열모세관에 의한 미소액적 구동과 모세관 밸브

임남혁* • 김성욱** • 유정열†

Micro droplet driven by thermocapillary and capillary valve

Namhyuk Lim*, Sungwook Kim** and Jung Yul Yoo†

Key Words : Micro droplet (미소액적), Thermocapillary (열모세관), Capillary valve (모세관 밸브), Bifurcation channel (분기관), Meniscus (메니스커스)

Abstract

This paper presents the design, fabrication, and testing of the capillary-induced pressure drop valve, thermocapillary pumping of liquid droplet in hydrophilic channels and the splitting of droplet. The capillary-induced pressure drop is derived with thermodynamic approach considering three-dimensional meniscus shape which is essential for calculating pressure drop in the diverging shape channel when the aspect ratio is close to one. The micro channel is fabricated via MEMS processes, which consists of the liquid stop valve to retard the liquid droplet, thermocapillary pumping region and the bifurcation region. Also the micro heaters are fabricated to drive the droplet by thermocapillary. The theoretical approaches agree well with the experimental data. The functionality of capillary valve is confirmed to be valid when the aspect ratio is smaller than one. To overcome the difficulty in splitting of the droplet due to the pressure drop in the general Y-shape channel, the protrusion shape is employed for easy splitting in the bifurcation channel.

기호설명

w : 채널 폭
h : 채널 높이
x : 목으로부터 메니스커스까지의 거리
r : 곡률반경
L : 채널 길이
w/h : 종횡비 (aspect ratio)
P : 유체압력

그리스문자
g : 표면장력
q_c : 접촉각
z : 채널 상하의 곡률각
a : 채널 측면의 곡률각
b : 확대관의 각

하첨자
a : 공기
s : 고체
l : 유체

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 정회원, 서울대학교 마이크로열시스템연구센터
† 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail: jyyoo@plaza.snu.ac.kr
TEL: 02-880-7125 FAX: 02-883-0179

1. 서 론

유체의 제어는 미소전기기계시스템 (MEMS)과 의공학 분야에서 중요한 요소이다. 그러나 마이크로 펌프와 밸브에 대한 많은 연구가 수행되었으나 상업적으로 이용되고 있는 경우는 드문 실정이다.

마이크로 펌프는 그 구동방식에 따라 크게 전기와 열에 의한 구동으로 나누어진다. 전기를 이용한 유체의 구동은 주로 전기 전도성 유체 (conductive liquid)의 구동에 이용이 된다는 제약이 있다[1]. 한편 열을 이용한 방법은 비전도성 유체를 구동할 수 있으나 고온에 의한 유체의 성분 손상

과 정확한 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다[2,3]. 전기 젖음 (electro-wetting)을 이용한 유체 구동은 이러한 문제들을 해결하였으나,[4-5] 소수성인 테프론 (Teflon)에 잔존하는 전하들에 의한 비가역성 (irreversibility) 문제를 가지고 있다[6].

이러한 고온과 제어의 문제를 해결할 수 있는 하나의 방법으로 열모세관 (thermocapillary) 현상을 이용한 유체 구동이 시도되었다[7,8]. 모세관에 미소 액적 (droplet)이 존재하는 경우, 액적의 양단에는 표면장력이 작용한다. 이 표면장력은 온도에 따라 그 크기가 변화하기 때문에, 이러한 현상을 이용하여 열모세관 펌프 (thermocapillary pump)는 액적의 양단에 온도차를 발생시켜 미소 액적을 구동시킨다. 또한 액적 양단의 온도는 유체의 비등점 이하로 유지할 수 있기 때문에 유체의 열적 손상을 줄일 수 있다.

한편 모세관 내에 미소 액적을 만들기 위하여, 친수성 (hydrophilic) 모세관 내부로 유입되는 유체를 특정 위치에서 정지시키는 것이 중요하다. 기존 연구자들은 주로 OTS (octadecyltrichlorosilane)[9], 소수성 패치 (hydrophobic patch)[10] 혹은 기포의 팽창[11]을 이용하여 유체를 제어하였다. 그러나 이러한 방법들은 각각 고비용, 공정의 복잡성, 그리고 고온의 문제점 등을 내포하고 있다. 이러한 문제점들은 Man 등[12]에 의해 고안된 모세관 밸브 (capillary valve)에 의하여 상당히 개선할 수 있었다. 그들은 채널의 기하학적 모양을 조절함으로써 쉽게 밸브로서의 기능을 구현하였다. 그러나 Man 등의 해석은 종횡비 (aspect ratio)가 작은 경우에만 적용이 가능하다. 그러나 마이크로 공정 (micro fabrictation)에 의하여 폭에 비해 높이가 큰 채널을 제작하는 것은 어렵고 상용화 측면에서도 공정 비용 상승의 원인이 되기 때문에 임계 종횡비 (critical aspect ratio)의 선택은 매우 중요하다.

본 연구는 미소 액적을 구동하는 마이크로 펌프 내에서 모세관 밸브의 기능에 중요한 영향을 미치는 인자들에 대한 이론적 고찰과 실험적 검증을 그 목적으로 한다. 또한 액적이 확대관을 지날 때 발생하는 압력강하는 분기관 (bifurcation channel)에서도 나타나는 현상이기 때문에 열모세관 현상을 이용한 액적의 분기가 쉽지않게 된다. 따라서 돌출형태의 구조물을 채널의 분기부에 설치하여 액적의 분기를 용이하게 하였다.

2. 이론적 해석

Fig. 1 은 단면이 확대되는 채널에서 종횡비에 따른 메니스커스의 형상을 보여주고 있다.

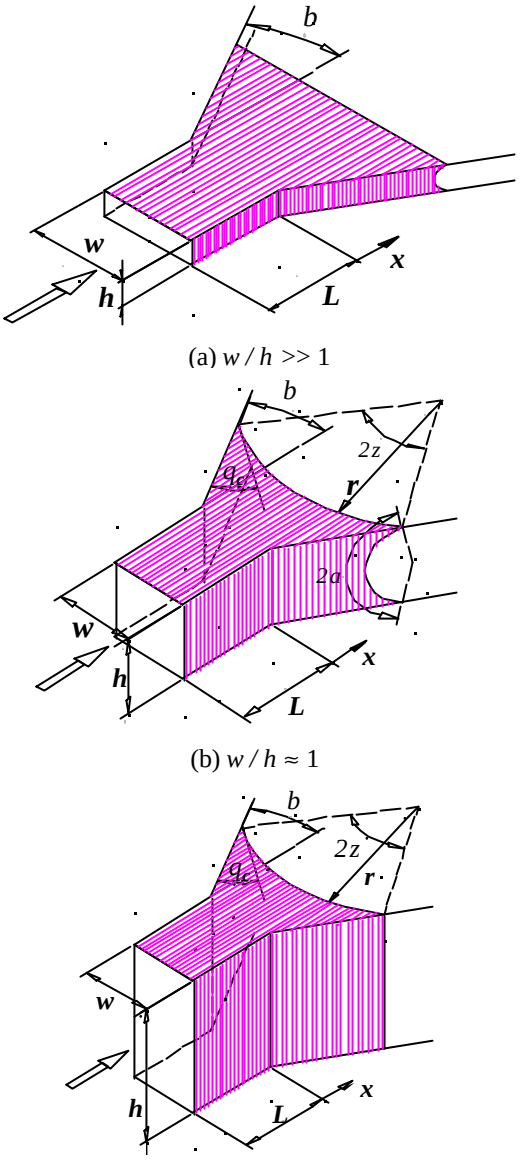


Fig. 1 Meniscus shapes in diverging channels at various aspect ratio

Fig. 1(a)의 경우는 폭이 높이에 비해서 크기 때문에 채널의 측면이 주된 모세 영역 (capillary region) 이 된다. 따라서 채널 측면의 메니스커스 (meniscus) 형상은 호의 형태를 갖지만, 채널의 위와 아래면은 직선 형태의 메니스커스가 존재하게 된다. Fig. 1(c)는 이와 반대의 경우이다. 폭에 비해서 높이가 크기 때문에 폭이 주된 모세 영역이 된다. 메니스커스의 형상은 fig. 1(a)의 반대의 경우가 된다. Fig. 1(b)는 종횡비가 1 에 가까운 경우를 나타낸다. 이 경우, 채널의 모든 면에서 메니스커스가 호의 형상을 가지므로 3 차원적인 해석이 필요하다. 각각의 메니스커스는 원호의 형태로 가정하였다.

모세압력 (capillary pressure)의 계산은 열동력학적 접근법 (Thermodynamic approach)[12]을 이용하여 Fig. 1 의 세가지 경우에 대하여 수행하였다. 계산된 압력은 종횡비에 따라서 다음과 같이 표현된다.

$w/h >> 1$ 인 경우,

$$P = \frac{g_{la}\cos q_c\left[4x\tan b + 2w + \frac{2h}{\cos b}\right] - g_{la}\frac{2ah\tan b}{\sin a}}{wh + 2xh\tan b - 2\left[\frac{a}{4}\left(\frac{h}{\sin a}\right)^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2\frac{\cos a}{\sin a}\right]\tan b} \quad (1)$$

$w/h << 1$ 인 경우,

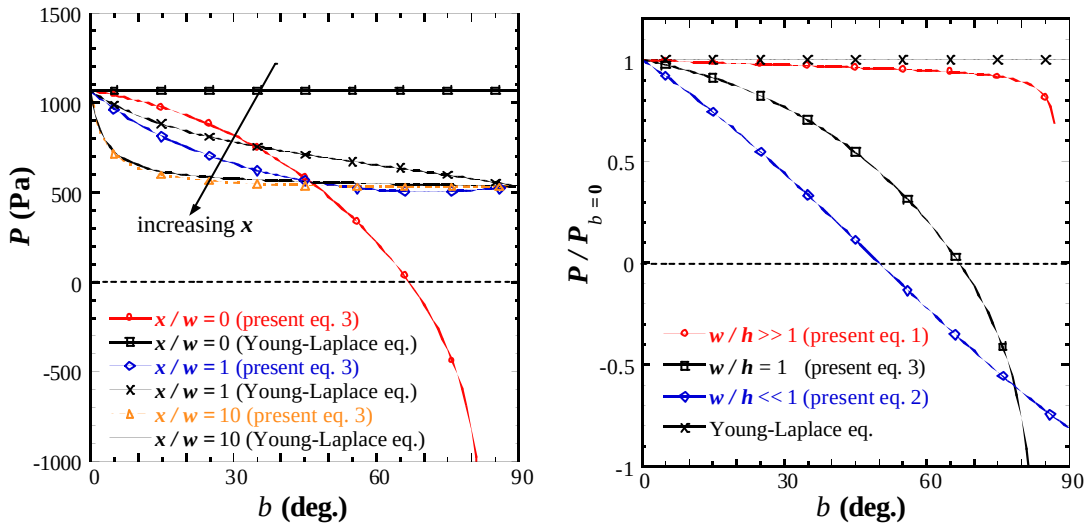
$$P = \frac{g_{la}\cos q_c\left[4x\tan b + 2w - \frac{2(w+2x\tan b)\tan b}{\sin V}\left(\frac{V}{\sin V} - \cos V\right) + \frac{2h}{\cos b}\right] - g_{la}\frac{2Vh\tan b}{\sin V}}{wh + 2xh\tan b - \frac{(w+2x\tan b)h\tan b}{\sin V}\left(\frac{V}{\sin V} - \cos V\right)} \quad (2)$$

$w/h \approx 1$ 인 경우,

$$P = \frac{g_{la}\cos q_c\left[4x\tan b + 2w - \frac{2(w+2x\tan b)\tan b}{\sin V}\left(\frac{V}{\sin V} - \cos V\right) + \frac{2h}{\cos b}\right] - g_{la}A'_{la}}{wh + 2xh\tan b - \frac{h\tan b(w+2x\tan b)}{\sin V}\left(\frac{V}{\sin V} - \cos V\right) - v'} \quad (3)$$

여기서 A'_{la}, v' 은 각각 유체와 공기에 의해서 형성된 계면의 면적과 체적 변화율을 나타낸다.

여기서 계산된 압력은 접촉각에 의해 계면방향과 같다. Fig. 2 는 계산된 압력과 확대각 (diverging angle)과의 관계를 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 폭과 높이가 각각 200 *mm* 이고 구동유체가 20 °C 의 물이라고 가정했을 경우에 대한 모세압력과 확대각과의 관계를 보여주고 있다. x = 0 인 영역, 즉 채널의 목에서의 압력은 확대각이 커짐에 따라서 작아지는 것을 알 수 있다. 확대각이 70° 이상의 경우, 모세압력이 음의 값으로 강하하는 것을 볼 수 있다. 이것은 목 부분이 모세관 밸브로서의 기능을 할 수 있다는 것을 보여준다. 그러나 x 가 커짐에 따라 계산된 압력은 Young-Laplace 방정식에 의해 계산된 압력에 근사하고 모세압력이 음의 값까지 강하하지 않는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(b)는 각각의 종횡비에 따라 계산된 압력을 확대각이 0° 인 경우의 압력으로 나눈 무차원 압력을 나타내고 있다. 종횡비가 작을수록 작은 확대각에서도 음의 압력을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 종횡비가 1 보다 매우 큰 경우에는 최대 확대각에서도 압력이 음의 값을 갖지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 모세관 밸브로서의 기능은 종횡비가 1 보다 작은 경우에서만 가능하다는 것을 알 수 있다.



(a) Calculated capillary pressure for w/h = 1 (b) Non-dimensional pressure at various aspect ratio

Fig. 2 Calculated pressure versus diverging angle

3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 마이크로 히터 (micro heater)는 반도체 공정을 이용하여 제작하였다. 마이크로 히터의 제작공정은 Fig. 3(a)에 나타내었다. 공정에 사용된 웨이퍼 (wafer)는 두께가 500μm 이고 직경이 10cm 인 실리콘 웨이퍼이다. 단열을 위하여 실리콘 위에 5000 Å 두께의 TEOS (tetraethoxysilane)를 증착하였다. 그 위에 5000 Å 두께의 폴리실리콘 (Polysilicon)을 LPCVD (low pressure vapor chemical deposition) 공정을 이용하여 증착하였다. 증착된 폴리실리콘이 적절한 저항치를 갖게 하기 위하여 인첨가 (phosphorous dopping) 공정을 수행하였다. 폴리실리콘의 패터닝 (patterning) 작업 후 6000 Å 두께의 TEOS 보호막을 다시 증착하였다. 이 보호막은 구동유체에 의해 히터가 산화되는 것을 막는 역할을 한다. 끝으로 알루미늄을 스퍼터링 (Sputtering) 작업으로 증착하고, 패터닝하여 접촉 패드 (contact pad)를 제작하였다.

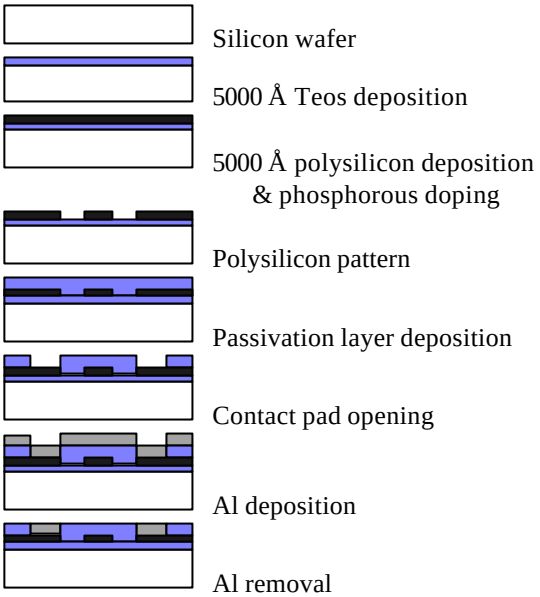
본 연구에 사용된 마이크로 채널은 폭 500 μm 높이 200 μm 크기의 유리 채널이다. 목 부분의 폭은 200 μm, 높이는 200 μm 이다. SOG (Silicon On Glass) 웨이퍼를 사용하여 실리콘 웨이퍼에 대한 에칭을 수행하였다. 이 공정은 Fig. 3(b)에 나타내었다. 우선 500 μm 두께를 가지는 Pyrex 유리 웨이퍼와 200 μm 두께를 가지는 실리콘 웨이퍼로 구성된 SOG 웨이퍼를 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정을 이용하여 패턴 작업을 수행하였다. 끝으로 샌드블라스트 (sand blast) 공정을 이용하여 채널의 입출구를 제작하였다.

실험장치의 구성은 Fig. 4에 제시하였다. 마이크로 채널의 바닥에 설치되어 있는 히터에는 전원공급장치 (power supply)와 제어기를 통하여 전류가 공급된다. 유체유동을 관찰하기 위하여 현미경과 CCD 카메라를 사용하였다.

4. 실험결과

4.1 모세관 밸브

Fig. 5(a)에 유체가 표면장력에 의하여 채널 내부로 유입되는 상태를 나타내었다. 유체의 계면이 친수성 형상임을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 유체가 밸브의 목에서 압력강하에 의해 정지한 상태를 나타내고 있다. 이러한 현상은 이론적인 값과 잘 일치하는 것을 보여준다. 이때 목에서의 계면은 소수성으로 바뀌는데 이러한 현상은 모세관 밸브의 기능을 물리적인 설명하기 위한 중요한 단서가



(a) Fabrication process of heater.

(b) Fabrication process of channel

Fig. 3 Fabrication process

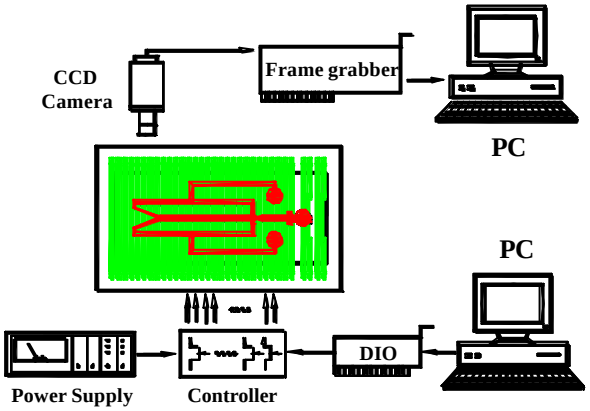
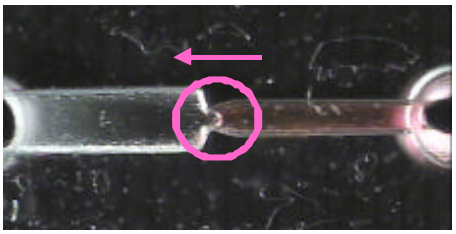
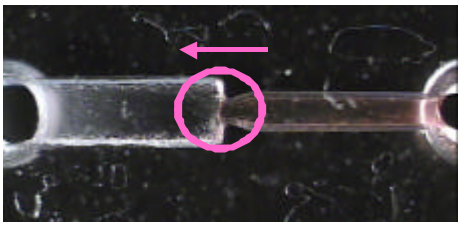


Fig. 4 Experimental setup

된다. 즉 친수성에서 소수성으로의 계면 변화는 액적에 미치는 힘의 방향을 하류방향에서 상류방향으로 바꾼다. 채널의 상하면에서 작용하는 소수성 계면에 의한 모세압력이 측면의 친수성 계면에 의한 모세압력보다 크면 유체는 상류방향으로 작용하는 힘을 받게 되고 유동은 더 이상 전진하지 못한다. Fig. 5에서와 같은 폭과 높이를 가지나 확대각이 70^o 와 50^o 인 경우를 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 6(a)로부터 확대각이 50^o 인 경우, 표면장력에

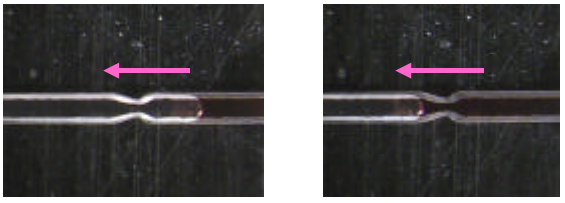


(a) Liquid wets into the channel

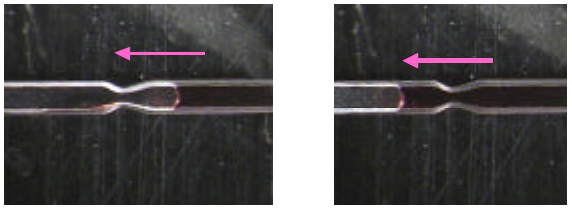


(b) Liquid stops at neck

Fig. 5 Capillary driven stop valve



(a) Capillary valve at b = 50^o



(b) Capillary valve at b = 70^o

Fig. 6 Capillary valve

의해 채널 내부로 유입된 유체가 목에서 멈추지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 이론적인 계산과도 일치하는 결과이다. 반면에 확대각이 70^o 인 경우, 이론적인 모세압력은 크기가 수 Pa 에서 수십 Pa 인 음의 압력이 작용하지만, 실제 실험의 경우 Fig. 6(b)와 같이 유체가 목에서 멈추지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이론식의 유도 시 유체의 계면이 호의 형태를 가진다는 가정을 하였으며, 실제 실험을 위한 채널의 표면이 거칠고 밸브의 수축-확대부에서 단면의 변화가 급격하지 않기 때문이다. 또한 채널의 입구에 유체를 주입하면 입구에 볼록한 형태의 액적이 형성되는데, 이러한 소수성 액적은 유체를 하류방향으로 밀어내는 역할을 하기 때문이다. 채널의 설계 시 샌드블라스트 공정으로 제작된 입출구 구멍의 크기가 1mm 정도인데, 이때 입구에서의 모세압력은 200 Pa 을 능가한다. 따라서 확대각이 70^o 인 경우 전술한

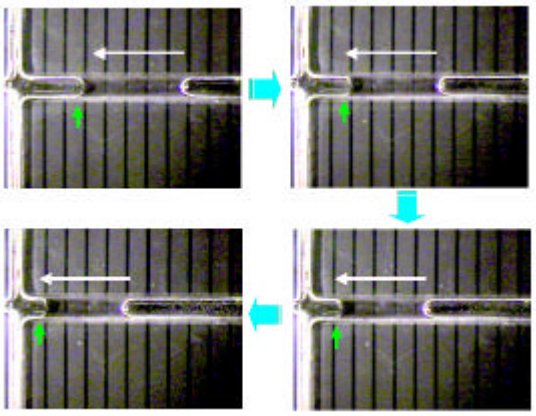


Fig. 7 Thermocapillary pumping

요인들로 인하여 목에서 유체가 멈추지 않는다고 판단된다.

4.2 열모세관 펌프

Fig. 7 에 열모세관 현상에 의하여 마이크로 액적이 채널의 우측에서 좌측으로 이동하는 과정을 나타내었다. 액적의 우측 하단에 위치한 히터는 온도의 변화를 야기하고 이로 인한 액적의 표면장력의 변화는 액적의 모세압력 변화를 유발한다. 따라서 액적은 채널의 좌측으로 이동하게 된다. 한편 히터의 열에너지에 의한 액적 증발도 관찰할 수 있었으며, 압력에 의한 유체구동과 같이 열모세관에 의한 구동에서도 접촉각 히스테리시스 (contact angle hysteresis)가 존재한다는 것도 관찰할 수 있다.

4.3 마이크로 액적의 분기

실험에 사용된 분기관은 폭이 300 *mm* 이고 높이가 200 *mm* 인 채널이다. 이때 모세 압력은 약 900 Pa 이다. 일반적인 Y 형 분기관의 경우, 분기되는 곳의 폭이 분기전 채널 폭의 두 배 이상으로 늘어난다. 이 때 모세압력은 약 700 Pa 정도로 작아진다. 그러나 액적의 온도차에 의해서 야기되는 압력은 물의 경우 상온에서 비등점까지의 온도차

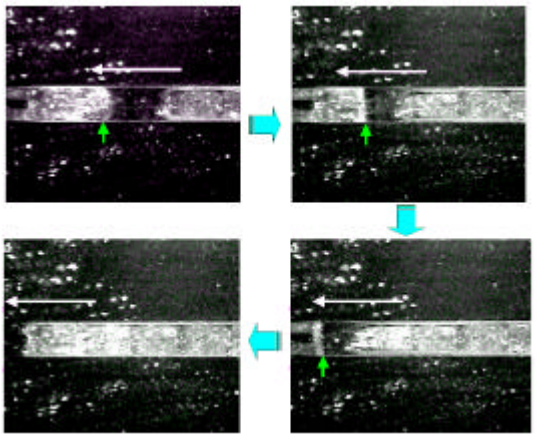


Fig. 8 Bifurcation of droplet

에서도 약 100 Pa 보다 약간 클 뿐이다. 따라서 Y 형 분기영역에 열모세관 현상을 이용한 액적의 분리는 불가능하게 된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 8에 제시한 바와 같이 분기영역 이전에 돌출형상 (protrusion shape)을 둠으로써 구동압력을 크게 하여 액적의 분기를 가능하게 하였다.

5. 결론

다양한 종횡비를 갖는 채널의 확대부에서 유체계면에 작용하는 압력을 이론적으로 해석하였다. 종횡비가 1 인 경우 확대각이 증가할수록 모세압력의 강하가 유발되고 70^o 이상인 영역에서 음의 압력이 발생함을 확인하였다. 이러한 음의 압력은 채널의 목에서 유체를 정지시키는 역할을 하게 되며 마이크로 공정을 이용하여 제작한 미소 채널 실험을 통하여 확인하였다. 목에서의 압력은 채널의 종횡비, 확대각, 유체의 표면장력, 온도 등에 의존함을 알 수 있고, 특히 종횡비와 확대각이 가장 중요한 영향을 미치는 요소이다. 모세관 밸브로서의 기능은 확대각이 크고 종횡비가 작을수록 그 효과가 크다. 이 때 목에서 음의 압력이 가장 크게 작용하기 때문이다. 한편 종횡비가 최소한 1 보다 작은 경우에 목에서 모세관 밸브로서의 기능이 가능하다. 종횡비가 1 인 경우, 확대 채널에서 모세압력 강하는 $x/w = 10$ 까지도 그 영향이 존재함을 확인하였다. 반면에 확대각이 70^o 보다 작은 경우에는 음의 압력이 나타나지 않고 모세관 밸브로서의 기능도 할 수 없음을 확인하였다. 열모세관 현상을 이용한 액적의 구동을 실험을 통하여 확인하였다. 그러나 열에 의한 마이크로 액적의 증발도 관찰되었으며 앞으로 해결되어야 할 문제라고 판단된다. 또한 분기채널에서 분기영역 전단에 돌출부를 둠으로써 액적을 쉽게 분리할 수 있다는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 마이크로열시스템연구센터와 서울대 반도체공동연구소 공동시설 활용 프로그램의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Jonathan Simon, Scott Saffer and Chang-Jin Kim, 1997, "A Liquid-Filled Microrelay with a Moving Mercury Microdrop", *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 208-216

(2) Jr-Huang Tsai and Liwei Lin, 2002, "A Thermal-Bubble-Actuated Micronozzle-Diffuser Pump", *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, No. 6, pp.665–671

(3) Thomas K. Jun and Chang-Jin Kim, 1998, "Valveless pumping using traversing vapor bubbles in microchannels", *J. Applied Physics*, Vol. 83, No. 11, pp.5658-5664

(4) Junghoon Lee, Hyejin Moon, Jesse Fowler, Thomas Schoellhammer and Chang-Jin Kim, 2002, "Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling", *Sensors and Actuators A*, Vol. 95, pp.259-268

(5) Craig Rosslee and Nicholas L. Abbott, 2000, "Active control of interfacial properties", *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, Vol. 5, pp.81-87

(6) H. J. I. Verheijen and M. W. J. Prins, 1999, "Reversible electrowetting and trapping of charge: model and experiments," *Langmuir*, Vol. 15, pp.6616-6620

(7) Timothy S. Sammarco and Mark A. Burns, 1999, "Thermocapillary pumping of discrete drops in microfabricated analysis devices," *AIChE J.*, Vol. 45, No. 2, pp.350-366

(8) Mistuhiro Makihara, Makoto Sato, Fusao Shimokawa and Yasuhide Nishida, 1999, "Micromechanical optical switches based on thermocapillary integrated in waveguide substrate," *J. Lightwave Technology*, Vol.17, No. 1, pp.14-18

(9) Helene Andersson, Wonter van der Wijngaart, Patrick Griss, Frank Niklaus and Göran Stemme, 2001, "Hydrophobic valves of plasma deposited octafluorocyclobutane in DRIE channels," *Sensors and Actuators B*, Vol. 75, pp.136-141

(10) K. Handique, B. P. Gogoi, D. T. Burke, C. H. Mastrangelo and M. A. Burns, 1997, "Microfluidic flow control using selective hydrophobic patterning", *Proc. SPIE Conf. Micromachined Devices* (SPIE Vol. 3224), Austin, Texas, Sep. 29, 1997, pp.185-195

(11) Koji Takahashi, Koichiro Yoshino, Sachiko Hatano, Kunihito Nagayama and Tanemasa Asano, 2001, "Novel applications of thermally controlled microbubble driving system," *14th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS '01), Interlaken, Switzerland, Jan. 2001, pp.286-289

(12) P. F. Man, C. H. Mastrangelo, M. A. Burns and D. T. Burke, 1998, "Microfabricated capillarity-driven stop valve and sample injector," *11th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS '98), Heidelberg, Germany, Jan. 1998, pp.45–50