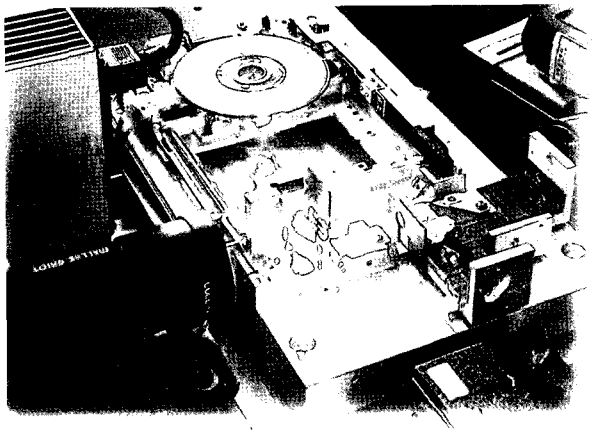
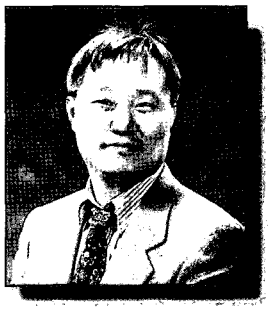


나노영역의 기술중에 가장 많이 응용되고 있고 실용화를 눈앞에 둔 대표적인 분야로는 반도산업이다. 초직접회로의 기술진보와 더불어 메모리소자의 직접도는 기하급수적으로 증가되고 이에따라 직접회로 패턴의 미세화가 진행되어 앞으로는 나미터영역의 선폭가공이 요구되고 있다.

나노기술의 현황과 미래



설 용 건 교수
연세대 화학공학과

30여년전 노벨물리학상을 수상한 Richard P.Feynma 교수가 물질의 크기를 극도로 작게 조절하고 배열할 수 있다면 물질에 잠재된 엄청난 특성을 과학과 기술에 사용할 수 있을 것으로 예측하였다. 이러한 가능성이 최근 몇 년동안 나노구조와 나노입자에 관한 집종적인 기초 연구결과로 실현가능한 가설이었음으로 입증되었으며 이에따른 여러분야로의 응용이 주목을 받고 있다. 현재 미국에는 대학이나 Sandia, Oak Ridge 등의 국립연구소 뿐 아니라 Nanodyne, Nanophase technology 등의 기업에서 나노물질의 대량 생산 공정과 물질 특성에 관한 연구를 집중적으로 수행하고 있고 일본에서도 히타지, 소니, 국립공업기술원에서 나노입자의 특성, 생산 및 응용에 관한 연구를 국가에서 중점 지원하는 21세기 미래 연구과제로써 수행중에 있다. 본고에서는 공학적 측면에서의 나노기술을 살피고 여러가지 가능성을 제시 하고자 한다.

우리가 생활하는 대부분의 기술은 눈으로 그 차이가 구분되고 설명되는 거시세계의 기술이다. 따라서 다루는 기술의 대상물질의 크기는 미터에서 수미리까지의 눈으로 보이는 영역의 것이 대부분이다. 1나노미터는 10^{-9}미터에 해당되므로 나노영역의 기술은 사람눈으로 식별가능한 가시광선영역 (0.4-0.7 마이크로미터)을 초월한, 즉 고도화된 현미경을 통해서만 가시화되는 초미세영역의 기술이다. 이들 초미세

영역을 물질들은 나조구조화된 물질, 나노입자, 나노결정, 양자점등으로 불리운다. 이러한 물질들을 공학적으로 이용하기 위해서는 기존의 거시기술과는 다른 기술영역이 필요하게 된다. 이에 대표적인 영역이 나노표면의 분석기술, 나노물질의 화학, 나노물질의 물리, 나노물질의 합성공학, 나노가공공학, 나노시스템 설계공학 및 나노응용공학 바로 그것이다.(그림1)

나노영역의 기술중에 가장 많이 응용되고 있고 실용화를 눈앞에 둔 대표적인 분야로는 반도체산업이다. 초직접회로의 기술진보와 더불어 메모리소자의 직접도는 기하급수적으로 증가되고 이에따라 직접회로 패턴의 미세화가 진행되어 앞으로는 나미터영역의 선폭가공이 요구되고 있다(그림2). 이 분야의 기술은 최첨단기술로 선진국의 순위결정에 결정적 역할을 하고있을만큼 중요시되고 있다. 특히 기억용량을 테라(10^{12})비트 수준으로 증가시키기 위한 연구는 국내에서도 활발하게 진행되고 있다. 그러면 무엇이 기존의 마이크로기술과 다른지를 살펴보기로 하자.

나노구조를 형성함으로 해서 디바이스화를 하는 경우의 나노구조 다차원화 기술이 있다. 예로 양자점이나 양자선은 1차원구조의 소자이며 이들의 집적화는 2차원화, 더 나아가 3차원화가 추진된다. 나노입자의 표면농도, 전하, 입자크기 및 입자간의 거리를 2차원적으로 조절하여 원하는 특성을 가진 나노구조를 제조하는 다양한 방법이 이용되고 있다. 또한 이러한 단분자막 구조로 형성된 나노입자를 반복적으로 고체표면에 전이하여 다층막을 형성하여 나노입자의 특성을 가진 3차원적 구조물을 제조하기도 한다

그림 1. 나노공학의 영역

그리고 미세가공의 광원이 바꾸어져야한다. 현재 사용하고있는 자외선 노광장치는 고압수은등 g선(436 나노미터)또는 단파장의 수은 i 등(365나노미터)을 사용하고 있다. 여기서 더욱 고집적 소자를 가공하기 위해서는 소프트 X선을 이용하는 시스템이 필요하다.(그림 3, 4)

이러한 이유로 선진국에서는 방사광을 이용한 미세가공기술과 이로부터 얻어진 기초기술을 범용화 하는 연구개발이 추진되고 있다. 앞으로 소규모의 X선 광원에서

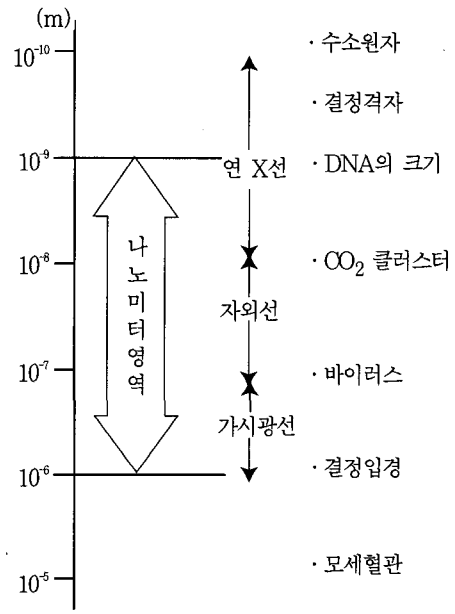


그림 3 나노미터의 범위.

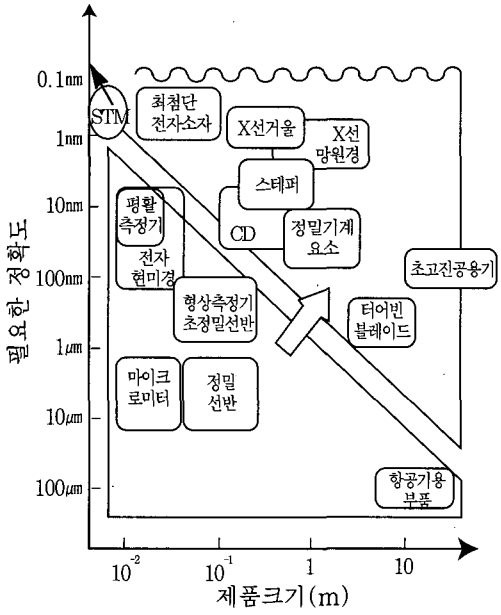
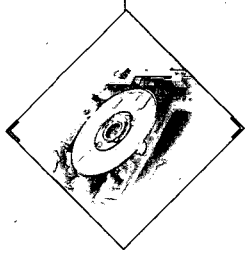


그림 4 제품정확도의 분포

선진국에서는 방사광을 이용한 미세가공기술과 이로부터 얻어진 기초기술을 범용화 하는 연구개발이 추진되고 있다. 앞으로 소규모의 X선 광원에서 고질의 단색광이 어진다면 이의 상용화가 촉진될 것으로 예측된다.



고질의 단색광이 어진다면 이의 상용화가 촉진될 것으로 예측된다. 광의 질적인 평가는 단색광의 편차를 줄여 가공의 정확도를 높이는 것이 중요한데 이를 위해 지금은 진공중에 레이저를 발생시키고 있다. 진공중에 레이저의 파장은 10-10 정도로 정확한 단색광이 얻어지고 있다. 파장은 적색(633나노미터)과 녹색 (524나노미터)이 대표적으로 사용된다. 가공의 대상이 되는 실리콘웨이퍼 단결정에서 실리콘원자의 원자격자간 거리(격자정수)가 0.543 나노미터이므로 나노가공은 궁극적으로는 원자의 조작과 가공을 수반해야 만 한다. 이러한 관점에서 사용되는 기술이 Atom Manupulation기술이다. 이 기술은 최근에 급격히 발전하는 원자 이미지화 기구인 STM(Scanning Tunneling Microscopy), AFM(Atomic Force Microscopy) 등을 단순한 나노이미지 관찰에서 그치지 않고 이들을 이용하여 특정원자를 관찰하고 나노구조상에서 조작하여 디바이스화를 이룩하려는 기술로 이들을 이용한 대량생산이 21

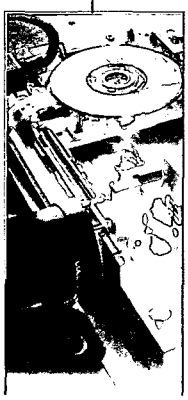


표 1. 나노구조물질의 특이물성

	특성
크기	원자영역으로의 접근
광학	광 투과성
상 안정성	높은 외부표면적 높은 표면에너지 Gibbs-Thomson 효과
화학적 반응성	짧은 확산거리 높은 확산속도 증가된 촉매활성
양자	blue shift
기계적 특성	높은 기계적 인장강도

세기 초첨단기술로 자리잡을 것이다. 이 기술에서의 특징은 기존의 마이크로 기술에서는 다소의 결함과 가공오류를 포함하고도 제품기능의 발현이 가능하였으나 나노디바이스는 이러한 적당주의가 허용되지 않고 엄밀한 무결함 가공이 필요하고 이를 확인하기 위한 원자수준의 품질관리가 필요하게될 것이다.

나노입자구조의 특징은 크기에만 있지않고 물리 화학적 특성도 거대분자물성과 매우 상이한 것이 알려져 있다(표1)

물질의 크기와 모양이 물질의 특성에 미치는 영향, 입자 형성과정의 열역학적, 반응속도론적 조절, 최적 제조 조건, 형성된 입자들의 안정화 과정에 관한 연구가 아직은 시작 단계이므로 화학분야에서의 기여가 이 분야의 발전에 필수적이다. 표 2에서는 표면적과 표면 에너지가 입자크기에 따라서 극단적으로 변화함을 알 수 있다.

이러한 결과는 나노입자의 용융점과 표면반응성에 영향을 미치는데 일예로 수 나노크기의 금입자의 경우 일반적인 마이크로 크기의 입자들에 비하여 용융점이 1000K이상 차이가 나게 된다.

나노물질의 고유한 특성은 구조를 형성하는 물질간 또는 물질의 접촉 계면에서의 복잡한 상호작용에도 기인하는 것으로 알려져 있다. 즉, 나노입자는 집합체를 형성시 입자의 크기가 자외선이나 가시광의 파장에 비해 훨씬 작고, 입자의 질량에 비해 상대적으로 커다란 계면경계를 형성하고 bulk 물질에 비해 많은 수의 원자나 분자가 계면에 위치하게 되므로 micro/nano hybrid 구조를 형성하게된다. 입자의 크기와 형태(morphology)에 따라 물리, 화학적, 광학적 특성이 매우 민감하게 변화되므로 나노구조를 통한 새로운 물리화학적 신물성의 발현도 기대되고 있다. 나노 입자로 이루어진 산화물 소결체는 입자간의 기공이나 계면이 가시광선 영역보다 훨씬 작기 때문에 빛을 산란하지 않고 투명한 광투과특성을 나타내기도 한다. 이러한 기술은 특정구조의 산화물구조체가 극한조건에서 센서나 광응용공정 재료로 사용될 수 있는 기회를 제공하고 있다. 이러한 측면에서 국방관계로의 응용도 기대가 모아지고 있다. 기포나 콜로이드 입자를 유리와 같은 고체 표면에 접속인자(coupling agent)를 매체로 하여 자기집합법(self-assembled process)으로 제조

표 2. 입자의 크기에 따른 표면적과 표면에너지의 변화

입자크기 [nm]	외부비표면적 [m^2/g]	표면에너지 [J/mol]	표면에너지 전체에너지
1	6.6×102	5.86×10^4	0.17
10	66	5.86×10^3	0.017
100	6.6	5.86×10^2	0.0017
1000	0.66	5.86×10	0.00017

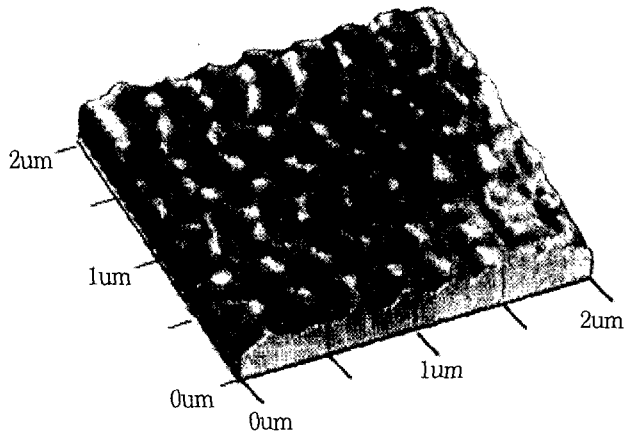
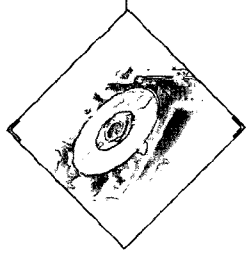


그림 5 자기집합법을 이용하여 합성한 제올라이트필름의 AFM 사진

된 금속박막은 재현성과 안정성이 우수하며 입자의 크기와 입자간의 간격에 따라 surface plasmon과의 공명상태를 조절할 수 있으므로 bulk 금속에 비해 훨씬 우수한 표면강화 라만산란 및 형광분광분석을 위한 기질로 사용될 수 있다. 이 자기집합법은 현재 습식법으로 나노구조의 형성이 가능케한 공정으로 건식법에 비해 대형화와 대량생산이 비교적 용이한 특성을 가지고 있다. 그림 5에서는 본 연구진이 자기집합법을 이용하여 제올라이트를 기판위에 array 시킨 AFM 사진이다.이러한 특징들이 공학적 기술로서 자리잡기 위해서는 재현성 있고 경제적인 대량생산기술의 확보가 필요하다. 이러한 측면에서 나노기술의 공학적 발전에는 화학, 물리, 생물 등의 기초학문과의 공학적 연계가 필수적인 요건이라 할 수 있다.



나노물질의 응용측면에서 촉매, 광전자, 전자재료, 신소재, 비선형 광학, 의학을 포함한 생명공학 등의 광범위한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다(표 3).

일반적으로 나노상 입자 또는 나노물질

표 3. 나노물질의 특성 및 응용 기능분야

특 성	응용 가능 분야
양자효과	반도체 재료 (전자광학, 메모리, 나노소자, 양자선)
쇄상초미립자	자기기록매체, 분자필터, 전자파흡수체
입경이 고체내 전자의 평균자유행로 수준	광전변화, 특수전도재료
특이한 표면반응성	촉매 및 반응물질
단위질량당 넓은 표면적(〉 수십 m^2/g)	열 및 물질의 교환막
원자 준위에서의 단계상 표면	정밀 · 고속 반응촉매
높은 강도와 인장력	고기능성 세라믹 및 금속
막이 균일한 계면층 형성	로케트의 연소 보조제
기체, 액체 및 고체의 균일한 분산혼합물	분산강화제, 균일화제, 에어로졸
입자내의 전자 에너지준위가 이산성	극저온 · 원적외선 재료

은 같은 화학적 조성을 가진 bulk 물질에 비해 우수한 기계적 강도와 화학적 안정성이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성을 이용하여 초강력, 초내마모성 절삭재료를 생산하거나 터빈엔진 내부의 코팅 등의 내마모 보호막 제조에 응용된 연구 결과가 최근에 발표되었다. 또한 나노상 입자로 이루어진 세라믹은 실온에서는 종래의 세라믹에 비해 높은 강도와 인장력을 가졌을 뿐 아니라 비교적 낮은 온도인 1873K 부근에서 높은 점도를 가진 유동성 물질로 전이되어 원하는 형태와 크기로 가공이 용이한 특성이 있는 것으로 보고되기도 하였다. 나노구조의 티타니아(TiO2)촉매는 현재 일반적으로 사용되는 크기로 제조된 것에 비해 탈황 성능이 훨씬 우수한 것으로 평가되었다. 실리콘 matrix에 나노미터 입자 산화철의 함량과 입자크기를 조절하여 전도도와 상자기성을 용도에 적합한 상태로 조정하여 자기장내에서의 약전달, 세포 제거 등의 진단 및 치료법에 적용하거나 물질재생, 마그네틱 잉크 및 마그네틱 기억소자

물질의 크기와 모양이 물질의 특성에 미치는 영향, 입자 형성과정의 열역학적, 반응속도론적 조절, 최적 제조 조건, 형성된 입자들의 안정화 과정에 관한 연구가 아직은 시작 단계이므로 화학분야에서의 기여가 이 분야의 발전에 필수적이다.

물질 제조분야에 응용도 발표되고 있다. 특히 Murrel 등은 매우작은 반도체 입자로 매우 균일한 크기의 II-VI 결정 (CdS, CdSe)들을 성장과정조절을 통해 제조하였다. 이는 나노입자의 밴드갭, flatband 전위, 전자-구멍 쌍의 포착속도, 상전이 압력 등의 물리적 특성을 입자의 크기를 조절하여 특정 응용에 최적화된 반도체 물질의 제조가 가능함을 입증하는 것이다.

나노입자는 콜로이드합성법, 진공증착법, 분자선증착 등을 이용하여 제조하거나 LB또는 자기집합 분자막을 이용한 나노구조를 형성하기도 한다. 이중 금속이나 일부 무기재료는 시간당 수 키로그램을 제조하는 공정이 개발되었다(표 4). 또 최근에 개발된 나노카본튜브(그림 6)는 이제까지 마이크로 영역에서 얻지 못했던 전기·자

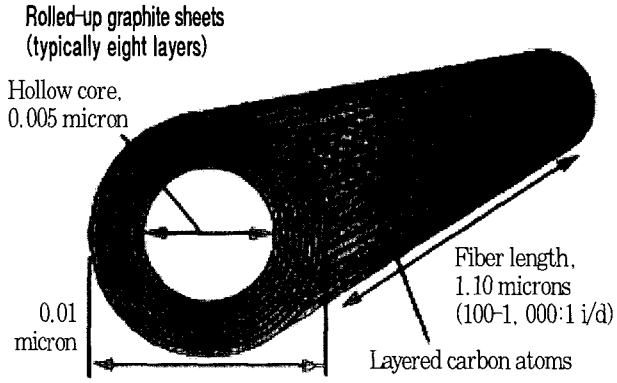
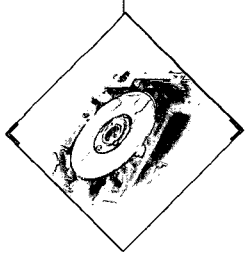


그림 6 나노카본 튜브

기적 특성으로 신기능 소자로서의 가능성을 풍부히 가진 21세기 재료로 각광을 받고 조만간 기초영역의 연구에서 산업응용으로의 전개가 기대되고 있다.

앞으로 이 분야가 공학의 새로운 영역으로 자리잡을 것으로 믿으며 많은 신산업 기술이 한국에서 태어나길 기원한다.

표 4. 나노입자의 제조방법

	분류	방 법	제조방법	생성 나노입자
기상법	금속	증발법	저압에서 불활성기체 중에서 금속을 증발	금속 및 금속의합금
		활성수소, 융용금속 반응법	수소기체 혼합 분위기에서 아크 가열 용탕면에서 금속 초미분을 방출	
		염화물 반응법	염화니켈 증기를 Ar 가스와 흐르게 하여 H_2 가스와 반응	
	화합물	통전 가열 증발법	탄소봉 전극을 금속과 반응하고 통전 가열법에 의하여 금속을 용해한후 고온의 탄소와 반응	SiC, TiC, VC, ZrC
		하이브리드 플라즈마 증발법	아크 플라즈마 제트로 발생시킨 제트 속에 캐리어 가스를 송입하고 미염부에 반응가스를 분출	Si_3N_4
		휘발성 금속 화학물의 가수분해법	금속 화합물을 화염중에 공급	
		고융점 화학물반응법	공융점 금속 염화물과 암모니아 가스의 고온 반응으로 초미분체 합성	WC, Mo_3C, NbC
액상법	침전법	공침법	금속염 용액에 침전제를 첨가한후 침전시킨 후에 열분해	금속 원소를 2종이상 포함한 화합물
		가수분해법	금속염 용액에서 가수분해에 의해 수산화물을 침전시키고 그후 열분해	고순도의 $BaTiO_3$
		환원법	금속염 용액에서 환원 반응	지름 1㎛이하의 금속
	분무법	분무 열분해법	금속염 수용액을 고온 분위기에서 분무하고 용액의 증발과 동시에 열분해로 산화물생성	spherical한 다공성 분체
		동결건조법	금속염 수용액을 분무시켜 액을 동결하고 저온 감압의 분위기에서 탈수하고 열분해	조성 균일성 양호, 다공성
		분무 건조법	금속염 수용액을 열풍안에 분무하여 건조	입자내의 균일 조성