

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.77

상관이 없는 직사각형 단면의 미세채널에서 모세관 유동 분석[§]

박은정* · 조지용* · 김정철** · 허대성*** · 정찬일*** · 김종경*†

* 국민대학교 기계자동차공학부, ** 서울대학교 의학연구원 의용생체공학연구소, *** (주)나노엔텍

Analysis of Capillary Flow in Open-Top Rectangular Microchannel

Eun-Jung Park*, Jiyong Cho*, Jeong Chul Kim**, Dae Sung Hur***, Chanil Chung*** and Jung Kyung Kim*†

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University

** Institute of Medical and Biological Engineering, Medical Research Center, College of Medicine, Seoul National University

*** NanoEnTek, Inc.

(Received September 16, 2009 ; Revised November 20, 2009 ; Accepted November 24, 2009)

Key Words : Capillary Flow(모세관 유동), CFD(전산유체역학), Open-Top Microchannel(개방형 미세채널), Particle Tracking Technique(입자추적기법), Surface Tension(표면장력)

초록: 소형분석시스템에서 미세채널의 상관이 제거되면 상관에 의한 빛 에너지 손실이 대폭 감소되어 광학측정법으로 대상을 분석할 때 장점을 갖는다. 본 연구에서는 상관이 없는 사각단면 미세채널 내 액체유동을 이해하려는 목적으로 실험과 전산유체역학 해석을 수행하였다. 개방형 사각단면 미세채널에서 입자추적기법으로 유속을 측정하였고, 채널의 단면적 변화에 따른 모세관 유동현상을 이론적으로 해석하였다. 단면의 너비와 높이가 각각 20 μm로 제작된 미세채널의 주입부에 물을 떨어뜨렸을 때 물은 오직 모세관 힘에 의해 미세채널을 따라 이동하였다. 액체의 젖음현상에 영향을 미치는 중요한 유동 파라미터는 채널의 크기와 표면장력, 점성 등으로 볼 수 있으며, 미세채널에서 액체 유동을 조절하는데 이용될 수 있다.

Abstract: Our study aims to understand the flow of liquid in an open-top rectangular microchannel that can be used in micro total analysis systems (μ -TAS) because it has advantages in terms of light transmission and energy efficiency. We measured the liquid velocity using particle tracking technique and conducted a simulation with computational fluid dynamics by altering the area of channel cross section and channel length for the capillary-driven flow in the open-top rectangular microchannel. When liquid water drops to an entrance of the fabricated microchannel with a height of 20 μ m and a width of 20 μ m, it flows along the microchannel by only capillary force. In the wetting behavior of the liquid, important parameters of this flow are channel size, contact angle and liquid properties such as surface tension and viscosity, which are used to control the flow of liquid in the microchannel.

- 기호설명 -

1. 서론

- γ_{SV} : 고체/기체 계면장력 (N/m)
- γ_{SL} : 고체/액체 계면장력 (N/m)
- γ_{LV} : 액체/기체 계면장력 (N/m)
- θ : 액체의 접촉각
- η : 점성계수
- r : 원형관의 반지름
- l : 액체가 관에서 흐른 거리.

실험실을 작은 칩으로 옮긴다는 의미의 랩온어칩(Lab on a chip)은 소형분석시스템을 기반으로 하고 있다. 이는 작은 칩 속에서 혈액이나 세포가 포함된 유체를 분리, 전달, 감지, 분석하여 기존의 실험실에서 수행하던 분석시스템을 소형화, 간편화 시키는 기술을 뜻한다. 소형분석시스템이 최근 주목받는 분야로 떠오르면서 이 시스템의 구성요소인 미세채널에서 유체의 유동에 대한 연구가 주목받고 있다.⁽¹⁾ 관련 연구가 활발히 이루어지고 있으나 소형분석시스템의 본격적인 상용

§ 이 논문은 2009년도 바이오공학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 21-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, jkkim@kookmin.ac.kr

화를 위해서는 미세채널에 관한 더 많은 기술개발과 유동해석 연구가 필요하다. 미세채널을 따라 흐르는 미량의 유체를 이해하기 위한 실험은 매우 작은 스케일로 인해 측정이 쉽지 않고 측정값을 하더라도 측정기의 감도가 매우 좋아야 하므로 고가의 장비가 요구된다. 이 때문에 미세유체장치 분야에서 전산유체역학의 사용은 시각적, 경제적으로 상당한 이점을 가지고 있다.

Washburn⁽²⁾은 중력이 중요한 역할을 하는 거시적인 계면현상이 아닌 중력을 무시할 수 있는 미시적 관점으로 Fig. 1과 같은 원형미세관에서 모세관력과 점성항력을 액체 흐름의 주요 원동력으로 보고 그 사이 힘의 균형만 고려하여 계면이 이동한 거리를 계산하는 식 (1)과 같은 이론식을 1921년에 제시하였다.

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r}{\eta} \frac{\gamma}{4l} \cos\theta \quad (1)$$

그 이후로 미세관의 계면현상에 관한 여러 연구들이 진행되어 왔으나 이론적인 연구들은 젖음현상이 대칭적으로 발생하는 원형미세관에 관한 내용이 주를 이루고 있다. 사각형 단면의 채널에서 발생하는 모세관유동은 대칭적이지 않고 모서리에서 빠르게 흐르며 또한 채널의 형상비에 따라 제약을 받기 때문에 이론적으로 해석하기가 쉽지 않다. 그러나 원형채널이 모든 미세유체소자 분야에서 최적의 형상은 아니며 일반적인 미세채널 제작공정을 통해서 사각채널을 보다 쉽게 만들 수 있다. 그러므로 최근에 다양한 분야에 활용되는 사각채널에 관한 유동해석의 필요성이 증대되고 있다.

고체표면 위에 액체를 떨어뜨리면 고체/액체의 계면에너지가 고체/기체의 계면에너지 보다 낮을 때 계면에너지를 줄이기 위한 젖음 현상이 일어난다. 고체, 액체, 기체가 함께 존재할 때 계면에서 모든 상은 Young이 제안한 다음 식 (2)를 만족시키는 평형상태를 이루려고 한다.

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos\theta \quad (2)$$

미세채널에서 적절한 표면처리에 의한 접촉각과 형상크기와 단면의 종횡비에 의한 계면에서의 모세관력을 유동의 추진력으로 사용하면 소형 펌프나

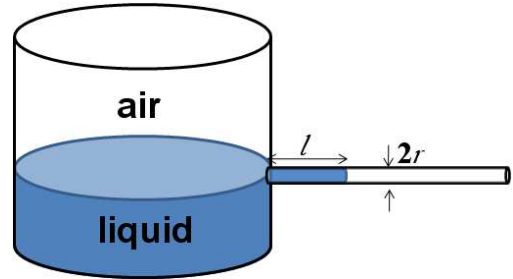


Fig. 1 Schematic diagram of Washburn's model.

다른 구동장치 없이도 유동을 발생시킬 수 있다. 한편, 소형분석시스템에서 광학측정 효율을 높이기 위해서 측정면의 광 손실을 줄이는 것이 중요하다. 혈액, 세포 등의 시료는 미세채널을 따라 이송되며 광학장치를 통해 측정되는데 고배율로 관찰할수록 광학장치에 들어올 수 있는 광량이 줄어든다. 상판이 있는 채널에서 광학측정은 일차적으로 빛이 채널을 통과할 때 그리고 관찰대상에서 방출된 빛이 다시 검출기로 들어가기 위해 채널을 재통과할 때 표면에서의 반사와 채널 안에서 산란 및 흡수로 인해 광 손실이 일어난다. 대상을 관찰할 수 있는 충분한 광량을 조사하기 위해 조리개나 광원장치 등을 사용할 수 있으나 소형분석시스템은 최대한 시스템을 단순화하는 것이 중요하므로 다른 장치를 사용하지 않고 상판을 제거하는 것이 광 손실을 줄이는 하나의 방법으로 제시될 수 있다. 검출부가 개방될 경우 채널을 통과하면서 발생하는 빛에너지의 손실이 줄어들게 되어 광학효율을 높이는데 기여할 수 있다.

본 연구에서는 모세관력을 추진력으로 이용하여 별도의 구동장치가 필요 없으며, 또한 상판을 제거하여 광학측정 시 기존 채널보다 광 손실을 줄인 개방형 사각단면 미세채널에서 발생하는 모세관 유동을 분석하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 채널제작

본 연구에 사용한 미세채널은 (주)나노엔텍에서 제작되었다. 제작공정은 다음과 같다. 실리콘웨이퍼 위에 감광제를 채널의 높이만큼 도포한다. 감광제 위에 포토마스크를 놓고 자외선을 조사하여 원하는 형상을 만든다. 그 위에 전류가 통하는 금속물질을 얇게 증착시키는 과정을 거치는데 니

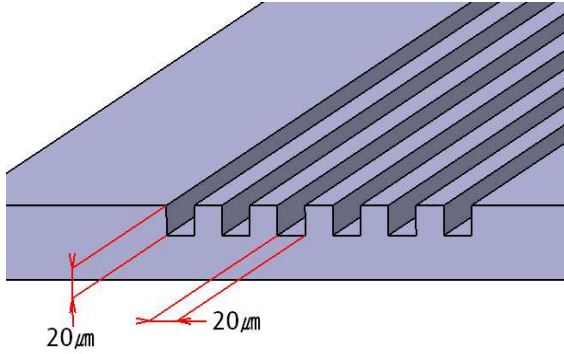


Fig. 2 Cross-sectional geometry of open-top microchannels.

켈도금 조를 사용해 사출에 사용할 스템퍼를 제작한다. 도금한 스템퍼를 평탄화 공정을 통해 일정한 두께를 가지도록 만든다. 그 다음 다이싱 공정을 통해 사출장비의 금형에 맞도록 도금된 스템퍼를 재단한 후 사출장비의 금형에 장착한다. 사출기를 통해 샘플 용액 20 μl를 수용할 수 있는 주입부가 있고, Fig. 2와 같이 폭 20 μm, 높이 20 μm, 길이 50mm인 채널이 병렬로 놓여있는 개방형 사각단면 플라스틱 미세채널을 만든다.

2.2 속도측정

주입부에 지름 6 μm 형광입자가 포함된 샘플 용액 20 μl를 넣고 채널 유동을 따라 이동하는 입자들을 촬영하였다. 형광현미경(IX71, Olympus)과 저조도용 ICCD 카메라(Dicam-Pro, PCO)를 사용하여 해상도 1280×1024pixels, 프레임 속도 5.44Hz, 노출시간 60ms 조건에서 얻은 영상을 입자추적기법으로 분석하여 유동속도를 측정하였다.

2.3 유동해석

본 연구에서는 상용 S/W인 Fluent를 이용하여 전산유체역학 해석을 수행하였다. 상판 개방형 사각단면 단일 미세채널 격자를 만들어 입구에서 물을 주입한 이후, 시간에 따른 상태를 보기 위해 비정상 유동으로 해석하였고 기체와 액체가 섞이지 않도록 VOF(volume of fluid) 모델을 사용하였다. 입구에서 물이 들어오며 그때의 압력은 Ichikawa 등⁽³⁾이 제안한 Young의 관계식을 바탕으로 사각채널의 계면에서 발생하는 압력차를 이용하여 식(3) 및 (4)와 같이 계산하였다.

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_h} \right) \quad (3)$$

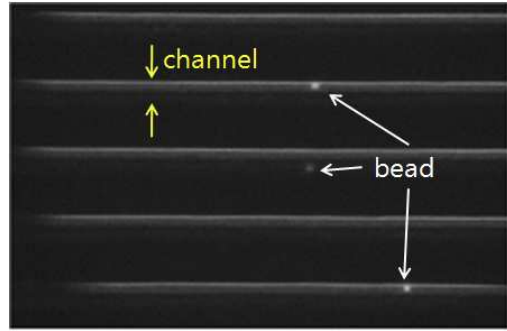


Fig. 3 Micrograph of fluorescent microbeads transported in open-top microchannels.

$$R_w = \frac{w}{2\cos\theta}, \quad R_h = \frac{h}{2\cos\theta} \quad (4)$$

w는 채널의 너비, h는 채널의 높이, σ는 물의 표면장력, θ는 접촉각이며 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산된 압력이 물이 유입될 때의 초기조건이다. 상판이 없기 때문에 채널 윗면과 출구는 대기과 같은 상태이며 10⁻⁵sec의 시간간격으로 계산하였다. 실제 실험에 사용되었던 너비와 높이가 20 μm, 길이가 50mm인 채널과 같은 크기와 형태를 갖고 있는 채널을 기준으로 단면 크기는 같지만 상판이 있는 채널, 상판이 없으며 한쪽 면의 길이가 10 μm와 40 μm인 정사각형 단면의 채널에서 발생하는 모세관 유동을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 입자추적을 통한 속도측정

미세채널을 따라 이동하는 형광입자의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 카메라로 촬영한 입자의 영상이 충분히 밝으므로 배경과 분리된 입자를 자동화된 이미지 처리 프로그램으로 추적할 수 있다. Fig. 4는 채널 입구를 통해 형광입자 시료를 주입한 후 입자추적기법을 사용하여 측정된 시간에 따른 입자 속도의 변화를 나타낸다. 주입한 20 μl의 샘플용액이 채널을 따라 출구를 향해 이동하는데 초기에는 속도가 급격히 감소하다가 이후 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 유동이 안정되면 0.4~0.6mm/s의 속도분포를 보인다. 시간이 지나면 채널 말단부에 모인 용액의 양이 대부분을 차지하게 된다.

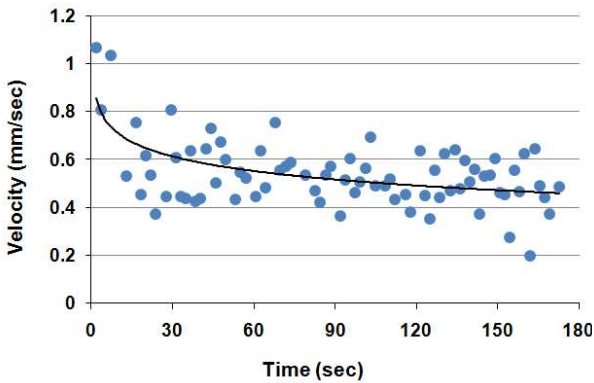


Fig. 4 Time course of flow velocity in open-top microchannel measured by particle tracking technique

3.2 전산유체역학을 이용한 유동분석

속도측정 실험에 사용되었던 채널과 같은 크기의 단면을 가지고 상관이 있는 단일채널과 상관이 없는 단일채널에 대하여 전산유체역학 해석을 수행하여 각 채널에서 형성된 액체와 기체의 계면 형상(meniscus)을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 상관이 있고 한 면의 길이가 $20\mu\text{m}$ 인 정사각형 채널에서는 수직단면의 중심을 기준으로 X, Y축으로 대칭을 이루어 액체가 이동하며, 상관이 없는 채널에서는 액체가 아래의 두 모서리에서 가장 먼저 이동하는 것을 확인하였다. 상관의 유무와 관계없이 사각채널에서 액체는 모서리에서 가장 빠르게 이동한다. 상관이 있는 채널에서는 중심부와 모서리의 액체속도 차이가 크지 않은 반면, 상관이 없는 채널에서는 윗면에서 표면과의 젖음현상이 일어나지 않기 때문에 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 모서리 부분의 속도와 중심부의 속도 차이가 시간이 지날수록 증가한다. 다시 말하면 모서리를 따라 이동하는 물의 메니스커스의 끝은 가장 빠른 속도로 채널을 타고 흐르나 액체가 채널을 채우며 이동하는 속도와는 차이가 있음을 의미한다.

앞서 입자추적을 이용한 속도측정 실험에서 계측한 형광입자의 속도는 메니스커스 끝의 이동속도가 아닌 액체가 채워지는 속도와 비교되어야 하므로 이를 Table 1에 정리하였다. 채널 상관의 유무는 전체적인 유동 속도에도 영향을 미치는데 상관이 있을 때 상관이 없는 경우보다 메니스커스가 채널 말단까지 10배정도 빠르게 도달한다.

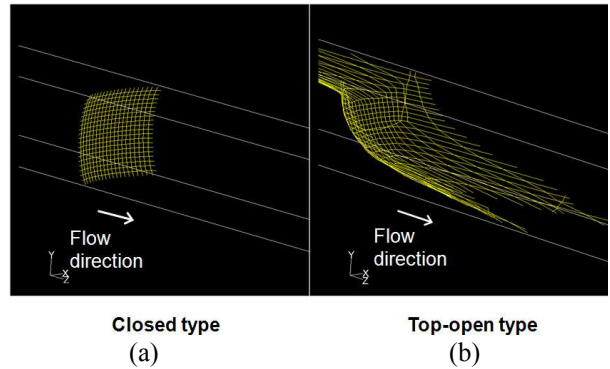


Fig. 5 Comparison of liquid menisci in (a) closed and (b) open-top microchannels.

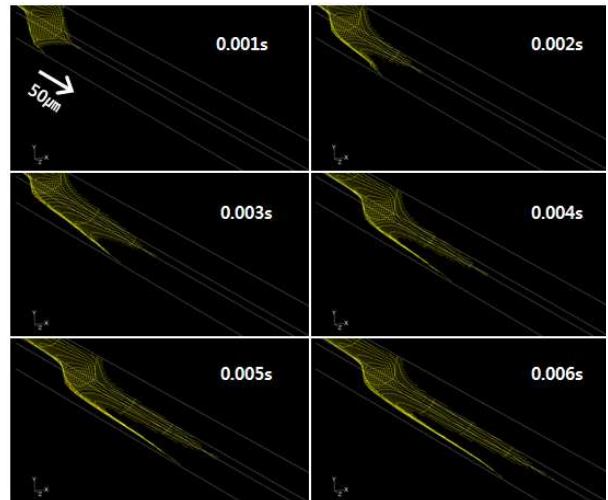


Fig. 6 Marching of liquid meniscus in open-top microchannel

채널 단면의 크기가 액체의 이동현상에 미치는 영향을 확인하고자 채널의 종횡비와 하류 방향 길이를 일정하게 유지하고 한 면의 길이가 $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$ 인 정사각형 단면의 채널에서 모세관 유동 해석 결과를 비교하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 상관이 없는 채널의 바닥면에서 액체는 출구 방향으로 V자 형태를 지닌다. 액체가 채널을 채우는 위치를 V자의 골로 보고 일정한 시간이 지났을 때 채널별 액체의 위치와 평균속도를 비교하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 전산유체역학을 통해 일정 시간이 흐른 뒤 채널을 채우는 물의 메니스커스 위치는 단면의 크기가 $10\sim 40\mu\text{m}$ 범위에서 채널의 크기가 증가할수록 빨리 이동하는

Table 1 Total moving distance and average velocity of water obtained from computational fluid dynamics in open-top microchannel

Width and height of channel [μm]	Total moving distance for 5 sec [mm]	Average velocity of water [mm/s]
10	0.81	0.16
20	2.00	0.4
40	2.35	0.47

것을 확인하였다. 채널의 크기가 20 μm 일 때와 40 μm 일 때의 이동속도는 큰 차이를 보이지 않으나 10 μm 일 때는 50% 이상 감소하는 경향을 볼 수 있다. 모든 채널에서 전체적인 메니스커스의 모양은 비슷하게 나타나지만 물의 추진력에서 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

일반적으로 쉽게 볼 수 있는 거시적인 모세관 현상은 작은 모세관일수록 물이 관을 따라 올라가거나 내려가는 길이가 증가한다. 즉 액체기둥의 높이는 반지름에 반비례한다. 그러나 채널의 크기가 매우 작고 미량의 액체가 이동하게 되는 경우, 즉 중력의 영향이 미미한 경우는 현상이 달라진다. 수백 μm 이하의 지름을 갖는 원형관의 경우 모세관의 지름이 클수록 이동거리가 길다는 것은 Washburn⁽²⁾과 Kim 등⁽⁴⁾이 제시하였다. 거시적 단위와 미시적 단위의 경계선 사이로 유체의 운동을 지배하는 힘이 다르며, 본 연구를 통해 상판이 없는 사각단면 채널의 경우 수십 μm 범위에서는 채널의 크기가 클수록 물의 추진력이 커지는 범위에 있다는 사실을 전산유체역학을 통해 확인하였다.

4. 결론

그동안 여러 선행 연구⁽⁵⁻⁷⁾를 통해 다양한 미세채널 제작기술이 개발되었다. 이러한 연구에서는 메니스커스의 이동에 영향을 주는 요인으로 접촉각과 계면에서의 압력차를 제시하였고, 다양한 매개변수를 비교 분석하여 향후 소형분석시스템에서의 활용 가능성을 예측하였다. 본 연구에서는 표면이 처리된 개방형 미세채널에서 외부 구

동력 없이 모세관 유동이 발생하여 샘플 용액이 채널을 따라 흐르게 되는 현상을 확인하였다. 이러한 개방형 미세채널이 광학검출 방식의 초소형 분석기에 활용될 경우, 펌프와 같은 외부 동력원을 필요로 하지 않을 뿐 아니라 기판에 의한 광손실을 감소시키며 여러 채널에서 동시에 샘플 검출이 가능해진다는 장점을 지니게 될 것이다. 활용 목적에 따라 샘플의 종류가 결정되므로 표면장력은 변수가 되기 힘들지만, 채널 제작 시 표면처리를 통한 접촉각의 조절과 채널 형상의 변화는 최근에 발달된 기술을 통해 충분히 다양하게 구현할 수 있으며 향후 소형분석시스템 제작을 위한 핵심 요소기술로 활용이 기대된다.

후 기

이 논문은 지식경제부 21세기 프론티어 기술개발사업인 지능형마이크로시스템개발사업단(<http://microsystem.re.kr>)과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. 2009-0082038).

참고문헌

- (1) Vilkner, T., Janasek, D. and Manz, A., 2004, "Micro Total Analysis Systems. Recent Developments," *Anal. Chem.*, Vol. 76, No. 12, pp. 3373-3386.
- (2) Washburn, E. W., 1921, "The Dynamics of Capillary Flow," *Phys. Rev.*, Vol. 17, No. 3, pp. 273-283.
- (3) Ichikawa, N., Hosokawa, K. and Maeda, R., 2004, "Interface Motion of Capillary-driven Flow in Rectangular Microchannel," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 280, No. 1, pp. 155-164.
- (4) Kim, E. and Whitesides, G. M., 1997, "Imbibition and Flow of Wetting Liquids in Noncircular Capillaries," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 101, No. 6, pp. 855-863.
- (5) Yang, L.-J., Yao, T.-J. and Tai, Y.-C., 2004, "The Marching Velocity of the Capillary Meniscus in a Microchannel," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, No. 2, pp. 220-225.
- (6) Swickrath, M. J., Shenoy, S., Mann, J. A., Belcher,

J., Kovar, R. and Wnek, G. E., 2008, "The Design and Fabrication of Autonomous Polymer-based Surface Tension-confined Microfluidic Platforms," *Microfluid. Nanofluid.*, Vol. 4, No. 6, pp. 601~611.

(7) Kim, D. S., Lee, K.-C., Kwon, T. H. and Lee, S. S., 2002, "Micro-channel Filling Flow Considering Surface Tension Effect," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, No. 3, pp. 236~246.