

탄소나노튜브 ‘전기 제어 시스템’ 세계 최초 개발

반도체 칩 초소형화 길 열어

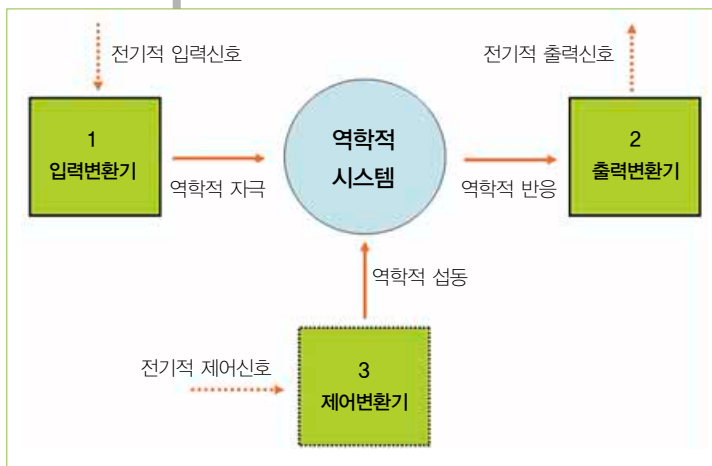
글_ 이상욱 서울대학교 물리학과 박사과정 · 박영우 서울대학교 물리학과 교수 ywpark@phy.snu.ac.kr

리 소그래피 기술의 발전은 반도체 소자의 크기를 줄여 집적화할 수 있는 길을 열었고, 이를 통해 반도체 기술은 현재와 같은 초고밀도 집적회로를 생산할 수 있는 단계에 이르렀다. 90년대 중반 이후로 많은 물리학 연구자들은 탄소나노튜브, 또는 전도성 고분자 나노 섬유와 같은 저차원 나노구조의 한 가지 특성에 대한 궁금증을 풀기 위하여 이러한 리소그래피 기술을 채택하였다. 탄소나노튜브의 경우 합성될 때 꼬임벡터의 종류에 따라 금속성 혹은 반도체성을 가질 수 있고, 공기 중에서 안정하며, 역학적 특성도 매우 우수해 탄소나노튜브의 기초적 물성 연구뿐 아니라 이를 응용한 나노 소자 제작 등과 같이 미래의 새로운 반도체 소자로서 실제로 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

탄소나노튜브를 이용한 전자소자는 이미 세계의 많

은 연구진에 의해 연구 개발되었고 최근에는 반도체 나노선, 고분자 섬유와 같은 다른 일차원 나노구조에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 탄소나노튜브를 이용하여 전자소자를 개발하려는 시도를 넘어서 우수한 역학적 특성을 활용할 수 있는 방안이 모색되기 시작하였다.

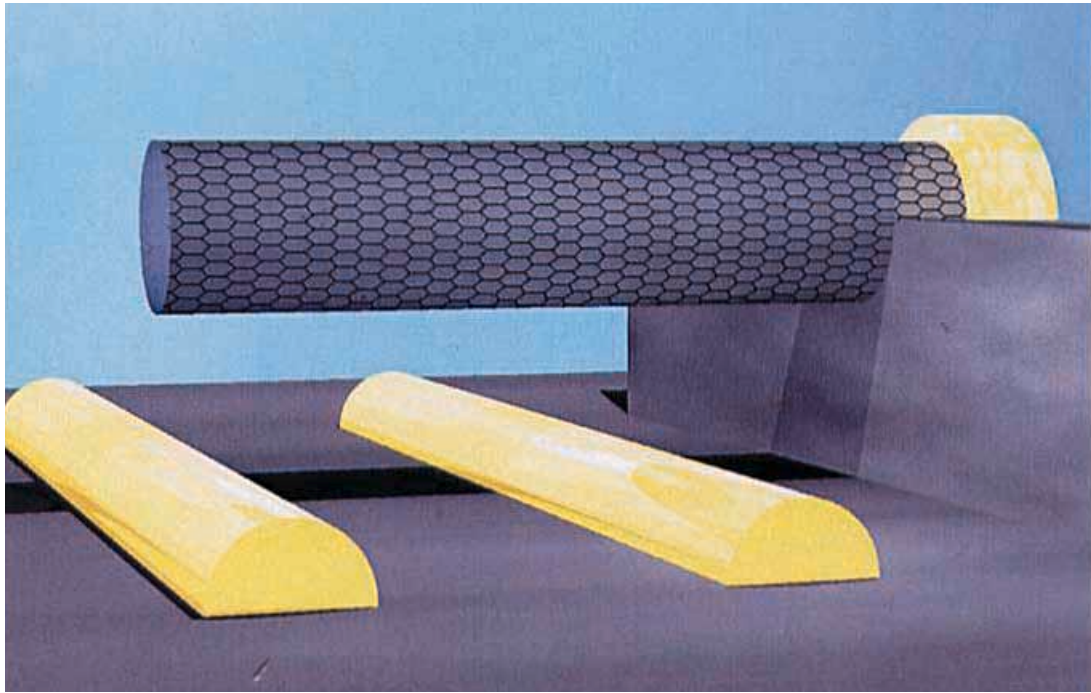
90년대 후반부터 전기적 신호를 역학적 움직임으로 바꾸는 전기역학 시스템(electro-mechanical system)을 나노미터 수준에서 제작하려는 시도가 있었다. 본 연구진은 탄소나노튜브를 이용하여 이와 같은 시스템을 만들어 나노미터 수준에서 역학적 움직임에 의해 전기적 신호의 스위칭이 이루어지는 나노 전기 역학 시스템(nano electro-mechanical system, NEMS)을 개발하였다. 이 연구는 스웨덴 예테보리 소재 찰머스 대학의 Eleanor E. B. Campbell 교수진과 공동으로 수행한 것이다. 찰머스 대학이 MC2 lab에 보유하고 있는 세계 최고 수준의 나노 공정 시스템과 전자 빔 리소그래피 장비를 사용하여 실험을 하였다. 이 대학의 J. M. Kinaret 교수와 M. Jonson 교수진이 수년 전 탄소나노튜브를 이용한 나노릴레이의 가능성을 이론적으로 예측하였고, 본 연구진이 Campbell 교수진과 공동으로 최근 이것을 실험으로 구현하는데 성공한 것이다.



〈그림 1〉 나노 전기역학 시스템의 개념도

3개 탐침이 전기적 신호·역학적 움직임을 릴레이

일상 생활에서의 스위치나 전동기와 같이 역학적인 힘이 전기적 신호를 제어하거나 그 반대로 전기적인 신호가 역학적인 움직임을 제어하는 구조를 모두 전



〈그림 2〉 탄소나노튜브를 이용한 스위치 시스템의 개략도

기역학 시스템이라고 한다. 이러한 기본 개념이 나노미터 수준의 시스템에 적용이 되면 우리는 이를 나노 전기역학 시스템이라고 말한다.

〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 나노 전기역학 시스템은 전기적인 신호와 역학적인 신호에 동시에 반응할 수 있는 역학적 시스템을 중심으로 전기적인 신호를 역학적인 자극으로 바꾸는 변환기(1), 역학적 반응을 전기적 신호로 바꾸는 변환기(2), 또 이들을 제어하는 변환기(3)로 구성되어 있다. 전기적 섭동(perturbation)이 시스템이 가지고 있는 기저상태에 자극을 주어 들뜬 상태로 될 때의 전기적 신호를 받아들이는 것이 우리가 알고 있는 전기적 시스템에서의 측정의 원리이다. 나노 전기역학 시스템에서는 이때 주는 전기적 자극과 이 자극에 의한 반응이 변환기에 의해 역학적인 자극과 반응을 거친 후에 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 이와 같이 전기적인 신호를 역학적인 움직임으로 바꿀 수 있는 변환기가 되려면 중심이 되는 역학적인 시스템이 전도성을 가지면서 동시에 움직일 수 있도록 자유롭게 공중에 매달려 있어야 한다.

〈그림 2〉는 이번에 개발한 탄소나노튜브를 이용한 스위치 시스템의 개략도이다. 그림과 같이 나노튜브가 한 쪽은 전극(소스 전극, S)에 의해 고정되어 있고 다른 한쪽은 공중에 자유롭게 매달려 있다. 매달려 있는 탄소나노튜브는 역학적 자극과 반응을 일으키는 역학 시스템이 되고 그 아래쪽에 있는 전극(게이트 전극, G)은 전기적 신호를 주어 탄소나노튜브를 끌어당기는 역할을 하는 것으로 앞서 〈그림 1〉에서 언급한 변환기 1에 주어지는 전기적 신호를 주는 매체가 된다. 그리고 바깥쪽 전극(드레인 전극, D)은 탄소나노튜브가 아래로 움직여 전극에 닿는 순간 소스 전극에서 나오는 전기신호를 받아들여 줌으로써 변환기 2에서 보여주는 역학적 신호를 전기적 신호로 바꿔주는 역할을 할 수 있게 된다.

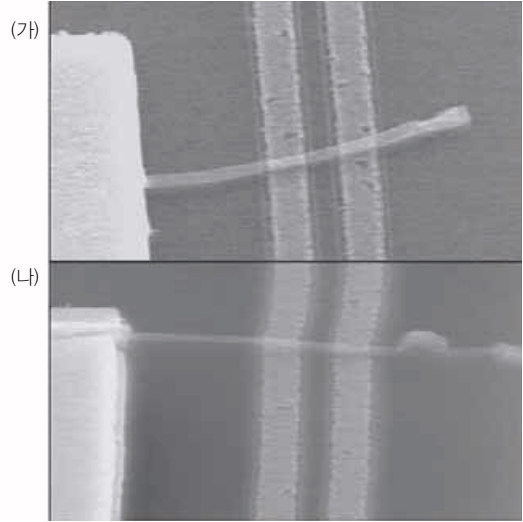
〈그림 2〉와 같은 형태를 나노릴레이라고 하는데 일반적으로 우리가 알고 있는 릴레이는 전자적으로 자기장을 일으켜 자기력을 이용해 철판을 끌어당기는 자성 릴레이(magnetic relay) 이지만 여기서는 정전기력을 이용해 나노튜브를 끌어당기게 되므로 정전기 릴레이(electrostatic relay)라고 할 수 있겠다. 이

와 같이 3개의 탐침을 통해 전기적 신호를 통한 역학적 움직임, 그리고 역학적 움직임이 다시 전기적 신호로 반응하는 탄소나노튜브 나노 릴레이는 나노 전기 역학 시스템이 가지고 있는 기본 개념을 모두 만족시키는 구조이다.

'쌍극 전기영동법'으로 탄소나노튜브 공중에 고정

앞에서 말한바와 같이 리소그래피 기술을 통해 작은 구조물을 제작하는 데는 많은 발전이 있어 왔지만, 리소그래피의 원리가 평판화와 같은 2차원적인 작업이 기본이 되기 때문에 2차원적인 리소그래피 기술을 이용해서 3차원의 공중에 매달린 구조를 만드는 데는 여러 가지 아이디어가 필요하다.

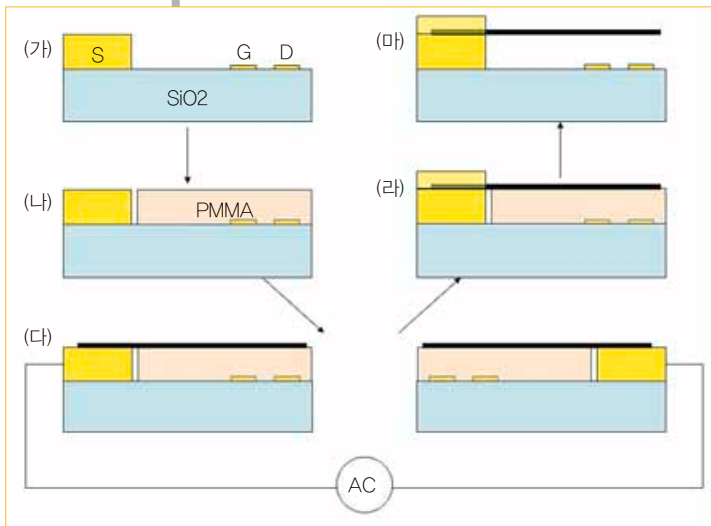
지금까지 탄소나노튜브나 다른 1차원 나노구조를 공중에 매다는 방법은 매달고자 하는 시료를 실리콘 또는 산화 실리콘 기판 위에 흘뿌린 다음 양끝을 리소그래피를 이용해서 패터닝을 만들고 금속을 증착시켜 고정시킨 후 바닥을 강한 산을 이용해서 녹여내는 방식을 통해 이루어져왔다. 그러나, 한쪽만을 고정시키고 다른 한쪽은 공중에 자유롭게 띄워 놓기 위해 이와 같은 방법을 사용한다면 산에 넣어서 녹여낸 후 기판에 남아있는 산을 제거하는 과정에서 액체의 흐름이 고정되어 있지 않은 탄소나노튜브에 힘을 가하게 되



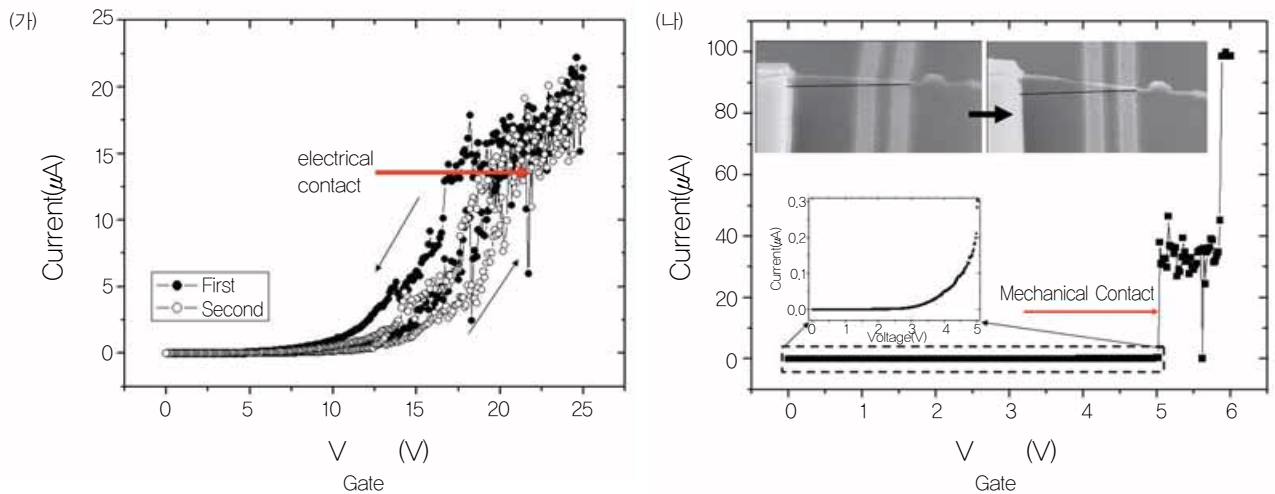
〈그림 4〉 탄소나노튜브 나노릴레이의 전자현미경 사진

어(liquid effect) 대부분 바닥에 무너져 내림을 알 수 있었다. 또한 기판에 시료를 뿌릴 경우 원하는 위치에 시료가 위치하는 것이 아니기 때문에 이것의 위치를 찾아내는 것이 쉽지 않을 뿐 아니라 실제 이를 응용한 소자를 만들기 위한 집적화 또한 불가능하다.

이에 연구진은 이미 교류 전압을 이용한 '쌍극 전기 영동법(di-electrophoresis)' 방법을 통해 탄소나노튜브를 정렬하는 기술을 개발하였다. 탄소나노튜브 릴레이를 제작하기 위해서 우선 전극 부분을 제작하고, 바닥 부분은 소스 전극과 같은 높이로 전자빔 리소그래피에 사용되는 레지스트를 패터닝해서 제작한다. 이때 소스 전극은 바닥에서 100나노미터 높이에 전극을 위치시키고 게이트와 드레인 전극은 바닥에 만든다. 이후 앞에서 말한 전기 영동법을 통해 탄소나노튜브를 소스 전극 위에 정확히 위치시킨다. 소스 전극 위에 전극을 한 번 더 증착시켜 나노튜브가 확실히 고정되게 한 이후 유기 용매를 통해 소스전극 주위에 나노튜브를 받치고 있는 부분을 조심스럽게 제거한다(그림 3 참조). 이 레지스터는 유기 용매에 쉽게 제거되고 유기용매는 쉽게 기화되어 탄소나노튜브가 무너지지 않고 공중에 매달릴 수 있게 된다. 〈그림 4〉는 이렇게 제작된 탄소나노튜브 나노릴레이의 전자현미경 사진이다.



〈그림 3〉 탄소나노튜브 나노릴레이 제작과정



〈그림 5〉


반도체 칩 제작에 전기역학 시스템 응용

이렇게 제작된 탄소나노튜브 나노릴레이로 게이트 전압을 변화시킬 때 소스와 드레인 사이에 흐르는 전류를 측정할 결과, 게이트 전압이 낮을 때는 소스와 드레인 사이에 전류가 흐르지 않다가 점차 비선형적으로 증가하고 어느 게이트 전압 이상에서 갑자기 전류값이 커졌다(그림 5-(가) 참조). 즉, 게이트 전압을 증가시켰을 때 정전기력에 의해 탄소나노튜브가 드레인 전극쪽으로 끌려오게 되고 둘 사이 거리가 좁아짐에 따라 터널링 효과가 점점 증가함으로써 전류가 비선형적으로 증가하는 것이다. 갑자기 전류값이 증가하는 것은 탄소나노튜브와 드레인 전극이 접촉했기 때문이지만, 이 접촉이 완전하지 않아서 전류값의 요동이 보인다. 완전한 접촉은 되지 않았지만 이와 같은 스위칭 효과는 반복적인 측정을 통해 재현이 되기 때문에 이를 ‘전기적 접촉(electrical contact)’이라 명명할 수 있다.

〈그림 5-(나)〉는 나노튜브가 드레인 전극에 완전히 접촉을 한 모습이다. 게이트 전압에 의해 탄소나노튜브가 드레인 전극에 확실히 접촉을 하고(mechanical contact), 접촉을 한 이후는 전류값이 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 접촉을 하기 직전에는 〈그림 5-(가)〉에서 보여준 바와 같이 탄소나노튜브가 전극에 가까워짐으로써 터널링에 의해 전류가 비선형적으로

증가하는 모습도 볼 수 있었다.

연구진은 전자빔 묘화 방법과 쌍극 전기영동법을 응용하여 탄소나노튜브의 나노미터 수준의 릴레이 구조를 개발하였다. 현재 연구를 통해 나노튜브를 한쪽만 고정시키고 다른 한쪽은 공중에 자유롭게 떠있는 구조를 완성하였고, 이것이 실제로 전기적인 신호를 통해 역학적 반응을 얻는 전기역학적 시스템으로 구현됨을 알 수 있었다. 그리고 여러 번의 반복 측정을 통해 게이트 전극이 소스와 드레인의 전류를 조절하는 스위치로서의 기능 또한 밝혀졌다.

탄소나노튜브는 다른 물질에 비해 매우 강한 역학적 특성을 가지고 있어서 스위칭이 되는 시간이 매우 빠를 것으로 예상된다. 역학적 특성을 알 수 있는 지표의 하나로 사용되는 영률(Young's modulus)은 탄소나노튜브의 경우 1TPa 정도가 된다. 현재 이론적으로 결함이 없는 탄소나노튜브의 스위칭 진동수는 1테라 헤르츠까지 예상하고 있다. 앞으로 이와 같은 특성을 릴레이 구조를 통해 밝혀낼 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이렇게 된다면 매우 빠르고 집적화된 반도체 칩에 탄소나노튜브를 이용한 전기역학 시스템이 응용될 수 있을 것이다. 



글쓴이 박영우 교수는 서울대학교 물리학과를 졸업 후, 미국 펜실베이니아 대학교에서 박사학위를 받았다. 현재 나노응용시스템 국가핵심연구센터(NSI-NCRC)의 연구 부장을 겸임하고 있다.