

## 고내구성 초소수성 표면

자가세정, 안티바이오파우링, 안티아이스 등 다양한 분야에 활용이 기대되는 초소수성 표면은 물과의 계면에 넓은 공기 층 형성이 필수이기 때문에, 다기공구조 혹은 높은 거칠기를 갖는 구조로 이루어진다. 지난 10년간 물에 젖지 않는 다양한 초소수성 표면이 개발되어왔으나, 이러한 구조적 특성으로 인해 초소수성 표면의 물리적 안정성 및 내구성 확보에 많은 어려움이 있어왔다. 이에 영국 University College London의 Manish K. Tiwari 교수팀은 불화에폭시 레진(fluorinated epoxy resin)과 불화탄소 오일, 그리고 불화탄소 고분자(polytetrafluoroethylene) 나노입자를 배합한 용액을 스프레이 분사를 통해 코팅하는 간단한 방식으로 뛰어난 내구성의 초소수성 표면을 구현하였다. 이러한 고내구성 초소수성 코팅은 향후 자동차, 건축 외장재 등 다양한 분야에서 널리 활용될 수 있을 것으로 보고하고 있다.

본 연구결과는 “All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance”라는 제목으로 2018년 *Nature Materials*에 게재되었다.

<C. Peng et al., *Nat. Mater.*, **17**, 355 (2018),  
<https://doi.org/10.1038/s41563-018-0044-2>>

## 불화탄소를 이용하지 않는 고온 발수 표면

발수 표면에 대한 최근 연구의 일환으로 뜨거운 물에 발수성을 나타내는 표면 처리 기술이 개발되고 있다. 기존에 보고된 바 있는 고온 발수 표면은 주로 불화탄소(fluorocarbon)를 이용한 코팅 표면이나 다공성 표면에 윤활층이 도포된 표면 등이 있으

며, 이들은 90°C 이상의 뜨거운 물에 대해서 발수성이 있다는 사실이 실험을 통해 입증되었다. 하지만 불화탄소 계열의 화합물들은 인체유해성 이슈가 있고 또한 표면 위에서 액적의 이동 속도가 느리다는 문제가 있어 식품산업, 섬유산업 등 많은 분야에서 적용에 어려움이 있어왔다.

이에 Keio University의 Seimei Shiratori 교수팀은 Si-O, Si-C 결합과 벤젠고리를 가지고 있는 phenyltriethoxy-silane (PTES)을 이용한 표면 개질 기술을 개발함으로써 불화탄소 계열의 화합물을 사용하지 않으면서도 뜨거운 물에 안정한 표면의 제작이 가능하도록 하였다. 이 표면은 PTES에 존재하는 벤젠고리의 파이 전자 상호작용( $\pi$ -electron interaction)을 통해 다양한 윤활제들을 표면에 안정적으로 고정시킬 수 있다고 설명되었다. 연구진은 제작된 표면의 PTES 밀도가 클수록 윤활층이 끓는 물에 대하여 높은 저항성을 갖는다는 것과 윤활제로 올레산을 사용할 경우 최대 90°C의 물에 대하여 안정적으로 발수성을 나타낸다는 것을 밝혔다. 끝으로, 연구진은 식용 기름들을 윤활제로 사용함으로써 위의 표면을 식품 포장 시스템에 응용할 수 있을 뿐만 아니라 높은 온도를 필요로 하는 여러 분야에서 활용할 수 있을 것으로 기대한다고 보고하였다.

본 연구결과는 “A fluorine-free slippery surface with hot water repellency and improved stability against boiling”이

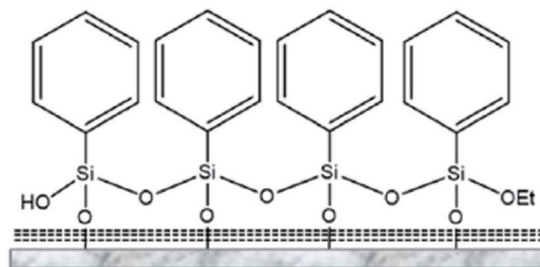


그림 2. 고온 발수 표면의 분자구조.



그림 1. (a) 고내구성 초소수성 표면의 구조, (b) 물방울 튕김(bouncing) 거동.

라는 제목으로 2018년 *ACS Applied Materials & Interfaces*에 게재되었다.

<R. Togasawa et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 4198 (2018), DOI:10.1021/acsami.7b15689>

## 친수성 및 나노 구조 표면을 이용한 기름/물 분리기

기름/물 분리기 기술은 해양환경에 심각한 영향을 미치는 산업 폐수나 석유 등의 유출 문제 해결을 위해 지속적으로 연구되어 왔다. 초기 기름/물 분리 기술로는 기름은 통과할 수 있지만 물은 통과할 수 없는, 초친유성(superoleophilic) 및 초발수성(superhydrophobic)의 성질을 가지는 분리막이 개발되었다. 이 분리막은 적은 에너지 소비로 간단한 공정을 거쳐 높은 효율로 물과 기름을 분리할 수 있었으나, 기름에 의해 분리막이 쉽게 오염되어 시간에 따라 분리 효율이 감소하는 문제로 인해 지속적인 사용이 불가능하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 초친수성 및 수중에서 초발유성을 가지는 분리막의 연구가 진행되었고, 다양한 분리막이 개발되었지만 합성 과정이 복잡하거나 특별한 장비에 의존하여 합성하기 때문에 높은 원가로 인해 대량 생산이 힘든 단점이 있었다.

이에 Harbin Institute of Technology의 Zhongjun Cheng 교수팀은 11-mercapto-1-undecanol이 포함된 에탄올 용액에 구리메시를 담가 12시간 동안 반응시키는 단순 공정을 통해, 히드록실(hydroxyl) 작용기를 함유한 나노구조를 구리메시 표면에 구현하였다. 이를 바탕으로 친수 특성을 지닌 히드록실 작용기에 나노구조가 더해진 초친수성 및 수중에서 초발유성을 가

지는 분리막을 개발하였으며, 이 분리막 이용 시 높은 유량에서도 안정적이고 빠르게 물과 기름의 분리가 가능함을 확인하였다.

본 연구결과는 “One-step solution immersion process for the fabrication of low adhesive underwater superoleophobic copper mesh film toward high-flux oil/water separation”라는 제목으로 2018년 *Applied Surface Science*에 게재되었다.

<H. Lai et al., *Appl. Surf. Sci.*, **448**, 241 (2018), DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.110>

## 방빙(Anti-icing) 및 광열 제빙(De-icing) 효과를 보이는 초소수성 SiC/CNT 코팅

기온이 낮은 지역에서 비행기의 날개, 풍력터빈, 송전선 등과 같은 장비의 표면에 형성되는 얼음은 장비 운전에 심각한 문제들을 야기한다. 형성된 얼음을 제거하는 기술인 제빙(de-icing)은 주로 열 또는 기계적 힘을 사용하는 에너지 집약 방식이 사용되며, 얼음 형성을 억제하는 방빙(anti-icing) 기술은 얼음의 형성을 늦추는 표면 혹은 얼음과의 흡착력이 낮은 표면 구현을 통해 이루어진다.

이에 Hanxiong Huang 연구팀은 근적외선 하에서 높은 광열 전환 효율을 갖는 초소수성 표면을 간단한 용액 분사(spraying) 공정으로 구현하는 방법을 소개하였다. 탄화규소/탄소나노튜브(SiC/CNTs) 혼합물을 용액 분사를 통해 기판 표면에 코팅 시키면 낮은 표면에너지의 탄화규소와 탄소나노튜브로 이루어진 마이크로/나노 단위의 계층적 구조를 형성하고 물과 얼음에 대한 낮은 흡착력이 유도되어 우수한 방빙효과를 보이게 된다. 또한, 탄소나노튜브는 뛰어난 광열전환효과(photothermal conversion effect)를 가지기 때문에 근적외선(808 nm) 조사 시 수초 안에 약 90도 가량의 온도 상승이 유도되어 표면에 생성된 얼음을 녹이는 효과적인 제빙효과를 확인하였다.

본 연구결과는 “Superhydrophobic SiC/CNTs coatings with photothermal deicing and passive anti-icing properties”

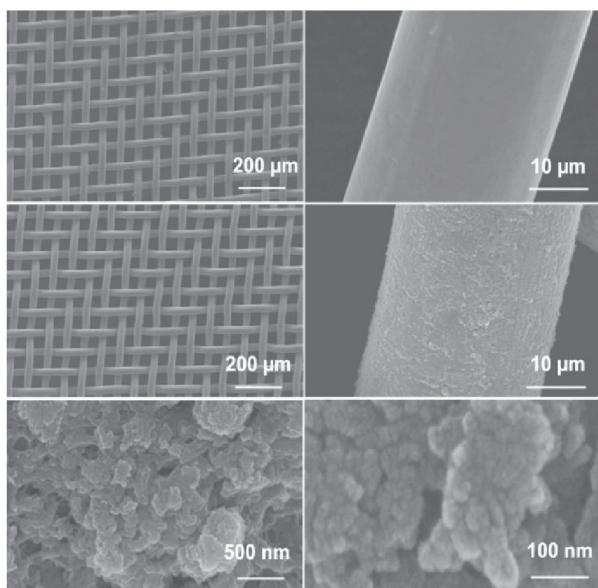


그림 3. 표면처리 전(위)과 후(아래)의 구리메시 표면.

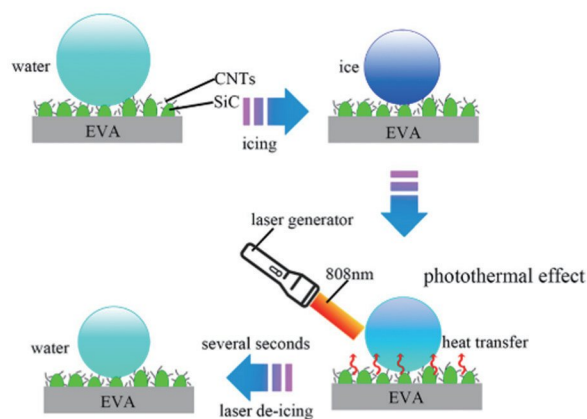


그림 4. 탄화규소/탄소나노튜브(SiC/CNTs) 코팅의 광열 제빙 모식도.

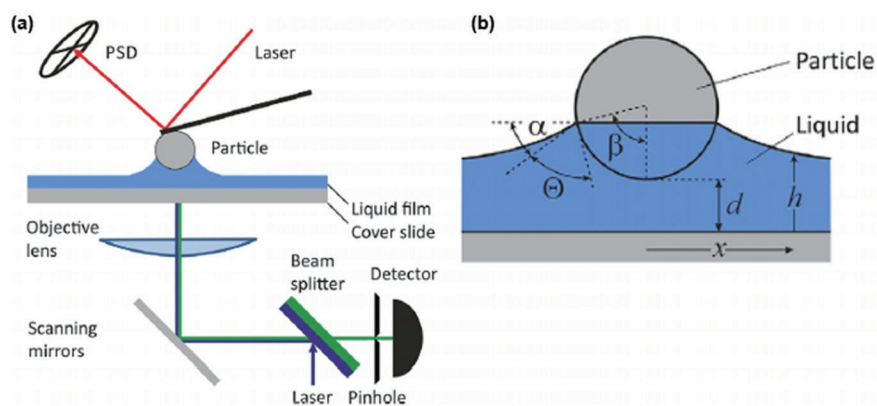


그림 5. (a) 콜로이드 탐침 기술과 공초점 현미경을 결합한 장비의 모식도, (b) 고체 기판 위의 액상막과 입자가 접촉한 모식도.

라는 제목으로 2018년 *ACS Applied Materials & Interfaces*에 게재되었다.

<G. Jiang *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 36505 (2018), DOI: 10.1021/acsami.8b11201>

## 액상 표면과 고체 마이크로 입자간 흡착력 분석

액체와 고체 입자 사이의 흡착력은 액체와 입자 계면에 형성되는 액체의 메니스커스(meniscus) 형태가 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다. 하지만 기존의 실험들로는 흡착력과 메니스커스의 동시 분석이 힘들었기 때문에 흡착력과 메니스커스의 관계를 실험적으로 증명하는데 있어서 많은 어려움이 있어왔다.

이에 Max Planck Institute for Polymer Research의 Hans-Jürgen Bütt 교수팀은 콜로이드 탐침 기술(colloidal probe technique)과 공초점 현미경(laser scanning confocal microscope)을 결합한 장비를 개발하여 구형의 유리 입자와 글리세롤 액상막 사이에 형성되는 메니스커스의 형태를 확인함과 동시에 입자와 액상막 간의 흡착력을 분석하였으며, 이렇게 얻은 결과를 이론 값과의 비교를 통해 메니스커스의 형태가 흡착력에 미치는 영향을 실험적으로 증명하였다.

본 연구결과는 “Detaching microparticles from a liquid surface”라는 제목으로 2018년 *Physical Review Letters*에 게재되었다.

<F. Schellenberger *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 048002 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.048002>

<우상혁, e-mail: woohsh@cau.ac.kr>