

임 현 의 한국기계연구원 나노자연모사연구실 실장

| e-mail : helim@kimm.re.kr

박 승 철 한국기계연구원 나노자연모사연구실 선임연구원

| e-mail : scpark@kimm.re.kr

이 덕 규 한국기계연구원 나노자연모사연구실 선임연구원

| e-mail : educk9@kimm.re.kr

자연의 뛰어난 슬기로운 많은 부분 최적화된 자연물의 구조와 표면에서 기인한다. 이 글에서는 에너지 효율을 높이고 기능을 극대화하며 환경에 대한 부담을 저하시키려 계속 진화하는 자연의 지혜로운 구조와 표면을 살펴보고, 지속가능한 삶을 위한 과학기술의 개발방향을 제안하고자 한다.

자연의 기능성 구조 및 표면

자연에 존재하는 물체들은 다양한 구조로 이루어져 있으며 여러 가지 기능의 표면을 가지고 있다. 자연의 생물체와 무생물은 견고하면서도 짜임새 있는 구조로 구성되어 있고, 외부환경과 직접 접하며 항상 상호작용을 하면서 끊임없이 변하고 있는 표면으로

자연의 현명함을 그대로 드러내고 있다. 그러하기에 자연의 현명함을 배워 현존하는 과학기술의 한계점을 극복해 보려는 과학자들이 가장 관심을 보이는 곳도 자연의 구조와 표면일 것이다. 이 글에서는 자연이 가지고 있는 마이크로 스케일의 구조와 표면구조가 어떤 기능을 발현하며 이를 공학적으로 응용해 보고자 하는 어떤 시도들이 있었는지 소개하고자 한다.

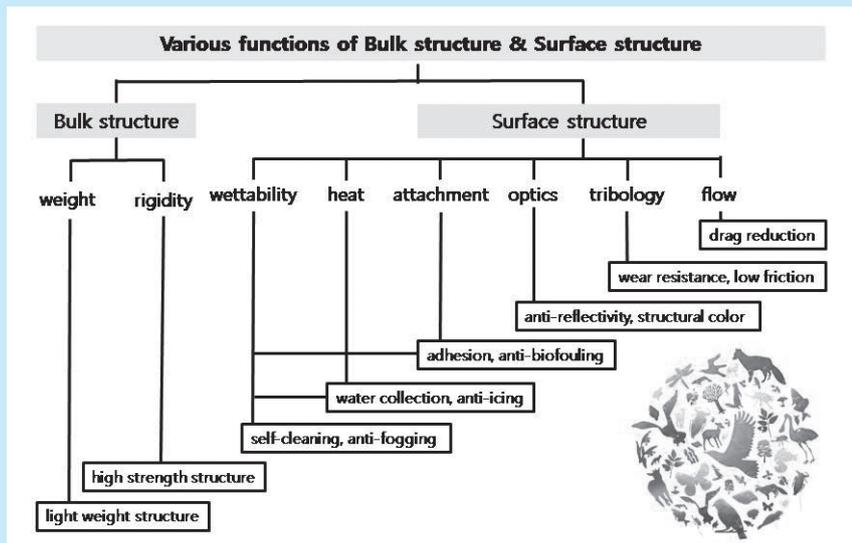


그림 1 자연의 구조와 표면이 구현하는 다양한 기능들

가장 쉽게 배울 수 있는 자연의 지혜: 구조 및 표면

자연을 배워 공학적 난제를 해결하는 자연모사공학의 분류를 명확히 하는 것은 참으로 어렵다. 여러 선진국에서 다양한 분류들이 발표되고 있는데, 분류의 기준에 상관없이 가장 많은 예를 보여주는 것이 바로 자연에 존재하는 구조와 표면의 기능들이다. 그림 1은 자연의 구조와 표면에서 얻을 수 있는 기능을 정리한 것이다. 구조라는 것은 그 크기가 다양한데, 새의 날

개를 보고 비행기의 형상을 설계하는 구조도 있지만 여기서는 물체를 이루는 마이크로 스케일의 구조를 말한다. 이러한 미세구조는 물체를 이루는 전체에 3D 구조를 가지도록 형성되어 경량이나 강성의 성능을 가지도록 역할을 한다. 또한 표면에서도 화학적인 성질뿐만 아니라 표면에 존재하는 미세구조로 인하여 한 가지 또는 다수의 기능을 발현할 수 있도록 한다.

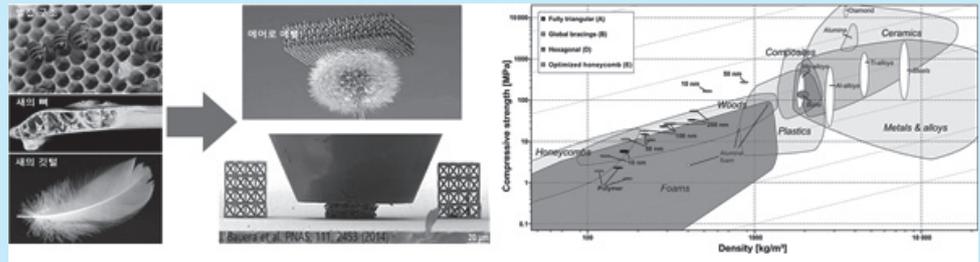


그림 2 뼈 구조 모사 초경량 소재(High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture, PNAS, 2014)

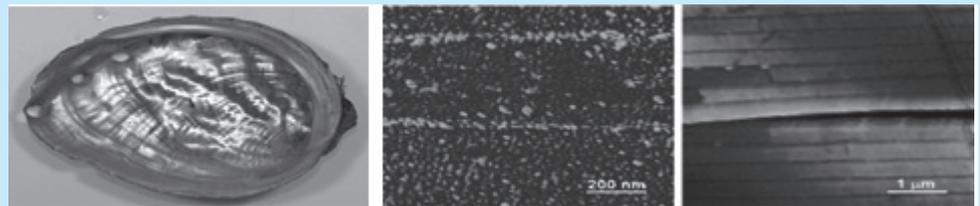


그림 3 전복 껍질의 고강도 구조(Nanoscale Structural and Mechanical Characterization of a Natural Nanocomposite Material: The Shell of Red Abalone, Nano Lett., 2004)

더 강하게 더 가볍게 더 효율적으로 변해가는 구조들
 자연이 가지는 구조의 가장 큰 특징은 계층구조로 이루어져 있다는 것이다. 모든 물질은 원소로 구성되어 있고 이는 다시 분자>원자>쿼크, 렙톤 등으로 구성되어 있다. 계층구조를 사람의 몸에 적용하면 사람의 몸은 DNA로 시작하여 세포-조직-기관-기관계-인체로 구성된다. 다른 개념으로 자연의 물체들은 큰 구조 밑에 작은 구조를 가지고 있고 이는 또한 더 작은 미세구조들이 모여 이루어지는 계층구조를 가지고 있다. 이러한 구조 특성은 여러 가지 기능들을 발현하는데, 자연계에서 흔히 볼 수 있는 벌집구조, 깃털, 동물의 뼈, 나무 등은 그 자체의 독특한 구조를 통하여 무게는 최소화하면서 외부의 물리적인 충격에 견디는 특징을 보여준다. 이 특징들은 경량 신소재에 영감을 제공하여 에너지 효율은 높이고 강성까지 높이는 소재를 만들 수 있도록 도와준다. 예를 들어 깃털에 존재하는 매우 작은 크기의 공동구조를 모사한

금속소재인 에어로 메탈의 무게는 스티로폼의 1.3%에 불과하지만 자기 무게의 약 4만 배를 견디는 초경량 신소재로 유사한 부피의 민들레 위에서 버틸 수 있을 만큼 매우 가볍다. Karlsruhe 연구소에서는 어떤 구조가 가장 강하면서도 견고한지 다양한 3D 미세구조에 대한 연구를 진행 중이다(그림 2). 초경량 신소재는 무게가 에너지 효율의 요인이 되는 항공기, 자동차, 선박 등의 핵심기술이며, 널리 응용이 가능하다.

바닷가에서 흔히 볼 수 있는 조개류는 또 다른 신소재 개발에 영감을 제공한다. 특히 전복의 경우에는 외부의 충격에 매우 강한 특징을 지니는데, 그 이유는 전복의 껍질이 여러 층의 층상 구조를 통하여 외부의 충격을 흡수 및 분산 시킬 수 있기 때문이다(그림 3). 따라서 층상 구조를 통한 충격의 흡수 및 분산을 인위적으로 구현하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 금속 및 비금속의 복합물질로 이루어진 층상 구조 형성이 많은 관심을 받고 있다.

다양한 구조의 특징 중 자연의 구조가 가지는 가장

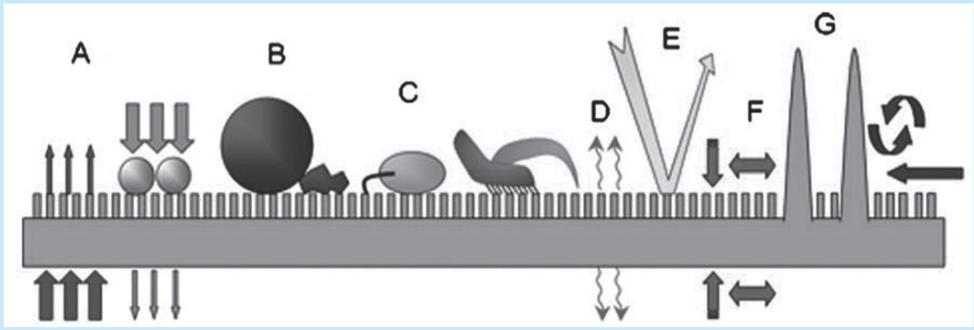


그림 4 마이크로 구조를 갖는 소수성 표면의 식물 앞에서 일어나는 기능들에 대한 개략도: 수분흡수 및 방출, 표면 젖음성, 접착성, 감지, 광학성, 기계적인 물성, 표면온도 조절 등(Multifunctional surface structures of plants: An Inspiration for biomimetics, Prog. in Mater. Sci., 2009)

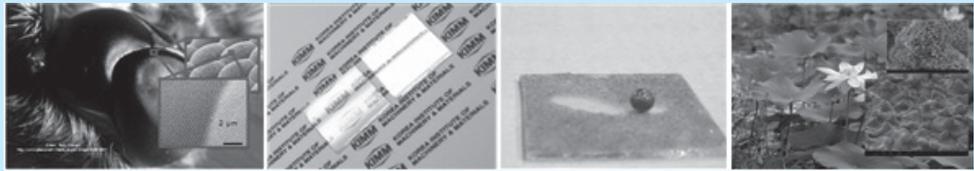


그림 5 나방 눈의 미세구조와 연잎의 미세구조를 모사한 반사방지 자기세정유리

매력적인 것은 구조들이 환경에 반응하면서 끊임없이 적응을 하며 변화한다는 것이다. 사람의 뼈는 부위마다 밀도가 다르며 자극이 많은 곳, 감당해야 할 역할이 많은 부분은 더 밀도가 치밀해지도록 변화한다고 알려져 있다. 요즘 4D프린팅으로 자연의 지혜를 흉내내려하지만, 아직 우리의 지식이 부족하므로 앞으로 해야 할 일이 많다.

상호작용에 익숙한 다양한 표면의 기능들

자연의 기능성 표면 연구에 있어, 연구자들에게 접근하기 쉬운 것은 식물인데, 이는 식물의 생명시스템이 동물보다 덜 복잡하기 때문일 것이다. 연잎의 자기세정효과를 처음으로 밝힌 Wilhelm Bartlott 교수와 Koch 박사, Bhushan 교수는 식물이 가지고 있는 기능성 표면에 대하여 정리한 논문을 발표하였다(그림 4). 대부분의 식물 잎들은 최외각 표피층이 왁스성분으로 이루어져 있으며 다양한 마이크로나 나노구조를 가지고 있다. 식물 잎의 기능도 종류와 서식환경에 따라 매우 다양하며, 표면의 젖음성 특성에 대하여만

살펴보더라도 식물마다 초친수성, 친수성, 소수성, 초소수성까지 그 정도가 식물마다 상이함을 알 수 있다.

표면은 최외각 표면층의 화학적인 성질 외에 표면에 존재하는 미세구조들로 인하여 그 기능이 더 극대화되고 이를 그림 1에 정리하였었다. 하지만 이는 대표적인 특성과 기능만을 나타낸 것으로 아직 우리가 밝히지 못한 많은 기능들이 표면에 존

재할 것이다. 지금까지 가장 많은 관심을 받아 상용화까지 다다른 표면은 연잎의 자기세정효과와 나방 눈의 반사방지효과로 표면에 나노구조물을 도입함으로써 두 가지 기능을 함께 구현할 수 있다. 아직 내구성이나 기능면에서 자연의 표면을 따라잡기에는 무리가 있지만 우리의 생활에 큰 변화를 줄 수 있는 기술들이다(그림 5). 이처럼 자연의 표면들은 다양한 미세구조로 대부분 다기능을 나타내고 있다. 또 다른 예로, 공기 중의 수분을 포집하는 딱정벌레 등껍질이나 거미줄은 피부보호, 강하고 질긴 특성 등도 보인다. 따라서, 이런 표면에서 영감을 얻어 고효율 공기 중수집 포집기술을 개발하려면 젖음성뿐만 아니라 열전달에 대한 이해를 가지고 접근해야 한다.

안개방지 표면을 만들기 위한 초친수 표면이나 접촉각 이력이 적은 초발수 표면을 이용하는 접근, 얼음방지를 위하여 초발수성과 미끄럼표면에 대한 접근도 활발하다. 이 또한 젖음성뿐만 아니라 상변화에 관계되는 열전달에 대한 이해가 필요하며 큰 물방울이 아닌 수증기나 얼음의 표면과의 상호작용을 이해하

여야 한다.

자연의 표면에는 분자간의 인력을 접착력으로 사용하는 동물들도 많다. 그림 6에서 보여주듯이 딱정벌레, 파리, 거미, geko 등은 끝단이 주걱모양인 가느다란 털을 가지고 있으며, 몸의 무게가 무거워질수록 털의 직경이 가늘어지고 털의 개수가 많아진다. 이러한 표면은 접착 기능 이외에도 자기세정의 기능도 보유하고 있음이 밝혀져 있고, 구조를 이용한 건식접착이 아닌 친환경소재를 이용한 습식접착에 대하여도 많은 연구가 진행 중이다. 또한 조류나 박테리아 등이 붙어 있는 것을 선박이나 수도관에서 쉽게 발견할 수 있는데 이러한 생물부착을 줄일 수 있는 지혜가 자연에도 있다. 상어의 표피는 생물부착방지기능 이외에도 항력을 저감시키는 역할도 같이 하는 것으로 밝혀져 있다. 생물부착방지도 초발수성을 기본으로 한 특성이라 볼 수 있는데, 생물분자의 종류가 다양하고, 이를 이루는 수 많은 단백질들과 표면의 구조와의 상호작용에 있어 명확한 메커니즘이 아직은 밝혀져 있지 않아, 앞으로 연구되어야 할 내용이 매우 많다.

색을 구현하는 방식은 크게 두 가지가 있다. 첫째, 가장 흔하게 쓰이는 염료를 사용하는 것이다. 물질에서 반사되는 빛이 우리의 눈에서 물질 고유의 색으로 인식이 되는 것으로 쉽게 페인트를 생각할 수 있다. 두 번째는 주기적인 구조물을 통하여 특정 파장의 빛을 선택적으로 반사하여 우리의 눈에 들어오게 하는 방식으로 이러한 구조를 광결정 또는 광구조라 부른다. 이 방식은 염료 없이 단지 주기적인 구조만으로 색을 구현하는 특이적인 방식으로 화학물질을 사용하지 않기 때문에 환경친화적이며, 색깔이 선명하고, 보는 각도

에 따라 색이 달라보여 관심이 증가하고 있다. Morpho 나비의 푸른색, 오팔의 영롱한 빛, 공작새 깃털의 다양한 색이 구조색이다(그림 7). 구조색 구현을 위한 표면 나노구조물의 형성기술은 단순히 색을 발현하는 것뿐만이 아니라 micro-laser, filter, 고효율LED, 광스위치, 저손실 waveguide 등 다양한 광전자 소자에 응용가능성이 높다.

또 다른 자연으로부터 배울 수 있는 지혜 중의 하나는 표면의 구조를 이용하여 마찰을 줄이고 마모도 줄이는 방법이다. 사막에서 생존하는 천선갑, 샌드피시의 표면은 마이크로/나노구조를 가지고 있어 마찰이

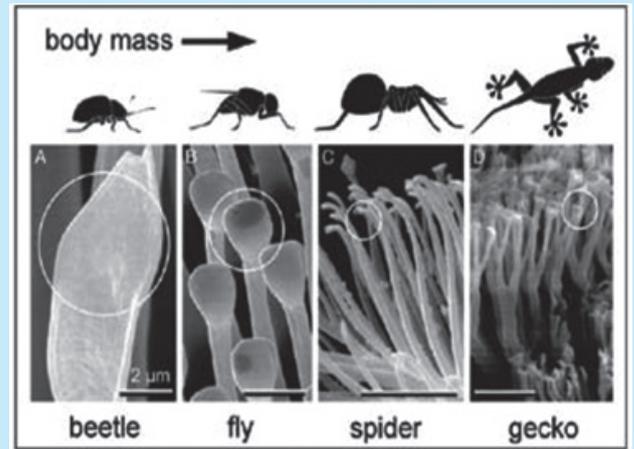


그림 6 분자간의 인력을 이용하는 자연의 부착생물의 예(From Micro to Nano Contacts in Biological Attachment Devices, PNAS, 2003)

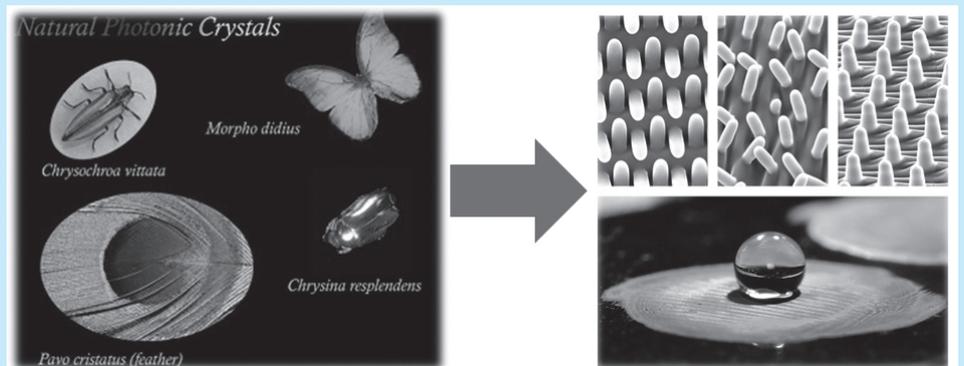


그림 7 자연의 다양한 구조색 및 나노구조물 기반의 구조색(Photonic Crystals: Semiconductors of Light, Scientific American, 2001)

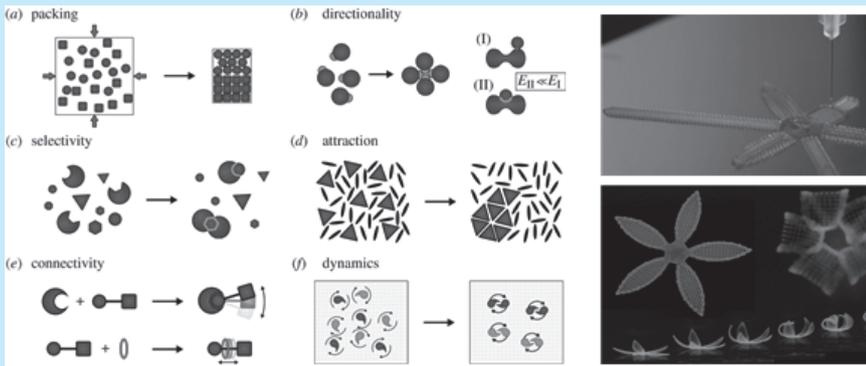


그림 8 자기조립법(Using shape for self-assembly, Phil. Trans. R. Soc. A, 2012)과 4D프린팅(하버드대, 2016)

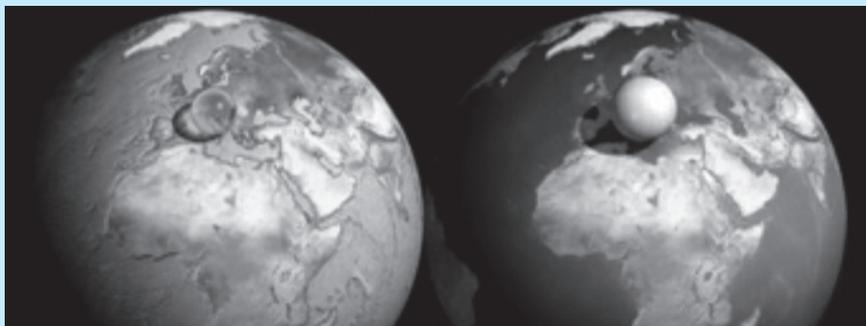


그림 9 지구상의 물과 공기의 총량(생체모방의 실제, TED, 2009)

많은 모래환경에서도 저마찰/내마모의 특성을 가지고 살아간다. 이러한 표면을 산업적으로 응용하려는 움직임이 있지만, 계속 복원되는 자연의 구조물과 한 번 제작되면 자체 복원이 힘든 인공구조물 간의 근본적인 차이는 연구자들이 풀어야 할 큰 숙제이다.

맑은 공기와 청량한 물 한모금의 소중함을 우리는 너무나 잘 알고 있기에 자연모사공학의 발전은 자연과 인간의 공존을 위한 과학기술발전의 토대가 될 것이다

자연이 구조와 표면을 만드는 방법

그렇다면 이런 정교한 구조와 표면들을 자연은 어떻게 만들고 있는가? 자연은 생명이라는 신비로 상향식 방법인 자기조립이라는 공정을 사용한다. 우리는 주로 하향식 방법을 사용하여 왔으며 지금까지 구현해 왔던 제작기술로 자연의 구조나 표면을 형성하는

데에는 한계가 있다. 하지만, 우리가 조금 더 고민을 한다면 재료와 에너지를 가장 덜 쓰고, 가장 부산물을 적게 남기면서도 정교한 구조를 제작할 수 있는 공정개발이 가능할 것이다. 이를 위해서는 분자레벨에서부터 물질을 제어할 수 있는 연구가 진행되어야 하고, 상향식 공정인 자기조립뿐만이 아니라 하향식 공정인 4D프린팅 등이 복합공정으로 개발되어야 할 것이다.

자연과 인간의 공존을 위한 과학기술의 발전을 위하여

지금까지 자연이 가지고 있는 기능성 구조와 표면의 특성들과 이를 응용하고자 하는 노력들을 살펴보고, 이를 구현하고자 하는 공정에 대하여도 아주 간단히 살펴보았다. 자연이 가르쳐 주는 지혜인 구조와 표면이 구현되지 않는다고 하여 우리의 생활이 불가능하지는 않지만, 이제는 어느 정도 과학기술이 정체에 머무른 시점에서 우리는 가장 효율적인 방법으로 최고의 성능과 적은 에너지를 소모하는 자연을 살펴보아야 할 때인 것 같다. 더욱이 과학기술의 발전

이라는 명목 하에 치룬 값비싼 자연과 환경의 파괴 비용을 이제는 고려해야 할 때이다. 나만이 아닌 다른 사람들, 환경을, 지구를 고려할 줄 아는 넓은 마음을 가지라고 자연은 그들의 지혜로움으로 우리에게 계속 이야기하고 있다.