

스스로를 세정하는 탄소나노튜브 코팅

최근 인도 국립 학제간 과학 기술 연구소(National Institute for Interdisciplinary Science and Technology)의 아야판필라이 아자야고쉬(Ayyappanpillai Ajayaghosh) 연구진은 이러한 목적의 달성에 진일보하는 성과를 이루어 냈다. 그들은 *Angewandte Chemie*에 초소수성(superhydrophobic) 자체 세정 표면을 제조하는데 성공하였다고 보고하였다. 이러한 연구 결과는 파라-페닐렌비닐렌(para-phenylenevinylene)으로 불리는 견고한 방향족 분자(aromatic molecule)를 통해 나노미터 두께의 파라핀 코팅을 갖는 탄소나노튜브(carbon nanotubes)에 의해 달성되었다.

연꽃 식물은 자연의 자체 세정 메커니즘의 대표적인 예인데, 연 잎의 초소수성 표면은 물방울을 구형으로 형성하여 굴러 내려가게 하며, 이때 표면의 오염물을 함께 씻어낸다. 연 잎은 나노 수준의 물 반발성 코팅막으로 덮인 3-10 마이크로미터의 “돌기(bump)”를 갖고 있다. 돌기 구조는 물이 접촉하는 면적을 최소화하고, 물 반발 코팅은 돌기 사이의 골에 물이 들어가는 것을 방지하게 된다. 따라서 물은 잎을 코팅하지 못하고 굴러 떨어지게 된다.

이를 모방하기 위해 연구진은 벌집 형태의 배열로 탄소 원자가 정렬된 속 빈 기다란 섬유인 탄소나노튜브에 연구의 초점을 맞췄다. 자기 조립(self-assembly) 공정을 이용하여 그들은 튜브의 외층에 유기 분자를 부착하였는데, 이러한 분자는 기다란 탄화수소 사슬 몇 개를 지탱할 수 있는 방향족 6각 고리로 구성되어 있다.

방향족 고리는 자체적으로 나노튜브의 벌집 구조에 단단히 부착하며, 탄화수소 사슬은 파라핀 코팅처럼 작동하게 된다. 연구진은 이러한 조립체를 유리, 금속, 운모 표면에 분산시킨 후 건조함으로써 안정한 자체 세정 성질을 갖는 물 반발 코팅막을 얻을 수 있었다.

전자 현미경(Electron microscopy) 이미지에 따르면 코팅은 연 잎처럼 규칙적인 구조를 갖고 있진 않지만, 나노 수준의 거칠음(roughness)을 형성하고 있었다. 이러한 인공 표면에서 물은 연 잎에서와 같은 상황을 겪게 되는데, 2도의 경사를 주면 물방울은 굴러 떨어졌으며, 이때 물방울에 의해 표면의 오염은 제거되었다.

(*Angewandte Chemie International Edition*, July, 2008)

바이오분자 계면 활성제를 이용한 나노 구조체 제조

최근 바이오분자(biomolecules)를 이용하여 단결정(single-crystal) 나노막대(nanorods)를 생성하고 이들의 형태를 조절할 수 있는 새로운 방법이 개발되어 보다 강력한 열펌프(heat pumps) 및 열전 장치의 개발 가능성이 타진되고 있다. 렌슬러 폴리테크닉 연구소(Rensselaer Polytechnic Institute)의 과학자들은 바이오분자 계면 활성제(surfactant)를 이용하여 두 개의 단결정으로 구성된 나노막대의 제조법을 최근 개발하였다. 그들은 또한 온도, 시간, 계면활성제의 양 등을 세밀히 조절하여 “가지를 친(branched)” 구조체도 제조할 수 있었다.

가지가 달린 나노막대 복합체는 최초의 사례인데, 나노막대는 속이 빈 실린더 형태의 단결정 비스무스 술피드(bismuth sulfide) 껍질

에 감싸진 비스무스 텔루리드(bismuth telluride) 단결정의 두 물질로 구성되어 있다. 가지 달린 구조 및 중심-껍질(core-shell) 구조는 독립적으로 보고되어 왔지만, 바이오분자 계면 활성제를 이용하여 동시에 제조된 것은 이번이 최초이다. 중심과 껍질로 구성된 대부분의 나노구조체는 1 단계(one step) 이상의 합성 과정이 필요하지만, 금번의 연구 결과에선 이와 같은 나노막대가 1 단계로 합성될 수 있었다. 이러한 1단계 합성은 나노물질 복합체의 대량 생산에 있어 중요한 의미를 지닌다.

이와 같은 장점으로 인해 중심-껍질 나노막대는 언젠가 전력 생산용 나노 열전 장치 혹은 나노전자 장치 냉각부의 열 펌프로 활용될 전망이다. 금번의 연구 결과는 열 방출과 열에서 전력을 생성하는데 두 가지 중요한 의미를 갖는데, 첫째 나노막대에서 중심-껍질 접합은 전압 인가 시 열 제거를 위한 전도체가 되거나 혹은 열에서 전력을 생성하게 된다. 둘째 가지 달린 구조체는 나노와이어 연결 패턴을 따라 열을 제거하기 위한 도랑으로서의 가능성을 갖고 있다.

연구진은 고온 혹은 바이오분자 계면활성제인 글루타토닉산(L-glutathionic acid(LGTA)) 소량으로 가지 달린 나노막대 구조체를 정밀하게 제조할 수 있었다. 반면에 저온 혹은 과량의 LGTA가 이용될 경우 가지가 없는 직선의 나노막대가 제조되었다. 가지 형성의 관점에서 볼 때 가지를 구성하는 원자가 모결정(parent crystal)의 거울상 이미지를 닮았다는 것은 흥미로운 사실이며, LGTA가 원자 수준의 나노구조 형성에 관여한다는 연구진의 주장을 증명하는 것이기도 하다.

LGTA는 바이오 분자와 유사하기 때문에 바이오 공정을 통해 위와 같은 나노막대 구조체의 제조를 위해 단백질과 효소의 기능을 확인하는 것이 우선 필요하다.

(*Advanced Materials*, July, 2008)

빛으로 구동하는 분자 광모터

순수하게 빛으로만 구동되는 광 구동모터가 일본 동경공과대학(Tokyo Institute of Technology) 토미키 이케다(Tomiki Ikeda) 교수 연구진에 의해 개발되었다.

연구진에 의하면 액정의 성질과 고무같은 탄성중합체의 성질을 동시에 가지고 있는 액정탄성중합체(liquid crystalline elastomer : LCE) 벨트를 크기가 다른 풀리(pulley) 사이에 장착한 다음 두 풀리에 각각 다른 파장의 빛을 조사하는 방식으로 모터를 구동시키는데 성공했다.

나노기술의 빠른 발전으로 나노모터와 나노기계 장치가 속속 개발되고 있다. 미토콘드리아, 열, pH 변화 등에 의해 구동되는 나노모터가 이미 개발되었다. 물론 빛에 의해 구동되는 모터가 개발된 것이 처음은 아니다. 2007년 일본의 인터네셔널크리스천대학 연구진은 ‘레이리파(Rayleigh wave)’라는 탄성파에 의해 회전하는 광 구동모터를 개발한 바 있다. 하지만 이 모터의 경우 광원으로 고출력 레이저를 이용하기 때문에 순수하게 빛에 의해 구동된다고 보기 어렵다. 레이저 역시 전기를 공급해야만 작동할 수 있기 때문이다.

이케다 연구진의 모터는 자외선과 가시광선을 조사하는 것으로 구

동이 가능하다. 모터에 사용된 액정탄성중합체는 액정 분자 중간에 아조벤젠(azobenzene) 구조가 삽입된 형태의 물질이다. 아조벤젠은 2개의 벤젠고리가 질소-질소 이중결합에 의해 연결된 구조로 빛에 의해 2가지 다른 기하학적 형태로 상호 전환되는 독특한 성질을 가지고 있다. 아조벤젠의 질소-질소 이중결합을 기준으로 양쪽에 연결된 벤젠 고리는 자유롭게 회전하는 단일 결합에 의해 연결되어 있다. 질소-질소 이중결합 양 끝단의 벤젠 고리가 같은 방향에 위치하면 '시스(cis-)'라고 하고 서로 다른 방향에 위치하면 '트랜스(trans-)'라고 한다. 이 경우처럼 서로 구별되는 기하학적 구조를 나타내는 분자의 관계를 '기하이성질체'라고 한다.

액정분자 중간에 아조벤젠 구조를 삽입하면 빛에 의해 아조벤젠의 기하학적 구조가 변하면서 액정의 구조도 변하게 된다. 빛에 의해 액정이 트랜스가 되면 액정 분자는 전체적으로 짝 펼쳐진 구조가 되어 층상 구조를 이루기 쉬워진다. 반대로 시스가 되면 액정 분자의 형태가 부메랑처럼 구부러진 구조가 된다. 아조벤젠의 경우 트랜스 구조가 열역학적으로 보다 안정한 구조이기 때문에 일반적으로 트랜스 형태로 더 많이 존재한다. 하지만 자외선처럼 강력한 빛을 조사하면 시스 형태로 전환된다. 이러한 시스-트랜스 이성질화 과정은 빛에 의해 가역적으로 일어나는 것이 특징이다. 연구진은 시스-트랜스 이성질화 과정의 가역적인 특징을 이용했다.

아조벤젠의 이성질화 과정을 이용한 분자모터는 영국 에딘버그대학 데이비드 리히(David Leigh) 교수 연구진에 의해 구현된 예가 있다. 하지만 리히 교수 연구진은 분자 수준에서 모터를 작동시켰을 뿐 매크로 수준의 운동으로 전환시키진 못했다.

이케다 연구진은 직경이 10 mm와 3 mm인 두 개의 폴리에틸렌 튜브를 각각 5.5 mm, 길이 36 mm인 원통형 LCE 벨트를 걸고 큰 폴리에틸렌 튜브에는 가시광선을 조사하고, 작은 폴리에틸렌 튜브에는 자외선을 조사하여 모터를 구동시켰다. 이는 큰 폴리에틸렌 튜브 쪽에 조사한 가시광선에 의해 아조벤젠의 구조가 트랜스로 전환되면서 벨트가 부분적으로 늘어나고, 작은 폴리에틸렌 튜브 쪽에 자외선에 의해 아조벤젠이 시스로 전환되면서 벨트가 수축되기 때문에 일어나는 현상이다. 즉 분자 수준의 미세한 변화가 길이 방향의 신축 운동으로 전환하는 광기계효과를 이용해 모터를 구동했다. 이는 지금까지 시도된 바 없는 전혀 새로운 개념을 이용한 시도라는 점에서 큰 의미를 갖는다.

앞서 언급한 레일리회파를 이용하는 광 구동모터는 광원으로 가시광선 레이저를 사용하지만 이케다 연구진의 광 구동모터의 경우 광원으로 가시광선과 자외선을 사용한다. 물론 이케다 교수도 전기로 구동되는 인공 광원을 사용했지만 가시광선과 자외선은 태양 빛으로부터 얼마든지 공급받을 수 있는 빛이다. 즉 온전히 빛으로만 구동되는 진정한 의미의 광구동모터의 실현 가능성이 높다는 의미이다.

(Angewandte Chemie International Edition, July, 2008)

DNA로 만든 재봉틀

최근 일본 연구진은 기다란 DNA 타래를 특정 형태로 꿰기 위해 마이크로 크기의 바느질 기계를 제조하였다(그림 1). Lab on a Chip에 보고된 본 연구 결과에선 DNA 사슬을 파괴하지 않고 정교하게 조절하는 방법이 소개되어 있다. 과학자들은 비슷한 DNA 사슬에 결합하는 유전자 표식(gene markers) 혹은 "탐침(probes)"을 이용하여 다운증후군과 같은 유전자 증후군을 진단한다. 일단 결합되면 탐

침의 위치는 형광(fluorescence)으로 쉽게 검출되며, 이는 유전자 문제에 대한 정보를 제공하게 된다.

하지만, 이러한 탐침을 검출하는 것은 사실이 코일 형태로 계속되어 있기 때문에 너무나 느리고 어려운 공정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 과거 DNA 한 쪽을 유리판에 고정시키고 다른 쪽은 자석 구슬에 고정시킨 후 작은 자석을 사용하여 DNA를 펴거나 비트는 기술이 소개되었으며, 최근 교토대(Kyoto University) 교헤이 테라오(Kyohei Terao) 연구진은 레이저로 조절되는 마이크로 크기의 갈고리를 이용하여 우수한 정밀도와 정교함으로 DNA 사슬 하나를 선택하여 곧게 펼 수 있었다.

DNA 분자 하나가 마이크로고리와 실패에 의해 조절되고 곧게 펴지면 유전자 위치는 우수한 공간 해상도를 갖는 탐침으로 용이한 검출이 가능케 된다. 연구진은 초점이 맞춰진 레이저 빔인 광학 집게(optical tweezers)를 이용하여 Z-형태의 마이크로고리를 조절하여 DNA 사슬 하나를 집어내었다. 고리는 화살처럼 바늘을 갖고 있기 때문에, DNA 사슬은 바늘에서 유리되지 않는다.

그러나 바느질 기계의 실타래와 같이 기다란 DNA 사슬은 움직이기 어렵기 때문에 연구진은 마이크로 크기의 실패를 제조하여 사슬을 여기에 감았다. 레이저를 통해 실타래는 하나씩 주변으로 옮겨지게 되고, 연구진은 이러한 DNA 타래를 조절 가능한 물체에 감았다.

본 연구 결과는 거대한 DNA 분자 하나를 조절할 수 있는 마이크로 도구를 제조한 우수한 아이디어이며, 또한 본 기술은 DNA 서열화 및 분자 전자소자 등에 다양하게 이용될 것으로 기대된다고 나고야대에서 생물학적으로 유용한 마이크로장치를 개발하고 있는 요시노부 바바(Yoshinobu Baba)는 말했다.

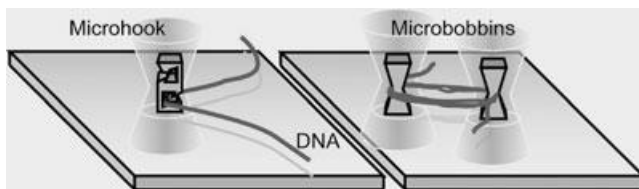


그림 1. DNA를 이용한 바느질 과정의 모식도.

(Lab on a Chip, July, 2008)

탄소나노튜브를 이용한 분자 운송

세포막(cellular membranes)을 가로지르는 분자 운송(molecular transport)은 많은 생명 프로세스에서 핵심적인데, 신경, 근육, 시냅스(synapsis) 등에서의 전기 신호가 대표적이다. 생물 시스템에서 멤브레인은 종종 나노미터 이하 크기의 특별한 단백질 채널로 구성된 선택적인 필터 영역을 갖는 내부 표면이 존재하는데, 이때 내부의 구멍은 세포내의 출입을 조절하여 소형 분자는 멤브레인을 빠르게 순환시키지만, 다른 분자나 이온 등은 배척하게 된다.

최근 로렌스 리버모어 국립 연구소(Lawrence Livermore National Laboratory)의 연구진은 탄소나노튜브(carbon nanotubes) 멤브레인을 이용하여 이러한 프로세스를 모방하였는데, 이때 멤브레인은 인간의 모발보다 10만 배나 작은 구멍을 갖고 있으며, 구멍 내에서 배척 메커니즘을 중재하게 된다. 소수성의 작은 직경을 갖는 탄소나노튜브는 보다 간단하고 견고한 형태로 재현됨으로써 멤브레인 채널의 간소화된 모델로 이용될 수 있다고 올지카 바카진(Olgica Bakajin)

은 말했다. 한편 이에 대한 연구 결과는 proceedings of the national academy of sciences에 보고되었다.

2006년 5월19일 Science에 연구진은 생물학적 채널을 통해 이동하는 물과 같이 탄소나노튜브에서 물 분자가 빠르게 움직이고, 표면에 부착되지 않는다는 것을 보고하였다. 이때 물 분자는 수소 결합(hydrogen bonds)을 통해 서로 강하게 상호작용하기 때문에 꼬리를 물고 이동하게 된다. 이러한 형상은 마치 좁은 나노튜브 터널에서 고속으로 움직이는 미니 열차의 모습과 같다. 한편, 나노튜브는 일반적으로 물을 배척하는 소수성의 성질을 갖는데 어떻게 물이 나노튜브를 통과할 수 있는지에 대한 의문이 든다. 그 이유는 나노튜브 말단의 전하에 기인하는데, 평상시는 물을 배척하는 소수성 성질을 나타내나 나노튜브에 약간의 전압을 인가하게 되면 물은 나노튜브를 빠르게 통과하게 된다.

탄소나노튜브 멤브레인의 가장 촉망되는 응용 분야는 해수의 담수화이다. 이러한 멤브레인은 언젠가 기존의 멤브레인을 대체하여 담수화에 이용되는 에너지를 현격히 감소시킬 수 있다. 최근 연구에서 연구진은 1.6 nm 직경의 구멍을 갖는 멤브레인이 일반적인 소금을 구성하는 이온을 배척한다는 것을 발견하였다.

연구 결과는 1.6 nm의 직경을 갖는 구멍은 탄소나노튜브 말단의 전하로 인해 염이 배척된다는 것을 나타낸다. 탄소나노튜브 구멍을 통한 빠른 흐름은 나노튜브 멤브레인이 동일 크기의 구멍을 갖는 다른 멤브레인보다 투과성이 우수하다는 것을 나타낸다. 그러나, 기존 멤브레인과 같이 나노튜브 멤브레인은 작은 구멍 크기와 구멍의 전하 효과로 인해 이온 및 기타 입자를 배척한다.

탄소나노튜브 멤브레인이 유사한 크기의 구멍을 갖는 멤브레인과 같이 비슷한 배척 메커니즘이 작동하는 반면 나노튜브 멤브레인은 우수한 투과성을 제공하는데, 이는 현재의 멤브레인보다 효율적이란 것을 시사한다. 연구진이 향후 구멍의 직경, 전하, 탄소나노튜브간 사이의 공간을 채울 수 있는 물질 등을 독립적으로 변화시킬 수 있다면 보다 우수한 멤브레인이 제조될 것으로 기대할 수 있다.

(*Proceedings of the National Academy of Sciences*, July, 2008)

보다 강해진 나노멤브레인

최근 5 nm 이하의 두께를 갖는 탄소 필름을 강하게 만드는 새로운 화학 접근법이 개발되어 분자체(molecular sieves) 및 유연성 디스플레이(flexible displays)에 탄소 박막(carbon films)의 사용이 가속화될 전망이다. 일리노이대(University of Illinois at Urbana-Champaign) 제프리 무어 및 존 로저스(Jeffrey Moore and John Rogers) 연구진이 개발한 질긴 나노멤브레인(nanomembranes)은 풍선, 튜브, 주름 구조와 같은 다양한 형태와 크기로 제조될 수 있다.

연구진은 필름 제조를 위해 이단계 공정을 이용하였는데, 단일 분자 층으로서 매질에 자기 조립되는 알킨 함유 단량체(alkyne-containing monomers) 용액을 사용하였다. 이후 몰리브덴 혹은 구리 촉매(molybdenum or copper catalyst)의 존재 시에 분자는 교차 결합되어(cross-link) 탄소가 풍부한 필름이 형성된다. 멤브레인은 평평한 시트 형태로 제조되거나 또는 상이한 형태를 제조하기 위해 실리카 구슬, 광섬유, 주름진 표면에 제조되었다. 과거 기계적 강도가 우수한 박막을 제조하는 일반적인 방법은 복합체를 제조하는 것이었는데, 기능성 나노입자와 고분자의 결합기술은 가볍고, 강하며

다양한 기능을 갖는 새로운 물질을 만들 수 있다. 실제로 유기물질을 이용하여 금 나노입자가 서로 붙지 않고 규칙적으로 배열된 상태를 만든 후, 이를 나노입자 용액에 분산시키고, 실리콘 칩에 용액을 뿌려 건조시키는 공정으로 구조체를 제조하였다. 하지만, 이러한 방법들의 문제점은 그 두께가 일정치 못하다는 단점이 있다.

이론적으로 생성될 수 있는 단분자 층의 크기는 제한이 없다. 하지만, 이러한 방법의 특징은 멤브레인의 조성에 따라 형상 조절 정도가 달라지며, 실제로 연구진은 분자 구축 블록 방식을 통해 분자 수준에서 이러한 시트를 제조할 수 있었다.

연구진은 나노멤브레인의 구조를 미세 조절할 수 있는 위와 같은 방법을 통해 분자체를 보다 유용하게 제조할 수 있을 것으로 생각하였다. 그러나 연구진의 장기 목표는 그래핀(graphene)과 같이 촉망되는 물질을 보다 용이하게 제조하고, 흥미로운 전자 성질이 다양한 멤브레인을 만드는 것이다. 현재 그래핀을 제조하는 기술은 그래핀 조각을 생성하기 위해 딱딱한 표면에 대고 벌크 흑연을 문지르는 방법을 이용하고 있다. 과거 그래핀 산화물 박막은 진공 여과법을 사용하여 제조되었는데, 이 방법은 물 속에 단일층 그래핀 산화물 박판을 넣어 현탁액을 만들고 이를 25 nm의 기공이 있는 필터로 걸러내, 1-5 nm 두께의 균일한 그래핀 산화물 박막이 제조되기도 하였다.

현재 연구진은 색다른 방법으로 제조되어 흥미로운 전자 성질을 갖는 재료를 조합함으로써, 특별한 전자 구조체의 제조 가능성이 배가될 것으로 기대하고 있다. 한편 캘리포니아 로스앤젤레스대(University of California, Los Angeles)에서 나노전자소자(nano-electronics)를 연구하고 있는 코스 갈랏시스(Kos Galatsis)는 반도체 재료를 제조하기 위해 위의 소개된 새로운 방법을 이용하려는 연구진의 계획에 대해 회의적인 생각을 갖고 있다. 사실 탄소를 첨가하여 강도가 증가될 수도 있지만, 전자 전송(electronic transport) 성질의 관점에서 보면 그리 큰 여력이 있는 것은 아니라고 그는 말했다.

일리노이 연구진은 개발된 재료를 고 사양 컴퓨터에 이용하려는 것은 아니라고 회답하였지만, 머지 않은 미래에 컴퓨터 및 PDA와 같은 휴대 장치의 스크린을 대체할 것으로 예상되는 유연성 디스플레이 이용 필름이 위의 방법을 통해 제조될 것으로 기대하고 있다.

(*Proceedings of the National Academy of Sciences*, July, 2008)

10배 이상의 신축성을 가지는 플라스틱을 만드는 나노기술

전기방사(electrospinning)는 나노에서 마이크로 크기의 섬유를 생산할 수 있는 최근 발견된 간단하고 다재다능한 공정기술이다. 전기방사된 섬유 매트(mat)는 높은 비표면적, 높은 종횡비, 그리고 섬유의 무질서한 직조로 다공성 같은, 많은 특성들을 가지고 있다. 그리고 광전자학, 센서기술, 촉매, 정제, 의학 같은 다양한 잠재된 응용 분야를 가진다.

중국의 연구원 럼플레스틸스킨(Rumplestiltskin)은 자동차 및 전자기기에서 폭넓게 사용되는 한 종류의 플라스틱에 대해 처음으로 성공적으로 전기 방사한 결과를 보고했다. 전기가 가해지는 상태에서 고분자를 가는 섬유로 바꾸기 위해 전기적 전하를 사용하는 하이 테크 공정은 원래의 물질보다 어떤 파손없이 10배 이상 신축할 수 있는 플라스틱 매트(mats)를 만들었고 새로운 용도로 응용될 수 있다. 이들의 연구는 미화학회(ACS)의 Macromolecules 6월 10일자에 게재될 예정이다.

이 새로운 연구에서 칭화대(Tsinghua University) 자오샤(Zhao-xia Guo)와 동료들은 polyoxymethylene(POM)이라 불리는 플라스틱은 금속같은 경도, 경량, 화학적 내성을 가진 것으로 알려진 공학용 제품이다. 그러나 이 물질은 상대적으로 부서지기 쉬워(brittle), 응용에 제한적이다.

비록 많은 다른 종류의 플라스틱들이 확장된 용도와 특성을 가진 섬유형태로 전기방사되어 왔지만, 연구진은 POM을 지금까지 섬유화할 수 없었다고 말한다.

그들은 POM을 HFIP(1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol)라는 용액에 처음으로 녹인 후에 전기방사에 의해 나노크기의 섬유로 바꿀 수 있었다(이는 머리카락 한 개의 두께보다 수 천 배 가늘다). 공정은 향상된 신축성, 연성, 높은 다공성 그리고 넓은 표면적을 가진 POM 매트(mats)를 얻었다. 이런 특징들은 플라스틱의 용도를 넓은 범위의 산업적, 전자적, 의학적 용도로 확장할 수 있다고 연구진은 주장한다.

(*Macromolecules*, June, 2008)

초박막 폴리에틸렌 필름

한 가닥의 모발보다 얇은 초박막 고분자 필름(ultrathin polymer film)은 과학 및 공학계의 큰 관심거리로서, 예를 들면 보호 코팅(protective coatings)을 들 수 있다. 콘스탄츠대(University of Konstanz) Stefan Mecking 연구진은 최근 웨이퍼 두께의 플라스틱 구조를 제조할 수 있는 방법을 개발하였다. 연구진은 개개의 미리 제조된 나노결정(nanocrystal) 구축블록으로부터 필름을 제조하는 방법을 *Angewandte Chemie*에 소개하였다.

현재 많은 기술 응용 분야에서 고분자 재료가 사용되고 있으며, 고분자 박막재료는 실생활에서 다양하게 볼 수 있는데 대표적인 고분자 필름으로 배향막, 편광막, 반사방지필름과 같은 광학재료와 전자과 차폐필름, 백그라운드 필름, 콘텐서용 필름, 반도체 보호피막용 폴리이미드 등의 반도체용 필름, 그리고 생분해성의 친환경 필름 등이 있다. 이러한 재료들은 그 요구 특성에 맞추어 다른 물질의 표면과 접촉하며, 다양한 계면 현상을 나타내게 된다.

한편, 최근 나노입자와 고분자를 이용하여 고분자 나노복합체 등의 다양한 연구가 수행되고 있는데, 이는 기능성 나노입자와 고분자의 결합기술을 통해 가볍고, 강하며 다양한 기능을 갖는 새로운 물질을 만들 수 있어, 기계적인 성질과 열적인 성질을 향상시킬 수 있기 때문이다. 하지만, 금번 보고서는 나노입자와 고분자의 조합을 통한 복합체의 제조가 아닌 나노결정을 제조한 후 이를 박막으로 형성시키는 방법을 다루고 있다.

초박막 고분자 필름($0.1 \mu\text{m}$ 이하의 필름)을 제조하는 기존의 방법은 유기 용매에 고분자를 희석하는 것으로 개시되며, 희석된 고분자 용액을 표면에 뿌려 건조시키는 과정을 거치게 된다. 일단 고체 고분자의 결정 구조를 깨뜨려 용액으로 제조하기 위해선 일반적으로 고온이 요구되며, 정렬된 결정 층은 용매가 제거 혹은 냉각된 후에 형성된다. 사실 이러한 방법은 일반적인 것이라 할 수 있는데, 과거 고분자를 물과 섞이지 않는 용매에 용해시킨 후, 계면활성제 용액을 첨가하고 초음파를 통해 고분자 용액이 함유된 안정한 미니-에멀전을 제조하였다. 이후 용매가 증발되고 남은 물속의 안정한 고체 고분자 나노입자 분산액을 유리 혹은 실리콘 기질 위에 떨어뜨려 스핀-코팅을 통해 균일한 나노구조가 제조된 보고가 있었다.

이와 달리 Mecking 연구진은 유기 용매 없이 상온에서 작동하는 전혀 다른 방법을 취하였다. 선택된 고분자는 폴리에틸렌(polyethylene)으로서, 간단한 화학 구조를 갖는 고분자이지만, 필름 및 포장 재료에서부터 기술적으로 중요한 요소 혹은 임플란트에 이르는 다양한 분야에 응용되고 있다. 폴리에틸렌은 생리학적으로 무해하고 친환경적이지만, 초박막 필름으로 제조하기가 어렵다는 단점을 갖고 있다.

니켈 착물을 이용한 에틸렌의 촉매 고분자 반응(catalytic polymerization)은 수용액에 분산된 결정 고분자 입자를 생성하게 된다. 이들은 1 nm 두께의 무정형 층으로 둘러싸인 $25 \times 6 \text{ nm}$ 의 결정 박판(lamella) 구조로 구성된 단결정(single crystals)이다. 표면 위의 무정형 도메인(amorphous domains)은 고분자 결정에 존재하는 전형적인 모습이다. 이러한 수용성 분산 방울을 유리 슬라이드에 떨어뜨린 후 분당 2000번의 회전 속도를 인가한다. 그러면 과량의 액체는 회전하여 배출되고 50 nm 두께의 초박막 필름이 형성된다.

이와 같은 제조법의 성공 요인은 결정 크기와 조합되어 단결정 주변에 무정형 도메인이 존재한다는 사실에 근거한다. 비록 무정형 도메인은 입자 부피의 작은 부분을 구성하고 있지만, 서로 강하게 상호작용하여 필름 내에서 개개 입자를 강하게 결속하게 된다. 따라서, 박막은 쉽게 부서지지 않으며, 비교적 높은 온도에서도 구조적으로 안정하고, 강도와 인성이 우수하여 향후 멤브레인 등의 다양한 응용 분야에 사용될 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

(*Angewandte Chemie International Edition*, June, 2008)

본 기술 뉴스는 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 글로벌동향브리핑(GTB) 및 나노위클리(Nano Weekly)에서 발췌, 정리하였습니다.

<충주대학교 인인식, e-mail: in1@cjnu.ac.kr>