

2 자연속의 나노

물에 뜬 연꽃잎 ‘나노의 신비’

글_ 김은애 연세대 교수 eakim@yonsei.ac.kr · 금동화 한국과학기술연구원 책임연구원 dwkum@kist.re.kr



나노 기술이 21세기의 가장 중요한 기술로 등장함에 따라, 학문적인 연구자에게 뿐만 아니라 일반 대중들까지 나노 현상에 대한 관심이 높아졌다. 모든 나라들이 나노기술 개발에 중점을 두고 기술개발에 집중 투자를 하는 이유는, 이 분야가 21세기에 경제 발전을 이끌 첨단산업의 근간이 될 것이라는 예측과 기대 때문이다.

인간이 인지영역을 넓혀온 세상을 역사적인 순서로 나열하면, 첫째는 우리가 생활을 영유하는 땅이고, 다음으로 바다이며, 세 번째가 촘촘히 밝힌 별 세계를 건너 무한히 펼쳐진 우주이다. 인간이 새롭게 펼치는 네 번째 세상이 바로 나노 세상이다.

“나노는 새롭게 펼쳐질 네 번째 세상”

땅과 바다와 하늘이 태초부터 우리 가까이 있어왔듯이 나노 세상 또한 우리 주변에 항상 같이 있어왔다. 나노 기술의 영역

도 바닷속과 우주처럼 신비스럽고 흥미진진한 신천지이다. 21세기의 첨단 기술이라는 나노기술도 이와 같이 우리 주변에 있었던 작은 세상의 재발견인 셈이다.

20세기에 과학과 기술이 눈부시게 발달하여, 나노미터 크기의 물체를 관찰하거나 인위적으로 만들 수 있어서 이와 같은 재발견도 가능해 졌다. 이 글에서는 자연 속에 있는 여러 가지 나노 현상 중에서 연꽃잎이 감추고 있던 티끌처럼 작은 세계를 소개하고, 이를 바탕으로 인간이 개발한 첨단 기능성의 페인트와 의복을 소개하고자 한다.

연꽃잎에 떨어진 빗방울이나 아침 이슬은 잎을 적시지 않고 동그랗게 뭉쳐서 또르르 굴러 떨어진다. 물방울이 잎에 앉은 먼지나 티끌을 머금고 함께 떨어져서, 연꽃잎은 항상 깨끗하고 청아한 녹색 자태를 뽐낼 수 있다. 연꽃잎이 가진 이런 특징을 학술적으로 ‘연꽃잎 효과’라 한다(그림1).

연꽃잎이 다른 풀이나 나뭇잎과는 달리 물에 젖지 않는 이유



〈그림 1〉 물방울이 연꽃잎 위에서 흘러져 떨어지는 사진

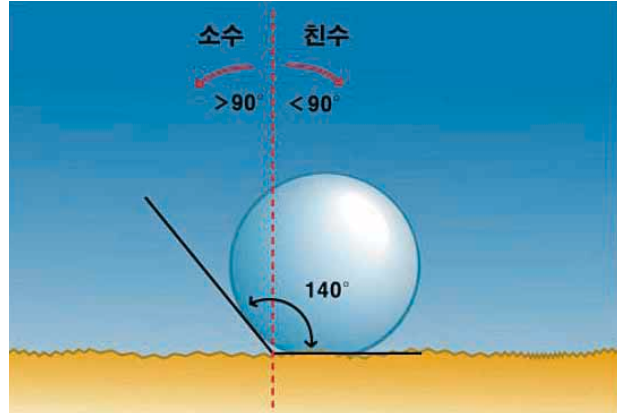
는 무엇 때문일까? 표면이 물에 젖느냐, 아니냐는 물체가 물과 친하냐(친수성), 혹은 아니냐(소수성)하는 두 경계면의 화학적 성질에 따라 정해진다. 물이 접촉한 경계면의 에너지(계면장력)가 크면, 계면 에너지를 낮추려고 접촉 면적이 작아져서 소수성을 띤다.

반대로 계면장력이 작으면, 물은 넓은 면적을 적셔서 친수성이라 한다. 이런 성질을 접촉각으로 표시하는데, 〈그림2〉에서 처럼, 접촉각이 90도보다 작으면 친수성을, 그리고 이보다 크면 소수성을 띤다. 이와 같이 친·소수성을 결정짓는 표면장력은 경계면에 위치한 원자들의 화학적인 상태에 따라 정해지는 물질의 성질이다.

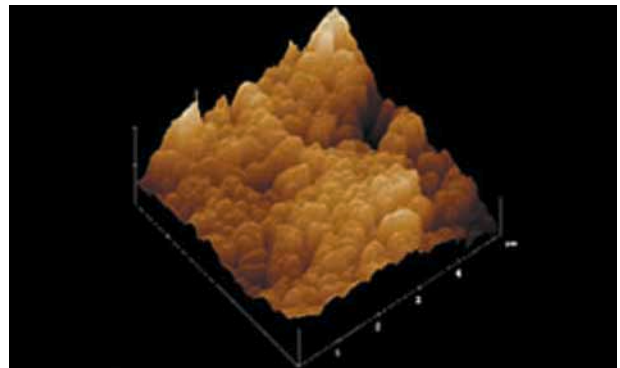
연꽃잎 효과는 초소수성(超疏水性) 현상

연꽃잎이 물에 전혀 젖지 않음은 기본적으로 표면이 소수성을 띠고 있기 때문이다. 그런데 연꽃잎 표면이 소수성을 띠는 것은 단순히 표면장력에서 기인하는 것이 아니고, 여기에 바로 나노 세상의 비밀이 숨어있다. 즉, 잎의 표면이 티끌 크기의 작은 돌기로 덮여있다. 티끌은 동양의 십진법에서 진(塵)으로 표기하며, 서양식으로 나노미터에 해당한다. 〈그림3〉은 연꽃잎 표면을 원자현미경(AFM)으로 관찰한 사진이다. 육안으로는 다른 잎들보다 훨씬 매끄럽게 보이지만, 나노 스케일을 볼 수 있을 만큼 크게 확대시키면 티끌만큼이나 작은 돌기들이 덮고 있는 것을 알 수 있다.

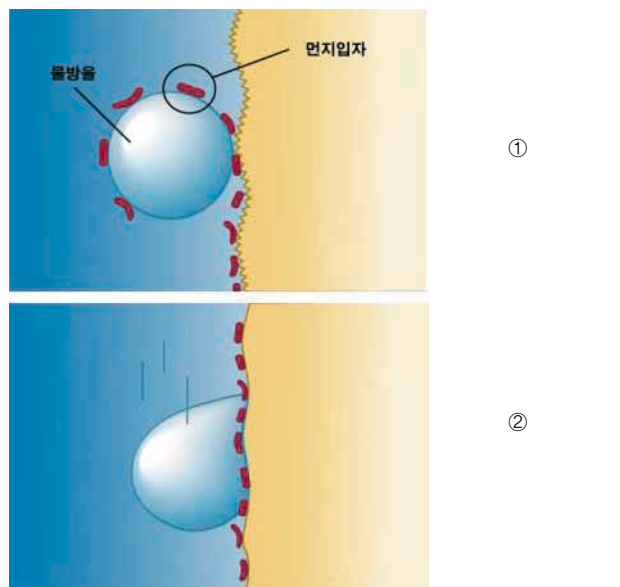
표면이 이처럼 미세한 돌기로 덮여 있으면, 표면장력이 크고 작음에 무관하게, 조그만 흔들림으로도 굴러 떨어질 정도로



〈그림 2〉 표면에 물방울이 맺힌 모습으로, 접촉각이 90도보다 크면 소수성, 이보다 작으면 친수성이라 한다.



〈그림 3〉 연꽃잎을 원자현미경으로 확대시킨 사진(Wall-master.co.kr)



〈그림 4〉 ① 나노 스케일 돌기에 의한 초소수성 표면 ②일반적인 소수성 표면

접촉각이 크고 소수성을 나타낸다. <그림4-①>에 연꽃잎에서 물방울이 굴러 떨어지는 모습을 스케치하였다. 물방울은 자체의 표면적을 최소화하기 위하여 공 모양을 갖는다. 그리고 미세한 돌기보다 100만배 이상 큰 물방울이 연꽃잎과 접촉하는 면적이 아주 작으며, 물방울과 잎 사이의 접촉각이 100도 이상으로 커진다. 이런 모습은 화학적인 친·소수성과 무관하다. <그림4-②>는 소수성을 가진 일반적인 표면에서 물방울이 흐르는 모습이다. 물방울이 흐르더라도, 전부 떨어지지 않을 뿐만 아니라 먼지도 잡아먹지 못한다.

<그림4-①>에서처럼 접촉하고 있는 면적이 워낙 적으면, 유효성이 큰 표면 위에서처럼 물방울이 자유롭게 돌아다닐 수 있다. 넓은 연꽃잎은 실바람에서도 쉽게 흔들거리고, 물방울이 모이고 합쳐져서 무거워지면 굴러 떨어진다. 이때 잎에 앉은 먼지들은 물에 씻겨서 텅달아 떨어져서, 연꽃잎은 <그림1>의 모습이 된다. 참고로 물리적인 형상, 즉 나노 크기의 미세한 돌기 때문에 나타나는 소수성은 일반적인 정도보다 더 심하다는 뜻으로 초소수성(super hydrophobic)이라고 구분한다. 즉, 연꽃잎 효과란 초소수성 현상을 말한다.

더러워지지 않는 페인트는 연꽃잎의 선물

연꽃잎 효과를 실생활에 이용하는 방법은 없을까? 가장 대표적인 예로, 독일에서 '로토산'이라는 상품명으로 개발한 건물 외벽에 쓰는 페인트가 있다(그림5-①).

페인트는 다양한 색의 염료를 섞은 도료다. 건물 외벽에 칠한 페인트는 유기물의 일종으로 세월이 흐르면, 대기 중의 먼지와 때가 끼어, 정기적으로 청소를 해주어야 화창한 본래의 색과 청결을 유지할 수 있다. 손이 닿는 곳은 걸레로 닦고 물을 뿌려서 청소를 쉽게 할 수 있다. 그러나, 높은 처마 밑이나 걸레질이 닿기 어려운 구석진 곳까지 깨끗이 청소하려면 쉽지 않은 노동력과 숙련이 필요하다. 이런 문제점에서 착안하여 개발한 것이 로토산 페인트이다.

로토산은 때가 끼지 않는 페인트이다. 페인트를 칠하고 용매가 날아 간 후에 연꽃잎처럼 나노 크기의 작은 돌기가 형성되도록 고안한 특수 페인트이다. <그림5-②>는 로토산을 칠한 벽의 표면을 원자현미경으로 확대시킨 사진이다. 표면이 매끄럽지 않고 연꽃잎처럼 미세한 돌기로 덮여있다. 나노미터 크

기의 돌기 크기와 분포가 <그림3>의 연꽃잎 표면을 확대한 사진과 거의 똑같다. 따라서 로토산 페인트의 표면은 연꽃잎 표면과 똑같으며 당연히 초소수성을 띠고 있다. 비가 오거나 물을 뿌려주면 물방울이 떨어지면서 <그림5-③>처럼 물방울이 벽에 묻은 먼지를 머금고 떨어져서, 처음 페인트칠했을 때와 같이 깨끗해지는 것이다.

나노 휘스커 솜털이 때 묻지 않는 옷 비결

연꽃잎 효과를 실생활에 이용한 다른 예로 첨단 기능성 의복이 있다. <그림 6>은 때가 묻지 않는 바지를 보여주는데, 하얀 면바지를 입은 사람이 바지에 콜라를 흘린 후 손으로 툭툭 털어버려서 낭패에서 벗어난 모습이다. 때가 묻지 않는 의복은 시사주간지 타임지가 선정한 올해(2002년)의 10대 기술로 선정할 정도로 창의성과 우수성이 인정된 최신 기술이다.

오염되지 않는 의복이 시사하는 경제·사회적 가치는 매우



<그림 5> ① 로토산 페인트칠한 건물 ② 로토산 페인트를 칠한 표면의 원자현미경 사진 ③ 물방울이 먼지를 머금고 굴러 떨어지는 모습(Wall-master.co.kr)



<그림 6> 콜라를 흘린 의복(Invention of the year 2002, Time)

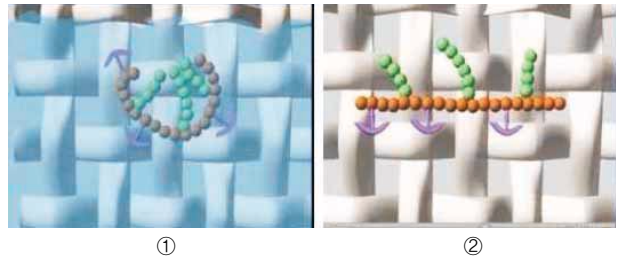
크다. 옷을 세탁하지 않아도 된다면, 세탁기, 물 및 세제가 필요 없을 것이고 가정주부의 노동이 감소될 뿐만 아니라 세제를 과다하게 사용함에 따른 공해도 그만큼 적어질 것이다. 이런 경제·사회적인 이유로 때가 끼지 않거나 세탁을 줄이려는 새로운 섬유 가공기술이 개발되어 왔다. 기존의 오염 방지 가공법은 모두 화학적으로 표면에너지를 낮추는 코팅 방법을 이용하였다. 따라서 코팅 때문에 땀을 잘 흡수하지 못한다든가, 세탁시 오염이 완전히 제거되지 않거나, 시일이 흐르면 그 성질이 소멸되는 단점을 가지고 있다. 그리고 제2의 물질이 섬유에 코팅됨으로써 의복의 질감이 나빠지는 문제점을 가지고 있다. 이런 여러 이유로 코팅제를 첨가하는 양과 이 기술을 적용할 수 있는 섬유의 종류에도 제한이 되어 있다. 그러나 이제는 의복의 질감을 손상하지 않고, 땀도 잘 빨아들이고, 섬유가 갖는 본래의 성질을 그대로 유지하면서 오염이 덜 되는 제품 생산이 가능하게 되었다.

때가 묻지 않는 섬유는 어떻게 생겼을까? 이 기술의 핵심은 면섬유에 많은 양의 아주 작은 솜털을 붙이는 데에 있다. 섬유 표면에 나노휘스커를 영구적으로 첨가하여 연꽃잎 효과를 얻는 것이다. 면섬유의 단면을 나무 줄기로 생각하고, 이 위에 원자단위의 나노휘스커 솜털을 코팅한 것이다. 이 때 섬유에 나노휘스커를 완벽하게 정착시키고, 정착된 휘스커가 솜털처럼 솟아나오도록 만드는 것이 가장 중요한 핵심 기술이다.

탄소휘스커를 정착시키는 가공 용액 속에서는 탄소휘스커가 (그림 7-①)와 같이 구 형태를 이루고 있다가, 섬유 표면에 부착된 상태에서는 수직으로 서게 만드는데(그림 7-②) 성공하였다. 나노휘스커 용액에 면을 담갔다가 꺼내어 열처리로 용액을 증발시키면, 섬유와 영구히 결합하게 된다. 나노휘스커로 된 작은 솜털들로 에어쿠션이 만들어져 액체를 강하게 떠받들어 섬유에 닿지 않고 굴러 떨어지게 된다. 현재 합성에 성공한 나노휘스커는 길이가 수십 나노미터이며, 탄소 원자들로 유연하게 설계하여 만들었다. 겉모양은 원래 섬유와 똑같고, 질감도 그대로 유지되며, 보풀도 일지 않는다.

청색 나비 날개에도 나노의 비밀 숨겨져

연꽃잎과 유사한 나노 세계를 통해서 현란한 색을 자랑하는 날개를 가진 나비가 있다. 흔히 모포나비라 불리는 종류 중에



〈그림 7〉 ① 용액 속에서 공모양으로 영긴 나노휘스커 ② 섬유 표면에 솟아난 나노 솜털 모형

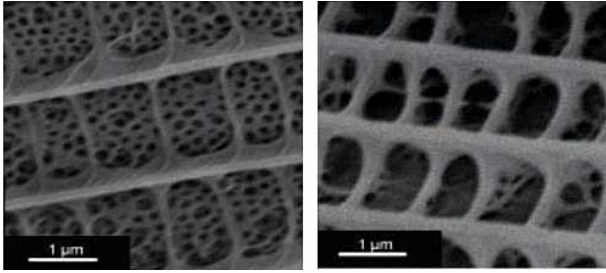


〈그림 8〉 ① 청색 날개의 멜리거 블루 수나비 ② 갈색조를 띤 멜리거 블루 암나비(Bio et al., Phys. Rev. E(2003))

멜리거 블루(학명 *Polyommatus daphnis*)인데, 이종의 암·수가 다른 색을 띠고 있다. 수놈은 눈이 부실 정도로 환한 푸른색을 띠며(그림8-①), 암놈은 갈색조의 날개를 가지고 있다(그림8-②). 더욱 특이한 것은 연중 시기, 혹은 서식지의 기온에 따라서 날개 색이 변하는 점이다.

수나비가 환한 청색을 띠는 날개의 비밀은 날개 표면에 있는 나노미터 스케일의 형상에 있다. 우리 생활에 쓰이는 물감에는 모두 특정한 색만을 흡수 혹은 반사시키는 염료가 사용된다. 그런데, 이 나비는 분자구조가 복잡한 염료를 합성하지 않고, 염료와 다른 새로운 방법으로 자연환경과 생태에 적합한 색을 낸다.

고배율의 전자현미경으로 관찰해 보면(그림9), 날개 표면이 나뭇잎처럼 본줄기와 미세줄기로 짜여 있고 그 사이는 그물망 형태의 더 작은 세포구조로 덮여 있는 것을 확인할 수 있다. 본줄기의 크기는 약 100 μ m 이고, 다시 약 1 μ m 크기의 미세줄기가 사각형의 격자로 본줄기를 단단하게 연결하고 있다. 암수의 차이는 분명하게 비교된다. 청색을 띤 수놈의 경우, 미세 줄기 속은 크기가 대체로 100~200nm 내외인 빈 공간이 있는 미세한 스펀지 모양의 그물망으로 되어 있다. 이에 비하여 갈색을 띤 암놈의 날개에는 이런 후춧가루를 뿌린 것 같은 그물망이



〈그림 9〉 멜리거 블루 나비 날개의 주사전자현미경 사진으로 수나비와 암나비가 비교되어 있다.(Bio et al., Phys. Rev. E(2003))

보이지 않는다.

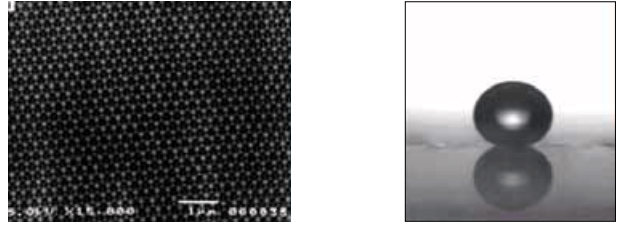
날개 표면을 덮고 있는 세포를 구성한 물질은 키틴이라는 생체 폴리머로, 안료를 포함하고 있지 않아 무색이다. 그런데 200nm 이하의 빈 공간이 정렬된 그물망 형태를 가지면, 그 크기와 배열에 따라서 회절과 간섭에 의하여 특정한 파장의 빛만을 흡수 혹은 반사시킨다. 따라서 푸른 색 염료가 없이도 파란색을 나타낼 수 있는 것이다. 이런 현상을 학술적 용어로 '구조에 의한 색'이라 한다. 멜리거 블루는 미세 줄기내의 나노 형상 때문에 일정 방향에서는 밝은 청색을 띠며, 날개를 펼치는데 따라서 보는 방향에 따라 다양한 색깔을 자랑하는 것이다.

학자들은 암·수가 다른 색을 가진 이유를 번식기에 짝짓기를 통한 종족번식의 수단으로서 수백 만년 동안 진화된 결과로 해석하고 있다. 이런 나비는 고도가 2천~2천500m인 고산지대에 서식하는데, 푸른 색을 띤 수놈은 갈색의 암놈이 출현하기 수일 전에 나타난다. 나비는 포유류 동물처럼 자체적인 체온 조절 기능이 없어서, 태양열을 받아 몸의 온도를 조절해야 한다. 청색을 띤 수놈은 짝짓기를 시작하기 전 이른 아침부터 상당기간 태양열로 체온을 유지하면서 암놈을 기다리고 번식의 기회를 높인다는 해석이다. 참고로 온도가 높은 열대 환경에서 서식하는 다른 종의 나비에는 이런 나노 형상이 없으며 찬란한 색도 띠고 있지 않다.

비에 젖지 않는 총천연색 레인코트 선 보일것


최근에 일본과 터키의 과학자들은, 연꽃잎 효과에 남미 멜리거 블루 나비가 가진 나노현상을 이용하여, 비에 젖지 않을 뿐만 아니라 다양한 색깔을 띠는 레인코트의 개발 가능성을 발표했다.

일본의 과학자들이 개발한 기술은 1차적으로 6nm 크기의 실



〈그림 10〉 총천연색 레인코트의 표면과 인공적으로 제작한 초소수성 표면을 증명하는 광학사진(Gu et al., Antrew. Chem. Inter(2003))

리카 입자와 직경이 수백 마이크로미터 크기의 폴리스타이렌 구를 섞은 다음, 이 혼합체를 섬유 위에 얇은 막으로 코팅하였다. 코팅 막을 입힌 직물을 가열, 유기물을 날려 버리면, 균일하게 분포된 실리카 입자 사이에 빈공간이 생긴다. 이런 방법으로 멜리거 블루 나비 날개 표면을 인위적으로 모사하였다. 마지막으로 이 나노크기의 울퉁불퉁한 표면 위에 소수성의 플로로알킬 사일레인을 입혀서 〈그림10〉에 보인 것처럼 초소수성의 표면을 인위적으로 제작하는데 성공하였다. 터키 과학자들은 폴리프로필렌을 사용해서 위와 유사한 나노 코팅기술을 훨씬 싼 값으로 제조하는 방법을 개발하였다. 이 때 생기는 공간의 크기에 따라서 붉은 색부터 푸른 색을 띠는 섬유의 제작이 가능하다. 이처럼 제작한 첨단 섬유로 레인코트를 제작하면, 물에 젖지 않을 뿐만 아니라 색깔이 다양하여 부가가치가 높은 패션용 의복소재가 될 수 있을 것이다.

우리의 주변에는 많은 종류의 나노 세상이 있으며, 사람들이 발견하도록 기다리고 있다. 이들은 모두 관찰하는 것만으로도 신기하고 흥미진진하다. 우리가 그 속성을 얼마나 잘 이해하느냐에 따라서 우리의 실생활에 유용하게 이용할 수 있다. 20세기 후반부터 눈부시게 발달한 과학과 기술의 덕택으로, 나노스케일의 새로운 세상을 관찰하고 인공적으로 제작하거나 제어하기 시작하였다. 자연에서 배우는 나노기술은 무한한 가능성을 내포하고 있어서 부가가치가 높은 첨단기술로서 연구 개발의 가치가 매우 높다. 



글쓴이는 서울대 의류학과 졸업 후, 동대학원에서 석사학위를, 미국 메릴랜드대학에서 박사학위를 받았다. 현재 연세대학교 생활과학연구소 소장을 겸임하고 있다.



글쓴이는 서울대 금속공학과 졸업 후 미국 스탠퍼드대에서 박사학위를 받았다. KISTEP 연구기획관리단장, KIST 부원장을 역임했다.