

| 발수 코팅을 위한 친환경적인 고분자

발수 코팅은 표면 구조(거칠기)를 조절하거나 표면 에너지를 낮출 수 있는 물질로 코팅, 또는 두 가지 방법을 함께 사용하여 구현 가능한데, 표면 코팅 재료로 가장 널리 쓰이고 있는 것은 과불화 고분자이다. 그런데 최근 들어 탄소 시슬이 매우 긴 과불화 재료는 환경 오염을 유발하고 생체 흡수 시 생체 내 축적이 가능한 것으로 알려지는 등 보건 및 안전 위험 문제가 심각하게 대두되고 있고 여러 나라에서 단계적으로 이런 종류의 물질을 사용 금지하고 있어 대체 재료 개발이 시급한 상황이다.

MIT의 Varanasi 교수팀과 Gleason 교수팀은 공동연구로 8개의 탄소로 구성된 1수소, 1수소-과불화 옥틸 메타크릴레이트를 개시제로 이용한 화학 기상 증착법으로 섬유에 발수 코팅하였다. 이 때, 가교제로써 디비닐벤젠을 활용하였다. 코팅 후 섬유 자체가 가지는 통기성이 유지되면서 물, 커피, 케첩, 간장 등 다양한 액체가 코팅된 섬유에 묻지 않음을 보였으며, 10,000번의 반복적인 마멸 시험에도 발수 기능이 유지되고 10회 세척 후에도 코팅이 손상되지 않아 뛰어난 내구성을 보였다. 본 연구에서 보고한 기상 증착 방법은 비교적 간단하고 섬유 뿐만 아니라, 종이, 실리콘 웨이퍼 등 다양한 기판들에 적용될 수 있는 장점을 갖추고 있다.

본 연구 결과는 "Short-fluorinated iCVD coatings for nonwetting fabrics"라는 제목으로 *Advanced Functional Materials*에 게재되었다.

<D. Soto *et al.*, *Adv. Funct. Mater.*, Early View Article, DOI: 10.1002/adfm.201707355 (2018)>

| 초고속 초발수 및 초발유 코팅 공정법

초발수 성질 뿐만 아니라 물보다 표면장력이 낮은 유기용매, 기름 등에 대해 초발유 성질까지 가지는 superamphiphobic 표면 개질법은 2007년 첫 보고된 이래 여러 가지 방법들이 시도되어 왔지만, 아직 상용화되고 있지 못하다. 대부분의 공정 방법이 대면적에 적용하기 어렵고, 공정이 복잡하거나 비싸며 코팅의 기계적 내구성을 향상시켜야 하는 등 기술적인 어려움이 있으며 실질적인 응용을 위해 친환경 소재를 사용해야 하는 사회적 요구에 직면해 있기 때문이다.

최근 독일의 막스 플랑크 내 고분자 연구팀은 초당 0.8 m의 굉장히 빠른 속도로 이산화 규소-이산화 티타늄 나노 구조화 코팅 기술을 개발하였다. 만들어진 나노 구조 표면을 불화실란으로 개질해 줌으로써 초발수 및 초발유 성질을 구현할 수 있었고, 특히 표면 장력이 매우 낮은 헥사데케인의 경우 코팅된 표면을 1도만 기울여도 쉽게 굴러 떨어져 뛰어난 초발유 성질을 보였다. 또한 50 cm 높이에서 액체를 떨어뜨려도 성질이 유지되어 높은 압박 압력(impalement pressure)을 가짐을 증명하였다. 이처럼 우수한 초발수 및 초발유 성질은 코팅의 뚜렷한 계층적 나노 구조 때문이며, 본 연구의 가장 큰 의의는 나노 구조를 굉장히 빠르게 코팅할 수 있는 기술 개발에 있다. 아울러 규소와 티타늄의 비율을 조절함에 따라 기계적 내구성과 코팅의 투명성이 조절될 수 있는데, 규소의 비율을 높일수록 불투명해지지만 기계적 내구성은 향상되고 티타늄의 비율이 증가하면 투명한 코팅이 가능하여 목적에 맞게 여러 분야에 사용 가능할 것으로 기대된다.

본 연구 결과는 "Ultrafast processing of hierarchical nanotexture for a transparent superamphiphobic coating with extremely

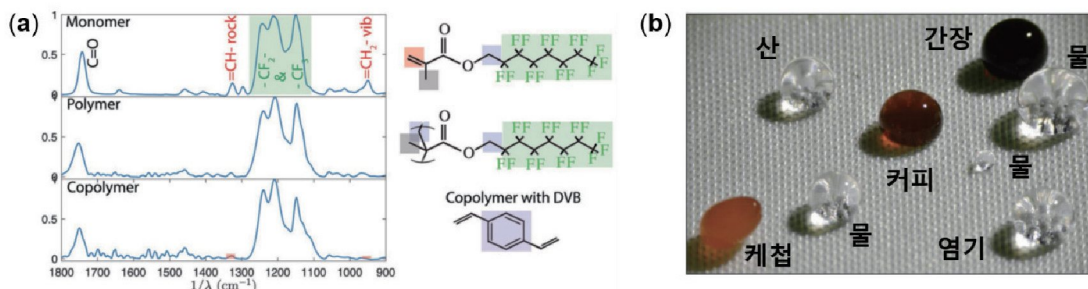


그림 1. (a) 발수 코팅에 활용된 고분자 재료, (b) 코팅된 섬유에 다양한 액체가 묻지 않는 모습.

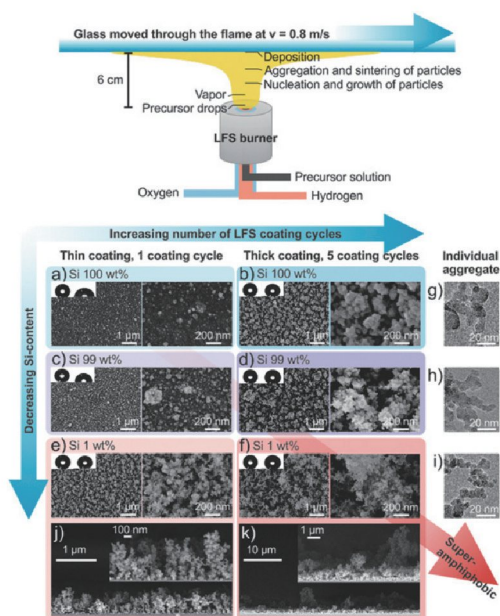


그림 2. 나노 구조화 코팅 기술의 개략도 및 규소와 티타늄 조성 비율에 따른 코팅 표면의 형태와 습윤 성질(왼쪽: 물, 오른쪽: 헥사데케인).

low roll-off angle and high impalement pressure”라는 제목으로 *Advanced Materials*에 게재되었다.

<H. Teisala et al., *Adv. Mater.*, **30**, 1706529, DOI: 10.1002/adma.201706529 (2018)>

화학적 성질과 물리적인 구조를 동시에 가역적으로 조절할 수 있는 스마트 표면

온도, pH, 빛, 전기, 기계적 변형 등 외부 자극에 의해 표면 습윤성을 가역적으로 조절할 수 있는 기능성 표면은 기름과 물 분리, 세포와의 상호작용 조절, 바이오 센서 등에 활용되면서 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다. 일반적으로 표면의 화학적 조성을 소수성/친수성으로 전환하거나 물리적 구조를 기계적/자기적 힘으로 전환하는 경우로, 두 가지 중 한 가지 요소만 조절하는 연구결과들은 보고되어 왔지만 화학적 성질과 물리적 구조를 동시에 가역적으로 조절할 수 있는 플랫폼은 지금까지 보고된 사례가 없었다.

중국 하얼빈 공대 Liu 교수팀과 Cheng 교수팀은 공동연구로 화학적 조성 and 물리적인 구조를 동시에 가역적으로 전환할 수 있어 필요에 따라 표면 습윤성을 소수성, 친수성, 초소수성, 초친수성으로 조절할 수 있는 플랫폼을 개발하였다. 형상 기억 고분자로 마이크로 구조체를 만들고 구조체 표면으로부터 온도 감응성 고분자인 poly(*N*-isopropylacrylamide)(PNIPAAm)를 중합한 것으로, 형상 기억 고분자로는 외부에서 가해지는 힘에 따라 물리적 구조를 변형했다가 원래 구조로 되돌릴 수 있는 형상기억 특성을 구현하고, PNIPAAm으로는 온도에 따라 고

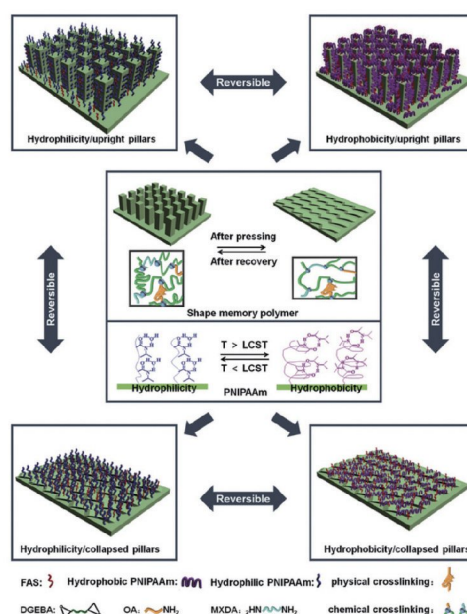


그림 3. 형상 기억 고분자 및 PNIPAAm을 이용하여 표면의 물리적 구조 및 화학적 성질을 가역적으로 조절할 수 있는 시스템의 개략도.

분자 사슬 형태의 변화로 인한 친수성/소수성 전환을 이용한 것이다. 표면 습윤성의 가역적인 전환은 여러 번의 전환 사이클을 거쳐도 기능이 안정적으로 유지되고 습윤성의 구배 또한 구현이 가능하여 본 연구결과는 앞으로 표면 습윤성을 정교하게 조절하는 일이 필요한 분야에 응용될 수 있으리라 생각된다.

본 연구결과는 “A smart superwetting surface with responsivity in both surface chemistry and microstructure”라는 제목으로 *Angewandte Chemie International Edition*에 게재되었다.

<D. Zhang et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **57**, 3701, DOI: 10.1002/anie.201800416 (2018)>

기계적/화학적 내구성과 액체 침투 저항성이 매우 우수한 초소수성 코팅

자가세척 기능으로 대표되는 초소수성 코팅의 경우 실질적으로 활용하기 위해서는 기계적/화학적 내구성이 확보되어야 함은 물론이고 매우 빠른 속도로 분사되는 물에 노출되었을 때에도 코팅이 안정적으로 기능을 발휘할 수 있어야 한다. 또한 코팅이 대면적에 쉽게 적용될 수 있어야 한다. 지금까지 무기 나노 입자를 활용하여 기계적 강도를 높이는 사례들이 있었지만 화학적 내구성은 낮았고, 유기재료 코팅으로 화학적 내구성을 높인 경우에는 기계적 강도가 낮았다. 달리는 자동차나 풍력발전 블레이드 등에 적용 가능할 정도로 초소수성 코팅의 실용성을 높이기 위해서는 빠른 속도로 표면에 가해지는 물에 대한 저항성 평가도 이루어져야 하는데 해당 연구는 아직까지 심도 있게 이루어지지 못하였다.

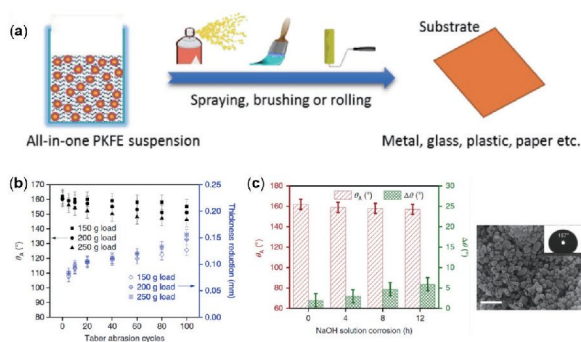


그림 4. (a) 초소수성 코팅의 개략도, (b) 마멸 시험에 따른 코팅의 기계적 내구성 평가 결과, (c) 1M 수산화 나트륨 수용액에 담겼을 때 시간에 따른 표면 습윤성 변화 및 12시간 후 코팅 표면의 전자 현미경 사진과 물 접촉각(157°).

이에 영국 유니버시티 칼리지 런던의 Tiwari 박사는 내구성, 유연성, 기관 부착력, 표면 에너지 등의 요소를 고려하여 내구성과 액체 침투 저항성이 매우 뛰어난 초소수성 코팅을 개발하였다. 코팅 재료로 불화계 에폭시 수지와 과불화 폴리테트라, 그리고 불화고분자 기반의 나노입자가 혼합된 유기 코팅 재료(PKFE 코팅제로 명명)를 개발하고, 일상생활에서 사용하는 스프레이, 브러싱, 롤링 방법으로 금속, 유리, 플라스틱, 종이 등 다양한 기판에 쉽게 코팅할 수 있음을 보였다.

코팅된 기관은 테이프를 붙였다가 떼는 실험(30회 반복)과 150-250 g의 무게로 수행한 마멸 시험(100회 반복) 뒤에도 물 접촉각이 150°로 유지되거나 4° 정도만 감소되어 우수한 기계적 내구성을 보였고, 왕수나 1M 수산화 나트륨 수용액에 각각 1시간과 12시간 동안 담겼다 코팅이 유지되고 초소수성을 나타내어 화학적 내구성 또한 뛰어난 것을 보였다. 초소수성 코팅을 실질적으로 활용하기 위해서는 접촉각을 측정할 때 활용하는 마이크로 부피의 액체가 아니라 굉장히 빠른 속도로 코팅 표면에 와서 부딪히는 제트 수류에 안정성이 있어야 하는데 본 연구에서는 코팅된 표면을 최대 35 m/s까지 제트 수류에 노출시켰음에도 불구하고 코팅이 손상되지 않고 초소수성을 그대로 유지함을 보여 실생활에 실질적으로 활용될 수 있는 플랫폼이 될 수 있으리라 기대된다.

본 연구 결과는 "All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance"라는 제목으로 *Nature Materials*에 게재되었다.

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

당뇨병 치료를 위한 장 코팅용 고분자

위장관, 특히 소장은 음식의 소화와 흡수 뿐만 아니라 면역 활성 및 호르몬 생성 세포들이 인체 내에서 가장 많이 분포하고 있는 장기로 전신질환의 발병 기전에 중요한 역할을 하는 것으로 인식되고 있으며 여러 질병 중 대표적으로 제2형 당뇨병과 염증성 장 질환의 치료와도 밀접한 연관이 있다고 알려져 있다.

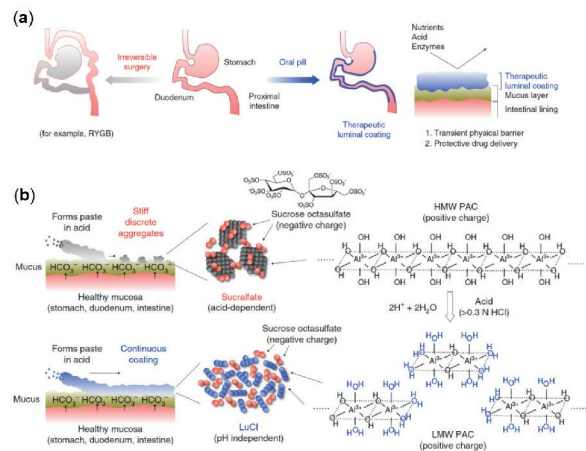


그림 5. (a) 경구 투여를 통해 치료용 장 코팅을 개발한 개략도, (b) 균일한 장 코팅용 고분자 재료인 LuCl의 구조.

염증성 장 질환의 경우 대개 질병이 장의 점막 표면에만 영향을 미치지만 점막에만 국소적으로 약물을 전달하는 것은 매우 어렵고 경구 투약으로는 장까지 전달되는 효율도 낮아 약제를 전신에 투여하는 방법이 일반적이어서 이에 따른 부작용이 따르기도 한다. 비만에 의한 제2형 당뇨병 환자의 경우 병세가 위증할 때 위장 우회술(Roux-en Y gastric bypass)을 통해 체중 감량과 당뇨병 치료를 시도하지만 수술 위험 부담과 한 번 수술하면 원 상태로 되돌릴 수 없다는 단점이 있다.

하버드 의대 브리검 여성 병원의 Karp 교수팀은 이유한 박사를 리더로 하는 연구팀으로 위장 우회술을 하지 않고도 일시적으로 동일한 효과를 보일 수 있는 장 코팅용 재료를 개발하였다. 위궤양을 치료할 때 사용하는 수크랄페이트(sucralfate)를 기본 재료로 선택하고 위산에 의한 활성화 과정 없이, 그리고 균일하게 장을 코팅할 수 있도록 제제(LuCl, Luminal Coating of the Intestine로 명명)를 최적화시켰다. LuCl은 가루형태지만, 물을 만나게 되면 끈적한 접착제처럼 되어 장을 코팅할 수 있게 된다. Karp 교수팀은 Tavakkoli 교수팀과의 공동연구로 LuCl로 쥐의 장을 코팅하여 영양분이 장과 접촉할 수 있는 장벽을 형성함으로써 식사 후 쥐의 혈당 수치를 낮출 수 있음을 보였다. 그리고 쥐에게 LuCl를 투여한 지 1시간 후에는 포도당에 대한 반응 효과가 47% 감소하여 혈당을 낮출 수 있는 효과가 일시적이며 3시간 후에는 효과가 사라짐을 확인하였다. 즉, 일시적으로 수술과 같은 효과를 보일 수 있는 것을 증명한 것으로 제2형 당뇨병 치료에 활용될 수 있는 경구 투여 제제를 개발한 점에서 본 연구의 의의가 있고, 또한 LuCl가 위장관에 국소적으로 약물을 전달하는데 사용될 있음을 증명하여 앞으로 점막접착성 약물전달 제제로 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과는 "Therapeutic luminal coating of the intestine"라는 제목으로 *Nature Materials*에 게재되었다.

<Lee et al., *Nat. Mater.*, in press, DOI: 10.1038/s41563-018-0106-5 (2018)>

<조우경, wkcho@cnu.ac.kr>