마이크로 구조를 이용한 유체 표면마찰의 감소

Friction Drag Reduction using Microstructured Surfaces

박치열[1], 배승일[1], 이상민[1], 고종수[1,✉], 정광효[2]
Chi Yeol Park[1], Seung Il Bae[1], Sang Min Lee[1], Jong Soo Ko[1,✉] and Kwang Hyo Chung[2]

1 부산대학교 기계공학부 (Graduate school of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)
2 한국전자통신연구원 (Electronics and Telecommunications Research Institute)
✉ Corresponding author: mems@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2488

Manuscript received: 2009.3.23 / Accepted: 2009.8.27

The hexagonal network-type PDMS microstructures were fabricated and they were employed to low-friction drag surfaces. While the lowest contact angle measured from the smooth surface was 108°, the highest contact angle measured from the microstructured surfaces was 145°. The moving speed of bullet-type capsule attached with a PDMS pad of smooth surface (CA=108°) was 0.1261 m/s and that with a PDMS pad of microstructured surface (CA=145°) was 0.1464 m/s. Compared with the smooth surface, the microstructured surface showed 16.1% higher moving speed. The network-type microstructures have a composite surface that is composed with air and PDMS solid. Therefore, the surface does not wet: rather water is lifted by the microstructures. Because of the composite surface, water shows slip-flow on the microstructures, and thus friction drag can be reduced.

Key Words: Surface Friction Drag (표면 마찰 항력), Microstructure (마이크로 구조물), Microcasting (마이크로 캐스팅), Contact angle (접촉각)

1. 서론

부존자원의 고갈에 따라 대체 에너지 개발 및 고효율 에너지 시스템을 개발하는데 전세계의 노력이 집중되고 있다. 유체와 접촉을 하며 이동하는 선박과 같은 운송수단의 경우에는 표면 마찰을 줄임으로써, 에너지 사용량을 크게 줄일 수 있다. 유체 내에서 운동하는 물체는 물체의 형태에 따른 형상 항력(form drag)과 물체 표면에서 생기는 표면 마찰 항력(surface friction drag)을 받으며 운동하게 되는데, 선박이나 비행기의 경우에는 전체 항력에서 표면 마찰 항력이 약 50%를 차지하며, 잠수함은 약 70%, 긴 수송관의 경우에는 약 100%를 차지하므로 운송수단의 표면 마찰 항력을 줄이는 연구는 에너지 효율 측면에서 매우 중요하다.[1]

최근 표면 마찰 항력을 감소시키기 위한 연구는 국내·외적으로 활발히 진행되고 있으며, 이를 제어하는 방법에 따라 크게 능동적 제어방법과 수동적 제어 방법으로 분류할 수 있다. 먼저, 능동적 제어방법으로는 극소 가진을 이용하여 미소공기방울을 경계층에 주입하는 방법을 들 수 있다. McCormick, M. 와 Bhattacharyya, R. 는 물속에서 실험체 표면에 구리선을 설치하여 물을 전기분해 시켜 생성된 공기방울을 이용하여 10~30%의 항력을 감소시켰다.[2] Kato et al.은 유속이 낮으며 유입되는 공기의 양이 많을수록 표면마찰 항력의 감소량이 증가하며, 이때 벽면부근에서의 미소 공기량이 중요한 인자라는 것을 확인하였다.[3] Park, Y. S.와 Sung,

H. J.는 초음파 가진을 이용하여 15%정도의 속도를 향상시킨 바 있다.[4] 이러한 능동적 제어 방법은 속도의 증가가 크나, 낮은 에너지 효율, 복잡한 소자 제작공정, 구동체 제어의 어려움, 무게의 증가, 소음발생 등의 문제점을 가진다.

수동적 제어 방법으로는 상어 표면에서 관찰할 수 있는 리블렛(riblet)으로 항력 감소 효과에 관한 연구를 진행하였으며,[5] 초소수성 나노 마이크로 돌기를 이용하여 표면마찰 항력을 감소시키는 연구가 진행되었다.[6,7] 수동적 제어방법은 제작이 용이하며 추가적인 에너지가 필요없는 반면, 능동적 제어에 비해 효율이 낮다는 문제점을 가진다.

본 연구에서는 네트워크형의 마이크로 구조물을 이용하여 수중에서 움직이는 구동체의 표면마찰을 줄일 수 있는 새로운 저마찰 항력 표면을 제안하고, 제작한 기판을 수중 구동체의 표면에 부착하여 구동체의 속도증가를 평가한다.

2. 개념 및 설계

2.1 개념

제작하고자 하는 네트워크형 마이크로 구조물의 형상은 Fig. 1 에서 보는 바와 같다. 돌기형 나노 마이크로 구조물이 접촉각을 증가시키는데 매우 큰 영향을 미친다는 것은 기존의 여러 연구를 통하여 입증되었다. 본 연구진은 돌기형 구조물 외에 네트워크형 구조물도 접촉각 증가에 크게 기여할 수 있다는 것을 실증하였으며, 이러한 네트워크형 구조물은 돌기형 구조물에 비하여 기계적으로 우수한 강도를 가지는 장점이 있다.[8,9]

네트워크 형상의 마이크로 구조물이 물과 접촉할 경우, 함몰부의 마이크로 공동(microcavity)은 물에 의해 곧 닫히게 된다. 결과적으로 물은 네트워크 형태의 고체와 공동에 채워진 공기로 구성된

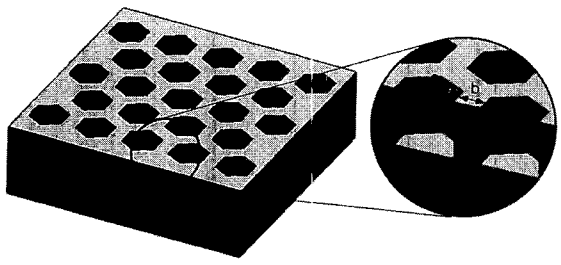


Fig. 1 Geometry of the designed hexagonal network-type microstructures

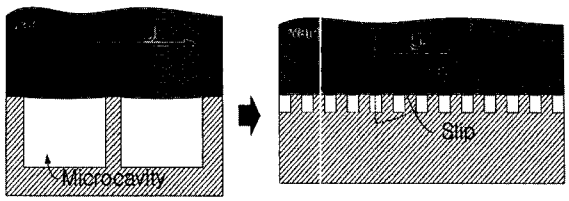


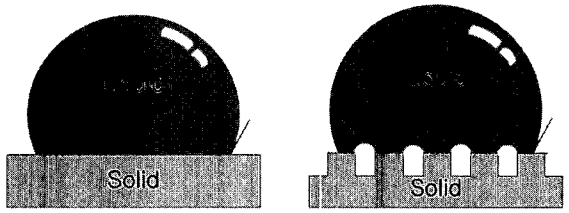
Fig. 2 Effect of composite surface

복합표면(composite surface) 위에 떠 있는 형태가 된다. 이 상태에서 물과 고체 표면이 상대운동을 할 경우 Fig. 2 에서와 같이 구조물의 표면에서는 물과의 상대속도가 "0"이지만, 공기 위에서는 "0"이 아닌 일정한 속도를 가지게 된다. 따라서 이러한 복합표면 위를 지나는 물은 일정한 속도로 미끄러지는 효과를 가지게 되며, 이로 인하여 표면마찰에 의한 항력은 감소하고, 결과적으로 구동체의 운동속도는 증가하게 된다.

특히 마이크로 공동 내부에 갇힌 공기는 밖으로 빠져나가지 못하게 되므로 수압이 작용하더라도 복합표면을 그대로 유지할 수 있다. 기존의 돌기형 나노 마이크로 구조물은 수압이 작용하면 물이 돌기 구조물 사이로 침투하여 표면 전체가 쉽게 젖게 되는 단점을 가지고 있기 때문에 네트워크 구조물은 이 같은 단점을 보완할 수 있는 좋은 대안이다. 본 연구에서는 상이한 접촉각을 가지는 네트워크형 마이크로 구조체를 가진 폴리머 패드를 제작하고 이를 구동체의 표면에 장착하여 수중에서의 구동체의 이동속도를 측정함으로써, 접촉각의 증가에 따른 구동체의 이동속도의 변화를 실험적으로 규명한다.

2.2 접촉각 이론

표면의 젖음 특성은 3 상(고체, 액체, 기체)이 만나는 지점에서 물방울과의 각도에 의해 정의된



(a) (b)

Fig. 3 Wetting modes of liquid drops: (a) On a smooth surface; (b) On a microstructured surface(Cassie-Baxter mode)

다. 특히 물방울과 고체 표면이 이루는 접촉각은 표면장력 혹은 표면자유에너지로 인한 젖음성으로 평가되는데 이러한 관계는 Young 의 식에 의해 얻어진다. 이로 인한 고체의 표면의 접촉각은 Fig. 3(a)와 같이 표현된다.

평형상태에서의 표면 자유 에너지는 ($\gamma_{LA}, \gamma_{SL}, \gamma_{SA}$)의 합은 아래의 식에서와 같이 "0"이 되어야 한다.

$$\vec{\gamma}_{SL} + \vec{\gamma}_{LA} + \vec{\gamma}_{SA} = 0 \qquad (1)$$

고체 표면으로 투영에 의한 표면 에너지의 관계는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.[10,11]

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SA} - \gamma_{LA} \cdot \cos\theta \qquad (2)$$

Cassie-Baxter 는 Fig. 3(b)에서와 같이 물방울이 기판 표면의 요철에 떠 받쳐지는 상태를 가정하여 아래와 같은 이론 접촉각을 제안하였다.[12]

$$\cos\theta^c = -1 + f_S(\cos\theta_0 + 1) \qquad (3)$$

여기서, $f_s = A_{SL}/A_C$ 이며, 이는 액체방울이 실제로 고체표면에 닿는 면적(A_{SL})과 상부에서 투영된 면적(A_C)의 비를 나타내며, Solid Fraction 으로 정의한다.

2.3 형상 설계

마이크로 구조물의 형상은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 구조적으로 가장 안정적인 육각형을 선택하였다. 마이크로 공동의 폭(a), 격벽의 폭(b), 격벽의 높이(h)를 변화시키며 세 가지 서로 다른 구조물 크기를 가지는 표면을 설계하였으며, 설계치수와 Cassie-Baxter 모델을 가정하여 계산한 이론접촉각을 Table 1 에 정리하였다. Cassie-Baxter 모델에서

Table 1 Dimension, Theoretical and Experimental CAs

No.	Structure Size			Solid Friction [f_s]	Theoretical CAs.[deg]	Experimental CAs.[deg]
	a[㎛]	b[㎛]	h[㎛]			
#1	Non-Structured			1.0000	-	108
#2	27	12	30	0.5207	131	128
#3	60	13	23	0.3245	142	137
#4	106	13	21	0.2066	150	145

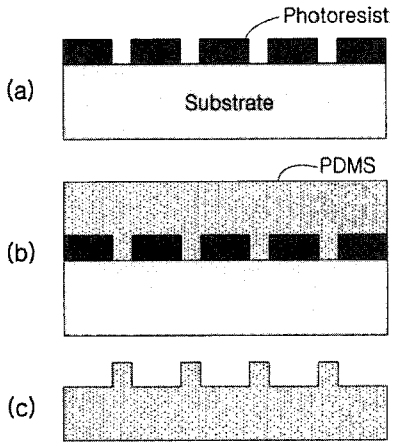


Fig. 4 Fabrication process of network-type PDMS microstructures: (a) Photolithography; (b) PDMS casting; (c) Separation of PDMS from the Silicon substrate

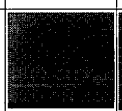
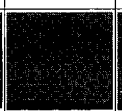
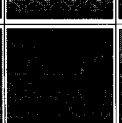
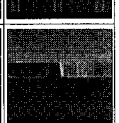
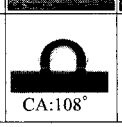
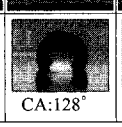
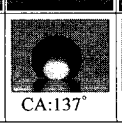
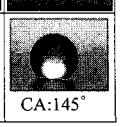
접촉각에 영향을 미치는 인자는 마이크로 공동의 폭과 격벽의 폭이며, 격벽의 높이는 영향을 미치지 않는다. Table 1 에 기재된 격벽의 높이는 제작된 구조물을 실제 측정한 값이다.

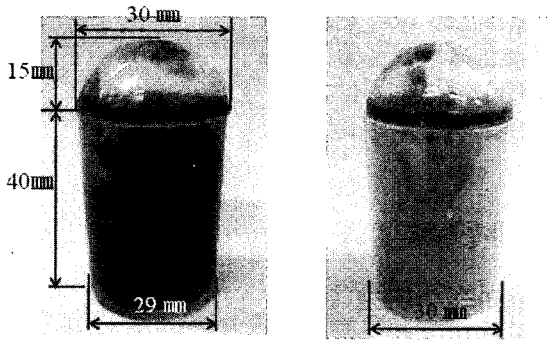
3. 제작

3.1 마이크로 구조물 제작

마이크로 구조를 제작하기 위해 사진 공정과 PDMS(polydimethylsiloxane) 캐스팅 공정이 진행된다. 전체 제작공정 순서는 Fig. 4 에 도시하였으며, 세부공정 내용은 다음과 같다. AZ9260(Clariant, USA) 감광제를 사용하여 6 인치 웨이퍼에 사진공

Table 2 SEM and Contact angle images of fabricated micro hexagonal pore structures

Model No.	#1	#2	#3	#4
Top View				
Cross Sectional View				
Contact Angle	 CA:108°	 CA:128°	 CA:137°	 CA:145°



(a) (b)

Fig. 5 Photos of the fabrication bullet-type capsule: (a) without PDMS pad; (b) with PDMS pad

정을 수행한다(Fig. 4(a)). PDMS 주제와 경화제를 10:1 체적비율로 혼합하여 실리콘 기판 위에 부은 후, 진공오븐을 이용하여 기포를 제거한 후 경화시킨다(Fig. 4(b)). 경화된 PDMS를 실리콘 기판으로부터 분리시켜 제작 공정을 완료한다(Fig. 4(c)). 제작된 구조물의 SEM(scanning electron microscope) 사진을 Table 2에 나타내었다.

3.2 구동체 제작

마이크로 구조물이 제작된 패드를 수중 구동체의 표면에 부착하여 구동체의 이동속도를 측정하기 위해 Fig. 5 에서와 같은 탄환형태의 구동체를 제작하였다. 구동체의 머리부분은 지름이 30mm 인 반구형이며, 몸통은 지름 29mm, 높이 40mm 인 원통형이다. 본 연구에서는 구동체의 몸통부분에만 제작된 PDMS 패드를 부착하였다. PDMS 패드의 두께가 0.5mm 이므로, 제작된 PDMS 패드를 원통에 부착하여 반구형 머리의 직경과 같아지게 하였다. 아크릴을 사용하여 제작한 구동체의 질량은 34.3g 이다.

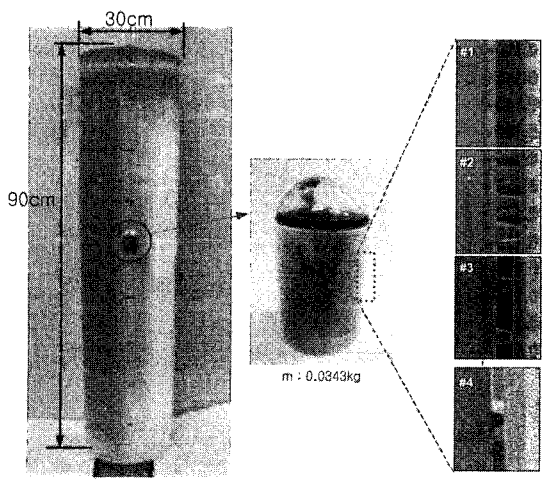


Fig. 6 Measurement setup for moving speed test

4. 결과 및 고찰

4.1 마이크로 구조물의 접촉각

네 가지 서로 다른 표면을 가진 PDMS 표면에서 측정한 접촉각은 Table 2 에 나타내었다. 측정된 접촉각은 초순수(DI water)를 사용하였으며, 물방울의 부피는 약 3 $\mu\ell$이다. Table 1 의 설계치수에서 알 수 있듯이 마이크로 공동의 폭이 크면 클수록 접촉각은 증가하게 된다. 측정된 접촉각은 5 회 반복한 데이터의 평균값이다. 마이크로 구조물이 없는 평평한 면(model #1)에서의 접촉각이 108°임에 반해, 마이크로 공동의 폭이 가장 큰 구조물이 형성된 면(model #4)에서의 접촉각은 145°으로써, 마이크로 구조물로 인하여 37°의 접촉각이 증가하였다. 이론 접촉각과 측정한 접촉각 사이에 약 5° 정도의 오차가 발생하였다. 이는 사진공정에서 발생하는 빛의 산란에 의한 패턴 크기의 오차에서 발생한 것으로 사료된다.

4.2 수중 구동체의 이동 속도

네 가지 모델로 제작된 PDMS 패드를 장착한 구동체의 수중에서의 이동 속도를 측정하기 위하여, Fig. 6 에서와 같은 실험 장치를 구비하였다. 이

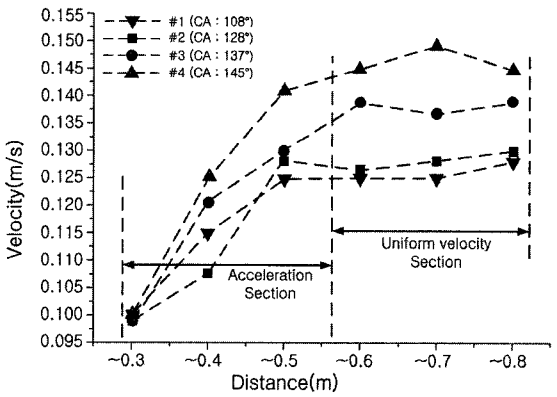


Fig. 7 Measured velocities of the moving capsules attached with PDMS pads of four different surface conditions

장치는 부력에 의해 떠 오르는 구동체의 속도를 측정하기 위한 것으로써, 직경 20cm, 높이 1m 인 원통 내부에 90cm 높이로 물을 채워 넣은 것이다. Fig. 7 은 구동체의 이동속도를 측정한 그래프를 나타낸다. 제작한 PDMS 패드에 대해서 각각 7 회 반복 실험을 하여, 최소 및 최대 속도를 제외한 구동체의 평균 이동 속도를 데이터로 채택하였다. 바닥에서 출발한 구동체는 60cm 의 높이에 이를 때까지 가속운동을 하며, 그 이후에는 등속운동을 한다. 등속운동구간에서의 구동체의 이동속도는 접촉각이 108°, 128°, 137°, 145°인 시편에서 각각 0.1261m/s, 0. 1282m/s, 0.1383m/s, 0.1464m/s 로 증가하였다. 접촉각 145°를 가지는 마이크로 구조화 된 표면(model #4)이 접촉각 108°를 가지는 평면인 표면(model #1)에 비하여 이동속도가 16.1% 증가하였다.

이러한 속도증가는 네트워크형 구조물이 형성된 표면이 물과의 접촉을 줄였기 때문이다. 마이크로 공동의 폭이 커질수록 물과 접촉하는 표면적이 작아지게 되며, 접촉각 또한 증가하게 된다. 접촉각이 클수록 물과 접촉하는 면적이 적어지므로, 마찰 저항이 감소하게 되고, 결과적으로 속도증가는 더욱 커지게 된다. 이는 물이 고체와 공기로 이루어진 복합표면을 지나갈 때에 평균 유동 속도가 "0"이 아닌 슬립(Slip)이 발생하기 때문이다. 또한, 돌기 형상 구조물에 비해 네트워크 구조물 이 일정 이상의 수압에서 공기를 안정적으로 가지고 있기 때문에 상대적으로 낮은 표면 마찰 항력 계수를 가지는 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용한 PDMS 재질은 소수성을 띄기 때문에 마이크로 공동 내의 공기와 물이 만나서 이루는 경계면은 Fig. 3(b)에서와 같이 볼록렌즈 모양을 띄게 되며, 이러한 볼록렌즈 형상이 유동에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 또한 본 연구에서는 구동체의 몸통부분에만 PDMS 패드를 부착하였기 때문에, 구동체의 표면 마찰 저항을 평가하는데 제한이 있었다. 머리부분에도 PDMS 패드를 부착할 경우 구동체의 속도는 더욱 크게 증가할 것으로 사료되며, 관련 연구는 향후 진행할 예정이다.

5. 결론

네트워크형 마이크로 구조물이 형성된 PDMS 패드를 설계 및 제작하였으며, 접촉각 증가에 따른 유체 마찰 저항 감소를 실험적으로 규명하였다. 네 가지 상이한 표면형상을 가지는 PDMS 패드의 접촉각은 각각 108°, 128°, 137°, 145°로 측정되었다. 이러한 패드를 탄환형 구동체의 몸통에 부착하여 부력에 의한 수중에서의 구동속도를 측정한 결과, 등속구간에서 각각 0.1261 m/s, 0.1282 m/s, 0.1383 m/s, 0.1464 m/s 의 속도를 보였다. 접촉각이 108°인 표면에 비하여 145°인 경우 구동체의 이동속도가 16.1% 증가하였다.

접촉각 증가에 따른 구동체의 이동속도 증가는 표면 마찰 감소에 기인한 것이다. 물과 접촉하는 PDMS 마이크로 구조물의 표면적이 적을수록 접촉각은 증가하게 되며, 이에 따라 마찰 저항이 감소하게 되고, 결과적으로 구동체의 속도가 증가하게 된다. 마이크로 구조물 위에 물이 떠받쳐진 상태이므로, 물은 고체와 공기로 이루어진 복합표면 위를 지나가게 되며, 복합표면에서의 물의 평균 유동 속도는 "0"이 아닌 일정한 속도를 가진다. 이는 곧 PDMS 패드 위에서 물이 미끄러지며 흐른다는 것을 의미한다. 네트워크형 구조물은 일정한 수압이 작용하더라도 공동 내부에 공기를 가두어 둘 수 있으므로, 수중에서도 복합표면을 그대로 유지할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 제안한 유체 마찰 감소 표면은 유체 마찰 저항이 발생하는 각종 분야에 적용할 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Han, M. H., Huh, J. K., Lee, S. S. and Lee, S. H., "Fabrication of a Micro-Reblet Film MEMS Technology and Its Application to Drag Reduction," Trans. of KSME(B), Vol. 26, No. 7, pp. 991-996, 2002.
2. McCormick, M. E. and Bhattacharyya, R., "Drag Reduction of a Submersible Bull by Electrolysis," Nav. Eng. J., Vol. 85, pp. 11-16, 1973.
3. Kato, H., Iwashina, T., Miyanaga, M. and Yamaguchi, H., "Effect of Microbubbles on the Structure of Turbulent in a Turbulent Boundary Layer," J. Mar. Sci. Technol., Vol. 4, No. 4, pp. 155-162, 1999.
4. Park, Y. S. and Sung, H. J., "Influence of Local

Ultrasonic forcing on a Turbulent Boundary Layer," Proc. of 4th KSV Conference, pp. 17-22, 2005.

5. Walsh, M., "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique," AIAA J., Vol. 21, No. 4, pp. 485-486, 1983.
6. Choi, C. H., Ulmanella, U., Kim, J. W., Ho, C. M. and Kim, C. J., "Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels," Physics of Fluids, Vol. 18, No. 8, Paper No. 087105, 2006.
7. Kim, J. H., Byun, D. Y. and Ko, H. S., "Experimental Study on Slip Flows in Superhydrophobic Microchannel," Proc. of KSV Autumn Conference, pp. 84-87, 2007.
8. Lee, S. M., Ha, S. W., Jung, D., Go, J. S., Shin, B. and Ko, J. S., "Surface Wettability in terms of the Prominence and Depression of Diverse Microstructures and Their Sizes," Transducers '07 Conference, pp. 1577-1580, 2007.
9. Lee, S. M., Jung, I. D. and Ko, J. S., "The effect of the Surface Wettability of Nanoprotrusions Formed on Network-type Microstructures," J. Micromech. Microeng. Vol. 18, No. 12, Paper No. 125007, 2008.
10. Furstner, R., Barthlott, W., Neinuis, C. and Walzel, P., "Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces," Langmuir, Vol. 21, No. 3, pp. 956-961, 2005.
11. Callies, M., Chen, Y., Marty, F., Pepin, A. and Quere, D., "Microfabricated textured surfaces for super-hydrophobicity investigations," Microelectron. Eng., Vol. 78-79, pp. 100-105, 2005.
12. Cassie, A. B. D. and Baxter, S., "Wettability of porous surfaces," Trans. Faraday Soc., Vol. 40, pp. 546-551, 1945.