

생체모사를 통한 고기능성 센서 개발

Ultrasensitive Sensors Inspired by the Nature

박병학 · 김지선 · 김태일 | Byeonghak Park · Jisun Kim · Tae-il Kim

Center for Neuroscience Imaging Research (CNIR), Institute for Basic Science (IBS),
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do 16419, Korea
School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU),
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do 16419, Korea
E-mail: taeilkim@skku.edu

1. 서론

자연의 모든 생물들은 적응과 진화를 거치며 살아간다. 이들은 각자의 고유한 삶을 영위하기 위해 특정 기능이 주위 환경에 최적화 되어있다. 최근 과학계에서 자연의 최적화된 기능을 모사하여 인간의 실생활에 적용할 수 있는 방법에 대해 활발히 연구되고 있다. '생체모사공학(biomimicking engineering)'은 동물들의 특별한 능력의 원천이 되는 생물학적 기능적 계층구조 및 물질들을 모사하여 자연에서의 지혜를 얻고자 하는 공학적 기법이다.¹ 예를 들어, 산우영의 씨의 고리모양의 구조를 이용하여 본뜬 벨크로(그림 1a)와 벽이나 천장을 자유 자재로 기어다니는 게코 도마뱀 발바닥의 나노 단위의 구조를 모사한 건식접착제(dry adhesive)가 있다(그림 1b). 이 외에도 넓은 시야각을 가진 파리 눈의 구조를 모사하여 160도 이상의 범위에서 모니터링이 가능한 디지털 카메라,² 나비 날개의 나노 구조로 인한 광학적 특징을 모사한 반사방지막³(anti-reflective film), 연 잎 표면 구조의 초소수성(superhydrophobic) 특징을 모사한 방수 필름,⁴ 그리고 게코도마뱀과 홍합의 점착물질을 응용한 습식/건식접착제⁵ 등이 자연의 특별한 기능들을 모사하여 기존의 문제점을 해결하거나 더욱 우수한 특성을 갖게 된 사례라고 할 수 있다.

본 글에서는 앞서 설명한 생체모사공학을 이용한 다양한 기술들 중 자극을 감지하는 센서들을 소개하고자 한다. 기존의 물리적 혹은 화학적 센서의 경우에는 그 기능이 단조롭거나, 감지능력이 낮아 실제 상용화하는 데 있어 어려움을 겪고 있다. 특히 기존의 실리콘기반의 소자의 센서의 경우, 감지 능력이 낮고 공정이 복잡하며 유연하게 만들기 어렵다는 단점이 있다.⁶ 하지만, 생체모사공학을 이용하면 간단하면서도 높은 감지능력을 가지는 센서를 제작할 수 있다. 생체모사공학을 이용한 다양한 센서와 그와 관련한 최신 연구결과에 대해 소개하고자 한다.

Author



박병학

2014 성균관대학교 화학공학부 (학사)
2014-현재 성균관대학교 화학공학부 (석사)



김지선

2015 성균관대학교 화학공학부 (학사)
2015-현재 성균관대학교 화학공학부 (석사)



김태일

2003-2009 서울대학교 화학생물공학부 (박사)
2009 서울대학교 화학생물공학부 (Post-Doc.)
2009-2012 University of Illinois at Urbana-Champaign (Post-Doc.)
2013-현재 성균관대학교 화학공학부 조교수

2. 본론

2.1 두족류 동물의 피부를 모사한 위장 센서⁷

2.1.1 두족류 동물의 위장 원리 및 모사 센서

바닷가에는 많은 생물들이 먹이사슬에 얽혀 천적관계를 유지하고 있다. 따라서 먹이사슬의 아래에 있는 생물들은 천적을 피하기 위한 다양한 방어 기작을 가지고 있다. 예를 들면, 복어와 같은 생물들은 뱀독을 가지고 있거나 전기뱀장어 같은 생물들은 고전압을 내기도 한다.

특히 문어, 오징어와 같은 두족류 생물들은 천적을 회피할 목적뿐만 아니라 의사소통, 포식, 생식 등의 목적으로 피부의 색깔을 바꾸기도 한다. 그림 2는 파란색의 피부색을 가진 문어가 천적을 회피하기 위해 주변의 환경과 동일한 색으로 피부를 바꾸는 모습이다. 이 위장능력은 주변의 사물에만 국한되지 않고 온도나 빛의 자극에도 반응한다. 두족류의 피부는 수 초 내의 빠른 색깔 변화와 응답속도를 보이는데, 이러한 변화는 두족류의 피부 구조에서 그 원인을 찾을 수 있다. 두족류의 피부에서 자체적으로 가지고 있는 색소포 기관(chromatophore organs)이 근육과 신경에 연결되어있기 때문에 자극에 따라 색깔을 빠르게 변화시킨다. 또한 홍색소포(iridophore cells) 및 백색소포(leucophores)는 모든 색을 각도에 따라 반사하고 백라이트처럼 흰색을 확산하여 각 색을 감지하고 대조시키는 특성을 보인다.

이번 연구는 미국 University of Illinois의 John A. Rogers group에서 두족류의 색 변화 메커니즘을 모사하여, 외부

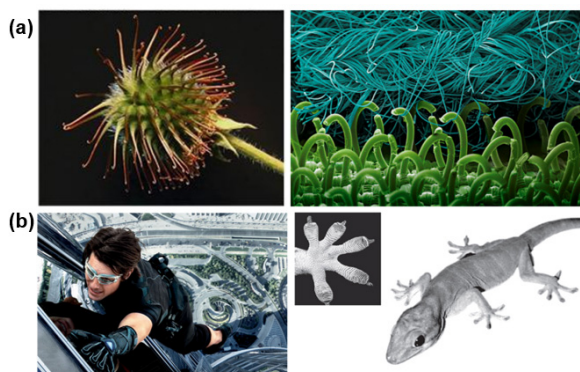


그림 1. 생체모사를 이용한 벨크로와 건식접착제.



그림 2. 파란색 피부의 문어의 위장장면.⁸

자극에 빠르게 색이 변화하는 센서를 개발한 것으로 2014년 미국 국립과학원회보(Proceedings of National Academy of Sciences)에 게재되었다.⁷

그림 3a는 전체적인 두족류 동물의 피부를 모사한 위장(camouflage) 센서의 모식도이다. 맨 위층 ac(artificial chromatophore) 층은 온도에 감응하여 색이 변하는 성질을 띄는 염료를 이용한 인공색소체로 색소포기관을 모사했으며 자극 신호를 줄-열(Joule heating)로 바뀌는 역할을 한다. 바로 아래의 al(artificial leucodye) 층은 Ag 층으로서 반사판의 역할을 하는 홍색소포를 모사하였다. Am(artificial muscle)층은 매우 얇은 실리콘 다이오드(silicon diode)로 받은 신호를 제어하는 역할을 하며 두족류의 신경과 연결된 근육을 모사하였다. poly-dimethylsiloxane(PDMS)층 아래의 ao(artificial opsins)층은 광센서(photodiode)로 주변 빛을 인식하는 역할을 한다.

위와 같은 체계는 전체적으로 모듈러스(modulus)가 낮고 얇기 때문에 소자가 유연한 특징을 가지므로 다양한 형태의 구조물에서도 쉽게 구부러지며(그림 3b), 구부러진 상태에서도 위장 특성이 유지된다(그림 3c). 이러한 센서는 자극의 유무에 따라 on/off가 빠르게 일어나며 시간의 경과에 따라 자극의 범위나 위치를 다르게 했을 때에도 가역적으로 적용된다(그림 3d).

2.1.2 위장 센서의 특성

그림 4a는 인공색소체와 반사판의 광학적 특성을 나타낸 그림이다(파란색: 47 °C, 검은색: 20 °C). 가시광선 영역대의 빛 혹은 열을 흡수하기 전의 온도와 흡수한 후의 온도에 따른 광학적인 반사율 차이를 보여준다. 빛 혹은 열을 흡수하기 전에는 외부 빛을 거의 반사하지 않지만, 염료 및 Ag 반사판에 의해 증가된 열은 염료의 반사율을 50%까지 끌어올려 주변의 자극과 같은 색을 띠게 된다. 이 센서는 수십 초 동안 센서 특성이 유지되고, 이는 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 양상을 가진다(그림 4b). 각 층은 분리되어있으므로 높아진 온도에도 실리콘 소자 등의 각각의 층

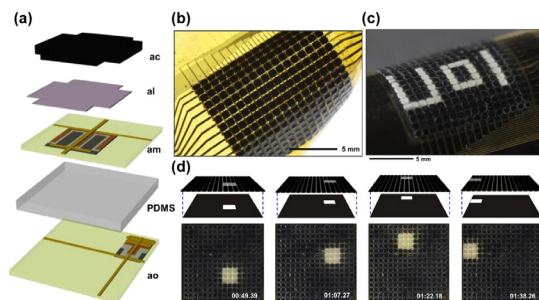


그림 3. 위장 센서의 모식도 및 성질.⁷ (a) 위장센서의 모식도, (b) 위장센서의 유연성, (c) 굽혔을 때의 위장센서의 특성, (d) 위장센서의 빠르고 가역적인 on/off 전환 특성.

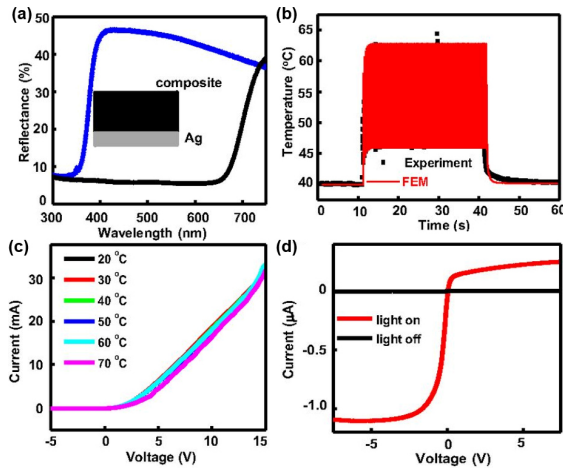


그림 4. 위장 센서의 특성.⁷ (a) 온도에 따른 인공색소체의 광학적 특성, (b) 위장 센서의 온도 특성 및 시뮬레이션, (c) 온도에 따른 실리콘 다이오드의 특성, (d) 빛 자극의 유무에 따른 전기적 특성.

에 영향을 미치지 않는다(그림 4c). 그림 4d는 실리콘 포토 다이오드의 특성을 나타낸 그림이다. 빛 자극이 들어왔을 때에는 아무런 전기적 특성을 보이지 않다가 빛이 들어왔을 때 전기적인 특성을 나타낼 수 있다. 이러한 특성은 빛이 들어왔을 때의 신호를 제어할 수 있게 해준다.

이러한 두족류의 위장 특성을 모사한 광학적 센서는 단순한 디스플레이뿐만 아니라 산업적으로나 군사적으로도 유용하여 군사적인 위장기술이나 보안 등의 정밀 기술에 다양하게 응용이 가능할 것으로 전망된다.

2.2 거미의 감각기관을 모사한 균열센서⁹

거미는 바퀴벌레와 함께 작은 진동도 알아차릴 수 있는 곤충으로 알려져 있다. 거미는 거미줄을 이용하여 먹이를 잡아먹는데, 신기한 점은 눈이 퇴화되어 있음에도 거미줄에 걸린 먹이의 위치를 단번에 파악한다는 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 거미는 진동 자극에 민감하기 때문인데, 이는 8개의 다리 관절에 위치해있는 균열로 이루어진 감각기관을 이용하여 거미줄의 떨림(진동)을 감지하고 위치를 파악해내기 때문이다.

이번 연구는 서울대학교 최만수 교수 연구팀과 성균관대학교 김태일 교수 연구팀의 공동연구로 진행되었으며 2014년 *Nature*에 게재되었다.⁹

2.2.1 거미 모사 균열센서의 원리 및 특징

거미 다리의 관절 바로 윗부분에는 진동을 수용하는 감각기관인 금형 기관이 존재한다(그림 5a). 외골격에 나있는 균열은 내부 큐티클 층에 존재하는 신경세포와 연결되어 있다(그림 5b). 따라서 먹이나 천적이 접근할 때, 거미줄을 통해 다리로 전해져 오는 진동이 금형 기관을 자극하게 되

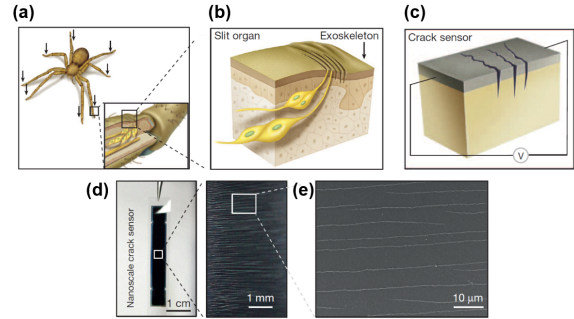


그림 5. 거미의 감각기관과 이의 모사 센서.⁹ (a-b) 거미의 다리의 관절에 위치한 진동을 감지하는 금형기관과 감각신경의 모식도, (c) 거미의 금형기관을 모사한 균열센서, (d) 균열센서의 전체적인 모습, (e) 센서 표면의 균열의 SEM 이미지.

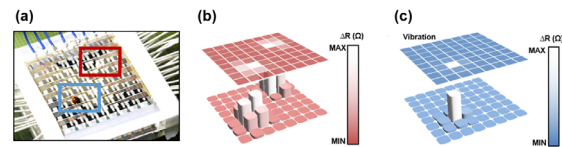


그림 6. 균열 센서의 압력 및 진동 센싱.⁹ (a) 8x8픽셀의 멀티플렉스 소자 및 동일한 압력의 고분자 조각과 무당벌레, (b) 압력 자극을 감지한 지점의 저항변화 도식화, (c) 진동 자극을 감지한 지점의 저항변화 도식화.

고 이를 하부의 신경세포가 감지하게 된다.

이러한 거미의 감각기관을 모사하여 진동 및 압력 등 기계적인 자극을 감지하는 초고감도 균열센서가 개발되었다. 단단한 외골격은 백금을, 외골격 아래의 부드러운 큐티클 층은 점탄성 고분자인 (polyurethane acrylate)(PUA)를 사용하였고, 이 박막을 물리적으로 굽혀 균열을 만들어 금형 기관을 모사하였다(그림 5c). 그림 5d는 거미의 진동을 수용하는 감각기관(금형기관)을 모사한 위 균열 센서의 전체적인 모양이고, 그림 5e는 센서에 만들어진 균열을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영한 사진이다. 외부 자극이 가해지는 경우, 이 균열들의 사이가 벌어지게 되고 그에 따라 균열 양측의 경계가 맞물리는 정도가 달라지게 된다. 이에 따라 전기전도도의 차이가 생겨 저항변화의 정도를 통해 미세한 진동 및 압력을 읽어낸다.

일반적으로 센서의 민감도를 나타내는 단위로 게이지율(Gauge factor) 단위($\Delta R/R_0$)가 쓰이는데, 이는 외력에 의해 생긴 단위 변형 당 저항변화율로 표현되며, 게이지율이 높을수록 센서의 특성이 좋다고 할 수 있다. 본 균열센서는 변형률 ~2% 범위에서의 게이지율이 2,000을 상회하는 값을 가진다. 이는 기존의 연구되어 온 기계적 센서들의 게이지율을 훨씬 웃도는 높은 수치이며, 미세한 자극을 감지할 수 있는 초고감도 센서임을 의미한다.

고감도 센서로서 기계적 압력과 진동의 차이의 구별을 확인하기 위하여 그림 6a와 같이 8x8 픽셀로 이루어진 멀티플렉스소자를 제작하였다. 우측 상단(붉은 박스)에는 5 Pa의

압력의 무게에 해당하는 고분자 조각(poly-dimethylsilane)을, 좌측 하단(푸른 박스)에는 무당벌레를 두어 동일한 5 Pa 압력의 무게와 동시에 고유의 진동(200 Hz) 자극을 주었다. 그림 6b는 두 개의 압력 자극을 감지한 지점의 저항 변화를 도식화한 것이다. 고분자조각과 무당벌레가 있는 두 지점 모두 동일한 압력을 받고 있으므로 동일한 범위에서 저항변화가 나타났다. 그림 6c는 진동 자극을 감지한 지점을 나타낸 것이다. 오직 무당벌레 만이 진동을 발생시키므로 좌측 하단(푸른 박스)에서만 진동자극이 감지되어 저항변화가 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 멀티플렉스 소자를 이용하여 균열 센서가 압력 뿐만 아니라 진동 또한 구분이 가능함을 확인할 수 있다. 더불어, 무당벌레의 경우 고속 푸리에 변환(fast fourier transform)을 통해, 압력 자극과 진동 자극을 함께 감지할 수 있다.

2.2.2 거미센서의 진동 인식 능력 및 이의 응용

균열 센서의 압력 및 진동 센싱 특성을 이용하여 다양한 어플리케이션에 사용할 수 있다. 특히 균열 센서를 웨어러블 소자로 제작하여 몸에서 발생할 수 있는 기계적인 자극을 고감도로 감지할 수 있고, 이를 이용하여 음성인식, 맥박측정, 유량 등의 생체 신호를 측정할 수 있다.

균열 센서의 높은 진동감지 능력은 악기 등에 부착하여 특정 주파수 감지하는 데에 이용할 수 있다(그림 7a). 바이올린의 E-, A-, D-, G- 등의 다양한 음계의 소리의 현을 켜를 때, 각 소리에 해당하는 음파를 감지할 수 있다(그림 7b). 그림 7c는 'Salut d'Amour'의 곡을 직접 연주하여 균열 센서로 측정된 그림이다. 거미센서로 감지한 곡의 각 음에 해당하는 주파수와 그 변화를 실시간으로 측정할 수 있다.

균열 센서의 유연한 특성을 이용하여 사람의 목에 붙여 직접 음성패턴인식도 가능하다. 그림 8a는 균열 센서를 목에 붙여 음성인식을 진행하는 사진이다. 균열 센서의 두께는 약 60 μm 이고 유연한 기관으로 제작되었으므로 목에

붙일 수 있는 웨어러블소자(wearable electronics)로의 응용이 가능하다. 목에 붙인 균열 센서로 사람의 음성패턴을 인식하여 단어를 인식할 수 있다. 특히 음성인식기술에서의 가장 중요한 이슈 중 하나는 바로 '칵테일 파티 현상(cocktail party phenomenon)'이다. 칵테일 파티 현상이란 소음이 많은 외부 환경에서도 상대방과의 대화에서의 미전달이 원활히 진행될 수 있다는 것을 의미한다. 그 이유는 사람의 뇌는 특정한 목소리 주파수 영역대만을 필터링할 수 있기 때문이다. 이와 같은 현상으로 소음이 있는 환경에서 인간의 뇌는 자체적인 필터링으로 단어 인식이 가능하지만, 마이크와 같은 기계적 센서와 같은 경우에는 소음을 직접 필터링 할 수 없다는 문제점이 있다. 그러나 균열 센서는 목 진동을 직접적으로 감지한다. 따라서 시끄러운 외부 환경에서도 목 진동만을 그대로 전달할 수 있기에 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 그림 8b는 소음이 없을 때와 소음(92 dB)이 있을 때 균열 센서, 일반적으로 사용되는 마이크와 목 진동 마이크를 이용하여 각각 "Go", "Jump", "Shoot", "Stop" 등으로 단어 인식을 진행하고 비교한 그림이다. 소음이 없는 환경에서는 세 개의 센서의 경우 단어 인식률이 100%에 가까운 수치를 보인다. 반면, 소음이 있을 경우 마이크의 인식률은 현저하게 떨어지는

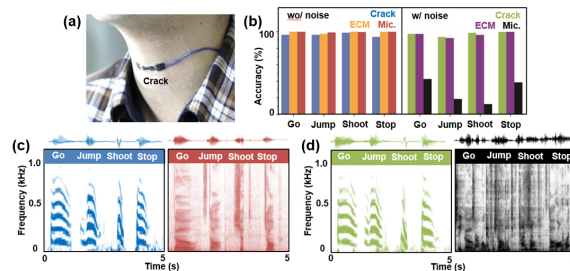


그림 8. 균열 센서의 음성 인식 및 스펙트럼 분석.⁹ (a) 목에 부착한 균열 센서, (b) 소음의 유무에 따른 단어 인식률, (c) 소음이 없을 때의 단어 인식 스펙트럼, (d) 소음이 있을 때(92 dB)의 단어 인식 스펙트럼.

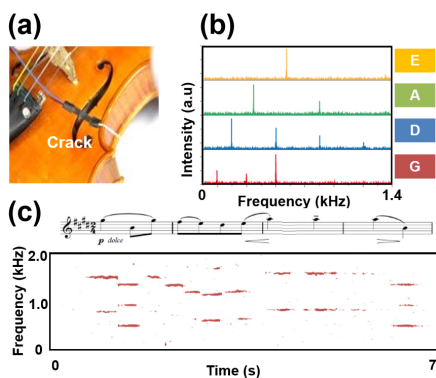


그림 7. 균열 센서의 음파 센싱.⁹ (a) 바이올린에 부착한 균열 센서, (b) E-, A-, D-, G- 등의 음계의 진동수 센싱, (c) 곡 Salut d'Amour 연주를 통한 실시간 진동수 감지.

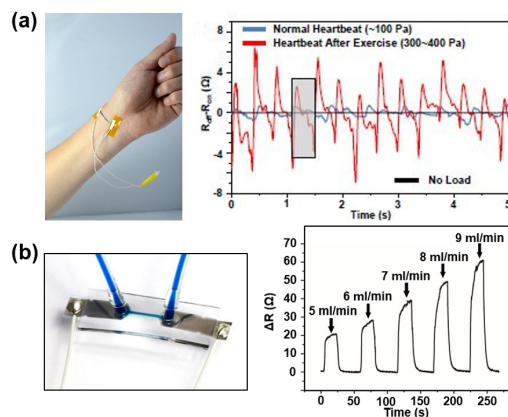


그림 9. 균열 센서의 응용.⁹ (a) 균열센서를 이용한 심박수 측정 및 (b) 유량 측정.

데에 반해, 균열 센서의 경우에는 일반적으로 사용되는 목진동 마이크와 비슷하거나 상회하여 100%에 가까운 인식률을 수치를 보였다. 추가적으로 균열 센서와 마이크에서 각각 스펙트럼분석을 진행했을 때, 소음이 없는 환경에서 균열센서와 마이크 모두 진동수 신호가 명확하게 보이는 반면, 소음이 있는 환경에서 마이크의 진동수 신호가 균열 센서에 비해 뭉개지는 현상을 발견할 수 있다(그림 8c, d). 이는 균열 센서가 단순한 진동 인식 기능을 넘어 웨어러블한 센서로서 소음이 있는 환경에서도 음성패턴을 인식할 수 있다는 것을 의미한다.

음성인식 외에도 고감도 균열 센서를 응용할 수 있는 방법은 다양하다. 팔목에 부착하여 맥박 및 심박수를 모니터링 할 수 있으며 마이크로 채널에서의 소량의 유체의 흐름도 측정할 수 있다. 이는 생체 내의 미세한 기계적 자극 역시 측정 가능함을 의미한다. 앞선 예와 같이 균열 센서는 의공학과 생물학적 응용 외에도 정밀한 측정이 필요한 나노, 정밀분야 등에 무궁무진하게 응용할 수 있다.

2.3 딱정벌레 날개 잠금 장치 모사 센서¹¹

2.3.1 딱정벌레 잠금장치 모사 센서의 원리

딱정벌레의 경우 날개에 강력한 잠금장치를 가지고 있다. 딱정벌레는 두 개의 날개를 가지고 있는데, 앞날개인 딱지날개(elytra)와 뒷날개라고도 불리는 막질의 날개(alae)이다. 실제로 딱정벌레가 비행할 때는 날개를 사용하는데, 비행이 끝나면 앞날개 아래에 접혀 들어가 고정된다(그림 10a).

이 때 딱정벌레의 날개와 몸은 일련의 잠금 장치로 고정된다. 딱정벌레가 날개를 펴고 접을 때, 수많은 작은 섬모들이 측방향의 전단 마찰을 최대화시키면서 수직방향의 박리를 최소화하여 몸과 (뒷)날개 사이의 잠금 기능을 가능하

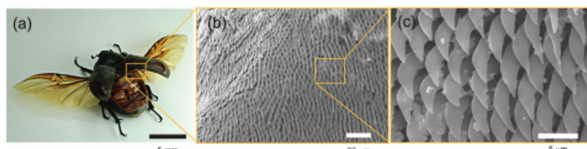


그림 10. 딱정벌레 날개의 구조.¹⁰ (a) 딱정벌레의 날개, (b-c) 딱정벌레의 날개 잠금 장치에 있는 나노 섬모로 이루어진 미세 구조. Reproduced with permission of *Adv. Mat.*, Copyright (2012) Wiley Online Library.

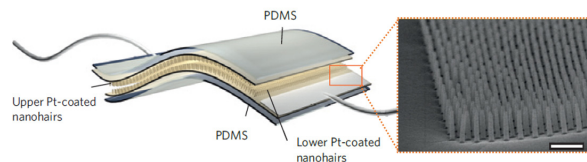


그림 11. 딱정벌레의 날개 잠금장치 원리를 모사한 기계적 센서의 전체적인 모식도 및 나노 섬모의 SEM 이미지.¹¹ Reproduced with permission of *Nat. Mater.*, Copyright (2012) Nature Publishing Group.

게 한다(그림 10b, c).

자연에서 동·식물의 독창적인 표면 구조를 모사하여 다양한 디바이스를 개발해 온 앞선 사례와 같이, 이러한 딱정벌레 날개의 섬모-섬모 간 잠금 메커니즘과 원리를 이용하여 외부로부터의 기계적인 자극을 감지할 수 있는 유연한 고감도 기계적 센서가 개발되었다. 이는 서울대학교 교수팀의 연구로 2012년 *Nature Materials*에 게재되었다. 이 잠금 장치를 응용한 센서(그림 11)는 고종횡비(high aspect ratio, 50 nm radius, AR=10)를 갖는 나노 섬모들(그림 11, 내부 사진)이 유연한 PDMS 고분자 기판 사이에 샌드위치 구조로 위치하고 있다.

딱정벌레의 잠금 메커니즘 원리와 동일한 원리로 작용하기 위해 위·아래 방향으로 맞물린 고분자 나노 섬모들은 고밀도($\sim 1.85 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$)로 배열되어 반데르발스 힘을 극대화 시킨다. 또한 이 섬모들은 백금이 증착되어있기 때문에, 외부 자극을 전기적 신호로 관찰할 수 있다.

위와 같은 소자에 외부 힘이 가해지면 위·아래 접촉하고 있던 섬모들 사이에서 작은 비틀림이 생기며 구조적으로 변형되고, 이는 곧 전기저항의 변화로 이어져 힘을 감지할 수 있게 된다(piezoresistive sensing).

2.3.2 나노 섬모 잠금 센서의 응용

앞서 언급한 바와 같이 잠금 장치를 이용한 나노 섬모 센서에서는 외력에 의해 섬모들 간에 비틀림이 생기고, 이 때 발생한 저항의 변화를 통해 자극을 감지할 수 있다. 나노

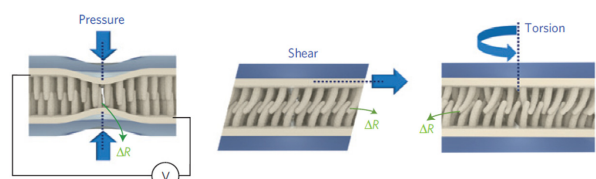


그림 12. 다양한 기계적 자극(압력, 전단, 뒤틀림)에서 맞물린 나노 섬모들의 구조적인 변형 모습.¹¹ Reproduced with permission of *Nat. Mater.*, Copyright (2012) Nature Publishing Group.

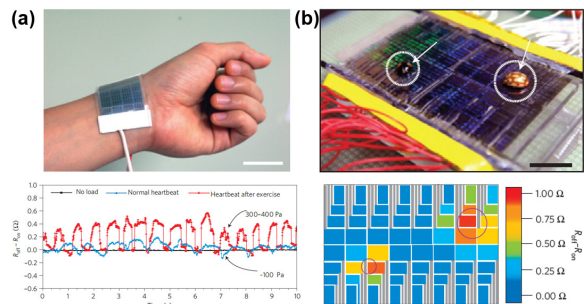


그림 13. 딱정벌레 날개 모사 센서의 응용.¹¹ (a) 맥박 측정을 위해 손목에 부착된 센서(위) 및 저항변화로 표현된 맥박의 신호(아래), (b) 딱정벌레가 올라가 있는 멀티플렉스 소자(위) 및 압력 크기 프로파일(아래). Reproduced with permission of *Nat. Mater.*, Copyright (2012) Nature Publishing Group.

섬모 센서는 게이지율의 차이를 통해 각기 다른 기계적 자극(압력, 전단, 비틀림 등)을 서로 구별해 낼 수 있다. 그림 12와 같이 외부 자극의 종류에 따라 섬모들 간의 뒤틀림 양상이 다르기 때문에 서로 다른 접촉저항 차이를 만들고 이로써 자극의 종류마다 고유한 게이지율을 갖는다. 각각의 경우에 ~11.45(압력), ~0.75(전단), ~8.53(뒤틀림)에 해당하는 게이지율을 가지며 특히 압력과 뒤틀림 자극의 경우 기존의 연구 결과보다 상당히 높은 게이지율을 갖는다. 각기 다른 기계적 자극이 게이지율의 차이를 통해 서로 구별되는 것은 인간의 피부에 감각기관이 자극을 구별해내는 시스템과 비슷하다.

나노 섬모 센서는 다양하게 응용 가능하다. 예로써 그림 13a는 나노 섬모 센서를 손목에 부착하여 맥박의 압력을 감지하고 저항변화로 읽어내 가시화한 것을 보여준다. 맥박을 인지함과 동시에 저항변화의 크기 차이를 통해 운동 전(-100 Pa)과 운동 후(300-400 Pa)의 맥박의 차이를 구별할 수 있다. 이 센서는 또한 여러 위치에서 발생하는 자극을 각각 구별하여 감지할 수 있다. 그림 13b는 다양한 크기의 센서가 64픽셀($8 \times 5 \text{ cm}^2$)로 연결되어 있는 멀티플렉스 소자이다. 무당벌레 두 마리를 멀티플렉스 소자 위에 얹어 압력을 가해주었을 때, 그림 13b(아래)와 같이 무당벌레에 의한 압력의 정보(크기, 위치 등)를 색을 통해 직관적으로 보여준다. 이러한 나노 섬모 잠금장치를 이용한 센서는 생 적합적(biocompatible)이며 유연한 고분자 물질을 기반으로 하고 있기 때문에, 최적화된다면 가까운 미래에 헬스 케어를 위한 웨어러블 장비 및 인공 피부에도 사용 가능할 것으로 보인다.

3. 결론

최근 자연 곳곳에 존재하는 독특한 특징을 모사한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 본 글에서는 두족류 동물의 피부를 모사한 위장 센서, 거미의 진동을 수용하는 감각기관

을 모사한 균열센서, 그리고 딱정벌레의 날개 하부의 잠금 장치의 미세구조를 응용한 나노 섬모 잠금 센서의 원리부터 응용까지 알아보았다. 이렇게 자연을 모사한 센서들은 색과 같은 시각적 자극부터 압력 및 진동 등의 기계적 자극까지 다양한 자극을 감지할 수 있다. 생체모사공학을 바탕으로 개발된 여러가지의 센서들은 인공 피부에 삽입되거나 생체 내에서 세밀한 생체신호를 읽어내는 등 다양한 분야에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 이러한 고성능 센서들이 가까운 미래산업에 다양하게 응용될 것을 기대해본다.

참고문헌

1. M. Hussain, J. Wackerlig, and P. A. Lieberzeit, *Biosensors*, **3**, 89 (2013).
2. Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. Xiao, I. Jung, K.-J. Choi, Z. Liu, H. Park, C. Lu, R.-H. Kim, R. Li, K. B. Crozier, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Nature*, **497**, 953 (2013).
3. R. H. Siddique, G. Gomard, and H. Hölscher, *Nat. Commun.*, **6**, 6909 (2015).
4. N. A. Patankar, *Langmuir*, **20**, 8209 (2004).
5. H. Lee, B. P. Lee, and P. B. Messersmith, *Nature*, **448**, 338 (2007).
6. E. A. C. Johnson, R. H. C. Bonser, and G. Jeronimidis, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **367**, 1559 (2009).
7. C. Yu, Y. Li, X. Zhang, X. Huang, V. Malyarchuk, S. Wang, Y. Shi, L. Gao, Y. Su, Y. Zhang, H. Xu, R. T. Hanlon, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **111**, 12998 (2014).
8. <https://www.youtube.com/watch?v=eS-USrwUfA>
9. D. Kang, P. V. Pikhitsa, Y. W. Choi, C. Lee, S. S. Shin, L. Piao, B. Park, K. -Y. Suh, T.-I Kim, and M. Choi, *Nature*, **516**, 222 (2014).
10. C. Pang, T. -I. Kim, W. G. Bae, D. Kang, S. M. Kim, and K. Y. Suh, *Adv. Mater.*, **24**, 475 (2012).
11. C. Pang, G.-Y. Lee, T.-I. Kim, S. M. Kim, H. N. Kim, S.-H. Ahn, and K.-Y. Suh, *Nat. Mater.*, **11**, 795 (2012).