

나노기술의 최근 동향 및 전망 (2) - 외국의 동향 -

김희중*

한국과학기술연구원

(2005년 2월 3일 받음, 2005년 2월 18일 최종수정본 받음)

I. 서 론

21세기 들어서자 과학기술계의 세계적 흐름을 주도한 기술이 나노기술이다. 이는 2000년초 미국의 클린턴대통령이 국가적 나노기술개발계획(National Nanotechnology Initiative, NNI)을 의회에 제안하고 예산을 요청하면서 전세계적인 추세로 확산되어 일본, 유럽 등의 선진국들은 물론 한국, 중국, 대만 등 개도국들도 국가차원에서 지원하는 연구개발계획을 수립하여 전략적으로 추진 중에 있다.

1998년 노벨 물리학상 수상자인 호르스트 스토머는 “나노기술은 우리에게 자연의 최후 장난감(원자와 분자)을 가지고 놀 수 있는 수단을 제공해 주었다. 모든 것은 그로부터 만들어지며 새로운 것을 창조할 수 있는 가능성은 끝이 없는 것처럼 보인다”라고 말하였다. 이는 나노기술이 정보, 전자, 재료, 화학, 기계, 의학, 약학, 농업, 환경, 에너지 등 광범위한 분야에서 기술혁신을 유발하고 다양한 산업 및 사회에 파급 효과가 지대할 것임을 의미한다. 따라서 세계의 각 국가들은 미래의 산업을 좌우할 나노기술을 국가전략기술로 선택하지 않을 수 없었고, 이는 향후 범세계적으로 치열한 나노기술 주도권 경쟁이 벌어질 것임을 의미한다.

본고는 1회의 나노기술의 개황에 이어 2회째로서 최근 미국, 유럽, 일본 등의 선진국들과 중국 등 아시아의 개발도상국들에서 추진되고 있는 나노기술연구정책들을 정리하고 논문 및 특허동향과 주요 응용동향에 대해서 소개하고자 한다.

II. 각국의 나노기술 연구개발정책[1-4]

2.1. 미국

미국의 나노기술 정책은 백악관내 국가과학기술위원회(National Science and Technology Council)와 과학기술정책실(Office of Science and Technology Policy)에 의해 추진되고 있다. 국가과학기술위원회 내에 설치된 나노기술분과위

원회(Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, NSET)에서 정부부처별 나노기술개발계획에 대한 조정작업을 하고 있다. 또한 과학기술정책실 내에 NNI 추진사무국인 나노기술조정국(National Nanotechnology Coordination Office, NNCO)을 설치하여 NSET의 활동을 지원하고 있다.

미국에서 나노기술 연구개발에 참여하고 있는 정부 부처 및 기관들은 10여개에 이르고 있으며, 2004년 2월 과학기술정책실이 공개한 2005 회계연도의 나노기술분야 예산요청기관에는 Table I과 같이 과학재단(NSF), 국방부(DOD) 등 10개 정부기관들이 명시되어 있다. 미국의 NNI 투자예산은 2001년 4.65억불로 시작한 이후 매년 급증하여 2003년 8.62억불, 2004년 9.61억불이 되었으며, 2005년에는 10억불에 근접한 9.82억불의 예산을 책정, 의회 승인을 요청하였다. 이러한 NNI의 예산규모는 미국 연방정부 전체연구개발비의 약 0.6%에 해당한다. 과학재단, 국방성, 에너지성이 전체 나노기술 예산의 70% 이상을 사용하고 있다.

2001년에 NNI는 15개 정부부처를 통해 2,000여개 대학, 정부기관 및 기업연구소에 재정지원을 하였으며, 대학 65%, 정부기관 30%, 산업계 5% 비중으로 배분하였다.

Table I. 미국의 부처별 나노기술 예산추이.

(단위 : 백만불)

| 부처 및 기관 | 2003년 (실제 집행) | 2004년 (승인) | 2005년 (정부요청) |
|-------------|------------------|---------------|-----------------|
| 과학재단(NSF) | 221 | 254 | 305 |
| 국방성(DOD) | 322 | 315 | 276 |
| 에너지성(DOE) | 134 | 203 | 211 |
| 국립보건원(NIH) | 78 | 80 | 89 |
| 상무성(NIST) | 64 | 63 | 53 |
| 항공우주국(NASA) | 36 | 37 | 35 |
| 환경보호청(EPA) | 5 | 5 | 5 |
| 국토안보국(DHS) | 1 | 1 | 1 |
| 농업성(USDA) | 0 | 1 | 5 |
| 법무성(DOJ) | 1 | 2 | 2 |
| 계 | 862 | 961 | 982 |

*Tel: (02) 958-5413, E-mail: hijkim@kist.re.kr

Table II. 미국 NNI의 주요 추진내용.

| 분야 | 세부 추진내용 |
|--|---|
| Fundamental Research | 나노스케일 현상의 원리를 규명하는 기초연구분야로 혁신적인 기초 연구를 진행하는 개인 연구자 또는 소규모 연구그룹을 지원 |
| Grand Challenger | 과학적인 연구성과의 응용에 초점을 맞춘 것으로 9개의 세부분야로 구성되어 연구추진. 1) Nanostructured Materials by Design (NSF) 2) Manufacturing at the Nanoscale (NIST, NSF) 3) Chemical-Biological-Radiological-Explosive Detection and Protection (DOD) 4) Nanoscale Instrumentation, and Metrology (NIST, NSF) 5) Nano-Electronics, -Photonics, -Magnetics (DOD, NSF) 6) Healthcare, Therapeutics, and Diagnostics (NIH) 7) Efficient Energy Conversion and Storage (DOE) 8) Microcraft and Robotics (NASA) 9) Nanoscale Processes for Environmental Improvement (EPA, NSF) |
| Centers and Networks of Excellence | 전통적인 연구지원 프로그램으로부터 지원받기 곤란한 대학제적 연구 목표를 지원하는 것으로 나노기술 연구인력 양성 및 기술인력 교육 등을 수행. NSF, DOD 등에서 2003년까지 16개 연구센터 수립. |
| Research Infrastructure | 나노측정법, 도구, 모델링, 시뮬레이션 등의 나노기술에 필요한 연구 인프라를 지원. NSF에서 National Nanofabrication Infrastructure Network(NNIN), Network for Computational Nanotechnology, DOE에서 Center for Functional Nanomaterials, Center for Integrated Nanotechnologies, Center for Nanophase Materials Sciences, Center for Nanoscale Materials, Molecular Foundry 등 5개 대형 연구시설 네트워크 설립을 추진중. NIST는 Center for Neutron Research 건립. |
| Social Implications and Workforce Education and Training | 나노기술의 사회적 영향에 대한 연구와 나노기술 교육을 지원. 대학 뿐만 아니라 고등학생, 일반인 교육도 추진. |

Table III. 미국 NNI의 나노기술 연구센터.

| 담당부처 | 센터명 | 연구기관 |
|--------------|---|--|
| 과학재단 (NSF) | Nanoscale Systems in Information Technologies, Nanoscale Science and Engineering Center | Cornell University |
| | Nanoscience in Biological and Environmental Engineering | Rice University |
| | Integrated Nanopatterning and Detection | Northwestern Univ. |
| | Electron Transport in Molecular Nanostructures | Columbia University |
| | Nanoscale Systems and their Device Applications | Harvard University |
| | Directed Assembly of Nanostructures | RPI |
| | Integrated and Scalable Nanomanufacturing | UCLA |
| | Nanoscale Chemical-Electrical-Mechanical Manufacturing | University of Illinois at Urbana-Champaign |
| | Nanobiotechnology, Science and Technology Center | Cornell University |
| 국방성 (DOD) | Institute for Soldier Nanotechnologies | MIT |
| | Center for Nanoscience Innovation for Defence | UC Santa Barbara |
| | Nanoscience Institute | NRL |
| 항공우주국 (NASA) | Institute for Cell Mimetic Space Exploration | UCLA |
| | Institute for Intelligent Bio-Nanomaterials and Structures for Aerospace Vehicles | Texas A&M |
| | Bio-Inspection, Design and Processing of Multi-functional Nanocomposites | Princeton University |
| | Institute for Nanoelectronics and Computing | Purdue University |

미국의 나노기술개발 추진전략(NNI)은 크게 기초연구, 대 형도전연구, 우수센터 설립, 연구인프라 구축, 사회적 영향 및 교육 등 5개 분야로 구분하여 연구개발을 지원하고 있으며, 상세한 내용을 Table II에 제시하였다.

미국의 NNI는 Table III과 같이 부처별로 다학제 연구와 산학연의 공동협력연구를 촉진하는 기능을 수행하는 총 16개 의 우수나노기술 연구센터의 설립과 지원을 추진하고 있다.

2003년 현재 NSF 7개, DOD 3개, NASA가 4개 등 14개의 나노기술센터를 지정하여 운영하고 있다.

2.2. 일본

일본은 2000년 9월 과학기술회의 정책위원회 산하에 '나노 기술의 전략적 추진에 관한 간담회'를 설치하여 각계의 의견을 집대성하는 작업을 전개하고, 2001년 3월 "제2차 과학기

Table IV. 일본 정부부처별 나노기술 예산추이.

(단위 : 백만불)

| 정부부처 | 2001년 | 2002년(보정예산) | 2003년 |
|----------|-------|--------------|-------|
| 총무성 | 2.5 | 15.8 | 15.8 |
| 문부과학성 | 17.5 | 81.7(206.7) | 75.8 |
| 후생노동성 | 0 | 11.7 | 11.7 |
| 농림수산성 | 0 | 1.7 | 1.7 |
| 경제산업성 | 162.5 | 260.0(41.7) | 310.0 |
| 환경성 | 0 | 0.8(14.2) | 3.3 |
| 운영비교부금 | 29.2 | 114.2 | 114.2 |
| 경쟁적 연구자금 | 294.2 | 323.3 | 323.3 |
| 계 | 505.0 | 809.2(263.3) | 855.8 |

*1 미국달러=120 일본엔으로 환산.

술기본계획'에 나노기술/재료분야를 생명과학, 정보통신, 환경과 더불어 4대 중점연구분야로 선정하였으며, 이후 2001년 9월 종합과학기술회의에서 '나노기술/재료분야 추진전략'을 확정하였다. 일본정부는 2002년 12월 '나노기술재료분야산업 발굴전략'을 수립하였는데 이것은 "10년 안에 세계시장을 주도할 수 있는 일본기업을 나노기술재료산업 5개분야에서 육성한다"는 전략적목표를 갖고 있다. 이 5개 분야는 네트워크 나노디바이스산업, 나노바이오산업, 나노환경에너지산업, 혁신재료산업, 나노계측가공산업들이다.

일본 산업계는 미국의 NNI 발표이후 나노기술에 대한 산업계의 의견을 정리하여 일본정부의 나노기술 정책수립에 적극적으로 참여하였다. 2000년 6월 일본 경단연은 나노기술전문부회를 설치하고 "21세기를 개척하는 나노기술(2000. 7)", "나노기술이 만드는 미래사회 n-Plan21(2001. 3)", "나노기술이 만드는 신산업 n-Plan2002(2002. 11)" 등의 보고서를 만드는 등 적극적인 제언을 하고 있다.

일본의 나노기술 예산지원은 Table IV에서 보는 바와 같이 주로 문부과학성과 경제산업성을 통하여 이루어지고 있는데, 일본의 예산은 미국에 버금가는 수준이며 2003년 예산은 8.56억불에 달하고 있다. 그 외 총무성, 농림수산성, 후생노동성 등에서도 그 규모는 크지 않지만 나노기술연구예산을 책정하고 있다.

일본의 나노기술 주요연구영역은 국가 및 사회적 과제에 대한 대응에 부합한 5가지 영역이며, 3개의 중점연구영역과 이들의 기반이 되는 2가지 영역이다. 첫째는 차세대 정보통신 시스템용 나노디바이스재료영역이며, 산업경쟁력 강화와 지속적인 경제발전을 위해서 정보통신분야의 기반이 되는 반도체, 정보저장기술, 신원리 디바이스기술 등을 연구개발대상으로 하고 있다. 둘째는 환경보전 에너지이용 고도화재료영역이며, 환경에너지, 저출산 고령화의 사회적문제에 대한 과제를 해결하기 위해 이산화탄소 배출저감, 재활용을 촉진하는 친환경적인 신재료 개발과 연료전지, 태양열발전의 고효율화 등을

대상으로 하고 있다. 셋째는 의료용 극소시스템 및 재료, 나노바이오로지영역이며, 생체기능 재생재료, 편포인트 치료기술의 확립을 목표로 하고 있다.

넷째는 상기 기술들의 기반을 제공하는 계측, 수치해석 및 시뮬레이션의 연구기반영역이며, 다섯째는 나노미터 단위에서의 탄소나노튜브와 같은 혁신적인 기능을 소유하는 재료들을 개발하기 위한 혁신재료 개발영역이다.

현재 일본에는 나노기술을 연구개발하는 연구기관들이 매우 많지만 그중 주요한 연구기관들은 다음과 같다. 일본 물질재료연구소(NIMS)는 2001년 4월 종래 국립연구기관이었던 금속재료기술연구소와 무기재료연구소가 통합되어 탄생한 연구소로서 물질, 재료 과학기술에 대한 연구를 종합적으로 추진하고 있으며, 현재 나노물질/재료, 환경/에너지재료, 안전재료, 연구/지적기반 향상 등의 4개 중점분야를 연구하고 있다. 산업기술종합연구소(AIST)는 기존의 통산산업성 소속 15개 산업과학기술연구소들과 계량교습소가 통합되어 2001년 4월에 설립되었으며, 연간 약 1조엔의 예산을 투입하여 일본의 국책연구개발사업들을 추진하고 있다. 이화학연구소(RIKEN)는 일본 유일의 자연과학종합연구소로서, 연간 약 800억엔을 투입하여 나노물질공학, 나노포토닉스분야 등을 연구개발하고 있다.

신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)는 1980년에 설립되어 석유대체에너지의 종합개발 및 다양한 산업기술 연구개발 업무를 담당하고 있다. 나노기술연구프로그램으로써 정밀고분자, 나노유리, 나노메탈, 나노입자, 나노코팅, 나노기능 합성, 나노측량기반기술 지식구축 등을 추진하고 있으며, 나노분야 연간 연구개발예산은 약 46억엔 규모이다.

2.3. 유럽연합(EU)

유럽연합의 나노기술개발은 1990년대 초부터 시작되어 연간 약 4,500만 유로를 투자하였다. 21세기에 들어서 나노기술의 중요성이 크게 부각되자 6차 Framework Programme (2002~2006)에서는 나노기술을 생명공학, 정보기술분야와 함께 7대 핵심연구기술분야로 선정하였다. 전체 연구개발예산은 175억 유로이며 그 중 13억 유로를 나노기술분야에 편성하고 있다. Table V에는 유럽연합의 연구사업인 FP6의 우선연구분야와 예산을 나타내었다.

나노기술은 세번째 항목인 나노기술, 다기능재료, 새로운 생산공정에 명시되어 있다. 나노기술의 연구내용으로는 장비개발을 위한 다학제간의 협동연구, 복잡한 분자구조 연구, 나노바이오기술, 나노미터수준의 소재제조기술, 제어장비 개발, 보건 화학 에너지 환경분야에 대한 적용기술, 지식기반 다기능재료 등을 설정하고 있다.

유럽연합은 미국, 일본이 강한 나노소자분야보다는 바이오,

Table V. 유럽연합의 제6차 Framework Programme(2002~2006)의 핵심연구 개발분야 및 예산.

| 핵심 우선분야 | 예산 (백만유로) |
|--|--------------|
| Life Sciences, Genomics and Biotechnology for Health | 2,255 |
| Information Society Technology | 3,625 |
| Nanotechnologies, Multifunctional Materials and New Production Processes | 1,300 |
| Aeronautics and Space | 1,075 |
| Food Quality and Safety | 685 |
| Sustainable Development, Global Change and Eco-systems-including Energy and Transport Research | 2,120 |
| Citizens and Governance in a Knowledge-based Society | 225 |
| 합 계 | 11,285 |

화학 등 유럽이 전통적으로 강한 분야를 바탕으로 개발전략을 수립하고 있으며, 나노과학, 나노기술을 이용한 생산기술, 환경 및 에너지분야를 강조하고 있는 것이 특징이다.

유럽국가들은 유럽연합의 연구개발프로그램과 연계하거나 독자적으로 나노기술 연구개발계획을 수립하여 추진중이므로 주요 국가들 동향에 대해 간단히 소개한다.

1) 독일

미국, 일본에 버금가는 기술강국인 독일의 나노기술개발은 80년대 후반부터 시작되었으나 본격적인 전략은 2002년 5월에 수립되었으며, 정부의 나노기술 연구예산은 교육연구부(BMBF)와 연방경제노동부(BMWA) 등에 의해 주로 집행되고 있다. 독일정부의 나노기술예산은 2002년 2.38억 유로에서 2003년 2.57억 유로, 2004년 2.92억 유로로 지속적인 증가를 하고 있으며, 나노기술의 정책수립과 추진을 주도하는 교육연구부가 그중 약 40%를 집행하고 있다. BMBF가 지원하는 나노기술 연구분야는 나노재료, 광기술, 바이오기술, 나노전자

공학, 통신기술, 제조기술, 마이크로시스템기술 등 7개가 주종을 이루고 있으며, Table VI에 그 내용과 예산추이를 나타내었다.

독일은 이외에 여러 공공연구기관들도 나노기술연구에 참가하고 있는데 예를 들면 2003년도 나노기술 연구기금규모가 독일연구협회(DFG)에 6,000만 유로, 라이프니츠연구협회(WGL)에 2,360만 유로, 헬름홀츠연구협회(HGF)에 3,710만 유로가 책정되었다. 독일은 현재 지역거점별로 9개의 나노기술네트워크를 구축하여 연구기관, 기업, 대학사이의 정보교류를 촉진하고 산업화기반을 조성하는 역할을 담당하게 하고 있다.

2) 프랑스

프랑스는 2003년부터 본격적인 나노기술연구개발에 착수하였으며, Table VII에 주요 프로젝트와 예산현황을 나타내었다. 프랑스의 나노기술연구는 나노제조, 나노구조체(나노튜브, 초분자, 양자선), 양자정보, 나노구조 조립, 나노소재, 나노바이오(나노모터 및 나노센서) 등의 분야에 우선순위를 두고 있다. 장기과제로서 유기나노복합재, 나노전자공학, 나노측정분야들을 지원하고 있다.

나노기술 연구개발 및 산업화의 거점사업으로 MINATEC을 설립하여 나노전자소자분야를 연구토록 하고 있으며, 대표적 연구기관인 CNRS는 연간 약 4,000만불의 예산을 나노기술연구에 투입하고 있다.

3) 영국

영국정부는 2002년 7월 나노기술 응용자문위원회를 구성하여 나노기술 사업내용을 검토한 후 2003년 7월 과학기술청에서 향후 6년간 9,000만 파운드를 나노기술 산업화지원에 투자하는 것을 골자로 한 마이크로나노기술 제조전략(MNT)을 발표하였다. 이 계획에는 영국 산업계의 최신 나노기술연구와 시설자원 이용을 지원하기 위해 산학 공동연구지원에 5,000만 파운드, 마이크로나노기술 네트워크 구축에 4,000만 파운드를 투자하는 내용이 포함되고 있다.

Table VI. 독일 교육연구부(BMBF)의 나노기술 분야별 연구개발 예산추이.

| 분야 | 중점 연구내용 | (단위 : 백만유로) | | | |
|----------|--|-------------|------|-------|-------|
| | | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
| 나노재료 | 나노분석, 나노바이오기술, 나노구조체, 나노화학 | 19.2 | 20.3 | 32.7 | 38.1 |
| 제조기술 | 초박막, 초정밀표면 | 0.2 | 0.8 | 2.2 | 2.2 |
| 광학기술 | 나노광학, 초정밀가공, 현미경, 광결정, 분자전자공학, OLED, 다이오드레이저 | 18.5 | 25.2 | 26 | 26 |
| 마이크로 시스템 | 시스템 집적 | 7.0 | 7.0 | 9.4 | 10.2 |
| 통신기술 | 양자시스템, 광결정 | 4.3 | 4 | 3.6 | 3.4 |
| 나노전자 | EUVL, 리소그라피, 마스크기술, 자성전자공학, SiGe전자공학, e-Bio칩 | 19.9 | 25 | 44.7 | 46.2 |
| 나노바이오 | 조작기술, 나노입자, 기능성 나노입자, 바이오칩 | 4.6 | 5.4 | 5.0 | 3.1 |
| 혁신기술분석 | ITA연구 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | |
| 계 | | 73.9 | 88.2 | 123.8 | 129.2 |

Table VII. 2003년 프랑스 정부의 나노기술 연구사업과 예산현황.

| 구분 | 연구사업 내용 | 예산 (백만유로) |
|------|---|--------------|
| 기초연구 | 국가나노과학연구사업(National Nanosciences Program) | 17 |
| | 퍼포먼스프로그램(Performance Program) | 15 |
| | 기술네트워크.마이크로/나노기술 네트워크 | 14 |
| 응용연구 | 기술네트워크.의료장비, 재료, 공정, 통신분야 프로젝트 | 2 |
| | 국가 우수센터 네트워크(3년간 1.4억 유로) | 37 |
| | MINATEC연구센터(4년간 2.15억 유로) | 29 |
| | CROLLES II 파일럿 칩 생산라인 | 91 |
| | 중앙정부 | 142 |
| 계 | 기타(지역 및 연구소 등) | 80 |
| | 합 계 | 222 |

영국의 나노기술 연구기관으로는 옥스퍼드대학을 중심으로 한 나노기술 학제간공동연구단(IRC on Nanotechnology)과 캠브리지대학을 주축으로 한 나노기술물리 공동연구단(IRC in Physics of Nanotechnology) 등 2개의 컨소시움이 대표적이다. 전자는 주로 나노-바이오소재의 구조와 기능에 대한 연구, 후자는 분자구조의 조립과 조직 등 나노구조체 및 나노소재의 물성연구에 초점을 맞추고 있다. 이외에 뉴캐슬대학을 중심으로 한 대학 나노기술혁신센터(UIC)가 설립되어 표면공학, 화학 및 생물소재, 분자전자공학, 생의학나노기술 등을 연구하고 있다.

4) 스위스

스위스는 1981년 주사터널현미경(STM)이 IBM 취리히연구소에서 발명되는 등 나노기술 연구개발 활동이 일찍부터 태동하였으며, 국가연구개발사업(NRP) 36, 47 프로그램을 통하여 나노기술 연구개발을 지원하고 있다. NRP36(Nanosciences, 1996~2000)은 기초연구에 초점을 맞추어 스위스 과학재단이 5년간 1,500만 스위스프랑을 투입하였으며, NRP47(2000~2004)은 역시 5년간 1,500만 스위스프랑을 배정하여 여러 과학분야의 다학제간 연구를 중점적으로 지원하며 정보저장, 분자스위치 및 와이어, 전자쌍자수송 관련센서, 분자자석 등에 관해 연구하고 있다.

나노기술의 산업화를 추구하는 Top Nano21프로그램은 나노과학 발견의 직접적 응용과 기술의 산업화라는 목표를 갖고 2001년 착수되었으며, 180개 연구진과 100개 기업이 110개 프로젝트에 참여하였다. Nanoscale Science NCCR(국가우수연구센터)는 스위스 국립과학재단에서 선정되어 2001년부터 1차로 4개년 나노기술연구사업을 추진하고 있다.

2.4. 아시아

1) 중국

나노기술이 중국의 경제발전에 크게 기여할 것이라는 인식과 함께 중국정부는 2001년부터 5년간 실시되는 10차 5개년 경제발전계획에서 나노소재를 핵심분야로 선정하였다. 5년간 20억 위안(약 2.5억불)의 연구개발비를 나노기술분야에 투입할 계획이며, 나노전자, 나노기계, 나노바이오 및 측정분야(14억 위안), 연구시설 건설 및 정보네트워크 구축(7억 위안), 기초연구분야(5억 위안) 등이 주요 내용이다.

중국정부는 나노기술의 체계적 연구개발과 산업화를 추진하기 위한 추진조직으로서 2000년 10월 과학기술부, 교육부, 중국과학원, 국가발전계획위원회, 국가자연과학기금위원회의 5개 기관 아래에 ‘국가 나노과학기술협조지도위원회’를 조직하였다. 또한 과학기술부는 2001년 5월 ‘중국국가나노기술발전요강’을 승인하였는데 이 계획은 나노전자와 나노바이오 핵심기술, 나노소재 개발과 산업화, MEMS 및 NEMS분야의 연구에 중점을 두고 있다. 이외에도 ‘973계획’ 및 ‘863계획’에 나노소재 및 나노구조 기술개발을 포함시켜 추진하고 있다. Table VIII에는 중국의 나노기술 추진기구들을 열거하였다.

주요 연구기관들로는 나노구조 측정 및 특성화, 나노소재 개발응용, 나노소재, 나노바이오기술과 나노의약분야를 중점적으로 연구하는 국가나노과학센터(NCNC), 상하이지역의 나노기술 산업화를 촉진시키기 위해 2001년에 설립한 상하이 나노기술산업발전추진센터(SNPC), 나노기술산업단지 등을 들 수 있다.

2) 대만

대만정부는 2002년 6월 행정원 국가과학위원회에서 국가 나노과학기술계획을 승인하고 본격적인 연구를 추진하고 있

Table VIII. 중국의 나노기술 추진기구.

| 기구 | 활동상황 |
|------------------|--|
| 국가과학기술위원회 (SSTC) | - 11·5계획에서 나노소재 개발을 10년간 지원하는 것을 승인. |
| 과학기술부 (MOST) | - ‘11·5계획’ 프로젝트로 나노소재 개발 지원(1990~1999) |
| | - 국가 핵심기초연구프로젝트로 ‘나노소재 및 나노구조’ 프로젝트 착수(1999) |
| 중국과학원 (CAS) | - 국가고등기술계획(863계획)에서 나노소재 적용방안에 대한 프로젝트 계획 수립(2000) |
| | - STM, 나노미터차원의 연구과제 지원(1987~1996) |
| 자연과학기금위원회 (NTFC) | - 중국과학원 산하에 ‘나노과기센터’ 설립(2000. 10) |
| | - STM, 나노미터차원의 연구과제 지원(1987~1996) |

다. 2003년부터 2008년까지 추진되는 대만나노기술개발전략의 총예산은 6.3억불이며, 교육부, 중앙연구원, 경제부 등이 참여하고 있다.

대만의 국가나노기술개발계획은 크게 학술연구, 산업화기술, 시설장비 구축, 인력양성 등으로 구분되어 있다. 이중 가장 핵심투자분야는 나노기술 산업화분야로서 약 61%가 책정되었으며, 21.2%가 학술연구분야, 16.3%가 핵심시설장비 구축 분야에 할당되었다. 산업화과제는 나노소재와 공정기술, 나노전자기술, 나노광통신기술, 나노조립기술 등이며, 학술연구과제는 나노구조의 물리, 화학 및 바이오특성, 나노크기의 탐측 및 제어, 나노바이오기술 등이다.

대만의 주요 나노기술 연구기관은 공업기술연구원(ITRI)의 나노기술연구센터(NTRC)이며 6년간 3억불 규모의 연구를 진행하고 있다. 이외에 중앙연구원 나노과학실험실, 국가 나노부품실험실, 대만 청화대, 교통대, 중정대 등에서 나노기술에 관한 연구를 하고 있다.

III. 학술동향[1]

전세계적으로 1997년 이후 나노기술관련 SCI논문은 발표된 학술지는 2,163종이며, 전체 SCI 학술지의 36%가 나노기술 관련논문을 게재하고 있고 매년 약 9%씩 나노기술관련 학술지의 수가 증가하고 있다. 1997년 이후 2004년까지 세계적으로 약 58,000편의 논문이 발표되었으며, 매년 평균 24.8%의 높은 성장세를 보이고 있다[1]. 그중 미국이 27.9%인 16,352편을 발표하여 가장 높은 비중을 차지하였으며, 중국 8,637편(14.7%), 일본 7,678편(13.1%), 독일 5,926편(13.1%), 프랑스 4,101편(7%)의 순서이며, 8위인 한국은 2,424편으로 4.1%를 차지하였다. Table IX에 주요국가의 연도별 논문수 변화를 나타내었다.

국가별 논문순위 변화를 보면 1997년 이후 미국, 중국, 일본, 독일, 프랑스가 상위그룹을 꾸준히 지속하고 있지만 중국

이 1997년 4위에서 2000년 이후에는 2위를 유지하고 있고 한국이 2000년에 8위로 진입한 후 2002년에는 6위가 되었다. 이와 같이 아시아권의 나노기술 연구개발이 확대되어 기존의 일본, 중국, 한국 외에 인도, 대만 등이 20위 이내의 상위권으로 진입한 것이 특징적이다.

VI. 산업 및 응용동향

나노기술분야의 응용분야가 매우 광범위하고 차세대 나노소자, 생체소자, 탄소나노튜브 등을 이용한 제품들이 미려에 유망시되고 있지만 현재 나노기술을 이용하여 응용되고 있는 제품은 주로 나노소재를 응용한 스포츠 및 웰빙용 제품이라고 할 수 있다.

미국 Forbes/Wolfe사는 'Nanotech Product Guide'에서 나노기술제품에 관해 소개하고 있는데[5], 2003년도의 경우 대표적 제품들은 Nanogate/Holmenke사의 Cerax Nanotech 스키악스, 나노튜브를 이용한 Babolat 테니스 라켓, Inmat/Wilson사의 수명이 긴 나노입자 테니스공, Nano-Tex사의 스키복용 Nano-care 발수제 및 얼룩방지 코팅제 등 스포츠제품들이 대부분이었다. 이는 신소재의 경우 가격이 비싸 군사용 및 스포츠용과 같이 가격보다는 성능을 중시하는 제품들에 응용되는 것이 대표적인 사례이기 때문이다. Table X에는 동사가 발표한 2004년도의 10대 나노기술제품들의 종류 및 주요 나노기술내용을 정리하여 나타내었다. 이 표로부터 나노기술은 골프공, 발보온재, 운동선수용 피부관리제품, 새로운 테니스 라켓(Wilson사) 등의 스포츠장비 및 소재에 대한 응용은 물론 칩대 매트리스, 은나노연고, 군수용 살균제, 관절통크림, 치과용 접착제와 같이 의료 및 살균용 제품, 스프레이, 유리보호제 등 일반용 제품까지 다양하게 응용되기 시작하였음을 알 수 있다. 국내에서도 멸균제, 소독제, 경구약물, 광택제, 화장품, 연마제, 세척제, 진단시약제, 화학촉매, 용매제 등 나노물질을 활용한 제품들이 속속 등장하고 있다. 냉장고, 세

Table IX. 연도별 주요국들의 나노기술 논문수 순위변화.

| | 미국 | 중국 | 일본 | 독일 | 프랑스 | 러시아 | 영국 | 한국 | 이태리 | 스페인 |
|------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 1997 | 1,120(1) | 373(4) | 523(2) | 470(3) | 355(5) | 227(6) | 177(7) | 54(13) | 114(8) | 114(8) |
| 1998 | 1,374(1) | 488(4) | 627(2) | 528(3) | 404(5) | 239(6) | 226(7) | 87(13) | 145(9) | 155(8) |
| 1999 | 1,644(1) | 717(3) | 816(2) | 678(4) | 482(5) | 350(6) | 282(7) | 162(10) | 181(9) | 188(8) |
| 2000 | 1,989(1) | 924(2) | 919(3) | 798(4) | 543(5) | 335(6) | 305(7) | 221(8) | 204(9) | 157(11) |
| 2001 | 2,687(1) | 1,336(2) | 1,270(3) | 916(4) | 620(5) | 432(6) | 411(7) | 408(8) | 283(9) | 243(11) |
| 2002 | 3,517(1) | 1,898(2) | 1,573(3) | 1,167(4) | 794(5) | 538(8) | 541(7) | 580(6) | 338(9) | 290(11) |
| 2003 | 3,724(1) | 2,640(2) | 1,853(3) | 1,284(4) | 860(5) | 608(7) | 574(8) | 832(6) | 491(9) | 360(11) |
| 2004 | 297(1) | 261(2) | 97(3) | 84(4) | 43(6) | 41(8) | 42(7) | 80(5) | 25(11) | 25(12) |

*단위는 건수이며, 2004년은 1년분이 아닌 일부 조사기간내의 통계임.
() 내는 순위임.

Table X. Forbes/Wolfe사가 선정한 2004년도 10대 나노기술제품 내용[5].

| 나노기술제품 | 제조기업 | 기술적용 내용 |
|-----------------|--------------------------|--|
| 발보온재 | Aspen Aerogels | 기존소재들에 비해 3~20배의 보온성능을 나타내는 단열성이 우수한 나노세공 에어로졸기 기술을 신발에 이용(상품명 Pyrogel AR5401) |
| 세탁가능 침대매트리스 | Simmons Bedding Co. | 최신 HealthSmart Bed에 Nano-Tex사의 유체와 입자를 포집하는 반투과층을 설치해 세탁시 씻겨나가도록 함. |
| 골프공 및 나노 드라이버 | Maruman & Co NanoDynamic | 플러렌소재를 채용한 티타늄 골프클럽 헤드 개발 비행경로를 보정하는 나노소재를 채용한 골프공 개발 |
| 맞춤형 피부관리용품 | Bionova | 나노피부관리기술을 이용하여 개인맞춤형 피부관리를 실시하고 테니스 스킨케어 제품 출시(Sun & Wind Protection-Dry Skin) |
| 화상환자용 은나노연고 | Nucryst제약 | 표면적을 증가한 은나노입자로 약물내성 박테리아를 포함한 150종의 미생물에 대한 항균효과를 가진 중증화상 및 만성상처에 바르는 연고 개발(Acticoat) |
| 군수용 살균제 | EnviroSystems | 표면전하를 갖는 나노구형체의 유적들이 물에 현탁되어 활성성분을 극소량 필요로 하는 나노에멀전을 형성. 1회 사용으로 세척 및 살균 가능(EcoTrue) |
| 초소수성 스프레이 | BASF | 건축자재의 소수성을 향상시키기 위해 초소수성 고분자 및 나노입자를 함유하여 물방울과 미립자오염물의 응집을 최소화한 첨가제를 개발(Mincor) |
| 자동차유리 투명성보호 처리제 | Nanofilm | 화학적 자기조립을 이용하여 외층에 3~10 nm의 고분자박막층을 형성, 투명성을 높여 시야개선을 하는 제품으로 자동차전면 유리창 및 선그라스에 사용(Clarify Defender) |
| 관절통 및 근육통 크림 | Flex Power | 90 nm의 리포솜을 이용하여 근육통 및 관절통을 완화시키는 제품 |
| 치과용 접착제 | 3M ESPE | 실리카나노필터기술을 이용하여 치아 에나멜에 보다 강력한 접착력을 제공하는 제품(Adper Single Bond Plus Adhesive) |

탁기 등에 사용되는 은나노분말이 최근 시장개척에 성공한 대표적인 나노소재라 할 수 있다.

대표적인 나노물질이며 '꿈의 신소재'로 불리는 탄소나노튜브(CNT)는 최근 연구실의 벽을 넘어 실제 응용에 접근하고 있다. 이 물질은 1991년 발견되고 1992년 NEC에 의해 특허 출원된 이후 우수한 역학적, 전기적, 화학적특성을 이용하여 각종 장치의 전자방출원, FED 및 VFD 디스플레이, 백색광원, 2차전지전극, 수소저장연료전지, 나노와이어, SPM, 단전자소자, 가스센서, 의공학용 미세부품, 고기능복합체 등 다분야에 응용이 시도되고 있으며, Frost & Sullivan사에 의하면 2003년 3500만불 시장에서 2007년에는 5.4억불 시장으로 성장할 것으로 전망되고 있다.

이상에서 보는 바와 같이 현재 나노기술 중 가장 활발하게 상업제품으로 응용이 시도되고 있는 분야는 나노소재분야인데, 나노소재의 주요시장을 조사한 자료를 보면 시장비중이 의료/의약 30%, 화학제품 및 신소재 29%로서 두 분야가 높고 다음으로 정보통신 21%, 에너지 10%, 자동차 5%, 항공 2%, 섬유 2%, 농업 1%를 차지하였다[6]. 나노소재의

생산제품 형태에 대한 비중을 보기 위해 Table XI에는 321개 나노소재 생산기업이 생산하는 제품형태와 기업수를 나타내었다[7]. 거의 절반이 나노분말이며, 나노튜브, 나노기공소재, 플러렌, 양자점, 나노구조재료 등의 순서를 보이고 있다.

나노소재분야 중에서도 가장 광범위하게 응용이 추진되고 있는 분야가 나노분말분야인데 Table XII에는 나노분말의 응용분야를 나타내었으며, 나노분말이 정보통신, 생명과학, 에너지분야 등 다분야에 광범위하게 응용되고 있음을 알 수 있다.

나노분말의 중요성을 쉽게 알 수 있는 용도가 초고집적 반도체 제조를 위한 공정인 화학기계적 연마공정(CMP)이다. 반도체구조의 평탄화를 위해 채용되는 CMP공정의 연마제에 나노분말이 핵심재료로 사용되고 있는데, 이 CMP분야의 시장은 최근 약 20억불 규모에 달할 만큼 큰 시장이 되었으므로 추정된다. Table XIII에 최근의 CMP시장동향에 관한 자료를 나타내었으며, 2000년 약 10억불 규모가 2002년 약 16억불, 2004년에는 약 19억불이 될 것으로 추정하고 있다. 용도면을 보면 2000년에는 산화물 유전체, 텅스텐이 주종이었지만 2004년에는 이중다마신(Dual Damascene), 저k 유전체, 산화물유전체, 텅스텐 등으로 매우 다양하게 이용될 것을 시사하고 있다[8].

최근 나노기술이 전세계적으로 각광을 갖게 된 것은 무엇보다 무어의 법칙으로 대표되는 메모리반도체의 미세공정기술이 100 nm 이하로 내려가고 새로운 소자기술들이 속속 등장하고 있기 때문이다[9]. 전세계적으로 차세대 반도체 개발 경쟁이 벌어지고 있는데 한국도 DRAM을 중심으로 나노공

Table XI. 나노소재의 생산제품 형태 및 기업수(총 321기업)[7].

| 제품형태 | 기업수 | 제품형태 | 기업수 |
|----------------------|-----|--------------------------|-----|
| Nanoparticles | 160 | Nanostructured materials | 16 |
| Nanotubes | 55 | Nanofibers | 9 |
| Nanoporous materials | 22 | Nanocapsules | 8 |
| Fullerenes | 21 | Nanowires | 6 |
| Quantum dots | 19 | Dendrimers | 5 |

Table XII. 나노분말의 응용분야[6].

| | | |
|---|---|--|
| Electronic, Optoelectronic, Magnetic Applications | Biomedical, Pharmaceutical, Cosmetic Applications | Energy, Catalytic, Structural Applications |
| Chemical-mechanical polishing support | Antimicrobials | Automotive catalyst |
| Electroconductive coatings | Biodetection and labeling | Ceramic membranes |
| Magnetic fluid seals | Biomagnetic separations | Fuel cells |
| Magnetic recording media | Drug delivery | Photocatalysts |
| Multilayer ceramic capacitors | MRI contrast agents | Propellants |
| Optical fibers | Orthopedics | Scratch-resistant coatings |
| Phosphors | Sunscreens | Structural ceramics |
| Quantum optical devices | | Thermal spray coatings |
| Solar cells | | |

Table XIII. 화학기계적연마(CMP)공정의 시장동향[8].

(단위 : 백만불)

| CMP Application | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Oxide Dielectric | 360 | 411 | 455 | 441 | 392 | 328 | 267 |
| Low k Dielectric | - | 16 | 41 | 171 | 235 | 311 | 362 |
| STI | 25 | 48 | 83 | 128 | 157 | 173 | 171 |
| Passive Layer | 13 | 24 | 41 | 71 | 94 | 121 | 133 |
| Polysilicon | 6 | 24 | 52 | 99 | 110 | 121 | 152 |
| Tungsten | 216 | 234 | 258 | 298 | 282 | 276 | 248 |
| Dual Damascene | 13 | 48 | 103 | 213 | 298 | 397 | 571 |
| Total | 632 | 806 | 1,033 | 1,421 | 1,567 | 1,727 | 1,904 |

정기술을 주도하는 나라가 되었다.

반도체공정의 미세화는 한국과 일본이 가장 선행적으로 개발하고 있는데 생산은 현재 90 nm 단계이지만 요소기술은 2004년도에 65 nm세대에서 45 nm세대로 중심이 이전되는 것으로 보인다. 한국의 삼성전자, 일본의 도시바 및 소니는 이미 65 nm의 양산기술을 확립한 것으로 알려졌고, 그 이하의 구현을 위한 절연막, 배선막 등을 개발하고 있다.

미국의 인텔사는 2004년 '프레스콧'으로 불리는 차세대 펜티엄4 프로세서를 공개하였는데 이 모델은 1.25억개의 트랜지스터, 1 Mb의 메모리용량, 2.8~3.2 GHz의 속도를 갖고 있다. 이 메모리칩은 인텔 최초로 90 nm 공정에서 생산되어 기존 생산공정보다 약 32%의 원가절감효과를 거두었으며 외형도 30% 줄어든 것이 특징이고 향후 하이엔드 PC시장에 채용될 것이다.

또 다른 나노 CMOS프로젝트는 ST마이크론, 인피니온, 필립스 등 유럽 3대 반도체 메이저가 주도해 2010년까지 45 nm 이하 32 nm 반도체 공정개발을 목표로 하는 과제이다. 유럽연합이 연구자금을 지원하고 있으며, 2004년 5월 완공된 벨기에소재의 IMEC연구소의 300 mm 웨이퍼팩을 기반으로 진행되는데 1차로 2005년까지 45 nm SRAM을 개발할 계획이다.

한국의 삼성전자는 세계 최초로 90 nm 공정에서 메모리반도체를 이미 생산하고 있는데 2007년까지 메모리반도체와 비

메모리반도체를 융복합화한 퓨전메모리를 기반으로 반도체제조 나노기술을 선도하여 세계 수위의 반도체기업을 달성할 계획을 2004년 10월에 천명하였다.

반도체분야와 더불어 나노기술이 가장 활발히 연구개발되고 있는 분야가 정보저장분야이다. 하드디스크기술의 경우 수평기록방식의 기록밀도가 한계에 도달하여 이의 돌파를 위해 수직자기기록기술, 패턴 자기미디어기술, 열보조 자기기록기술, 자기조립형 자기어레이미디어 등 여러 자기기록기술들이 개발되고 있으며, 제곱인치당 테라비트(Tera bit)의 면기록밀도가 가능할 것으로 생각되고 있다.

현재 CD, DVD, DVR 등에 사용되고 있는 광디스크는 정보처리속도는 빠르지 않지만 기록밀도는 제곱인치당 약 100 Gb까지 가능할 것으로 예상된다. 플래시메모리는 20 nm half pitch로 제곱인치당 1.6 Tb까지 개발할 수 있을 것으로 보인다.

아직 본격적으로 시장에 등장하지는 않았지만 나노정보저장기술로 개발되고 있는 기술들로는 자기램(MRAM), MEMS 기반 프로그래머블장치, 홀로그래픽 광디스크, 상전이메모리 등이 있으며, 장기적으로는 유전체, 주사 E-beam 저장장치 등도 대안이 될 가능성이 있다고 생각되고 있다.

V. 결 론

1990년대 이후 세계 주요국은 나노기술이 21세기 신산업혁명을 선도할 핵심기술로 인식하고 기초연구 중심으로 연구하다가 2000년 미국의 NNI 발표 이후에는 모든 국가들에서 나노기술을 국가주도 연구개발사업으로 기획하고 대규모의 예산을 투입하고 있으므로 나노기술 주도권을 확보하기 위한 각국간의 경쟁은 향후 매우 심화될 것으로 전망된다.

본고에서 살펴본 바와 같이 미국, 일본, 유럽연합에 속한 선진국들은 물론 한국, 중국, 대만, 인도 등과 같은 아시아의 개발도상국들도 자기 나라들의 강점을 활용한 나노기술을 선정하여 공동협력연구, 공동시설의 구축, 핵심인력 양성 등의

내용으로 국가연구사업을 추진하고 있다.

현재 응용면에서는 나노기술이 중요하리라고 기대되는 반도체, 정보저장 및 정보표시소자 등 IT소자들보다 스포츠용, 웰빙용, 화장품용을 중심으로 분야에 나노물질 및 소재를 활용한 나노기술제품들의 개발보급이 활발하며, 이 경향은 앞으로 몇 년간 지속될 것으로 전망된다. 그렇지만 나노기술이 큰 산업과급효과를 가지는 것은 정보산업분야의 미래소자군과 생명과학산업분야의 응용제품이 본격적으로 시장에 등장하는 시기로써 2010년 전후가 될 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] 한국과학기술정보연구원, 나노기술연감 2003, 2004년 6월.
- [2] 과학기술부, 나노기술 종합발전계획, 2001년 7월.
- [3] 미국 국가과학기술위원회, National Nanotechnology Initiative, 2000년 1월.
- [4] 정상기, 한국의 나노기술 연구개발 동향, KISTEP News Letter, 2004. 11. 22.
- [5] 한국과학기술정보연구원, Nano Weekly 131호, 2005. 1. 21일.
- [6] Business Communication Co., Inc., 2001년 보고서.
- [7] 박종구, 나노기술의 전망과 차세대 유망산업, 한국과학기술정보연구원 기술시장 정보분석 세미나자료, 2004. 12월.
- [8] Dataquest report, 2000년.
- [9] 전자부품연구원, 2004년도 IT주요품목 산업동향보고서(1), 2004. 10월.