

친수성 및 소수성 마이크로 노즐 내 유동 μ -PIV 연구

변도영* · 김지훈*

μ -PIV Visualization of Flow in Hydrophilic and Hydrophobic Micro-nozzle

Doyoung Byun* · Jihoon Kim*

ABSTRACT

Recently, experimental visualization of microscale fluid transport has attracted considerable attention in designing microelectromechanical systems. Fluid-surface interactions on hydrophobic and hydrophilic surfaces can play a key role in passively controlling microfluidics. Here we investigate the slip boundary condition depending on the surface characteristics; hydrophilic, hydrophobic wettabilities. Using the micro-PIV, velocity profiles are measured in the glass (hydrophilic), PDMS (hydrophobic) microchannels.

초 록

최근 미소기전시스템(MEMS)을 개발함에 있어 마이크로 크기의 유동가시화는 중요한 문제이다. 특히 유체와 고체표면의 상호작용에 있어 표면의 친수성과 소수성의 성질은 미소유체를 조절 가능케 하는 핵심적인 역할이다. 본 연구에서는 마이크로 채널 내 표면을 개질하여 친수성 및 소수성의 벽면 경계 조건 습윤도를 측정하였고, 또한 micro-PIV를 이용하여 벽면 근처에서의 속도 분포를 분석하였다.

Key Words: Micro-Nozzle(마이크로 노즐), Hydrophilic(친수성), Hydrophobic(소수성), Slip(슬립)

1. 서 론

최근 많은 연구 역량이 미소유체에 집중하게 되면서, 점차적으로 나노 크기에 접근해가고 있다. 특히 마이크로 유동 가시화의 실험적 연구는 미소 기전 시스템(MEMS)을 만드는데 중요한 영향을 미치고 있다. 무엇보다도 화학적으로 분사하거나, 쉐거나, 정제 및 정련, 유체의 인지를 가

능하게 한 '랩 온 어 칩(Lap on a chip)' 인 마이크로 장치를 개발하는데 노력이 이루어졌다.[1] 또한 인접공학에 접목 가능한 마이크로 장치들이 개발 되고 있으며, 그 중 항공우주분야에서는 마이크로 콜로이드 추진장치를 개발함으로써 나노 크기의 인공위성 개발에 중요한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이러한 추진장치에는 많은 구성요소들이 들어가는데, 추진에 쓰이는 유동체의 직접적인 영향을 미치는 것은 노즐이다. 나노 크기에서 노즐은 마이크로 채널로 대체될 수 있는데, 특히 채널은 간단한 구조에서 복잡한 구조가

* 건국대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: dybyun@konkuk.ac.kr

지 제작이 용이해야 하며, 시간 또한 절약되어야 한다. 이처럼 마이크로 채널을 제작하기 위해 널리 사용되는 재료 중 친수성은 모세관(capillary)으로, 소수성은 PDMS로 대체된다.

특히 PDMS(polydimethylsiloxane)는 무독성이고, 값이 싸며, 여러 번 재생 사용 가능하다는 이점이 있다. 또한 복잡한 층별 구조물도 제작 가능하다.[2] J. Cooper McDonald et al. 은 3차원상의 코일모양의 채널을 만드는 공정을 개발하여 PDMS의 다양한 채널구조물 제작이 가능하다는 것을 보였다.[3]

따라서 노즐 내 미소유체를 다루기 위해서는 마이크로 채널 내 특성을 파악하여야 한다. 무엇보다도 표면 특성 분석은 마이크로 장치에서 아주 흥미로운 문제로 남아있다. 정적인 상황에서 친수성(hydrophilic) 영역에서는 액체의 접촉각이 낮아 넓게 퍼지며, 소수성(hydrophobic) 영역에서는 접촉각이 높아 구 모양을 만들게 된다. 본질적으로 표면 에너지의 차이가 이러한 차이를 만들게 된다. 따라서 표면 변화를 이용한 다양한 연구들이 진행되었다. Muller and Gubbins et al. 은 친수성과 소수성 표면에서 일어나는 현상을 분자 동역학 시뮬레이션을 이용하여 규명하였다.[4]

Nagayama and Cheng et al. 은 분자 동역학 시뮬레이션을 이용하여 나노채널내부의 친수성인 경우 포물선 모양의 속도분포를, 소수성인 경우 plug 흐름의 속도분포임을 밝혔다.[5] 실험적으로 Santiago et al. 은 PIV를 새롭게 적용하여, 마이크로 유체문제를 풀었다.[6] 이와 같이 채널 내 유동 흐름 분석 및 제어를 하는 활발한 연구가 진행 되어가고 있다.

본 연구에서는 항공우주산업에 적용 가능한 나노크기의 인공위성 추력기의 마이크로 노즐 표면 개질에 따른 유동을 분석하였다. 친수성과 소수성을 갖는 표면에서 속도분포를 통하여, 차후 효율적인 노즐개발을 가능케 할 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 정적 상태에서 표면 성질에 따른 영향

친수성에서는 Fig. 1(a)와 같이, 소수성에서는 Fig. 1(b)와 같이 접촉각이 변하는 현상을 볼 수 있다. 이는 표면 에너지의 변화가 액체와 고체 상호간의 인력에 관여하기 때문이다.

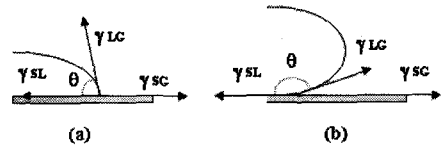


Fig. 1 Diagram of hydrophilic and hydrophobic

따라서 Young's Laplace 이론에 따라서 정적 상태에서에서의 접촉각은 Eq. 1과 같이 제시된다.

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

3. 연구 방법

3.1 마이크로 노즐 공정

친수성 채널은 Fig. 2와 같이 500×50 μm 크기의 모세관(capillary)을 이용하여 슬라이드 유리에 접합하였다. 소수성 채널은 Fig. 3과 같이 200×50 μm 의 크기를 갖는 포토레지스트(photoresist) 주형을 만든 뒤, PDMS를 100 ℃ 플레이트(hot plate)에서 1시간 동안 굽는다. 그 뒤, PDMS를 떼어내어 슬라이드 유리와 접합하기 위해 테슬라 코일을 이용하여 실란올기(silanol)로 산화시킨 뒤 접합한다.

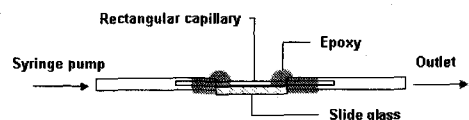


Fig. 2 Diagram of the mounted glass microchannel.

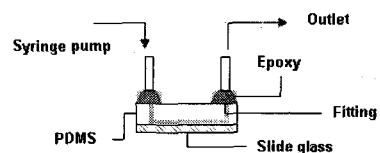


Fig. 3 Diagram of the mounted PDMS microchannel.

3.2 micro-PIV 분석

Fig. 4와 같이 micro-PIV 시스템을 구축하였다. Nd: YAG 레이저로 두 개의 펄스를 내보내며, 현미경 (Nikon Eclipse TE2000)과 연결된 포트로 이미지를 얻게 된다. 펄스는 현미경 내 long-pass 필터박스를 거쳐 60 배율 (NA=1.515), oil immersion을 이용하여 관찰하였다. 입자는 1 μm (Molecular Probes Inc.)를 사용하여 녹색 빛 ($\lambda = 532\text{nm}$) 흡수하고 붉은 빛 ($\lambda = 575\text{nm}$)을 방출하게 된다. 파장은 해상도 1280×1024 픽셀, 12 bit 의 CCD 카메라(PCO QE)에 의해서 기록하였다.

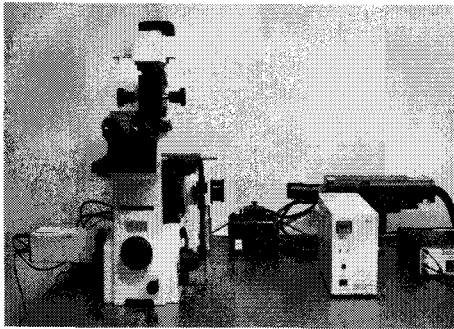


Fig. 4 Experimental micro particle image velocimetry (μ -PIV) setup.

유동속도를 10 mm/s로 동일하게 맞추기 위해, 펄스 간 지연시간은 75 ms으로 하였다. CCD 카메라에 의해 촬영된 두 개의 이미지는 PIV 소프트웨어(Lavision Inc. Davis 7.1)를 이용하여 분석하였다. Fig. 5와 같이 interrogation 영역을 64×64 픽셀에서 32×32 픽셀로 감소되는 방식을 선택했으며, 픽셀 당 해상도(spatial resolution)는 $3.00 \times 3.13 \mu\text{m}$ 이다. 각각의 채널은 50개의 이미지를 cross correlation 시켰다.

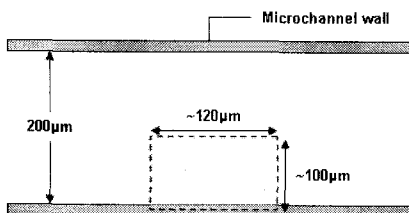


Fig. 5 Schematic of microchannel with the measurement plane.

4. 결 과

Fig. 6은 벽면근처에서 모세관(capillary)과 PDMS 마이크로 채널의 종단면에 대한 속도분포를 보여주고 있다. 특히 친수성과 소수성의 기울기가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

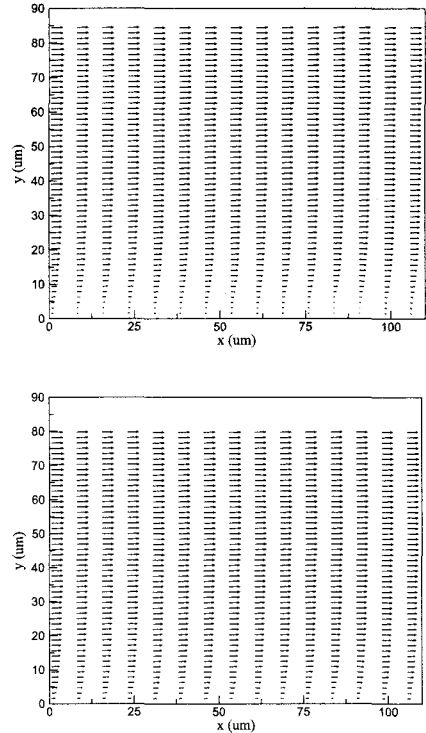


Fig. 6 Ensemble-averaged velocity vector field measured in glass(up) and PDMS(down) microchannel

소수성에서 더욱 급격하게 증가하는 것으로 보아 벽면경계조건에 변화가 있음을 확인 할 수 있었다. 속도분포를 비교하기 위해 Fig. 7과 같이 최대속도를 기준으로 표준화 하였다.

특히 Fig. 7에서 모세관 표면에서는 벽면으로 접근 할수록 부드럽게 속도가 0으로 수렴하는 경향을 보인다. 이러한 경우 벽면 경계 조건이 no-slip으로 볼 수 있다. 하지만 소수성인 PDMS인 경우 벽면근처에서 속도가 친수성인 모세관 표면보다 10% 가량 증가된 경향을 보였다. 이는 전형적인 slip 조건으로 볼 수 있다.

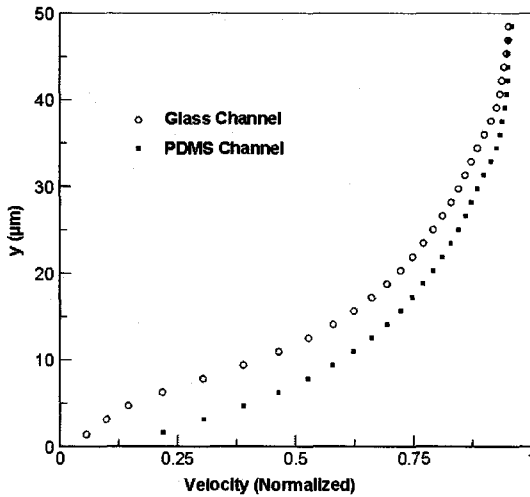


Fig. 7 Normalized velocity profiles for flow over a hydrophilic glass (circle) and hydrophobic PDMS(square) microchannel surfaces.

5. 결 론

마이크로 노즐 내부에서 micro-PIV를 통하여 친수성과 소수성의 벽면 근처에서 어떠한 현상이 나오는지 관찰하였다. 친수성의 모세관 벽면에서는 속도 분포가 부드럽게 0으로 수렴하는 no-slip 조건을 보였다. 반대로 소수성의 PDMS 벽면에서는 속도가 있는 것으로 보였고 친수성에 비해 약 10% 가량 증가된 slip 조건을 보였다.

따라서 이러한 성질을 이용하여 차후 개발될 나노크기의 인공위성 추력기에 쓰일 노즐개발에 적용할 수 있다. 현재 친수성과 소수성만을 비교하여 분석하여 보았으나, 향후 초소수성 표면을

갖는 마이크로 채널을 제작할 계획이다. 또한 친수성, 소수성, 초소수성 세 가지의 벽면 표면 특성을 서로 비교, 분석하여 제시하겠다.

참고 문헌

1. Freemantle, M, Chem. Eng. News, 77(8), 2003
2. Honest Makamba, Jin Ho Kim, Kwansoep Lim, Nokyoung Park, Jong Hoon Hahn, "Surface modification of poly(dimethylsiloxane) microchannels," Electrophoresis, Vol. 24, pp3607-3619, 2003
3. J. Cooper McDonald, George M. Whitesides, "Poly(dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices," Accounts of chemical research, Vol.35, NO.7, pp491-499, 2002
4. Muller E A, Gubbins K E, "Molecular simulation study of hydrophilic and hydrophobic behavior of activated carbon surfaces," Carbon, 36, 10, pp1433-1438, 1998
5. Nagayama G, Cheng P, "Effect of interface wettability on microscale flow by molecular dynamics simulation," International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, pp501-513, 2004
10. Santiago J G, Wereley S T, Meinhart C D, Beebe D J, Adrian R J "A particle image velocimetry system for microfluidics," Experiments in Fluids, 25, pp316-319, 1998