

# 초소수성 마이크로 채널 내 슬립 유동의 실험적 측정

김 지훈\* · 변 도영† · 고 한서\*\*

## Experimental Study on Slip Flows in Superhydrophobic Microchannel

Jihoon Kim, Doyoung Byun, Hanseo Ko

### Abstract

Recently, many studies concern on the slip flow and slip length, which allow liquid flow to reduce drag force in microchannel. However, until now not enough investigation is performed experimentally to understand the slip flow in the superhydrophobic microchannel exhibiting riblet structures on vertical wall. Here we investigated and compared the slip flows according to the surface characteristics; hydrophilic, hydrophobic, and superhydrophobic wettabilities. Using the micro-PIV, velocity profiles can be obtained in the glass (hydrophilic), PDMS (hydrophobic), and micro-structured PDMS (superhydrophobic) microchannels. For both PDMS and superhydrophobic PDMS microchannels, we observed the slip effects showing the microscale slip lengths. Due to the micro-riblet, there are two distinctive flow characteristics on the riblet surface and the liquid meniscus in the valleys.

**Key Words :** Micro-channel(마이크로 채널), Superhydrophobic(초소수성), Slip flow(슬립 유동)

### 기호설명

$u$	slip velocity
$\beta$	slip length of coefficient
$\nu$	kinematic viscosity
$y$	height of spanwise $y$
$a$	radius
$\Omega$	angular velocity

### 1. 서론

최근 들어, 많은 연구 역량이 마이크로 (Micro) 혹은 나노(Nano) 크기의 유체의 유동현상을 주목하고 있다. 마이크로 및 나노의 크기는 직

접적으로 Bio chip 이나 Lab-on-a-chip 형태에 즉시 응용이 가능한 이점이 있으며, 더 나아가 산업공정인 Ink-jetting 과 우주추진과 자세제어를 가능케 하는 Micro-thruster 에도 이용이 가능하다.[1][2] 따라서 이와 같은 Microfluidic 장치에서의 유체 운동의 분석은 매우 중요한 의미를 지닌다. 장치를 설계-배치 혹은 특정 재질을 선택함에 있어 유동해석은 최적화된 장치를 만드는 데 기여할 수 있다.[3] 많은 유동특성 중 하나인 슬립 조건(slip condition)은 항력을 감소시키며, 보다 적은 압력과 비용으로 유동의 이동을 도와주는 장점이 있다. 무엇보다도 이러한 slip 을 좌우하는 것은 표면 특성에 기인하는 경우가 많다. 대표적으로 표면 장력의 변화를 유발하면 액체-고체 접촉각을 다양하게 변화시킬 수 있으며, 이 역시 많은 연구들이 진행되어 오고 있다.[4][5]

본 연구에서는 마이크로 채널 내부의 벽면 근처에서의 슬립 영향을 Micro-PIV 를 이용하여 측정하였다. MEMS 공정을 사용하여 초소수성(Superhydrophobic) 마이크로 채널을 제작한 뒤 친수성(Hydrophilic) 및 소수성(Hydrophobic)과 정량적으로 비교 하였다.

† 건국대학교 항공우주정보시스템공학과  
E-mail: dybyun@konkuk.ac.kr

\* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

\*\* 성균관대학교 기계공학부

## 2.2 실험방법

### 2.1 공정방법

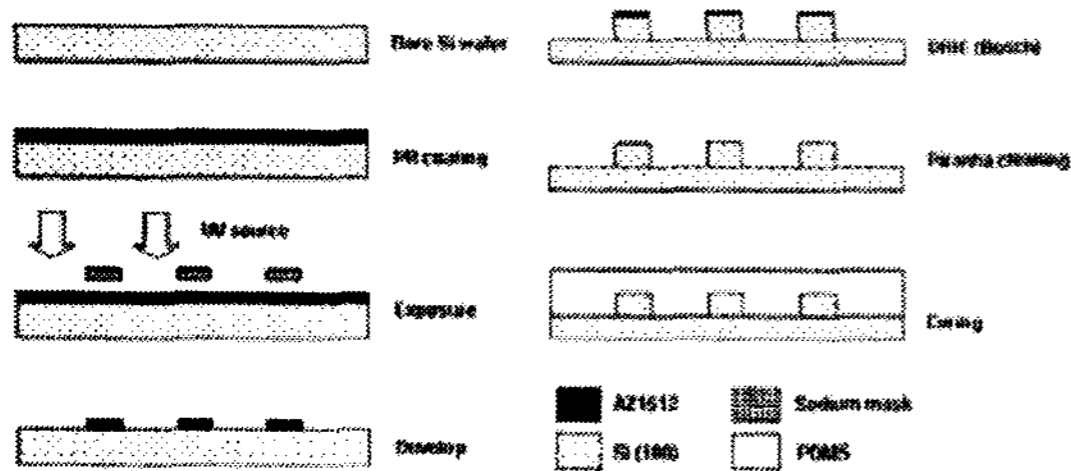


Fig. 1 Schematic of mold master fabrication

Fig. 1 에서 보여주는 바와 같이 벽면에 riblet 구조를 만들기 위해 MEMS 공정을 이용하여, PDMS mold master 를 만들 수 있다. 기본적으로 깨끗한 Si wafer 에 AZ1512 Photo-resist 를 3000RPM 에서  $1.5\mu\text{m}$  의 두께로 도포한다. 그 뒤, sodium mask 을 이용하여 (최소 선폭  $5\mu\text{m}$ ) photolithography 작업을 하였다. Develop 과정 후 생성된 pattern 을 다시 DRIE 를 이용하여 Si wafer 를 Bosch etching 시킨다.  $1\mu\text{m}/\text{min}$  의 속도로  $\approx 20\mu\text{m}$  를 etching 하였다. 남은 PR 은 piranha cleaning 을 통하여 제거한 후, IPA cleaning 을 하여 완성한다. 이 상태에서 PDMS 를  $110^\circ\text{C}$ 에서 30 분 동안 curing 하여 PDMS 내부의 구조물을 만든다. Fig. 2 는 제작된 riblet 모양을 보여주고 있다.

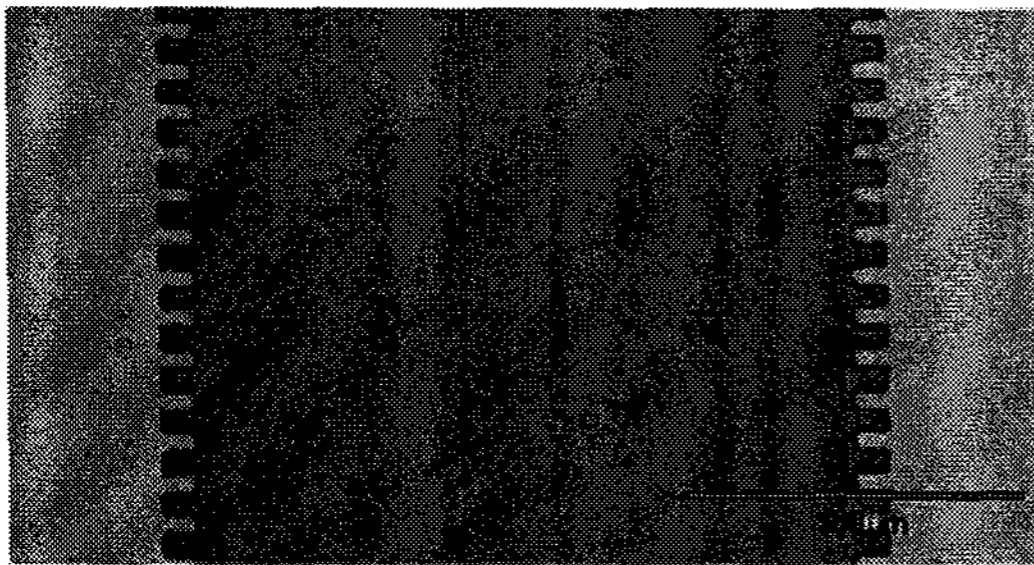


Fig. 2 Picture of the riblet on the wall in microchannel

### 2.2 Micro-PIV 및 분석방법

Fig. 3 는 일반적인 micro-PIV 의 설정된 모습이다.[6] Double shot frame 방식으로 사진을 획득하기 위해, two frequency-double Nd:YAG( $\lambda = 532\text{ nm}$ ) 레이저를 microscope (Nikon Eclipse TE2000 inverted microscope)와 연결시켰다. 특히 이미지를 기록하기 위한 cooled CCD 는 (PCO QE,  $1380 \times 1040$ , 12bit) Nd:YAG 레

이저에 의해 입사된  $\lambda = 532\text{ nm}$  의 녹색 레이저를 흡수 후, 주황색 계열의  $\lambda = 575\text{ nm}$  로 발광하는 유체 추적 입자를 감지한다. Glass, PDMS microchannel 에서 유동가시화를 위하여 형광입자를 사용했으며 그 크기는  $1\mu\text{m}$  이다. Pulse 의 시간은  $\Delta t \approx 75\mu\text{s}$  으로 설정하였으며, CCD 의 이미지는 back-to-back 방식을 취하여, 500ns 이하의 시간에서 획득하였다.

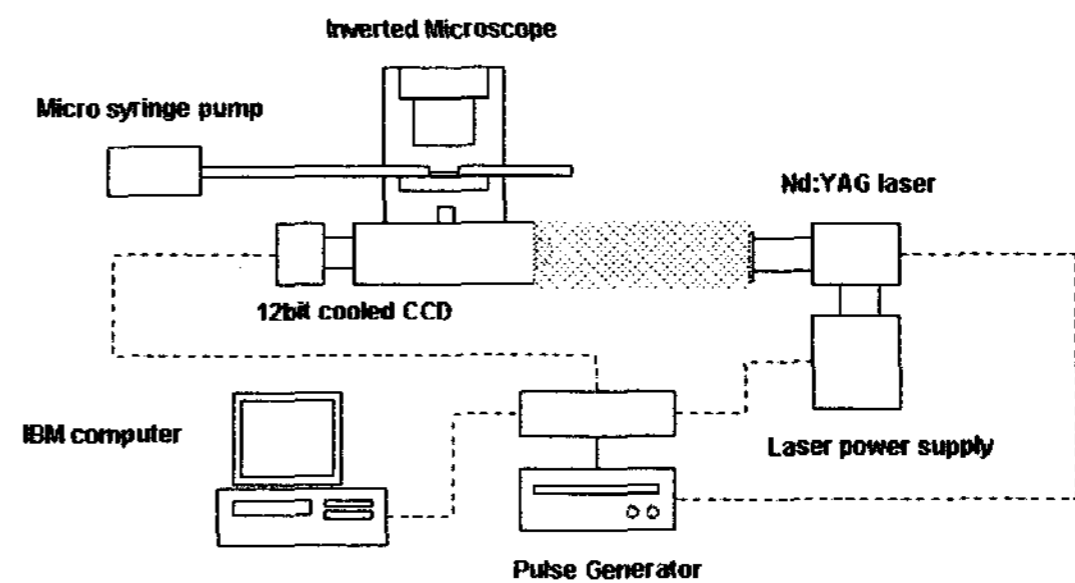


Fig. 3 Schematic of Micro-PIV system

## 3. 실험 결과 및 고찰

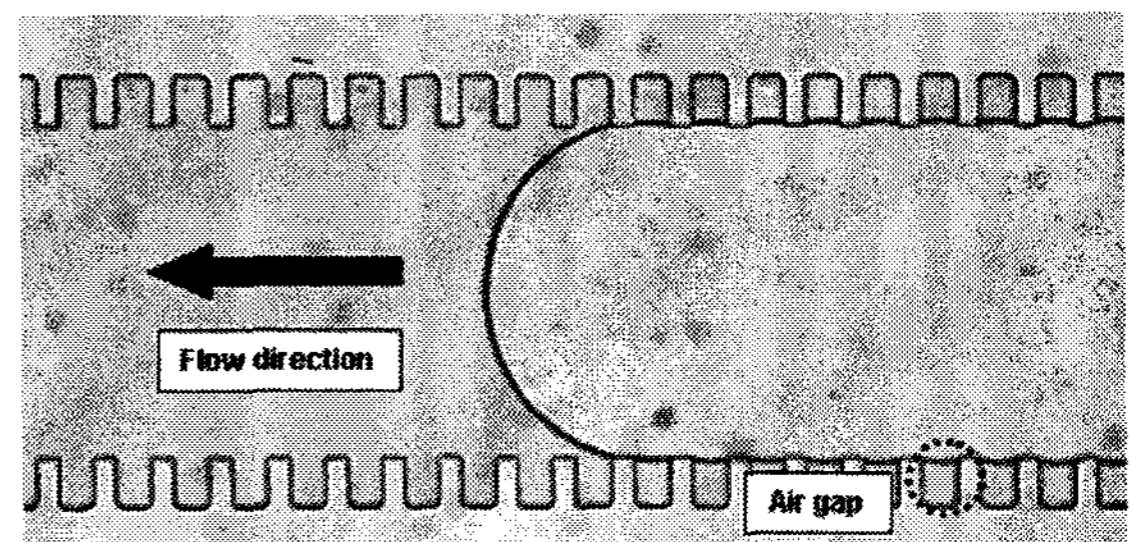


Fig. 4 Contact line of the liquid and gas phases in the superhydrophobic PDMS microchannel

초소수성상태가 되면 air gap 이 생긴다. Syringe pump 로  $2.4\mu\text{l}/\text{min}$  의 일정한 유량을 공급했을 때, Fig. 4 와 같이 air gap 은 만들어졌으며, 시간이 흘러도 계속 유지되는 것이 관측되었다.

Fig. 5 와 같이 Glass, 일반 PDMS, 초소수성 PDMS 채널 내부에서의 속도를 200 장의 사진을 앙상블 평균(ensemble average)한 뒤 표준화(normalization)로 비교하였다. Glass 채널에서는 no-slip 조건에 비슷한 분포를 나타내는 반면에 소수성 특징을 가지는 PDMS 채널 내부에서는 약간의 slip 이 일어나고 있음을 알 수 있다. 초소수성 PDMS 에서는 그 정도가 Glass 에 비하여 33~35% 정도 증가된 것을 확인할 수 있었다.

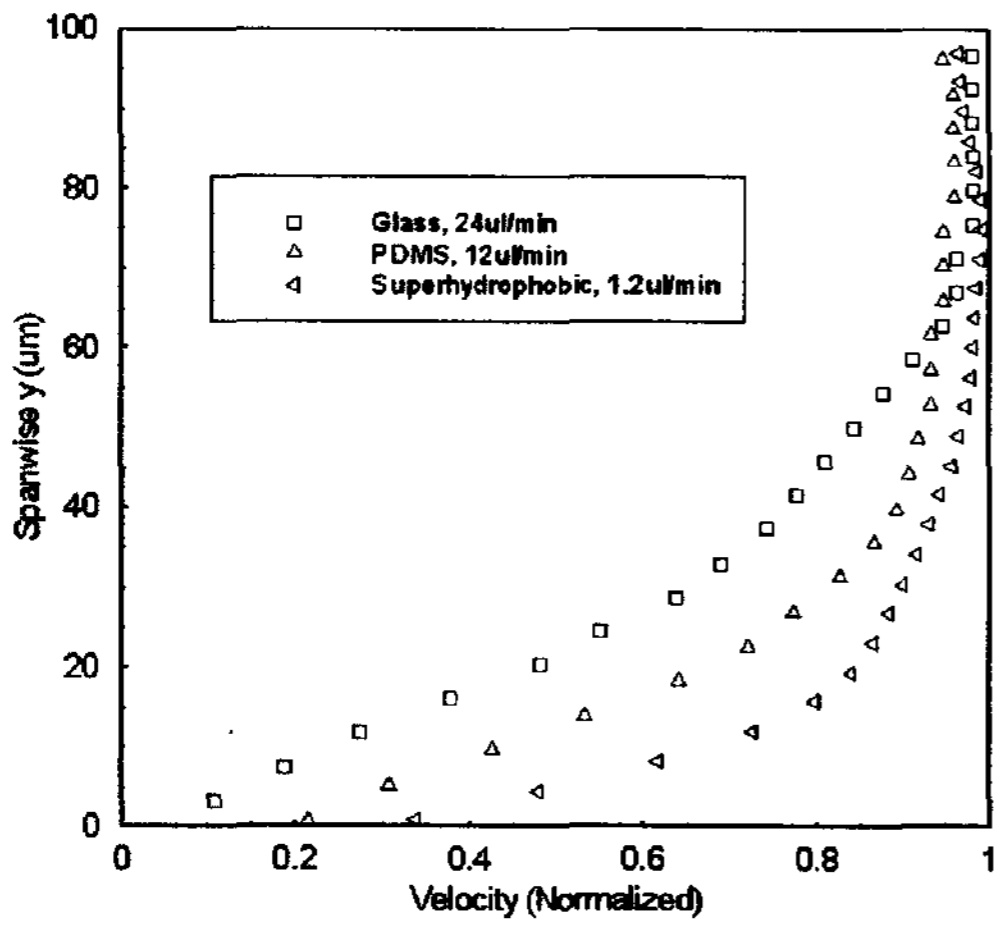


Fig. 5 Comparison of velocities along the vertical direction on the wall

또한 Table. 1 과 같이 구조물의 크기와 간격 (Pitch)의 영향을 살펴보기 위하여 초소수성 PDMS 채널을 다양하게 제작하였다.

Table. 1 Dimension of riblet structures

Structure size	5 $\mu m$	14 $\mu m$
Pitch	12.5 $\mu m$	35 $\mu m$
	25 $\mu m$	70 $\mu m$
Depth	20 $\mu m$	

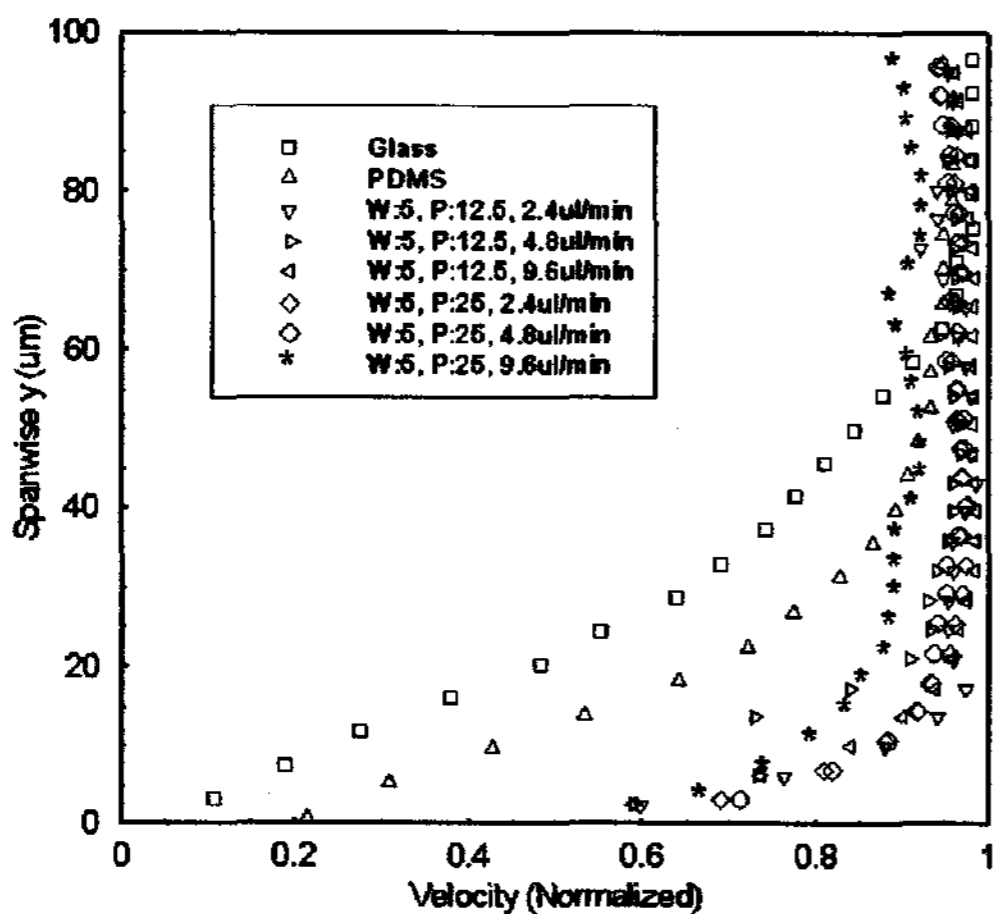


Fig. 6 Effect of pitch on the velocity distribution for 5  $\mu m$  riblet on the riblet surface

Fig. 6 은 5  $\mu m$  의 riblet 이 존재하는 채널에서 riblet 표면으로부터의 속도 분포를 나타낸 것이며, Fig. 7 은 14  $\mu m$  riblet 에 대한 속도 분포를 나타낸 것이다.

간격이나 riblet 의 크기에 따른 슬립 현상의 증가는 명확하게 구분되지는 않고 있으나 riblet 이 커질수록 유동의 불안정도가 증가함을 알 수 있다.

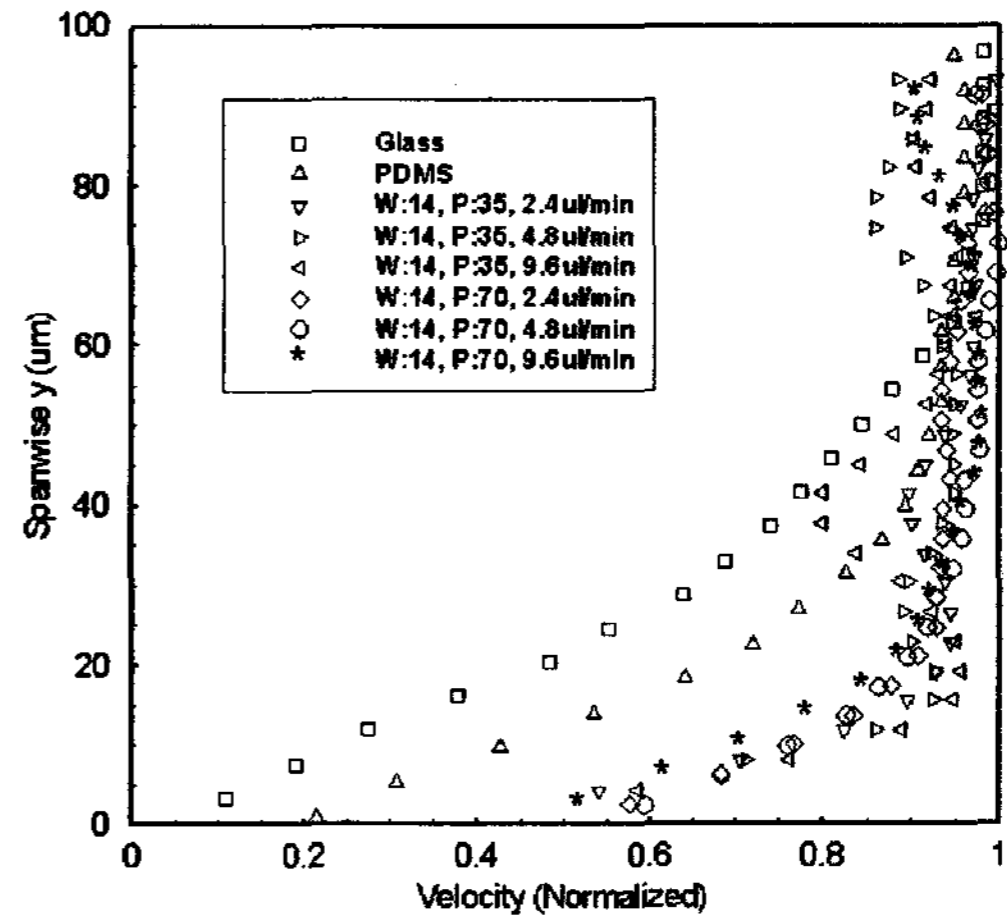


Fig. 7 Effect of pitch on the velocity distribution for 14  $\mu m$  riblet on the riblet surface

속도의 분포가 파동형태의 모습으로 불규칙하게 나타난 모습을 볼 수 있다. Navier 는 슬립 속도를 벽면의 응력에 비례하게 된다는 다음과 같은 식을 정립하였다.[7]

$$u_i = \beta_i \left( \frac{du}{dy} \right)_i \quad (1)$$

이는 비록 층류(laminar flow)영역일지라도, 구조물에 의해서  $\beta$  와  $y$  가 변하면, 슬립의 길이는 매우 다른 모습을 나타낼 수 있다. 특히 유량이 빠를 경우 구조물과 구조물 사이에 생긴 air gap 을 지나가는 입자들은 회전을 유발하는데, 다음 식에 의해 회전관성에 의한 슬립이 야기되는  $Re_\Omega$  (레이놀즈 수) 성분을 Saffman effect 의 구성으로 정의할 수 있다.

$$Re_\Omega = \frac{4a^2\Omega}{\nu} \quad (2)$$

따라서 속도가 증가된 상태에서 구조물의 윗부분에서는 많은 속도성분들이  $x$  방향이 아닌  $y$  방향의 성분을 가지게 된다. 이는 Fig. 8 과 9 에서 더욱 면밀히 드러난다. Fig. 8 은 5  $\mu m$  구조물에서 속도벡터를 나타낸 것이다. 벡터의 성분들이 대부분 큰 방향의 변화 없이 부드럽게 진행하고 있는 상태이다. 그러나 Fig. 9 는 14  $\mu m$  구조물의 높이와 간격이 5  $\mu m$  에 비해 상대적으로 크게 되면서 마치 파동이 중첩되는 모습을 보인다. 이는 위에

서 설명한 속도와 회전에 의한 추가 슬립 성분들이 더해진 것으로 마이크로 채널의 중간부분에서는 오히려 속도가 감소하는 영향을 야기함을 알 수 있었다.

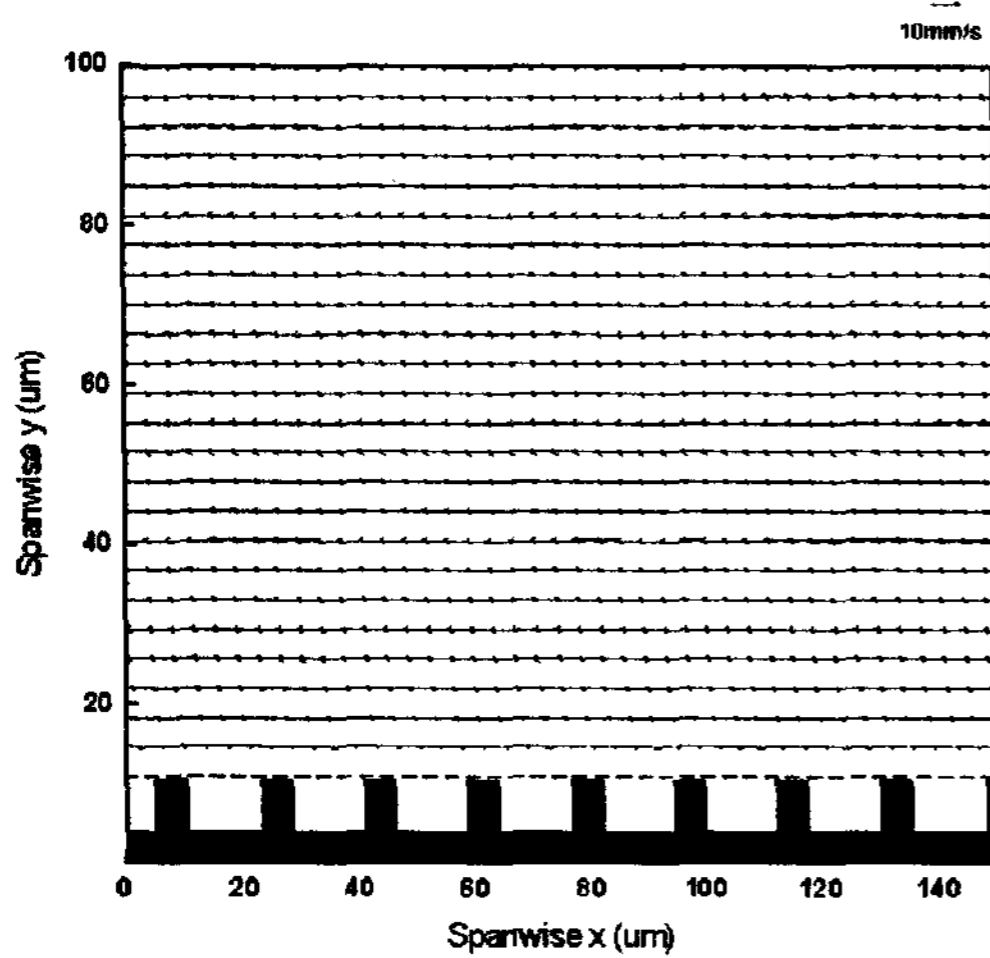


Fig. 8 Velocity vectors in superhydrophobic microchannel with 5  $\mu\text{m}$  riblets

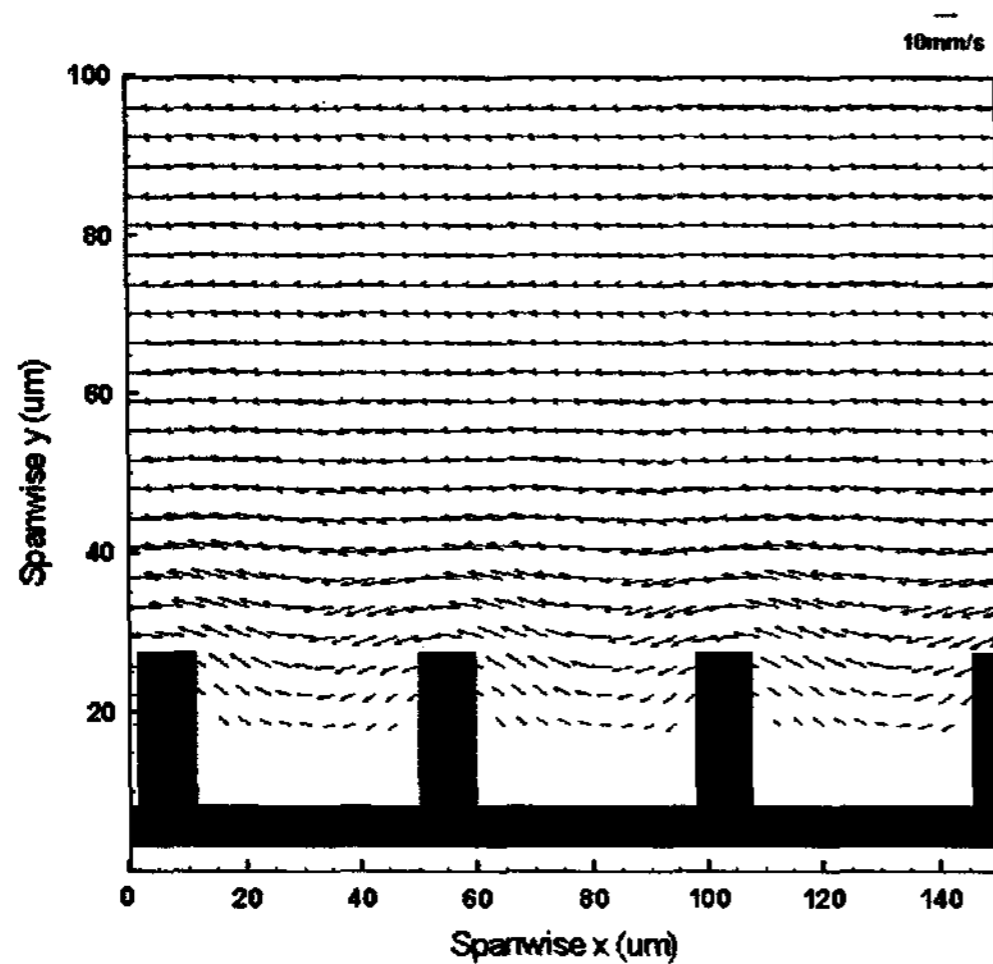


Fig. 9 Velocity vectors in superhydrophobic microchannel with 14  $\mu\text{m}$  riblets

#### 4. 결론

본 연구는 MEMS 공정을 이용하여 벽면에 비등방성 초소수성을 갖는 구조물을 PDMS 마이크로 채널에 제작 한 뒤, Micro-PIV 를 이용하여 벽면에서의 슬립 유동을 측정하였다. Riblet 구조를 갖는 초소수성의 채널에서는 구조물의 크기 및 거리에 따라 유동의 슬립과 흐름이 달라짐을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-2005-D00051, KRF-2005-D00045) 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Freemantle, M, 2003, Chem. Eng. News, Vol.77(8)
- 2) Honest Makamba, Jin Ho Kim, Kwansoep Lim, Nokyoung Park, Jong Hoon Hahn, 2003, "Surface modification of poly(dimethylsiloxane) microchannels", Electrophoresis, Vol.24, pp3607-3619
- 3) J. Cooper McDonald, George M. Whitesides, 2002, "Poly(dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices," Accounts of chemical research, Vol.35(7), pp491-499
- 4) Muller E A, Gubbins K E, 1998, "Molecular simulation study of hydrophilic and hydrophobic behavior of activated carbon surfaces," Carbon, Vol.36(10), pp1433-1438
- 5) Nagayama G, Cheng P, 2004, "Effect of interface wettability on microscale flow by molecular dynamics simulation," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.47, pp501-513
- 6) Santiago J G, Wereley S T, Meinhart C D, Beebe D J, Adrian R J, 1998 "A particle image velocimetry system for microfluidics," Experiments in Fluids, Vol.25, pp316-319
- 7) Xue-Yi You, Jing-Ru Zheng, Qi Jing, 2007, "Effect of boundary slip and apparent viscosity on the stability of microchannel flow", Forsch Ingenieurwes, Vol.71, pp99-106