

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 부배랑처럼 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 폴리 사이에 폭 5.5 mm, 길이 36 mm인 원통형 LCE 벨트를 걸고 큰 폴리에는 가시광선을 조사하고, 작은 폴리에는 자외선을 조사하여 모터를 구동시켰다. 이는 큰 폴리 쪽에 조사한 가시광선에 의해 아조벤젠의 구조가 트랜스로 전환되면서 벨트가 부분적으로 늘어나고, 작은 폴리 쪽은 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 레일리효과를 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 사슬이 코일 형태로 결속되어 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 실베에 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 실베를 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.

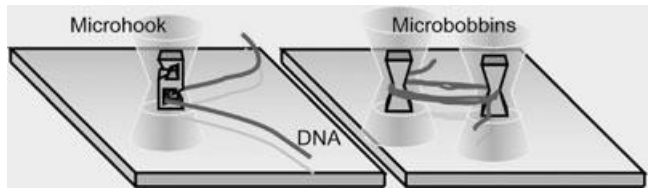


그림 1. DNA를 이용한 바느질 과정의 모식도.

(*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, 시냅시스(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.