



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

마이크로 돌기 구조 표면의
이방성 흐름 특성 평가



2024 년 2 월

국립부경대학교대학원

지능로봇공학과

백 승 익

공 학 석 사 학 위 논 문

마이크로 돌기 구조 표면의
이방성 흐름 특성 평가



지도교수 김 태 완

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2024 년 2 월

국립부경대학교대학원

지능로봇공학과

백 승 익

백승익의 공학석사 학위논문을 인준함.

2024 년 2 월 16 일



위 원 장	공학박사	강 대 민 (인)
위 원	공학박사	박 영 환 (인)
위 원	공학박사	김 태 완 (인)

목 차

I.	표 목차	iii
II.	그림 목차	iv
1.	서론	1
1.1.	연구 배경	1
1.2.	연구 동향	6
1.2.1.	초소수성 표면 제작	6
1.2.2.	자연 모사	8
1.3.	연구 목표	10
2.	비대칭 마이크로 돌기 구조의 몰드 제작을 위한 레이저 홀 가공	11
2.1.	고출력 다이오드 레이저 이용 홀 가공.....	11
2.2.	초단펄스 다파장 레이저 이용 홀 가공 몰드 및 시편 제작.....	16
3.	마이크로 돌기 구조 표면이 이방성 흐름 특성 평가	21
3.1.	정적상태에서의 젖음성 평가.....	21
3.2.	동적상태에서의 젖음성 평가.....	27
4.	그루브와 경사 마이크로 돌기 구조 표면의 이방성 흐름 평가	30
4.1.	정적상태에서의 젖음성 평가.....	30
4.2.	동적상태에서의 젖음성 평가.....	33
4.3.	곡선 그루브를 갖는 마이크로 돌기 박막의 액적 흐름 제어 특성 평가	38
5.	결론	42
6.	참고문헌	45

영문 초록	50
감사의 글	52



표 목차

Table 1 Laser and Scanner condition



그림 목차

Fig. 1	Surface description according to the contact angle
Fig. 2	Definition of the contact angle and various wetting models
Fig. 3	Inclined hole machining using scanner angle
Fig. 4	Image of 0° hole machining according to numbers of machining
Fig. 5	Image of inclined hole with 16° machining according to numbers of machining
Fig. 6	Schematic of the laser grooved surface
Fig. 7	Schematic of the laser micro-texturing with oblique hole and superhydrophobic sheet my micro molding
Fig. 8	Photographs of the test set-up
Fig. 9	SEM image of molded surfaces with oblique asperities
Fig. 10	Schematic of the droplet on the micro - asperity surface
Fig. 11	Photographs of the goniometer
Fig. 12	Images of the droplet at different micro - asperity surfaces
Fig. 13	Comparison of the static contact angle on 12 kinds of surfaces
Fig. 14	Comparison of the left and right contact angles for surfaces with different oblique angles at specific pitch
Fig. 15	Variations of the difference between the right and left contact angles with different oblique angles at specific pitch
Fig. 16	Images of the droplet on micro - asperity surfaces at different oblique direction

- Fig. 17 Variations of the roll off angle with different oblique angles at specific pitch
- Fig. 18 Schematic and SEM image of the groove surface with micro - asperities
- Fig. 19 Images of the droplet on micro - asperity surfaces at parallel and perpendicular directions
- Fig. 20 Comparison of the contact angle with different distance between asperities line at parallel and perpendicular directions
- Fig. 21 Images of the droplet on the grooved surface with micro - asperity at different oblique directions
- Fig. 22 Deviation of the tilting angle with different pitches of asperities
- Fig. 23 Comparison of the contact angle hysteresis with different distance between asperities line at different oblique directions
- Fig. 24 Variations of the roll off angle with increasing distance between asperity lines at different oblique directions
- Fig. 25 Schematic and SEM image of the curved groove surface
- Fig. 26 Image of the droplet movement at specific surfaces with increasing tilt
- Fig. 27 Deviation of the tilting angle with different surfaces

1. 서론

1.1. 연구 배경

현대 공업 분야 및 초정밀 전기전자 분야의 품질 및 성능 개선, 안전성 확보를 위한 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 소수성 표면을 응용하려는 노력이 다양한 분야에서 시도되고 있다. 폴리아닐린 필름에 금 나노입자 합성을 통한 필름의 탄성 증가 및 우수한 광 흡수[1], 렌즈 및 광학 부품 등에 응용 가능한 자가 세척 높은 투과율을 가진 소수성 코팅[2], 이중 나노 구조 코팅 소수성 표면을 이용한 해양오염으로의 선박보호[3], 원형 실린더 주변의 흐름에 대한 소수성 표면의 영향[4]에 대한 연구는 선박 표면에 적용하여 연비 감소에 활용될 수 있으리라 생각되며, 이처럼 다양한 분야에서 소수성 표면의 활용에 대해 연구되고 있다.

이러한 초소수성과 같은 젖음성은 고체 표면에서 액체 방울, 즉 액적이 존재할 때, 액체-고체 경계면이 액체-기체 경계면과 만드는 각인 접촉각(Contact angle)으로 평가할 수 있으며[5], 접촉각이 낮을수록 동일 체적의 액체의 고체와의 접촉면적이 넓어진다. 이러한 접촉각을 기준으로 하여 표면에 떨어진 액적이 잘 섞여 스며드는 성질을 가지며 액적과 표면의 접촉각이 10° 이하일 경우 초친수성(Super hydrophilic), 90° 이하일 경우, 친수성(Hydrophilic), 이와 반대로 액적이 잘 섞이지 않는 성질을 가지며 90° 이상 150° 이하의 구간에서 소수성(Hydrophobic)이라고 하며, 그 중 접촉각이 150° 이상의 값을 가지는 표면 초소수성(Super hydrophobic) 표면이라고 한다[6]. Figure 1 은 액적의 접촉각에 따른 표면을 도시한 것이다.

이러한 접촉각은 T. Young 고체 표면 위에 액적이 존재할 때 기체로 둘러 쌓인 액적에 작용하는 힘을 분석함으로써 정의하였다. Figure 2 는 접촉각의

개략도와 그에 따른 젖음 모델을 보여준다. 그림에서 보이듯이, 액적이 떨어져 고체 표면과 접촉하게 되면 액적의 선단 부분에는 세 가지의 힘이 작용하게 되며, 그 관계는 식 (1)로 표현된다.

$$Y_{SG} = Y_{SL} + Y_{LG} \cos \theta_C \cdots \cdots \cdots (1)$$

여기에서 Y_{SG} 는 고체와 기체 간 계면의 표면장력, Y_{SL} 은 고체와 액체 간 계면의 표면장력, Y_{LG} 는 액체와 기체 간 계면의 표면장력, θ_C 는 접촉각을 의미한다. 이때 접촉각을 평가하기 위한 젖음 모델 중, Wenzel 의 모델[7]은 액적이 고체 표면의 미세 구조에 완전 접촉한다고 가정하였으며, 이와 같이 고체와 액적이 잘 접촉을 하는 경우 θ_C 는 θ_w 로 바뀌어 다음과 같은 관계인 식(2)으로서 표현된다.

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_C \cdots \cdots \cdots (2)$$

여기서 r 은 액적의 실면적에 대해 고체 표면에 투영시켰을 때의 면적의 비율이다. 또한 Wenzel's equation 에 따르면 고체 표면에 미세한 구조가 형성되면 소수성은 더 소수성이 되고 친수성은 더 친수성이 된다.

다음으로 Cassie-Baxter 의 모델[8]은 액적이 고체 표면의 미세 구조의 상단 부에 위치하는 것을 가정하였으며, 이때 θ_C 는 θ_{CB} 로 바뀌며 다음과 같은 관계인 식(3)으로서 표현된다.

$$\cos \theta_{CB} = \phi (\cos \theta_C + 1) - 1 \cdots \cdots \cdots (3)$$

여기서 ϕ 는 미세표면이 없을 때의 고체 표면과 액적 간의 접촉 면적 대비 미세 표면이 있을 때의 고체 표면과 액적 간의 접촉 면적의 비율을 의미하며 Cassie-Baxter 상태가 존재하기 위해서는 다음의 관계가 만족해야 한다.

$$\cos \theta_C < (\phi - 1)/(r - \phi) \cdots \cdots \cdots (4)$$

Cassie-Baxter 상태에서의 고체 표면 위의 액적은 Wenzel 상태의 액적보다 더 유동적이며 이러한 두 방정식을 이용하여 액적의 접촉각을 측정하게 되면 젖음 모델을 판별할 수 있다. 다만, 이렇게 측정된 접촉각은 항상 일정한 값을 가지지 않으며, 고체 표면 위에서 액적의 운동 상태에 따라 접촉각이 달라진다. 이때 액적이 고체 표면 위에 정지해 있을 때 측정한 접촉각을 정적 접촉각(Static contact angle)이라 하며, 고체 표면 위에서 운동 할 때 측정한 접촉각을 동적 접촉각(Dynamic contact angle)이라 한다. 이때 액적의 속도가 증가함에 따라 커지는 접촉각을 전진 접촉각(Advancing contact angle)이라 하며, 감소하는 접촉각을 후진 접촉각(Receding contact angle)이라고 한다. 이러한 전진 접촉각과 후진 접촉각의 차이를 접촉각 이력(Contact angle hysteresis)이라고 하며, 전진 접촉각은 액체와 고체의 응집력과 관계되며, 후진접촉각은 액체와 고체 사이의 부착 접착력과 관계된다[9].

이러한 접촉각의 측정 방법에는 액적의 운동 여부에 따라 다르며, 정적 접촉각 측정에는 일반적으로 고체 표면 위에서 정지한 액적의 사진을 촬영하여 접촉각을 측정하는 접촉각 측정기(Goniometer)를 이용한다. 이외에도 최근 방사광 X-선 영상법을 활용하여 마이크로/나노 구조 표면에서의 접촉각을 측정한 바도 있다[10]. 동적 접촉각 측정에는 일반적으로 액적의 운동을 위해 액적이 위치한 고체 표면을 지면과 평행한 상태에서 표면에 경사를 주어 액적이 중력에 따라 움직일 때에 경사각을 측정하는 방법(Tilting method)을 사용한다. 이때 발생하는 액적의 전진 접촉각과 후진 접촉각을 접촉각 측정기를 이용하여 측정한다. 이외에도 높은 온도와 압력에서의 표면 또는 계면의 표면장력 측정을 위한 Captive drop 방법[11], 동적 접촉각 측정에 대한 점성력의 영향을 보기 위해 사용한 Wilhelmy plate 방법[12]을 사용하여 동적 접촉각을 측정한 바가 있다.

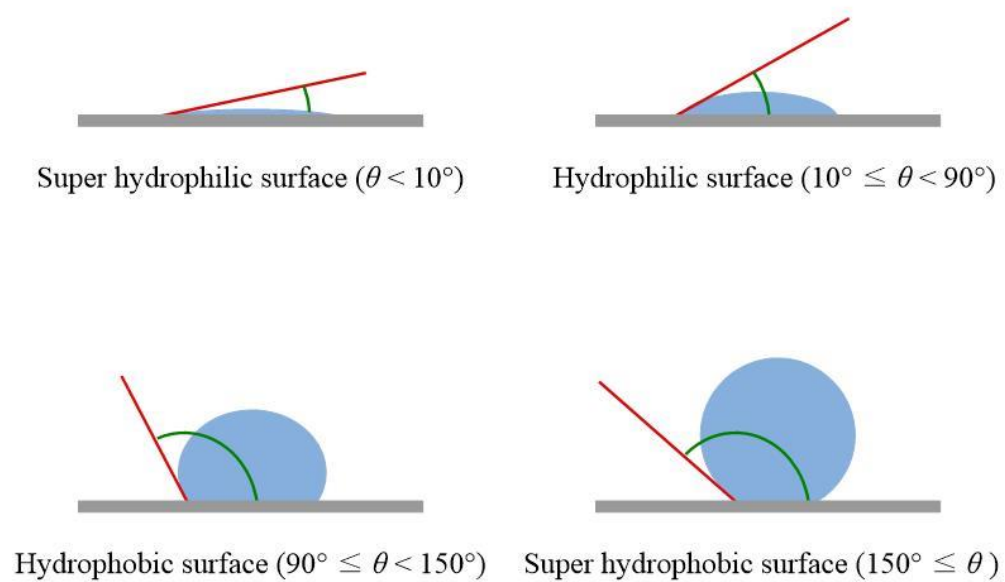


Fig. 1 Surface description according to the contact angle

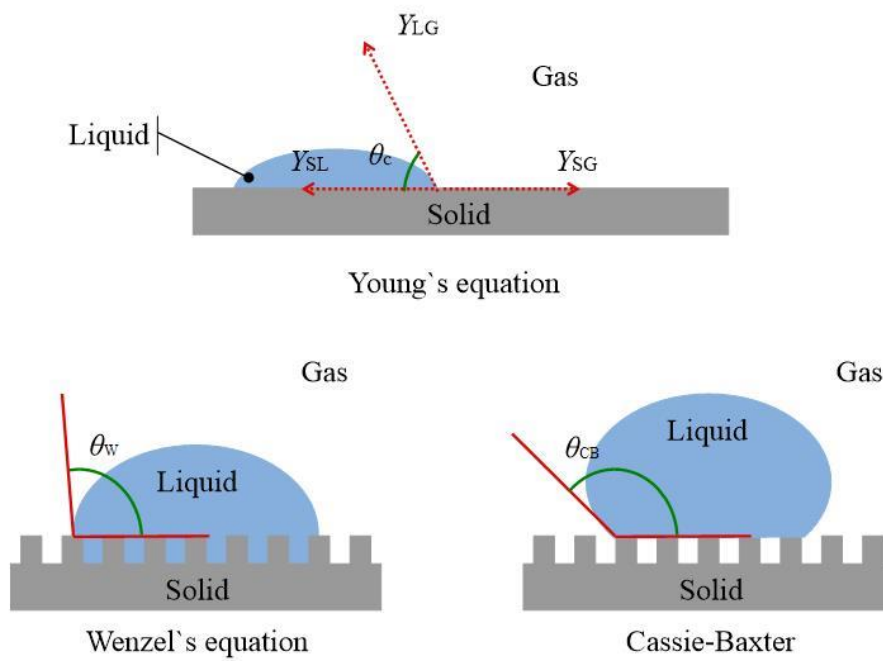


Fig. 2 Definition of the contact angle and various wetting models

1.2. 연구 동향

1.2.1. 초소수성 표면 제작

이러한 초소수성 표면 제작과 관련된 연구로는 전해질 속에서 전극에 의한 이온의 이동을 통하여 구조를 만들어 내는 electrochemical deposition 을 이용한 방식[13, 14], wet chemical reaction 을 이용해 식각하는 방법[15], 원자 또는 분자 집단이 자발적으로 일정한 패턴으로 배열되는 특성을 활용한 self-assembly 기법[16], 반응성 이온 또는 기체상의 화학 용매를 플라즈마의 중성 라디칼 확산을 이용하여 시료와 반응시킴으로써 이루어지는 plasma treatment 기법[17], 기체상의 반응물을 재료 표면에 퇴적시킴으로서 구조를 형성하는 chemical vapor deposition 기법[18], 광경화성 수지를 적층 하여 구조물을 만드는 stereolithography 기법[19] 등 다양한 방법 등을 통해 초소수성 표면을 제작하려는 연구들이 있었다.

이러한 초소수성 표면 제작에 관한 대표적인 연구들로는 G. He 등[20]은 electrochemical deposition 을 이용하여 시간과 온도를 조절하여 ZnO 재료의 종횡비가 다른 수직 성장형 나노 막대가 있는 표면을 구현하였으며, 이때의 접촉각은 약 167° 로 측정되었다. Z. Guo 등[21]은 wet chemical reaction 을 이용하여 연마된 구리에 초소수성 표면을 구현하였으며, 이때의 접촉각은 약 154° 로 측정되었다. T. Hu 등[22]은 self-assembly 기법을 이용하여 아미노산인 Cbz-Phe(4F) 분자를 물 상태에서 β -turn 구조를 가진 마이크로 섬유로 자가 조립하여 접촉각 150° 이상의 기판을 만들었습니다. A. Oberlntner 등[23]은 plasma treatment 기법을 이용하여 친수성인 셀룰로오스 섬유를 표면 처리하여 약 136° 의 접촉각을 가진 소수성 표면을 구현했다. Y. Ye 등[24]은 chemical vapor deposition 기법을 이용하여 구리 기판에 마이크로 구조를 가진 표면을 만들었으며, 이때의 접촉각은 약

158°으로 측정되었다. Hong, S. H.[19]은 stereolithography 기법을 이용하여 단순모형인 삼각형과 사각형 그리고 상이가래의 끝단 형상을 모사한 다양한 마이크로 패턴을 제작하였고, 이러한 패턴에 의해 110°에서 130°사이의 접촉각이 측정되었다. 다만, 이와 같은 기존의 초소수성 표면을 구현하려는 연구들은 매우 성공적이나 제조공정이 복잡하거나 복잡한 형태를 가진 부품 적용의 한계가 있다.

또한 기존의 초소수성 표면에 관한 연구는 액적의 흐름 방향과는 관계없는 등방성 균일 표면(isotropic homogeneous surface)에 대한 연구가 대부분이었다. 다만, 최근 액적의 유동 제어의 한 방법으로 이방성 흐름(anisotropic flow) 특성을 갖는 초소수성 표면에 대한 연구가 이루어진 바 있으나, 단순히 grooving 을 통한 표면 패턴 제작에 관한 연구들이 주를 이루고 있어, 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

1.2.2. 자연 모사

이러한 초소수성 표면을 구현함에 있어서, 일반적인 마이크로/나노 구조를 가지는 고체 표면을 제작하는 경우가 일반적이다. 특히, 해당 마이크로/나노 구조에 대한 형상을 최적화함에 있어서, 소수성 표면을 가진 자연물의 표면 특성을 연구하여 이를 구현 및 적용하는 자연 모사 기반 구조 최적화 방법이 널리 사용되고 있다.

이러한 자연모사를 활용한 대표적인 연구들로는, Pengyun Xu [25]등의 연꽃 잎(lotus leaf)의 표면 구조를 모방한 초소수성 세라믹 코팅을 구현하였으며, Changmin Shao[26] 등의 나비 날개(butterfly wings) 표면구조를 활용하여 형광 검출 방법에 응용하였으며, 이외에도 Genzer[27]등은 상어 비늘 구조를 활용하여 각진 돌기가 나 있는 선박용 코팅제 개발하여 선체에 달라붙는 해조류를 약 15% 감소시켰다. Sirovich[28]등은 상어 피부 돌기 형상과 유사한 리블렛을 제작하여 평판에 비해 최대 8%의 마찰저항을 감소시켰다. Kim[29, 30]등은 상어 표피 형상을 마이크로 몰딩 공정을 통해 리블렛 표면을 제작하여 젖음성을 평가하였다. 그 중 벼 잎의 형상을 모사하여 표면의 소수성을 구현하려고 하는 연구가 진행된 바 있다. T. Kim 등[31]은 이러한 벼 잎의 형상을 모사하여 고체 표면의 소수성을 구현하였으며, 이때의 접촉각은 약 164° 으로 측정되었다. 이러한 벼 잎을 활용한 연구는 다른 식물의 잎을 모사하였을 때와 유사하게 표면이 소수성을 띄지만, 등방성(isotropic)으로 분포된 연꽃 잎과는 달리 벼 잎 표면의 돌기들은 마이크로 그루브 형상을 따라 한 방향으로 배열되어 있어서 액적이 한방향으로만 흐르는 이방성 흐름 특성을 보인다.

기존 연구들을 종합해본 결과, 소수성 표면의 제작 방식에 있어 제조과정의 복잡성과 형상이 복잡한 부품에 대한 적용의 한계를 확인하였으며, 등방성

젖음 표면에 대한 연구들이 주를 이루었다. 이러한 이방성 젖음 표면에 대한 연구들 중, 벼 잎의 구조를 모사한 돌기 구조 적용 초소수성 표면 구현에 대한 연구가 진행된 바 있으나, 해당 마이크로 돌기 구조에 대한 형상 최적화 및 그 적용에 대한 연구가 부족한 실정이다.



1.3. 연구 목표

본 연구에서는 벼 구조의 돌기 형상을 응용한 초소수성 표면을 구현하고자 하였으며, 특히 다만 이러한 초소수성 표면 제작에 있어서 그 과정이 복잡하고, 복잡한 형상의 부품에 대한 초소수성 표면 적용에 있어서 한계를 가지기에 형상 제작에 용이한 몰딩을 활용한 비대칭 마이크로 돌기 구조를 갖는 표면을 제작하고 이에 대한 젖음 특성 평가를 하고자 하였다.

레이저 가공을 통한 몰드를 이용하여 경사진 마이크로 돌기구조를 제작하여 액적의 동적 거동을 평가하고자 하였다. 레이저를 활용하여 경사홀을 갖는 몰드를 제작하였고 마이크로 몰딩(micro molding) 기법을 적용하여 다양한 영향 인자(돌기 간격, 돌기 경사각) 변화에 따른 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 대해 액적의 접촉각 및 roll off angle 을 측정하여 경사돌기의 이방성 흐름에 대한 영향을 분석하였다. 이를 기반으로 마이크로 돌기 형상을 도출하여 그루브 형상을 지닌 표면에 적용한 그루브 및 마이크로 돌기구조를 가진 시편을 제작하고, 이에 대한 젖음성을 평가하고자 하였다. 또한 곡선 그루브와 마이크로 돌기 구조를 가진 시편을 제작하여 젖음성 평가를 통해 액적의 흐름 컨트롤이 가능한지를 평가하고자 하였다.

2. 비대칭 마이크로 돌기 구조의 몰드 제작을 위한 레이저 홀 가공

2.1. 고출력 다이오드 레이저 이용 홀 가공

본 연구에서는 레이저를 이용한 몰드의 경사 홀 가공 유효성 확인을 위해, 저비용 레이저를 이용한 비대칭마이크로 돌기 구조의 몰드를 제작하고자 하였다. 이를 위한 레이저 스캐너의 각도 조절 및 몰드가 고정된 지그(Jig)의 각도 조절이 가능한 레이저 홀 가공 실험장치를 구축하였으며, 해당 실험 장치 환경은 Figure 3 과 같다. 본 연구에서 사용된 저비용 레이저는 2 kW 의 고출력 다이오드 레이저(High Power Diode Laser)이며, 스캐너 각도 조절을 위해 대면적용 F-theta lens 를 사용하였으며, 150 개의 홀들로 이루어진 하나의 line 을 가공 후 홀 간격(hole pitch) 만큼 스테이지를 이동시키면서 가공하였다. 레이저 스캐너의 가공영역은 30 mm × 30 mm(가로 × 세로)로서, 홀 간격(hole pitch)을 200 μ m 으로 하여 22,500 개의 홀을 가공하고자 하였다. 이때의 홀 경사각(hole angle)의 경우, 본 연구에서 사용한 레이저 스캐너의 각도 한계로 인해, 최대 경사각인 약 16°를 홀 경사각으로 선정하였다. Table 1 은 본 연구에서 사용한 레이저 및 스캐너의 조건을 정리해 놓은 표이다.

본 연구에서는 일정 깊이 이상의 경사 홀 가공을 위해 동일 홀에서 레이저 가공을 반복 진행하였다. 경사 홀 가공에 앞서 레이저 반복 가공에 따른 홀 가공 상태 확인을 위해, 0°의 경사각에서 가공 횟수를 달리하여 홀을 가공하였다. Figure 4 는 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)으로 레이저 가공 횟수에 따른 홀 가공 상태를 확인한 사진을 보여준다. 그림에서 보이듯이, 5 회 가공 시 약 100 μ m, 10 회 가공 시 약 250 μ m 정도의 홀 깊이

(hole depth)로 가공되었다. 다만, 10 회 이상의 가공 시 깊이방향으로 가공이 더 이상 일어나지 않고 홀의 직경(hole diameter)이 커지는 것을 확인하였다. 해당 결과를 바탕으로 약 16° 의 경사각에서 가공 횟수를 달리하여 홀을 가공하였다. Figure 5 (a) 및 (b)는 각각 5 회 및 10 회 가공한 약 16° 의 경사각을 가진 홀의 가공 상태를 촬영한 SEM 사진에 해당한다. Figure 5 (a)에서 보이듯이, 가공 횟수를 5 회로 하여 깊이 약 $100\ \mu\text{m}$, 표면 직경 약 $50\ \mu\text{m}$ 의 홀이 가공됨을 확인하였다. 또한 Figure 5 (b)에서 보이듯이, 10 회 가공 시 깊이 약 $250\ \mu\text{m}$, 표면 직경 약 $84\ \mu\text{m}$ 의 홀이 가공됨을 확인하였다. 이를 통해 레이저 스캐너를 이용해 일정 경사를 가지는 홀 가공이 가능함을 확인하였으나, 앞서 언급한 바와 같이 저비용 레이저의 한계 경사각에 의한 구현 가능한 홀 경사각의 한계를 확인하였다.

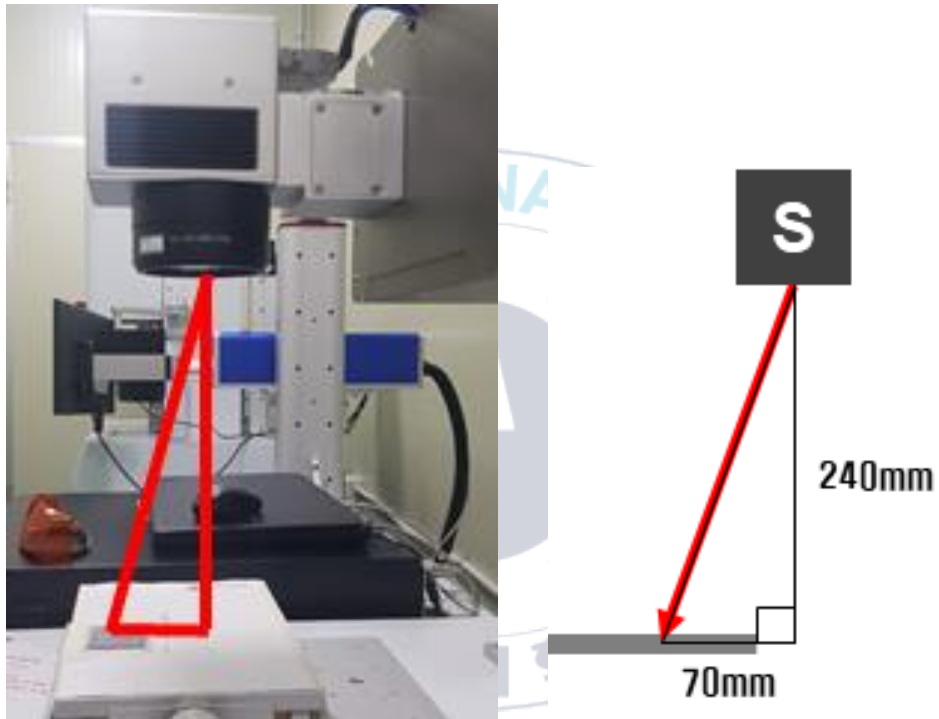


Fig. 3 Inclined hole machining using scanner angle

Table. 1 Laser and Scanner condition

Laser		Scanner	
Wave length	355 nm	Beam size	70 μm
Repetition rate	30 kHz	Speed	1 mm/s
Pulse width	16 ns	f-theta lens	f 165
Power	1 W (Max. 3 W)		
Machining number	5 times		

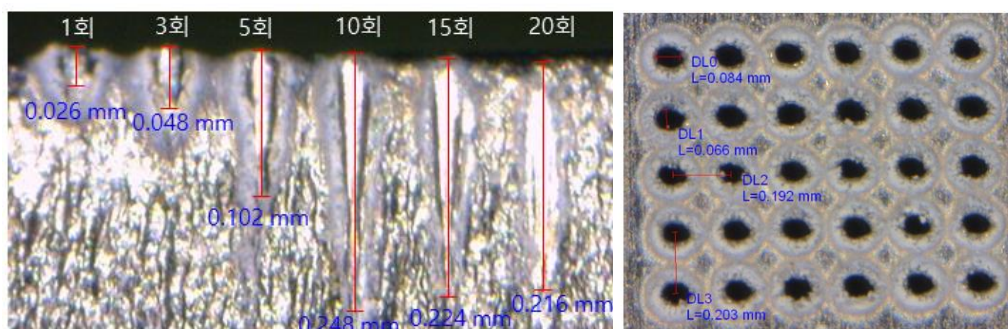
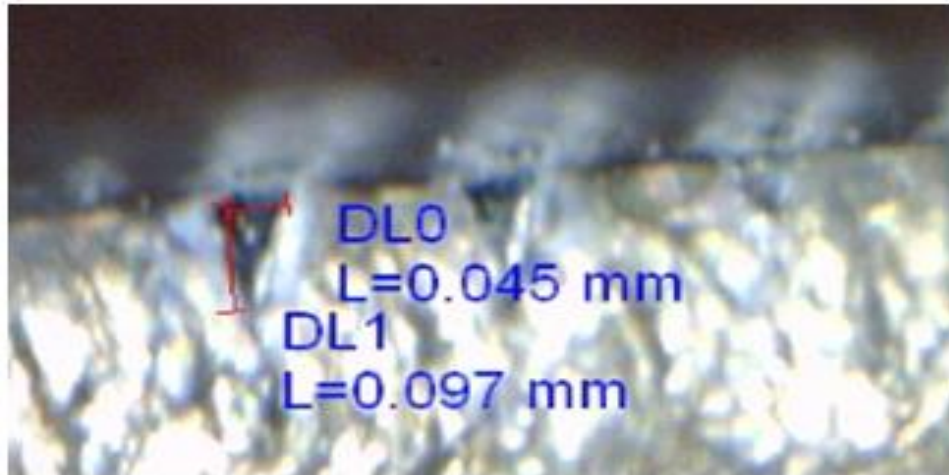
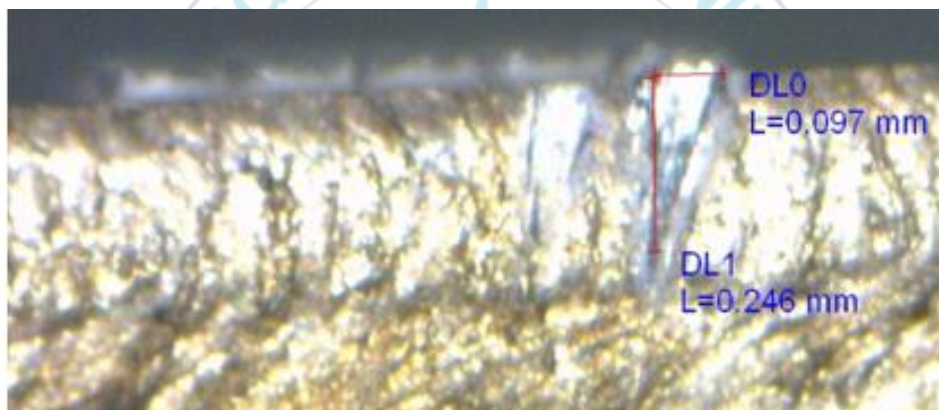


Fig. 4 Image of 0° hole machining according to numbers of machining



(a) 5 times of machining



(b) 10 times of machining

Fig. 5 Image of inclined hole with 16° machining according to numbers of machining

2.2. 초단펄스 다파장 레이저 이용 홀 가공 몰드 및 시편 제작

본 연구에서는 앞선 몰드 제작에서의 홀 경사 한계를 극복하기 위해, 초단펄스 다파장 레이저(Ultrashort Pulsed multi-wavelength Laser)를 이용하고 지그의 각도를 조절하여 경사 홀을 갖는 몰드 12 종과 그루브와 경사 홀을 갖는 몰드 3 종, 곡선 그루브와 경사홀을 갖는 몰드 2 종을 제작하고자 하였다. Figure 6 은 그루브 폭(Groove space), 그루브 간격(Groove width), 그루브 높이(Groove height), 및 그루브에 대한 수직(perpendicular)방향과 평행(parallel)방향에 대한 정의를 도시한 것이다. Figure 7 은 초단펄스 다파장 레이저의 이미지와 레이저를 이용한 몰드 제작부터 몰딩을 떼서 시편을 제작하는 과정을 도시한 것이다. Figure 8 은 초단펄스 다파장 레이저를 사용한 실험장치 사진을 보여준다.

본 연구에서는 돌기 간격(pitch of asperity) 및 돌기 경사각(angle of asperity)에 따른 영향을 평가하기 위해, 홀 직경 $50\mu\text{m}$, 홀 깊이 $100\mu\text{m}$ 로 고정하고 $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$ 의 홀 간격과 0° , 15° , 30° , 45° 의 홀 경사각을 갖도록 몰드를 제작하였다. 이를 바탕으로 돌기의 간격 $200\mu\text{m}$, 돌기의 각도 30° 를 기반으로 하여, $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ ($a \times b \times h$)의 그루브를 제작하고 홀 라인 간 간격을 $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$ 로 변화하여 몰드를 제작하였다. 또한 액적의 흐름 제어 여부를 보기 위하여 그루브에 그루브 반경 15mm 를 주어 곡선 그루브와 홀 간격 $200\mu\text{m}$, 홀 각도 0° 를 가진 몰드를 제작하였다. 단계별 그루브 및 홀 복합 몰드 제작 과정으로는 Laser Grooving 가공을 통해 Micro wave structure 을 형성하고 Laser drilling 가공을 통해 Oblique micro hole 을 형성하였다.

본 연구에서는 제작한 몰드를 이용하여 경사 홀 간격 및 경사각에 따른 젖음성을 평가할 시편을 제작하였다. 시편 재료로는 PDMS(Sylgard 184)을 사용하였으며, 제작에 앞서 PDMS와 경화제를 10:1의 비율로 섞어 주었다. 이후 PDMS 혼합물에 생성된 기포 제거를 위해 진공 환경에서 약 10 분간 노출시켜 기포를 제거한 후 PDMS 혼합물을 제작한 몰드에 부은 뒤, 잔여 기포를 제거하기 위해 앞선 방법을 반복하였다. 이후 몰드를 핫 플레이트(Hot plate) 위에 올린 채 약 100 °C로 가열하여 약 1 시간의 응고 과정을 거친 뒤, 상온에서 24 시간 동안 건조하였다. 이후 이와 같이 제작된 시편들에 대한 젖음성을 평가하고자 하였다. 젖음성 평가에는 시린지 펌프(syringe pump)가 장착된 접촉각 측정기를 이용하여 약 10 μ l의 증류수를 시편의 표면에 떨어트렸을 때 발생한 정지상태의 접촉각(static contact angle)과 기울여진 시편에서의 접촉각 이력(Contact angle hysteresis)을 측정하여 경사돌기의 이방성 흐름에 대한 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 홀 간격과 홀 경사각을 달리하여 제작된 12종의 시편에 대해 주사전자 현미경을 이용하여 표면 형상을 관찰하였으며, Figure 9는 각 시편들의 표면 형상을 촬영한 SEM 사진을 보여준다. 그림에서 보이듯이, 앞선 저비용의 고출력 다이오드 레이저의 한계로 제작에 어려움을 겪었던 경사진 돌기들이 잘 형성되었음을 확인할 수 있다.

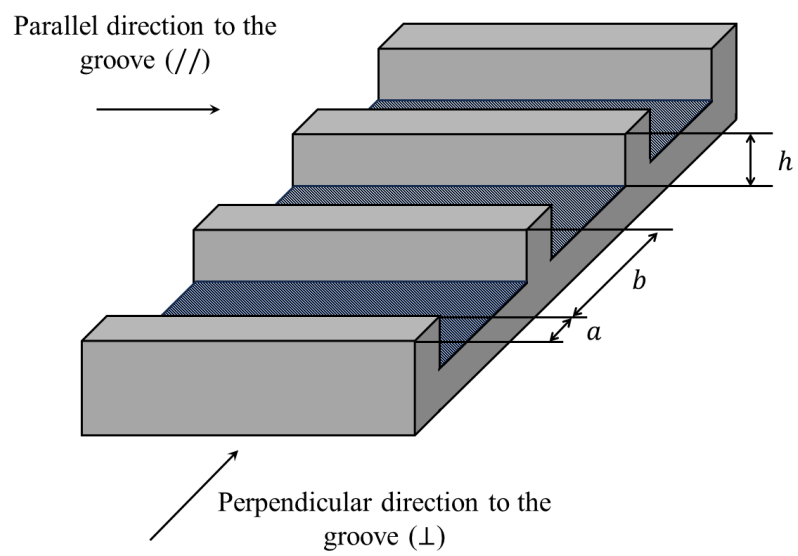


Fig. 6 Schematic of the laser grooved surface

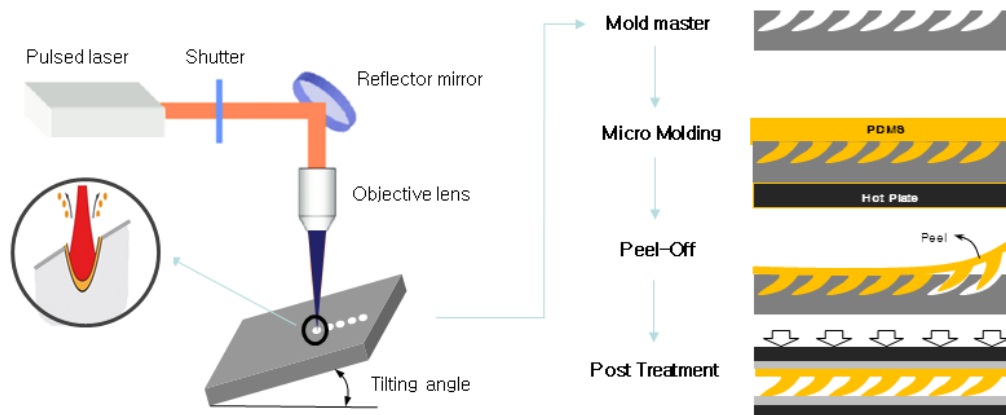


Fig. 7 Schematic of the laser micro-texturing with oblique hole and superhydrophobic sheet by micro molding

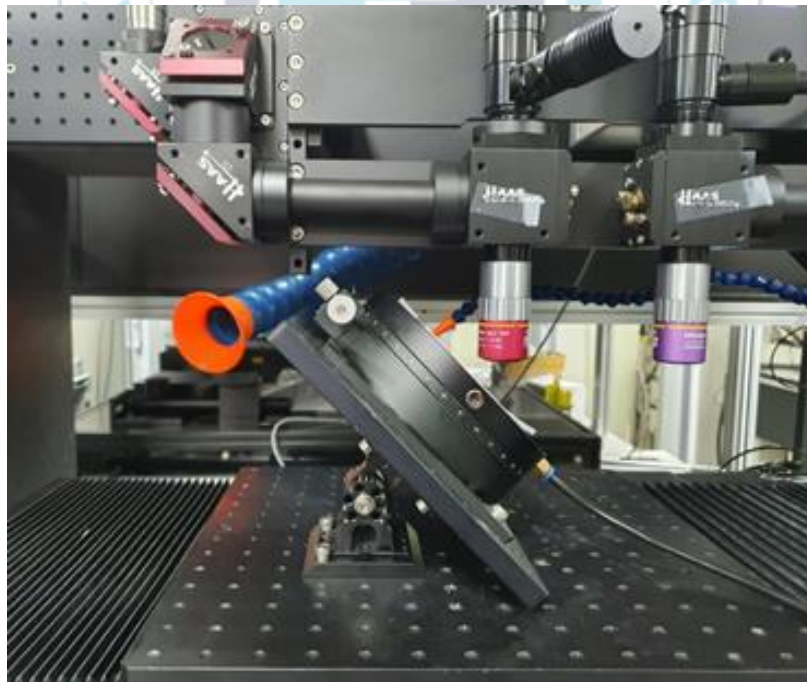


Fig. 8 Photographs of the test set-up

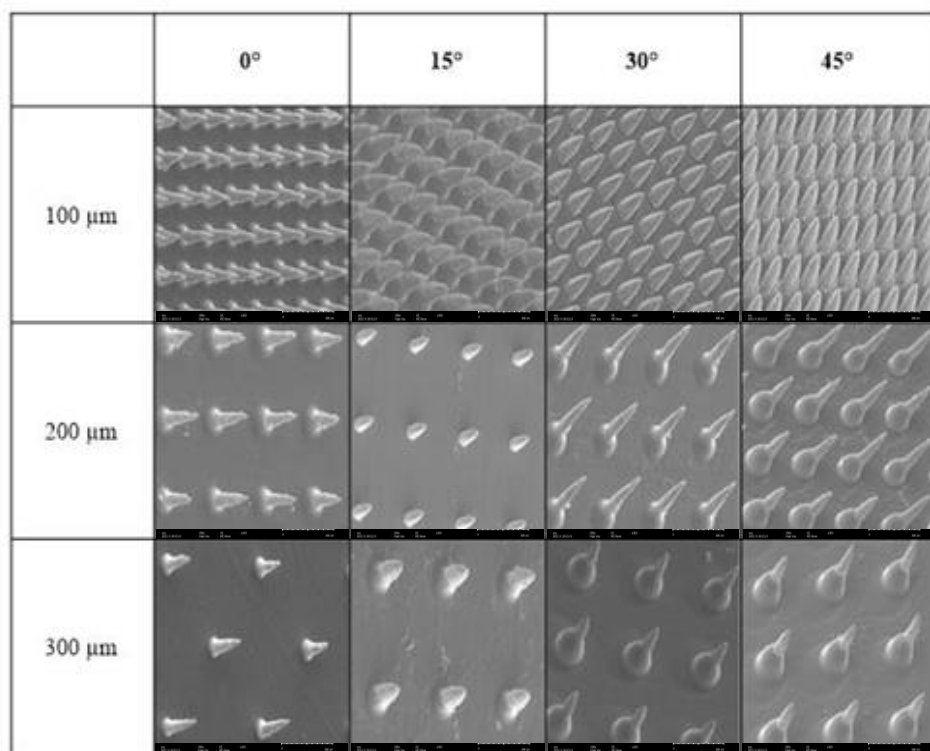


Fig. 9 SEM image of molded surfaces with oblique asperities

3. 마이크로 돌기 구조 표면의 이방성 흐름 특성 평가

3.1. 정적상태에서의 젖음성 평가

초단펄스 다파장 레이저를 이용하여 제작한 몰드 중 12 종의 경사진 마이크로 돌기 구조를 갖는 형상의 PDMS 시편들을 정적상태에서 접촉각을 측정하였다. Figure 10 은 시편의 돌기의 방향에 따른 액적을 도시한 것이며, 그림과 같이 돌기의 방향대로 시편을 배치하였다. Figure 11 은 접촉각을 측정하기 위해 사용한 장비이다. Figure 12 및 13 은 시편의 돌기 간격과 돌기 각도에 따른 액적의 이미지와 해당 이미지를 바탕으로 하여 측정한 Right angle 과 Left angle 의 접촉각을 통해 얻은 평균 접촉각을 비교한 결과를 나타낸다. Figure 13 에서 보이듯이, 돌기 각도 대비 돌기 간격에 따른 접촉각의 큰 차이를 확인할 수 있었다. 돌기 간격 100 μm 와 200 μm 에 해당하는 시편에서는 액적의 접촉각이 약 160° 정도로 측정되어 높은 소수성을 보인다. 이는 상대적으로 좁은 돌기 간격에 따른 Cassie-Baxter 상태가 유지되었음으로 판단된다. 그에 비해 돌기 간격 300 μm 에 해당하는 시편에서는 접촉각이 약 110° 정도로 측정되었으며, 이는 돌기 간격 증가에 따라 Wenzel 상태가 유지되어 소수성 효과가 급격히 줄어들었음으로 판단된다. Figure 14 (a) 및 (b)는 각각 돌기 간격 100 μm 와 200 μm 의 좌우 접촉각을 나타낸 그래프이며, 이를 기반으로 하여 돌기 경사각에 따른 좌우 접촉각의 차이는 Figure 15 (a) 및 (b)에 도시되어 있다. Figure 15 (a)에서 보이듯이, 돌기 간격 100 μm 에서는 좌우 접촉각의 차이가 1° 미만으로 큰 차이가 없었다. 그에 비해 Figure 15 (b)에 해당하는 돌기 간격 200 μm 의 결과에서는 좌우의 접촉각이 비교적 큰 차이를 보였다. 이를 통해 돌기 간격 200 μm 에서 30°의 돌기 경사각을 갖는 시편이 좌우 접촉각의 편차가 가장 적음을 확인할 수 있다.

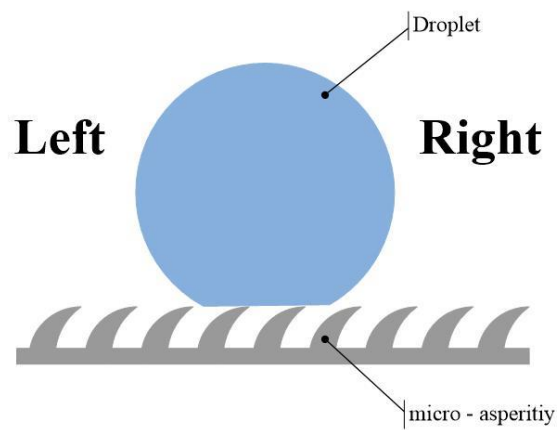


Fig. 10 Schematic of the droplet on the micro - asperity surface

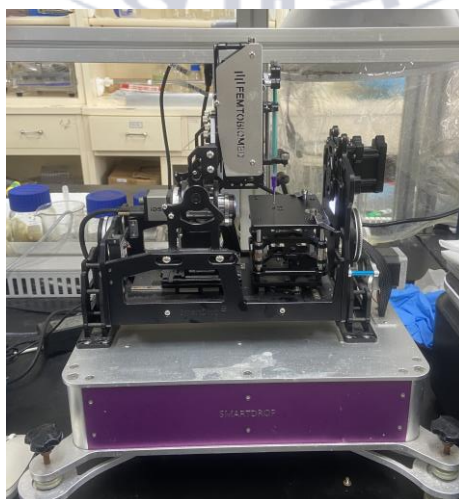


Fig. 11 Photographs of the goniometer

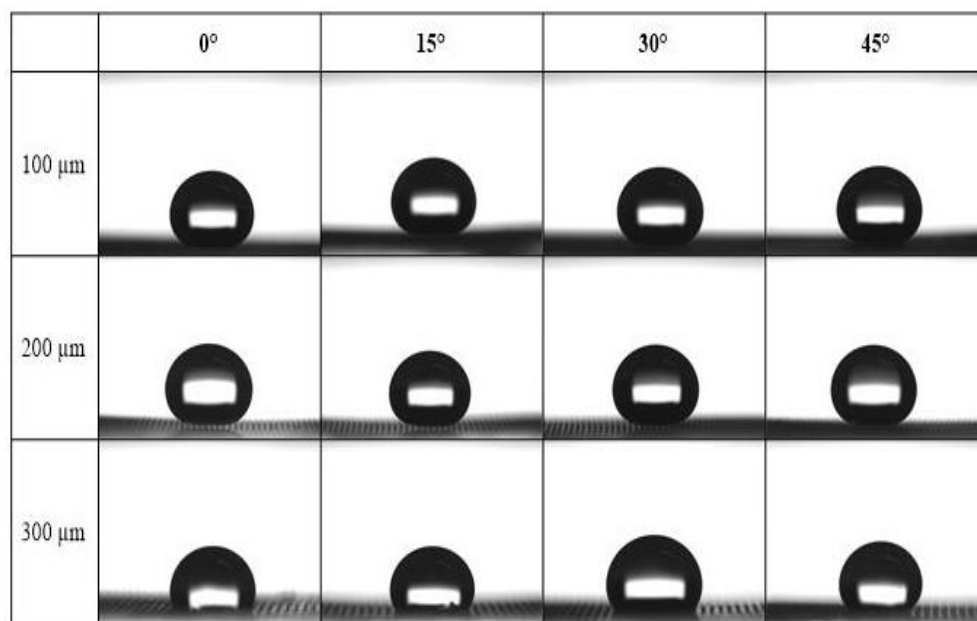


Fig. 12 Images of the droplet at different micro - asperity surfaces

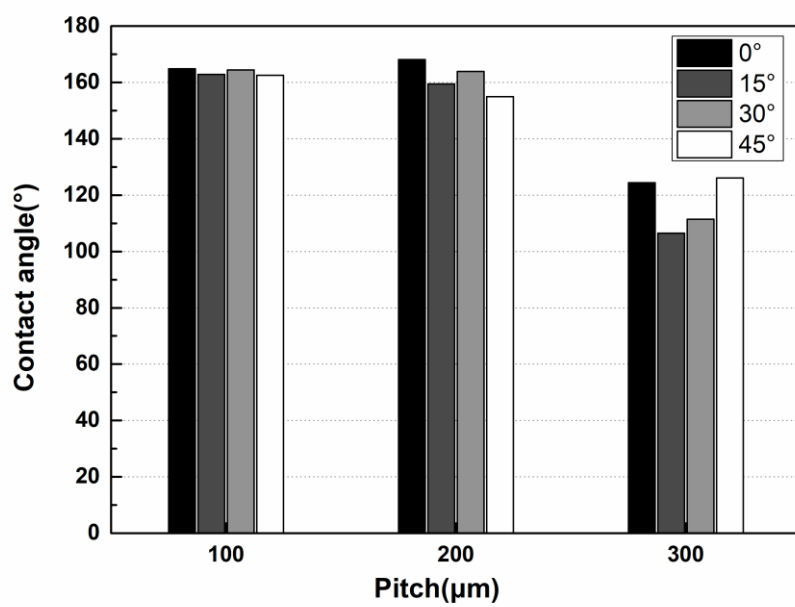
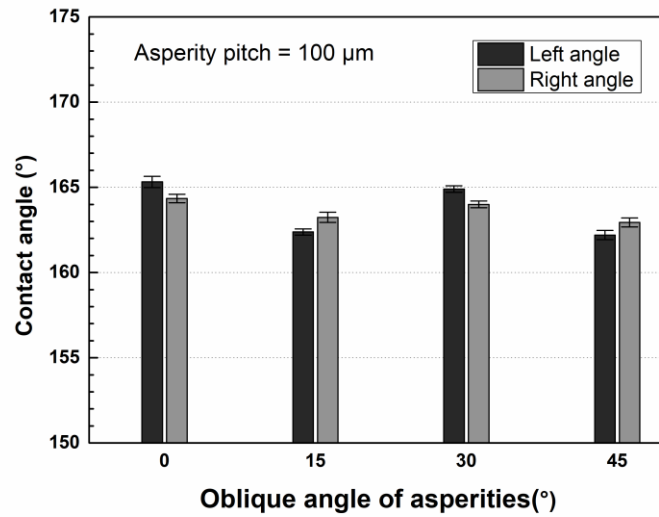
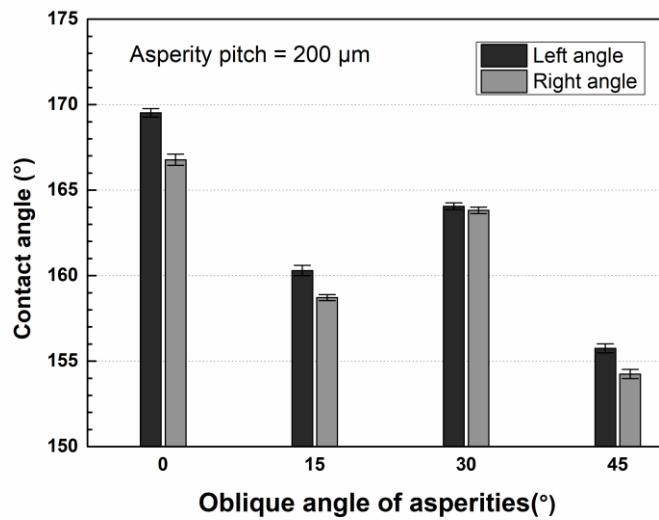


Fig. 13 Comparison of the static contact angle on 12 kinds of surfaces

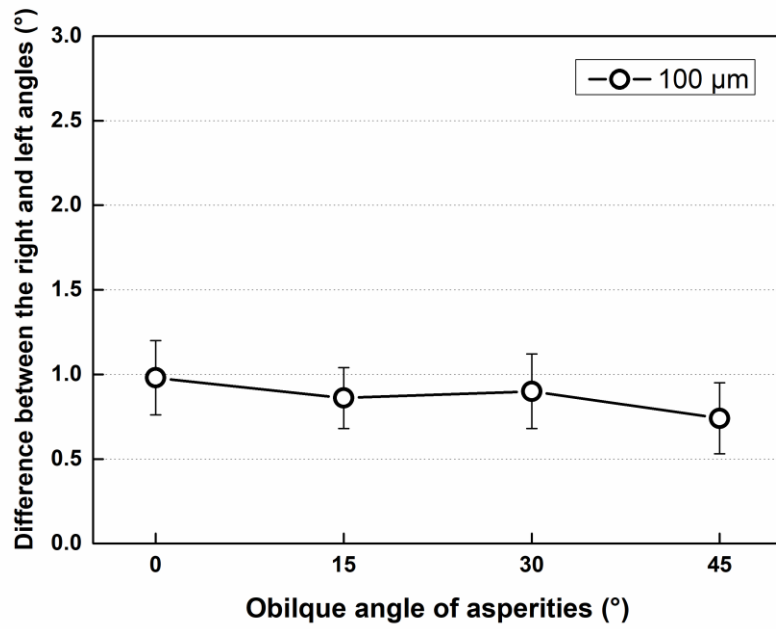


(a) Asperity pitch 100 μm

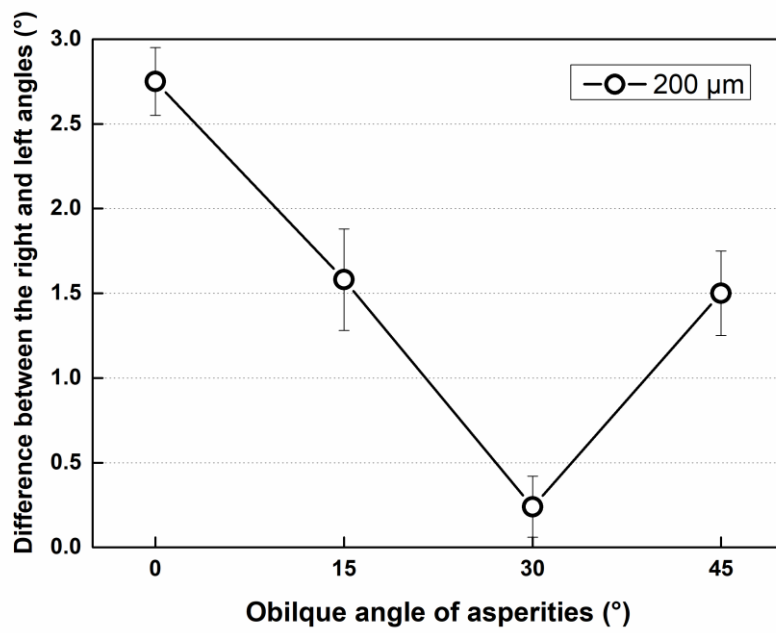


(b) Asperity pitch 200 μm

Fig. 14 Comparison of the left and right contact angles for surfaces with different oblique angles at specific pitch



(a) Asperity pitch 100 μm

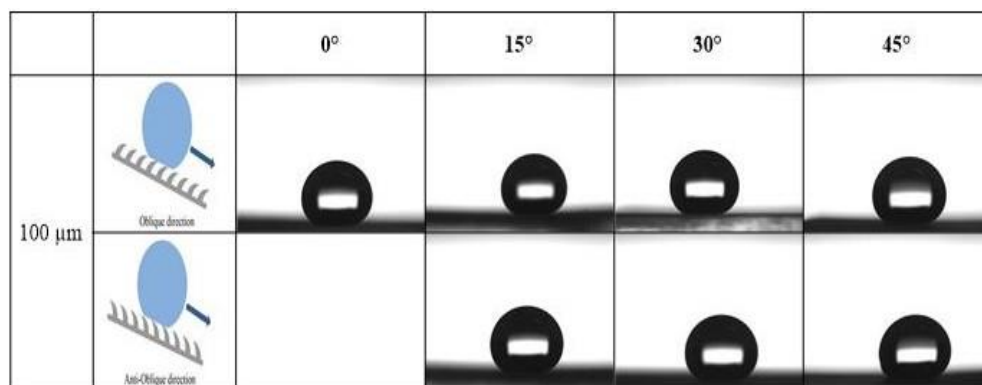


(b) Asperity pitch 200 μm

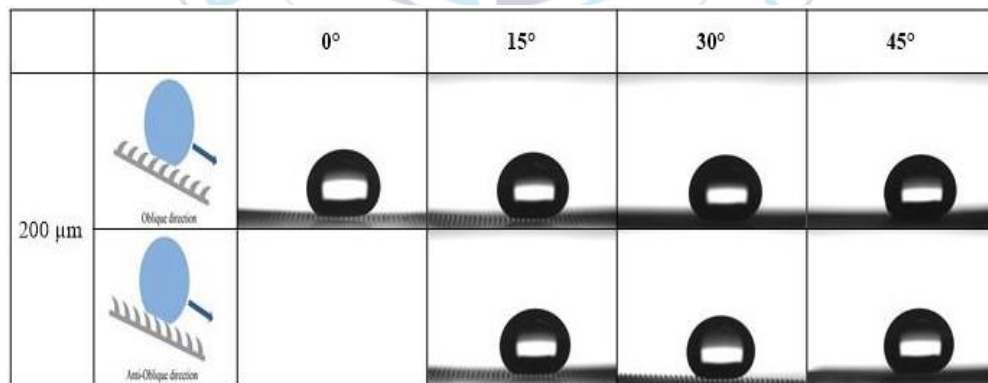
Fig. 15 Variations of the difference between the right and left contact angles with different oblique angles at specific pitch

3.2. 동적상태에서의 젖음성 평가

본 연구에서는 정적상태에서의 경사진 마이크로 돌기 구조 표면의 젖음성 평가를 통해, 경사진 마이크로 돌기 구조를 가진 12 종 시편 중 높은 소수성을 띄는 Cassie-Baxter 상태를 유지하지 못했던 돌기 간격 300 μm 를 제외한 100 μm , 및 200 μm 에 대해 접촉각 이력(Contact angle hysteresis)을 측정하고자 하였다. 이를 위해 시편을 1 초당 0.5°씩 기울여가며 돌기의 경사방향(Oblique direction)과 역경사방향(Anti-oblique direction)에 대한 roll off angle 을 측정하였다. Figure 16 (a) 및 (b)는 각각 돌기 간격 100 μm 와 200 μm 에서 돌기방향에 대한 액적의 흐름방향과 이에 해당하는 액적의 이미지를 나타낸 것이다. 이를 바탕으로 또한 100 μm 와 200 μm 에 대한 roll off angle 의 값을 도식한 것이 Figure 17 (a) 및 (b)이다. Figure 17 (a)에서 볼 수 있듯이, 100 μm 의 시편에서는 액적이 돌기의 경사방향과 역경사방향으로 흐를 때 Roll off angle 의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 100 μm 의 돌기 간격에서는 액적과 표면의 접촉면적 대비 액적에 접촉하는 돌기가 많아서 돌기의 방향에 따른 액적의 흐름 영향이 미비하였기 때문이다. 그에 비해 Figure 17 (b)에서 볼 수 있듯이, 200 μm 의 시편에서는 돌기의 역경사방향 대비 경사방향으로 흐를 때에 roll off angle 이 더 작음을 확인하였다. 이는 돌기 팁 방향과 일치하는 경사방향으로 인해 액적의 유동저항이 작게 발생하였기 때문이며, 100 μm 에 비해 액적이 돌기들 사이로 스며들어 roll off angle 이 증가함을 알 수 있었다. 다만 30°의 돌기 경사각을 갖는 시편에서 가장 작은 roll off angle 을 측정하였다. 이를 통해 돌기의 방향에 따른 액적의 흐름 특성이 달라짐을 확인할 수 있었고 돌기 간격 200 μm , 돌기 경사각 30°의 시편에서 액적의 구름성이 가장 높음을 알 수 있었다.

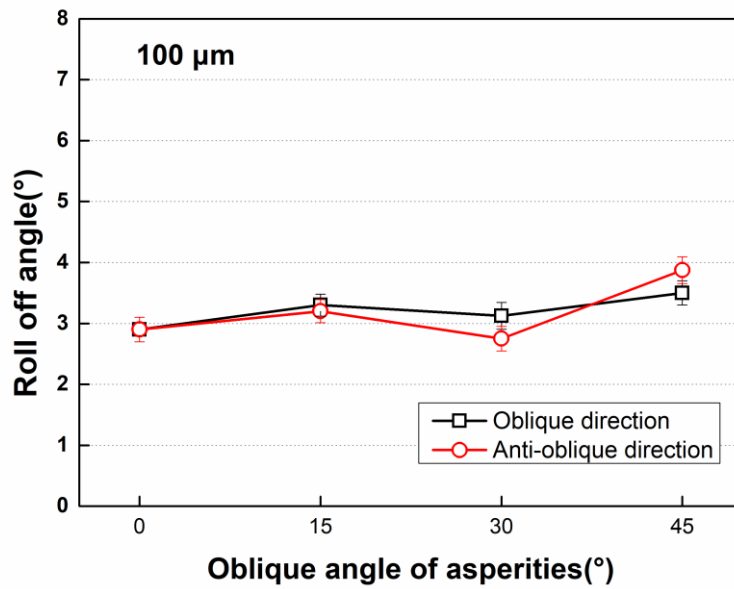


(a) Asperity pitch 100 μm

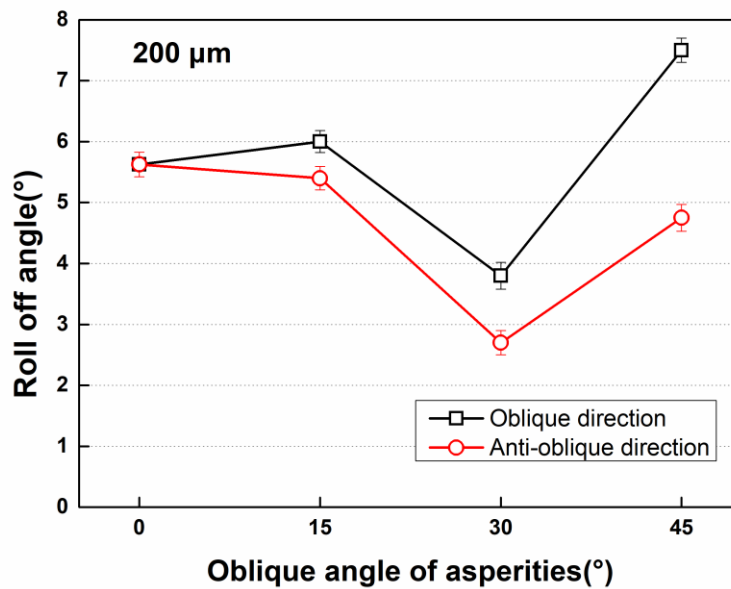


(b) Asperity pitch 200 μm

Fig. 16 Images of the droplet on micro - asperity surfaces at different oblique direction



(a) Asperity pitch 100 μm



(b) Asperity pitch 200 μm

Fig. 17 Variations of the roll off angle with different oblique angles at specific pitch

4. 그루브와 경사 마이크로 돌기 구조 표면의 이방성 흐름 평가

4.1. 정적상태에서의 젖음성 평가

앞선 마이크로 돌기 구조 표면의 이방성 흐름 특성 평가를 통해 최적 돌기 간격과 돌기 경사각을 도출하였다. 이를 기반으로 하여 그루브 및 경사진 마이크로 돌기 구조를 갖는 PDMS 시편을 제작하였으며, 해당 표면의 정적상태에서의 젖음성을 평가하고자 하였다. Figure 18 은 그루브 표면에 마이크로 돌기 구조를 적용하여 제작된 시편에 대한 개략도와 SEM 사진을 보여준다.

본 연구에서는 그루브 폭, 간격 및 돌기의 경사 방향에 따른 영향을 평가하기 위해 정적상태에서 접촉각을 측정하고자 하였다. Figure 19 및 20 은 각각 그루브 폭에 따른 액적의 이미지와 해당 이미지를 바탕으로 하여 측정한 그루브와 평행한 방향(parallel direction)과 그루브와 수직한 방향(perpendicular direction)의 접촉각을 비교한 결과를 나타낸다. Figure 20 에서 볼 수 있듯이, 돌기 간격 200 μm 및 300 μm 인 표면에서는 155°에서 165° 사이의 높은 접촉각이 측정되었다. 그에 비해 돌기 간격이 400 μm 인 표면에서는 140°에서 150° 사이의 접촉각이 측정되었으며, 앞선 돌기 간격 200 μm 및 300 μm 결과 대비 다소 낮아진 접촉각을 확인할 수 있었다. 이는 돌기 간격 400 μm 에서는 접촉각이 감소함에 따라 액적과 표면의 접촉면에서 돌기의 접촉면적 비율이 감소한 영향으로 판단된다.

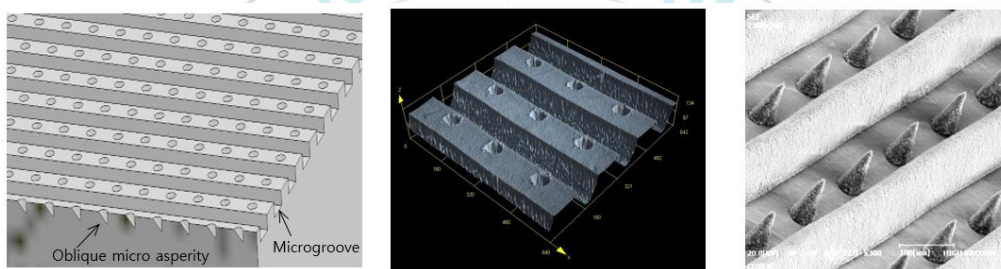


Fig. 18 Schematic and SEM image of the groove surface with micro-asperities

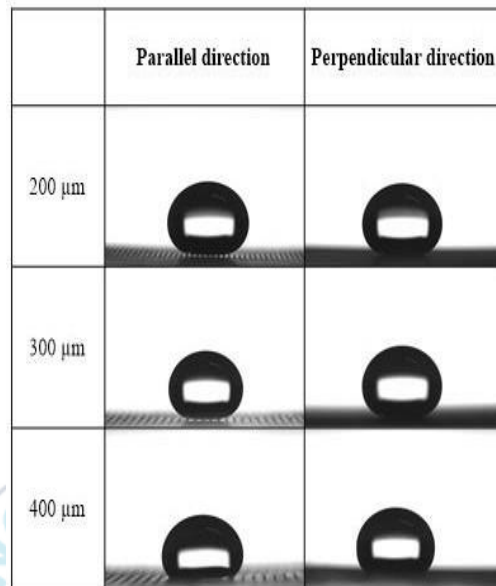


Fig. 19 Images of the droplet on micro - asperity surfaces at parallel and perpendicular directions

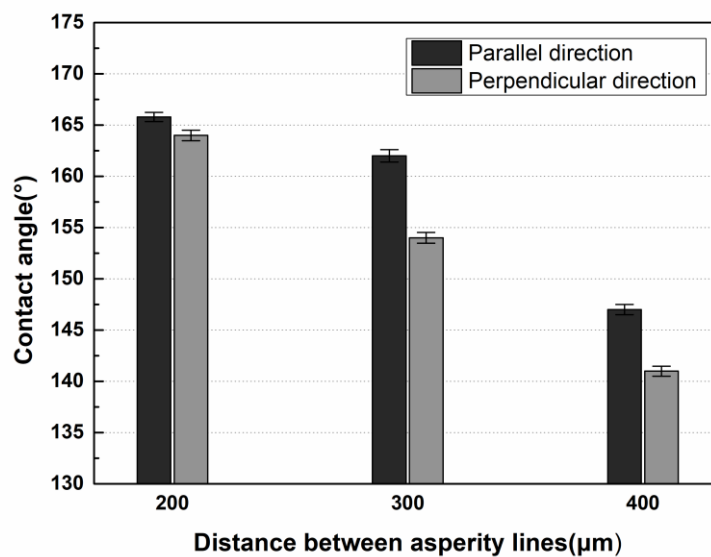


Fig. 20 Comparison of the contact angle with different distance between asperities line at parallel and perpendicular directions

4.2. 동적 상태에서의 젖음성 평가

이후 앞선 과정과 동일하게 그루브 및 경사진 마이크로 돌기 구조를 가진 표면의 동적상태에서의 젖음성을 평가하고자 하였다. Figure 21 은 각각 돌기 line 간의 간격을 200 μm , 300 μm 및 400 μm 으로 하여 돌기방향에 대한 액적의 흐름방향과 이에 해당하는 액적의 이미지를 나타낸 것이다. 또한 Figure 22 는 특정 돌기 라인간의 간격에서 시편의 경사각에 따른 액적의 전진접촉각과 후진접촉각의 변화를 도식한 것이다. 이를 바탕으로 측정한 돌기 팁 방향에 따른 경사방향(Oblique direction)과 역경사방향(Anti-oblique direction)에 대한 전진 접촉각과 후진 접촉각의 차인 접촉각 이력과 roll off angle 의 값을 도식한 것이 Figure 23 및 24 이다. Figure 23 에서 볼 수 있듯이, 돌기 line 간의 간격과 무관하게 돌기의 역경사방향 대비 경사방향으로 흐를 때에 접촉각 이력이 더 작음을 확인하였다. 또한 이는 앞선 결과인 마이크로 돌기 표면에서 확인하였던 돌기 팁과 경사방향의 일치함에 따라 액적의 유동저항이 감소하였기 때문이다. 이로 인해 Figure 24 에서 볼 수 있듯이, 돌기 line 간의 간격과 무관하게 돌기의 역경사방향 대비 경사방향으로 흐를 때에 Roll off angle 또한 더 작음을 확인하였다. 다만, 돌기 line 간의 간격이 증가함에 따라 경사 방향과 무관하게 Roll off angle 의 증가 경향을 확인할 수 있었으며, 이는 돌기 line 간의 간격이 증가함에 따라 그루브 폭이 증가하여 표면과 액적 사이의 접촉면적이 증가하였기 때문이다.

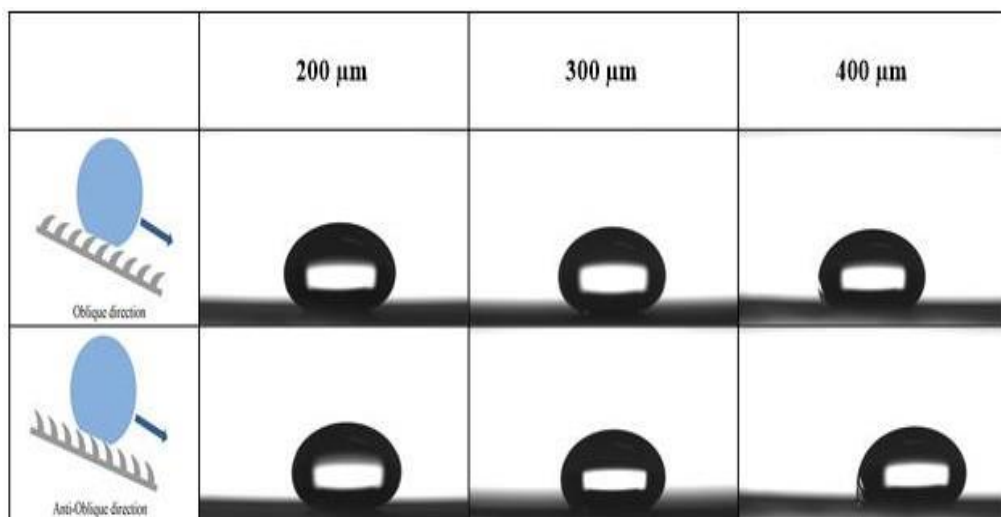


Fig. 21 Images of the droplet on the grooved surface with micro - asperity at different oblique directions

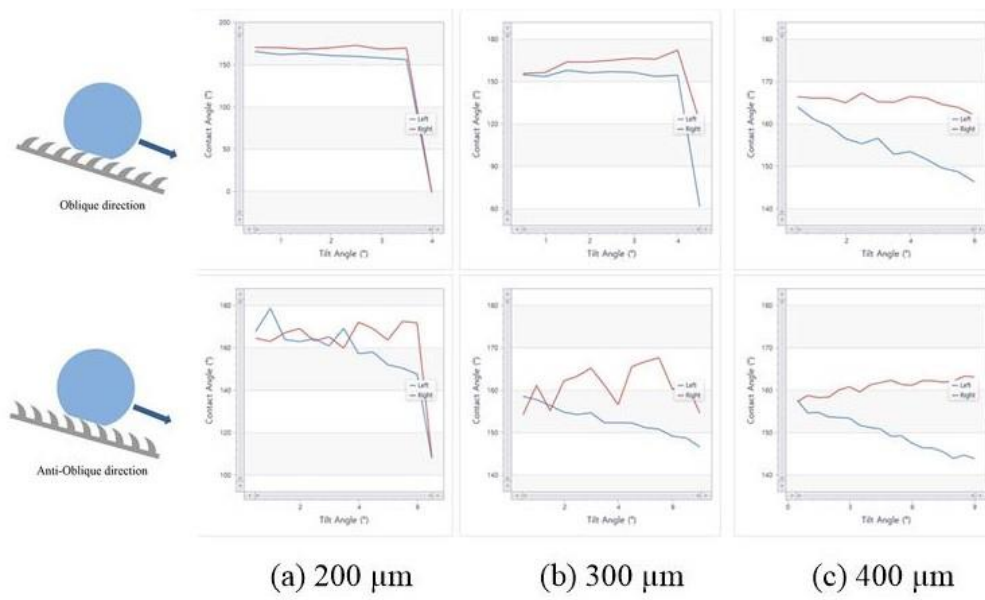


Fig. 22 Deviation of the tilting angle with different pitches of asperities

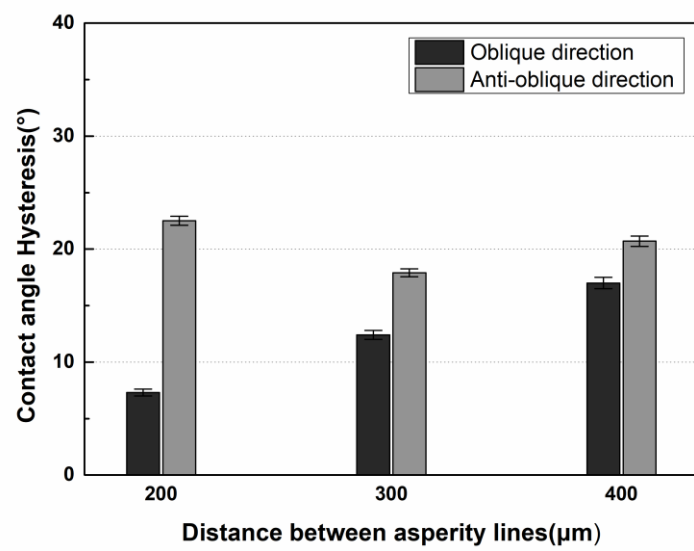


Fig. 23 Comparison of the contact angle hysteresis with different distance between asperities line at different oblique directions

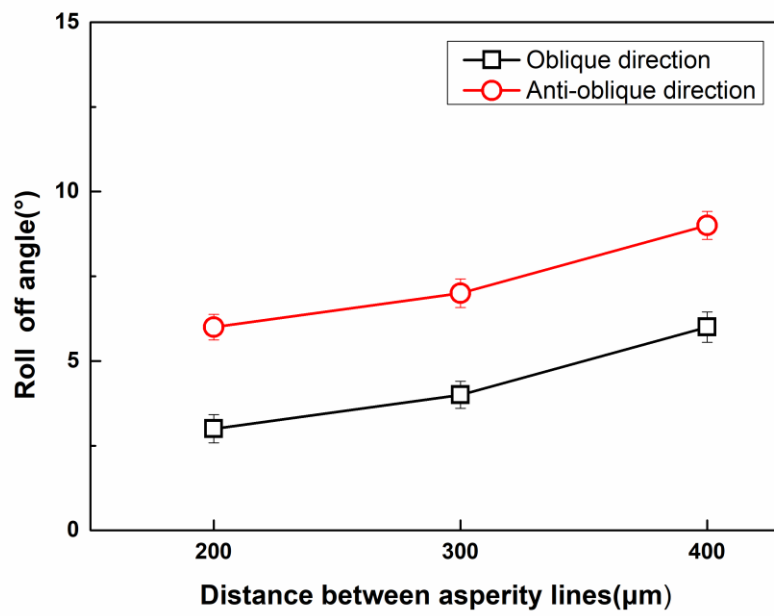
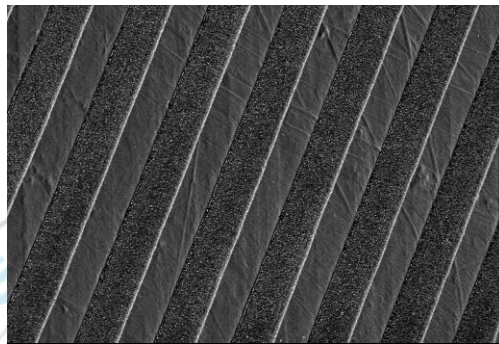
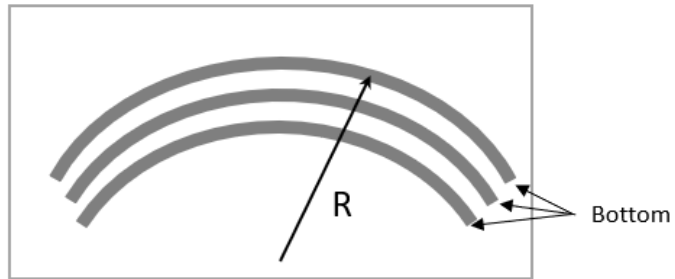


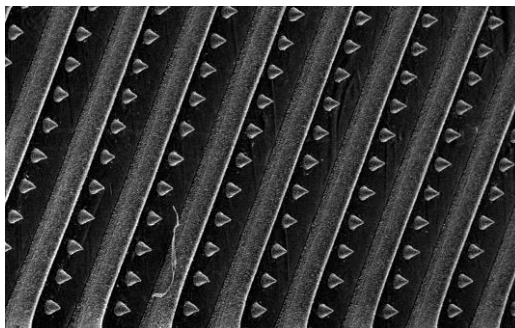
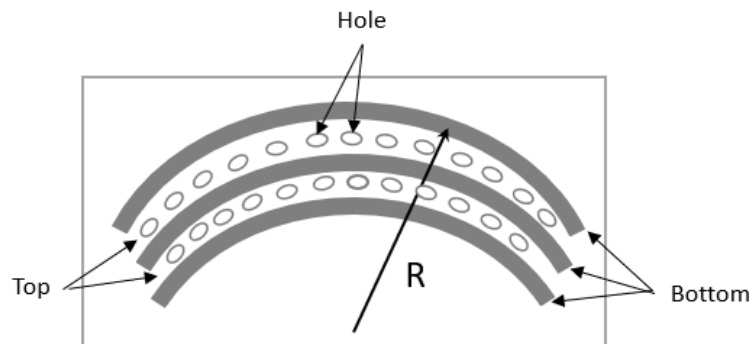
Fig. 24 Variations of the roll off angle with increasing distance between asperity lines at different oblique directions

4.3. 곡선 그루브를 갖는 마이크로 돌기 박막의 액적 흐름 제어 특성 평가

본 연구에서는 곡선 그루브를 가진 시편과 곡선과 돌기를 가진 시편에 대하여 액적의 흐름 제어가 가능한지에 대해 평가하고자 하였다. Figure 25 (a) 및 (b)는 각각 곡선 반경 15mm 의 그루브를 가진 시편과 곡선과 0°의 돌기를 가진 시편의 개략도와 두 시편에 대한 SEM 사진을 나타낸다. Figure 26 은 각각의 두 시편에 대하여 경사를 주었을 때 액적이 시편의 그루브 라인을 따라 흐르는 이미지를 나타낸 것이다. 이를 바탕으로 하여 경사각의 변화에 따른 전진, 후진 접촉각의 변화를 도식한 것이 Figure 27 이다. 그림에서 보이듯이, 곡선 그루브만 가진 시편은 roll off angle 이 약 4°임에 비해 곡선 그루브와 돌기를 가진 시편은 약 9° 정도로 곡선 그루브만 가진 시편에 비해 상대적으로 높게 평가되었다. 이는 마이크로 돌기의 존재가 액적의 접촉면적을 증대시킨 결과로 판단된다. 이를 통해 곡선 그루브에 돌기가 조합된 소수성 표면의 젖음성 평가를 통해 액적이 곡선 라인을 따라 흐르는 것을 확인하였으며, 액적의 흐름 제어가 가능함을 확인하였다.

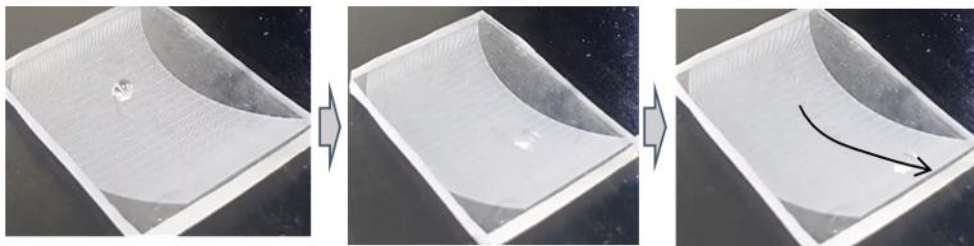


(b) Curved groove surface

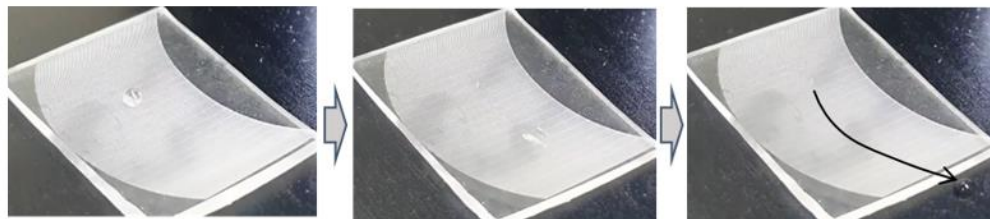


(a) Curved groove surface with asperities

Fig. 25 Schematic and SEM image of the curved groove surface

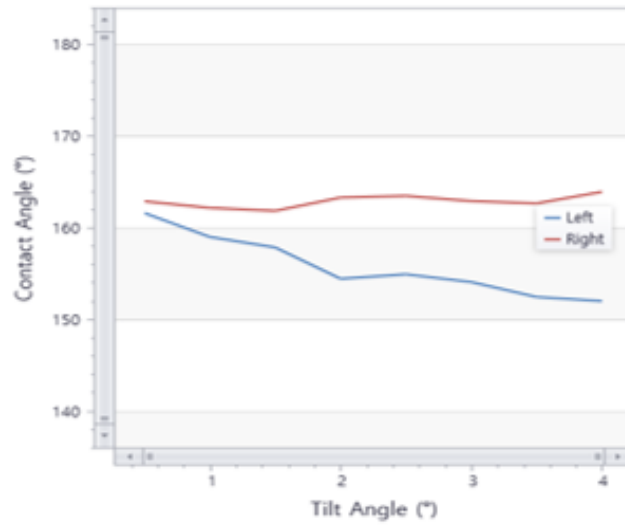


(a) Curved groove surface

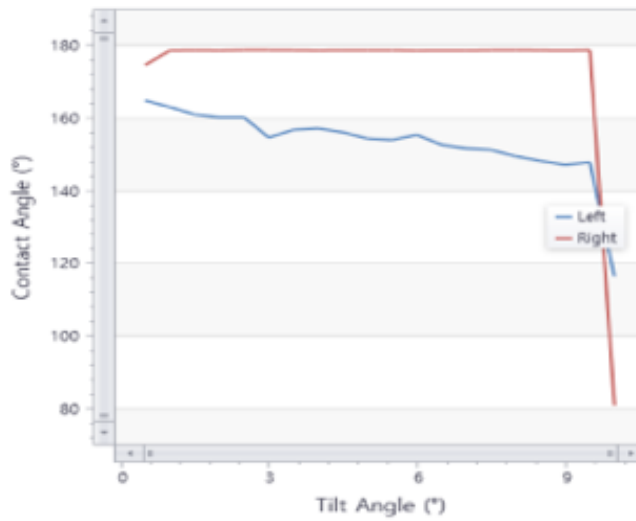


(b) Curved groove surface with asperities

Fig. 26 Image of the droplet movement at specific surfaces with increasing tilt



(a) Curved groove surface



(b) Curved groove surface with asperities

Fig. 27 Deviation of the tilting angle with different surfaces

4. 결론

본 연구에서는 소수성 표면에 대한 산업적 활용도가 높아짐에 따라 기존에 주로 연구되었던 액적에 대한 등방성 흐름 표면 및 단순 그루브 표면에서 나아가 단방향 흐름 제어가 가능한 마이크로 그루브 및 비대칭 마이크로 돌기를 갖는 표면의 최적화 및 성능 평가를 목표로 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 고출력 다이오드 레이저를 이용한 몰드 제작을 통해 경사진 마이크로 돌기 제작에 대한 유효성을 확인하였으며, 해당 방법의 홀 경사각 한계를 확인하였다. 이러한 한계를 극복하기 위해 초단펄스 다파장 레이저를 이용하여 홀 경사각을 가지는 몰드를 제작하고, 이를 이용해 다양한 영향인자(예. 마이크로 돌기의 경사각, 간격, 그루브 사이 간격) 변화에 따른 시편을 제작하였다. 시편은 PDMS를 이용하여 제작하였으며, 제작된 시편에 대한 정적 및 동적 상태에서의 액적의 젖음성을 평가하고자 하였다. 측정 결과, 표면 조건에 따라 이방성 흐름 특성을 확인할 수 있었으며, 또한 곡선 그루브를 통해 액적의 흐름 제어가 가능함을 알 수 있었다. 본 연구에서 실험에 따른 세부적인 결과는 아래와 같다.

1. 본 연구에서는 마이크로 돌기 표면 제작 유효성 평가를 위해, 고출력 다이오드 레이저를 이용한 반복 가공을 통해 몰드를 제작하였다. 제작 결과, 5 회 및 10 회 반복 가공 시 각각 $100\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ (홀 직경 $\times$ 깊이), $250\ \mu\text{m} \times 84\ \mu\text{m}$ (홀 직경 $\times$ 깊이)의 홀이 가공되었으며, 이를 통해 본 연구에서 제안한 레이저 반복 가공 이용 마이크로 돌기 구조 제작의 유효성을 확인하였다. 다만, 고출력 다이오드 레이저 스캐너의 경우 최대 약 16° 의 홀 경사각 한계를 지녔으며, 이러한 한계를 극복하기 위해 초단펄스 다파장 레이저 및 지그 각도를 조절하여 최대 45° 까지의 홀 경사각을 가질 수 있도록 하였다. 이를 이용하여 홀의 경사각, 간격 및 그루브 사이 간격 등을 달리 한 몰드를 성공적으로 제작하였으며, 이를 이용한 다각도의 돌기 형상 표면을 구현하였다.

2. 돌기의 경사각과 간격에 따른 12 종의 시편에 대한 젖음성 평가를 위해 정적 접촉각을 측정한 결과, 돌기 간격이 100 μm , 200 μm 에서는 상대적으로 좁은 돌기 간격에 따른 Cassie-Baxter 상태로 인한 약 160°의 높은 접촉각을 보였으나, 돌기 간격이 300 μm 으로 증가함에 따라 Wenzel 상태가 되어 약 110°의 낮은 접촉각을 보였다. 이중, 100 μm 에서는 좌우의 접촉각의 차이가 돌기의 각도의 상관없이 약 1° 정도로 일정한 값을 보였는데 이는 100 μm 정도의 돌기 간격에서는 액적의 접촉각에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되었으며, 200 μm 에서는 돌기의 경사각이 액적과의 접촉면적에 영향을 주어 이방성 효과가 커짐을 알 수 있었다.

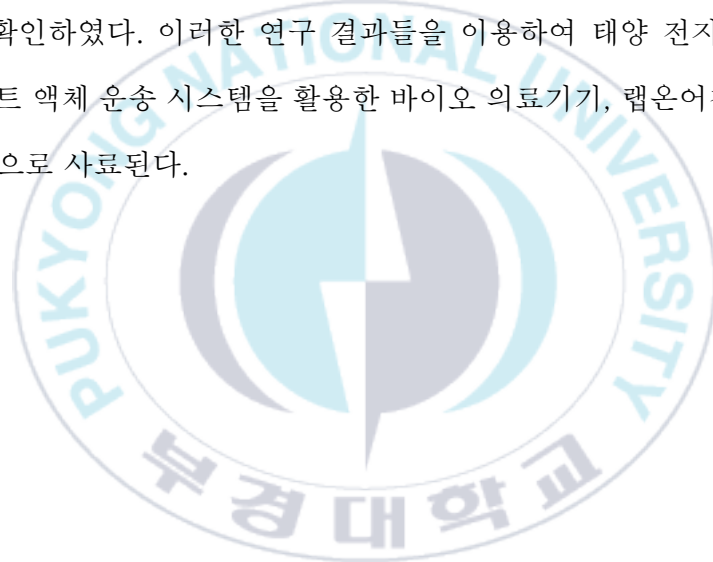
3. 마이크로 돌기 구조에 따른 액적 흐름 특성과 관련하여, 큰 정적 접촉각을 보였던 100 μm , 200 μm 에서 돌기 경사각에 따른 동적 접촉각 및 roll off angle 을 측정하였다. 측정 결과, 100 μm 에서는 좁은 돌기 간격으로 인해 경사 방향에 따른 roll off angle 의 차이가 크지 않았다. 그에 비해 200 μm 에서는 경사방향에서 돌기 팁 방향과 일치하는 액적 유동으로 인해 유동 저항이 작게 발생하여 roll off angle 이 더 작음을 확인하였다. 특히, 200 μm , 돌기 경사각이 30°에서 가장 작은 접촉각 이력 및 roll off angle 을 확인할 수 있었다.

4. 돌기의 간격이 200 μm 인 마이크로 돌기 구조를 이용하여 그루브 및 경사진 마이크로 돌기 구조를 갖는 표면에 대한 젖음성 평가를 위해 돌기 line 간의 간격을 200 μm , 300 μm , 400 μm 으로 달리하여 정적 접촉각을 측정하였다. 그 결과, 돌기 line 간의 간격이 증가함에 따라 액적과 표면의 접촉면에서 돌기의 접촉면적 비율이 감소하여 접촉각이 감소함을 확인할 수 있다.

5. 그루브 및 경사진 마이크로 돌기 구조를 갖는 표면에 대한 액적 유동 특성 확인을 위해 동적 접촉각 및 roll off angle 을 측정한 결과, 돌기 line 간의 간격과 무관하게 액적의 유동 저항이 상대적으로 낮은 경사방향에서 더욱 낮은 접촉각 이력과 roll off angle 을 확인하였다. 다만, 돌기 line 간의 간격이

증가함에 따라 그루브 간격 증가에 따른 액적과의 접촉면적이 증가하여 roll off angle 이 증가함을 확인하였다.

6. 곡선 그루브 및 돌기를 가진 시편에 대한 액적 흐름 제어를 평가하기 위해, 시편의 경사각 변화에 따른 액적의 전진 및 후진 접촉각의 변화를 측정하였다. 그 결과, 마이크로 돌기에 따른 액적과의 접촉면적 증가로 인해 곡선 그루브만 가진 시편 대비 곡선 그루브와 돌기를 가진 시편에서 roll of angle 이 약 9°로 증가함을 확인하였다. 따라서 돌기를 포함하는 표면을 통한 액적 흐름 제어가 가능함을 확인하였다. 이러한 연구 결과들을 이용하여 태양 전지, 항공 우주 산업, 스마트 액체 운송 시스템을 활용한 바이오 의료기기, 랩온어칩 등에 적용 가능 할 것으로 사료된다.



6. 참고문헌

- [1] S. Mahadik, S. Thakur, P. Fernando, “Designing polyaniline films with tailored thermal, optical, and hydrophobic properties via gold nanoparticle integration”,
- [2] Y. Wu, X. Tan, Y. Wang, F. Tao, M. Yu, X. Chen, “Nonfluorinated, transparent, and antireflective hydrophobic coating with self-cleaning function”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 634 (2022) 127919
- [3] X. Zhang, J. Wu, X. Lin, X. Fan, X. Zhang, “Dual-phase nanostructured coating with high hydrophobicity”, *Materials Letters* 333 (2023) 133563
- [4] N. Kim, H. Kim, H. Park, “An experimental study on the effects of rough hydrophobic surfaces on the flow around a circular cylinder”, *Physics of Fluids* 27, 085113 (2015)
- [5] T. Young, “An Essay on the Cohesion of Fluids”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 95, pp. 65–87, 1805.
- [6] W. Barthlott, C. Neinhuis, *Purity Planta* 202 (1997) 1–8.
- [7] R. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 28, pp. 988–994, 1936.
- [8] Cassie A. B. D., Baxter S., “Wettability of porous surfaces”, *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 40, pp. 546–551, 1944.
- [9] Pockels A, “Über randwinkel und ausbreitung von flüssigkeiten auf festen körpern” *Physikalische Zeitschrift* (1914) 15: 39–46 (in German).

- [10] H. Kwak, D. Yu, S. Doh, H. Park, M. Kim, "A visualization study of liquid spreading on micro/nano textured surfaces with synchrotron X-ray imaging", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B 41 (2017) 531-536
- [11] A. Karim, H. Kavehpour, "Effect of viscous force on dynamic contact angle measurement using Wilhelmy plate method", Colloids and Surfaces A 548 (2018) 54
- [12] L. Schramm, D. Fisher, S. Schiirch, A. Cameron, "A captive drop instrument for surface or interfacial tension measurements at elevated temperatures and pressures", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 94 (1995) 145-159
- [13] K. Topka, A. Karantonis, "Electrochemical synthesis of biomimetic micro-nano structured super-hydrophobic thin films," Materials Today: Proceedings 5 (2018) 27500-27510
- [14] M. Kwon, W. Jee, and, C. Chu, "Fabrication of hydrophobic surfaces using copper electrodeposition and oxidation" International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 16, No. 5, pp. 877-882
- [15] L. Rizzello, S. Shankar, D. Fragouli, A. Athanassiou, R. Cingolani, and P. Pompa, "Microscale patterning of hydrophobic/hydrophilic surfaces by spatially controlled galvanic displacement reactions," Langmuir 2009, 25(11),6019-6023

- [16] A. Sánchez-Iglesias, M. Grzelczak, T. Altantzis, B. Goris, J. Perez-Juste, S. Bals, G. Tendeloo, S. Donaldson Jr., B. Chmelka, J. Israelachvili, and L. Liz-Marzán, “Hydrophobic interactions modulate self-assembly of nanoparticles” *ACS Nano.*, Vol.6, pp.11059–11065, 2012.
- [17] S. Tan, N. Nguyen, Y. Chua, and T. Kang, “Oxygen plasma treatment for reducing hydrophobicity of a sealed polydimethylsiloxane microchannel” *BIOMICROFLUIDICS* 4, 032204 2010
- [18] S. Han, K. Kim*, J. Kim, S. Uhm, and Y. Dok, “Hydrophobic Polydimethylsiloxane Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition: Application in Water Purification” *Appl. Chem. Eng.*, Vol.28, pp.1–7, 2017.
- [19] S. Hong, “Fabrication of Hydrophobic Surfaces with Stereolithography” *Tribol. Lubr.*, Vol. 37, pp.1–6, 2021.
- [20] G. Hea, K. Wang, “The super hydrophobicity of ZnO nanorods fabricated by electrochemical deposition method”, *Applied Surface Science* 257 (2011) 6590–6594
- [21] Z. Guo, J. Fang, L. Wang, W. Liu, “Fabrication of superhydrophobic copper by wet chemical reaction”, *Thin Solid Films* 515 (2007) 7190–7194
- [22] T. Hu, Z. Zhang, M. Reches, “A self-standing superhydrophobic material formed by the self-assembly of an individual amino acid”, *Journal of Colloid and Interface Science* 655 (2024) 899–908

- [23] A. Oberlintner, V. Shvalya, A. Vasudevan, D. Vengust, B. Likozar, U. Cvelbar, U. Novak, "Hydrophilic to hydrophobic: Ultrafast conversion of cellulose nanofibrils by cold plasma fluorination", *Applied Surface Science* 581 (2022) 152276
- [24] Y. Ye, Z. Kang, F. Wang, Y. Long, T. Guo, D. Chen, J. Kong, L. Xu, "Achieving hierarchical structure with superhydrophobicity and enhanced anti-corrosion via electrochemical etching and chemical vapor deposition", *Applied Surface Science* 610 (2023) 155362
- [25] P. Xu, X. Sui, S. Wang, G. Liu, A. Ge, T. Coyle, J. Mostaghimi, "Superhydrophobic ceramic coatings with lotus leaf-like hierarchical surface structures deposited via suspension plasma spray process", *Surfaces and Interfaces* 38 (2023) 102780
- [26] C. Shao, J. Chi, Z. Chen, L. Cai, Y. Zhao, "Superwetable colloidal crystal micropatterns on butterfly wing surface for ultrasensitive detection", *Journal of Colloid and Interface Science* 546 (2019) 122-129
- [27] J. Genzer and A. Marmur, "Biological and synthetic self-cleaning surfaces", *MRS Bulletin*, Vol. 33, pp. 742-746, 2008.
- [28] L. Sirovich and S. Karlsson, "Turbulent drag reduction by passive mechanisms", *Nature*, Vol. 388, pp. 753- 755, 1997
- [29] Y. Kong, T. Kim, "Wettability of Biomimetic Riblet Surface like Shark Skin", *J. KSTLE*, Vol. 29, pp. 304-309, 2013
- [30] T. Kim, "Assessment of hydro/oleophobicity for shark skin replica with riblets", *J. Nanosci. and Nanotechno.*, Vol. 14, pp. 1-7, 2014

[31] T. Kim, “A Study on the Anisotropic Flow Characteristics of Droplets on Rice Leaf Surface”, Tribol. Lubr. Eng., Vol. 33, No. 6, December 2017, pp. 251~255



Anisotropic flow Evaluation of Surface with Micro-asperities

SeungIk Baek

Department of Intelligent Robot Engineering,
Pukyong National University

This study was conducted with the aim of optimizing and evaluating the performance of surfaces with micro-grooves and asymmetric micro-asperities capable of unidirectional flow control for the effectiveness of the manufacture of inclined micro-asperities, mold manufacturing using a high-power diode laser was tried but the limit of the hole inclination angle of the method was confirmed. A mold with a hole inclination angle was manufactured using an ultra-short pulse multi-wavelength laser, and a specimen was successfully manufactured according to changes in various influence factors such as inclination angle, spacing of the micro-asperities and spacing between grooves. The specimen was manufactured using PDMS, and the wettability of the droplets in static and dynamic states of the manufactured specimen was to be evaluated.

As a result of measuring the static contact angle, the surfaces with spacing of asperities of 100 μm and 200 μm gives a high contact angle of about 160° due to the Cassie-Baxter state according to the relatively narrow asperity interval. As a result of measuring the dynamic contact angle, the difference in roll off angle according to the inclination direction was not significant at the surface with spacing of asperities of 100 μm due to the narrow asperity interval, but at the surface of 200 μm , the flow resistance was small due to the droplet flow consistent with the asperity tip direction, which result in the smallest contact angle history and roll off angle at 30° .

It showed that the anisotropic flow occurs depending on the direction of the surface asperities. To evaluate the droplet flow control for a specimen with curved grooves and micro-asperities, the changes in the forward and backward contact angles of the droplet according to the change in the inclination angle of

the specimen were measured. As a result, it was confirmed that the roll off angle increased to about 9° in the specimen with curved grooves and micro-asperities compared to the specimen with curved grooves due to the increase in contact area between droplets and micro asperities.



감사의 글

스스로에 대한 새로운 도전을 해보자 마음먹고 김태완 교수님의 연구실을 찾아 뵈었던 때가 엇그제 같은데 벌써 학부생부터 지금까지 4년이라는 시간이 흘러 마무리를 짓고 있다는 것이 믿어지지 않습니다. 도전은 삶이 무료해질 때쯤 항상 활력을 불어넣어 주는 것 같습니다. 먼저 이러한 기회를 만들어 주시고 저 스스로가 끈게 나아갈 수 있도록 지도해 주신 김태완 교수님께 감사의 말을 올립니다. 다양한 연구와 학문적 배움의 기회를 주셨던 것과 학위를 마무리함에 있어서 조언과 지지를 해주신 것에 대해 진심으로 감사합니다. 막막하고 갈피를 잡지 못할 때도 방향성을 잡는데 도움을 주셨고, 이러한 학문적인 부분을 제외하고 저라는 존재에 대해 더욱 성숙해지고 받은 도움을 또 다른 학우들에게 베풀어 줄 수 있도록 응원을 해주셨기에 지금의 제가 있지 않나 싶습니다. 배움 앞에서 항상 겸손한 마음을 가지고 앞으로 다가올 시련들도 잘 이겨내 나가도록 하겠습니다. 다시 한번 교수님, 감사합니다.

목표를 정하고 도전을 하겠다고 결심하고 달려 나갈 때 항상 생각했던 대로 안 될 때도 많았던 것 같습니다. 연구 결과가 잘 나와서 즐거워하기도 하고 때로는 생각처럼 결과가 안 나와서 슬퍼하기도 했습니다. 그럴 때 마다 항상 옆에서 같이 고민해주고 조언을 해주고 힘이 되었던 학교 선후배님들 특히 연구실 선후배님들의 응원에 감사의 말을 전합니다. 그리고 같이 석사 과정을 진행하면서 서로 많이 의지하고 서로의 버팀목이 되어주었던 재혁이, 경섭이에게도 감사의 말을 전합니다. 또 힘들고 지칠 때 마다 나의 얘기를 들어주고 응원해주는 나의 고향 친구 치우, 호건, 유리, 한나, 시영, 유진, 희진이에게도 감사의 말을 전합니다. 무엇보다 제가 하고자 하는 것에 대해 지지해주고 항상 믿어준 나의 가족들에게도 감사하고 사랑합니다.

전부 담지는 못했지만 지금의 제가 있기까지 많은 분들의 도움과 응원이 있었기에 지금에 제가 있지 않았나 싶습니다. 제가 받은 것들을 잊지 않고 베풀면서 나아가도록

하겠습니다. 익숙함에 속아 소중한 것을 잃지 않으면서 항상 겸손하게 배우면서 앞으로
나아가는 삶을 살아가도록 하겠습니다. 감사합니다.

