

미세 채널에서 가스 경계면을 이용한 미세 유체의 폭 조절

손 상 옥[†], 이 승 섭^{*}

(2004 년 1 월 24 일 접수, 2004 년 5 월 24 일 심사완료)

Manipulation of Microfluid Width in a Microchannel Using Gas Boundary

Sang Uk Son and Seung Seob Lee

Key Words : Microfluid(미세 유체), Microchannel(미세 채널), Gas boundary(가스 경계면), Focusing(포커싱), Virtual wall(가상벽)

Abstract

A novel manipulation of microfluid width in a microchannel was presented by controlling inflation of a gas boundary. The gas boundary was formed by heating water with a microheater in a semicircular shape from a chamber which was connected symmetrically to the microchannel. The formed gas boundary inflated perpendicularly to the flow direction and, consequently, the microfluid width was narrowed. The inflation and contraction were flexibly like a virtual wall and dependent on two factors: one is the flow velocity of the microfluid and the other is the pressure inside the gas boundary. Dimensions of the chamber and the microchannel width were determined empirically as same of 300 μm for stable operation. The width of microfluid was manipulated manually with the microheater and could be maintained as up to 22 μm . The stable focusing began to be distorted when the flow velocity exceeded 17.8 mm/s.

1. 서론

미세 유체는 수 백 마이크로미터 이하의 폭을 가지는 미세 채널에서 화학 물질이나 미세 입자의 수송 수단으로서^(1,2) 또는, 열전달의 매체로서⁽³⁾ 중요하게 연구되고 있다. 최근 들어, 화학이나 생물학 연구 등에 미세 유체 분야를 접목한 랩온어칩 (lab-on-a-chip)이나 마이크로타스 (micro-TAS, total analysis systems)의 분야에서 미세 유체의 흐름을 제어하거나,⁽⁴⁾ 극소량의 서로 다른 두 종류의 유체를 혼합 (mixing)하거나,⁽⁵⁻⁷⁾ 또는 미세 유체의 폭을 조절하는^(8,9) 다양한 연구들이 이루어지고 있다.

미세 유체를 조작하는 기존의 대표적인 방법은, 공압 펌프나 주사기 펌프를 이용해서 미세 유체의 좌우에 버퍼 (buffer)를 주입하고 압축 (sheathing)

하는 것이다. 이 방법은, 좌우 버퍼의 유량을 서로 다르게 조절함으로써 미세 유체의 방향을 조절할 수 있으며 세포 조작 장비에도 적용할 수 있다. 또한, 버퍼와 미세 유체의 유량 비를 조절하면 최대 수 마이크로미터 정도로 미세 유체를 압축할 수 있어서⁽⁸⁾ 버퍼의 내용물과 미세 유체의 빠른 혼합도 가능하다.

하지만, 소자에 비해 외부 펌프 시스템이 고가이고 부피도 커서 실험실 외부에서의 사용을 목표로 하고 있는 랩온어칩이나 마이크로타스의 분야에 적용하기는 적절하지 않다. 그러므로, 미세 소자에 적용 가능하고 미세 유체의 흐름과 폭을 조절할 수 있는 새로운 방법의 연구가 필요하다. 최근 들어, 이러한 목적에 적용이 가능한 가스를 이용한 미세 펌프와⁽¹⁰⁻¹³⁾ 미세 유체 혼합의⁽¹⁴⁾ 연구 사례들이 소개되고 있다.

본 논문에서는 미세 채널의 흐름과 수직인 방향으로 가스를 발생시켜 유체에 대해 가상의 벽 (virtual wall)을 형성하고 가스의 팽창과 유속을 조절하여 가상의 벽을 움직여서, 안정적으로 미세 유체의 폭을 조절할 수 있는 새로운 방법을 제안한다.

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : chairson@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3086 FAX : (042)869-5046

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

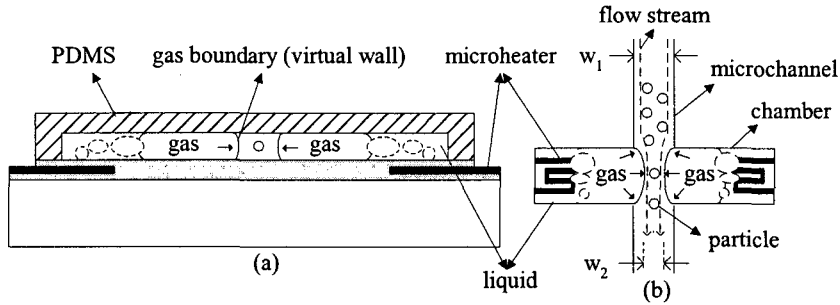


Fig. 1 Schematic view of manipulation of microfluid width: (a) cross section; (b) top view

2. 원리 및 디자인

Fig. 1은 미세 채널 내의 미세 유체의 폭을 조절하는 원리와 이를 구현하기 위한 디자인을 개략적으로 보여준다. 단면(cross section)에 나타낸 바와 같이, 미세 히터(microheater)로 챔버(chamber) 내의 액체(liquid)를 가열해서 가스(gas)를 생성하고, 유체에 대해 경계면(gas boundary)을 형성한다. 양방향에서 가스 경계면을 팽창시키면 윗면(top view)에 나타낸 것처럼, 유체의 폭은 처음의 w_1 에서 반원 형태로 줄어들게 되며 가운데 부분에서 최소 폭 w_2 가 된다. 폭 w_2 는 챔버 내부의 온도에 따른 압력과 미세 유체의 유속에 반비례 하게 된다.

가스 경계면이 수축 또는 팽창하면서 미세 유체의 폭이 변하는 것은, 마치 가상의 벽(virtual wall)이 미세 유체의 흐름에 수직한 방향으로 움직이는 것과 같다. 가상의 벽은 고정되어 있는 미세 채널과 달리 자유로이 그 폭을 조절할 수 있으므로, 하나의 구조물로부터 다양한 폭의 미세 채널들을 구현할 수 있다. 이를 응용하면, 입자(particle)들을 포커싱하면서 수송하거나 좌우의 팽창 정도를 달리하여 원하는 방향으로 스위칭(steering)하는 것도 가능하다.[Fig.1(b)]

챔버 속의 액체는 미세 히터로 가열해서 가스를 발생할 수 있어야 하므로 끓는점이 높지 않아야 한다. 본 연구에서는 과산화수소수와 물을 이용하였는데, 과산화수소수는 낮은 온도에서도 가열에 의해 물과 산소로 분해가 되어 산소 가스가 발생되었고 물은 가열에 의해 증기를 발생시켰다. 미세 히터의 기판은 절연을 위해서 글래스 또는 산화막을 입힌 실리콘 웨이퍼를 사용하고, 미세 히터는 알루미늄을 증착하고 패터닝하여 제작하였다. 미세 히터를 보호하고 미세 채널과의 접합성을 높이기 위해 절연층을 미세 히터 위에 생성하였다.

가스 경계면 형성을 위해 미세 유체 흐름과 수직한 방향으로 챔버를 미세 채널의 좌우에 연결하였고, 채널의 재질은 관찰의 용이성과 절연층과의 접합을 고려해서 polydimethylsiloxane (PDMS, Sylgard184, Dow Corning, USA)로 하였다.

3. 제작

디바이스는 두 가지 모델로 제작하였는데 첫 번째 모델은, 세 개의 챔버를 미세 채널에 연결하여 서로 다른 세 개의 가스 경계면 반경을 가지도록 하였다. 이를 통해, 미세 유체의 폭을 조절하는데 적합한 미세 채널과 챔버의 크기를 결정하였다. 두 번째 모델은, 첫 번째 모델로부터 결정된 미세 채널과 챔버로 제작되었다.

두 모델의 제작 공정은 유사하지만, 사용한 기판과 미세 히터의 재질에서 차이가 있다. 첫 번째 모델은, 글래스 기판과 금을 사용하였고, 두 번째 모델은, 산화막을 입힌 실리콘 웨이퍼와 알루미늄을 사용하였다. 또한, 첫 번째 모델에 비해 두 번째 모델은 챔버 위에 유체 주입구가 있다. Fig. 2는 두 번째 모델을 기준으로 한 공정도이다.

3.1 미세 히터

미세 히터의 제작 과정은 Fig. 2A 와 같다. 우선 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 면적의 실리콘 웨이퍼 (n-type, 500 μm 두께)를 1000 $^\circ\text{C}$ 에서 4 시간 동안 습식 산화시켜 0.7 μm 두께의 산화막을 생성시켰다. 그 위에 알루미늄을 0.2 μm 두께로 열증착하고 선폭 30 μm 로 패터닝하여 미세 히터를 제작하였다. 미세 히터의 저항은 60 Ω 으로 측정되었다.

미세 히터를 절연하고 미세 채널과의 조립을 용이하게 하기 위해, spin-on-glass (SOG)를 0.8 μm 두께로 스핀 코팅하고 열처리하여 절연층을

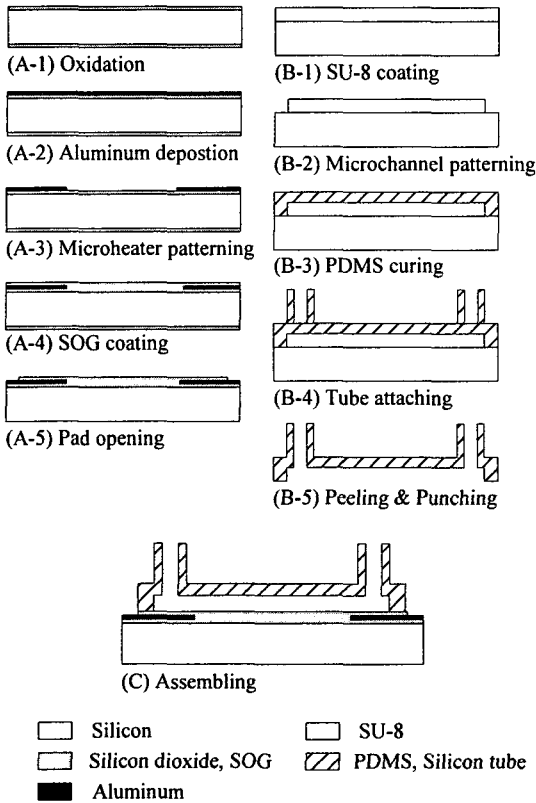


Fig. 2 Fabrication process

형성하였다. 마지막으로, 패드 부분을 패터닝하고 buffered oxide etchant (BOE)로 SOG 막을 에칭하여 미세 히터의 전극을 노출시켰다.

3.2 미세 채널

미세 채널의 제작 과정은 Fig. 2B와 같다. 마스터로 몰드 (mold)를 먼저 제작하고 여기에 PDMS를 부어서 경화시키는 캐스팅 (casting) 공법으로 제작하였다.

몰드 제작을 위해, 실리콘 기판에 음성 감광재인 SU-8 (Microchem, USA)을 두께 50 μm로 스핀 코팅하고 핫 플레이트를 이용해서 65/95 °C 에서 6/20 분간 베이킹 (bake)하였다. 자외선 노광량을 400 mJ/cm²로 한 후, 다시 65/95 °C 에서 2/5 분간 베이킹하고 6 분간 현상하여 높이 50 μm, 폭 300 μm의 미세 채널 몰드를 완성하였다.

경화된 PDMS를 몰드로부터 분리하는 과정에서 미세 채널의 형상을 보호하기 위해, trimethyl silane (DC(R) 9-5170, Dow Corning, USA)을 진공 용기에 몰드와 함께 24 시간 동안 두어서 몰드 표면에 이형막이 형성되도록 하였다. PDMS 제조를 위해, base와 curing agent를 10:1 (w/w)로 섞은 다음,

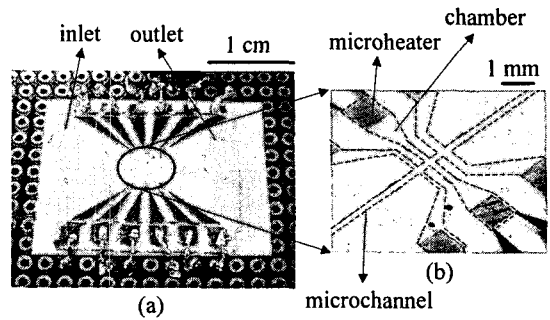


Fig. 3 Device for multi-point focusing: (a) overall view; (b) microchannel and microheater

내부의 공기를 진공 용기에서 제거하였다. 이어서, 몰드에 두께 1 mm로 부은 다음 오븐 (65 °C)에서 5 시간 동안 경화시켜 몰드와 역상인 미세 채널을 제작하였다.

주입구 (inlet, outlet)를 제작하기 위해, 내경 2.5 mm, 외경 4 mm의 실리콘 튜브의 단면에 액체 상태의 PDMS를 바르고 채널 윗면에 부착한 다음 미세 채널 제작과 동일한 온도와 시간으로 열처리하였다. 이어서, 주입구가 부착된 미세 채널을 칼로 잘라서 몰드로부터 떼어낸 후, 실리콘 튜브의 내경에 공구를 삽입하고 편칭하여 지름 2 mm의 주입구를 제작하였다.

3.3 디바이스 조립

제작된 미세 히터 기판과 미세 채널을 조립하여 디바이스를 완성하였다.(Fig. 2C) 우선, 플라즈마 클리너 (PDC-32G, Harrick, USA)의 챔버에 미세 채널을 넣고 내부의 공기를 0.2 torr 이하의 압력으로 유지하면서 1 분간 플라즈마를 발생시켜 표면을 산화시켰다. 이어서, 프로브 스테이션 (probe station) 위에 미세 히터 기판을 고정시키고 메탄올을 뿌린 후 그 위에 미세 채널을 덮었다. 프로브로 미세 채널 윗면을 고정시킨 상태로 미세 채널과 미세 히터 기판 사이의 메탄올을 윤활제로 이용하면서 두 면을 정렬하였다. 30 분 정도 상온에 두어서 메탄올이 증발하도록 한 후 프로브를 제거하고 오븐 (80 °C)에 24 시간 이상 두어서 두 면이 접착되도록 하였다.

제작된 디바이스는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. Fig. 3은 미세 채널과 챔버의 폭 비율이 1.5, 1.0, 그리고 0.5가 되도록 세 개의 챔버를 가지는 첫 번째 모델을, PCB 기판에 부착하고 인둠으로 전극을 연결한 상태를 보여준다. Fig. 4는 미세 채널과 챔버의 폭 비율이 1.0인 두 번째 모델을 보여준다.

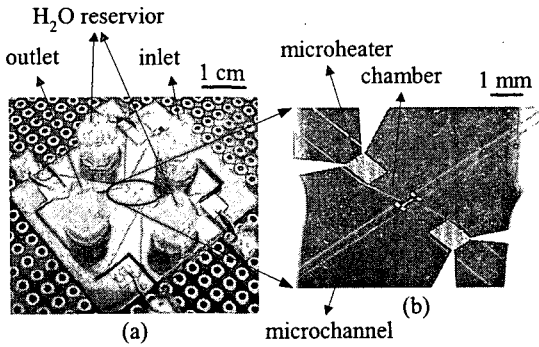


Fig. 4 Device for single-point focusing: (a) overall view; (b) microchannel and microheater

4. 실험

4.1 멀티포인트 포커싱 실험

미세 유체의 폭을 조절하기에 적합한 미세 채널과 챔버의 형상을 결정하기 위해서 멀티포인트 실험이 가능한 Fig. 3의 디바이스로 실험을 수행하였다.

실험 장비 구성은 Fig. 5와 같으며, 유체 수송을 위해 peristaltic pump (LKB P-1, Pharmacia, Sweden)를 사용하였고, 현미경으로 유체 폭 조절 정도를 관찰하기 위해 디바이스가 부착된 PCB 기판을 프로브 스테이션에 설치하였다.[Fig. 5(a)] 미세 히터의 전극은 각각 버튼식 스위치를 이용해서 9 V 건전지 연결하였고 스위치를 손으로 점멸하면서 가스 발생을 조절하였다.[Fig. 5(b)]

실리콘 튜브로 주입구와 펌프를 연결하고 미세 채널과 챔버를 deionized (DI) water 로 채운 후, 미세 히터로 챔버 내의 DI water 를 가열해서 수증기를 발생시켜 가스 경계면을 형성하였다.[Fig. 6(a)] 유량을 0.1~1 ml/h 로 유지하면서, 가스 경계면을 형성하고 팽창시켜 미세 유체의 폭을 좁혔다.[Fig. 6(b),(c)]

챔버 세 곳에서 동시에 가스를 발생시키자 각 가스 경계면이 서로 영향을 미치는 것이 관찰되었으며, 결과적으로 세 개의 가스 경계면을 독립적으로 조절하는 것이 어려웠다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 챔버 입구 사이의 거리를 충분히 멀리해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 미세 채널과 챔버 폭의 비율 (T/W)이 좌로부터 1.5, 1.0, 그리고 0.5 세 가지 조건일 때, 가운데 1.0 인 경우에서 미세 유체의 폭이 안정적으로 조절됨을 반복적인 실험을 통해 확인하였다. 이때, 미세 채널의 폭은 200 μm 이었다.

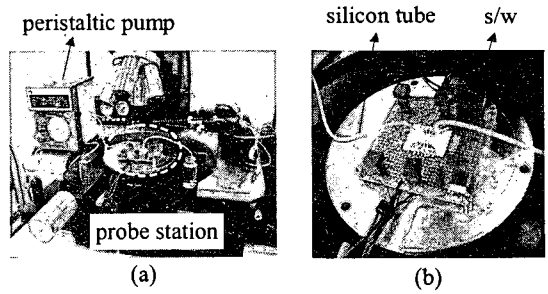


Fig. 5 (a) Experimental setup with device installed on probe station and peristaltic pump; (b) device mounted on PCB and connected with s/w for heating

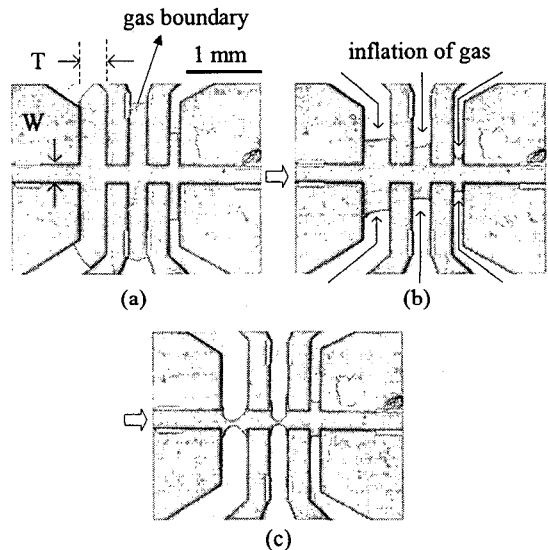


Fig. 6 Process of microfluid width manipulation at multi-point. The gas boundary inflates and the microfluid width narrows as the process goes from (a) to (c) through (b). The ratio of T/W is 1.5, 1.0, and 0.5 from left to right, respectively, where W=200 μm

4.2 싱글포인트 포커싱 실험

멀티포인트 실험 결과로부터, 미세 채널과 챔버 폭의 비율을 1.0 으로 하는 디바이스(Fig. 4)를 제작하였고, 이를 이용해서 미세 유체의 폭을 조절하는 실험을 수행하였다. 이때, 채널의 폭은 300 μm 로 제작하였다.

동일한 방법으로 유체의 폭은 Fig. 7과 같이 조절되었으며 가스 경계면 내부의 압력과 유속에 반비례하는 경향이 관찰되었다. 유체의 폭 변화에 따른 영향을 관찰하기 위해, 10 μm 크기의 polystyrene 비드(CAT#17136, Polysciences Inc., USA)를 미세 채널에 흘려보냈으나 유속이 빨라서

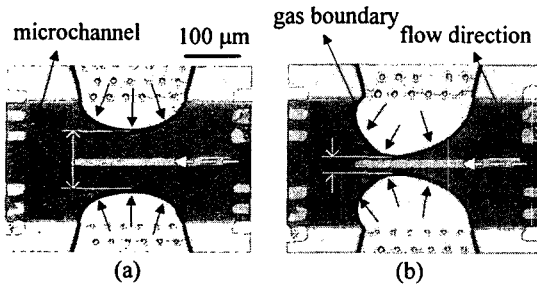


Fig. 7 Microfluid width manipulation at single-point: (a) the moment the width was 140 μm ; (b) the moment the width reached up to 22 μm where the microchannel width was 300 μm . Ink (black) was injected in the microchannel to illustrate the gas boundary

CCD 카메라로 비드가 확인이 되지 않았다.

대신에, 검은색 잉크를 주입하여 가스 및 유체의 경계면을 표시하였고 유체의 폭이 조절되는 정도를 나타내었다.

펌프의 유량 조절 다이얼과 s/w 의 점멸을 손으로 조절하면서 미세 유체의 폭을 단계적으로 줄인 결과, 최대 22 μm 까지 안정적으로 줄일 수 있었다. Fig. 7(a) 상태에서 Fig. 7(b) 상태로 가스 경계면이 팽창하면서 검은색 잉크가 지나가던 미세 채널의 바닥면이 드러났다. 이때, 바닥면에 잉크의 흔적이 없는 것으로 보아, 가스 경계면이 미세 채널의 바닥면과 윗면에 완전히 접촉하고 있다는 것과, 가스의 팽창압력이 미세 채널면에 대한 잉크의 표면장력보다 높음을 유추할 수 있다. 또한, 보통의 세포가 10 μm 의 크기임을 고려할 때, 본 방법은 미세 채널에서 세포의 유동을 조절하는 용도에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

유속이 17.8 mm/s 이상이 되자 가스 경계면의 형상이 안정 상태를 유지되지 못하고 변형되기 시작하였다. 유속이 더 빨라지자 두 경계면 사이의 거리가 급격히 감소하면서 서로 붙어버리면서 폭 조절 기능을 상실하였다.

5. 고 찰

챔버에서 가스를 생성하기 위해 과산화수소수 (30 %, w/w)를 가열하여 물과 산소 가스로 분해시키면서 산소 가스를 발생시켜 보았으나, 가열을 중지한 이후에도 적은 양이지만 계속해서 산소 가스가 발생되어 안정적으로 가스 경계면을 유지하는데 어려움이 있었다. 과산화수소수는 작은 입자, 빛, 또는 접촉면의 거칠기 등에 의해

자발적으로 분해가 일어나는 성질이 있는 것으로 알려져 있고,⁽¹⁵⁾ 미세 채널 내에는 일정 수준의 거칠기가 존재하므로 과산화수소수를 본 방법에 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

과산화수소수 대신 DI water를 사용하자, 가열에 의해 수증기가 발생하고 냉각에 의해 응축이 일어나므로, 가열을 조절함으로써 경계면의 팽창과 수축을 조절할 수 있었다. 채널의 폭이 300 μm 일 때 최대 22 μm 까지 유체의 폭을 좁힐 수 있었으며 그 이하로는 조절이 되지 않는 것으로 보아, 채널의 폭, 유속, 가스 내부의 압력 등의 변수들에 의해 조절 가능한 최소 폭이 결정될 것으로 추측된다. 또한, 가열 시간과 유속을 제어기로 더 정교하게 조절하면, 조절 가능한 최소 폭이 달라질 것으로 판단된다.

가스 발생원으로 사용한 물에 비해 점성차가 크고 온도에 의해 부피 팽창이 가능한 오일 같은 재료를 사용하면, 보다 효율적으로 미세 유체의 폭을 조절할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 좁혀진 폭이 채널의 중심부에서 양끝으로 움직인다면 flow switching도 가능할 것으로 예상된다. 정량적인 조절을 위해서는, 시뮬레이션으로 변수들의 영향을 분석하고 다양한 형상의 디바이스를 제작하여 검증할 필요가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는, 가스 경계면의 형성과 팽창을 이용하여 미세 채널 내부를 흐르는 미세 유체의 폭을 자유로이 조절할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 가스 경계면은 가스의 벽과 같이, 고정되어 있는 미세 채널의 폭으로부터 다양한 미세 유체 폭을 생성할 수 있다. 이를 위해, 챔버가 연결된 미세 채널을 PDMS로 제작하고 미세 히터를 실리콘 기판 위에 제작한 후, 두 층을 접합하여 디바이스를 제작하였다. 그리고, 실험으로부터 미세 채널과 챔버의 폭이 같은 크기일 때 미세 유체의 폭 조절이 안정적이라는 것을 알 수 있었다.

챔버 내에 저장된 DI water를 미세 히터로 가열해서 가스 경계면을 형성하고 팽창시켜 높이 50 μm , 폭 300 μm 인 미세 채널 내부를 흐르는 미세 유체 폭을 최소 22 μm 까지 안정적으로 좁힐 수 있었다. 유속이 17.8 mm/s 이상이 되자 폭 조절은 불안정해지기 시작하였으며, 미세 채널의 폭, 유속, 가스 경계면 내부의 압력 등에 의해 안정적으로 유지될 수 있는 최소 폭이 결정될 것으로 추측된다.

제안된 방법을 이용하면, 공압 펌프나 주사기 펌프와 같은 외부 장비를 사용하지 않고서도 미세 유체의 폭을 조절할 수 있으며, 세포의 이송경로를 조절하는 용도에도 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21 세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원 (02-K14-01-005-1-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Arash Dodge, Gijs W. K. van Dedem, Nico F. de Rooij, and Elisabeth Verpoorte, 2003, "Chemical and Physical Processes for Integrated Temperature Control in Microfluidic Devices," *Lab on a chip*, Vol. 3, pp. 1~4.
- (2) Yasuda, K. Umemura, S. -I. and takeda, K., 1995, "Concentration and Fractionation of Small Particles in Liquid by Ultrasound," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 2715~2720.
- (3) Belhardj, S., Mimouni, S., Saidane, A. and Benzohra, M., 2003, "Using Microchannels to Cool Micro-processors: a Transmission-Line-Matrix Study," *Micro-Electronics J.*, Vol. 34, pp. 247~253.
- (4) Nieuwenhuis, J. H., Bastemeijer, J., Sarro, P. M. and Vellekoop, M. J., 2003, "Integrated Flow-Cells for Novel Adjustable Sheath Flows," *Lab on a chip*, Vol. 3, pp. 56~61.
- (5) Deval, J., Tabeling, P., Ho, C. -M. Ho, 2002, "A Dielectrophoretic Chaotic Mixer," *Proc. IEEE Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'02)*, pp. 36~39.
- (6) Lee, Yi-Kuen, Deval J., Tabeling P. and Ho, Chih-Ming 2001, "Chaotic Mixing in Electrokinetically and Pressure Driven Micro Flows," *Proc. IEEE Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'01)*, pp. 483~486.
- (7) Branebjerg J., Gravesen P., Krog J. P., Nielsen C. R., 1996, "Fast Mixing by Lamination," *Proc. IEEE Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'96)*, pp. 441~446.
- (8) James B. Knight, Ashbin Vishwanath, James P. Brody and Robert H. Austin, 1998, "Hydrodynamic Focusing on a Silicon Chip: Mixing Nanoliters in Microseconds," *Physical Review Letters*, Vol. 80, No. 17, pp. 3863~3866.
- (9) Miyake R., Ohki H., Yamazaki I., Yabe R., 1991, "A Development of Micro Sheath Flow Chamber," *Proc. IEEE Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'91)*, pp. 265~270
- (10) Xie, J., He, Q., Tai, Y. -C., Liu, J. and Lee, T., 2002, "Integrated Electrospray Chip for Mass Spectrometry," *Proc. Int. Conf. On Micro Total Analysis Systems (μ TAS'02)*, pp. 709~711.
- (11) Choi, Y. H., Son, S. U. and Lee, S. S. 2003, "Novel Micropump Using Oxygen as Pumping Source," *Proc. IEEE Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'03)*, pp. 116~119.
- (12) Hong, C. -C., Murugesan, S., Kim, S., Beaucage, G., Choi, J. -W. and Ahn, C. H., 2003, "A Functional on-Chip Pressure Generator Using Solid Chemical Propellant for Disposable Lab-on-a-Chip," *Proc. IEEE Int. Conf. On Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'03)*, pp. 16~19.
- (13) Son, S. U., Choi, Y. H. and Lee, S. S. 2003, "Fabrication of Micro Cell Counter Integrated with Oxygen Pump," *Proc. Korean MEMS Conf.*, pp. 436~440.
- (14) Liu, R. H., Yang, J., Pindera, M. Z., Athavale, M. and Grodzinski, P., 2002, "Bubble-Induced Acoustic Micromixing," *Lab on a chip*, Vol. 2, pp. 151~157.
- (15) Chang, R., 1981, "Chemistry," 2nd ed., Random House, New York, p. 63, p. 591.