

PDMS 기반 초소수성 마이크로 채널내의 유동 및 표면 젖음 전이 가시화에 관한 연구

김 지훈*·홍 종인**·변 도영*†·고 한서***

Visualization of Flow and Wetting Transition in PDMS Superhydrophobic Microchannel

Jihoon Kim*, Jongin Hong**, Doyoung Byun*†, Hanseo Ko***

Key Words : MEMS(미소 전자 기계 시스템), Microfluidics(마이크로 유체역학), Superhydrophobic(초소수성), Wetting Transition(젖음 전이), Micro-PIV(마이크로 입자 영상 속도법)

Abstract

We investigate the slippage effect in a micro-channel depending on the surface characteristics; hydrophilic, hydrophobic, and super-hydrophobic wettabilities. The micro-scale grooves are fabricated on the vertical wall to make the super-hydrophobic surfaces, which enable us visualize the flow fields near walls and directly measure the slip length. Velocity profiles are measured using micro-particle image velocimetry (Micro-PIV) and compared those in the hydrophilic glass, hydrophobic PDMS, and super-hydrophobic PDMS micro-channels. To directly measure the velocity in the super-hydrophobic micro-channel, the transverse groove structures are fabricated on the vertical wall in the micro-channel. The velocity profile near the wall shows larger slip length and, if the groove structure is high and wide, the liquid meniscus forms curves into the valley so that the wavy flow is created after the grooves.

1. 서론

최근 몇 십 년간 비약적인 기술의 발전에 힘입어 미세 공정을 할 수 있는 연구방법이 점차 중요한 문제가 되고 있다. 이미 많은 연구 역량들이 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)를 연구 하고 있으며, 심지어 그 크기가 나노(Nano)에 접근한 작은 NEMS(Nano Electro Mechanical Systems)연구에 집중하고 있다.[1] 이러한 작은 단위에서의 전자신호, 유체의 운송들은 응용 산업에 접목할 수 있는 주요한 방식이다. 무엇보다도 위의 기술을 응용한 장치에 있어서는 물리, 화학, 생명공학 분야에서 쓰이는 정제 및 정렬 기술에 직접적으로 쓰일 수 있는 장점이 있다. 특히 Lap-on-a-Chip, μ -TAS(Micro Total chemical Analysis System) 경우는 크기가 매우 작고, 빠른 분석 능력과 정보의 능동적 교환을 이용, 산업의 극대화를 이룰 수 있다는 점에서 주목 받고 있다. 그러나 크기가 마이크로(Micro) 및 나노 크기에 접근을 해 갈수록 전통적인 No-Slip Boundary Condition이 표면 특성에 좌우되어 깨지므로 이론 적용과 예측이 쉽지 않고, 마이크로, 나노의 크기로 근접할수록 유동의 Slip 영향이 성능에 막대한 영향을 미

칠 수 있으므로 이를 설계단계에서 고려를 해야 한다.

일반적으로 친수성 영역(Hydrophilic area)에서는 No-Slip이 충족되는데 반해, 소수성 영역(Hydrophobic area)에서는 Slip이 미세하게나마 존재 하는 것이 여러 연구자들에 의해 밝혀졌다.[2][3][4] 또한 초소수성(Superhydrophobic)은 기본적인 소수성 영역을 바탕에 공극(Air Pocket)이 유체를 지탱하면서 소수성 영역의 Slip보다 상대적으로 크게 된다.

Neelesh A. Patankar et al.은 표면이 거친 상태의 초소수성 표면에서 일어난 젖음 전이 가시화 및 이론적 분석을 정립하였다.[5] Young Chae Jung et al.은 다양한 형태의 기둥(pole)을 세워 기둥간의 거리에 의해서 정적 접촉각이 붕괴되는 개방된 상태의 초소수성 젖음 전이 상태를 연구하였다.[6] 또한, Junfeng Zhang et al.은 개방된 초소수성 상태의 접촉 경계와 동적 접촉각을 수치 해석적으로 분석하여 제시하였다.[7]

그러나 현재까지 마이크로 채널 내부에서 붕괴되는 현상의 관측과 정량적인 해석은 미비한 실정이다. 공극이 붕괴되면 층류유동이 순간적으로 복잡한 유동양상을 보일 수 있으며, 이는 많은 응용 연구에 사용이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 MEMS 공정을 이용하여 홈(Groove)이 있는 구조물을 제작하였다. 벽면 부근에서 구조물에 의한 초소수성 영향을 평가하기 위하여 Micro-PIV를 사용하여 유동을 측정하였다. 아울러 구조물의 간격의 변화에 따른 초소수성이 붕괴되면서 일어나는 표면 젖음 전이 현상을 가시화하였다.

* 건국대학교 대학원, 항공우주정보시스템공학과, nasadream@paran.com

** Imperial College London, Department of Chemistry, hong.jongin@gmail.com

† 책임저자, 건국대학교, 항공우주정보시스템공학과, dybyun@konkuk.ac.kr

*** 성균관대학교, 기계공학과, hanseoko@skku.edu

2. 이론적 배경

2.1 마이크로 채널 내 유동 형상

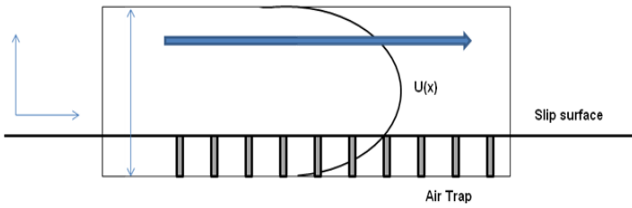


Figure 1. Schematics of meniscus in microchannel

일반적으로 물체표면에는 친수성과 소수성이라는 특이한 성질을 가지고 있다. 친수성의 표면에서는 접촉각이 작으며, 이로 인하여 액적의 모양이 납작하게 된다. 반대로 소수성의 표면에서는 접촉각이 크며, 이로 인하여 액적은 구 모양의 형상을 나타낸다.

이를 응용하여 채널 내부의 유동의 흐름을 분석할 수 있다. Figure 1와 같이 유동의 흐름이 곡선을 가질 때, 표면의 자유 에너지에 의하여 액체와 고체의 경계면에 압력이 발생하게 된다. 이 압력은 오목한 곳에서는 볼록한 구간보다 더욱 높게 되며, 이는 Young-Laplace 방정식에 의해 다음과 같이 제시할 수 있다. 수직의 벽면에서 동적 접촉각을 θ_b 을 나타내며 곡률 R_1 을 형성한다. [8]

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

또한 직선적 흐름에서 내부 곡률반지름의 표현은 다음과 같이 된다.

$$R_1 = \frac{h}{2\sin(\theta_b - 90^\circ)} \quad (2)$$

이를 유발하는 주요한 원인은 수직의 벽면에서 일어나는 최대 압력이 다음과 같이 표현되기 때문이다.

$$P_{max} = \Delta P = \frac{2\gamma}{h} \sin(\theta_n - 90^\circ) \quad (3)$$

2.2 마이크로 구조물의 압력 분포

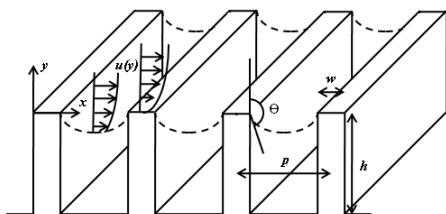


Figure 2. Schematic of Liquid meniscus on the micro-structured surface with air gap in the valley between grooves

일반적으로 초소수성의 경우 구조물 형상 아래에 수많은 공

기가 갇히는 이른바 공극 구조를 가지게 된다. 이 때, 마이크로 채널 내 유동의 특성을 총류라고 가정하면 유체의 압력과 구조물간의 간격, 그리고 공기의 압력 간에 다음과 같은 격차가 생기게 된다.

$$\Delta P = P_\omega - P_a = \frac{4\gamma}{\omega} \cdot \frac{1}{\cos(\pi - \theta)} \quad (4)$$

따라서 구조물의 거리에 따라서 유체의 지지되는 압력이 다르게 생겨, 굴곡진 모양이 다양하게 나타날 수 있음을 시사한다.

3. 연구방법

3.1 마이크로 채널 공정

다음 Table 1과 같이, 홈의 가로 길이가 5 μ m와 14 μ m인 두 경우로 제작을 하였다. 구조물과 반대편 구조물 간의 거리는 200 μ m이며, 채널의 깊이는 20 μ m이다.

Table 1. Geometric design of groove microchannel

Groove width	5 μ m		14 μ m	
	Pitch	P/W ratio	Pitch	P/W ratio
Distance	12.5 μ m	2.5	35 μ m	2.5
	25 μ m	5	70 μ m	5
	45 μ m	9	126 μ m	9

따라서 위의 Table 1과 같이 최소 5 μ m의 형상을 구현하기 위한 마이크로 채널의 주형판을 만들기 위해서 실리콘 기판(Si wafer)위에 포토레지스트 (Photoresist, AZ1512)를 도포하여, 사진 공정으로 마이크로 홈 (Micro Groove)이 있는 형상을 얻는다. 특히 마이크로 홈이 존재하는 구조물을 만듦에 있어서 벽면을 수직으로 제작을 하여야 유동을 정량적으로 분석 할 수 있다. 따라서 DRIE(Deep Reactive Ion Etching)을 이용하여 Bosch공정으로 마무리 작업을 한다. 초소수성의 기반은 소수성 물질에서 가장 대표적으로 쓰이는 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 이용하여 채널을 마감한다.

3.2 정적 접촉각 측정

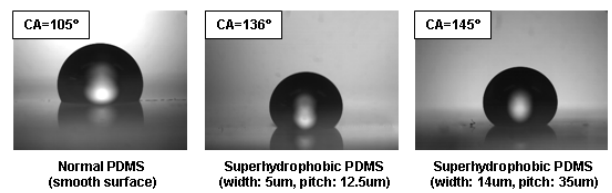


Figure 3. Measurement of contact angles on the grooved PDMS super-hydrophobic surfaces.

홈의 영향을 정량화하기 위하여 우선 개방상태에서 정적 접촉각(Static Contact Angle)을 측정하였다. 일반적인 PDMS의 평면에서는 약 105°정도로 보고되고 있다. 홈이 있는 평면에서는 단일 방향으로 갇힌 공기와 PDMS의 면이 서로 번갈아 가면서 나타나는 구조이므로 초소수성의 현상이 나타난다. 다만, 기존에 보고된 바 있는 막대구조(Pillar)보다는 약 10~15°낮은 정적접촉각을 유지하였다.

3.3 Micro-PIV

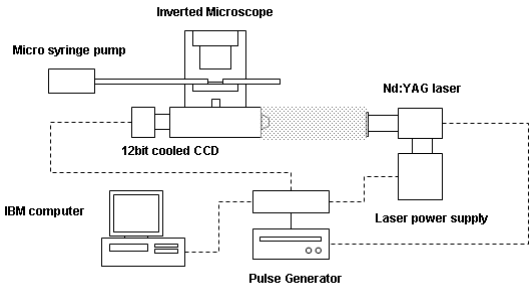


Figure 4. Schematic of micro-PIV system setup.

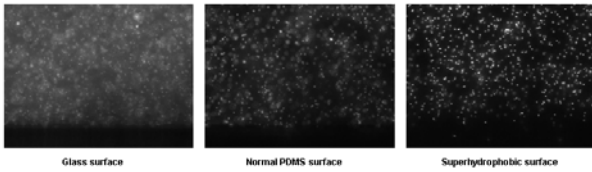


Figure 5. Raw images in glass, PDMS, and grooved PDMS micro-channels.

Figure 4는 일반적인 micro-PIV의 설정된 개요이며 Figure 5는 이를 이용해 얻은 raw 입자 사진들이다. macro-PIV와 다르게 micro-PIV는 microscope와 Nd:YAG 레이저를 간접적으로 이용하여 이미지를 획득한다. 유동의 이미지 획득은 전적으로 microscope의 재원에 종속적인 성능에 비례하게 된다. Double shot frame 방식으로 사진을 획득하기 위해, two frequency-double Nd:YAG 레이저를 Inverted Microscope(Nikon Eclipse TE2000)와 연결시켰다. 특히 이미지를 기록하기 위한 cooled CCD는 (PCO, 12bit) Nd:YAG 레이저의 입사된 532nm의 녹색 레이저를 흡수 후, 주황색 계열의 575nm로 발광하는 유체 추적 입자(seeding particle)를 감지한다. 또한 유동 흐름을 가시화하기 위하여, 형광 입자(Molecular Probes FluoSpheres® polystyrene microspheres)를 사용했으며 그 크기는 1 μ m 이다. Nd:YAG laser로는 30mJ의 에너지를 가했으며, pulse의 시간은 75 μ s로 가하였다. CCD의 이미지는 back-to-back 방식을 취하여, 500ns 이하의 시간에서 각각의 경우 200장을 획득 하였다.

4. 결과 및 토의

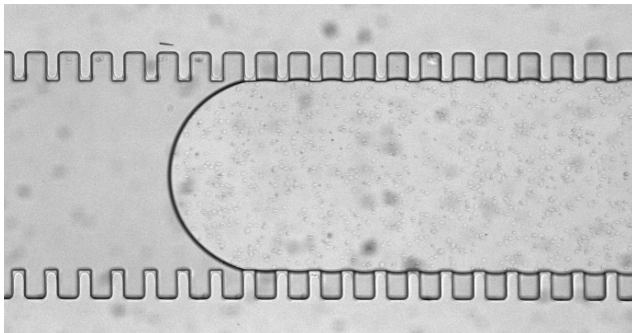


Figure 6. Flow in micro-channel with grooves of width 14 μ m, height 30 μ m, and pitch 35 μ m

Figure 6는 유동이 구조물이 있는 채널 내부를 지나갈 때, 벽면에서 초소수성 효과가 생기는 것을 CCD로 촬영한 사진의 일부이다. 공기에 의해서 유체가 지탱이 되면서 약간의 굴곡진 경계면(interface)를 볼 수 있다. 각각의 경우를 다양한 유량에서 정량적으로 분석하기 위하여, 공기 위 중앙에서의 속도분포, 그리고 구조물 중앙에서 속도분포를 획득하였다.

예전 선행된 연구에서 획득한 친수성 채널 (Glass capillary)와 소수성 채널 (normal PDMS)의 속도분포와 비교한 각각의 초소수성 그래프에서는 대부분 y방향으로 0인 지점에서 속도성분이 상당히 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 slip 길이에도 영향을 주며, 약 4 μ m 정도로 측정되었다.

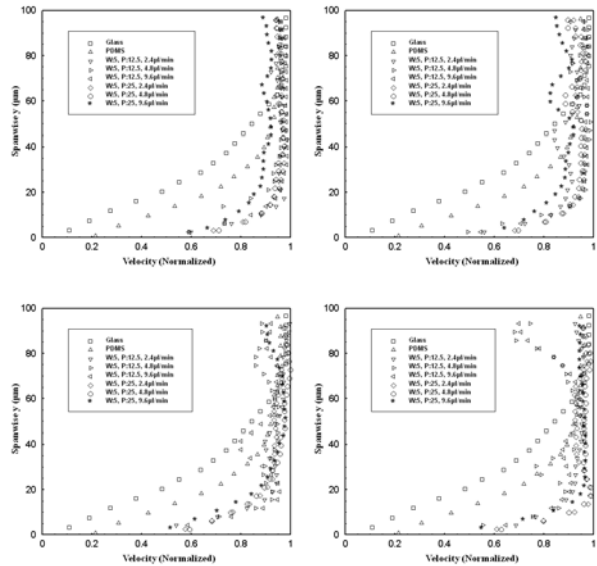


Figure 7. Effects of micro-structure width and pitch on the normalized velocity profiles the superhydrophobic PDMS microchannels.

또한 구조물의 간격이 커지게 되면 공극과 유체간의 압력 분포에서 압력이 지속적으로 감소하는 결과를 초래하므로, 특수한 간격에서는 공극이 붕괴될 수 있다. 따라서 이 경우 순간적으로 유체는 처음에는 공극을 유지하다가, 차츰 표면 젖음 전이 현상 (Wetting Transition)이 일어나게 된다.

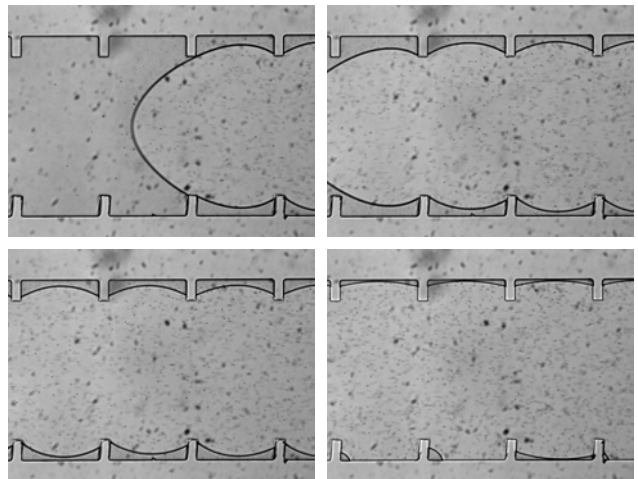


Figure 8. Sequential images of wetting transition in the superhydrophobic microchannels.

특이한 점은 개방상태에서의 정적 접촉각이 P/W의 값이 5인 경우에 유지가 되고, 9인 경우 두 가지 형상의 채널에서 모두 일어났다. 이는 P/W 5와 9사이에 임계 압력(Critical Pressure)가 존재하게 되는 것을 암시한다. 공극 압력의 붕괴는 채널 전체에 영향을 미치게 되며, 이는 변화되는 압력 장이 공극이 유지 될 때보다는 크고 넓게 일어나는 것을 알 수 있다.

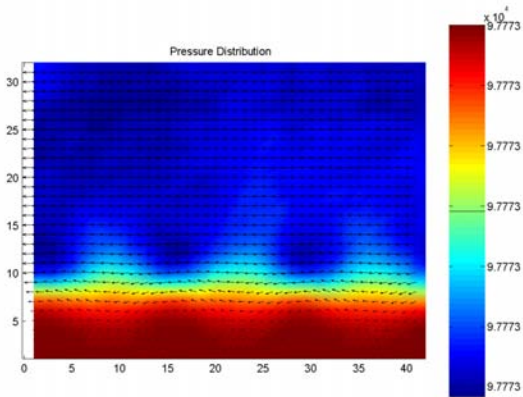


Figure 9. Pressure distribution in micro-channel with grooves of width 14 μm , height 30 μm , and pitch 70 μm .

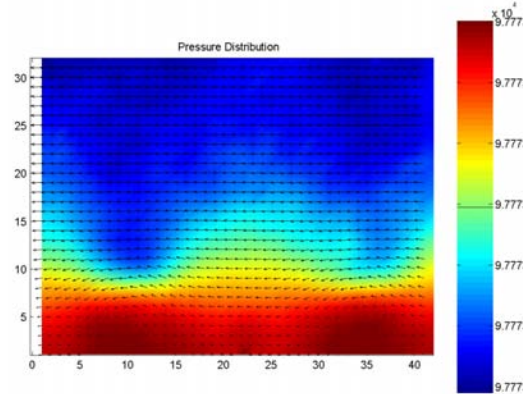


Figure 10. Pressure distribution in micro-channel with grooves of width 14 μm , height 30 μm , and pitch 126 μm .

Figure 9는 공극이 유지되면서 초소수성 상태에서 진행된 상태의 압력분포이다. 그러나 Figure 10은 젖음 현이가 일어나 채널 모두가 젖은 상태의 압력분포이다. 압력 분포에서 특히 주목할 만한 변화는 압력의 변화가 초소수성인 경우 약 30-40 μm 위치에 영향을 주는 반면에, 젖은 상태가 지속된 경우 훨씬 넓은 약 60-80 μm 위치에 영향을 주고 있다. 공극이 유지되는 초소수성인 경우 압력의 복원이 구조물의 모서리까지 급격하게 이루어지는 양상을 보이지만, 공극이 붕괴된 상태에서의 구조물은 오히려 압력의 복원을 방해하는 역할을 한다. 따라서 유체의 혼합 관점에서는 구조물의 적절한 위치조절로서 압력 영향을 변화시킬 수 있으며 이는 곧 능동적 제어를 할 수 있음을 시사한다. 따라서 구조물간의 거리와 형상에 대한 정량적인 연구가 더 필요하다. 그러나 본 연구에 쓰인 값은 P/W의 값이 5와 9의 값만 고정되어 있으므로, 차후 연구에서는 공극 유지 및 붕괴 범위에 서 다양한 값을 제시하겠다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로 채널 내부에 다양한 형태의 홈을 MEMS 공정으로 제작하여, 기본적으로 소수성 물질인 PDMS를 이용하여 벽면 부근에서 초소수성에 관련한 유동을 분석하였다. 특히 초소수성의 기본적 생성 원리인 공극의 유지 관점에서 속도분포를 얻었으며, 또한 공기-유체간의 압력 변화를 P/W의 값을 이용하여 채널 내 젖음 현이 현상을 가시화 하였다. 특히 닫힌 상태인 마이크로 채널 내부에서 일어나는 젖음 현이 현상은 차후 micro-PIV로 분석이 가능하며, 보다 정량적으로 측정하여 원인과 현상을 밝힐 필요가 있다. 더 나아가 이를 응용하여 Bio-MEMS 관점에서 micro-Mixer를 설계하는데 직접적 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후기

This work was supported by the Korea Research Foundation Grant funded by the Korean Government (MOEHRD) (KRF-2005-D00051). DB acknowledges partial support from the National Research Laboratory program, Korea Science and Engineering Foundation Grant (R0A-2007-000-20012-0) and HSK also acknowledges partial support from the Korea Research Foundation Grant funded by the Korean Government (MOEHRD) (KRF-2005-D00045).

참고문헌

- [1] Freemantle, M., 1999, Chem. Eng. News, 77(8)
- [2] Bin Zhao., Jeffrey S. Moore., David J. Beebe., "Surface-Directed liquid flow inside microchannels", Science, vol. 291, 9 February, 2001, pp. 1023-1026.
- [3] Honest Makamba., Jin Ho Kim., Kwansoep Lim., Nokyoung Park., Jong Hoon Hahn., 2003, "Surface modification of poly(dimethylsiloxane) microchannels", Electrophoresis, Vol. 24, pp3607-3619.
- [4] J. Cooper McDonald., George M. Whitesides., 2002, "Poly(dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices", Accounts of chemical research, Vol.35, NO.7, pp491-499.
- [5] Neelesh A. Pantankar, "Transition between Superhydrophobic States on Rough Surfaces", Langmuir 2004, Vol.20, pp7097-7102
- [6] Young Chae Jung, Bharat Bhushan, "Wetting Transition of water droplets on superhydrophobic patterned surfaces", Scripta Materialia, Vol.57, 2007, pp1057-1060
- [7] Junfeng Zhang, Daniel Y. Kwok, "Contact Line and Contact Angle Dynamics in Superhydrophobic Channels", Langmuir, Vol.22, 2006, pp4998-5004
- [8] J Pellicer, V Garcia-Morales, M J Hern'andez, "On the demonstration of the Young-Laplace equation in introductory physics courses", Phys. Educ, Vol.35(2), March, 2000