

나노소자 기술의 전망

이 조 원

태라급 나노소자 개발사업단

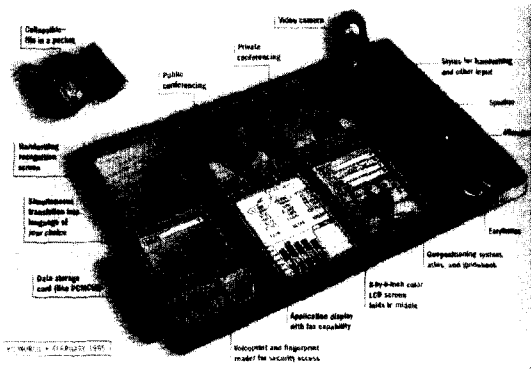
I. 21세기에도 과학·기술발달은 계속된다!

20세기에는 '시간과 공간이 상대적이라는 아인슈타인의 상대성 원리'와 '19세기까지 이루어진 과학의 난제를 해결한 양자역학' 등의 위대한 이론들이 등장했다. 또한 유럽에서 만들어진 '물리, 화학, 양자역학'은 20세기 초반에 미국으로 건너가 「텔레비전, 라디오, 전화, 컴퓨터」 등의 정보통신기구와 「자동차, 비행기, 고속선」 등과 같은 다양한 실용화물을 탄생시켰다. 산업의 변천사를 살펴보면, 20세기 초반에는 제련/제철 기술을 기반으로 철강산업이, 20세기 중반 이후에는 트랜지스터의 개발로 실리콘 기술이 산업을 선도했다. 이렇듯 50년을 주기로 산업의 핵이 되는 하나의 기술이 개발되고, 산업을 주도해 왔음을 알 수 있다.

그렇다면 21세기에는 어떤 과학·기술이 발전

되어 전체 산업을 이끌어 나갈 것인가?

21세기 산업변화의 핵심기술은 Biotechnology, 정보통신기술, 그리고 Nanotechnology(이하 Nanotech.)의 세 가지가 될 것이다. 이들 세 가지 기술이 동시에 등장함은 다른 세기와는 전혀 다르다. 특히 지금까지 우리 부모 및 조부모 세대에 영향을 미쳤던 기술들과는 달리 파도와 같이 밀려오고 있으며 앞으로 20년 이내에 사회/문화적으로 막대한 파급 효과를 불러일으킬 것이다. 명령만을 수행하는 기존의 Computing System과는 다른 「인공지능 로봇」이 등장하고, 외국어 자동동시통역, 실시간 Video phone/Video 회의 가능한 「포켓용 초미니 슈퍼컴퓨터(〈그림 1〉)», 「인간의 오감을 자연 인터페이스화한 3-D 가상실현」이 등장할 것으로 예상된다. 이들 Computing System은 초고속 통신망과 결합되어 지구촌을 하나의 전자촌으로 통합시키고, 가전제품, 정보입출력 System, 통신 System, 사회기반 시설, 자동차, 우주산업, 군사, 농업, 의학 등과 결합하여 사회 전반에 걸쳐 엄청난 변화를 초래할 것이다. 특히 문자, 음성, 영상 등을 일체적으로 이용하고 키보드 없이 인식하고 추론할 수 있는 「Ubiquitous 컴퓨터」라고 통칭되는 초소형 휴먼 컴퓨터들이 손목시계, 허리띠, 모자, 안경 심지어 옷과 구두속으로 옮겨가면서 우리가 상상할 수 없는 세계가 열릴 것이다.



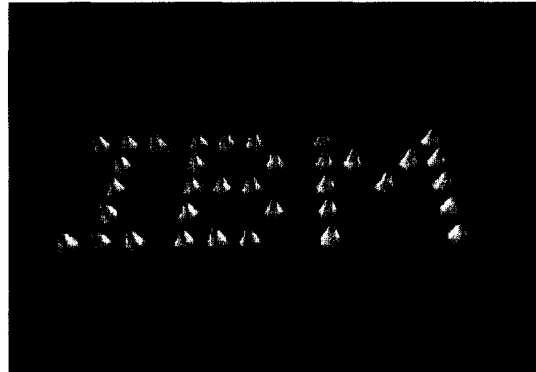
〈그림 1〉 포켓용 Communicator

II. 우리는 이미 Nanotech. 시대에 진입했다!

1946년 인류문명의 대 전환을 예고하는 최초의 Computer인 에니악이 펜실베니아 대학의 한 연구실에서 만들어졌다. 에니악은 면적 130m², 무게 30t, 진공관 1만 8천개로 구성된 거대한 구조물로 한번 가동되면 필라델피아시의 전력공급 부족현상마저 일으킬 정도였다. 1947년 12월 벨 연구소의 Shockly, Bardeen, Brattain등이 진공관의 크기를 220분의 1로 줄인 트랜지스터를 개발하였고, 58년에 진공관 대신에 트랜지스터로 제작된 최초의 Computer인 유니백Ⅱ가 등장하게 되면서 크기 및 무게가 에니악의 $\frac{1}{100}$ 정도로 줄어들었으며 동년 T.I.의 Kilby에 의한 트랜지스터의 집적화 기술개발과 69년 인텔의 CPU개발로 교실 만하던 크기의 컴퓨터가 드디어 책상 위에 올라가게 되었다. 이후 초고집적 트랜지스터 등이 나오면서 노트북, 랩톱, 팜톱 등에 이르기까지 소형화, 고성능화 바람을 타고 있는데 이는 Nano World로의 진입을 알리는 것이다.

III. Nanotech.이란 무엇인가?

Nanotech.이란 Nanometer (nm) 범위(10^{-9} - 10^{-7} m)에서 재료, 소자, System을 창조하는 기술이라 정의하며 기존의 이론(고전역학)이 아닌 새로운 이론(양자역학)이 적용된다. 1nm는 머리카락 굵기의 10만 분의 1에 해당하며, 원자 3-4개가 모인 정도이다. Nanotech.은 1959년 노벨상 수상자인 Feynman이 “원자/분자 레벨로 제어하여 부품을 만드는 데 제한이 없다”라고 역사적인 예언이 효시가 되었다. 그는 전 세계의 모든 정보가 2백 분의 1인치 크기의 정육면체에 기록할 수 있는 날이 올 것이라고 예언하였다. 1981년 IBM의 Binnig와 Rohler에 의한 전자 주사현미경(Scanning Tunneling Microscopy: STM)의 발명에 따른 원자 및 분자 조



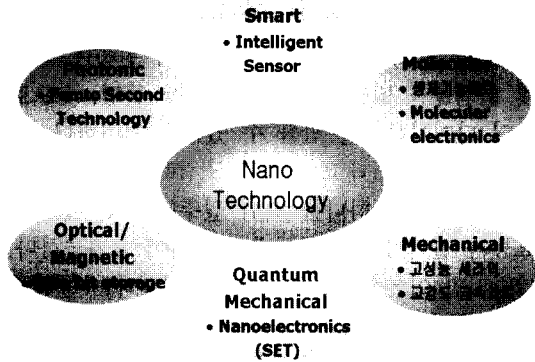
〈그림 2〉 SPM 조작에 의해 배열된 원자들의 모형

작 가능성 제시는 나노기술 연구에 기폭제가 되었으며 그 이후 1985 전자 하나하나를 제어할 수 있는 Single Electron Transistor(이하 SET: 모스크바대 Likharev)가 개념화되었다. 90년에는 IBM 연구소의 Eigler 박사가 나노구조를 제어하고 측정하는 눈(eyes)과 손(fingers)이라 할 수 있는 매우 정교한 금속탐침으로 극저온에서 원자 하나하나를 움직여 원하는 위치에 배열하는데 성공하였다(〈그림 2〉). 따라서 언젠가는 상온에서도 원자 및 분자를 마음대로 떼었다 부쳤다 할 수 있고, 어느 물질이든지 원하는 구조 및 화합물을 만들 수도 있다. 예를 들면, 솟으로부터 다이아몬드를 만들 수 있음을 의미한다. 그러나 상온에서 레고 블록을 조립하는 것처럼 원자 하나, 분자 하나를 끼워 맞추는 것은 원자의 요동과 열역학 제 2법칙에 위배되어 불가능하다. 그렇지만 이론적인 가설은 흔히 실제와는 동떨어진 경우가 종종 있어, Nanotech.에 의해 전혀 생각지도 못했던 과학기술이 등장할 수도 있는 것이다.

기존 물질의 화학성분을 변화시키지 않고 눈에 보이지 않는 나노수준에서 조작하면 기존의 눈에 보이는 μm Scale에서 나타나지 않는 전혀 새로운 특성들의 구현이 가능하고, 이를 통해 물리적/화학적/전기적/기계적 특성 향상이 이루어지고 있다(〈표 1〉). Nanotech.은 산업 전반에 걸쳐 응용될 것으로 예측되나(〈그림 3〉) 그 중에서도 Electronics 분야에서 제일 먼저 실용화가

〈표 1〉 마이크로구조와 나노 구조의 특성차이

Mechanical Property		
	Macro/Micro	Nano
Force	10^8-10^6N	$10^{-7}-10^{-14}\text{N}$
Pressure	$0-10^{-2}\text{GPa}$	$10^{-5}-10^3\text{GPa}$
Hardnes for Cu	0.5GPa	2.5GPa (6nm)
Strain rate Sensitivity	0.015	0.035
Eigen Frequency	Hz-MHz	MHz-THz
Electrical Property		
	Macro/Micro	Nano
Breakdown Strength	$<10^5\text{V/cm}$	$<10^8\text{V/cm (DC)}$ $<10^7\text{V/cm (DC)}$
Current Density	10^6A/cm^2	10^8A/cm^2
Transport	Diffusion	Ballistic Tunneling
Numbers	Mega/Giga	Tera/Pata



〈그림 3〉 나노 응용분야

이루어질 것으로 보인다. 특히 Nanotech. 이 오늘날 단순한 공상에서 현실로 변해가고 있는 배경에는 반도체 미세 가공 기술의 비약적 진보가 있었기 때문이다.

IV. 21세기 나노소자 개발은 필수 불가결하다!

우리가 예측하는 인공 지능형 정보/통신 System을 구현하기 위해서는 현재 수백 MIPS 수준인 CPU의 성능이 천 배 이상인 수백 GIPS가 되어야 하고, 이들 데이터를 Processing하기 위해서는 1Tb급 이상의 반도체 메모리가 필요하다. 또한 초절전형의 전자소자를 개발하지 않고서는 미래의 에너지 소비 문제를 해결할 방법이 없다. PC에 소요되는 에너지는 매년 100%씩 증가한다. 이러한 추세가 계속되면 2010년경에는 현재 미국의 총 발전량(3조 6250억 KWh)과 맞먹는 PC전력 소요가 예상되어 초절전 전자 소자 구현을 위한 특단의 해결책이 필요하다(Forbes, 99/5/31).

현재 반도체소자의 주류를 이루고 있는 Si MOSFET은 1958년 노벨상 수상자인 Kilby에 의해 집적기술이 적용되면서 매 12~18개월마다 Moore 법칙에 따라 2배씩 트랜지스터 집적도가 증가되어 왔으며 십 년마다 1000배씩 성능향상을 이루었다. 이러한 추세가 계속된다면 2008년에 70nm급의 64G DRAM, 2014년에는 게이트 길이 35nm의 1Tera의 DRAM이 개발될 것으로 전망된다. 트랜지스터의 게이트 길이가 70nm 이하로 줄어들면 전자숫자의 불균일에 따른 오작동, 배선 길이가 길어지고 선폭이 좁아짐에 따른 RC 지연, 게이트 절연막 터널링에 의한 허용치 이상의 누설전류 등과 같은 기술적 한계와, 10nm에 이르면 열적진동 및 양자역학적 진동에 의한 오작동 등과 같은 현재의 기술로는 극복할 수 없는 물리적 한계를 맞게 된다.

따라서 기존의 기술을 연장선상에서 순차적으로 개선해서는, 21세기 정보/통신화에 부응하는 초고집적, 초저소비전력, 초고속의 인식 및 추론 기능 트랜지스터 개발이 불가능한 것은 자명하다. 이를 극복하기 위해서는 현존하는 기술과는 전혀 다른 현상 및 원리에 기초한, 새로운 공정에 의한 트랜지스터를 개발할 수 밖에 없다. 바로 그것이 Nanotech.에 근간한 나노소자이다.

V. 신개념 나노소자

Nanotech.에 기반 한 신개념 소자는 크게 양자 광소자와 양자소자로 나뉜다. 양자 광소자로는 파장을 조율할 수 있는 반도체 레이저, 광 검출기, 광 배선 등이 연구되어 왔으며, 양자소자의 경우 양자우물에서 전자관통, 저차원에서 구속되는 전자의 특성, 전자의 파동성 등을 응용한 소자 연구가 활발히 진행되어왔다. 그 결과 개념 및 한계극복 단계를 지나 실용화가 가능한 수준의 결과들이 최근 10여년 사이에 보고되어왔다. 이들 소자로서는 전자 하나하나 제어가 가능한 SET, 공명 전자 관통을 응용한 Tera Hertz급의 화합물반도체소자, 전자의 스핀분극 현상을 응용한

스핀소자, 유기물을 디자인하고 합성하여 전류 제어가 가능한 분자 소자 등이다(〈그림 4〉). 이러한 소자들을 기반으로 하나의 Chip에 여러 개의 소자들을(MPU, Memory, Cache, Flash) 복합화 한 System on a chip이 등장할 것으로 예상된다(〈그림 5〉). 이러한 System on a chip이 개발되어야 비로소 200평 크기의 슈퍼컴퓨터가 손바닥만하게 작아질 수 있다.

VI. 국내의 개발 동향

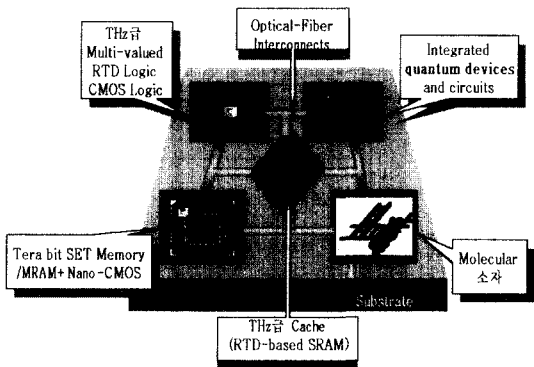
21세기 삶의 지도를 바꿀 수 있는 산업이 나노 기술에서 출발할 수 있다는 가능성을 인식하고 세계각국은 Nanotech.에 막대한 연구비를 국가 차원에서 매년 확대하고 있다.

1. 미국의 동향

미국의 클린턴 대통령은 2000년 1월 Nanotech.이 미래 국가경쟁력의 핵심이라는 인식하에 21세기 3대 중점연구과제(정보통신기술, Biotechnology, Nanotech.)중의 하나로 선정하였으며 이에 따라 National Nanotechnology Initiative(NNI)를 선언하였다. 이 선언에 의하면 미국 국회도서관의 모든 장서들을 각설탕 크기의 메모리에 저장할 수 있는 초고밀도 메모리, 재료를 생물체의 생성과 같이 원자·분자에서 단위에서 출발하여 조립하는 기술, 몇 개의 암세포까지도 검출해낼 수 있는 초고감도 생체센서, 철강보다 훨씬 가볍고 10배의 강도를 가진 재료, 펜티엄Ⅲ 컴퓨터보다 성능을 100만 배 이상 향상시키는 소자, 미량의 환경오염물질까지도 제거하는 기술, 현재보다 2배의 태양에너지 변환효율을 가진 태양전지 등 생활과 산업에 막대한 파급효과를 가져오는 기술적 발전을 Nanotech.의 대과제로 내세워 20년 후의 실현을 목표로 하고있다. 이러한 목표를 위해 NNI는 ①범부처적인 역량의 집중 ②나노단위의 합성과 기술 이해 ③산학연 공동연구 체제 구축 ④나노연구

신개념 소자	개념	특징
Single Electron Transistor		<ul style="list-style-type: none"> ■ 불 휘발성 ■ 초고집적(Terabit) ■ 초고속(nsec)
Spintronics (MRAM)		<ul style="list-style-type: none"> ■ 불 휘발성 ■ 초고집적(Terabit) ■ 초고속(nsec)
화합물 반도체 소자		<ul style="list-style-type: none"> ■ 초고속(psec) ■ 초저 소비전력 ■ NO RC Delay
Molecular 소자		<ul style="list-style-type: none"> ■ Organic/Bio Nano-Tube ■ 초고집적(Terabit)

〈그림 4〉 신개념 소자 개요



〈그림 5〉 System on a chip

센터 설립 및 네트워크 구축 ⑤나노연구기반 구축 ⑥나노 산업인력 육성 등을 전략적으로 추진할 예정이다. 이를 위해 2001년 예산(495백만 불)을 2000년 예산(270백만 불)보다 84% 정도 증액하였고, 행정부에 『나노기술발전위원회』(NSF, 국방성, 에너지성, NIH, NIST, NASA 등)를 구성하였으며, 기초연구와 응용연구 및 연구기반구축을 도모하고 있다.

2. 일본의 동향

일본은 80년대 초부터 Nanotech.에 대응하기 시작하여 나노소자를 비롯한 일부분에서는 미국보다 앞서 있다. 통산성/문부성/과기청에서는 97년도 한해만 이미 120백만 불의 예산을 Nanotech. 분야에 책정하였으나, 일본 반도체업체들의 나노소자분야 투자액은 국가 예산을 수십배 상회하고 있다. 일례로 92년에 통산성 주도로 '아톰 테크놀로지 프로젝트'가 발족되어 원자/분자 수준에서 물질을 제어하는 연구가 총 220백만 불의 예산으로 10년 동안 진행되어 왔으며 2001년 과제 종료 후 2011년까지 동일 프로젝트가 진행될 예정이다. 그밖에 통산성에서 91년부터 2000년까지 64백만 불의 예산으로 진행했던 반도체업계 중심의 양자기능소자 프로젝트, 과학기술청내의 5개의 나노관련 연구조직, 문부성의 동경대학, 호카이도 대학등 우수 대학에 연간 25백만 불의 Nanotech. 투자 등 범부처 차원의 Nanotech. 육성이 이루어지고 있다. 한편 2000년 7월 경단련은 차세대 고성능 컴퓨터에 대응하기 위해 Nanotech.을 중점적으로 육성할 것을 일본정부에 강력하게 요청한 바 있다.

3. EU의 동향

EU의 경우 국가 프로그램, 유럽연합 네트워크, 대기업 연구소등이 연합하여 Nano-tech.을 지원하는 구조로서 투자의 효율과 시너지를 극대화하기 위해 각국이 참여하는 ESPRIT Charge 프로그램, Phantom 프로그램, 나노구조 연구센터 등 7개의 대형 프로그램이 있다. 1997년도 EU의 전체 Nanotech. 투자는 128백만 불에 이

르렀으며 그중에서 독일이 BMBF를 통해 가장 큰 액수인 연 50백만 불을 투자한 바 있다.

4. 치열해지는 미, 일, EU의 나노테크 패권쟁탈전 : 미국은 다면적 대응, 유럽은 재료와 바이오의 제후 도모, 일본은 나노소자

미국, 유럽 및 일본의 Nanotech.에 대한 상황을 비교분석 한 표가(〈표 2〉) 99년 9월에 발간된 『Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study』라는 제목의 보고서에 있다. 합성과 어셈블리(나노재료의 제조와 조립), 다공성재료, 분산체재료와 생명공학으로의 접근 등 기초연구 면에서는 미국과 유럽이 우위에 있고, 나노소자와 일반재료(나노복합재료) 같은 응용분야에서는 일본이 앞서 있다고 평가한다. 이러한 결과는 각국이 우위에 설 수 있는 분야를 전략적으로 선택과 집중을 기하고 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 미국은 21세기에도 Nanotech. 모든 분야에서 기술적 헤게모니를 장악하기 위해 NNI를 선언하게 되었다.

〈표 2〉 Technological Comparison Europe, Japan, U.S. Summary

Synthesis & Assembly	U.S.	Europe	Japan	
Biological Approaches & Applications	U.S./Eur	Japan		
Dispersions and Coatings	U.S./Eur	Japan		
High Surface Area Materials	U.S.	Europe	Japan	
Nanodevices		Japan	Europe	U.S.
Consolidated Materials		Japan	U.S./Eur	
	Level 1	2	3	4
	Highest			

WTEC Nanotechnology Workshop, 1998

5. 우리나라 현황

우리나라는 선진국에 비해 기술력과 인적자원이 부족한 것은 사실이나 아직은 Nanotech.이

개념정립단계이므로 범국가적 차원에서 선택과 집중을 하게되면, 산업화단계에서 선진기술을 모방하던 시절에서 탈피하여 선진국과 특정분야에서 대등하게 기술경쟁을 벌일 수 있다고 하겠다.

과학기술부는 나노원리규명을 위해 표준연, 전자통신연, 삼성전자 등 3개 기관에 국가지정연구실을 지정하였으며, 서울대, 서울시립대, 한국과학기술원 등 7개 기관에 창의사업단을 발족하였고, 연세대, 동국대, 충남대 등에 SRC/ERC를 설립하였으며, 국가중점과제로 『극미세구조기술개발』사업을 추진하고 있다. 또한 기존의 반도체 소자보다 100배 이상 처리속도와 용량이 향상된 나노소자개발을 위해 『테라급나노소자개발사업단』(사업단장: 이조원)을 설립하여 2000년부터 10년 간 매년 100억 원 씩 투자예정이다. 한편, 산업자원부는 차세대신기술사업을 통해 한국과학기술연구원에 『고기능나노복합소재개발사업』, 전자부품연구소에 『차세대대용량저장장치개발사업』을 지원하고 있으며 이를 통하여 기존소재의 물질 특성 및 소자성능을 개선하는 연구를 수행하고 있다.

Ⅶ. 테라급 나노소자개발 사업단의 목표 및 기대성과

본 사업단은 현재까지 알려진 나노소자 중 가장 실현 가능성이 큰 소자들로 제안되고 있는 Tera급 Nanoelectronics, 분자 전자소자, Spintronics 등과 나노요소기술을 중과제로 하여 2000년 7월부터 개발에 착수하였다. 이러한 소자들을 제작하기 위해서는 기존의 발상을 뛰어넘는 신개념의 설계 및 공정 기술들이 필요하다. 기존의 E-beam/EUV가 아닌 신개념의 25nm 이하 선폭 제어용 Nano-Litho. System 구축이 필요하며, 결함없이 가공할 수 있는 Etching 기술, 1nm 이하를 제어할 수 있는 나노증착기술 및 Litho./Etching 없이 소자를 제작할 수 있는 SAM(Self Assembly Monolayer)기술이 요구된다. 이들 기술은 기본적으로 저가이어야 한

다. 이들 장비 및 공정기술이 개발되었을 때 비로소 경제성을 갖춘 Tera급 나노소자 제작이 가능하며, 이를 계기로 극소 소자 개발 능력의 확대와 더불어 장비업체와 공정기술분야 등의 Venture 기업들이 탄생되고 NEMS(nano-electromechanical system) 분야에서도 많은 Venture 기업들이 생성 될 것이다.

1. 연구목표

본 사업단의 최종목표와 중 과제별 연구 목표는 다음과 같다.

▶ 사업단 최종 목표 : Tera급 IC TEG (Test Element Group) 개발

▶ 중 과제별 연구목표

- Tera급 Nanoelectronics

SEM, Nano-CMOS 소자를 응용한 테라급 메모리 및 초고속 소자를 개발하며, RT-based Tera-hertz급 초고속 메모리 및 논리소자 개발.

- 분자 전자소자

Tera bit급의 반도체소자에 적용 가능한 분자 수준의 소자, 소자 회로 구성과 작동 및 분자 소자의 Break-through를 위한 신개념 창출.

- Spintronics

nonvolatile/초고속(10-20ns)/초저소비 전력의 1Tera급 MRAM 소자를 개발하며, 자성체/반도체, 자성체/반도체/초전도체 혼합 구조의 신개념 소자 가능성 연구

- 나노 요소기술

Tera급 소자 구현을 위한 핵심 공정 기술 확보를 연구목표로 하며, 이를 위해 Nano-patterning, Nano-증착 및 Nano-분석 기술을 개발하며, ULSI Si-소자와 μ -광 소자의 집적을 통한 Gbps급 고속 데이터의 광연결 기술 창출.

상기 기술들 중 Tera급 Nanoelectronics, Spintronics, 분자 전자소자들 중 어느 하나가 성공하면 전자소자 산업 전체에 큰 Impact를 가져올 수 있다. 또한, 나노소자 제작에 필수 불가