

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 μm 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 촉물을 이용한 에틸렌의 촉매 고분자 반응(catalytic polymerization)은 수용액에 분산된 결정 고분자 입자를 생성하게 된다. 이들은 1 nm 두께의 무정형 층으로 둘러싸인 25×6 nm의 결정 박판(lamella) 구조로 구성된 단결정(single crystals)이다. 표면 위의 무정형 도메인(amorphous domains)은 고분자 결정에 존재하는 전형적인 모습이다. 이러한 수용성 분산 방식을 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>