

# 생체모방을 이용한 스마트 건식접착 필름 제작 및 응용

배원규 · 서갑양

## 1. 서론

최근 마이크로/나노공학의 비약적인 발전으로 인하여, 나노 크기의 물체를 관찰할 수 있게 되었고 기존에는 구현하지 못했던 기술들을 새로운 공정을 바탕으로 실현할 수 있게 되었다. 특히, 나노 수준에서 물질을 관찰하고 그 구조를 제작할 수 있는 기술들이 개발되면서 새로운 기능을 수행하는 기능성 표면연구에 많은 관심이 집중되고 있으며, 그 중 생체모방 공학에 기반을 둔 연구들이 주를 이루고 있다. 자연의 지혜를 배우고 이를 모방하여 인류에 필요한 기술들을 개발하고자 하는 대표적인 융합기술의 예가 바로 생체모방공학(biomimetics)이다. 그 대표적인 연구결과로 게코도마뱀의 초접착성 모방, 홍합 접착력 모방, 연꽃잎의 초소수성 표면 모방, 마찰력이 적은 상어 표면 등 그 수를 헤아릴 수 없을 정도로 다양하다. 이러한 기능성이 부여된 스마트한 표면들은 학문적인 연구 가치뿐만 아니라 실생활에 적용되었을 때의 경제적인 부가가치가 높기 때문에 학계뿐만 아니라 산업계에서도 많은 주목을 받고 있는 상황이다. 본 고에서는 최근 발표된 생체모방기술들의 대표적인 사례들을 살펴보고, 향후 다양한 분야에서 그 수요가 증가될 것으로 확인되는 스마트 필름(표면)에 대해서 고찰해보고자 한다.

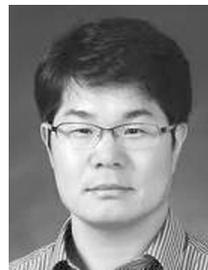
본 내용에 들어가기에 앞서서, 생체모방공학에 대해서 간략하게 소개하고자 한다. 생체모방공학의 사전적인 의미는 그리스어 단어에서 생명을 뜻하는 'Bios'와 모방을 의미하는 'mimiesis'의 결합된 단어로써 '자연의 생물체 및 생체물질의 기본구조의 원리와 메커니즘을 모방 또는 응용하여 공학적으로 활용하는 기술'이라고 정의하고 있다. 레오나르도 다 빈치는 '자연은 최고의 스승이다'라는 말을 남겼듯이 자연을 관찰하고 이를 모방하려는 노력은 아주 오래전부터 시작되었다. 38억년이란 길고 긴 진화의 실험실에서 만들어진 생물체로부터 인류에게 유용한 여러 가지 지혜를 배우려고 하는 생체모방공학은 여러 문헌들에서 biomimetics, bio-mimicry, bioinspired engineering, Nature-inspired engineering 등의 용어들로 사용되면서 현재 과학계 및 산업계의 가장 활발한 연구 분야로 대두되고 있는 실정이다. 생체모방이 하나의 학문 분야로 등장하기 시작한 것은 1997년 생체모방학의 선구자로 불리는 재닌 베이어스(Janine Benyus)가 <생체모방: 자연이 가져다 준 혁신 Biomimicry: Innovation inspired by Nature>라는 책을 발표하면서 부터다. 이 책에

서 베이어스는 디자이너뿐만 아니라 공학자들이 어떻게 생체모방을 적용하고 활용할 수 있는지 서술하였으며, 이를 계기로 1998년 '생체모방학회(Biomimicry Guild)'를 공동 설립하고 다양한 분야의 사람들에게 이 분야를 알리는데 적극적으로 활동하고 있다. 최근 들어서 이 학회는 세계적인 건축회사 HOK와 제휴를 맺고(2008. 09. 15) 건축 프로젝트에 생체모방 디자인이 적용될 수 있도록 지원하는 등 활발한 활동을 통하여 생체모방공학 분야를 널리 알리는데 앞장서고 있다.

생체모방공학의 대표적인 사례들을 살펴보면, 현재는 지퍼만큼 널리 사용되는 발명품인 벨크로가 대표적이라고 할 수 있다. 1948년 자신의 바지와 개의 털에 날아와 달라붙은 엉덩퀴씨를 발견한 스위스의 공학자 조지 드 메스트랄(George de Mestral)은 엉덩퀴의 표면에 작은 갈고리모양의 가시가 달려있는 것을 보고 이를 모방하여 '벨크로'라는 테이프를 발명하게 되고, 얼마 지나지 않아 NASA에서 우주 비행사들의 우주복과 신발에 적용하게 된다. 그리고 물속으로 다이빙할 때 물을 튀기지 않는 특징을 가지고 있는 물총새의 날카로운 부리를 모사하여 일본 신간센 고속열차의 앞부분을 디자인한 사례, 빠른 속도로 안정적으로 이동이 가



**배원규**  
2005 숭실대학교 전기공학과(학사)  
2009~ 서울대학교 공과대학 협동과정  
현재 바이오엔지니어링 석박통합과정



**서갑양**  
1996 서울대학교 화학공학과(학사)  
1998 서울대학교 응용화학부(석사)  
2002 서울대학교 응용화학부(박사)  
2002~ Massachusetts Institute of Technology,  
2004 Chemical Engineering (Post doc.)  
2004~ 서울대학교 기계항공공학부 교수  
현재

### Bio-inspired Smart Dry Adhesives and Their Applications

서울대학교 공과대학 협동과정 바이오엔지니어링 (Won-Gyu Bae, Interdisciplinary Program of Bioengineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea)

서울대학교 기계항공공학부 (Kahp-Yang Suh, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea) e-mail: sky4u@snu.ac.kr

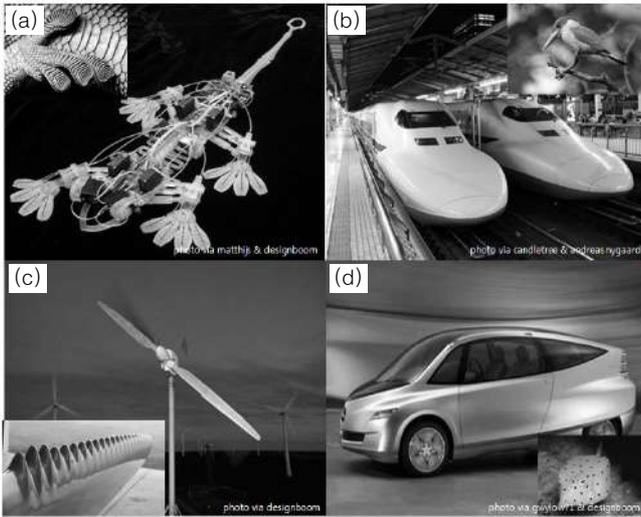


그림 1. 생체모방공학의 대표적 예: (a) 스텐포드에서 제작한 ‘스티키봇’, (b) 신간선 고속열차, (c) ‘웨일파워’ 풍력터빈, (d) 메르세데스 벤츠 승용차.

능한 노랑거북복의 시각형 몸통형상을 모방한 메르세데스 벤츠 승용차, 뜨거운 사막 한가운데에서도 시원한 환개미의 집 통풍 구조를 모방한 아랍(Arup) 건축의 이스트게이트센터(잠바브웨 하라레 소재), 고래의 지느러미의 요철 형상에서 착안을 한 풍력터빈 디자인 등 많은 사례를 손쉽게 찾을 수 있다(그림 1). 앞서 설명한 사례들이 비교적 초기의 생체모방공학의 사례라고 할 수 있으며, 현재는 마이크로/나노 공학의 비약적인 발전에 힘입어 이전과는 다른 방식의 접근으로 생체모방공학의 연구들이 수행되고 있다. 그 대표적인 예로 게코도마뱀의 나노 섬모를 모사한 건식접착 필름, 연꽃잎 표면의 형상을 모사한 초소수성 필름 등이 그것인데, 본 고에서는 생체모방공학의 구체적인 연구결과들 중 마이크로/나노 기술에 기반을 둔 기능성 표면 연구에 대한 원리 및 구현 방법을 구체적으로 살펴보고자 한다.

## 2. 건식접착 표면을 위한 나노 패터닝 기술

자연계의 특이한 현상 중 하나인 초접착 메커니즘은 생체모방공학의 가장 중요한 분야 중 하나이다. 그 대표적인 예 중 건식접착은 게코도마뱀이, 습식접착에서는 홍합이 대표적인 연구대상이라고 할 수 있다. 특히 게코도마뱀의 경우에는 벽이나 천장을 기어 다니는 특성은 과거에서부터 궁금중의 대상이었다. 하지만 최근 나노 기술의 발달로 인해, 나노 수준에서의 관찰이 가능해 짐으로써 그 해답이 밝혀졌는데, 발바닥에 있는 미세한 고-중형비의 나노 섬모가 접착력의 원인으로 밝혀졌고 이러한 나노 구조는 많은 연구자들의 관심을 이끌어 내었다.<sup>1</sup> 그리고 홍합은 물속에서나(유기물이나) 육지에서나(무기물이나) 변함없이 강력한 접착력을 보이는 특징을 가지는데 이 또한 최근 한 연구 그룹에 의하여 그 비밀이 밝혀졌다.<sup>2</sup> 본 고에서는 초접착성의 기능성 표면을 연구의 대표적인 두 가지 모델 중 건식접착을 실현하기 위한 연구 주제로, 게코도마뱀의 섬모구조를 모사한 대표적인 연구 사례를 분석하고 본 연구그룹에서 활발하게 연구된 결과들을 살펴보고자 한다.

게코도마뱀은 기원전 그리스 때부터 학자들의 주목 대상이었다고 한다. 날카로운 발톱이나 갈고리도 없고 발바닥이 끈적거리지도 않는데 곤충보다 훨씬 무거운 도마뱀이 벽이나 천장을 자유자재로 이동할 수 있었기

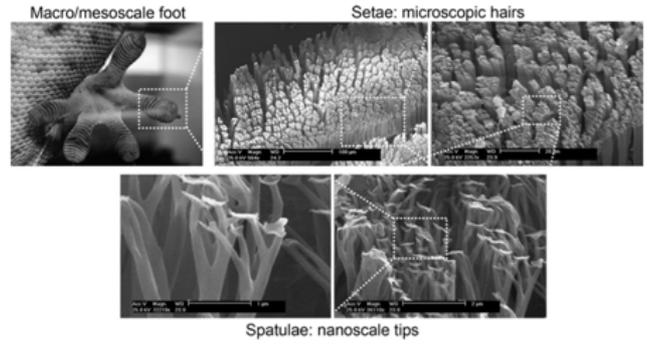


그림 2. 실제 게코도마뱀의 발바닥에 존재하는 나노 섬모의 구조.

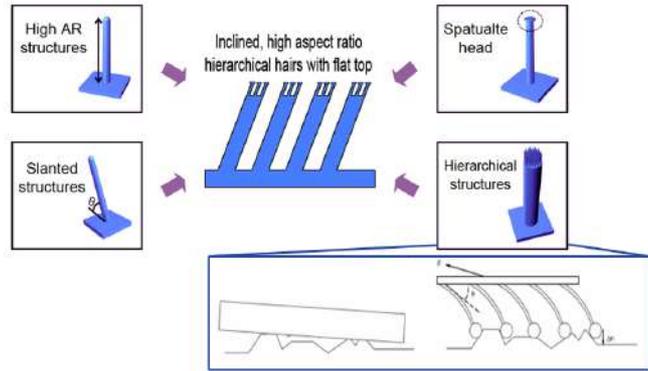
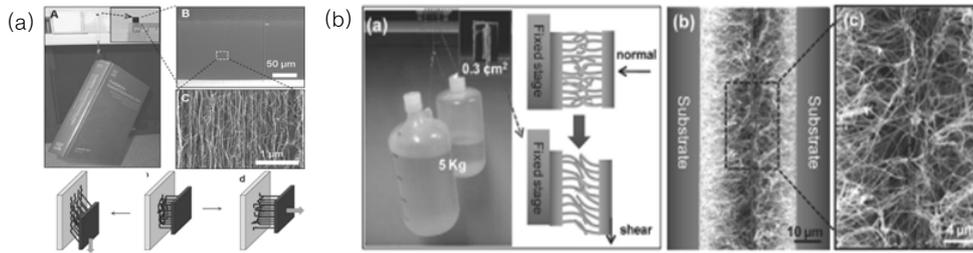


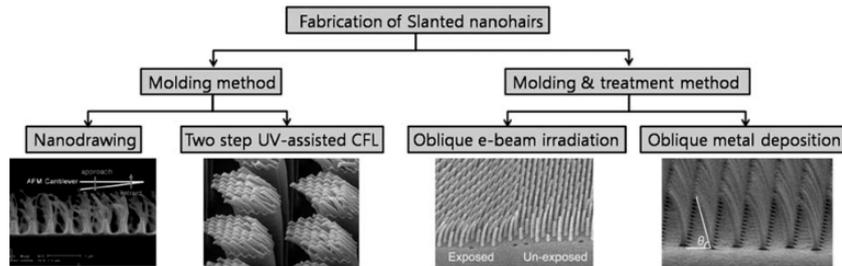
그림 3. 게코도마뱀의 초접착성 표면을 모사하기 위한 구조적 특징.

때문이다. 이 오랜 궁금중을 2002년 8월에 미국 캘리포니아 버클리/산타 바버라대와 스탠퍼드대의 공동연구팀이 해결 하였는데, 그 비밀은 1910년 노벨물리학상 수상자의 이름을 딴 반데르 발스 결합(Van der Waals bond)이었다. 좀 더 자세히 살펴보면 화학 결합은 공유 결합(Covalent bond, 100 Kcal/mole), 이온 결합(Ionic bond, 5 Kcal/mole), 수소 결합(Hydrogen bond, 3 Kcal/mole), 그리고 마지막으로 반데르 발스 결합으로, 총 4가지로 분류된다. 이 중 반데르 발스 결합은 비교적 약한 결합(0.5 Kcal/mole)으로 두 원자가 가까이 접근하였을 때 각 원자의 핵을 둘러싸고 있는 전자구름에 변동이 발생하고, 이로 인해 약한 정전기적 인력이 생겨서 두 원자가 접착력을 가지게 되는 원리이다. 두 원자간의 정전기적 인력은 약하지만 게코도마뱀의 발바닥에는 그림 2에서와 같이 수 백 만 개의 미세한 나노 섬모가 존재하고, 각 섬모의 끝이 다시 갈라져 있는 구조이기 때문에 각각의 인력이 모이면 그 결합력이 엄청나게 높아진다. 실제로 게코도마뱀의 접착력은 약  $10 \text{ N/cm}^2$ 으로 이는 단위 센티미터 제곱 면적당 약 1 kg의 무게가 매달릴 수 있는 접착력이다. 그리고 게코도마뱀의 발바닥의 섬모구조는 기울어진 독특한 구조적 특징을 보이는데 이는 발바닥이 표면과 떨어질 때, 아무런 힘이 들지 않고 떨어질 수 있게 하는 방향성 접착력(directional adhesion)을 만들어내는 역할을 한다.

이러한 나노 섬모구조를 모사하기 위하여 본 연구그룹은 인공적인 건식접착력을 보이기 위한 구조적인 특징들을 규명하였는데 이를 그림 3에 도시화하였다.<sup>3</sup> 그 특징들을 구체적으로 살펴보면 고-중형비(high aspect ratio)의 구조, 기울어진(slanted) 구조, 주걱 모양(spatulate head) 구조, 그리고 계층(hierarchical) 구조로 총 4가지로 규정할 수 있다. 이러한 구조적인 특징이 모두 구현될 때 그 표면은 자연에서 보이는 강한 접착력을 보이게 되는 것이다.



**그림 4.** (a) CNT를 이용한 초접착 표면: 4 mm<sup>2</sup>의 표면적에 1,480 g 무게의 책을 지지, 벽면과 수직 방향으로서는 쉬운 탈착 특성이 존재, (b) CNT 커넥터를 구현한 경우: 3 mm<sup>2</sup>의 면적에 5 kg의 무게를 지탱.



**그림 5.** 고-중형비의 경사구조 나노 섬모 제작 기술 분류도.

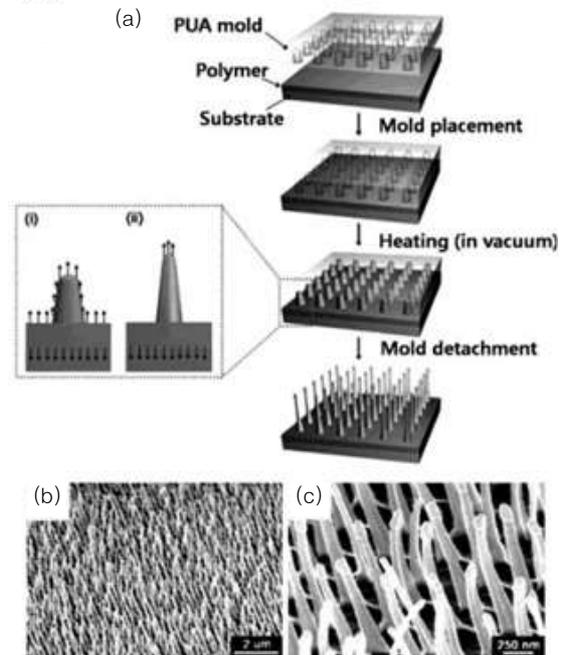
이러한 표면을 나노 수준에서 모사한 최근 연구결과들을 살펴보면, 2008년 유명학술지인 Science지에 실린 탄소나노튜브를 이용한 연구 결과로, 미국의 University of Dayton과 Georgia Institute of Technology의 연구자들이 공동으로 강한 접착력을 보이면서도 쉽게 탈착이 가능한 표면에 대한 연구결과를 발표하였다. 이 연구에서 4 mm<sup>2</sup>의 표면적에 탄소나노튜브를 수직 성장시키고 접착력을 테스트한 결과 무거운 책(1480 g)을 거뜬히 들 수 있을 정도의 충분한 접착력을 보였다(그림 4(a)).<sup>4</sup> 그 다음 해인 2009년에 University of California, Berkeley 연구자들은 탄소나노튜브를 이용한 커넥터를 개발하였는데, 3 mm<sup>2</sup>의 면적의 탄소나노튜브를 성장시키고, 두 장의 필름을 서로 접착시켜 무려 5 kg의 무게도 접착시킬 수 있는 연구결과를 보였다(그림 4(b)).<sup>5</sup> 이처럼 탄소나노튜브를 이용한 건식접착성 표면은 높은 중형비의 나노 섬모, 높은 기계적 강도, 그리고 게코도마뱀을 능가하는 접착력 등 우수한 특징을 가지고 있지만, 그 공정과정이 포토리소그라피, 촉매증착, 화학기상증착 등 복잡하고 높은 단계의 공정이 필요할 뿐만 아니라 구현할 수 있는 표면의 면적이 작다는 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구그룹에서는 고분자를 이용한 다양한 패터닝 기법을 개발하였다. 고분자를 이용할 경우, 탄소나노튜브와 비교하였을 때, 원하는 다양한 형상의 패터닝이 가능하고 가공 공정이 간단하고 손쉽게 재료의 물성을 변화시킬 수 있으면서 대면적 제작이 비교적 용이하다는 장점을 가지게 된다. 이로 인하여 건식접착 표면의 실제 응용이 보다 용이할 것으로 기대된다.

그림 5에서는 본 연구그룹이 개발한 나노 섬모 제작공정을 크게 두 가지로 분류하여 나타내었다.<sup>6</sup> 첫 번째는 기울어진 혹은 고-중형비의 나노 섬모를 패터닝 형성된 몰드로부터 직접 제작하는 방법이고, 반대로 두 번째 방법은 수직, 고-중형비의 나노 섬모를 제작한 후, e-beam 조사 혹은 금속 증착과 같은 후처리 과정을 거쳐 경사구조의 나노 섬모를 제작하는 방법이다. 지금부터 각각의 방법에 대해 좀 더 구체적으로 살펴보고자 한다.

### 2.1 Direct Molding 방법

본 연구그룹에서는 초소수성 표면을 모사하기 위하여 사용한 UV 경



**그림 6.** (a) 나노 신장 기술의 공정도, (b),(c) 나노 신장 기술로 제작된 나노 섬모의 SEM 이미지.

화성 고분자인 PUA를 이용하여 실제 게코도마뱀의 나노 섬모를 가장 유사하게 모사하는데 성공하였으며, 그 접착력 또한 게코도마뱀 이상으로 구현하였다(그림 6). 구체적으로 연구내용을 살펴보면, 직경 200 nm 이하, 중형비 20 이상의 고-중형비 고분자 나노 구조체를 새로운 열공정 모세관 리소그라피 방식으로 제작하였다. ‘몰드와 고분자 박막 사이에서의 표면에너지’와 ‘고분자 박막과 기판 사이에서의 표면에너지’의 상대적 크기가 서로 대등할 경우 고분자가 PUA몰드의 천정과 적절한 친화력을 형성함으로써 몰드 제거 시 길이방향으로 신장되어 20 이상의 고-중형비의 나노 구조체를 형성할 수 있었으며, 이를 ‘나노 드로잉(Nano Drawing) 기법’이라고 명명하였다.<sup>7</sup> 이러한 나노 신장기술은 새로운 가공법으로써,

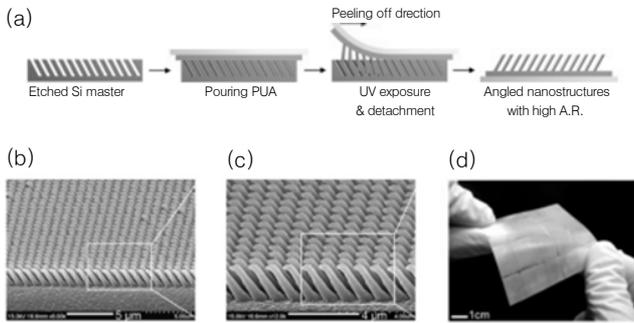


그림 7. 게코도마뱀의 경사진 나노 섬모를 모사하기 위한 실리콘 경사 에칭 공정 및 복제한 고분자 나노 섬모구조.

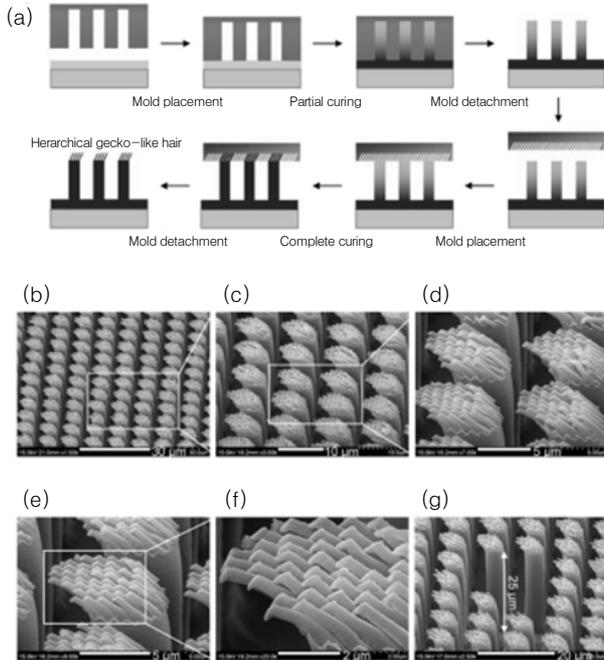


그림 8. 2단계 UV경화 공정을 이용한 마이크로/나노 이중구조의 제작: 직경 5  $\mu\text{m}$ 의 기둥에 팁 직경 600 nm의 기울어진 나노 구조물.

기존에는 구현이 힘들었던 고-종횡비의 나노 구조물 제작 한계를 극복한 대표적인 사례라고 할 수 있으며 게코도마뱀의 나노 섬모를 모사하는데 있어서 아주 중요한 기술 중의 하나로 자리 잡고 있다.

더 나아가 본 연구그룹은 실제의 게코도마뱀과 형태학적, 기능적으로 가장 유사한 건식접착 표면을 구현 하였는데, ‘2단계 UV경화 공정을 이용하여 마이크로 섬모 위에 기울어진 나노 섬모를 비교적 간단한 공정으로 구현할 수 있었다(그림 7, 8). 마이크로 패터닝된 몰드를 이용하여 마이크로 섬모를 제작함에 있어서 부분 경화를 하는 것이 가장 큰 특징이다. 이를 바탕으로 나노 몰드를 이용하여 이중구조를 제작할 수 있었으며, 이때 두 구조의 경계면이 없게 되며 이는 외부에서 가해지는 힘에 더욱 잘 견딜 수 있다는 것을 의미한다. 이렇게 마이크로구조물 위에 나노 섬모가 존재하는 계층구조물은 실제 거친 표면에서 평면 대비 ~80%의 접착력을 보이면서 효과적으로 달라붙을 수 있었으며, 본 연구그룹은 이러한 기능성 고접착 표면의 실용적 예로 2세대 LCD패널을 운반하는 운반 시스템을 제작하여 시연하였다.<sup>8</sup>

## 2.2 Molding and Post Treatment 방법

다른 연구결과로는 이미 제작되어진 수직의 고분자 나노 섬모에

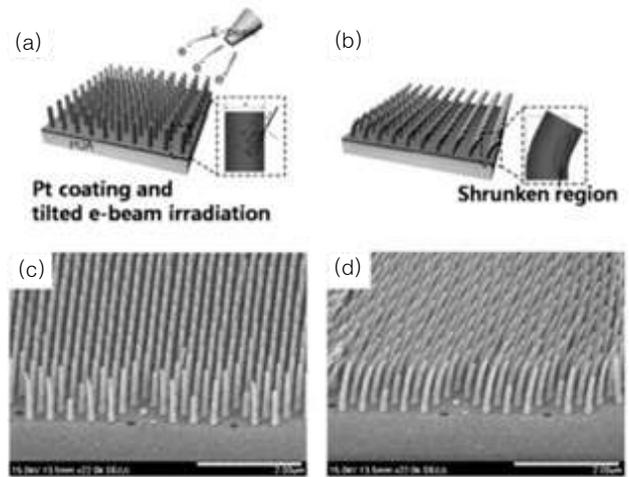


그림 9. E-beam 조사를 통해 구부러진 나노 섬모를 제작하기 위한 메커니즘 및 구부러진 나노 구조물.

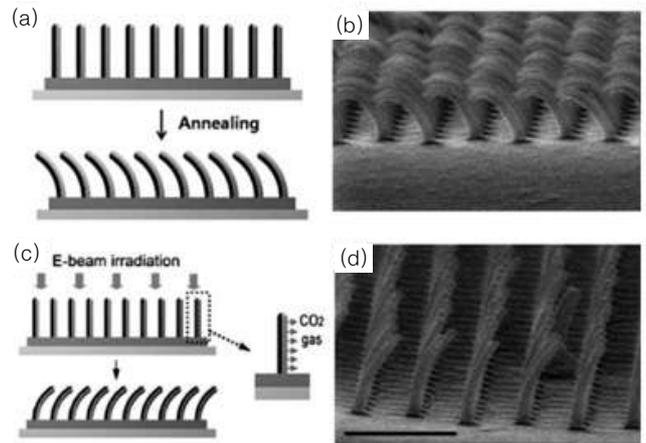


그림 10. 금속 증착을 바탕으로 하여 annealing 및 e-beam 조사과정을 통해 제작된 구부러진 모양의 나노 섬모.

e-beam을 조사하여 게코도마뱀의 경사진 섬모를 모사한 사례도 있다(그림 9). E-beam의 조사량, 강도, 기울인 각도에 따라 다양한 구조의 나노 섬모를 제작할 수 있다. 이 방법은 기존의 소프트 리소그래피와 FE-SEM 장비를 이용함으로써 매우 간단한 방법으로 연구를 수행하였다. 정밀하게 제어된 에너지를 이용하여 원하는 각도로 섬모에 e-beam을 조사하였고 그 결과, e-beam에 노출된 부분이 반대편에 비해 수축하게 되어 방향성 있는 구부러짐이 발생하였다. 이에 조건을 달리하여 나노 섬모의 경사를 조절하였고 그 결과 최대  $12 \text{ N/cm}^2$ 의 접착력을 보였으며, 100회 반복 실험에서도 접착력이 유지되는 것을 실험적으로 확인하였다.<sup>9</sup>

위와 비슷한 방법으로, 기존의 수직의 고분자 나노 섬모에 금속을 증착하여 게코도마뱀의 경사진 섬모를 모사한 사례도 있다(그림 10). 나노 섬모구조를 기울인 후, 한쪽 면에만 nm 수준의 두께로 금속(ex. platinum)을 증착시킨다. 이렇게 한쪽 면에만 금속이 증착된 나노 섬모에 열을 가해 주게 되면, 고분자에 비해 상대적으로 낮은 금속의 열팽창계수에 의해 자연스럽게 금속이 증착된 방향으로 나노 섬모가 기울어지게 된다. 나노 섬모의 기울임 각도, 금속 증착 두께, 가열 온도와 시간에 따라 다양한 구조의 나노 섬모를 제작할 수 있다. 앞선 연구와 마찬가지로 저렴한 방법으로 간단하게 수행할 수 있기 때문에 대면적 공정에 적용이 가능하다. 또

한 나노 섬모에 증착된 금속은 구조적인 안정성을 강화시키며 섬모끼리 붙거나 덩어리지는 현상을 방지하는 역할을 수행한다.<sup>10</sup>

### 3. 자연모사에 기반한 바이오패치

앞서 본 연구그룹에서 연구한 건식접착은 다양한 응용분야를 생각해 볼 수 있다. 가까운 미래에 사용화될 말리는 디스플레이의 뒷면에 건식 접착 표면을 만들어 말린 채로 고정하거나 펼친 상태에서는 벽면 등에 붙일 수 있는 기능을 구현할 수 있고, 중력이 없어 작업 환경이 가혹한 우주의 작업 현장에서 우주인들을 신발에 부착된 건식접착체가 우주선 표면을 손쉽게 걸어갈 수 있게 하거나 작업도구를 간편하게 벽면에 고정해 놓을 수 있을 것이다. 본 연구그룹에서는 앞으로 있을 미래에 적용 가능한 응용과 함께 좀 더 현실적인 적용을 위하여 건식접착 메커니즘을 적용한 스마트 바이오 패치를 구현하였다. 스마트 바이오 패치는 기존의 습식접착의 문제점으로 지적된, 오랜 시간 접착 후 패치를 떼어낼 때 인체 표피의 일부분도 함께 떨어져 나와 사용자로 하여금 고통과 불편을 일으키는 점을 개선하고자 했다. 더 나아가 이러한 건식접착이 분자간의 인력을 바탕으로 접착하기 때문에 접촉 표면과 수 십 나노미터 거리로 인접하게 되는 점에 착안하여, 생체신호를 감지할 수 있는 센서를 함께 내포시키는 연구를 수행하였다(그림 11).

본 연구진은 표면이 거칠고 기름 및 수분이 분비될 뿐만 아니라 항상 움직임이 존재하는 특징을 가지는 인체 표면에 건식접착 패치를 적용하기 위하여, 앞서 설명한 본 연구그룹에 의해 개발된 다양한 마이크로/나노 공정을 바탕으로 게코도마뱀의 섬모와 문어의 빨판 구조를 혼합한 새로운 형태의 건식접착 구조를 제안하였다. 문어는 물속에서 독특한 구조의 빨판을 이용하여 자유자재로 물속의 표면을 이동할 수 있는데, 본 연구진은 인체 피부에서 지속적으로 분비물이 나오는 점을 극복하고자 문어의 빨판에 착안하여 문제를 효과적으로 해결하였으며, 이 또한 생체모방

공학을 이용한 연구결과라고 할 수 있다. 그림 12에 나와 있듯이 본 연구진은 다양한 모양의 빨판 구조를 마이크로 기둥 끝단에 제작하였다. 이는 빨판의 두께와 직경의 크기, 그리고 그 모양에 따라서 서로 다른 특징을 보였으며, 이와 같은 특징을 이용하여 응용을 하고자 하는 분야와 접착하고자 하는 표면의 특성에 따라 맞춤형으로 설계가 가능하도록 공정을 개발하였다. 구체적으로는 총 아홉 가지의 구조를 제작하였는데(지름: 20, 22, 24  $\mu\text{m}$ , 두께: 1.5, 2, 2.5  $\mu\text{m}$ ) 각각의 아홉 가지 접착 표면은 9~16  $\text{N}/\text{cm}^2$ 의 범위에서 다양한 접착력을 보였다. 또한 이를 토대로 추론된 경향성을 바탕으로 접착 메커니즘을 분석한 결과, 5  $\mu\text{m}$  지름, 15  $\mu\text{m}$  높이의 마이크로 구조물 위에 0.6  $\mu\text{m}$  두께, 9  $\mu\text{m}$ 의 지름을 갖는 빨판 구조가 가장 좋은 접착력을 보여주었는데, 수직방향의 접착력으로 매끄러운 표면 위에서는 17  $\text{N}/\text{cm}^2$ , 인체 피부 조직위에서는 1.3  $\text{N}/\text{cm}^2$ 의 접착력을 보였다. 이는 실제 패치를 대체할 만한 접착력으로 건식접착 메커니즘이 바이오 패치로서 응용 가능하다는 점을 확인시켜 주었다.

#### 3.1 바이오 패치의 탈착 메커니즘

건식접착의 메커니즘은 반데르 발스 인력으로 인하여 표면에 접착하게 되는 것이다. 이로 인하여 접착은 비교적 쉬우나 탈착을 위해서는 특별한 메커니즘을 필요로 한다. 앞서 설명하였듯이 게코도마뱀은 기울어진 섬모 구조를 이용하여 방향성 있는 접착력을 만들어내어 원할 때는 언제든지 손쉽게 표면에서 발을 뺄 수 있다. 본 연구그룹도 경사 구조를 이용한 접착 탈착 메커니즘 뿐만 아니라 좀 더 발전된 형태의 탈착 메커니즘을 개발하여 발표하였다.

먼저 표면에 주름을 만든 건식접착체의 접착력을 인장력으로 조절할 수 있는 방식을 제안하였다(그림 13). 마이크로 구조가 형성된 PDMS 표면에 빨판 구조의 보호를 위한 캡을 씌운 뒤 양쪽 방향으로 잡아 늘린 후, UVO 처리를 하여 표면을 얇은 박막형태의 딱딱한 표면으로 개질을 시켰다. 그 후 보호 캡을 제거하면 빨판 부분은 여전히 접착력을 유지한 상태로 남게 되는데, 표면에서부터 탈착을 할 때는 양쪽에 가해진 인장력이 없어지면 표면에 마이크로 크기의 주름이 생기면서 표면에 굴곡이 발

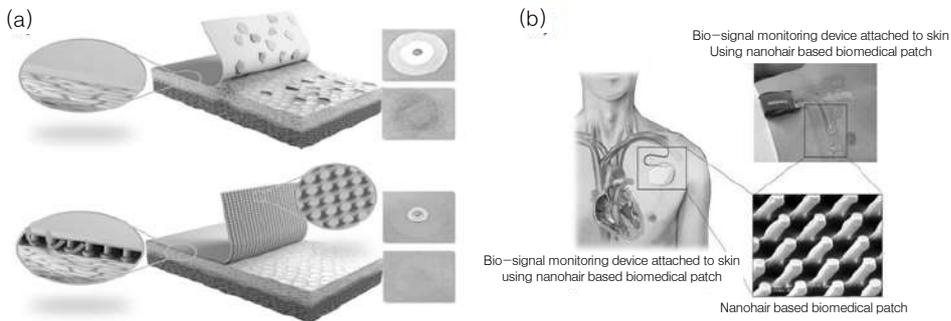


그림 11. (a) 기존의 습식접착 패치와 본 연구 그룹에서 개발한 건식접착 패치, (b) 스마트 바이오 패치의 구성도.

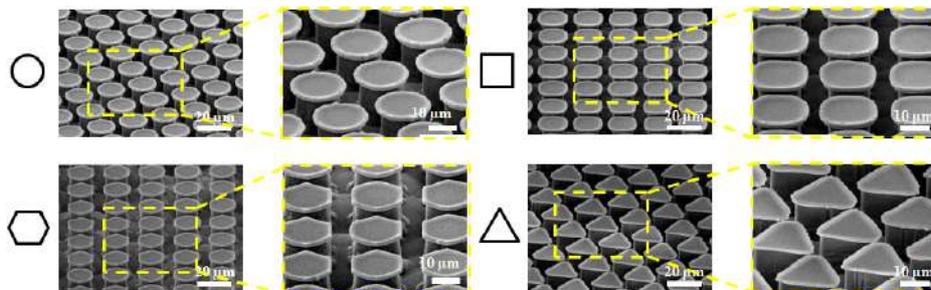


그림 12. 마이크로 구조물 위에 다양한 형상으로 설계된 빨판 형상.

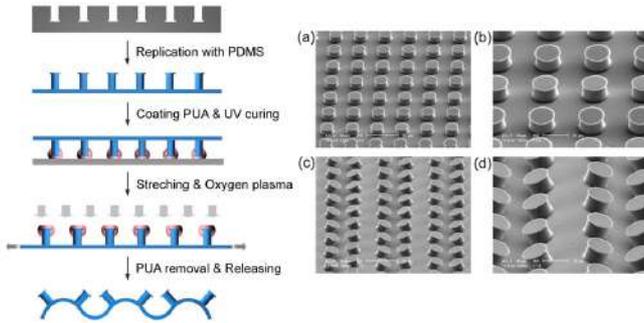


그림 13. 건식접착의 탈착 메커니즘: 수축/인장 방식, 탈착 시에 구조물 표면에 주름이 생김으로 인해서 표면으로부터 분리되는 원리.

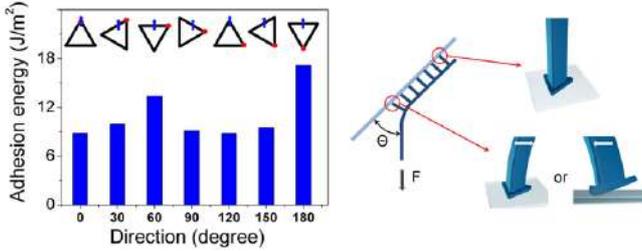


그림 14. 건식접착의 탈착 메커니즘: 빨판 형상의 제어를 통한 방식, 삼각형의 빨판 모양으로 인하여 방향성을 가지는 접착 표면.

생하게 된다. 이러한 원리로 능동적 접착력 조절이 가능한 메커니즘을 개발한 결과 최대 인장 하에서  $10.8 \text{ N/Cm}^2$ 의 수직 접착력과  $14.7 \text{ N/Cm}^2$ 의 수평 접착력이 측정되었고 인장이 없는 주름진 샘플에서는 접착력이 어느 방향에 대해서도 측정되지 않았다. 추가적으로 모든 방향의 접착에 대해서 100번 이상의 반복 사용에도 그 성능이 유지되는 것을 실험적으로 확인하였다.<sup>11</sup>

두 번째 탈착 메커니즘은 삼각형 빨판을 갖는 마이크로 구조물의 제작이다(그림 14). 모든 방향에 따라 일정한 접착력을 가지는 둥근 모양의 팁을 갖는 미세 구조와는 다르게 삼각형 구조를 갖는 마이크로 구조는 뜯어내는 방향에 따라 다른 접착력을 보였다. 탈착력이 삼각형 꼭짓점 방향에서 밀변방향으로 주어질 때, 탈착에 대해 꼭짓점이 균열 방지점이 되어 균열의 진전을 잘 막지 못하고 쉽게 떨어지게 되는 원리이다. 그와 반대로 밀변방향에서 꼭짓점 방향으로 탈착이 이루어지면 비교적 넓은 면적의 밀변이 균열의 진전을 막아주어 비교적 높은 값의 접착력을 보여 주게 된다.<sup>12</sup> 이러한 새로운 메커니즘은, 삼각형 팁의 구조를 사용하여 복잡한 공정이 소요되는 경사구조의 제작 없이 접착력의 방향성과 강한 수직 방향의 접착력을 동시에 갖는 신개념 건식접착제를 제시했다는 데 큰 의미가 있다.

### 3.2 심전도 측정이 가능한 스마트 바이오 패치

이렇게 개발된 건식접착 바이오 패치를 실제 활용을 위하여, 심전도 장비에 결합을 시도하였다. 계코도마뱀과 문어 빨판의 강점들이 서로 합쳐진 건식접착 표면에 피부를 통하여 추출할 수 있는 생체신호 추출전극을 하나로 통합함으로써, 지능형 바이오 패치 다시 말해서 스마트 패치를 개발할 수 있었다. 이렇게 개발된 스마트 패치는 효과적으로 생체신호를 추출할 뿐만 아니라 장시간 피부에 부착하고 있더라도 피부 표면을 오염시키거나 손상시키지 않는다는 장점을 가지게 된다. 실제 본 연구진이 확인한 결과 일주일 이상 패치를 부착하고 생활하는 경우에도 패치가 떨어지거나 피부가 손상되는 일은 일어나지 않았다(그림 15). 그리고 정확한

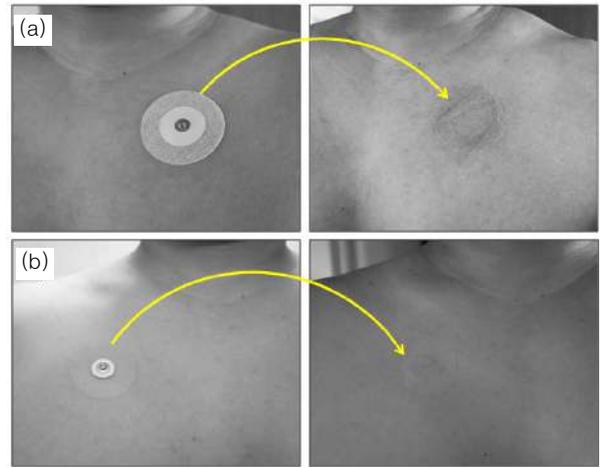


그림 15. (a) 기존의 습식 접착 패치를 사용한 경우, (b) 스마트 바이오 패치를 부착한 경우.

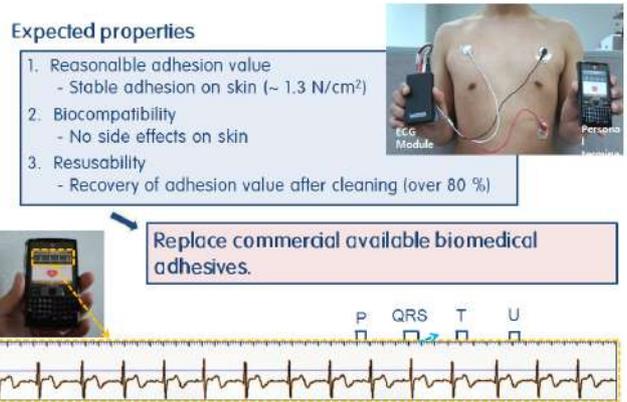


그림 16. 생체신호 추출이 가능한 장비와 스마트 패치를 결합한 모습 및 추출된 생체신호.

생체신호를 추출하기 위해서는 무엇보다도 피부와 센서부가 가까이 접촉해야 하는데 이 부분에 있어서도 분자간 인력을 이용하는 건식접착 패치가 효과적인 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다(그림 16).

이러한 연구결과는 이전에는 보여주지 못했던 결과일 뿐만 아니라, 앞으로의 사회가 추구하는 유비쿼터스 헬스케어 분야에 큰 파급효과를 가져 올 수 있는 기술로 평가 되고 있다. 본 연구진은 앞으로 더욱 다양한 분야에 적용 가능한 스마트 패치, 스마트 필름을 개발하기 위하여 현재도 다양한 분야에 속한 연구그룹과 활발히 연구를 진행하고 있으며, 머지 않아 실제 이러한 스마트 필름이 적용된 제품을 만날 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 특집에서는 표면의 다양한 성질을 구현하기 위하여 수행된 많은 연구들을 살펴보았다. 특히 이러한 표면은 자연을 관찰하고 이를 구현하고자 하는 많은 연구자들에 의해서 수행되었고, 나노기술의 발달이 이러한 성과들을 가능하게 하였다. 이렇게 만들어진 가능성 표면은 더욱 발전된 형태의 스마트 필름을 만드는데 중요한 요소기술로서 작용할 것이고, 앞으로 우리 일상생활에 활용될 날이 그리 멀지 않다는 것을 이번 글을 통하여 다시 한 번 확인할 수 있었다. 현재도 많은 연구자들이 새로운 자연

의 원리를 찾아 연구에 몰두하고 있으며 산업적으로도 새로운 기능의 지능형 표면(smart surface)에 대한 수요가 계속적으로 증가하고 있기 때문에, 첨단 우주산업에서부터 매일 접하는 제품에 이르기까지 이제껏 경험해보지 못한 새로운 응용기술들이 개발될 것이다. 이러한 기능성 표면들의 원리는 자연으로부터 나온 것이기 때문에 에너지 효율 측면이나, 환경적인 측면에서 강점을 가질 것으로 기대되며, 이러한 기술들은 발전된 나노기술을 바탕으로 다양한 분야에서 적절히 융합되고 발전되어, 인류에게 더욱 많은 기술적 도약과 당면한 문제들을 해결할 수 있는 실마리를 제공할 것이라고 확신한다.

### 참고문헌

1. K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. M. Peattie, W. R. Hansen, S. Sponberg, T. W. Kenny, R. Fearing, J. N. Israelachvili, and R. J. Full, *P.N.A.S.*, **99**, 12252 (2002).
2. H. Lee, B. P. Lee, and P. B. Messersmith, *Nature*, **448**, 19 (2007).
3. H. E. Jeong and K. Y. Suh, *Nano Today*, **4**, 335 (2009).
4. L. Qu, L. Dai, M. Stone, Z. Xia, and Z. L. Wang, *Science*, **322**, 238 (2008).
5. H. Ko, J. Lee, B. E. Schubert, Y.-L. Chueh, P. W. Leu, R. S. Fearing, and A. Javey, *Nano Lett.*, **9**, 52054 (2009).
6. M. K. Kwak, H. E. Jeong, T.-I. Kim, H. Yoon, and K. Y. Suh, *Soft Matter*, **6**, 1849 (2010).
7. H. E. Jeong, S. H. Lee, P. Kim, and K. Y. Suh, *Nano Lett.*, **6**, 1508 (2006).
8. H. E. Jeong, J.-K. Lee, H. N. Kim, S. H. Moon, and K. Y. Suh, *P.N.A.S.*, **106**, 5639 (2009).
9. T.-I. Kim, H. E. Jeong, K. Y. Suh, and H. H. Lee, *Adv. Mater.*, **21**, 2276 (2009).
10. H. Yoon, H. E. Jeong, T. Kim, T. J. Kang, D. Tahk, K. Char, and K. Y. Suh, *Nano Today*, **4**, 385 (2009).
11. H. E. Jeong, M. K. Kwak, and K. Y. Suh, *Langmuir*, **26**, 2223 (2010).
12. M. K. Kwak, H.-E. Jeong, W. G. Bae, and K.-Y. Suh, *Small*, in press.