

초소수성(Superhydrophobic) 표면 제조 및 응용

나정걸
에너지기술연구원

1. 들어가며



Fig. 1 sacred lotus

연꽃은 더러운 연못에서 자라지만 그 더러움을 자신의 꽃이나 잎에 묻히지 않아 동양에서는 예로부터 성자의 꽃으로 추앙 받아 왔다. 연이 스스로를 정화하는(self-cleaning) 신비는 어디에서 비롯된 것일까?

90년대 중반 식물학자들의 연구에 의해 연의 자기정화 기능이 상당부분 밝혀졌다. 연 잎은 표면이 왁스층으로 덮여 있으며, 표면이 마이크로-나노의 계층적(hierarchical) 구조로 이루어져 물이 잎에 잘 젖지 않는다. 방울로 맺힌 물은 쉽게 표면을 미끄러져 가며 더러운 물질들을 씻겨 내준다.

안개가 짙게 내린 아프리카 나미브 사막의 이른 아침, 풍뎅이의 일종인 *Stenocara*는 갈증을 해결하고 있다. 그의 등껍데기는 왁스가 코팅된 소수성 부분과 왁스 성분이 없는 친수성 부분이 번갈아 배열되어 있다. 물방울로 응결되지 않던 안개 속 미세 수분은 친수성 부분에서 쉽게 응축이 되고 일정한 크기가 되면 소수성 부분을 타고 흘러 내려 풍뎅이의 목을 축여 준다.



Fig. 2 tenebrionid beetle - *Stenocara* sp.

자연계에 존재하는 초소수성 구조에 대한 이해가 깊어지고, 나노가공기술이 발전함에 따라 ‘오염없는 표면’, ‘발열없는 전자소재’ 등의 꿈이 현실화되고 있다. 근원적인 메커니즘을 밝혀내기 위한 연구는 아직까지 기초 단계에 머물러 있으나, 벌써 몇몇 응용 제품들은 출시를 앞두고 있다. 본 고에서는 소수성 표면에 대한 기초 메커니즘, 이러한 소수성 표면을 만드는 간단하고 저렴한 방법들, 그리고 현재 활발히 시도되고 있는 몇 가지 응용분야에 대해 기술하고자 한다.

2. 표면 상에서 액체 방울의 거동 메커니즘

고체 표면 위의 물방울은 어떠한 모양을 나타낼까?

이에 대한 기본적 식이 물리학자인 Thomas Young에 의해 19세기 수립되었다. 액체 방울의 모양은 방울(액체)과 주변 공기(기체), 방울이 부착된 표면(고체)의 세가지 계면에서 서로 작용하는 표면장력에 의해 결정된다(식(1)).

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (1)$$

위 식에서 γ 는 계면 간의 표면장력을 나타내고 하첨자는 각 계면을 나타낸다. 만일 액체 방울이 수 마이크로에서 밀리미터 크기로 작아 중력의 영향이 무시될 수 있다면, 이들은 고체 표면과 θ 의 각을 이룬 구형 모자(spherical cap)처럼 될 것이다.

Young의 이름을 딴 (1)식은 표면에서의 wetting 현상을 설명하는 기초를 제공하고 있다. 액/고와 액/기 계면의 표면장력의 합이 고/기 계면의 장력과 같다면 (1)식에서 $\cos \theta$ 는 1이 되고(즉 θ 가 0° 가 되고) 액체 방울을 완전히 퍼져 필름을 형성할 것이다. 이러한 표면을 고에너지 표면이라고 부르고, 이 때 표면은 쉽게 젖게 된다. 반대로, 고/기 계면의 표면에너지가 매우 낮다면 접촉각은 이론상 180° 까지 커져 액체 방울은 표면을 거의 적시지 못할 것이다.

고에너지 표면(초친수성 표면)은 표면 힘 조절만으로 비교적 쉽게 만들 수 있다. 그러나, 초소수성 표면은 그리 단순하지 않다. Fluoropolymer 코팅이나 silane 코팅 등의 화학적 처리만으로는 물의 접촉각을 120° 이상 올리기 힘들다. 접촉각을 180° 근처까지 추가로 올리려면 물리적 처리 방법이 고안되어야 한다. 연잎의 구조처럼 표면 구조를 변형시켜야 하는 것이다.

표면 구조가 방울의 모양에 미치는 기본적인 영향은 Wenzel이 세운 식(식(2))에 의해 나타낼 수 있다.

$$\cos \theta^* = r \cos \theta \quad (2)$$

Wenzel 식은 Young 식에 나오는 매끄러운 표면에서의 접촉각 θ 와 거친 표면에서의 접촉각 θ^* 과의 관계를 나타내고 있다. 위 식에서 r 는 고체 표면의 roughness를 의미하는데, 표면이 거칠 때와 매끄러울 때의 면적비이다. Wenzel의 식에 따르면 친수성 표면($\theta < 90^\circ$)이 거칠어지면($r > 1$) 접촉각이 더 작아져 잘 젖게 되고, 소수성 표면($\theta > 90^\circ$)이 거칠어지면($r < 1$), 접촉각이 커져 잘 젖지 않게 된다. 따라서 고에너지 표면을 거칠게 하면, 물방울은 계면에서 'sink'될 것이다.

Wenzel에 따르면 거친 표면에서는, 고/액, 고/기 계면의 면적이 표면의 자유에너지에 미치는 영향이 커지게 된다. 고체 표면에서 액체 방울은 모든 표면과 접촉하고 있다는 가정이 Wenzel 식에 숨어 있다(Fig. 3(a)).

돌기가 더욱 깊어지면, Wenzel의 가정은 작동하지 못한다. 소수성 표면에 가늘고 깊은 채널이 형성되어 액체는 채널 내부와 접촉할 수 없게 된다. 이러한 표면에서 액체 방울은 고체로 된 돌기와 기체 위에 얹혀 있게 된다(Fig. 3(b)). 이 상황을 수학적으로 묘사하기 위하여 거친 표면을 공기 주머니(air pockets)들과 고체로 이루어진 비균일 표면으로 가정하고 Cassie와 Baxter는 아래와 같은 식을 수립하였다.

$$\cos \theta^* = -1 + \Phi_s(1 + \cos \theta) \quad (3)$$

위 식에서 Φ_s 는 고체 부분이 표면에서 차지하는 분율이다. 따라서, Φ_s 가 0에 가까운 '매우 거친' 표면에 대해, θ^* 는 180도가 되어 초소수성 성질을 나타낼 것이다. 분자 수준에서 바라보면, 마치 fakir 요기들이 바늘 카페트에 가부좌를 튼 것처럼 보일 것이다.

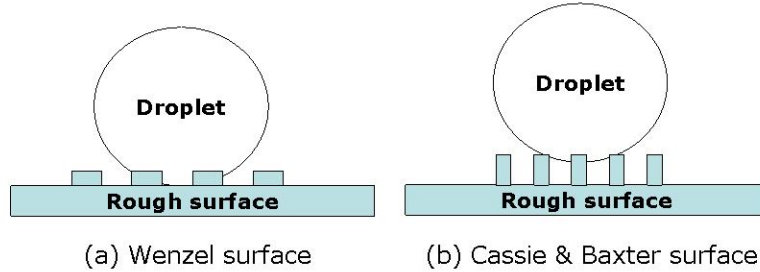


Fig.3 Rough Surface

Wenzel 식이나 Cassie & Baxter 식은 평형 상태에서의 액체 방울의 모양을 묘사한 것이다. 그렇다면, 거친 표면에서 액체 방울은 어떠한 동적 거동을 나타낼까?

초소수성 표면에서 액체 방울의 동적 거동은 David Quéré 에 의해 자세히 연구되었다. 고체 표면 위의 액체 방울은 대개 advancing angle(θ_a)과 receding angle(θ_r)(Fig. 4)이 다른데, 이는 고-액-기 세 계면이 교차하는 contact line 의 모양과 관련이 있다.

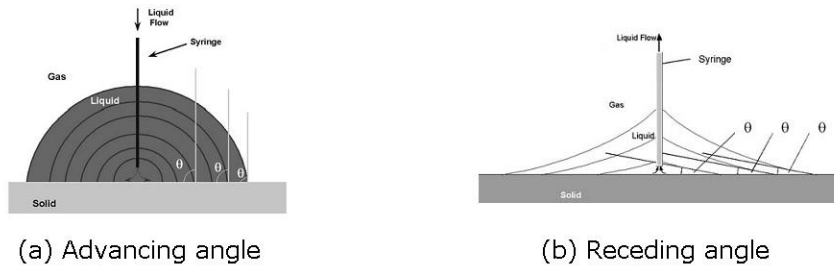


Fig. 4 Dynamic behavior of droplet on surface

방울의 접촉 면적은 접촉각이 증가할수록 줄어들므로, contact line 은 쉽게 변형되지 않는다. 따라서, 접촉각이 굉장히 커진다면 advancing 과 receding 시 접촉각 사이의 hysteresis 가 크게 줄어들 것이다. 접촉각 hysteresis 는 액체 방울의 운동과 직결되므로 실제 적용에 중요한 영향을 미친다. 액체 방울을 움직이기 위한 pinning force 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F = \gamma_{lg}(\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad (4)$$

Hysteresis 가 크거나, 그리고 pinning force 가 충분하지 않다면, 액체 방울은 구르지 못하고 표면에 붙어 있거나 스며들 것이다.

표면 위에서 액체 방울의 동적 거동은 표면 roughness 를 제공하는 미소 구조의 크기에 영향을 받는다. 미소 구조의 크기가 수십 마이크로 정도라면 액체 방울은 미소 구조보다 훨씬 크더라도 여전히 변형될 수 있다. 따라서, 초소수성 표면을 만들기 위해서는 이보다 작은, 나노 구조가 일반적으로 필요하게 된다.

3. 초소수성 표면 제조 방법

거친 표면은 크게 1) 규칙적 표면과 2) 랜덤(불규칙) 표면, 3) 계층(hierarchical) 구조 표면의 세가지로 나눌 수 있다.

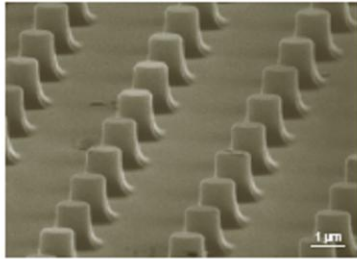


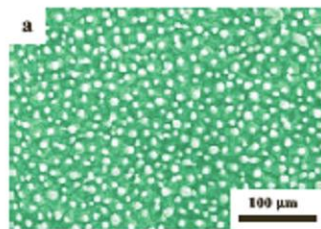
Fig. 5 A designed rough surface

규칙적 거친 표면은 **fakir** 요기의 카페트와 유사한 모습을 띤다(Fig. 5). 이러한 구조를 만들기 위해 보통 플라즈마-에칭 기술을 사용한다. 구조 생성 후, 표면에너지를 낮추어 소수성을 부여하도록 **organo-silane** 이나 **Fluorosilane** 등에 노출시킨다.

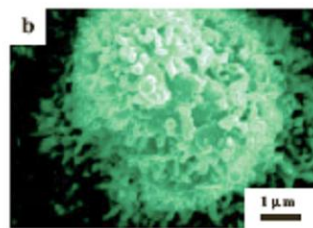
실용적인 입장에서는 가공이 훨씬 쉬운 랜덤 표면이 유용하다. 이들은 다양한 스케일의 내재된 **roughness** 를 갖고 있어 초소수성 효과가 높아질 뿐 아니라 외부 조건에 비교적 잘 견딜 수 있다. 더구나, 랜덤 표면은 다양한 금속이나 비금속 재료로부터 만들 수 있는 장점이 있다.

최근에 프랙탈 구조와 같이 계층 구조로 되어 있는 표면이 관심의 대상이 되고 있다. 계층 구조의 아이디어는 자연계로부터 배운 것이다. 잎의 표면은 진정한 프랙탈 구조는 아니나, 계층 구조를 가지고 있으며 이에 대한 관찰은 새로운 표면 제조 및 응용분야의 장을 열어 주었다.

1) 자연이 만드는 초소수성 표면



(a) SEM image of the surface



(b) Enlarged view of a single papilla



(c) Ball-shaped water droplet on a non-wettable leaf

Fig. 6 Surface structure of lotus leaf

연잎의 자기정화 기능은 다양한 응용 분야에서 관심을 끌고 있다. 서론에서 언급하였듯이 연잎 표면은 큰 접촉각(약 161°)과 작은 슬라이딩 앵글(약 2°)로 대표되는 초소수성 성질을 가지고 있다. 연잎의 SEM 이미지를 보면, 5에서 9 마이크로 정도의 지름을 갖는 돌기들(papillae)이 랜덤하게 연잎에 퍼져 있고(Fig. 6(a)), 각 돌기에는 124.3 나노미터 정도의 나노가지들이 형성되어 있는, 마이크로-나노 계층 구조를 확인할 수 있다(Fig. 6(b)).

현재까지, 용융된 alkylketen dimer 의 응고(solidification), PTFE 존재 하에서 PP 의 플라즈마 중합/에칭, TMMOS 의 MWPE-CVD(microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition), 알루미늄의 양극산화(anodic oxidization), 끓는 물에서 다공성 알루미늄 젤 필름의 immersion, 실리카나 boemite 와 승화성 물질의 혼합, 상분리, 몰딩 등 다양한 방법들이 생물계를 본뜬 계층 구조 표면을 만들기 위해 제안되었다. 그러나, 가혹한 합성 조건, 여러 단계로 이루어진 공정, 고가의 제조 비용 소요 등 실제 적용에 있어 많은 문제점이 지적되었고, 이에 따라 비교적 간단하고 저렴한 방법을 찾기 위한 노력이 계속되고 있다. 다음 절에서는 간단한 계층 구조 제조 방법 몇 가지를 소개하기로 하겠다.

2) 계층 구조 형성에 의한 초소수성 표면 제조

(1) FPU-PMMA 고분자 코팅

DMF 용매를 사용하여 단일 스텝만으로 범용성 고분자인 PMMA 와 FPU(fluorine-end-capped polyuretane)로 이루어진 초소수성 고분자 코팅을 만들었다. 기본적인 합성 메커니즘을 Fig. 7 에 나타내었다.

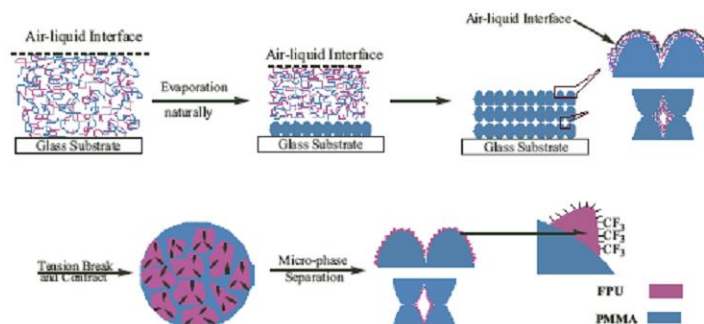


Fig. 7 Possible mechanism of formation of the micro-nano binary structure of FPU/PMMA mixture

FPU/PMMA/DMF 용액을 glass substrate 상에서 건조시키면, 증발 초기에 용해도가 나쁜 PMMA 가 먼저 스폰지 구조로 deposition 되면서 표면적이 크게 증가하게 된다. DMF 증발이 계속됨에 따라 FPU 가 PMMA 스폰지 내부 cavity 로 deposition 되는데, PMMA substrate 의 넓은 표면적으로 인하여 내부 장력이 점차 증가하게 되고, 어느 이상이 되면 장력을 견디지 못하여 조각나게 된다. 조각난 FPU 들은 수축되어 PMMA 표면에서 나노스케일 구조를 형성하게 된다.

Fig. 8(a)를 보면 FPU/PMMA 의 계층구조를 확인할 수 있다. 단일 스텝 공정에 의해 제조된 표면에서 물방울의 접촉각은 166° 로 초소수성 성질을 나타내며(Fig. 8(b)), 구조의 독특함으로 인하여 마치 생물시스템처럼 자기 복구 기능을 갖게 된다. 즉, 스폰지 구조의

자기 유사성과 **cavity** 내부에서 자리잡은 나노구조로 인하여 노출된 외부 표면이 파괴되더라도, 여전히 초소수성 성질을 가질 수 있다.

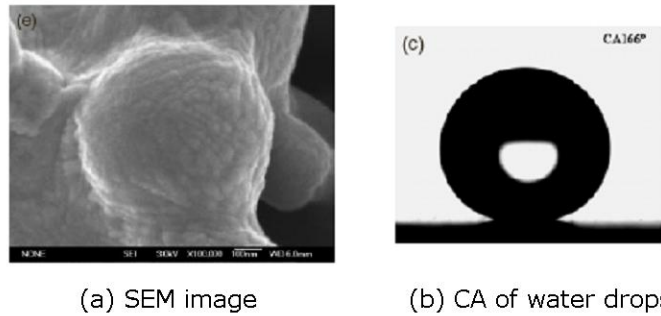


Fig. 8 FPU/PMMA superhydrophobic surface

(2) PP-PMMA 블록 공중합체 코팅

FPU/PMMA 초소수성 구조를 만든 연구진에 의해 다른 방식의 초소수성 표면 제조법이 제안되었다. 이 방식에서는 **PP-PMMA** 블록 공중합체가 사용되었다. 기본적인 합성 메커니즘을 Fig. 9 에 나타내었다.

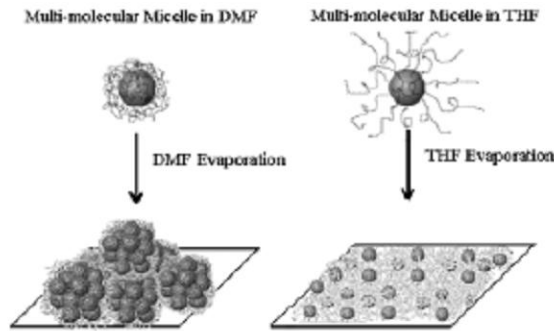


Fig. 9 Possible mechanism of formation of the micro-nano binary structure of PP-PMMA block copolymer

PP-PMMA 블록 공중합체를 DMF 에 녹여 **micelle** 용액을 만들었다. 각 **micelle** 은 불용성의 **PP core** 와 용해성의 **PMMA shell** 로 이루어져 있다. PP/PMMA/DMF 용액을 **glass substrate** 에 캐스팅하고 건조시켰다. DMF 가 증발되면서 나노 스케일의 다분자 **micelle** 들이 자유에너지를 최소화하기 위해 모여들어 마이크로 스케일의 응집체를 형성한다. 따라서, 계층구조로 된 거친 표면의 합성이 가능하다. DMF 대신 THF 를 사용하면, PMMA 에 대한 용해능이 좋기 때문에 PP core 표면의 PMMA 사슬이 이웃 **micelle** 로 쉽게 침투할 수 있어 매끄러운 표면이 만들어진다. TCB 처럼 PMMA 와 PP 모두에 용매능력을 갖는다면 **micelle** 자체가 형성되지 않게 된다.

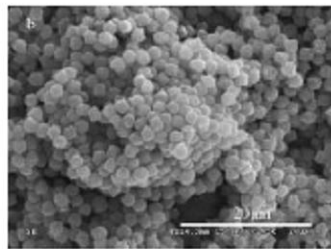


Fig. 10 Micelles deposited on a surface

Fig. 10 을 보면 glass substrate 에 deposition 된 PP-PMMA 의 계층구조를 확인할 수 있다. 이렇게 제조된 PP-PMMA 공중합체 표면은 160.5°의 접촉각과 9°의 슬라이딩 앵글을 갖는다. 앞서 언급한 방법보다 진일보한 면은 PU 로부터 FPU 를 얻기 위한 공정 없이, 소수성 고분자인 PP 를 바로 이용했다는 점이다.

(3) isotactic PP 고분자 코팅

i-PP(isotactic PP)는 소수성 고분자로 190 °C 정도의 녹는점을 가지는데 가공 조건에 따라 다양한 morphology 를 형성한다. 다공성 i-PP 고분자를 얻는 방법을 응용하여 i-PP 로 이루어진 초소수성 표면을 제조하였다.

과립 모양의 i-PP 를 p-xylene 으로 용해하고, MEK 를 nonsolvent, 즉 침전제로 사용하여 glass substrate 에 deposition 시켰다. 증발 과정이 끝난 후 형성된 표면의 SEM 이미지와 물방울의 접촉각을 Fig. 11 에 나타내었다. 이 때 물방울의 접촉각은 160° 정도였다.

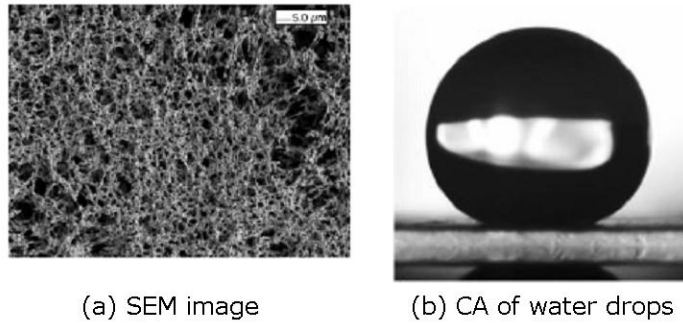


Fig. 11 i-PP superhydrophobic surface

MEK 를 사용함으로써 몇 가지 이득을 얻을 수 있었는데: (1) i-PP 침전제로 작용하여 결정화 시간을 줄이고 작은 응집체를 형성시켰다, (2) 산소가 포함되어 있어 고분자 용액이 glass substrate 표면에 잘 젖게 됨으로써 생성된 코팅의 균질성을 증가시킬 수 있었다.

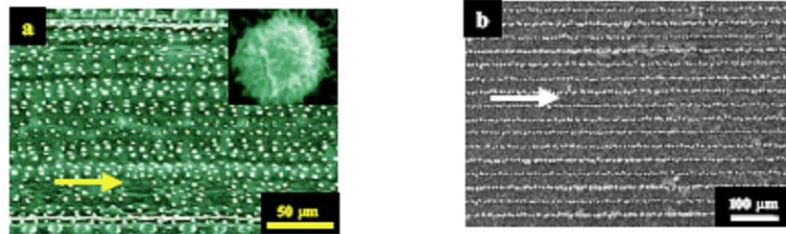
3)표면 제어에 의한 초소수성 특성 조절

단순히 초소수성 특성만을 나타내는 것이 아니라, 조건에 따라 wetting 특성을 가역적으로 바꾸거나, 재생 특성을 부여하여 기능성을 더욱 높이려는 연구 역시 활발히 진행 중이다. PS(polystyrene)과 같은 고분자를 oxygen-plasma 처리하면 표면에 다양한 산소 함유 그룹들이 생성된다. 따라서, 플라즈마 산화처리된 PS 는 고분자 전해질처럼 거동해, pH 에 따라 wetting 특성이 달라진다.

응용분야에 있어 특별한 관심의 대상이 되고 있는 기술은 표면 패터닝인데 리소그래피 기술 등을 사용하여 다양한 소수성/친수성 고분자들로 표면을 구성하는 것이다. 잘 젖는 poly(acrylic acid)와 젖지 않는 poly(*t*-butyl-acrylate)의 고분자 브러쉬를 실리콘 웨이퍼에 패터닝시켜 각 부위별로 접촉각이 80°나 차이 나는 체스판을 만든 예가 보고되었다.

나노-마이크로 구조의 배치를 변화시켜 액체 방울의 동작을 제어할 수 있다. 빗잎을 보면 마이크로 돌기가 잎의 끝부분을 향해 한쪽 방향(one-dimensional)으로 배치되어 있어 물

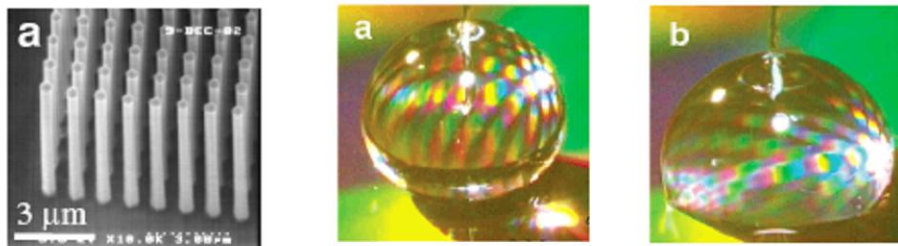
방울의 슬라이딩 앵글이 방향에 따라 달라지게 된다(Fig. 12(a)). 이는 물방울이 고체 표면이나 **air pocket** 들과 이루는 **contact line** 때문이다. 이에 착안하여 나노-마이크로 구조를 서로 다른 간격으로 정렬시킨 **ACNT** 필름을 제조하였더니(Fig. 12(b)), 정해진 방향으로만 물방울을 이동시킬 수 있었다.



(a) Surface of a rice leaf (b) Surface of rice-like ACNT films

Fig. 12 Arrangement of microstructures for anisotropic dewetting

최근 **Lucent-Bell Lab.**에서 **electrowetting** 을 응용하여, 제조된 초소수성 표면의 성질을 동적으로 손쉽게 변화시킬 수 있는 기술을 개발하였다. 실리콘 표면에 테프론과 유사한 소수성의 재료로 코팅된, 적혈구보다 30 배 이상 가는 **post** 들을 배치하였다(Fig. 13(a)). 실리콘 표면에 전압이나 열을 가함으로써, 액체를 뭉치게 하거나 구르게 할 수도 있고, **post** 를 따라 미끄러지게 하거나, 접촉시킬 수 있었다. (Fig. 13(b), (c))



(a) Nanostructured surface (b) Rolling ball state (c) Wetting state

Fig. 13 Dynamic tuning of liquids on nanostructured surfaces

4. 초소수성 표면의 응용

물과 사이가 극도로 나쁜, 초소수성 특성은 일상 생활에서도 쉽게 응용분야를 찾을 수 있다. 예를 들면 초소수성 표면을 이용하여 폭설에도 눈이 안테나나 유리창에 쌓이지 않도록 하거나, 신호등이 자체적으로 정화되도록 하거나, 잠수함 동체의 **drag force** 를 줄여 추진이 쉽도록 할 수 있다.

1) Nano/Biotechnology

Spotting 기술에 의해 구축된 **cDNA-microarray** 에서 **DNA** 나 단백질 등의 생물학적 분자를 오염없이 제어할 수 있다면 분석의 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것이다. **Microarray** 에서 사용하는 **glass slide** 는 약소수성화되어 있는데, **cDNA** 용액 방울이 마르면서 반지 모양의 흔적이 남게 된다. 이는 물방울 내 분산된 입자들이, 증발이 가장 빠른,

표면의 **contact line** 부분으로 이동하기 때문에 발생하는 것으로, 표면에 초소수성 성질을 갖게 한다면 접촉 면적이 현저히 감소하여 이러한 **doughnut-effect** 를 상당부분 줄일 수 있을 것이다.

친수성/소수성 패터닝에 의하여 물방울에 기반한 미소유체 채널 시스템(Fig. 14)을 개발할 수 있다. 현재 사용되는 미소유체 기술은 닫힌 채널 내부에서 벌크 유체가 흐른다. 이와 비교하였을 때, 방울 기반 미소유체 시스템이 갖는 장점은 오픈된 구조로 인하여 세척이 쉽고, 미세관이 막힐 가능성이 원천적으로 제거된다는 점이다.

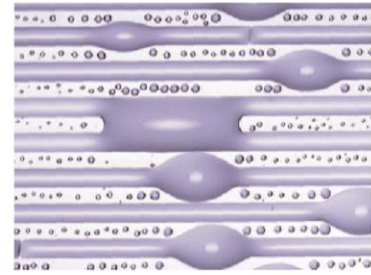


Fig. 14 Liquid channels on a hydrophilically-hydrophobically patterned substrate

친수성/소수성 패터닝에 의존하지 않고, 초소수성 표면 만으로도 미소유체 시스템을 구성할 수 있다. 초소수성 표면에서의 액체 방울은 **substrate** 와 매우 작은 접촉 면적을 가지므로 정전기력이나 표면 음파만으로 쉽게 구동할 수 있다.

2) Self-cleaning

자기 정화를 이용한 가정용 응용분야로 돌아가 보자. 천장 타일부터 욕실 표면, 집의 내외벽들까지 우리는 청소가 필요한 수많은 표면들에 둘러 쌓여 있다. 쉽게 상상할 수 있는 대규모 거래처는 유리창 시장이다. 유리창, 특히 마천루 꼭대기의 유리창을 청소하는 것은 힘들고 비용이 많이 든다. 빌딩 관리자뿐 아니라 모든 주부들은 자기 정화 유리가 저렴하게 상용화된다면 여기에 속 빠져들 것이다. 초친수성 표면에 의한 자기 정화 방식은 이미 시제품이 출시된 반면, 초소수성 표면에 의한 방법은 아직 상용화가 요원한 형편이다. 그러나, 이 방향으로 계속 연구가 진행 중이다.

초소수성 표면은 생물계에서 많은 해답을 얻어 왔다. 초소수성 요소와 **biomimesis** 를 결합하려는 야심찬 시도 역시 당연한 수순일 것이다. 연잎이 표면의 왁스층을 계속 수리하거나 보충하는 것처럼, 소수성 고분자가 담긴 **reservoir** 를 유리에 **embedded** 시켜 **self-repair** 가 가능한 **self-cleaning** 표면을 만드려는 시도가 진행 중이다. 소수성 표면층이 분해되거나 고갈되면 다시 보충이 되고, 따라서 초소수성을 회복할 수 있다.

3) Electric Device



Fig. 15 Fried egg on CPU

고출력 전자칩과 스위치들은 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 가까운 온도에서 구동 중이다(Fig. 15). 열을 내뿜고 있는 전자장비로 가득 찬 사무실을 적절히 냉각하는 것은 현재로서는 낭비가 심할 수밖에 없다. 왜냐하면, 열은 심지어 스위치나 칩 내부에서도 불균일하게 분포되어 있기 때문이다. 장비의 모든 부위가 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 것처럼 냉각 시스템을 운용해야 한다.

초소수성과 친수성을 조절할 수 있는 표면으로 이 문제를 해결할 수 있을지 모른다.

침의 특정 부위로 냉각수가 이동하여, sink 됨으로써 온도를 신속히 그리고 효과적으로 떨어뜨린다. 과열을 흡수한 냉각수는 초소수성 성질을 회복한 후 재빨리 빠져 나간다. 이러한 냉각 시스템은 정확히 열이 발생하는 곳에서 스스로 작동할 수 있다.

제어 가능한 초소수성 표면은 배터리 분야에도 응용할 수 있다. 현재의 배터리는 사용되지 않더라도 전기화학 반응이 일정한 수준으로 끊임없이 일어난다. 따라서 사용시간에 관계없이 배터리는 점차 분해된다. 초소수성 표면을 사용하여 액체 전해질을 고립시킬 수 있다면, 실제 전력이 필요할 때만 전기화학반응을 일으킬 수 있다. 특히 센서에 사용되는 배터리처럼 특정 상황에서만 많은 출력을 요구하는 경우 이러한 초소수성 응용 배터리는 이상적으로 사용될 수 있을 것이다.

19 세기, 오스카 와일드의 연극, "The importance of being Earnest (어니스트 되기의 중요성)" 에서 Bracknell 여사는 이렇게 말했다. "유감스럽게도, 우리는 외관의 시대(age of surfaces)에 살고 있어". 오늘날, 우리는 보다 심한 표면의 시대(age of surfaces) 한 가운데 놓여 있으나, 이를 후회하지 않는다. 표면을 제어하고 이해함으로써 우리는 보다 많은 것을 이룰 수 있으므로……

5. 참고문헌

- (1) Blossey, R. *Nature Mat.* **2**, 301-306 (2003)
- (2) Parker, A. R. & Lawrence, C. R. *Nature* **414**, 33-34 (2001)
- (3) Shirtcliffe, N. J., McHale, G., Newton, M. I., Chabrol, G. & Perry, C. C. *Adv. Mat.* **16**, 1929-1932 (2004)
- (4) Feng, L., Li, S., Li, Y., Li, H., Zhang, L., Zhai, J., Song, Y., Liu, B., Jiang, L. & Zhu, D. *Adv. Mater.* **14**, 1857-1860 (2002)
- (5) Xie, Q., Xu, J., Feng, L., Jiang, L., Tang, W., Luo X. & Han C. C. *Adv. Mater.* **16**, 302-305 (2004)
- (6) Xie, Q., Fan, G., Zhao, N., Guo, X., Xu, J., Dong, J., Zhang, L., Zhang, Y. & Han C. C. *Adv. Mater.* **16**, 1830-1833 (2004)
- (7) Erbil, H. Y., Demirel, A. L., Avci, Y. & Mert, O. *Science* **299**, 1377-1380 (2003)
- (8) Ming, W., van Benthem, R. & de With, G. *Nano Lett.* **5**, 2298-2301 (2005)
- (9) Krupenkin, T. N., Taylor, J. A., Schneider, T. M. & Yang, S. *Langmuir* **20**, 3824-3827 (2004)
- (10) http://www.lucnet.com/news_events/articles/031904.html
- (11) <http://www.lucnet.com/press/0304/040312.bla.html>
- (12) <http://www.lucnet.com/press/0904/040928.bla.html>