

◆특집◆ Nano Manufacturing (Ⅱ)

나노봇 기술동향

박경택*

Technology of Nanobot

Kyoung Taik Park*

Key Words : Nanobot (나노봇), Micro/Nano Manipulation (마이크로/나노 조작), Self-Assembly (자기조립), Molecular Manufacturing (분자제조), Nano Gear (나노 기어)

1. 서론

현재 많은 연구자들은 나노기술이 미래 산업의 핵심기술로 자리를 잡을 것으로 전망하고 있다. 인간의 몸속에 들어가서 손상되거나 병든 조직을 고칠 수 있는 것과 같이, 인간의 몸속에서 인간에게 필요하고 이로운 기능을 할 수 있는 극소 로봇 (Nanobot)과 인간의 기능을 컨트롤하기 위해 인간의 뇌 속에 심어진 나노 사이즈 크기의 논리 칩 (Nanochip)은 우리 인간들을 가장 매료시키는 작품 중 하나가 될 것으로 생각하고 있다. 이것들은 인간에게 긍정적인 측면과 부정적인 측면을 동시에 제공하게 될 것이지만, 여기서는 나노봇에 대한 기술적인 측면의 발전 동향에 대해서만 알아보도록 한다.

나노기술에 있어서 현재의 발전 동향과 분자 레벨에서의 생물공학에 대한 이해는 가까운 미래에 나노봇 개념이 현실화 될 것으로 생각하게 될 것이다. 여기서 나노봇(Nanobot)은 크기가 나노 스케일인 극소 로봇을 말하고, 나노 로봇(Nano Robot)은 크기에 관계없이 다루는 대상 물체나 조작 작업이 나노 스케일일 때 사용되는 로봇을 말한다. 기술 발전적인 측면을 볼 때 나노 조작 로봇이 우선 개

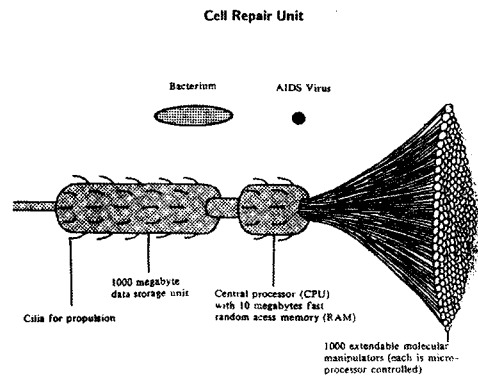


Fig. 1 Cell Repair Machine, Brian Wowk

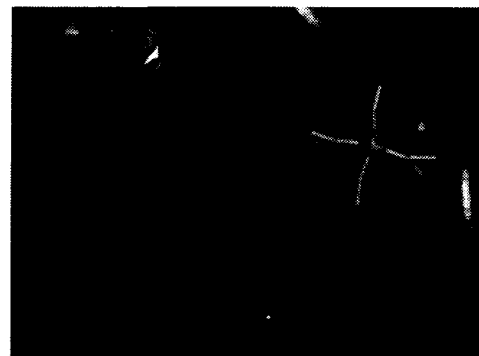


Fig. 2 Nano Capsule, Daniel Higgins, University of Illinois

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부
Tel. 042-868-7131, Fax. 042-868-7721
Email: ktpark@kimm.re.kr

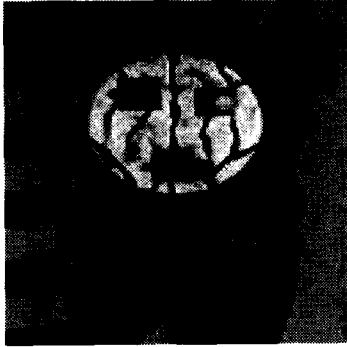


Fig. 3 Implanted Nanochip, Gina Miller

발이 되고 나서, 이것을 이용하여 나노봇을 만드는 것이 일반적인 것이다.

나노봇의 응용분야를 의학 분야에 초점을 맞출 때 현재 의학의 역할을 대신할 수 있는 좋은 방법이 될 것이다. 현재 의약품 전달 시스템은 미용이나 의학적 응용을 위해 내부 특정 조직을 활성화시키는 분자들을 전달하는데 사용되고 있다.

나노봇은 인간의 몸속에서 자유롭게 흩어질 수 있고, 그 스스로 분자 레벨에서 특정 조직과 상호작용을 할 수 있는 인공적으로 제조된 구동물체로 정의 할 수 있다. Fig. 4는 나노봇이 필요할 때 셀 조직에 의해 스스로 활동을 할 수 있는 나노봇의 도식적인 구성을 보여 준다. 일반적으로 질병이나 전염병의 공격에 의한 스트레스는 셀 조직의 화학적 반응을 변화 시킨다. 이러한 현상으로부터 세포 화학은 잘 이해될 수 있고, 나노봇의 기능을 위해서는 세포화학에 대한 연구가 필요하다. 나노봇의 크기는 천연 방벽이나 특히 셀 조직 내부를 잘 통과 할 수 있을 정도로 작아야 한다.

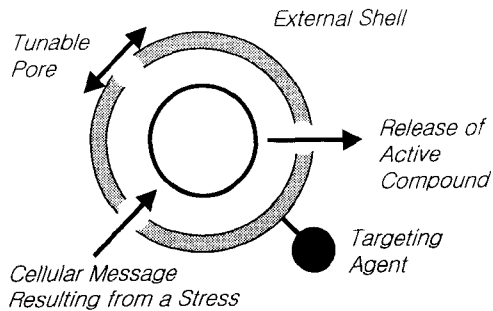


Fig. 4 Operation of Nanobot

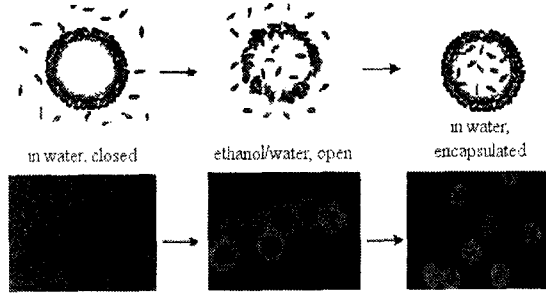


Fig. 5 Operation of Nano Capsule, Yuri Lvov, Louisiana Tech University

만능의 요술 탄알 개념이 현실화는 되지 않을지 몰라도, 어떤 특정 세포 조직을 목표로 함으로서 생기는 효율성 향상은 매우 중요한 것이다. 매우 정확한 목표를 가질 때 약품의 화학 치료 분자는 열 배 혹은 그 이상까지 인체에 끼치는 독성을 감소시킬 수 있다. 나노봇은 그들의 응용에 따라 세포조직 목적지에 의존하는 여러 가지 다른 약품으로 코팅 될 수 있다. 외부 껍질은 그것이 몸체의 일부로 인식될 수 있거나 혹은 다른 크기 분자들을 방출할 수 있어야 한다. 실리카처럼 단단한 껍질은 만약 그것이 나노미터 수준에서 비독성적인 것이라면 이상적인 모체가 될 수 있다.



Fig. 6 Respirocyte with Red Cells

기공의 크기는 따라 다른 여러 크기의 분자의 방출을 허용할 수 있도록 조정될 수 있는 것이어야 한다. 표면은 단순한 화학적 방법으로 쉽게 기능화 될 수 있어야 하고, 그러나 가장 중요한 것은 실리카가 몸체 속에서 장기적 활동성을 허용할 수 있도록 생물적 퇴화가 되지 않는 것이어야 한다. 이러한

기능 요소들을 조합하면, 그러한 나노봇을 만들어서 의학 분야에 응용을 할 수 있다.

가까운 장래에 서브-미크론 크기의 집게, 분자 기어 및 모터, 나노 센서 그리고 논리 나노칩 등은 나노봇의 구성요소로 사용될 수 있을 것이고, 새로운 기능과 성능을 추가함으로써 나노봇을 현실화를 시킬 수 있을 것이다. 우리는 몸속에서 외부로부터 아무런 조치 없이 손상된 세포조직을 스스로 치료하고 바이러스를 죽이면서, 우리 몸 속에 영구히 존재하는 수백만의 나노봇과 함께 살아가는 것을 상상할 수 있다.

2. Micro/Nano 조작 기술

지난 20년 동안 마이크로 시스템에 대한 연구 활동이 지속적으로 이루어져 왔으며, 그리고 산업체에서 그 응용분야도 많이 생기게 되었다. 마이크로 머신은 구성요소의 크기를 작게 하는 스케일적인 이점을 가지고 있으며, 소형화는 좁은 장소에 작업을 수행할 수 있도록 하는데 있어서 핵심 요소가 된다. 대부분 경우, 마이크로 시스템을 구축하는 핵심 기술은 MEMS 연구의 초기 단계에서는 리소 그래피를 이용한 마이크로-패브리케이션이었다. 그러나, 마이크로 시스템을 구축하는데 있어서 여러 가지 새로운 전략들이 제안되어 왔다. 새로운 패브리케이션 방법을 이용하여 마이크로 액츄에이터, 마이크로 센서, 마이크로 유체 디바이스 등을 생산을 하여 왔다. 펄 공정의 정밀도가 향상되고 그리고 제조된 디바이스의 형상비도 점차 증가하게 되었다. 아직도 대부분의 마이크로 시스템은 탑다운 전략에 의해 만들어진다.

90년대 초기에는 MEMS 디바이스를 구축하기 위해서는 버텀업 전략을 이용하였다. 그것들은 원자나 NEMS(Nanometer-sized Electro- Mechanical Structures)로부터 만들어져야 한다고 생각하였다. 그러나, 실제 기능의 디바이스나 시스템을 실현하는 데는 상당한 갭이 있었다. 다른 한편, 나노 과학과 공학을 이용하기 시작하였다. 탑다운 전략과 버텀업 전략 사이의 갭은 점차 줄어들게 되었다. 더욱이 나노 구조의 새로운 재료가 발견되거나 개발되었고, 그리고 나노미터 크기의 물체를 조작할 수 있는 여러 가지 도구가 출현하였다. 그래서, 지금 우리는 나노 기술을 이용하여 NEMS와 MEMS를 구축할 수 있는 새로운 단계에 진입하고 있다. 현

단계에서 요구되는 창조적인 연구에 있어서 주요 전략들은 다음과 같이 요약 된다.

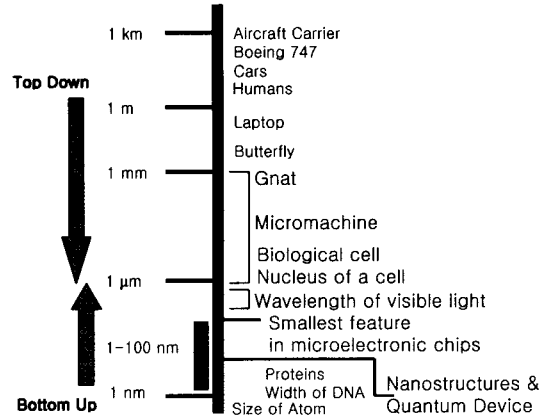


Fig. 7 Micro/Nano Strategy of top-down and bottom-up

- (1) 구성요소의 소형화 : Micro to Nano
- (2) 가공정도의 초정밀화
- (3) 3D 조작 및 조립 기술
- (4) 모델링과 실제 사이의 차이에 대한 극복할 수 있는 방법과 이론
- (5) 나노 구조 및 기능 재료
- (6) 설계 개념에 있어서 발상전환
- (7) 자기구성(Self-Organization) 현상의 활용

이것들 중에서도 나노 세계를 탐구하는 데는 3D 조작 과 조립 기술 및 이론은 가까운 장래에 매우 중요한 역할을 할 것이다. 지금까지 이에 관련되어 이루어진 주요 연구 활동은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- 1959 : Feynman, "Plenty of Room at the Bottom"
- 1981 : H. Rohrer and G. Binnig, Scanning Tunneling Microscope (STM) 발명, IBM Zurich
- 1985 : R. Smalley, R. Curl and H. Kroto, Buckyballs 발견
- 1986 : Atomic Force Microscope (AFM) 발명
- 1989 : 35 Xenon Atom으로 IBM 글자 작성, IBM Zurich
- 1990 : R. Hollis et al, Tele-Nanorobotic Manipulation System, IBM
- 1990 : M. Washizu, 바이오 물체에 대한

- 정전기 조작, Kyoto Univ.
- 1991 : S. Iijima, Carbon Nanotube(CNT)발견, NEC
 - 1995 : T. Hunno et al, AFM을 이용한 나노 입자조작, Lund Univ.
 - 1995 : In-pipe Micro Inspection Machine, Denso Inc.
 - 1995 : R. S. Fearing, Micro Force에 대한조사, UC Berkeley
 - 1996 : I. Shimoyama et al, 2D Micro Self-Assembly, Uni. of Tokyo
 - 1996 : T. Sato, SEM을 이용한 3D 마이크로 입자 셀프 어셈블리, Univ. of Tokyo
 - 1996 : T. Tanikawa et al, Two-Finger Micro Hand, Tsukuba Univ.
 - 1997 : C. Keller, HEXIL Micro-tweezer, UC Berkeley
 - 1997 : N. Seeman, DNA를 기초로 한 나노기계 디바이스, NY Univ.
 - 1998 : P. Avouris et al, 개별 CNT의 조작, IBM
 - 1999 : IMM, Micro Helicopter 제작, Germany
 - 1999 : C. M. Lieber et al, Nanotube Tweezer, Harvard/UC Berkeley
 - 1999 : Higuchi et al, Microtool을 이용한 Gene 주입, Univ. of Tokyo
 - 1999 : R. R. Syms, 3D Micro Self-Assembly, Imperial College of Science
 - 2000 : US, National Nanotechnology Initiative 시작, (\$422 million)
 - 2000 : 액체 속의 폴리머 마이크로 액츄에이터와 로봇, Linkopings Univ. R. S. Fearing et al, Micromechanical Flying Insect, UC Berkeley
 - 2000 : NanoWalker, Bio-Instrumentation Lab., MIT
 - 2001 : Screw Type Micro Surgical Robot, Tohoku Univ.
 - 2001 : Molecular motors : Nano-copter, Nanofabrication Lab., Cornell Univ.
 - 2001 : Elastomer Actuators, SRI international
 - 2001 : Nanotube Logic Circuits, IBM and Delft Univ.

마이크로와 나노 조작은 크게 두 가지 유형으로 분류할 수 있다. 즉, 접촉형과 비접촉형 두 가지로

Object Size	A°	1 nm	10 nm	100 nm	1 μm	10 μm	100 μm
Object Type	Atom	Molecule protein RNA			Cell	Neuron	Tissue
		DNA	Virus				
Imaging					Optical Microscope, SNOM		
					Scanning Electron Microscope, SEM		
					Scanning Probe Microscopes (STM, AFM, ...)		
Fabrication					Optical Lithography, Laser		
					E-Beam Lithography		
					Self-Assembly/Organization		
Robotic Manipulation		SPM manipulation, Optical tweezers				Micro-robotics	
						Nano-robotics	
Physics		Molecular Dynamics					Classical
			Quantum		Micro/Nano-Physics		Continuum Mechanics

Fig. 8 Scale in Micro/Nano Technologies

나눌 수 있다. 그들은 기본적으로 공기, 액체 혹은 진공과 같은 작업환경 하에서 조작 작업이 이루어진다. 이것은 물체의 성질, 크기와 관찰 방법에 의해 결정된다.

일반적으로 마이크로/나노 조작 시스템은 위치 이동 도구로는 마이크로/나노 조작자, 그것의 눈으로는 마이크로스코프, 손가락으로는 캔티레버와 트위저를 포함하는 여러 형태의 엔더이펙터, 그리고 조작을 할 수 있거나 혹은 물체의 성질을 결정할 수 있는 여러 형태의 센서(힘, 변위, 접촉, 변형 등)를 포함한다. 마이크로/나노 조작의 핵심기술은 관찰, 구동, 측정, 시스템 설계, 펌, 보정 및 제어, 통신 그리고 MMI 등을 포함한다. 마이크로/나노 조작에 관련된 연구 분야는 Fig. 9와 같다.

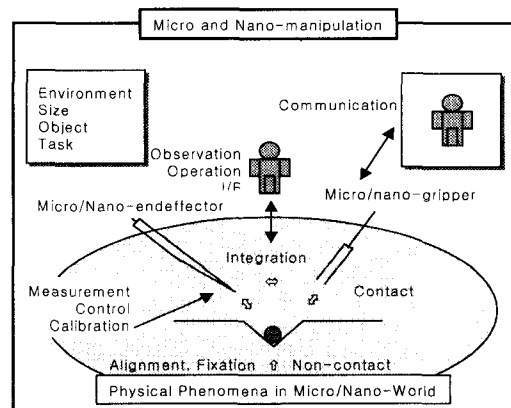


Fig. 9 Nano/Micro Manipulation System

나노 세계를 연구하는데 있어서 어려움은 이론이나 실험 양쪽 모두에 존재한다. 이론적으로, 나노 시스템 혹은 중간 범위 물체는 우리가 기초적인 거동에 대해 거의 이해하지 못하는 크기 영역에 존재한다. 그들은 이론적 원리에 의해 기술하기에는 너무 크고, 통계적 총합에 의해 기술하기에는 숫자가 너무 적다. 그리고 실험적으로 입자들은 직접 측정하기에 크기가 너무 작다. 나노 시스템을 만드는데 탑다운과 버텀업의 두 가지 전략이 있지만 아직 해결해야 문제점들이 많이 있다.

나노 기술을 활성화 하기위한 더 나은 방법은 이러한 두 가지 방법의 조합이다. 즉, 먼저 초분자를 발생시키는 직접 자기조립(Self-Assembly)을 통해 빌딩 블록을 구축하고 나서, 더욱 작은 나노 조작 도구를 이용하여 그들을 더욱 복잡한 나노 시스템으로 조립하는 것이다.

그래서 나노미터 스케일에서 있어서 나노 조작 및 위치제어는 분자 나노기술로 향하는 핵심기술이 될 것이다. 나노 조작의 장기적 목적은 고기능성 나노미터 스케일 구조물이나 메카니즘을 만드는 것이고, 이것은 나노미터 스케일의 빌딩 블록으로 얻을 수 없는 것이다.

나노 조작자의 최신 버전은 Drexler's Assembler 이고, 이것은 자기복제 뿐만 아니라 유용한 제품의 넓은 범위를 구축할 수 있는 일반 목적 제조 도구로 제안되었다. 현재 나노 조작은 나노 세계의 탐구를 위해 매우 유용하고, 이것은 가까운 장래에 비교적 단순한 나노구조 제조와 바이오 연구 분야에 활용 될 것이다. 그리고 원자 스케일 논리회로나 나노 디바이스도 멀지 않아 등장 할 것이다.

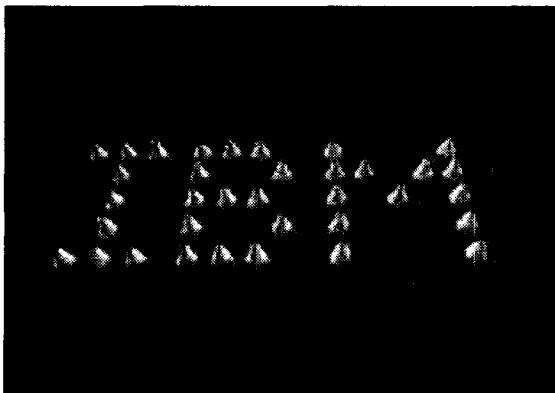


Fig. 10 IBM logo with atoms, IBM

나노 조작의 첫 번째 실험은 Eigler와 Schweizer에 의해 실행되었다. 그들은 원자 정밀도를 가진 싱글-크리스탈 니켈 표면에서 개별 제논 원자를 위치 이동 시키기 위해 저온(4K)에서 STM을 이용하였다. 조작은 원자 하나하나로, 그들 자신이 설계한 초보적인 구조물 제조할 수 있다. 결과는 세 글자로 'IBM'을 형성하기 위해 35개의 원자가 어떻게 움직이는가를 보여 주는 사진이다. 이것은 사람들이 실제로 원자를 이동시킬 수 있다는 것을 증명하는데 많은 도움을 주었다.

Feynman이 얘기하는 일종의 서브미크론 범위 조작은 아직 근접 단계이지만 한번에 하나의 원자를 이용하여, 표면에 재미나는 물리적 구조뿐만 아니라 글자, 그림 등을 만들기 위해 STM이나 다른 나노 조작자를 사용하였다. 최근 노력은 더욱 효과적이고 쉽게 사용할 수 있는 원자 단위나 분자단위를 조작할 수 있는 도구를 개발하는데 집중하고 있다.

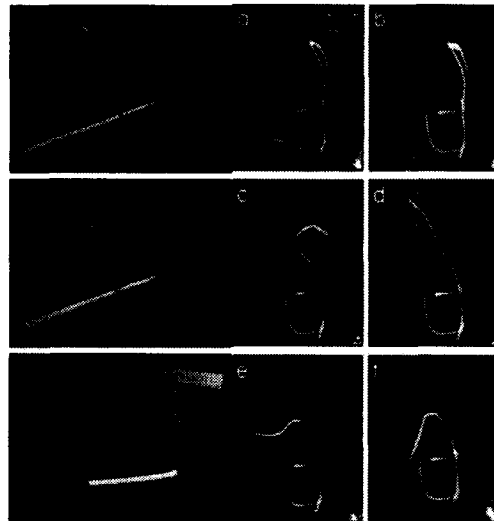


Fig. 11 Nanotube Manipulation, IBM

현재 나노기술로는 1~100 nm 크기 범위의 다기능 구조물을 만들 수 있고, 그리고 더욱이 콜로이드 화학, DNA 템플레이트, 혹은 AFM을 사용하여 독립적으로 합성된 다른 기본구성 단위들을 조립하는 것이 가능하다. 이 점은 대량생산이 주요 관심사가 되는 산업적인 관점으로부터 흥미를 끄는 것이다.

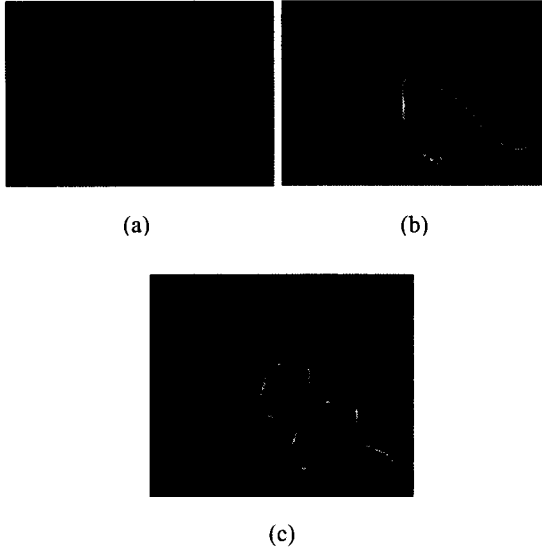


Fig. 12 Nano Tweezer, Source Bell Lab

3. 나노봇(Nanobot) 기술

나노봇은 1992년에 출간된 Drexler의 나노시스템이란 책자에서 처음으로 언급이 되었다. 이것은 분자 제조 분야에 대해 매우 유익한 기술적 기반을 제공하였을 뿐만 아니라, 그러한 기술들은 이미 의학에 대해 주요 연관성을 가진 것으로 알려져 있다. 특히, 이것은 분자기계 시스템과 생체 시스템, 인간 생체 시스템 사이의 상호작용의 개념과 종합적인 연구 분석을 더욱더 필요로 하고 있다.

나노봇에 대한 기본 개념을 제공한 나노시스템은 나노메디신으로부터 출발하였다. 나노메디신 분야는 분자기계적인 나노시스템과 생체 시스템 사이에 필요로 하는 인터페이스에 많은 문제가 있다. 이것은 부분적으로 분자제조 보다 여러학문 분야의 연구를 필요로 하는 다학제적인 분야가 되었다. 그러므로 미래 의학기술 분야에 흥미를 갖는 전문가나 기술자들이 관심을 갖게 되었다.

나노봇에 필요한 나노 디바이스의 공통적인 기본 기능과 그러한 디바이스의 물리적, 화학적, 열역학적, 기계적 그리고 생리적 제약들에 대한 연구가 필요하였다. 이것에 대한 관심은 기초 연구에 종사하는 물리학자, 화학자, 생물학자 그리고 바이오메디컬 연구자들이 대부분이었다. 나노 디바이스에 대한 제어와 구성, 생체 기능과 조직의 안전성, 그

리고 기본적인 나노메디컬 구성요소와 단순시스템의 형태에 대해 연구를 많이 하고 있다. 이 응용분야에 대해 관심을 갖는 사람들은 주로 시스템과 제어 기술자, 물리 연구자, 의학자, 바이오 기술자들이었다. 클리닉 상황에서의 나노 메디컬 기술을 이용하여 특정 조건과 상처에 대한 특정 치료에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이 분야는 주로 클리닉 전문가와 의사들이 관심을 갖고 있다.

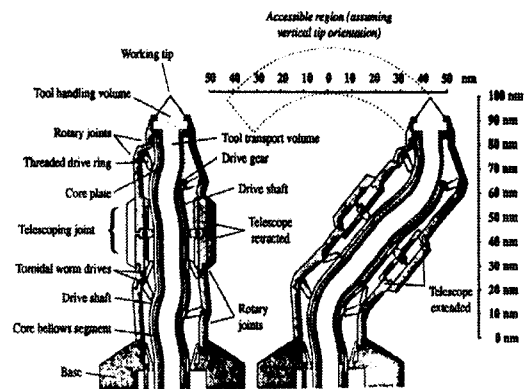


Fig. 13 Nanobot, Drexler

분자 조립을 이용하면 매우 적은 개수의 분자로 매우 높은 고정밀도의 간단한 나노기계 시스템을 구성할 수 있다. 그래서 초기에는 기능을 갖는 나노기계는 실험실의 호기심 수준이었지만, 분자 조립 기술이 천천히 향상되어 감에 따라 점차적으로 더 복잡한 기능을 갖는 나노기계를 방대한 숫자로 제조될 수 있을 것이다. 이러한 매우 복잡한 기능을 갖는 나노기계에 대한 설계와 조작에 대해서도 연구가 많이 이루어지고 있다.

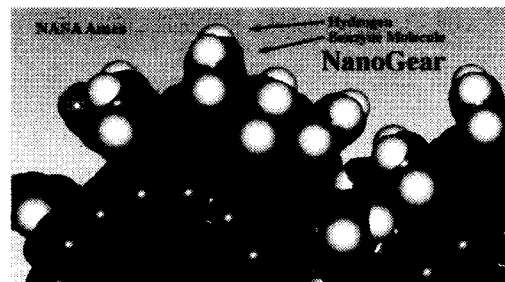


Fig. 14 Nano Gear, NASA

© Institute for Molecular Manufacturing
www.imm.org

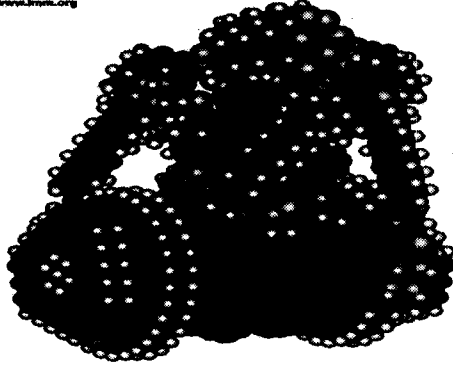


Fig. 15 Nano Controller, NASA

메디컬 나노봇 디바이스에서 요구되는 분자기계 시스템의 기본 기능에 대해서도 연구를 많이 하고 있다. 이것들은 중요한 분자들을 인식, 분류 그리고 전달할 수 있는 기능을 포함한다. 즉 환경을 감지할 수 있고, 형상 혹은 표면 조직을 변경할 수 있고, 의사, 환자 그리고 다른 나노봇과 통신을 할 수 있어야 한다. 몸속을 돌아다닐 수 있게 하는 기능, 즉, 내장, 기관, 조직, 세포내에서 특정 인체부위 혹은 특정 세포부위의 위치를 결정할 수 있고, 미세 물체를 조작할 수 있고, 그리고 시간에 맞추어 계산을 수행할 수 있어야 하고, 살아있는 세포와 바이러스를 비활동화 시킬 수 있어야 하고, 그리고 여러 압력과 온도에서도 구동을 할 수 있는 기능 등이 필요하다.

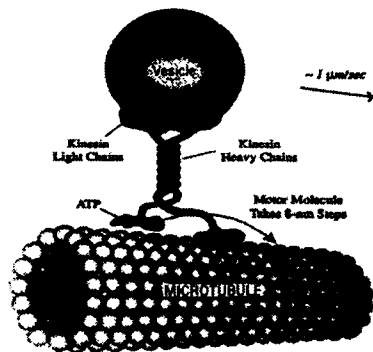


Fig. 16 Cyto locomotion

시스템과 운영, 즉 메디컬 나노 디바이스의 설계와 운영에 있어서 시스템 레벨 수준의 기술에 대

해서도 연구가 이루어지고 있다. 스케일 효과와 일반 설계원칙을 포함한 나노메디컬 운영과 구성의 형태에 대해서도 연구가 많이 이루어지고 있다. 무선조작과 햅틱 제어기, 스위칭 동작, 자생 제어 시스템, 그리고 여러 가지 운영 프로토콜을 포함한 제어 문제에 대해서도 연구가 이루어지고 있다. 또한 수선, 대체 그리고 신뢰성 문제에 대해서도 연구가 이루어지고 있다. 특정 목적과 일반 목적의 구조사이의 트레이드오프와 같은 분자기계 시스템의 설계 문제, 나노 기관의 의학적 유용성 문제, 복제와 같은 개략적 구성에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다. 의학적 안정성과 성능, 특히 면역반응과 응혈을 포함한 메디컬 나노봇에 대한 바이오 성능 등의 다수 문제에 대해서도 연구가 이루어지고 있다.

인간 몸으로부터 나노봇의 침투와 퇴출 방법, 그리고 가능한 나노 디바이스의 실패 모드, 환경적 상호작용, 나노 메디컬 치료의 부작용, 나노 디바이스의 소프트웨어 버그, 그리고 기타 다른 안전성 문제 등을 다룬다. 기구, 도구, 진단 시스템을 포함한 메디컬 나노 시스템의 여러 종류에 대해서도 다룬다. 특정 메디컬 나노봇의 디바이스, 염색체와 단백질의 마이크로분자에 대한 급속 기계적 판독 및 편집, 그리고 발전된 세포병리학과 세포 수선, 조직과 기관의 제조, 그리고 개인적인 방어 시스템을 가능하게 만드는 여러 가지 복합 나노로봇 시스템에 대해서도 연구가 이루어지고 있다. 응용 분야는 나노의학에 광범위하게 이용할 수 있다. 나노의학 시대의 미래 전망은 인체 내부에서의 분자 나노 기술을 이용하는 나노 메디컬을 이용하게 될 것이다. 전체 나노 디바이스에 대한 검정된 개념설계, 인공 나노기관, 그리고 나노 메디컬 치료는 신속한 심장혈관 수술을 포함한다. 역학적 고려와 함께 발병성의 질병과 암에 대한 치료 등에도 적용할 수 있다.

4. 결론

가까운 장래에 나노/마이크로 조작 기술과 분자 제조기술, 생체공학 기술의 발전과 더불어 나노 단위 입자, 분자를 자유자재로 핸들링을 할 수 있게 될 것이다. 또한 나노디바이스, 분자 기어 및 모터, 나노 센서 그리고 나노 논리칩 등이 출현할 것이며, 이것들은 나노봇의 주요 구성요소로 사용될 것

이다. 여기에 지속적으로 새로운 기능과 성능을 추가하거나 발전시킴으로서 가까운 장래에 나노봇의 현실화를 시킬 수 있을 것이다.

우리는 몸속에서 외부로부터 아무런 조치 없이 손상된 세포조직을 스스로 치료하고 바이러스를 죽이면서 우리 몸 속에 영구히 존재하는 수백만의 나노봇과 함께 살아가는 것을 상상할 수 있다.

참고문헌

1. K. Eric Drexler, Nanosystem, John Wiley & Sons, Inc, 1992.
2. K. Eric Drexler, Nanomedicine, 1994.
3. By L. Levy, "The Coming Era of Nanorobots," Online Nanotechnologies Journal, Vol I, Issue 1, October 2000.
4. M. Sitti, "Teleoperated 2-D Micro/Nano Manipulation Using Atomic Force Microscope," Ph.D. Thesis, Dept. of Electrical Engineering, University of Tokyo, Tokyo, Sep. 1999.
5. Al Globus, John Lawton, Todd Wipke, "Automatic Molecular Design Using Evolutionary Techniques," NAS Technical Report NAS-99-005, Feb. 12, 1999.
6. M. C. Roco, "Partnership in Nanotechnology," NSF Grantees Conference, Jan. 29, 2001.
7. H. J. Guntherodt, "Nanotechnologies in Switzerland," TOP NANO 21.
8. Al Globus, "Molecular Nanotechnology in Aerospace: 1999," NAS-00-001, January 2000.
9. Shoushan Fan, "Self-Oriented Regular Array of Carbon Nanotubes and Their Field Emission Properties," Science, Vol 283, Jan 1999.
10. Jing Kong, "Synthesis of Individual Single Walled Carbon Nanotubes on Patterned Silicon Wafers," Nature, Vol. 395, Oct. 1998.
11. Austin N. Kirschner, "A Biosensor for Fullerenes and Carbon Nanotubes," Foresight, www.foresight.org/Conferences.
12. Leslie Rubinstein, "A Practical NanoRobot for Treatment of Various Medical Problems," Foresight, www.foresight.org/Conferences.
13. K. Eric Drexler, "A Debate About Assemblers," www.imm.org/SciAmDebate2.
14. Ph. Avouris, "AFM-tip-induced and current-induced local oxidation of silicon and metals," Appl. Phys. A 66, S659-S667, 1998.
15. Nanotube manipulation, Molecular mechanics, Nanotube ring, AFM Oxidation, www.research.ibm.com/nanoscience.
16. A Fine-Motion Controller for Molecular Assembly, www.imm.org/Parts.
17. Andrew Carl Miner, "Integrated Scanning Probe Microscopy for Study of Thermal, Electrical, and Thermoelectric Properties," Ph.D Thesis, UC Berkeley, 2002.
18. Li Shi, "Mesoscopic Thermophysical Measurements of Microstructures and Carbon Nanotubes," Ph.D Thesis, UC Berkeley, 2001.
19. Boggild, P., "Fabrication and Actuation of Customized Nanotweezers with a 25 nm Gap," Nanotechnology 12, pp. 331-335, 2001.
20. Edwin W. H. Jager, "Microrobots for Micrometer-Sizer Objects in Aqueous Media: Potential Tools for Single-Cell Manipulation," Science, Vol. 288, June 2000.
21. Philip Kim, "Nanotube Nanotweezers," Science, Vol. 286, December 1999.
22. Ricky K. Soong, "Powering an Inorganic Nanodevice with a Biomolecular Motor," Science, Vol. 290, November 2000.
23. Ray H. Baughman, "Carbon Nanotube Actuators," Science, Vol. 284, May 1999.
24. Satoshi Horiguchi, "Virtual Reality User Interface for Teleoperated Nanometer Scale Object Manipulation,"
25. Metin Sitti, "Survey of Nanomanipulation Systems," sitti@robotics.eecs.berkeley.edu.
26. Metin Sitti, "Macro to Nano Tele-Manipulation Through Nanoelectro-mechanical Systems," 0-7803-4503-7/98, IEEE, 1998.
27. Metin Sitti, "Teleoperated Nano Scale Object Manipulation," Recent Advances on Mechatronics, Springer Verlag Pub., May 1999.
28. Metin Sitti, "2-D Micro Particle Assembly Using Atomic Force Microscope," International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998.