Biomicrosystem 적용을 위한 CNT-NEMS 기술

주병권, 강유리, 김용국, 김병규 / 한국과학기술연구원

서 론

2000년 미국에서 국가적인 나노 기술 정책 사업의 시작을 발표하면서 그 영향으로 나노 기술의 응용 분야에 대한 연구가 전 세계적으로 정보 통신 기술 뿐 아니라 에너지 및 생명 공학 기술에서도 주목할 만한 패러다임으로 급부상하게 되었다. 또한 현재 과학 기술이 머지 않아 예견되는 반도체 소자의 미세화에 대한 한계점을 극복하는데 초점을 맞추고 물질을 원자나 분자 단계에서 규명하는데 노력을 기울이고 있다는 점에서 나노 기술의 중요성을 집약할 수 있다. 이러한 나노 과학 기술 분야 중 탄소나노튜브 기술은 미개척 나노 영역에서의 새로운 물질 분석과 특성 조사뿐 아니라 다른 기초 연구들과의 연계성을 이용한 산업적 응용을 기대할 수 있어 크게 주목을 받고 있는 분야이다. 특히 탄소나노튜브는 그 특이한 물성과 구조가 보여주는 다양한 성질들을 이용해서 최근 주목받고 있는 생명 과학과 의료 산업에 접목할 수 있다. 더욱이 과학기술부에서 2010년까지 나노 기술(Nanotechnology)과 바이오 기술(Biotechnology)의 기술 경쟁력 확보 계획을 발표하면서 미세 가공기술이나 분자 계측 기술 뿐 아니라 의료 기술면에의 탄소나노튜브기술 적용 노력은 가속화되고 있는 추세이다. 또한 탄소나노튜브기술을 MEMS(Micro Electromechanical System) 기술과 연계하여 보다 집적도를 향상시킨 반도체와 인체 내부에서 유영하는 초미세 로봇, 고성능 바이오 센서 등 첨단 제품의 등장을 예견할 수 있게 되었다. 이렇듯 실제적으로 생명 과학에 응용하기 위해서 MEMS 기술과 연계된 탄소나노튜브 기술을 CNT-NEMS라한다.

본고에서는 의료 과학 분야에 응용하기 위해 연구되고 있는 CNT-NEMS 기술의 실례와 현재 이루어지고 있는 연구와 투자, 그리고 필요성에 대해 언급하고자 한다.

탄소나노튜브의 구조와 특성

1985년 탄소의 동소체(allotrope)중 하나인 플러렌(C_{60})이 발견된 이후 1991년 탄소의 새로운 물질 조성에 대한 연구를 하던 NEC의 Thukuba 연구소의 Sumio Iijima 박사가 arc-evaporation 실험을 하는 동안 음극상에 침전된 탄소나노튜브를 발견했다. 이 때 발견된 탄소나노튜브는 이전까지 전혀 발견된 적 없는 육각형 고리로 연결된 탄소들의 집합이었고 형태는 긴 대롱 모양의 1 nm크기 미세 흑연 분자를 종이처럼 말면서 생긴 것 같은 형태를 띠고 있었다. 이 후 T.Ebbesen, P.Ajayan등에 의해 전기 방전법을 사용한 다중벽 탄소나노튜브의 합성 수율 증가와 D.Bethune과 Iijima등에 의해 직경이 1~2 nm 수준의 단중벽 나노튜브 합성이 발표되면서 탄소나노튜브에 대한 연구가 본격화 되었다. 이어서 전기 방전법 이외에 레이저 증착법에 의해 성장된 다발형 나

노튜브의 성장과 플라즈마 화학 기상 증착법에 의해 글라스 기판위에 수직배향된 탄소나노튜브의 합성이 각각 발표되어 고순도의 탄소나노튜브 합성을 할 수 있게 되었다. 그 이후로 탄소나노튜브 합성 및 응용에 관한 연구가 국내외적으로 많은 연구자에 의해 활발히 수행되게 된다.

(가) 탄소나노튜브의 구조

탄소나노튜브는 하나의 탄소 원자가 3개의 다른 탄소원자와 sp^2 결합을 한 채 육각형 벌집 모양을 하고 있으며 흑연면이 나노 크기의 직경으로 둥글게 말린 형태를 띄고 있다(그림1). 이 때 튜브 직경은 수 nm정도로 작고 흑연면이 말리는 각도 및 구조에 따라서 금속 또는 반도체의 특성을 보인다.

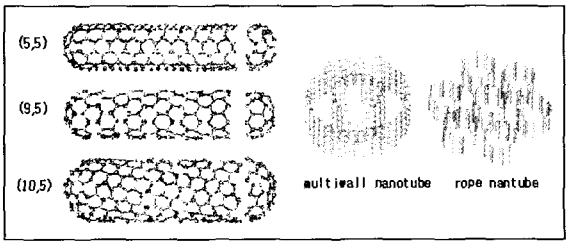


그림 1 탄소나노튜브

대부분의 탄소나노튜브는 육각형의 벌집 모양이 튜브 축을 기준으로 나선 배열된 카이랄(chiral)구조를 가지고 있고 그 외에 지그재그(zigzag)와 팔걸이 의자(armchair)형태의 대칭 구조가 있다(그림2). 또한 벽을 이루고 있는 흑연면의 결합수에 따라서 단중벽 나노튜브(singlewalled nanotube)와 다중벽 나노튜브(multi-walled nanotube) 그리고 다발형 나노튜브(rope nanotube)로 구분하기도 한다.

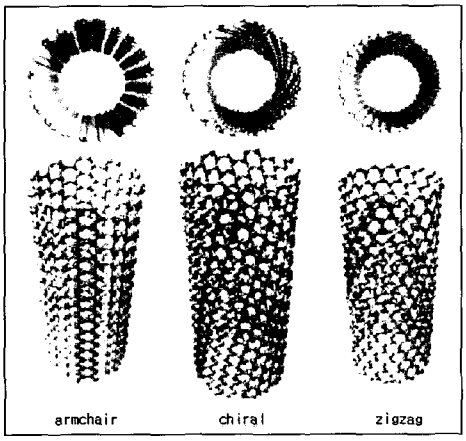


그림 2 탄소나노튜브의 구조

(나) 탄소나노튜브의 특성

탄소나노튜브의 특성은 크게 전기적 특성, 열적 특성, 기계적 특성 그리고 화학적 특성으로 분류할 수 있다. 우선 전기적 성질은 탄소나노튜브의 직경과 chirality의 함수로 정의할 수 있는데 튜브가 감긴 형태에 따라 금속 혹은 반도체적 성질을 주기적으로 가지며 일반적으로 단중벽 나노튜브의 1/3이 금속성을 띄고 나머지는 에너지 밴드갭이 나노튜브의 직경에 반비례하는 반도체 성질을 나타낸다. 또한 거의 모든 팔걸이 의자(armchair)구조의 나노튜브와 지그재그(zigzag)구조의 나노튜브 중 약 1/3 정도가 금속성을 가진다(그림3). 특이한 점은 도체의 특징을 가지는 나노튜브를 다발로 형성할 경우 대칭성이 깨지면서 도핑이 필요 없는 반도체의 성질을 띤다는 점이다. 또한 탄소나노튜브는 같은 직경의 구리보다 훨씬 안정되고 8배 이상 전기전도도가 뛰어나며 더 많은 전류를 전달할 수 있다는 장점이 있다. 현재 이 특성을 이용하여 나노 스케일의 전자회로에 응용하려는 노력과 전자 수송 현상에 대한 연구가 진행되고 있다. 그밖에 탄소나노튜브는 직경에 따라 에너지 갭이 달라지고 준 일차원적 구조로 인해 특이한 양자 효과를 나타내기 때문에 나노 소자로 응용될 경우 이제까지 실현되지 못한 신기능 재료로 작용할 것으로 생각된다.

다음으로 나노튜브는 다이아몬드가 3,320W/m · K

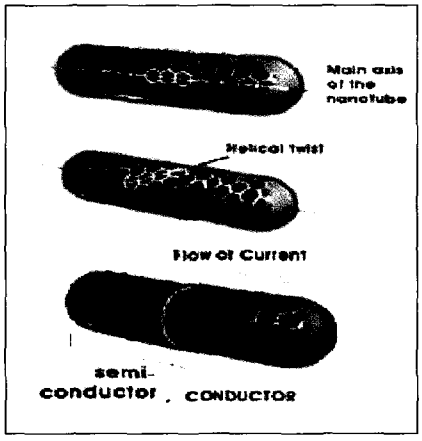
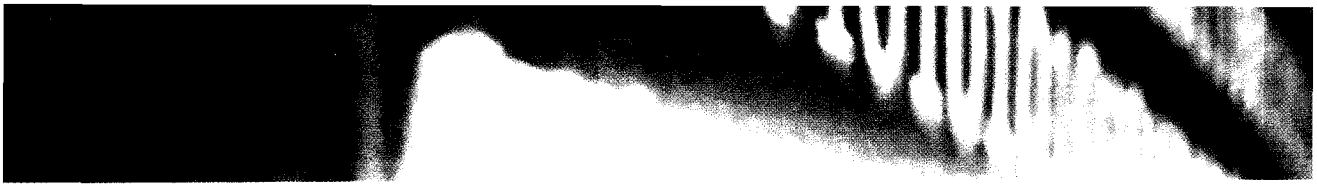


그림 3 탄소나노튜브의 전기적 특성



의 열전달 특성을 갖는 것과 비교해 6000W/m · K의 열 전달 특성을 갖는다. 이로 인해 열 방출이 용이하고 고온에서도 잘 견디는 특성을 가지므로 전자 회로에 적용되어 사용될 때 기기의 열적 결함이 적은 소자를 제작할 수 있다. 뿐만 아니라 탄소나노튜브는 흑연면이 둥글게 감겨 있는 형태를 가지고 있고 탄소 원자의 sp^2결합으로 결합 강도가 강하며 측정된 길이 방향의 영률(Young modulus)은 1TPa 이상의 값을 가진다. 따라서 강철보다 100배 이상의 인장 강도를 가져 끊어지지 않고 휠 수 있으면서 다시 본래의 모양으로 돌아오는 탄성이 뛰어나 계속된 반복에도 전혀 손상되거나 마모되지 않는 특성을 가지고 있다. 특히 다른 화합물과 반응을 잘 하지 않아 안정된 결합을 이룰 수 있다. 이러한 특징을 이용하면 스포츠나 우주 항공 산업 혹은 화학센서등에도 응용을 기대할 수 있을 것이다.

CNT-NEMS를 이용한 바이오 응용 소자

탄소나노튜브는 특이한 성질과 구조를 가지고 있어 다양한 분야에서 응용이 되고 있다. 특히 현재 의료 분야에서와 같이 나노 기술 적용이 활발하게 이루어지고 있는 분야에서는 나노튜브를 적용한 실제 소자에 대한 연구 사례가 늘고 있다. 특히 본고에서 다루고자 하는 CNT-NEMS 기술을 의료 과학 분야에 직접적으로 적용하기 위해서는 시스템에 생체 신호를 증폭하여 보낼 수 있는 집적 기술뿐 아니라 생체 신호의 특성을 파악할 수 있는 의학적 지식이 수반되어야 한다. 또한 생명과 직결되는 역할을 수행할 수 있는 만큼의 시스템 안정성과 내구성 및 재연성을 확보해야 한다.

현재 CNT-NEMS 기술을 바이오에 응용한 예로는 AFM-tip이나 나노 트위저, 바이오 센서등이 있다.

(가) 탄소나노튜브를 이용한 AFM tip

라이스 대학의 Smalley와 하버드의 Lieber 그리고 스탠포드 대학의 Dai 그룹은 AFM tip에 탄소나노튜브를 부착하여 AFM의 해상도를 향상시키는 연구를 진행하였고 후에 AFM-tip에 직접 탄소나노튜브를 성장시키는 기술이 개발되어 탄소나노튜브 팁의 대량 생산의 길이 열렸다(그림4). 기존의 AFM-tip은 실리콘이나 몰리브덴을 이용하였으나 쉽게 마모되고 시편의 미세 결함을 부분적으로 관찰하지 못하는 문제점이 있었다(그림5-a,c). 그러나 탄소나노튜브를 사용하였을 경우 우수한 기계적 강도로 수명이 길고 안정성이 높아졌으며 높은 전도성으로 우수한 해상도의 이미지를 얻을 수 있다(그림5-b,d). 또한 DNA(Deoxyribo Nucleic Acid)나 세포등과 같은 생체 인자들의 경우 수 nm~μm 정도의 크기이므로 이를 검출 또는 관찰하고 2차원적으로 조작하기위해서는 탄소나노튜브 팁의 응용이 필요하다(그림5-e).

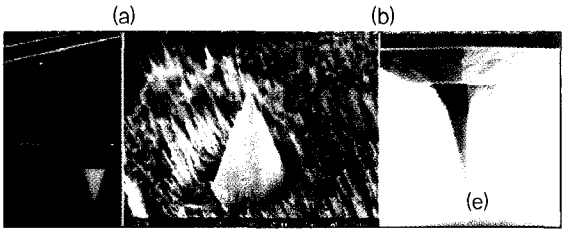


그림 4 탄소나노튜브를 부착한 AFM-tip

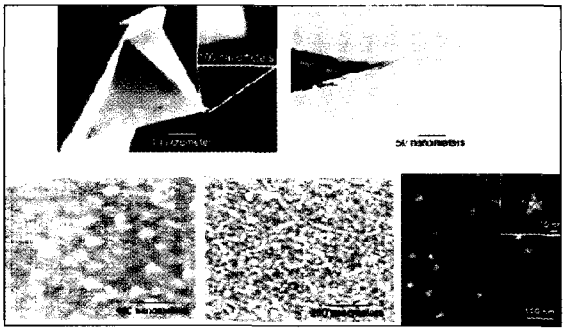


그림 5 기존의 AFM-tip과 탄소나노튜브를 이용한 AFM-tip

(나)분자크기의 물체 집는 나노 핀셋

탄소나노튜브를 결합한 AFM-tip이 나노 구조를 밀어 옮기는 2차원적 움직임만이 가능했다면 최근 미국 버클리 소재 캘리포니아대(UC Brkly) 김필립

박사와 찰스 리버 교수가 발표한 나노 핀셋은 3차원적인 나노 구조물 이동이 가능하다. 발표된 나노 핀셋은 마이크로 피펫을 금(Ag)전극으로 둘러싼 뒤 전극에 지름이 50nm이고 길이가 4μm인 탄소나노튜브 2가닥을 붙여 핀셋으로 만든 형태이다(그림6) 이는 탄소나노튜브의 전기적 성질을 이용하여 금 전극에 바이어스를 걸어주었을 때 나노튜브가 서로 붙었다 떨어지는 움직임을 이용해 분자크기의 물체를 잡을 수 있게 설계된 것이다. 이 핀셋은 500nm 이하의 플라스틱 분자를 집어서 움직였으며 이를 바이오 영역에 이용할 경우 생물 세포를 조작하거나 한 세포 내의 단백질 복합체나 DNA를 분석하거나 조작하는데 이용할 수 있을 것으로 생각된다(그림7). 또한 나노 핀셋은 나노 기계를 만들고 미세 수술을 하거나 유전자 칩등의 영역에서도 이용될 가능성이 있다. 그밖에 생물체에 손상이 가지 않을 정도의 낮은 전압에서 구동이 가능하다면 게놈 연구에서 세포를 파괴하지 않고 내부 구성물질을 조사할 수도 있을 것이다.

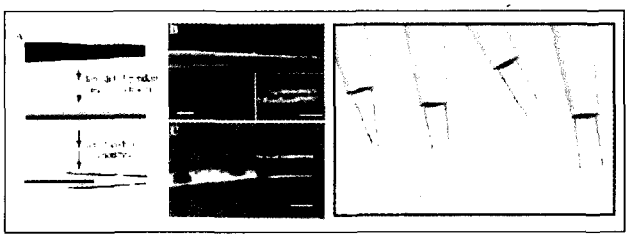


그림 6 탄소나노튜브를 이용한 나노 핀셋

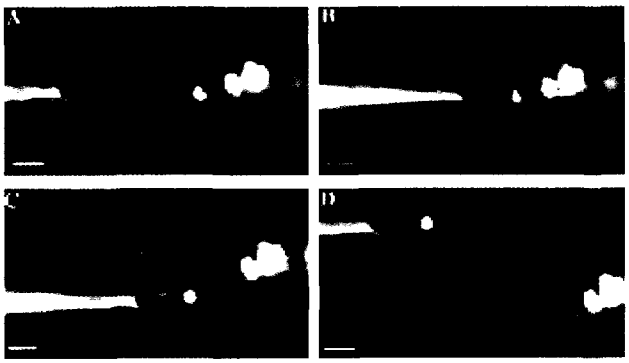


그림 7 탄소나노튜브 트위저로 나노 분자를 집는 모습

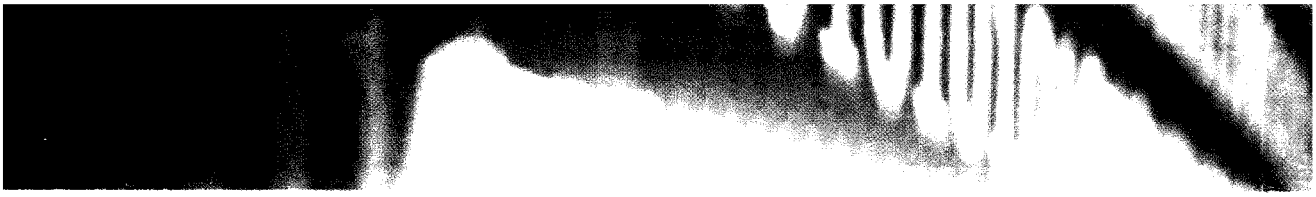
(다) 바이오 센서에의 응용

바이러스, 세포막 또는 단백질 복합체등을 포함한 많은 생체 시스템은 자연 발생적인 나노 구조(nanostructure)라 할 수 있으며 현대 의학은 이러한 나노 구조를 파악하고 진단하는 바이오 센서에 관심을 두고 있다. 특히 병의 유무를 판독해 내는 바이오 센서의 경우 체내 혹은 체외의 생체 신호를 빠르게 분석하면서 높은 민감도를 지닌 초소형의 소자를 요구한다. 이러한 점에서 탄소나노튜브를 바이오 센서로 이용하게 될 경우 나노튜브의 안정된 화학적 특성과 미세한 크기로 인한 신호 전달의 효율 증대로 인간의 갖가지 질병을 빠르게 진단하는 한편 다양한 의약품 개발에도 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

단백질이나 탄수화물은 동식물 세포를 구성하는 주성분으로 DNA와 달리 특이성(specificity)이 매우 높다는 특징을 가지고 있다. 특히 이러한 고분자 유기물 성분을 검출하고 분석하는데 이용되는 바이오 센서는 특정 질병을 진단하고 약물 치료의 효능을 평가하는데 이용된다. 그러나 단백질이나 탄수화물 같은 효소의 경우 환경의 변화에 민감하고 화학적인 증폭이 불가능하기 때문에 일반적인 바이오 센서에 나노 크기의 민감도를 지니는 탄소나노튜브를 응용할 경우 보다 신뢰성있는 반응을 얻어낼 수 있을 것이다.

기판에 성장된 탄소나노튜브는 특정 효소를 검출해 내기 위해서 나노튜브 표면과 효소의 화학적인 유기 결합을 통해 튜브 끝부분에 효소를 고정시킨 후 산화 환원 반응을 거쳐 생성된 전자를 기판에 전달한다. 이렇게 전달된 전자는 전기적인 신호나 기계적인 진동으로 바뀌어 검출해 내게 됨으로써 특정 효소를 비롯하여 특정한 약물의 변화 등을 감지해 인체에 투여한 약물의 변화를 알아낼 수 있는 센서가 될 수 있다(그림8).

최근에 에너지 대체 용기로 속이 빈 탄소나노튜브의 내부에 모세관 현상을 이용하여 수소를 비롯한 다른 기체의 저장이나 감지에 응용한 소



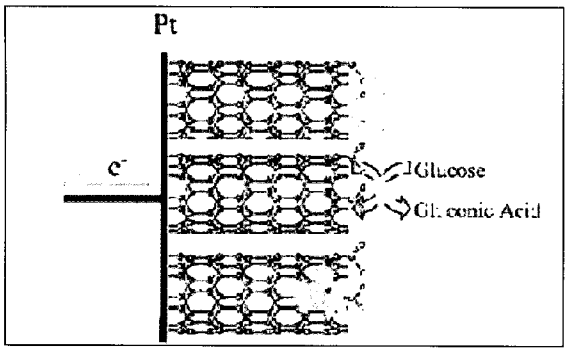


그림 8 탄소나노튜브 배열을 이용한 바이오 효소 센서

자의 연구 발표가 활발하다. 특히 Hummer가 제안한 분자 역학 시뮬레이션에서는 단중벽 탄소나노튜브가 물 분자 이동의 경로로 이용될 수 있다는 것을 설명하였다. 이러한 개념을 이용하여 탄소나노튜브를 의료 과학 분야에 응용하게 되면 나노튜브의 끝부분을 개방해서 생물학적 분자를 포함한 여러 가지의 약품들로도 채울 수 있을 것이다. 그 한 예로 DNA를 탄소나노튜브안으로 주입될 수 있게 함으로써 분자 공학이나 센서 등에 이용하는 경우를 들 수 있겠다. DNA를 분석하는 바이오 센서는 근래에 인체내 모든 유전자 정보를 규명하고자 하는 노력이 진행되면서 유전병을 진단하고 예방하는데 있어 막대한 양의 유전자 정보를 신속하게 분석하고 분리해 내는데 이용될 수 있다(그림9).

현재 널리 사용되고 있는 전기 영동에 의한 DNA 염기 서열 분석이 오랜 시간과 고도의 숙련 기술이 필요하고 복잡한 과정이 필요하기 때문에 새로운 분석 시스템의 연구를 거듭하고 있는 상태이다. 이와 관련하여 캔틸레버등의 MEMS 구조물 위에 탄소나노튜브를 성장시킨 후 화학적 처리 등을 거쳐 목표 DNA 단편을 고정시킨 후 목표 DNA의 짝 염기를 이용하여 탄소나노튜브에 고정된 DNA를 결합시키면 염기 서열의 상보성 정도에 따라 각기 다른 결합(hybridization)상태를 나타내게 된다. 이를 기계적 움직임이나 광학적인 방법으로 관찰 해석함으로써 목표 DNA의 염기 서열을 확인할 수 있는 센서가 될 것이다. 이러한 바이오 센서의 사용은 DNA 분석 시스템의 소형화(miniaturization)를 이루어 극미량의 시료만으로도 분석이 가능한 것 외에 탄소나노튜브 배열(array)을 이용하면 목표 DNA 상의 여러 군데 염기서열을 한꺼번에 규명할 수 있게 할 수 있을 것이다(그림 10).

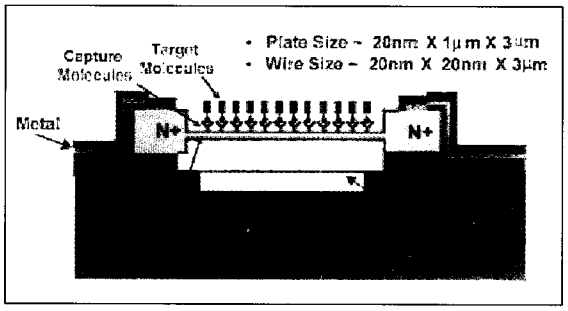


그림 10 DNA 검출을 위한 바이오 분자 센서

결 론

현재 세계 각국 정부는 나노 바이오 기술에 대한 투자를 늘리고 있다. 그 중 미국에서는 지난 1998년부터 12개 연방 정부기관이 참여하는 국가 나노 기술 개발 전략(NNI)를 수립하여 추진하고 있고 일본은 NNI와 유사한 기술 개발 종합 계획을 마련해 운영하고 있다. 그 밖

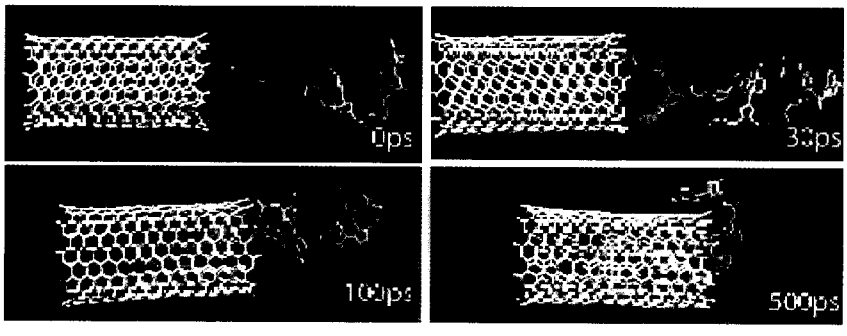


그림 9 탄소나노튜브 안으로의 DNA oligonucleotide 주입 시뮬레이션

에 유럽 연합 국가들은 연구소 차원의 개별 연구 성과들을 국가 차원으로 통합해 나가고 있는 상황이며 중국도 지난 2000년부터 4~5년의 중기 프로젝트를 수행하고 있다. 이러한 국가적 투자 외에도 전 세계 주요 민간기업에서는 나노 바이오 기술개발에 대한 연구를 증가하고 있다. 이렇듯 나노 바이오 기술에 대한 연구가 증가 되고 있는 지금 가장 각광받고 있는 탄소나노튜브는 20세기 획기적인 발견 중 하나로 반도체 원료로 사용되고 있는 실리콘등을 대치할 전망이다. 또한 나노 기술과 바이오 기술을 연결하기 위해 탄소나노튜브와 MEMS 기술을 이용하려는 시도가 진행되고 있다. 이러한 CNT NEMS 기술은 기술의 파급 효과와 경제적, 산업적인 가치가 매우 높은 신기술로서 21세기의 의료 과학 혁명을 이뤄낼 수 잇을 것이다. 아직까지 국내외적으로 탄소나노튜브의 응용 분야에 대한 연구는 미비한 실정이나 각국 정부의 나노 기술 시장 선점을 위한 활발한 투자와 나노 산업의 중요성을 강조하는 시장 분위기는 바이오-나노 인프라 구축에 유익한 영향을 줄 것이다. 또한 이 기회를 잘 활용하여 보다 많은 연구 그룹에서 다양한 의료 공학적 시스템을 연구한다면 CNT NEMS 기술이 의료 공학에 적용될 수 있는 현실이 보다 빨리 대두될 것이다.