근육의 고에너지 효율 구조를 분자 수준에서 해명

도쿄대학 가야 모토시 조교와 히구치 히데오 교수(대학원 이학계연구과 물리학전공)는 근육의 수축을 담당하는 단백질 미오신(myosin) 1 분자의 탄성과 힘 발생 중의 운동 거리를 측정했다. 그 결과 미오신은 에너지효율을 높이기 위한 환경 친화적인 분자특성인 '압축시키면 유연해지는 성질'을 갖고 있는 것이 규명되었다. 이 구조에 의해 근육은 대단히 높은 에너지 효율과 빠른 운동을 실현할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 근육(골격근)은 신체의 운동에 중요할 뿐만 아니라 말을 하기 위해 입을 움직이고, 글씨를 쓰기 위해 손가락을 움직이며, 감정표현을 하고 물건을 보기 위해 눈을 움직이는 등 일상 커뮤니케이션을 하는데 있어서도 중요한 조직이다. 이 근육의 운동을 담당하고 있는 소자는 미오신이라 불리는 단백질로 그 크기는 수십 나노미터이다.

근육이 수축할 때 미오신은 액틴(actin)이라 불리는 단백질과 결합하여 액틴 섬유를 움직인다. 이때 미오신 분자에 내재된 탄력성 있는 구조 부위를 늘임으로써 힘을 발생한다. 이 미오신 분자의 에너지 효율은 마이크로모터의 에너지 효율(1%)이나 자동차의 에너지 효율(15%)보다 훨씬 높은 약 50%이다. 일반적으로 크기가 작아지면 마찰에 의한 에너지 손실 비율이 커진다고 알려져 있는데, 미오신의 크기는 마이크로모터의 1000분의 1밖에 안 되는데도 불구하고 어떻게 이렇게 높은 효율을 낼 수 있는지가 의문이었다. 이 고효율의 원리를 해명하기 위해 연구진은 미오신 1 분자의 탄성과 힘 발생 중의 운동 거리(보폭)를 나노-피코 뉴턴의 정밀도로 측정했다. 그 결과 미오신 분자를 늘이면 단단해지고 반대로 압축시키면 부드러워지는 것을 세계 최초로 밝혀냈다. 이 결과에 의하면 미오신은 힘을 발생할 때 신장되기 때문에 단단한 용수철을 늘였을 때처럼 큰 힘을 낼 수 있다. 한편, 힘을 다 발생한 후에는 마치 끈처럼 부드러워져서 다른 분자의 힘 발생에 방해되지 않음으로써 에너지 효율을 향상시킨다. 이렇게 미오신은 환경 보호적 구조를 갖고 있다는 사실을 처음으로 알았다.

지금까지의 실험에서는 에너지원인 아데노신3인산(ATP, adenosine triphosphate)을 넣지 않고 탄성 성질을 조사했다. 그 다음 ATP를 넣자 미오신은 계단상의 변위와 힘을 발생했다. 변위 1단의 높이는 미오신의 보폭에 해당하며, 약 8 nm인 것을 처음으로 알게 되었다. 이상의 결과를 근거로 근육의 수축 모델을 고안했다. 미오신 분자는 액틴 섬유에 결합하여 이것을 8 nm 움직이게 한다. 이때 미오신 분자는 탄력성 있는 구조 부위가 단단한 용수철처럼 늘어나기 때문에 큰 힘을 발생할 수 있다. 미오신이 다시 힘을 발생하기 위해서는 액틴으로부터 벗어날 필요가 있다. 그러나 액틴으로부터 벗어나기 전에 다른 미오신이 액틴 섬유를 움직이기 때문에 이 미오신은 수축된다. 수축되었을 때 미오신의 끈모양 부위는 부드럽기 때문에 저항이 되지 않아 에너지 낭비가 적고 고에너지 효율이 가능해진다. 이 미오신의 고에너지 효율에 의해 근육은 보다 큰 힘을 내고 동시에 빠르게 움직일 수 있다.

미오신 분자는 골격근 이외에 심근이나 평활근은 물론, 신경 등 모든 세포에 포함되어 있으며 세포운동에 없어서는 안 될 분자로, 본 연구에서 얻어진 미오신의 고에너지 효율원리가 다른 세포에도 이용되고 있을 것으로 생각된다. 또 미오신에 머무르지 않고 미오신과 비슷한 구조를 갖는 분자가 세포분열을 일으킬 때에도 '압축되면 부드러워지는 성질'에 의해 고에너지 효율로 분열을 할 것으로 예상된다. 또 선천성의 심근비대증은 미오신의 끈모양 부위에 이상이 일어나는 것으로 알려져 있었다. 이번 결과를 기초로 할 때 그 원인은 탄성특성의 이상으로 인한 힘의 저하 등이 원인일 것으로 예상된다. 현재의 마이크로 머신은 에너지 효율이 대단히 낮지만 본 연구에서 얻은 고에너지 효율의 구조를 응용함으로써 효율을 올릴 수 있을 것으로 보인다. 손상된 근육의 힘을 보충하기 위해서 고분자로 만들어진 인공근육의 개발이 진행되고 있으나, 현시점에서 에너지 효율이 대단히 낮은 것이 문제이다. 보다 효율을 향상시켜 발생력을 크게 하는데 본 연구의 근육분자 구조가 참고가 될 것으로 기대된다.

<출처: *Science,* **329**, 686 (2010)>

세포 내부의 고감도 탐측이 가능한 트랜지스터 개발

하버드대학 연구진들이 나노와이어로부터 세포 내부의 고감도 탐측에 사용이 가능할 정도로 소형인 V자 모양의 새로운 트랜지스터를 제조했다. 최근 사이언스 저널에 게재된 이 새로운 장치는 바이러스보다도 작으며, 현재 세포측정에 사용되고 있는 기존 탐침의 크기(폭)에 비해 약 100분의 1정도에 불과하다. 삽입 시에 세포를 손상시켜 측정 데이터의 정확도나 신뢰도를 감소시킬 수 있는 세포 정도 크기의 기존 탐침과 비교해 볼 때 이 같은 소형 탐침 개발은 주목할 만한 진전이다.

"우리는 이들 나노 전계효과 트랜지스터(nano-FETs)를 사용하여 지난 수 십년 동안의 세포내 연구와는 완전히 다른 새로운 접근방법을 시도하였으며, 이는 또한 반도체 소자를 이용한 세포 내부의 최초 측정이다. Nano-FETs는 전자공학이 급속히 발전했던 1960년대 이래로 세포내 연구를 위한 최초의 새로운 전기적 측정 수단이다."라고 연구책임자인 하버드대 화학과 Charles M. Lieber 교수가 말했다.

Lieber 교수 연구팀은 nano-FETs를 세포 내의 이온 플럭스(ion flux)나 전기신호 측정에 사용이 가능하다고 말한다. 이 소자에 수용체나 리간드를 장착하여 세포 내부에 있는 개별 생화학물질의 존재를 탐지할 수도 있다. 인체 세포는 약 10 마이크론 크기의 신경세포에서 50 마이크론 크기의 심장세포로 이루어진다. 기존 탐침은 직경이 5 마이크론인데 비해, nano-FETs은 전체 크기가 50 nm 이하이며 나노와이어 탐침 자체의 직경은 15 nm이다. 크기가 작다는 점 외에도 nano-FETs를 세포에 쉽게 삽입할 수 있게 하는 두 가지 특징이 있다. 첫째 세포막을 구성하는 소재인 인지질 이중막으로 구조체를 코팅함으로써 바이러스와 박테리아를 완전히 에워싸는 공정과 유사한 막융합(membrane fusion)을 통해 이 장치가 쉽게 세포 내로 끌려들어 가게 된다. 세포 자체의 기계작용에 의해 세포막과 근본적으로 융합되기 때문에 nano-FETs를 세포에 밀어 넣을 필요가 없다. 이는 또한 nano-FETs의 삽입이 기존의 전기적 탐침만큼 세포손상을 일으키지 않는다는 뜻이다.

"우리는 인지가 가능할 정도의 세포 손상 없이 nano-FETs를 세포에 여러 번 삽입하고 제거할 수 있다는 사실을 알았다. 심지어 소자가 세포에 들어가고 나오는 과정에서도 연속적으로 측정이 가능하다."라고 Lieber 교수는 말한다. 둘째로, 본 논문은 120도로 고정된

연결부인 삼각형 입체중심(stereocenters)을 단단한 선형 구조의 나노와이어에 도입한 Lieber 교수의 기존 연구결과를 기반으로 하고 있다. 많은 복잡한 유기 분자에서 발견되는 화학적 허브(chemical hubs)와 유사한 이들 입체중심은 구부러진 구조들(kinks)을 1차원 나노구조체에 도입하여 보다 복잡한 형태로 변환시킨다.

Lieber 교수 연구팀은 나노와이어에 적절한 시스(cis) 위치에 2개의 120도 각을 도입함으로써, V형 팁에 센서가 있는 두 갈래진 nano-FET에 합치되는 한 개의 V형 60도 각이 생성된다는 것을 발견했다. 그 다음 두 개의 팔이 나노 트랜지스터에 전류를 생성하기 위해 와이어에 연결된다.

<출처: *Science,* **329**, 830 (2010)>

새로운 생체모방형 나노센서

GE 글로벌 연구소(GE, Global Research)의 연구진은 미 공군 연구소(Air Force Research Laboratory), 뉴욕 주립대학(State University of New york at Albany), 영국 엑시턴 대학(University of Exeter)의 연구진과 함께 생화학 무기 및 폭발물을 보다 빠르고 선택적으로 검출을 할 수 있는 새로운 생체 모방형 나노센서를 연구하고 있다. 3년 전에, GE 연구진은 나비 날개와 닮은 나노구조가 뛰어난 화학적 감지 성질을 가지고 있다는 것을 증명했다. 그 후에, 이 연구진은 독특한 성질을 가진 새로운 감지 플랫폼을 개발했다. 이 새로운 생체 모방형 감지 플랫폼은 위험한 화학물질을 검출하는데 감도, 속도, 정확성을 매우 증가시킬 수 있었다. 이런 요인들은 위험으로부터의 노출을 피하고 효과적인 의료 반응을 관찰하는데 중요한 것들이다. 이 센서는 저렴하게 제조될 수 있고 매우 작은 크기로 되어 있다. 또한 대량 생산이 용이하고 필요한 곳에 쉽게 배치시킬 수 있었다. 이 생체 모방형 센서는 크기 및 제조 분야의 장점 이외에도 독특한 감지 특성을 가지고 있어서 다음과 같은 분야에 적용될 수 있을 것이다(발전소의 배출량 모니터링, 식음료 안전성 모니터링, 수질 상태 검사, 질병 검출을 위한 호흡 분석, 상처 치료 분석). 센서는 가스 농도에 대한 데이터를 수집해서 국부적 영역 또는 대규모 분산 영역의 공기 질을 파악하는데 주로 사용되고 있다. 이런 데이터를 통해서 발전소의 공기 질을 더 정확하게 파악할 수 있어서 화학물질에 노출되거나 건강에 위협을 받을 경우에 경고를 할 수 있다. 이번 연구진의 생체 모방형 센서의 독특한 감지 특성은 감지 데이터의 질을 향상시키고 정확한 데이터를 수집할 능력을 제공한다. 연구진은 자연의 광학적 구조에 영감을 받아서 이런 특성을 가진 나노센서를 개발하게 되었다. 예를 들어, 나비 날개, 벌레의 등껍질, 공작의 깃털에서 볼 수 있는 밝은 색깔은 주로 그들의 복잡한 구조에 의해서 발생하게 된다. 이 연구의 목적은 자연의 포토닉스 구조를 이용해서 가시광선 및 근적외선 파장에서 제어 가능한 포토닉스 장치를 만드는 것이다. 다양한 분야의 전문가들로 구성된 이번 연구진은 새로운 플랫폼 개발을 위해서 연구를 계속하고 있다.

<출처: http://www.azonano.com>

홍합의 접착단백질을 응용한 접착제로 파열된 태아막을 밀봉

태아막(fetal membrane)은 발육 중인 태아를 둘러싸고 있는 구조체이다. 임신 중 불의의 사고(예: 의료진이 의료기구로 태아막을 잘못 찌르는 경우)로 인하여 태아막이 파열되거나 구멍이 뚫리면 양수가 누출되어 조산(premature labor)이나 유산(miscarriage)을 초래할 수 있다. 웬만한 태아막의 결손은 자연적으로 치유되지만, 저절로 복구되지 않는 태아막 손상을 효과적으로 복구하는 방법은 현재 존재하지 않는다. 이에 대한 가능한 해결방법 중의 하나는 생체적합성을 지닌(biocompatible) 소재를 이용하여 파열된 태아막을 밀봉하는 것이다. 미국 노스웨스턴 대학의 연구진은 American Journal of Obstetrics & Gynecology 최근호에 실린 논문에서, 홍합으로부터 영감을 얻은 밀봉제(sealant)를 이용하여 손상된 인간의 태아막을 복구하는데 성공하였다고 발표하였다. 어떤 물체에 달라붙는 힘이 가장 센 생물을 꼽으라면 단연 홍합이다. 홍합이 한 번 바위에 착 달라붙으면 칼로 긁어내야 가까스로 떨어질 정도다. 홍합의 다리에서는 끈적끈적한 접착제가 생성되어 홍합을 바위나 기타 구조물에 고착시킨다. 홍합은 이 접착제 덕분에 엄청난 파도에도 쓸려 내려가지 않고 버틸 수 있다. 홍합이 보유한 이처럼 가공할만한 접착력의 비밀은 1980년대에 일부 밝혀졌다. 현재 캘리포니아 주립대 샌타바버라 캠퍼스(UCSB)에 재직 중인 허버트 웨이트(Herbert Waite) 교수는 당시 홍합의 접착패드에 있는 DOPA(dihydroxyphenylalanine)가 접착력의 근원임을 밝혀냈다(DOPA는 단백질을 구성하는 아미노산의 하나인 티로신이 변형된 물질로서, 파킨슨씨병의 치료에 이용되는 DOPA와 동일한 물질이다). 보통 접착제는 물에 약하지만 홍합은 오히려 물 속에서 접착력이 더 세진다. 홍합의 접착단백질(mussel adhesive proteins)이 골절이나 수술부위를 봉합하는 의료용 접착제로 각광받는 것도 이 때문이다. 그러나 접착력이 워낙 세다 보니 그 힘이 어느 정도인지를 제대로 측정하지 못해 개발에 걸림돌이 되어 왔다. 노스웨스턴 대학의 연구진은 2002년 홍합의 접착단백질을 응용하여 주사용 밀봉제(injectable sealant)를 개발한 바 있다. 연구진이 개발한 밀봉제는 2개의 상이한 용액으로 구성된 혼합물이며, 이 2 가지의 용액들이 결합하면 10~20초 후에 젤을 형성하도록 되어 있다(이 2가지 성분 중의 하나는 홍합 접착단백질의 핵심 아미노산인 DOPA이고, 다른 하나는 촉매제이다). 연구진은 이번 연구에서, 자신들이 개발한 밀봉제가 태아막 조직의 손상을 안전하게 밀폐할 수 있는지를 알아보기 위하여, *in vitro*에서 투관침(trocar)으로 인간의 태아막 조직에 3.5 mm의 구멍을 뚫어 태아막 파열을 시뮬레이션하였다. 그리고는 다양한 의료용 접착제로 태아막의 구멍을 처리한 다음, 각 밀봉제별로 효능(접착력)과 부작용(세포독성)을 비교분석하였다. 연구진이 이번 연구에서 사용한 의료용 접착제들은 Dermabond (Ethicon Inc, 독일), Histoacryl(B. Braun GmbH, 독일), Tissucol (Baxter AG, 스위스), 그리고 3개의 「폴리(에틸렌글리콜) 기반 폴리머 하이드로겔」[poly(ethylene glycol)-based polymer hydrogels, 홍합유래 밀봉제 포함]이었다. 연구진은 이 접착제들을 태아막과 24시간 동안 직접 접촉시키고 급성독성을 테스트하는 한편, 방출물질의 독성을 평가하기 위하여 밀봉제의 추출물을 72시간 동안 양막세포(amnion cells)와 함께 배양하였다. 접착력과 독성을 평가하는 데는 형태학적 분석(morphologic analysis) 및 생화학적 분석법들이 이용되었다. 분석 결과 홍합유래물질의 접착력이 가장 우수한 반면 세포독성은 가장 낮은 것으로 나타났다. "연구에 사용된 모든 접착제의 추출물은 배양세포에 독성을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 그중에서도 티슈콜(tissucol)과 홍합유래 밀봉제만이 효능과 비