

액적의 구름저항에 대한 정접촉각 및 거칠기의 영향

조원경¹ · 조상욱² · 김두인³ · 김대업⁴ · 정명영^{1,†}

¹부산대학교 광메카트로닉스공학과

²부산대학교 인지메카트로닉스공학과

³부산대학교 BK21+나노융합인지메카트로닉스공학 사업단

⁴한국생산기술연구원 전북지역본부 탄소경량소재응용그룹

Effects of Static Contact Angle and Roughness on Rolling Resistance of Droplet

Won Kyoung Cho¹, Sang Uk Cho², Doo-In Kim³, Dae-Up Kim⁴ and Myung Yung Jeong^{1,†}

¹Department of Opto-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

²Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

³BK21+Nano-integrated Cognomechatronics Engineering, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

⁴Carbon & Light Materials Application R&D Gropu, KITECH, Jeonju-city, Jellabuk-do 54853, Korea

(Received March 14, 2016: Corrected March 21, 2016: Accepted March 25, 2016)

초 록: 본 연구에서는 소수성 구현을 위한 표면 거칠기가 접촉각과 접촉각 이력에 미치는 영향을 평가하였다. 초발수 특성을 극대화하기 위해, 액적이 이동하기 위해 필요한 구름저항력을 제한하였으며, 이에 대한 평가를 통하여 표면에 형성한 패턴이 접촉각 이력 및 구름저항력에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 초발수 특성이 요구되는 실제 응용을 위해서는 액적의 이동에 필요한 에너지를 최소화하기 위하여 접촉각을 극대화하고 동시에 접촉각 이력을 최소화하기 위한 표면 패턴 형상의 최적화가 요구됨을 확인하였다.

Abstract: In this study, the effects of the contact angle (CA) and contact angle hysteresis (CAH) of planar and nano-patterned surfaces on rolling resistance of water droplet were studied. Based on the investigation on the CAH of water droplet on surfaces with various static wettability, it was found that the rolling resistance coefficient of water droplet is highly influenced by the surface pattern as well as CAH. The observed results suggest that the optimal surface patterns should be designed in order to minimize the rolling resistance of water droplet for the practical applications where superhydrophobicity is required.

Keywords: Superhydrophobicity, Contact angle hysteresis, Rolling resistance, Rolling resistance coefficient

1. 서 론

다양한 기능성을 가지는 연잎 효과(Lotus effect)의 초발수(superhydrophobicity)표면을 실제 생활에 활용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.¹⁾ 초발수는 연잎이 가지는 자기세정효과(self-cleaning)¹⁾ 뿐만 아니라 물이 맺힘으로써 생기는 여러 가지 문제를 줄일 수 있다. 예를 들어, 김 서림 방지(Anti-fogging),²⁾ 방오성(Anti-fouling),³⁾ 부식 방지(Anti-corrosion),⁴⁾ 소빙성(Icephobicity),⁵⁾ 방수(Water-proof)⁶⁾ 등의 효과를 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.⁷⁾ 연잎은 표면에 마이크로/나노 계층구조를 가지고 이에

더해 연잎 자체의 화학적 분자막 코팅으로 표면 에너지를 낮춰 액적과의 접촉을 최소화하여 물에 대한 150° 이상의 접촉각을 보인다.⁸⁻¹⁰⁾ 현재까지는 표면 위에 일정량의 액적을 떨어뜨린 후 고체 표면과 이와 접하는 액적의 표면이 이루는 각인 접촉각을 측정하여 표면의 젖음성(wettability)을 결정하였으며,¹²⁾ 앞서 언급한 다양한 기능성을 향상시키기 위해 젖음성을 제어하기 위한 연구를 진행해 오고 있다.¹³⁾ 기존에 마이크로/나노 패턴을 표면에 형성하여 표면의 실제 표면적을 극대화 하여 접촉각을 향상시키는 시도가 있었으며, 정지된 상태의 정접촉각이 크게 향상됨을 확인하였다. 그러나 단순히 접촉각이 큰

[†]Corresponding author

E-mail: myjeong@pusan.ac.kr

© 2016, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

것과 액적이 쉽게 이동할 것인가는 다른 문제인 것으로 보인다. 상어의 비늘에는 마이크로/나노 구조의 돌기가 있어 물속에서 저항(fluidic drag reduction)을 적게 받아 기민하게 움직일 수 있다. 이러한 특성은 표면에서의 정지된 상태의 물의 접촉각만을 고려하여 초발수 특성만으로 나타나는 것은 아니다.¹¹⁾ 최근 연구에 의하면 초발수 특성을 가지는 패턴의 경우 액적과 표면 사이에 강한 응착력이 작용함을 보였다.¹⁴⁾

본 논문에서는 초발수 표면에서 액적의 이동에 필요한 최소한의 외력을 평가하기 위하여 구름저항력 및 구름 저항 계수를 정의하였으며, 접촉각을 향상시키기 위한 나노스케일 패터닝이 구름저항력에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 이를 통하여 표면 패터닝이 접촉각 및 접촉각 이력(contact angle hysteresis, CAH)에 영향을 미치는 메카니즘을 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 액적의 구름 저항력

표면의 젖음성은 고체, 액체, 기체 간의 경계면에서 작용하는 힘 사이의 평형 상태에 의해 결정 되며, 이는 잘 알려진 Young 방정식¹⁵⁾ 식 (1)을 통해 표면 접촉각으로 표현이 된다.

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \tag{1}$$

여기서, θ_0 는 표면의 정접촉각, γ_{SV} , γ_{SL} , γ_{LV} 는 각각 고체-기체, 고체-액체, 액체-기체 사이의 계면에너지를 나타낸다. 위의 식 (1)과 함께 표면에너지에 관한 Dupre 방정식, $\omega = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$ 결합하여 접촉각과 표면 에너지의 관계식, 아래의 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\omega_0 = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta_0) \tag{2}$$

CAH는 액적의 이동을 위해 한 쪽 방향으로 외력을 가했을 때 액적의 새로운 액체-고체 계면을 형성하는 방향에서 정적인 상태의 접촉각보다 큰 접촉각을 가지는 전진 접촉각(advancing contact angle)과 액체-고체 계면이 사라지는 방향에서는 정접촉보다 작은 후진 접촉각(receding

contact angle)을 보이게 되고 두 각의 차이를 접촉각 이력이라고 한다.¹⁶⁾ 전진 접촉각과 후진 접촉각은 액체-고체-기체 계면이 이동할 때의 에너지 변화에 의해 결정된다. 결과적으로 이 전진-후진 접촉각의 차이가 클수록 액적의 구름 저항력이 커진다. 식 (2)를 이용하여 전진 접촉각과 후진 접촉각을 이용하여 이동 방향의 앞쪽과 뒤쪽에서 작용하는 에너지는 다음과 같이 계산할 수 있다.¹⁷⁾

$$\omega_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta_a) \tag{3}$$

$$\omega_r = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta_r) \tag{4}$$

여기서 θ_a 와 θ_r 는 각각 전진 접촉각과 후진 접촉각을 나타낸다. 위의 식 (3)과 (4)를 이용하여 전진 접촉각과 후진 접촉각에 의한 각각의 표면 에너지를 구하고 표면 에너지 차이를 이용하여 접촉각 이력에 의해 에너지 차이를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\omega = \gamma_{LV}(\cos \theta_r - \cos \theta_a) \tag{5}$$

위 식에서 $\Delta\omega$ 는 부착력의 차이(adhesion hysteresis)이며 이는 CAH에 비례함을 확인 할 수 있다. 따라서 식 (5)에 Fig. 1에서 보인 바와 같이 액적의 폭을 곱하여 액적이 이동할 때 필요한 힘, 즉 구름 저항력 F_d 를 다음과 같이 계산할 수 있다.¹⁸⁾

$$F_d = \gamma_{LV}(\cos \theta_r - \cos \theta_a)L \tag{6}$$

위 식에서 액적이 이동하기 위해 필요한 외력의 크기는 결국 액체의 표면장력, CAH, 그리고 액적이 고체 표면과 접하는 계면의 길이, L ,에 의해 결정됨을 확인할 수 있다. 일정한 체적의 액적이 고체 표면에 접하고 있을 때 고체-액체의 계면의 길이는 표면의 정접촉각에 의해 정의되며, 접촉각이 증가할 수록 계면의 길이는 감소한다. 따라서 액적이 이동하기 위해 필요한 힘은 표면의 접촉각과 접촉각 이력에 의해 결정됨을 확인할 수 있다.

이와 같은 액적의 구름 저항력은 고체의 최대정지 마찰력의 개념과 유사하게 상사할 수 있다.¹⁹⁾ 고체-고체 간의 마찰력은 응착력 등에 의하여 초기 이동시 가장 큰 외력이 필요하며 이때의 마찰력을 최대정지 마찰력으로 정의한다. 액적의 경우에도 표면에 접하고 있는 액적이 이

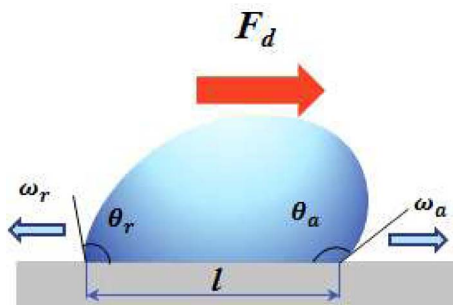


Fig. 1. Schematic of dragging droplet.

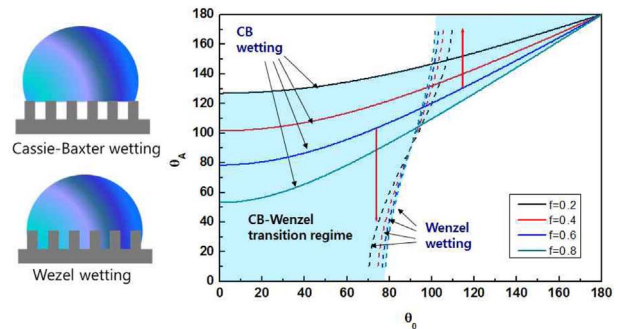


Fig. 2. The predicted apparent contact angle of rough surface based on the Wenzel model and CB model.

동하기 위해서는 유사한 초기 저항력을 극복해야 이동이 가능하므로 최대구름 저항력의 평가가 요구된다.

2.2. Wenzel 모델과 Cassie-Baxter 모델

식 (1)은 이상적으로 매끈한 표면에서의 접촉각으로 볼 수 있으나 실제로 대부분의 표면은 거칠기가 존재하기 때문에 Young 방정식에 따르는데 제한이 있다. 거칠기에 의한 젖음 특성이 변하는 경우를 위해 실제 젖은 상태의 표면을 고려한 Wenzel 모델²⁰⁾과 Cassie-Baxter (CB) 모델²¹⁾이 널리 활용되고 있다. Wenzel 모델은 패턴 사이까지 균일하게 액체가 접하고 있어 고체-액체 간의 균일한 계면을 이룬다. 반면 CB 모델은 액적이 패턴 사이에 부분적으로 젖어 있는 상태로, 거칠기 또는 패턴을 가지는 표면의 일부분이 젖어서 고체-액체, 기체-액체 계면이 동시에 존재하는 불균일한 계면을 형성하고 있다. Fig. 2는 CB 모델과 Wenzel 모델을 이용하여 평탄한 고체 표면의 접촉각(θ_0)에 대하여 사각 기둥의 단위면적에 대한 단면적의 비율, f 에 따른 겉보기 접촉각(θ_d)을 도식한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 거친 표면이 완전히 젖는 Wenzel 상태의 경우 접촉각이 90° 이하인 친수성의 표면은 친수도가 증가하여 접촉각이 감소하고 소수성 표면은 접촉각이 급격히 향상됨을 확인할 수 있다. 이와는 달리 거친 표면이 부분적으로 젖는 CB 상태의 경우 친수성 표면에서도 접촉각이 90° 이상의 소수성 표면으로 접촉각이 증가함을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 시스템의 에너지가 가장 낮은 상태가 아닌 준안정적인 상태로 액체-고체-기체 계면의 이동이 제한되어 발생되며, 이로 인해 액체-고체 계면과 액체-기체 계면이 혼합되어 존재하고 이로 인하여 친수성 표면에서도 90° 이상의 접촉각을 보이게 된다.

3. 실험 방법

3.1. 시편 제작

액적의 접촉각이력 및 구름저항력에 대한 고체 표면의 정접촉각과 표면의 거칠기의 영향을 평가하기 위해 본 연구에서는 네 가지 시편을 준비하였다. 표면거칠기의 영향을 무시할 수 있는 평탄한 시편으로 다양한 접촉각을 가지는 UV 레진(MTR-03) 평탄한 형태로 경화), PMMA (Poly(methyl-methacrylate)) 필름, PMMA-PC (Poly carbonate) 복합재에 대한 구름저항에 대한 평가를 수행하였다. 접촉각 및 접촉각 이력에 대한 나노스케일 표면 거칠기의 영향을 평가하기 위해 UV 나노임프린팅 공정을 이용하여 원뿔 형태의 어레이를 형성한 표면을 Fig. 3과 같은 방법으로 제작하였다.

나노 패턴을 가지는 시편의 제작 방법은 다음과 같다. Fig. 3과 같이 Si 몰드 위에 UV 경화 레진(MTR-03)을 균일하게 스핀 코팅하여 균일한 높이로 형성한다. UV 경화 레진을 UV (375-395 nm)에 540 mJ/cm^2 조건에서 노광하

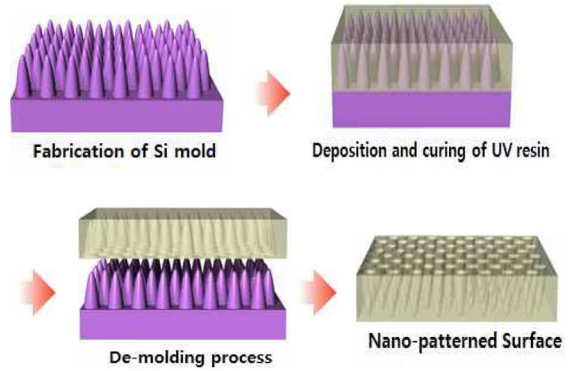


Fig. 3. UV nano imprint lithography process.

여 경화시킨 후 몰드와 UV-resin을 분리한다. 실험에 사용한 Si 몰드는 밑단 지름 350 nm, 높이 200 nm를 가지는 원뿔형상이며 별집구조의 육각 형태로 배열되어 있다.

3.2. 실험 방법

정접촉각을 측정하기 위해 준비된 시편의 다섯 지점에서 각각 세 번 이상씩 측정하여 모재의 정접촉각을 측정하였다. 접촉각 이력 및 구름 저항력을 측정하기 위해 기존에 접촉각 이력을 측정하는 방법인 틸팅 방법(Fig. 4)을 이용하여 전진 접촉각 및 후진 접촉각을 측정하여 접촉각 이력을 평가하였으며, 액적이 구르는 각도를 측정하여 표면과 액적의 구름 저항력과 구름 저항계수를 계산하였다.

Fig. 4와 같이 액적을 표면 위에 떨어뜨리고 액적이 올라간 표면을 서서히 기울이면서 액적이 굴러가기 시작하는 점에서의 전진 접촉각과 후진 접촉각이 각각 최대 전진 접촉각, 최소 후진 접촉각이 되며, 식 (5)를 이용하여 에너지 차이에 의한 구름저항력을 계산할 수 있다. 또 다른 접근법으로 경사면의 기울기가 증가함에 따라 액적의 자중에 의해 경사면을 따라 이동하려는 힘이 작용하게 되고 액적이 흘러가기 시작하는 각도를 최대 구름 저항력으로 볼 수 있다. 따라서 구름 저항력은 경사각, α , 로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_d = g\rho V \sin \alpha = \gamma_{LV}(\cos \theta_r - \cos \theta_a)L \tag{7}$$

여기서 ρ 는 액체의 밀도, V 는 액적의 볼륨을 나타낸다. 따라서 Fig. 4에서 마찰력의 개념을 도입하여 수직하중에 대한 구름저항력의 비, 구름 저항계수, μ_d 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu_d = \frac{mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \tan \alpha \tag{8}$$

식 (8)를 바탕으로 전진접촉각 및 후진 접촉각을 측정해야 하는 접촉각 이력을 고려하지 않고 액체의 이동에 필요한 에너지를 평가할 수 있다.

이와 같이 경사법에 의해 측정된 접촉각 이력과 구름 저항력과의 유효성을 비교하기 위해 또다른 접촉각 이력

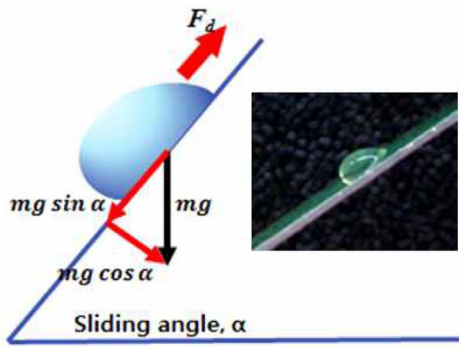


Fig. 4. Force balance of water droplet on sloped surface with sliding angle.

측정법인 체적법을 이용하여 접촉각 이력을 측정하여 비교 평가하였다. 본 연구에서는 10 μL의 물을 증가 시키며 전진각을 측정하였고 반대로 10 μL의 물을 감소시키며 후진각을 측정하였다.

4. 결과 및 검토

본 연구에서 사용한 평탄한 UV 레진, PMMA, PMMA-PC 복합재의 정접촉각은 각각, 65.6°, 70.9°, 105.4°로 각각 측정되었다. Fig. 5는 원자간력 현미경(atomic force microscope)으로 측정한 모스아이 나노 패턴의 실리콘 몰드와 UV로 임프린트한 시편의 이미지를 나타낸 것이다. 음각으로 성형된 패턴의 피치는 약 316 nm 정도이며, 깊이는 약 55 nm인 것을 확인할 수 있다. 다만, AFM 특성 상 굴곡진 패턴에서 깊이를 정확히 측정 할 수 없으므로 음각으로 형성된 패턴의 깊이는 정확히 평가하기 어렵다. 나노임프린트로 성형된 시편의 경우 접촉각이 112.2°

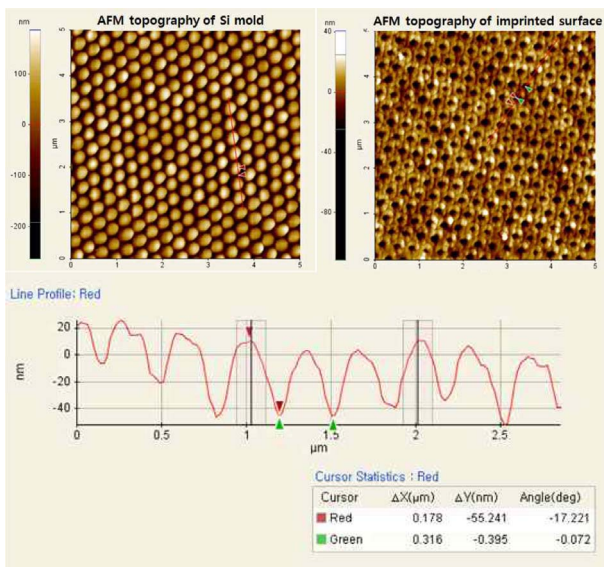


Fig. 5. Atomic force microscopy images of the Si mold and the UV-imprinted surface. Line profile shows the depth of the hole is ~50 nm.

로 측정되었으며, 평탄한 UV 레진의 접촉각이 65.6°임을 고려하면 나노임프린트 시편의 젖음 상태는 Fig. 2에 보인 바와 같이 거친 표면이 부분적으로 젖는 CB 상태임을 확인할 수 있다.

각 시편에서의 구름 저항력과 구름 저항 계수를 측정하기 위해 전진 접촉각과 후진 접촉각을 측정하여 접촉각 이력을 계산하고 액적과 표면이 접하고 있는 계면의 길이를 측정하였으며, 액적이 구르기 시작한 각도를 측정하였다. 일반적으로 접촉각을 측정할 때에는 중력에 의한 액적의 변형의 영향을 최소화하기 위해 5~10 μL의 부피에서 측정한다. 본 연구에서는 실험 접촉각 이력이 큰 표면에서 액적이 구르지 않는 현상이 발생하여 구름저항력을 극복하기 위해 액적의 부피는 50 μL로 일정하게 실험을 진행하였다. 체적법에 의한 접촉각 이력을 측정하기 위해 50±10 μL의 조건에서 전진각과 후진각을 측정하여 비교하였다.

Fig. 6(a)는 상기 기술한 두 가지 방법으로 측정한 전진 접촉각과 후진 접촉각을 나타낸 것이다. 첫 번째 방법은 이번 실험에서 구름 저항력을 구하기 위한 틸팅법이고, 두 번째 방법은 기존에 접촉각 이력을 측정하기 위해 사용되는 물의 부피를 증감시키며 측정하는 체적법이다. 전진 접촉각의 경우 네 가지 시편 모두에서 두 가지 방법에서 경향성에서 차이가 크게 나지 않았으나 후진 접촉각의 경우 다른 경향성을 보이고 있다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 정접촉각이 증가함에 따라 체적법에 의해 측정된 후진각은 일정하게 증가하는 경향을 보이고 있으나 틸팅법으로 측정된 후진 접촉각의 경우 소수성을 보이는 PMMA-PC복합재의 경우부터 후진각이 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히, 나노 패턴된 UV 경화 레진에서 더 크게 차이가 나고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 액적이 구를 때 말단부에서 앞선 연구에서 알려진 피닝 현상이 나타난 영향으로 보인다.¹⁴⁾ 그래프 Fig. 6(b)는 전진 접촉각과 후진 접촉각의 차이인 접촉각 이력을 나타낸 것이다. 체적법과 틸팅법으로 측정된 접촉각 이력이 모두 증가하는 경향을 보이고 있으나 틸팅법에서 접촉각 이력이 현격하게 증가하고 있다. 여기서 주목할 점은 정적인 접촉각이 가장 작은 UV 레진이 가장 큰 나노패턴 UV레진 보다 오히려 접촉각 이력이 작은 것을 볼 수 있다. 이는 부피 변화를 통해 측정한 접촉각 이력 측정에서는 액적이 다른 면으로 실제로 이동하는 것이 아니라 제자리에서 접촉각을 측정하는 것이므로 엄밀히 말해 구름 저항과 관련된 접촉각 이력과는 상이할 것으로 판단된다. 50 μL에서 ±10 μL로 체적을 변화시켰을 때 이 값이 일정 체적의 액적이 실제로 이동하기 직전의 전진각과 후진각과 동일한 것인지 고려할 필요가 있다. Fig. 6(c)는 구름 저항력을 계산하기 위해 틸팅법에서 측정한 고체-액체 계면의 길이, 즉 액적이 표면에 젖은 길이를 나타낸 것이다. 세 가지 평탄한 표면에서는 Dupre 방정식에 의해 정지되어 있을 때와 마찬가지로 가장 낮은 자유에너지를 갖는 상

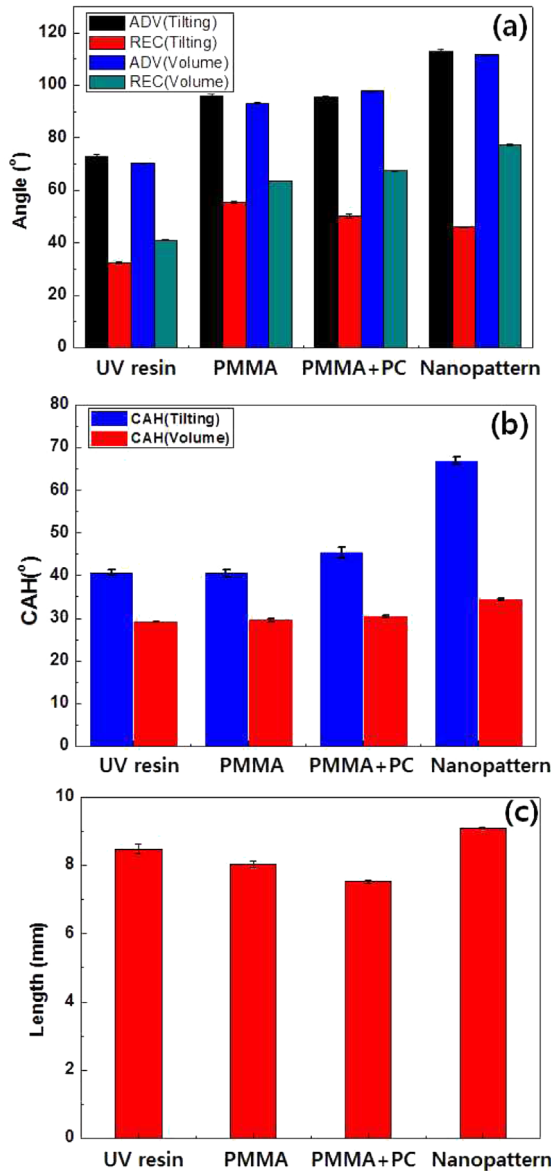


Fig. 6. Advancing and receding angle (a), contact angle hysteresis measured by tilting method and volume method (b), wetting length L measured during tilting method (c).

때, 즉 접촉각에 반비례하는 접촉 길이를 가짐을 확인할 수 있다. 그러나 나노 패터닝된 UV 경화 레진에서는 앞서 말한 피닝의 영향으로 인해 액적의 접촉 길이가 정지되어 있을 때와는 다르게 가장 크게 늘어나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 틸팅법을 이용하여 측정된 접촉각 이력(CAH)과 액적 길이를 사용하여 계산한 구름 저항력과 경사각과 액적의 체적을 이용하여 계산한 구름 저항력을 나타낸 것이다. 접촉각 이력과 액적 길이를 이용하여 계산한 구름 저항력이 경사각 측정에 의한 구름 저항력에 비해 높게 계산되었음을 확인할 수 있다. 접촉각 이력을 이용한 경우 평탄한 시편에서 Fig. 6(c)에서 보인 바와 같이 액적의 길이가 감소함에도 불구하고 접촉각 이력이 증가하여 구름 저항력이 증가하였음을 확인할 수 있다. 이와 같은

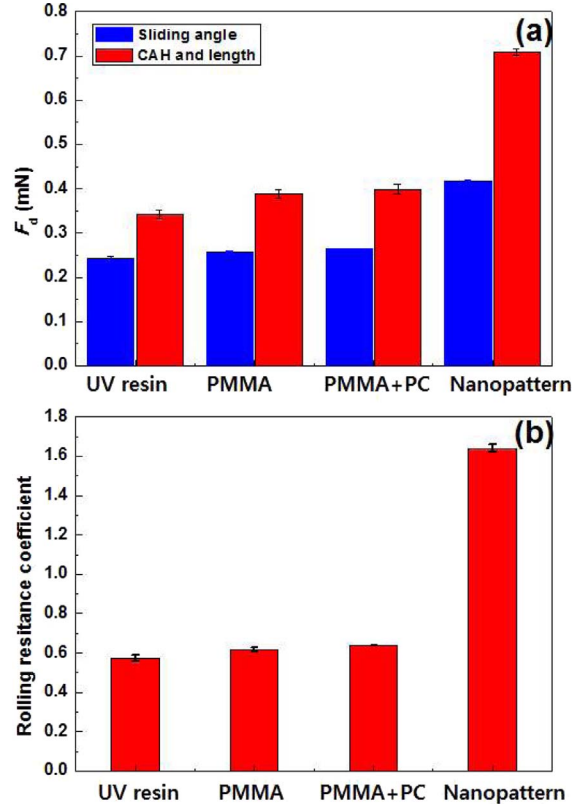


Fig. 7. Rolling resistance forces calculated from CAH and sliding angle (a) and rolling resistance coefficients for various surfaces (b).

거동은 경사각을 이용한 구름저항력에서도 동일하게 관찰되었다. 그러나 평탄한 시편에서는 구름저항력이 미세하게 증가하는 경향을 보였으나 나노패턴 시편에서는 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 상이한 구름저항력 결과는 접촉각 측정과 액적 길이 측정에서 오는 불확도의 증가에 기인한 것으로 보인다. 따라서 정확한 구름 저항력의 평가를 위해서는 정확도를 향상시킬 수 있는 경사각을 이용하여 구름저항력을 평가하는 것이 바람직할 것으로 보인다. Fig. 7(b)는 각 시편의 구름저항계수를 나타낸 것이다. 평탄한 시편의 경우 구름 저항 계수는 약 0.6으로 접촉각이 증가함에 따라 미세하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 나노패턴된 시편의 경우 1.6 정도로 급격히 증가되었음을 확인할 수 있다. 평탄한 UV레진의 접촉각이 65.6°이나 표면 거칠기를 증가시켜 접촉각이 112.2°로 증가되었으나 오히려 구름저항계수는 약 0.55에서 1.6 이상으로 증가하였다. 이와 같은 현상은 표면의 접촉각이 향상되는 CB 상태에 기인한 것으로 보인다. CB상태는 액체-고체-기체의 경계부가 국부적 영역에서 이동하지 않게 되어 액적이 액체-고체, 액체-기체의 복합적 경계를 가지게 됨으로써 높은 접촉각을 가지게 된다. 이와 같은 현상은 오히려 접촉각 이력을 증가시키게 되고 이로 인하여 구름저항계수가 급격히 증가한 것으로 판단된다. 본 결과를 통해 액적이 쉽게 이동할 수 있도록 접촉각뿐만 아니라 접촉각 이력을 고려하여 액적 구름저

항을 최소화할 수 있는 최적 패턴의 설계가 요구됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 접촉각 및 동접촉각 이력에 대한 표면의 거칠기의 영향을 평가하였다. 다양한 접촉각을 가지는 평탄한 시편과 나노임프린트 공정을 이용한 나노패턴 시편에 대한 정접촉각 및 동접촉각 평가를 실시하였다. 액적의 구름 저항을 평가하기 위해서는 동접촉각 측정법 중 경사법이 더 효과적임을 확인하였다. 평탄한 시편의 경우 접촉각이 증가함에 따라 접촉각 이력도 미세하게 증가하나 액적의 접촉 길이는 감소함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 구름저항계수를 고찰한 결과 평탄한 시편에 비해 정접촉각이 가장 높은 나노 패턴에서 구름저항계수가 급격히 증가함을 확인하였다. 따라서 접촉각 향상과 동시에 접촉각 이력 최소화를 위한 패턴의 최적화가 요구됨을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 평가 방법 및 결과는 향후 멀티스케일 패턴링을 이용한 초발수 표면 패턴에 적극 활용될 수 있을 것으로 보인다.

Acknowledgments

“이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음”.

References

1. L. Feng, S. Li, Y. Li, H. Li, L. Zhang, J. Zhai, Y. Song, B. Liu, L. Jiang and D. Zhu, “Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial”, *Adv. Mater.*, 14(24), 1857 (2002).
2. X. Gao, X. Yan, X. Yao, L. Xu, K. Zhang, J. Zhang, B. Yang and L. Jiang, “The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography”, *Adv. Mater.*, 19(17), 2213 (2007).
3. H. Yang and P. Jiang, “Self-cleaning diffractive macroporous films by doctor blade coating”, *Langmuir*, 26(15), 12598 (2010).
4. T. Ishizaki and M. Sakamoto, “Facile formation of biomimetic color-tuned superhydrophobic magnesium alloy with corrosion resistance”, *Langmuir*, 27(6), 2375 (2011).
5. L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur, J. A. Taylor, T. Krupenkin and J. Aizenberg, “Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets”, *ACS Nano*, 4(12), 7699 (2010).
6. Y.-L. Zhang, J.-N. Wang, Y. He, Y. He, B.-B. Xu, S. Wei and F.-S. Xiao, “Solvothermal synthesis of nanoporous polymer chalk for painting superhydrophobic surfaces”, *Langmuir*, 27(20), 12585 (2011).
7. Y.-L. Zhang, H. Xia, E. Kim and H.-B. Sun, “Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties”, *Soft Matter*, 8(44), 11217 (2012).
8. X.-M. Li, D. Reinhoudt and M. Crego-Calama, “What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces”, *Chem. Soc. Rev.*, 36, 1350 (2007).
9. M. Ma and R. M. Hill, “Superhydrophobic surfaces”, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 11(4), 193 (2006).
10. H. Lim, J. Park and W. Kim, “Micro/nanostructured superhydrophobic surface (in Kor.)”, *Elastomers and Composites*, 44(3), 244 (2009).
11. B. Dean and B. Bhushan, “Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a Review”, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, 4775 (2010).
12. J.-G. Park, N.-G. Cha, H.-J. Shin and J.-H. Park, “Characterization of fluorocarbon thin films by contact angle measurements (in Kor.)”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 6(1), 39 (1999).
13. A.-M. Yu, N. Kang, K. Lee and J.-H. Lee, “Effects of nano-sized diamond on wettability and interfacial reaction for immersion Sn plating”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(3), 59 (2010).
14. H. Teisala, M. Tuominen, M. Aromaa, M. Stepen, J. M. Makela and J. J. Saarinen, “Nanostructures increase water droplet adhesion on hierarchically rough superhydrophobic surfaces”, *Langmuir*, 28(6), 3138 (2012).
15. T. Young, “An essay on the cohesion of fluids”, *Philos. Trans. R Soc. Lond.*, 95, 65 (1805).
16. R. E. Johnson Jr and R. H. Dettre, “Contact angle hysteresis. III. Study of an idealized heterogeneous surface”, *J. Phys. Chem.*, 68(7), 1744 (1964).
17. M. Ruths, A. D. Berman and J. N. Israelachvili, “Surface forces and nanorheology of molecularly thin films”, in *Nanotribology and Nanomechanics*, B. Bhushan Eds., pp. 417-515. Springer, Berlin Heidelberg (2008).
18. B. Bhushan, M. Nosonovsky and Y. C. Jung, “Towards optimization of patterned superhydrophobic surfaces”, *J. R. Soc. Interface*, 4, 643-648 (2007).
19. L. S. Levitov, “Van der Waals' friction”, *Europhys. Lett.*, 8(6), 499 (1989).
20. R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 28(8), 988 (1936).
21. A. B. D. Cassie and S. Baxter, “Wettability of porous surfaces”, *Trans. Faraday Soc.*, 40, 546 (1944).