심 유동의 폭의 변화에 비하여 깊이 방향의 변화는 매우 미약함을 확인하였다.

4. 시뮬레이션

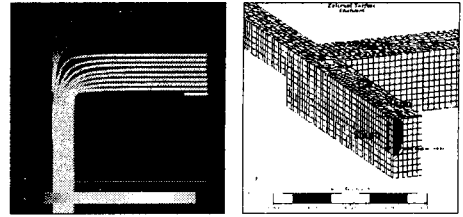
버퍼 유로의 합류 각도에 따른 유체의 포커싱된 3차원적인 형상을 예측하기 위하여 상용 FEM 프로그램인 CoventorWare를 사용하여 전기영동 유동 시뮬레이션을 수행하였다. 계산 시간을 줄이기 위해 Y축에 대칭인 유한 요소 모델을 사용하였고 샘플과 버퍼측에 각각 40V/cm와 54V/cm의 전장을 인가하였다. 유체의 모빌리티는 $7 \times 10^{-3} [\text{cm}^2/\text{Vs}]$ 이고 확산 계수는 $5 \times 10^{-9} [\text{cm}^2/\text{s}]$ 이다. 그림 11 (a), (b), (c)는 각각 합류각이 90도, 60도, 45도 일 때 유로내의 전기장과 포커싱된 유동의 폭과 깊이를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과, 유동 폭은 7-9 μm 정도로 합류각에 따른 변화가 거의 없으나, 깊이는 합류각이 60° 일 때 25 μm 로 가장 작다.

5. 결론

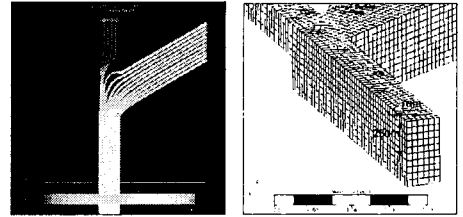
본 논문에서는 유로 표면의 플라즈마 처리와 경과 시간에 따른 표면 특성 변화를 관찰하였다. 플라즈마 처리에 의해 표면이 친수성으로 변하나 공기 중에 노출할 경우 시간이 지남에 따라 소수성으로 변하므로, 전기삼투 유체 이송은 플라즈마 처리 후 약 12시간 내에 수행하는 것이 바람직함을 확인하였다.

micro-FACS에 필요한 전기삼투 유체 이송 소자를 제작하여 인가 전압에 따른 중심 유동의 폭을 측정하였으며, 유로의 합류각에 따른 중심 유동의 깊이를 계산으로 얻었다.

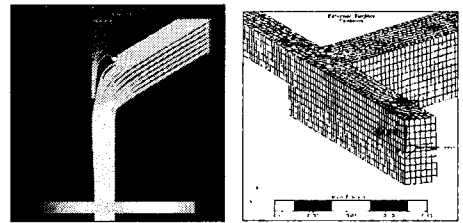
산소 플라즈마는 PDMS와 유리 등과 같이 재료가 다른 기판을 접합하는 데 이용되나, 시간이 경과함에 따라 표면 특성이 친수성에서 소수성으로 변하면서 비이드 등이 벽면 흡착하는 것을 확인하였다. 이를 개선하기 위해



(a) 합류각이 90° 일 때



(b) 합류각이 60° 일 때



(c) 합류각이 45° 일 때

그림 11 합류 각도에 따른 중심 유동 폭과 깊이

소수성인 PDMS 기판에 소수성 항체를 가지는 친수성도도 물질을 코팅시키는 것이 효과적인 것으로 기대한다.

추후에 micro-FACS의 용도에 따라 적절한 유로 구조 및 합류각과 크기를 갖는 유로를 제작하고, 장시간 친수성을 유지하도록 표면을 처리하여 유동시험을 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 조미세 생체전자 시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] D.Figeys and D. Pinto, "Lab on a Chip: A Revolution in Biological and Medical Sciences," *Analytical Chemistry*, vol.72, pp. 330A-335A, 2000.
- [2] St. Claire R. L. 1996 *Anal. Chem.* 68 569R-86R
- [3] H. Becker et al, palm quartz chipa with submicron channels for two dimensional capillary electrophoresis applications, *J.micromech.micro eng.*8, pp24-28, 1998.
- [4] W.E. Morf, O.T.Guenat, N.F. de Rooij, "Partial electroosmotic pumping in complex capillary systems. Part I: Principles and general theoretical approach," *Sensors and Actuators*, vol. B 72, pp.266-272, 2001.
- [5] Y.W.Jeong, B.H.Kim, J.Y.Lee, K.Y.Cho, J.K.Chang, K.chun, "Cyclic Capillary Electrophoresis Separator on Silicon Substrate with Synchronized Switching" *Trans. KIEE*. Vol. 49C, No.11, NOV. 2000.