

주요국 국방·군사 동향 시리즈 15-03

주요국의 나노기술 개발 및 정책 동향

Nanotechnology and Related Policy Trend in a Globalized World





발간사

1959년 미국의 물리학자 리처드 파인만에 의해 최초로 개념이 정립된 나노기술은 분자 단위에서 물질을 제어하는 기술로서 물라전자재료 등 기존 과학기술들을 횡적으로 연결하는 새로운 차세대 기반기술입니다. 나노기술은 지금까지 미지의 세계였던 극미세 세계에 대한 탐구를 가능하게 하고 DNA 구조를 이용한 동식물의 복제나 강철보다 강한 탄소섬유 등 새로운 물질의 제조를 가능하게 합니다.

미국은 일찍부터 에너지고갈에 대비하고 국방력 강화를 위하여 2000년 1월에 국가나노 기술이니셔티브(NNI)를 발표한 이후 나노 기술개발에 박차를 가하면서 세계 선두자리를 지키고 있습니다. 특히 군사 분야에서 선도연구기관인 미 국방고등연구기획국(DARPA)은 2005년 나노입자 복제기술 개발에 성공하였고 나노기술이 적용된 병사용 방탄조끼 등은 이미 실전에서 사용되고 있으며 조만간 상상을 초월할 정도의 나노 무기 출현도 예상되고 있습니다.

미국 외에도 현재에는 세계 60여개 이상의 국가들이 독자적인 국가나노기술이니셔티브를 수립하고 나노기술에 대한 국가기술력 우위유지를 위해 각축을 벌이고 있습니다. 이와 같이 세계 각국들이 나노기술 개발에 노력을 집중하고 있는 것은 나노기술이 갖고 있는 광범위한 기반성, 원천성이 향후 거의 모든 기술영역에 영향을 미치게 되어 나노기술이 국가 간은 물론 기업 간의 기술경쟁력에서 승패를 결정할 수 있기 때문입니다.

본 책자는 최근 미국에서 발간된 세계 나노기술 현황 관련 보고서를 기반으로 하고 국내 및 외국의 나노기술개발 관련 자료를 참고하여 새롭게 편집, 작성되었습니다.

1장에서는 나노기술의 전반적인 동향을, 2장에서는 나노기술의 의미와 군사 분야를 포함한 응용분야를, 3장에서는 기술발전에 못지않게 중요한 기술발전의 폐해를 예방할 수 있는 각국의 나노기술개발 거버넌스 정책 동향을, 4장에서는 세계 주요국들의 나노기술 연구 개발과 규제 현황을 기술하였습니다. 그리고 5장에서는 글로벌 세계에서 기술혁신과 리더십, 세계최고 수준을 보유하고 있는 미국의 나노기술 경쟁력의 유지 가능성 등에 대해서, 그리고 결론에서는 와해성(disruptive) 기술로서의 나노기술이 지속발전함과 아울러 기술의 악용에 의한 폐해를 규제하는 방안을 제시하였습니다.

아무쪼록 이 보고서가 방산 연구개발을 포함하여 국내 나노기술개발에 종사하시는 분들의 업무에 도움이 되시기를 바랍니다.

2015년 11월

국방기술품질원장 이 현 곤



목 차

발간사	2
목 차	4
요 약	8
제1장	나노기술에 대한 전 세계적 노력	12
서 론	보고서의 구성과 주안점	15
제2장	나노기술의 의미	20
나노기술이란 무엇인가?	나노기술의 응용분야	22
	나노 군사과학기술	27
	나노기술 정의하기	41
	왜 정의가 중요한가	43
	데이터의 문제	46
	척도의 중요성	48
제3장	민군겸용기술을 위한 다국간 규제 정책	53
나노기술 거버넌스	나노기술의 위험과 규제 영향에 대한 서로 다른 접근	55
	나노기술의 상향식 규제	57
제4장	나노기술계획이 전 세계에 급속도로 확산된 이유	63
나노기술 연구개발에 대한 전 세계적 판도	나노기술개발 동향	66

제5장

주요 국가별 나노기술
R&D 추진 현황

미국의 나노기술 80

 국가나노기술계획 80

 국가나노기술계획 추진체계 83

 군사분야 나노기술 개발 현황 84

 나노기술 경쟁력 88

중국의 나노기술 90

 나노기술 현황 90

 국가 안보와 기술 인프라 구축 정책 95

 나노기술 개발 관련 기관 및 리더십 정책 101

 나노기술 산업 이해관계자들 105

 나노기술 발전에 관한 윤리적, 법적 및 안전상의 우려 108

일본의 나노기술 110

 주요 나노기술 추진분야 112

러시아의 나노기술 115

유럽연합의 나노기술 118

독일의 나노기술 120

영국의 나노기술 126

브라질의 나노기술 129

인도의 나노기술 130

제6장

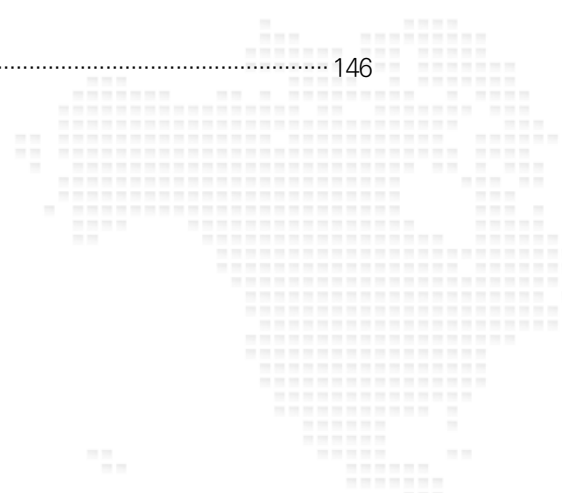
글로벌 세계에서
기술혁신과 리더십

국가적 혁신 역량이 중요 134

제7장

결론: 혁명적인 나노기술

주요 결론과 권고사항 146





표목차

표 1 나노융합의 주요 적용 분야	27
표 2 미 특허청에 등록된 주요국 누적등록 특허건수 및 점유율(2000~2013년)	64
표 3 미 NNI 분야 연간예산(2011~2013년)	82
표 4 미국의 각 군별 나노기술 연구분야	86
표 5 미국의 대표적인 군사용 나노기술 연구기관	87

그림목차

그림 1 세포의 생존환경을 규명하기 위하여 나노수준에서 만든 주름과 돌기 위에 세포를 올려놓고 그 움직임을 관찰한 장면	21
그림 2 마이크로, 마이크로 및 나노사이즈의 비교	22
그림 3 나노입자의 응용 분야	23
그림 4 탄소나노튜브의 배열	24
그림 5 탄소나노튜브의 활용 분야	25
그림 6 나노의학의 응용 분야	26
그림 7 나노기술이 국방에 적용될 수 있는 분야	28
그림 8 나노기술을 이용한 미래형 차량	29
그림 9 나노프로세서에 대한 연구에서 개발된 미세나노큐브	31
그림 10 팽창식 나노기술의 원리	32
그림 11 UC San Diego 대학 연구진이 개발한 메타물질	33
그림 12 일반매질의 빛 굴절현상과 메타물질의 빛 굴절현상	33
그림 13 나노 광학소재의 군사 분야 활용	34
그림 14 Morpho의 원래 날개 색과 에탄올과 톨루엔에 노출된 날개 색	35
그림 15 나노센서의 종류 및 기능	36



그림 16 전자코에 의해 감지된 화학물질별 색상변화	37
그림 17 나노기술을 적용한 전술조끼	38
그림 18 충격방지 소재 개발에 영감을 제공한 공룡뱀장어	39
그림 19 AA 배터리보다 가벼운 나노 벌새	40
그림 20 일반적인 금의 모습과 크기별로 색이 변하는 금 나노입자	43
그림 21 단일벽 나노튜브, 이중벽 나노튜브 및 다중벽 나노튜브	45
그림 22 국가나노기술계획의 전 세계적인 확산(1990~2011년)	62
그림 23 상위 10위권 국가들의 나노기술에 대한 국가적 투자	67
그림 24 상위 10위권 국가들의 나노기술에 대한 기업 지출	68
그림 25 나노기술분야 특허출원 수, 연도 및 출원인 국적별(1990~2009년)	69
그림 26 나노기술의 우선특허출원 수, 연도 및 출원인 국적별(1990~2009년)	70
그림 27 나노기술 관련 논문에 대한 전 세계의 인용 국가별 백분비	70
그림 28 OECD 및 주요 동반국의 연구개발 현황(2011년)	72
그림 29 ICT, 생명공학, 나노기술 분야의 혁신 핫스팟(1998~2000년, 2008~2010년)	73
그림 30 미국 NNI 추진 체계	84
그림 31 땀으로 건강상태를 모니터링하는 팔목 밴드 센서	85
그림 32 쿼드콥터로 제작된 드론	88
그림 33 국가별 나노기술 관련 출판건수	91
그림 34 주요국의 SCI 논문건수와 순위 도표(2000~2013년)	92
그림 35 주요국의 고인용 논문 수와 H인덱스	93
그림 36 중국의 제3차 유인 우주선 선저우 7호의 우주복	98
그림 37 최근 10년간 일본의 나노기술 관련 성과	111
그림 38 일본의 나노기술분야 30대 중점기술영역 발전 로드맵	112
그림 39 유럽연합이 2025년까지 집중할 나노기술 로드맵	119
그림 40 독일의 나노기술 지원 현황(2009~2011년)	124



요 약

나노기술은 현대사회를 바꿀 수 있는 잠재력을 지닌 민군겸용 기반기술로서, 재료 및 제조, 의약 및 건강, 운송, 국방, 환경 및 에너지, 바이오기술과 농업 등 그야말로 다양한 분야와의 융합을 통해 새로운 가치를 창출하는 첨단기술이다. 또한 타 기술의 혁신과 발전, 신산업 창출을 위한 지렛대 기술로서도 각광을 받고 있다. 따라서 21세기 국방, 경제 및 기술력에서 세계적인 경쟁력을 갖추기 위해서는 나노기술에서의 기술주도권 확보가 매우 중요한 요인으로 부각되고 있다.

기술력이 상대적으로 낙후되고 기존 일상적 기술에 대해서도 실적이 미미한 국가는 오직 혁신적인 신기술을 개발하고 이를 효율적으로 사용하는 것만이 기존의 기술 선진국을 크게 앞지를 수 있는 유일한 방법이라고 판단된다. 그러나 신기술은 초기 적당한 분야의 적용을 시작으로 점차 확산되어 발전될 수 있도록 하는 상당히 폭넓은 국가적 기반을 갖추고 사회가 해당 기술을 기꺼이 수용하려고 해야만 경제와 사회에 진정한 혁신을 가져올 수 있다. 나노기술은 전 세계적으로 국방, 경제, 사회뿐만 아니라 한 국가의 국제사회에서의 지정학적 서열도 변화시킬 수 있는 혁신적인 잠재력을 지니고 있다. 2000년에서 2014년 사이, 60여 개 이상의 국가들이 미국을 따라 나노기술계획을 수립했다. 이러한 국가들은 유럽과 일본 같은 선진산업국가들과 러시아, 중국, 브라질, 인도와 같은 신흥경제국 그리고 네팔과 파키스탄과 같은 개발도상국에 이르기까지 다양하다.

국가 안보, 리더십 및 이를 유지하기 위한 수단과 관련하여 나노기술과 연관된 위험을 이해하기 위해, 본 보고서는 일부 나노기술의 군사적 응용 및 나노기술의 학제적 성격을 고찰하는 것으로 시작하고자 한다. 나노기술의 정의 및 데이터상의 어려움이 나노기술의 안보, 시장, 안전, 보건 및 환경적 영향에 대한 위험평가를 어렵게 한다. 이러한 어려움의 원인은 안보목적으로 나노기술을 통제하려는 다자간 및 국가적 노력의 부족으로 판단된다. 또한 전 세계적으로 나노기술에 대한 국가적 노력을 기술하면서, 미국을 비롯하여 중국, 일본, 러시아, 유럽연합, 독일, 영국 및 브라질 등의 사례를 간략히 살펴볼 것이다. 나노기술이



가지는 기술적 기습(technological surprise)과 한 국가의 지정학적 위치를 와해 또는 상승시킬 수 있는 잠재력을 이해하기 위해, 기술적 우월성에 대한 정부의 통제를 형성하는 요인들을 바탕으로 이러한 실증적 결과에 대해서 기술하였고 이어 결론적으로 나노기술이 과연 혁신적 인가에 대하여 원론적이고 1차적인 평가를 하고 아울러 현 시점에서 가능한 주요 정책적 권고사항을 제시하였다.

제 1 장

서 론



- 나노기술에 대한 전 세계적 노력
- 보고서의 구성과 주안점

제1장
서론



1 제1장 서론

나노기술에 대한 전 세계적 노력

주요 선진국들은 경제위기 극복, 일자리 창출 등 글로벌 도전과제의 해결을 위한 나노기술 연구 성과와 산업화 연계 및 융합 신산업 창출 정책을 꾸준히 추진하고 있다. 또한 국제 정치무대에서 더 많은 부와 영향력을 바라는 국가들은 종종 차세대 ‘기술 혁명’으로 묘사되는 나노기술 연구에 뛰어들고 있다. 나노기술은 현대사회를 바꿀 수 있는 잠재력을 지닌 기반기술로서, 전쟁에서 산업디자인, 의학, 사회 및 인간공학에 이르기까지 방대한 분야에 적용이 가능하다. 나노기술은 단지 크기의 문제가 아니라 나노스케일에서 자연스럽게 나타나는 독특한 물리적, 화학적, 생물학적 그리고 광학적 특성과 그러한 효과를 조작하고 조절할 수 있는 능력에 관한 문제이다. 이 기술은 나노스케일에서 물리, 화학, 생물학, 재료과학 및 공학과 관련된 광범위한 새로운 과학 분야이다. 따라서 나노기술에서의 기술적인 주도권 확보는 21세기 국방 및 세계적인 경쟁력을 갖추기 위해서 매우 중요하다고 할 수 있다.

기술의 변화는 국가의 번영과 안보에 대한 희망과 우려를 동시에 안겨준다. 이것은 부(富), 생산성과 삶의 질 그리고 인간수명에 있어서 엄청난 향상이 있으리라는 전망을 가능하게 한다. 그러나 한편으로는 혁명적 기술의 변화로 인하여 국가적 및 세계적 산업이 완전히 파괴될 수도 있으며 국가들의 상대적인 부를 극적으로 변화시킬 수도 있다. 또한 기술적 변화는 전쟁과 국가 간 군사력의 판도를 완전히 바꿀 수 있으며, 국가뿐 아니라 비국가 단체까지도 힘을 실어주게 되어 인간의 삶과 환경을 황폐하게 만들 수 있다. 나노기술은 기술혁명의 토대로서 중앙정부의 상상력을 사로잡았다. 전 미 국방부 부차관 클리포드 라우는 나노기술이 가진 파괴적 잠재력이 군사에 새로운 혁명을 낳고 있다고 언급하면서, 나노기술이 화약의 발명보다 더 중요하다고 말했다.¹⁾ 전 미국 관리는 나노

1) Barnaby J. Feder, "Frontier of Military Technology is in the Size of a Molecule," New York Times, 2003년 4월 10일.

기술이 핵무기보다 힘의 균형을 급속도로 바꿀 수 있는 잠재력이 더 크며 화약의 발명보다 더 크게 전쟁의 판도를 바꿀 것이라고 말했다.²⁾

러시아 대통령 블라디미르 푸틴은 러시아가 새로운 첨단기술 군비 경쟁에서 뒤처지지 않기 위해 나노기술을 활용하는 혁명군이 필요하다고 강조했다.³⁾ 나노기술의 가장 염려스러운 양상 중 하나는 새로운 생물학적, 화학적 또는 나노물질 무기 및 운반 메커니즘이 가진 잠재력이다.⁴⁾ 정부들은 경쟁력을 위한 ‘스마트한 목표’의 일환으로 나노기술과 이머징 테크놀로지(Emerging Technology)를 통합했으며 이 기술들에 상당한 자금을 투자하고 있다. 미국 정치인들은 전 세계 시장에서 미국의 경제적 경쟁력은 활기 있고 혁신적인 나노기술 공동체를 개발하는 데 달려있다고 주장했다.⁵⁾ 2005년, 새천년개발목표 유엔 전담반은 나노기술이 기아를 줄이고, 보건을 증진하며 식수위생을 개선하고, 재생 에너지를 개발하고 환경을 개선할 수 있는 3대 플랫폼 기술 중 하나라고 선전하면서, 개발도상국이 나노기술 프로그램을 신설하도록 권고했다.⁶⁾ 2001년부터 2014년까지 그러한 전망에 고무된 60여 개국이 넘는 국가들이 미국의 선례를 따라 나노기술계획을 수립했다. 이러한 국가들은 유럽과 일본 같은 선진산업국가들과 러시아, 중국, 브라질, 인도와 같은 신흥경제국, 그리고 네팔과 파키스탄과 같은 개발도상국에 이르기까지 다양하다. 최근에는 말레이시아와 싱가포르가 국가 차원의 나노기술계획을 수립했으며, 가장 최근에는 네팔, 스리랑카 및 파키스탄과 같은 국가에서도 이러한 계획을 세운 것으로 여겨진다.⁷⁾

2) David Jeremiah, "Nanotechnology and Global Security." (Palo Alto, CA; 4th Foresight Conference on Molecular Nanotechnology), 1995년 11월 9일; 클리포드 라우, 기초연구에 관한 미 국방부 부차관, (Feder 2003)에서 인용.

3) Vladimir Putin, "Putin Warns of New Worldwide Arms Race,"에서 인용, www.chinaview.cn, 2008년 2월 8일.

4) Margaret E. Kosal, Nanotechnology for chemical and biological defense. (New York: Springer, 2009).

5) George Allen, "The Economic Promise of Nanotechnology," *Issues in Science & Technology* (2005, 여름). Online: <http://issues.org/21-4/allen/>.

6) Juma, Calestous, Lee Yee-Cheong, 기술 및 혁신 유엔 밀레니엄 프로젝트, 과학에 관한 전담반, 유엔 개발 프로그램, *Innovation: applying knowledge development*, Calestous Juma and Lee Yee-Cheong 편집, 기술 및 혁신 유엔 밀레니엄 프로젝트, 과학에 관한 전담반, 유엔 개발 프로그램, *Innovation: applying knowledge development*, London; Sterling, Va.: London; Sterling, Va.: Earthscan (2005); Salamanca-Buentello, Fabio, Deepa L. Persad, Erin B. Court, Douglas K. Martin, Abdallah S. Daar, and Peter A. Singer, "Nanotechnology and the Developing World (Policy Forum)," *PLoS Medicine* 2 (5), 2005; P. Singer., F. Salamanca-Buentello, and A. Daar, "Harnessing Nanotechnology to improve global equity: the less industrialized countries are eager to play an early role in developing this technology; the global community should help them," *Issues in Science and Technology* 21 (4), 2005.

7) Mihail Roco, *Nanotechnology research directions for societal needs in 2020 retrospective and outlook*, Chad A. Mirkin, Mark C. Hersam 및 SpringerLink 편집 (미국: 도르드레히트; 뉴욕: 미국: World Technology Evaluation Center; 도르드레히트; 뉴욕: Springer, 2011a); Donald Maclurcan, "Nanotechnology and Developing Countries - Part 2: What Realities?"

2011년, Lux Research는 2010년에 나노기술을 위해 쓰인 전 세계의 자금 총액이 (공공 자금과 민간자금) 178억 달러에 달하며, 그 중에서 기업의 연구개발비가 96억 달러에 이른다고 추산했다. 2011년 한 해 동안, 정부들은 나노기술에 약 100억 달러를 투자했으며, 2012년에서 2015년 사이 연간정부자금의 성장률이 20%가 될 것으로 예상된다.⁸⁾ 미국 정부만 하더라도 2001년에서 2014년까지 투입한 나노기술 자금이 거의 200억 달러에 달한다.⁹⁾ 중국 정부의 나노기술에 대한 지원은 2004년 이래 연간 30~45%의 비율로 성장해온 것으로 추산된다.¹⁰⁾ 2015년까지 나노기술 R&D를 위한 기업 및 민간 기금을 전부 합치면 1,500억 달러가 추가될 것으로 추산된다.¹¹⁾

세계화 시대에서 세계 각국들이 기술 혁신의 스핀온(spin-on, 군사분야에 적용) 및 스핀오프(spin-off, 민간기업으로 이전) 전략을 모두 추구하고 있기 때문에, 거의 모든 첨단 기술은 민군겸용으로 간주될 수 있다. 정부들은 안보 및 정부통제와 경제적 경쟁력 및 혁신을 위한 개방 사이에서 균형을 유지해야 하는 입장에 놓여 있다. 그러나 국가적인 군사 및 경제 우위가 글로벌 기업(R&D) 및 생산 제휴의 세계에서 만들어지고 유지될 수 있는지는 아직 논란의 대상이다. 국가들이 혁신적인 이머징 테크놀로지에서 기술적 주도를 형성하고 유지할 수 있다면, 그러한 국가들의 군사적 및 경제적 경쟁력은 미국을 포함하는 동시대의 군사 및 산업 리더들을 앞지르고 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 국제적으로 나노 안전성(EHS)¹²⁾ 문제가 나노기술 개발 못지않게 나노기술 실용화를 위한 주요 이슈로 부각되고 있으며 이에 따른 관련 규제 움직임도 점차적으로 가시화되고 있다.

AzONano—Online Journal of Nanotechnology 1 (2005); ETC Group, “Geopiracy: The Case Against Geoengineering” (2010); X. Li et al., “Worldwide Nanotechnology Development: A Comparative Study of USPTO (1976–2004),” *Journal of Nanoparticle Research* 9:977–1002 (2007)

8) John F. Sargent, Jr., “Nanotechnology: a policy primer” (Congressional Research Service Report, 2010); Cientifica, “Half Way to the Trillion Dollar Market? A Critical Review of the Diffusion of Nanotechnologies, Market Report, Research Policy” (2013); Cientifica, “Global Funding of Nanotechnologies and Its Impact” (2011).

9) NNI, “Frequently Asked Questions,” 미 국가나노기술계획(NNI), 2014.

10) Anne L. Clunan, U.S. Office of Science and Technology Policy (OSTP) Nanoscale Science, Engineering, and Technology (NSET) Subcommittee and the National Nanotechnology Coordination Office (NNCO)의 고위급위원과의 개인적 의사소통, 워싱턴 DC, 2013년 5월 30일.

11) Cientifica, “Global Funding of Nanotechnologies and Its Impact” (2011).

12) Environmental Health Safety

보고서의 구성과 주안점

현재로서는 나노기술이 진정으로 혁신적인 기술인지 아니면 군사 및 민간응용에 점진적인 개선을 줄 뿐인지 여부는 매우 불확실하다. 그러나 나노기술 분야에서 국가적 노력과 기술적 혁신에 관한 문헌을 조사하여 나노기술이 가지는 잠재력, 위험 및 관리에 대한 일차적인 평가를 위한 틀을 제공해야 할 필요가 있다. 이러한 차원에서 본 보고서는 나노기술이 경제적 패러다임을 무너뜨리고 국가가 국제적으로 지닌 경제 및 정치 군사적 위상에 일대 혁신을 일으킬 수 있는 잠재력을 가졌는지에 대한 조사 결과를 분석하였다. 또한 그러한 노력의 일환으로 상업적 및 군사적 나노기술이 미국을 포함한 각국의 국가적 안보와 경제적 번영에 위협이 되는지 아니면 기회가 되는지에 대한 종합적인 분석과 다양한 국가적 나노기술 개발 전략 및 주요 국가들에서 대두되는 나노기술 거버넌스 구조를 분석하였다.

또한 나노기술 분야에서 현재의 국가적 노력과 기술 혁명, 그리고 기술적 혁신에 관한 문헌에 대한 조사에 착수하여 나노기술이 군사 및 경제적 패러다임을 무너뜨리고 국가가 국제적으로 지닌 경제 및 정치 군사적 위상에 일대 혁신을 일으킬 수 있는 잠재력을 가졌는지를 평가할 것이다. 또한, 이머징 테크놀로지 및 민군겸용으로서의 나노기술에 대한 위험 평가와 관리에 있어서 도전과 기회를 평가하고, 나노기술의 적용에서 발생하는 기술적 기습(technological surprise)의 가능성을 평가할 것이다. 본 보고서는 아래와 같은 4가지 핵심질문을 바탕으로 구성된다.

- 나노기술은 무엇인가?
- 나노기술 거버넌스 상태란 무엇인가?
- 전 세계 나노기술 연구개발(R&D) 상황은 어떠한가?
- 나노기술 혁명이 과연 우리를 놀라게 할 것인가?

본 보고서에서는 명확한 답을 제공하지 않은 채 단지 나노기술을 평가하는 것과 관련된 중점적인 문제들만을 강조하고 있어, 제시되는 결과들은 일차적인 것으로만 간주되어야 한다. 따라서 이에 대한 명확한 답을 얻기 위해선 보다 많은 연구가 필요하다. 부분적으로,

이러한 잠정성은 이머징 테크놀로지에 대한 조사를 둘러싼 불확실성을 반영한다. 좀 더 구체적으로 말해서, 이것은 나노기술에 대한 정의와 측정에 대한 합의 기반이 결여된 것에서 연유한다. 그러므로 종종 비교가 불가하고 질적 문제가 있는 기존의 자료를 평가하는 데는 상당한 어려움이 따를 수밖에 없다. 그러한 상황은 나노기술의 잠재력을 부풀리거나 과소평가하게 만들고 보다 명확한 해답을 제공하지 못하도록 가로막을 수 있기 때문이다. 본 보고서는 매우 적극적으로 이용할 수 있는 자료와 학자 및 정책 전문가들의 평가를 바탕으로 분명한 평가를 제시하고자 하였다.

나노기술을 평가하는 데 따르는 어려움과 요구조건이 2장의 주제이다. '나노기술이란 무엇인가?'라는 질문은 간단한 대답으로 끝날 수 있는 문제가 아니다. 이 부분에서 집중적으로 다룰 부분은 나노기술의 군사적 응용과, 나노 적용 기술을 다루는 규제적인 정의와 기준을 세우기 어렵게 만드는 정의 및 측정상의 문제를 포함하였다.

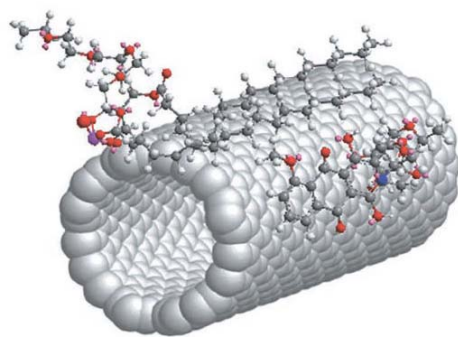
거버넌스에 대해 다루게 될 3장은 민군겸용기술에 대한 다국적, 국가적 및 상업적 제도를 조사하고, 나노기술에 대한 새로운 기술 통제 또는 다국적인 거버넌스 메커니즘을 신설하려는 노력을 찾을 수 없다는 점을 밝힐 것이다.

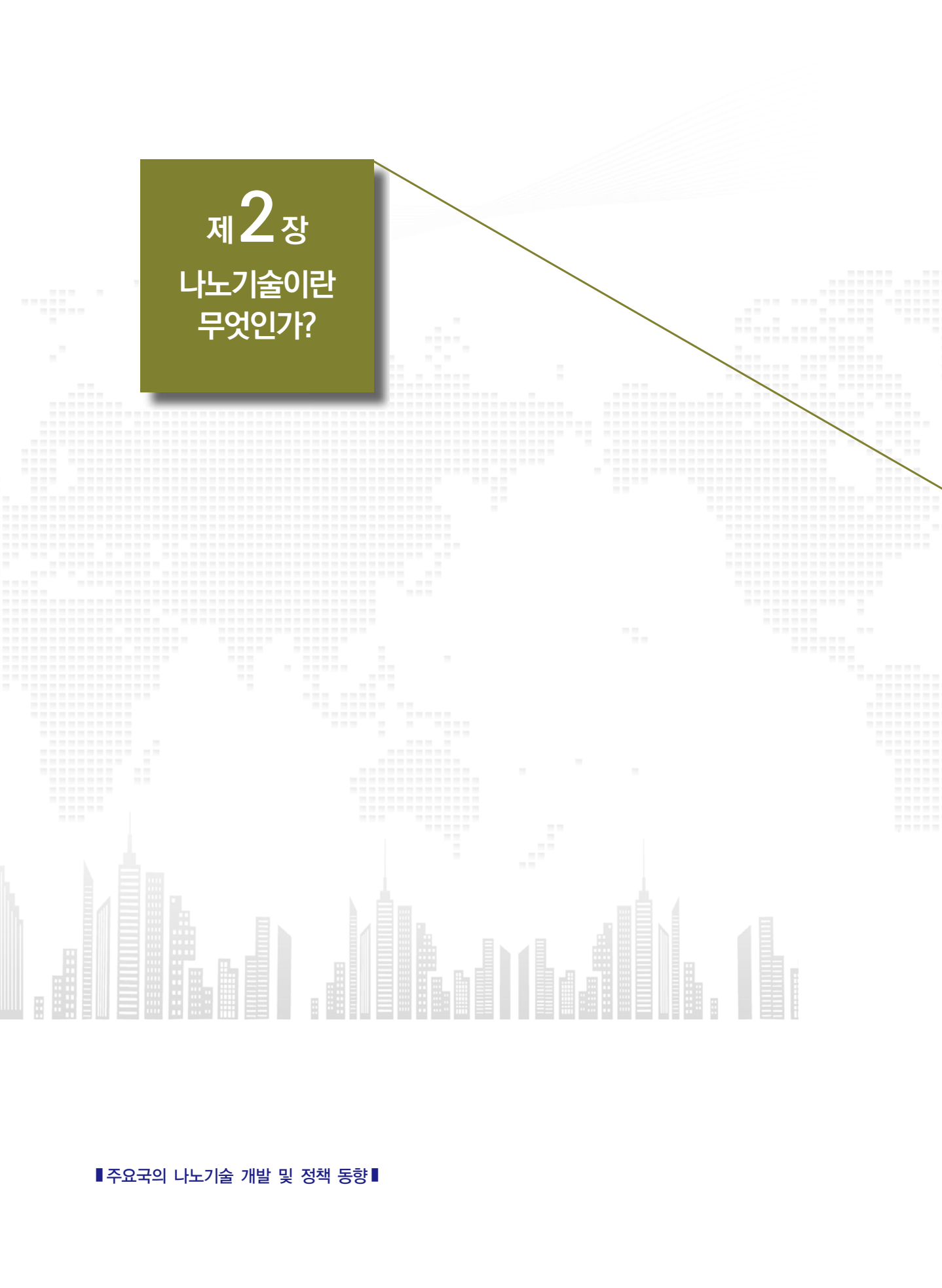
4장에서는 나노기술에 대한 국가적 노력과 국가적 나노기술계획이 급속히 확산되고 있는 점을 전 세계적으로 개관하고, 5장에서는 미국, 중국, 일본, 인도, 러시아 및 유럽, 독일, 영국 등 주요국의 나노기술에 대한 접근방식을 간략히 언급하며, 특히 나노기술 개발에 대한 전략적 경제 분야 및 노력을 규제하기 위한 중국의 접근방식을 기술할 것이다.

6장에서는 기술적 혁신의 선두로 나아가기 위한 국가적 노력을 형성하는 현 시대의 상황을 조명할 것이다. 나노기술이 기술적으로 뒤쳐진 국가들로 하여금 미국이 가진 경제 및 정치적 우위를 박탈하게 할 수 있을지를 기술하였다.

마지막 절에서는 기술적 기습(technological surprise)의 문제를 다루기 위해 와해성 기술과 혁명적인 기술의 예상결과를 살펴보고 나노기술의 혁명적인 잠재력에 대한 타당한 근거가 있는지에 대한 잠정적인 평가를 내렸다.

끝으로 본 보고서는 정책적인 권고사항과 앞으로 연구가 필요한 분야에 대한 제안으로 결론을 기술하였다.





제 2 장 나노기술이란 무엇인가?

- 나노기술의 의미
- 나노기술의 응용분야
- 나노 군사과학기술
- 나노기술 정의하기
- 왜 정의가 중요한가
- 데이터의 문제
- 척도의 중요성

제2장
나노기술이란 무엇인가?



II 제2장 나노기술이란 무엇인가?

나노기술의 의미

나노는 희랍어로 난쟁이를 뜻하는 나노스(nanos)에서 유래한 말로서 10억 분의 1 (10^{-9})을 나타내는 단위이다. 나노기술은 원자 혹은 분자를 적절히 결합시켜 새로운 미세구조를 만듦으로써 기존 물질을 변형 혹은 개조하거나 새로운 물질을 창출하는 것을 목표로 삼는다.¹³⁾ 미국의 국가나노기술계획(National Nanotechnology Initiative)에서는 “나노기술은 나노스케일, 즉 대략 1과 100나노미터 사이의 크기인 나노스케일에서 물질을 이해하고 통제하는 것으로, 이러한 크기에서 발생하는 독특한 현상이 새로운 응용을 가능하게 한다. 나노스케일의 과학, 공학 및 기술을 포함하는 나노기술은 이러한 길이의 크기에서 물질의 영상화, 측정, 모델화 및 조작을 수반한다.”¹⁴⁾라고 기술하고 있다. 1나노미터는 십억 분의 1미터이다(규모로 따지면, 1나노미터와 1미터의 크기 비율은 대략 구슬과 지구 행성 정도가 될 것이다).

13) 한국민족문화대백과사전

14) “What it is and how it works,” 미 국가나노기술계획(NNI), 2012년 5월 20일.

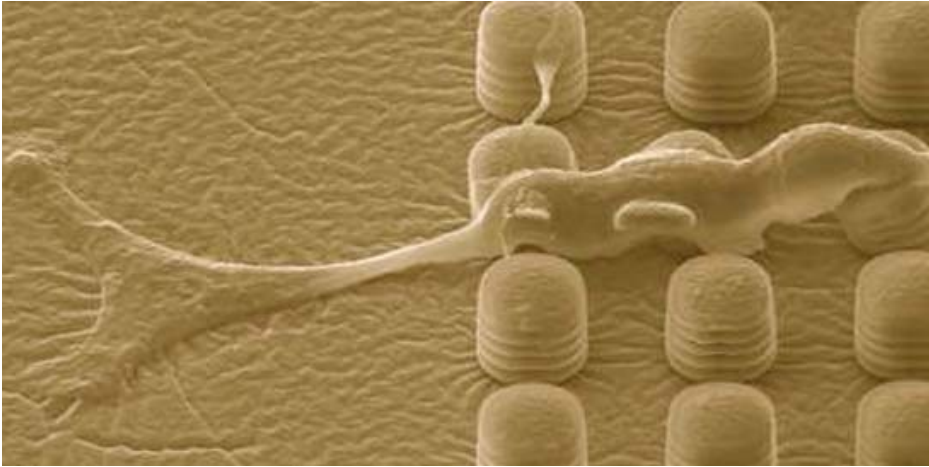


그림 1 세포의 생존환경을 규명하기 위하여 나노수준에서 만든 주름과 돌기 위에 세포를 올려놓고 그 움직임을 관찰한 장면

나노기술의 기본 개념은 1959년 캘리포니아 공과대학에서 개최된 미국 물리학회 연례 모임에서 노벨상 수상자인 리처드 파인만(Richard Feynman)이 “극소의 공학 분야(바다)에 무한한 가능성이 있다”는 주제 연설을 통해서 나노 개념을 최초로 언급하면서 성립되었고, 미래 나노기술의 발전을 예견하였다.¹⁵⁾ 당시 파인만은 기존의 물리학 법칙이 허용하는 한도 내에서 브리태니커 백과사전에 들어 있는 모든 내용을 하나의 머리핀에 기록한다 든가, 초고배율 현미경의 개발, 컴퓨터의 소형화 등 현대 나노기술의 기본이 되는 많은 개념들을 제안했고, 실제로 이미 대부분 실현되었다. 예를 들어 2007년 삼성전자가 세계 최초로 30나노 64기가 플래시 메모리를 개발했다. 30나노는 머리카락 두께의 4,000분의 1 정도의 초미세 기술이며, 64기가 용량은 세계 인구 65억 명의 10배에 해당하는 640억 개 메모리 저장소가 손톱 크기의 반도체칩에 집적되어 있다. 이 정도의 용량이면 영화 80편, 800년 분량의 신문 정보를 저장할 수 있다. 그러나 1980년대 말이 되어서야 과학자들이 원자 및 나노스케일에서 물질을 조작하는 것을 탐구하는 데 필요한 도구와 물질의 일부를 개발할 수 있었다. 정보처리 기술의 발전에 힘입어 물리학, 화학, 생물학이 나노스케일 수준에서 통합되면서 나노과학이 탄생하게 되었다. 나노기술은 단지 크기의 문제가

15) R.P. Feynman, “There’s plenty of room at the bottom (data storage)” *Journal of Microelectromechanical Systems* 1 (1): 60-66, 1992.

아니라 나노스케일에서 자연스럽게 나타나는 독특한 물리적, 화학적, 생물학적 그리고 광학적 특성과 그러한 효과를 조작하고 조정할 수 있는 능력에 관한 문제이다. 이 기술은 나노스케일에서 물리, 화학, 생물학, 인지과학, 재료과학 및 공학과 관련된 광범위한 새로운 과학 분야이다.



그림 2 매크로, 마이크로 및 나노사이즈의 비교

나노기술의 응용분야

나노기술은 대부분의 분야 및 차원(기술, 제품 및 산업)에서 적용 가능한 기반 공유 기술로 새로운 산업, 신규시장을 창출할 수 있는 모태산업적 특성을 가지고 있다.

또한 일반목적기술의 특성을 갖고 있어 활용 여부에 따라 기술적·산업경제적 파급 효과가 크게 달라질 수 있어 기존시장 및 주력산업의 패러다임을 바꿀 수 있는 와해성기술(Disruptive Technology)이라 할 수 있다. 물체가 나노미터 크기로 작아지면 구조나 성질이 달라질 뿐 아니라 표면적도 달라진다. 가장 대표적인 예가 은 나노입자이다. 은에 살균

효과가 있다는 것은 옛날부터 잘 알려진 사실이다. 그런데 최근에는 입자를 나노미터 크기로 만들어 아주 적은 양의 은을 사용하면서도 은의 표면적을 크게 하여 살균 효과를 증대시키는 기술이 세탁기, 양말, 화장품 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 또한 나노 물질들은 표면적이 크게 증가하여 촉매 효과를 높이는데, 자동차 배기가스를 정화하거나 발전소 폐가스에 활용되기도 한다.

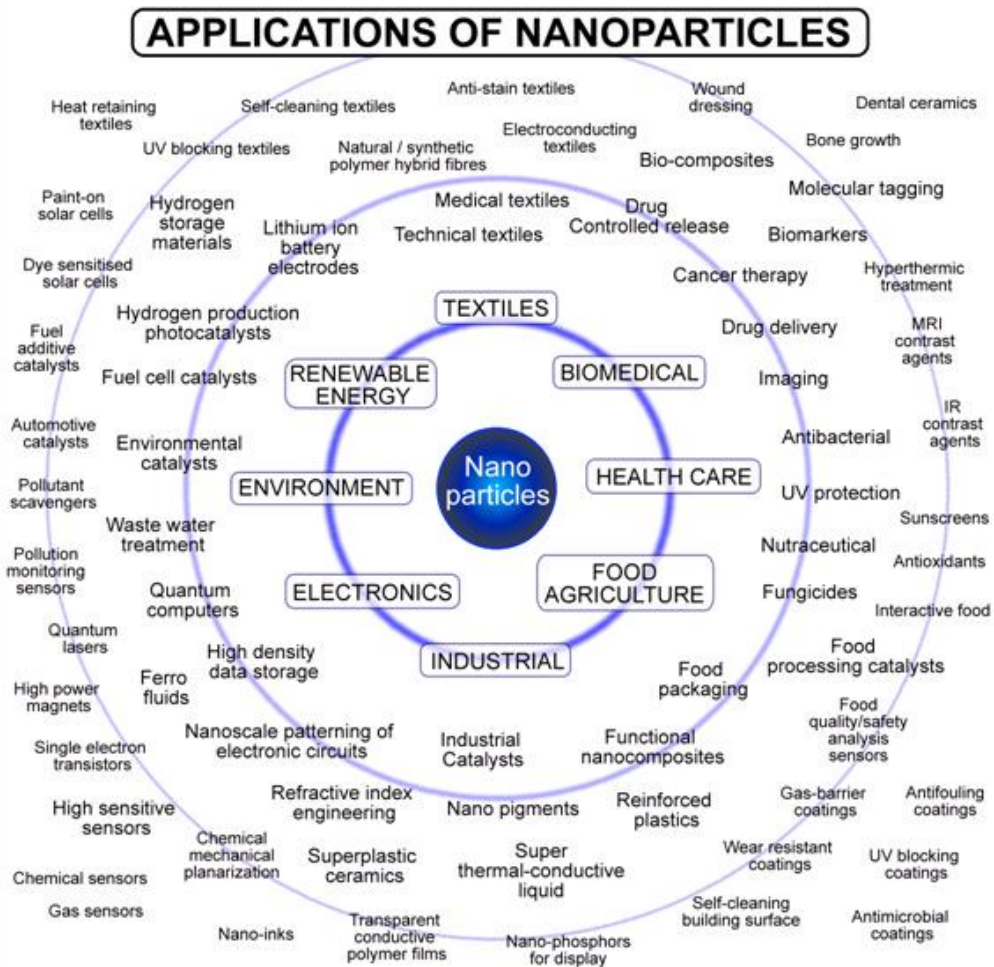


그림 3 나노입자의 응용 분야

또한 벽지나 페인트의 형태를 띠고 있지만 유기적으로 성장하는 나노 태양광 전지, 적외선과 함께 사용하여 암 종양을 파괴하는 한 겹의 금박으로 덮여있는 실리콘 나노입자, 기름유출이 일어난 경우 물과 기름을 분리하기 위한 고효율의 종이 같은 ‘스펀지’를 형성하는 실리콘으로 코팅된 나노 와이어, 그리고 물을 정화, 염분제거 및 소독하거나 에너지를 보다 효율적으로 저장할 수 있게 하는 나노 제품들이 있다.¹⁶⁾ 또한 1991년 일본전기회사(NEC) 연구진이 탄소 6개로 이루어진 육각형 벌집 모양의 속이 비어 있는 긴 대롱 형태의 탄소나노튜브를 발견했다. 직경이 수 나노미터인 탄소나노튜브는 전기전도율이 구리와 비슷하고, 열전도율은 자연계에서 가장 뛰어난 다이아몬드와 같으며, 강도는 철강보다 100배나 뛰어나다. 탄소나노튜브를 엮으면 엄청나게 튼튼한 실을 만들 수 있는데, 그 실의 인장강도는 강철로 된 실의 500배에 달한다고 한다. 그래서 미국항공우주국(NASA)은 우주 공간에 엘리베이터를 설치하는 목표를 진지하게 검토 중이다. 먼저 로켓을 이용해 나노튜브 합성물질로 만든 밧줄을 우주 궤도에 올린다. 밧줄의 한쪽 끝을 고도 수천 킬로미터에 놓고 다른 쪽 끝은 태평양 적도 부근에 고정하면, 밧줄은 지구의 자전에 의한 원심력으로 팽팽하게 당겨질 것이다. 그러면 이 밧줄을 이용하여 인간과 물자들을 우주 궤도로 운반할 계획이다.

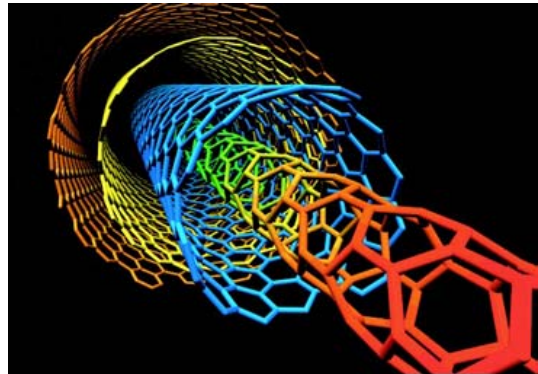


그림 4 탄소나노튜브의 배열

플러렌(Fullerene)¹⁷⁾과 탄소나노튜브는 높은 강도와 탄성 때문에 이미 많은 분야에서 활용되고 있다. 예를 들어 스포츠 용품 중 스키, 야구배트, 테니스라켓, 골프채, 자전거 프레임 등에 사용되고 있다. 전자제품 분야에서도 반도체, 평판 디스플레이, 배터리 등에 활용되고 있다.

16) Robert Falkner and Nico Jaspers, “Regulating Nanotechnologies: Risk, Uncertainty and the Global Governance Gap,” *Global Environmental Politics* (2012), p. 35.

17) 1985년 탄소원자 60개가 축구공 모양으로 결합된 특수한 분자구조(C60)가 발견되었는데 이를 비슷한 모양의 동을 설계한 건축가 버킨스터 플러(Richard Buckminster Bucky Fuller)의 이름을 따서 ‘플러렌’이라고 한다.

미래에 보여 줄 또 다른 나노기술 중의 하나는 물질의 복제나 재생기술이다. 나노기술을 이용하면 이론상 어떤 물체라도 만들어 낼 수가 있다. 멸종된 동식물의 복원이 가능하며 식량도 빠르게 대량으로 생산해 낼 수 있어 미래에는 식량 걱정을 할 필요가 없게 될 것이다. 또한 나노기술을 이용하면 줄기세포 기술보다도 더 빠르고 완벽한 복제가 가능하며, 손상된 인체부위도 빠르게 치료, 복원이 가능해진다. 인류의 삶의 질과 수명연장 등을 가능하게 할 수 있는 나노의학(nanomedicine)도 급속한 발전을 이루고 있는 분야이다.

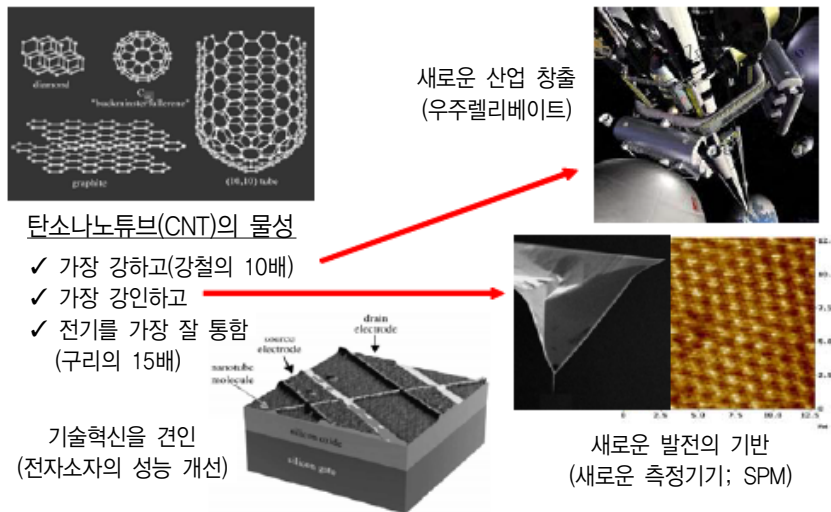


그림 5 탄소나노튜브의 활용 분야

나노의학은 나노기술을 이용하여 질병을 진단, 치료하거나 손상된 조직을 복구하는 등 나노 크기의 분자수준으로 개발된 입자 또는 이를 기반으로 하는 기술을 의학에 접목하는 분야이다. 나노바이오센서, 나노분자영상, 나노약물전달체, 나노조직공학, 나노기기 등 다양한 분야에 활용될 수 있다.

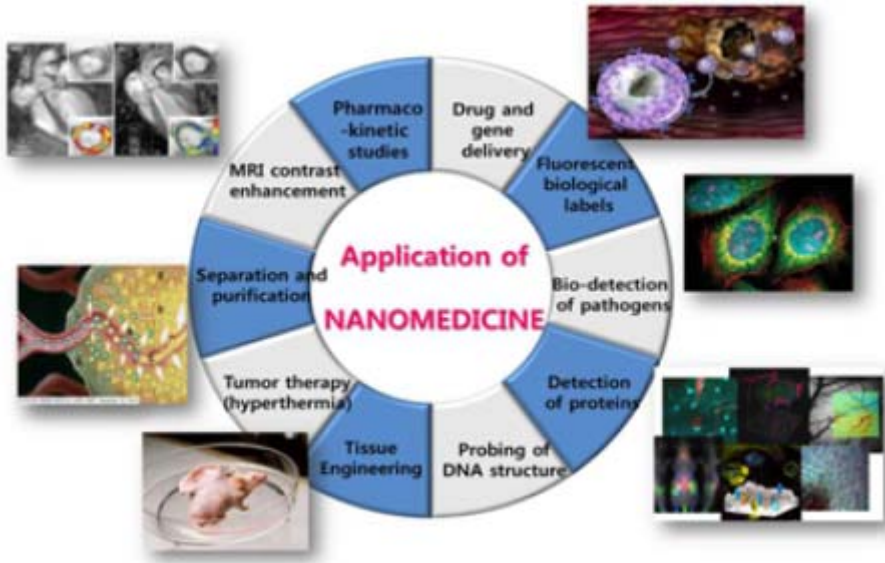


그림 6 나노의학의 응용 분야

점차적으로 암, 치매, 심혈관질환, 관절염 등 난치성 질환의 조기 진단 및 치료의 난제를 극복할 수 있는 돌파기술로 부상하고 있다. 예를 들어 진단 및 치료용으로 약물이나 유전자 등을 전달하는 기술, 병원체를 탐지하거나 질환 특이적 표지자(標識子, marker)의 표적화 기술 등에 적용이 확대되고 있다. 2014년 러시아 과학자들이 생체치료 나노의료 기술 개발에 주요한 이정표를 남겼다. 이 나노의료기술은 생화학반응을 이용한 세계 최초의 논리적 산출을 도입한 연구 성과로 치명적인 질병에 대한 진단 및 치료를 가능하게 하는 의료기술의 토대가 될 것으로 전망하고 있다. 네이처 나노테크놀로지에 게재된 내용을 보면 생체세포의 분할을 도우며 전기치료요법에서 생화학시스템을 가동, 전류 또는 전압을 조작해 신체에 긍정적인 영향을 미치는 분비물 형성을 돕는 방식으로 치료를 하는 방식인데 과학자들은 이번 연구로 각각의 암세포에 상호영향을 미치게 하는 가능성을 제시했다고 판단하고 있으며 상용화가 되면 건강한 신체조직과 기관에 미치는 영향을 최소화하면서 암세포만 선택적으로 파괴할 수 있을 것이라고 내다봤다. 그 밖에 휘어지는 디스플레이, 철근기둥이 필요 없는 건축물, 성형화장품 등 모든 산업의 기반이 되는 횡단적 기반기술로 사용될 것이다.

표 1 나노융합의 주요 적용 분야

분야	설명	주요 제품
나노소재	재료의 제어·조합·합성을 통해 탁월한 신기능의 소재 개발	• 그래픽 터치 패드 • 전자식 색기변 소재
나노소자	기존 IT소자의 물리적 한계를 극복한 혁신적 소자	• 유연 메모리 소자 • 양자점 LED
나노바이오	나노스케일의 생명현상 규명 및 바이오 의료분야 활용	• 고감도 자가진단 칩 • 나노구조 줄기세포 배양기
나노에너지·환경	고효율화, 저비용화 등 기술적 이슈해결	• 연료 감응형 태양전지 • 정수용 유기나노 필터
나노공정·장비	나노측정, 공정, 장비 개발로 첨단 제조기술 경쟁력 강화	• 나노 패터닝 장비 • 산업용 원자현미경

나노 군사과학기술

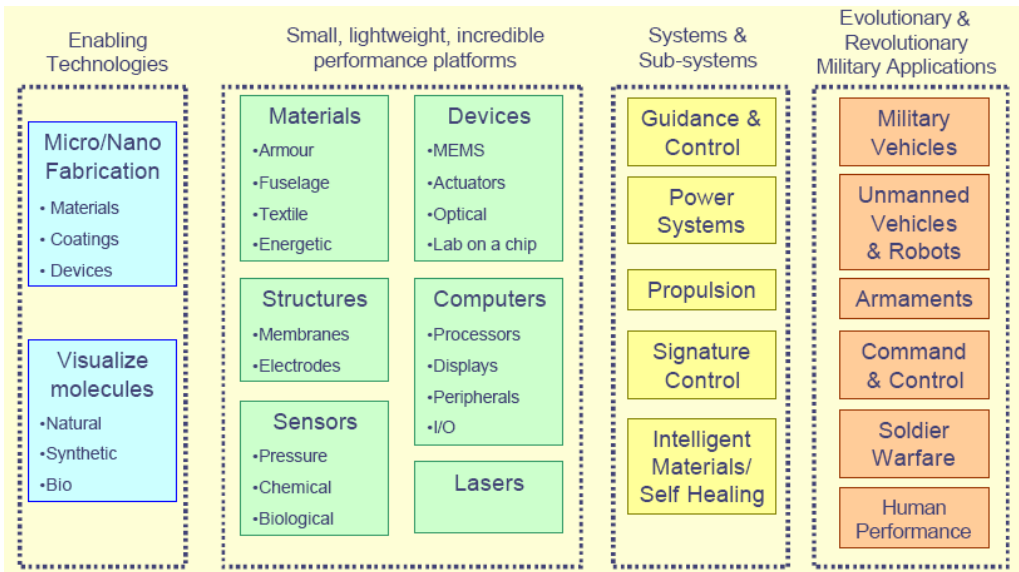
냉전시기 동안 상호확증파괴(MAD¹⁸⁾) 정책은 누가 먼저 미사일을 쏘았는지 상관없이 쌍방을 완전히 파괴하기로 약속을 함으로써 미국과 소련 두 국가 간의 핵전쟁을 피할 수 있게 했다. 일부 전문가는 군에서 나노기술을 사용하는 것이 이와 유사한 억지효과를 갖게 될 것이라고 말한다. 일부 미래학자들은 나노기술이 핵전쟁보다 더 무시무시한 결과를 야기할 것이라고 우려를 나타낸다. 가령 어떤 국가나 테러집단이 기하급수적으로 자기복제를 할 수 있는 엄청난 수의 악성 나노로봇을 쏟아내 미래를 가정해 볼 수 있다.

나노기술의 선구자인 에릭 드렉슬러(Eric Drexler)는 자신의 저서 『창조의 엔진(Engines of Creation)』에서 “나노복제기로 모든 생명체를 파괴하려면 평범한 요소로 만들어진 작은 알갱이 하나만 있으면 될 것이다.”라고 주장하였다. 이러한 어마어마한 힘은 각별한 주의를 기울여 행사되어야 한다. 그렇지 않을 경우, 인류를 전멸시키는 기계를 그린 어두운 공상과학 시나리오가 우리의 미래가 될 수도 있다. 아이러니하게도 나노기술의 발전으로 인해 제기되는 바로 이러한 위협이 전 세계 국가들로 하여금 미래 전쟁 시 교전을 꺼리도록 만들 수 있다. 물론, 원자폭탄의 파괴력이 항구적인 평화를 가져오게

18) Mutual Assured Destruction

될 것인지에 대한 비슷한 맥락의 주장을 우리는 수십 년 전에도 들은 바가 있다. 일부 미래학자들은 나노기술을 이용한 전쟁이 핵무기에 의한 인류종말보다도 더 끔찍할 수 있다고 예측한다.

나노기술은 전기나 컴퓨터와 마찬가지로 인류의 거의 모든 일상생활에 광범위하게 영향을 미치는 다목적 기술(GPT¹⁹⁾)이다. 따라서 군사 분야에도 응용이 가능한 민군겸용 기반기술이 될 수 있다. 그 이유는 수많은 생물학적, 화학적, 물리적 플랫폼 분야에서 나노스케일의 장비 건설 및 조정에 집중하고 있기 때문이다. 현재 1,600개가 넘는 상업 제품들이 나노기술에 의존하고 있다.



출처: 허선무, '나노기술의 군사적 응용 가능성', 물리학과 첨단기술, 1월/2월 2006년

그림 7 나노기술이 국방에 적용될 수 있는 분야

그림 7에서의 나노기술의 혁신적인 군사 적용 분야로는 군용기, 무인기/로봇, 병기, 지휘통제, 개인병사 전투, 병사의 능력 향상 및 웰빙 등이 있다.

나노기술은 합성생물학, 국방응용, 전자공학, 농업 및 식품생산, 산업 및 섬유제조,

19) General Purpose Technology

화장품, 신약자전자, 자동차 및 기타 소비제품과 환경 복원의 분야에서 사용되고 있다.²⁰⁾ 그러나 생명공학과 마찬가지로 나노기술은 ‘민군겸용의 딜레마’에 직면해 있다. 왜냐하면 화학, 의학, 센서, 섬유 및 다른 물질을 위한 평화적인 목적의 연구개발에 사용되는 시설, 물질 및 지식이 군사 및 무기용으로 사용될 수 있기 때문이다.²¹⁾ 나노기술을 군사목적으로 응용하기 위한 연구개발이 이미 상당히 진행되고 있다. 나노기술을 이용하면 기존의 대형 무기체계들을 전투원이 휴대할 수 있을 정도로 축소시킬 수 있고, 기존보다 더욱 강력한 파괴력을 보유할 수 있게 될 것이다. 예를 들면 소총에 장착한 전자기장 폭탄, 정찰 목적을 위한 초소형 로봇, 바이오 로봇, 초소형 위성파괴용 무기나 미사일 등을 무력화할 수 있는 나노 박테리아 무기 등을 들 수 있다. 또한 나노기술을 통한 다양한 신소재 개발은 자체 온도조절 및 위장 그리고 방탄기능이 더해진 고강도 다기능 전투복, 유기물을 이용한 나노전지를 통한 무한에너지를 제공하는 초경량 건전지를 생산할 수 있다.

나노코팅을 통한 절대 마모되지 않는 부품, 공기 중의 수분으로 물을 제공하는 정수기 등 그야말로 군사 분야에 일대 혁신적인 변화를 가능케 하는 와해성(disruptive) 기술이라고 할 수 있다. 또한 의료지원 분야에서도 나노기술 활용은 실시간 전투원의 건강상태를 알려주는 헬멧, 고음파에너지, 내부출혈을 막아주는 기계, 스프레이로 가공된 대체 혈액,



그림 8 나노기술을 이용한 미래형 차량

화생방 공격 시 인체를 나노 혼합물로 보호하는 의료지원 체계 등을 통해 의무병이 필요 없는 자동화 의료지원 시스템 등이 실현될 것이다. 현재 DARPA는 마치 영화 트랜스포머에 등장하는 차량과 같이 트럭처럼 주행하다가도 헬기로 모습을 바꿀 수 있는 차량을 개발하기 위해 TX(Transformer) 사업을 진행하고 있다. 한 가지 문제는 이러한 변신의 대상이 되는 하드웨어의 무게가 상당하다는 것이며 이것을 극복하는 것이 가장 큰 난관

20) The Project on Emerging Nanotechnologies, "Inventories," (2012).

21) Ronald M. Atlas and Malcolm Dando, "The dual-use dilemma for the life sciences: perspectives, conundrums, and global solutions," *Biosecurity and bioterrorism: biodefense strategy, practice, and science* 4(3): 276, 2006.

이다. 그러나 전압이 공급되면 모양을 바꾸는 신 나노물질로 가까운 미래에 이러한 차량을 볼 수 있을 것이다. 또 다른 나노기술의 향후 발전은 수천 명이 아니라 몇몇 소수의 승조원이 운용할 수 있는 대형 선박을 건설하게 할 수도 있다.

나노기술로 무장한 미래병사가 입은 전투복은 지형에 따라 색상이 변하기 때문에 현재처럼 전투복을 사막용, 정글용 등으로 따로 지급할 필요가 없을 것이다. 또한 기후에 따라 병사의 체온을 완벽히 관리해 주기 때문에 냉난방 기기가 필요 없게 될 것이다. 전투에서 부상을 당해도 전투복에 통합되어 있는 응급키트가 자동적으로 적절한 처치를 해주고 상처에 따라서는 전투복 일부가 굳어져 부목의 역할을 해주기도 할 것이다. 특히 현재와는 비교도 안 될 만큼 작고 성능이 뛰어난 무전기와 야간투시경 등 각종 통신 및 탐지장비가 전투복에 통합될 것이다. 또한 충격 방지 나노섬유로 만든 방탄복과 헬멧, 화생방 공격 시 공기 출입을 막고 전투원의 신체를 보호하는 나노혼합물 등을 통해 적의 무기에 대한 방호능력이 지금과는 비교가 안 될 정도로 향상될 것이다. 전투복은 찢어져도 자동으로 수선되며 모든 병사의 소총에서 펄스가 발사될 것이다. 그 밖에 수명이 반영구적인 나노건전지, 나노정수기 등을 통해 군수지원 분야에서도 획기적인 혁명이 일어날 것이다.

나노 일렉트로닉스

나노기술은 정보 통신 기술(ICT)과 결합하여 더 작고, 가볍고, 빠르고, 훨씬 에너지 효율적이고 쉽게 사용할 수 있는 장비를 생산한다. 이러한 장비들은 전장과 지휘통제 사령부를 통합하는 실시간 상황 및 정보 우위를 가능하게 한다.

나노 일렉트로닉스는 정보작전, 데이터 처리 및 흐름, 정밀유도무기, 유인 및 무인 차량에서 개별적인 인간의 인지 및 모터 제어에 이르는 모든 것을 상당한 수준으로 개선하고 있다.²²⁾ 무어의 법칙(Moore's law)에 따르면, 컴퓨터의 프로세싱 능력은 2년마다 두 배로 늘어난다. 현재의 마이크로컴퓨터는 이것이 사실임을 입증하고 있으나, 나노 기술은 무어의 법칙 이상의 컴퓨터 혁명을 가져올 것이다. 마이크로프로세서는 특히 생화학 및 양자 기술을 사용하는 나노프로세서로 조만간 교체될 수 있다. 나노컴퓨터는

22) Margaret E. Kosal, "Nanotechnology Threat Anticipation," 미발표 프레젠테이션, 2012년 9월 3일.

탄환에 결합된 초소형 순항미사일과 같이 비행 중 경로를 수정할 수 있는 발사체를 만들 수 있다.



그림 9 나노프로세서에 대한 연구에서 개발된 미세나노큐브

또는, 먼지입자 크기의 컴퓨터가 건물이나 대기 중에 살포되어 적의 행동을 감시하는데 쓰일 수도 있을 것이다. 이와 같이 보다 소형화되고 더욱 강력해진 나노프로세서는 인공지능을 비약적으로 발전시켜 더욱 발전된 로봇의 시대를 열 것이다.

팽창식 나노 전투장비

팽창식 나노 전투장비는 무겁고 부피가 큰 전투장비를 개인이 휴대할 수 있을 규모로 축소하여 무인 전투로봇, 소형정찰정, 초고속 정찰기에 적용하는 나노기술이다. 원리는 물질이 원자단위에서 자기 복제할 수 있는 특징을 응용하여 극소량의 재료로 자기 복제를 통하여 스스로 조합과 팽창을 하도록 하는 것이다. 이를 활용하면 기존에 부피가 크고 질량이 무거운 무인 전투로봇 같은 전투용 장비를 전투원 개개인이 휴대할 수 있을 정도로 축소가 가능하다. 전문가들은 팽창식 나노기술이 2050년까지 현실화될 것으로 전망하고 있으며 이는 나노기술에 있어서 군사혁신의 핵심으로 평가되고 있다.

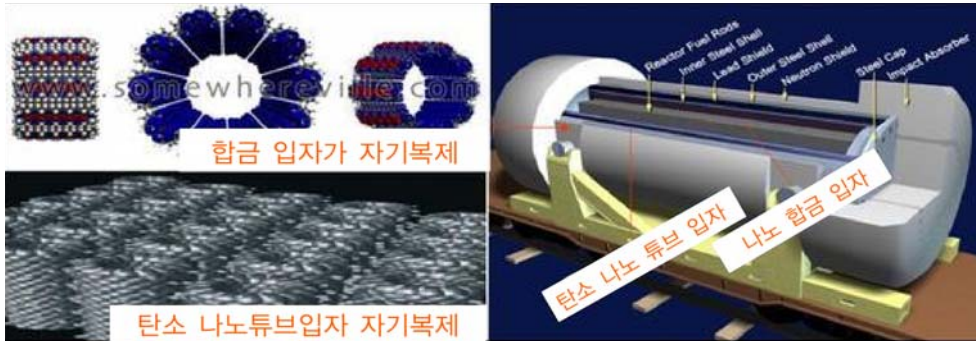


그림 10 팽창식 나노기술의 원리

나노 코팅

나노 코팅의 응용은 고성능 폭발물질을 안정화시키는 데 사용되며, 핵탄두와 그 밖의 탄두를 보다 안전하게 다룰 수 있게 한다. 나노 코팅은 또한 생화학 및 화학작용제를 안정화시켜 내구성을 높이고 운반수단을 다양화한다. 무선주파수 실드 코팅은 사생활 보호와 보안을 제공하여 무선전파로부터 건물이나 무선네트워크를 차단하여 보호한다.²³⁾ 합정과 잠수함은 바닷물의 엄청난 부식력 때문에 골치를 앓고 있으며 이로 인해 해군은 함대를 유지·보수하느라 매년 수억 달러를 지출하고 있다. 나노기술을 적용한 첨단 세라믹 코팅이 금속으로 된 선체부분과 기계에 적용되면 마모를 줄이고 선박의 수명을 상당히 연장시킬 수 있다.

나노 광학

나노 광학을 이용한 메타소재는 빛을 반사시키는 것이 아닌 물체 주변으로부터 빛을 굴절시키는 능력을 기반으로 스텔스 기술을 위장 및 불가시성으로 발전시키고 있다. 나노와이어와 결합된 광학 섬유는 태양에너지로 충전이 되는 휴대용 및 웨어러블 전자 장치의 도래를 예고한다.²⁴⁾ 미국 캘리포니아 대학(San Diego) 연구진은 새로운 은페

23) S. S. Azim, et al, "Studies on Graphite Based Conductive Paint Coatings," Progress in Organic Coatings 55(1): 1-4, 2006.

24) B. Weintraub, Y. G. Wei, and Z. L. Wang, "Optical Fiber/Nanowire Hybrid Structures for Efficient Three-Dimensional Dye-Sensitized Solar Cells," Angewandte Chemie-International Edition 48(47): 8981-8985, 2009.

(Cloaking²⁵)용 메타물질²⁶)을 개발하였는데 이 물질은 테플론 기질에 세라믹 나노실린더가 박힌 초박형 막으로 제작되어 가시광선을 비롯하여 전기적 신호, 열적외선 신호 등 넓은 범위에 대하여 은폐 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 메타물질인 은폐 막을 물체에 씌우면 광파(전자기파)를 물체 주위로 굴절시키는 원리로 은폐나 투명화되는 현상을 이용한 기술이다.²⁷⁾



그림 11 UC San Diego 대학 연구진이 개발한 메타물질

또한 복합 나노 광학렌즈는 나노 광학소재를 여러 층으로 겹쳐 광학렌즈를 제작하는 기술로, 2002년 미 나사(NASA)에서 차세대 천체망원경의 개발을 목적으로 계획을 수립하여 2004년 나노 광학소재가 개발된 이후 각종 광학장비에 다양하게 응용되기 시작하였다.



그림 12 일반매질의 빛 굴절현상(왼쪽)과 메타물질의 빛 굴절현상(오른쪽)

이 기술의 기본원리는 강도와 내구성을 극대화시킨 나노 광학소재에 자기적인 충격을 가해서 여러 층으로 증착시킨 후 복합광학렌즈를 제작하는 기술이다.

안정적인 실리콘카바이드(SiC) 구조로 재사용이 가능한 주물을 이용하여 제작되며 나노 단위의 형질 제어를 통해 보통 렌즈보다 더 매끄럽고 정밀한 표면을 얻을 수 있다. 기존 광학렌즈는 근거리, 중거리, 장거리 등 거리별로 배율 조절이 필요하나, 나노 광학

25) 상상 속의 '투명 망토' 효과로 일컬어지는 일종의 스텔스 기술로 광학장비, 레이더, 적외선 센서에 탐지되지 않도록 하는 방법
26) 지구상에 자연적으로 존재하는 물질에서는 찾을 수 없는 성질을 인위적으로 설계하여 만든 인공물질. Cloaking을 위하여 다양한 메타물질이 제시되었으나, 실용화를 위해서는 많은 연구가 필요함

27) Invisible Drones Could Become Reality with New Meta Material, defense-update.com, 2015. 8. 30.

렌즈는 자동으로 시야조절이 가능하여 배율을 조정해 줄 필요가 없고 빛의 파동감지 센서를 통해 오차범위 10nm 미만의 높은 정확도를 갖는다.



그림 13 나노 광학소재의 군사 분야 활용

즉, 현재는 거리에 따라 렌즈의 배율을 일일이 조정해야 하고 고성능일수록 비용이 높지만 미래에는 자동시야 조절이 가능한 저비용 고성능 나노렌즈가 사용될 것이다. 특히, 군사 분야에서는 차세대 레이저무기 개발은 물론 미래전투체계의 현실화에 크게 기여할 것으로 전망된다. 미 육군은 NASA로부터 나노 광학렌즈 기술을 도입하여 다양한 군사 장비에 적용을 추진하고 있다.

나노센서와 나노 모니터

나노센서는 기존의 센서기술에 나노물질을 이용하여 성능을 향상시킨 센서 또는 나노 물질과 나노전자소자를 결합시켜 만든 신개념의 나노센서들로 기존에 개발된 다른 센서들에 비해 월등한 감도를 가져 단일 분자의 검출도 가능하다. 감지 물질 특성의 전기적 변화에 따라 달라진 수치를 컴퓨터로 읽어냄으로써 1개의 대장균도 알아낼 수 있도록

센서 플랫폼을 제작하는 것이 관건이다. 따라서 암과 같은 중대 질병에서 발생하는 미량의 표지자 단백질을 검출할 수 있어 질병의 조기진단이 가능하다.

양자점은 어떤 물체를 태깅(tagging)하고 그 위치와 사용을 모니터링할 수 있게 한다. 미 연구원들은 스마트폰으로 구동되는 화학무기 센서 칩을 개발했다. 다른 연구원들은 모르포(Morpho) 나비의 날개에 있는 나노입자의 화학 감지 능력에 기반하여 화학무기 센서를 개발하고 있다. 이와 같은 생체모방 나노센서(Bio-inspired Nanosensors) 기술을 활용하여 사제폭탄 감지기도 개발 중이다.²⁸⁾



그림 14 Morpho의 원래 날개 색(왼쪽)과 에탄올과 톨루엔에 노출된 날개 색(오른쪽)

이러한 도구들이 화학, 생물학, 방사능, 핵 및 폭발(CNBRNE²⁹⁾) 물질에 대한 감지를 크게 향상시킬 것이다. 예를 들어, 필드 센서나 진단시스템의 일부로서 나노 바이오 IO 무기는 세균 시스템을 감시의 수단으로 이용하고, 식물, 곤충 또는 동물 감시병을 더 큰 센서 네트워크의 일부로서 이용할 수 있다. 유독성 산업용 화학물질 색상 변화 탐지 기기인 전자 코와 유사한 센서는 유독성 산업용 화학물질을 감지하고 핵 시설들의 주위에 방사선 감지기로 흔하게 사용될 수 있다고 미 국립환경보건과학연구소(NIEHS³⁰⁾)는 말한다. 미국 국립위생연구소(National Institutes of Health)의 일부인 NIEHS는 Urbana-Champaign에 위치한 일리노이즈 대학의 연구에 투자했는데, 이 대학 Kenneth Suslick 교수와 연구원들은

28) Angela Jones, Jeanne Nye and Andrew Greenberg, "Nanotechnology in the Military: National Defense, Homeland Security," *Small Science, Big Decisions* 프로젝트의 일부로 제작된 프레젠테이션, University of Wisconsin-Madison, Institute for Chemical Education, 2011년 3월.

29) Chemical Biological Radiological and Nuclear Explosive

30) National Institute of Environmental Health Sciences

유독성 화학물질들을 감지하는 데 사용되는 일회용 감지기를 만들었다. 지금까지 알려진 다양한 유독성 산업 화학 물질을 탐지하는 인공 코를 만들기 위해 광전자 공학 기술을 사용했다.



Acura RD-X concept
산소센서, 배기가스센서
지자기센서, 오일센서 등



ASIMO, Honda
전자코, 전자혀,
진동센서, 변위센서 등



폭발물탐지 및 제거로봇
화학센서, 가스센서



TNT잔류물센서
UCSD



혈당측정휴대폰, LG
글루코스센서



flying microbot, Epson
지자기센서, 화학센서
가스센서, 시각센서



Microflyer, GATECH
지자기센서, 화학센서
가스센서, 시각센서



Nano robot, Visions of
Science, Coneyl Jay
화학센서, 바이오센서

출처: 주요 나노기술의 현황과 산업화 동향, KISTI, 2008. 11

그림 15 나노센서의 종류 및 기능

특정한 독소들을 찾아낼 때 센서는 다른 컬러의 빛을 내는 방식으로 동작한다. 또한 36가지 컬러 센서 세트는 독소들의 혼합물에 대한 색상 변경의 독특한 패턴을 보여줄 것이고, 이는 색상 지문(color fingerprint)의 라이브러리를 카탈로그화 할 수 있게 해줄 것이다.

색도계 센서 세트는 교차 반응(cross-responsive)과 나노세공(nanoporous) 안료의 일회용 배열을 이용해 광범위한 휘발성 분석 물질을 탐지한다. 화학 반응의 복잡한 세트들에 반응하여 색상이 변화하고, 이는 독성 물질의 지문을 드러내어 탐지되게 만든다. 이러한 접근 방식의 실행 가능성을 입증하기 위한 최근 테스트에서, Suslick 팀은 암모니아,

염소, 질산 그리고 아산화황을 포함하여 인간들에게 해로운 것으로 알려져 있는 19개의 전형적인 유독성 산업 화학 물질에 대하여 센서를 테스트하였다. 2분 동안 화학물질들을 센서에 노출시킨 결과 전자 코는 대부분의 유독성 샘플을 인식했고, 2분 내에 유독성 화학물질들의 90%가량을 확인하였다.

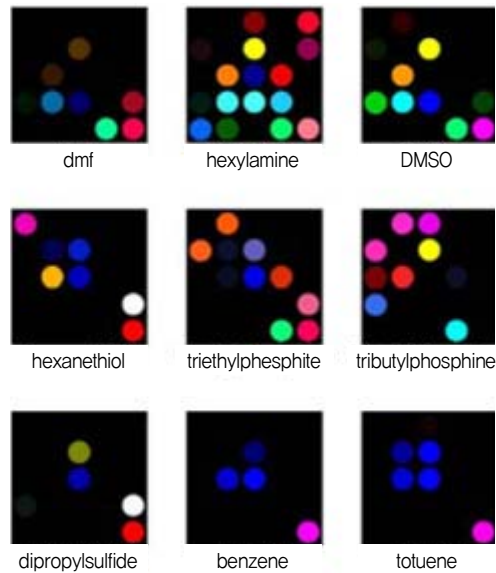


그림 16 전자코에 의해 감지된 화학물질별 색상변화

프로토타입은 노출된 탐지기의 컬러 패턴을 읽기 위해 평판 스캐너를 사용했다. 그런 다음 컴퓨터는 알려진 독성 물질의 라이브러리와 결과를 일치시켰다. 연구원들은 조명을 위해 백색 LTE를 그린 후 배열을 스캔하고 알고리즘에 파일을 전송하기 위해 디지털 카메라를 사용하는 휴대용 스캐너 프로토타입을 개발하고 있다. 알고리즘은 컬러를 인식하고 이를 알려진 독성 물질과 일치시킨다. 센서 네트워크도 나노 티끌이나 첨단 나노 위성을 포함하며 휴대폰, iPod 또는 PDA와 같은 소형 개인용 기기를 이용할 수 있다.”³¹⁾ 이러한 도구도 마찬가지로 그러한 기기의 활성화 역할을 할 수 있다.

31) Margaret E. Kosal, *Nanotechnology for chemical and biological defense*. (New York: Springer, 2009), pp. 95-96.

나노 섬유 및 소재

병사 개개인의 성과와 건강을 증진시키는 나노 섬유를 개발하기 위해 대규모 연구개발이 행해지고 있다. 나노 섬유는 병사의 방호복과 제복을 개선하기 위해 개발되고 있는데, 이는 무게를 줄이고, 방탄 기능을 제공하고, 체온을 조절하며, 세균을 가두고, 병사의 건강을 실시간으로 진단 및 치료하며, 전자기, 방사능, 생물학 및 화학 무기들에 노출되었는지 여부를 현장에서 바로 탐지하기 위해서이다. 이러한 섬유는 자가진단 및 자가준비가 가능할 것이다. 미군은 매사추세츠 공과대학교(MIT)에 설립된 병사나



그림 17 나노기술을 적용한 전술조끼

노테크놀로지연구소(ISN³²)를 통한 MIT와의 공동연구에서 스판텍스만큼 가벼울 뿐 아니라 병사의 건강을 모니터링하고, 상처를 압박하고 구급약을 투여하며, 생화학적 위협을 즉각적으로 감지하고 반응하는 방탄조끼를 개발 중이다. 특히 중국은 나노기술을 활용한 우주복을 독자적으로 개발하고 사용 배치했다. 미국은 MIT에 있는 ISN에 5천만 달러를 투자했다. 기동력을 유지하면서 전투에서 병사들을 보호하는 것이 군 지도부에게는 큰 관심사이며 나노기술은 이미 더 가볍고 강력한 방탄복을 생산해왔다. 가장 신형의 전술조끼 IOTV(Improved Outer Tactical Vest)는 소총 탄환과 파편을 보다 효율적으로 막아내면서도 불과 10년 전에 생산된 방탄조끼보다 3파운드나 가볍다. 화학증착방법(CVD)³³을 이용하여 극초소수(Ultrahydrophobic, 極超疎水³⁴)형 표면을 제작하여 방수 전투복 소재를 생산하거나 화학증착법으로 제조한 초박형의 나노 테플론 소재로 방탄 소재를 생산한다. 카본 나노튜브로부터 초박형 물질을 생산하는 업체인 NCTI (Nanocomp Technologies Inc.)사는 카본 페이퍼와 유사한 이

32) Institute for Soldier Nanotechnologies

33) Chemical Vapor Deposit, 기판의 표면에 서로 다른 성질을 갖는 기체-고체, 기체-액체의 화학반응을 이용하여 층을 생성하는 공정 <한국정보통신기술협회>

34) 물보다 기름과의 친화성이 매우 큰 무극성의 성질

물질을 100장 합한 것이 명함 몇 장을 겹친 두께와 같지만 9mm의 탄환을 막아낼 수 있다고 한다. 미래의 방탄조끼는 발사체를 저지하는 것 이상의 역할을 할 것이다. 또한 MIT 공대의 크리스틴 울티즈 교수 팀은 9,600년 이상의 기간 동안 적으로부터의 공격을 막아내면서 생존한 세네갈 Bichir나 공룡뱀장어(Dinosaur eel)의 나노 구조를 전자 주사현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 토대로 병사를 외부 충격으로부터 보호할 수 있는 소재 개발의 단서를 찾아냈다. 즉, 공룡뱀장어의 몸에서 적으로부터 공격을 받을 시 가해지는 에너지를 분산시키는 4개의 층을 발견하였는데, 이것이 뱀장어 비늘 아래의 연한 섬유조직을 보호하고 비늘이 파괴되는 것을 방지하는 원리를 이용하여 충격흡수 소재를 개발하고 있다.



그림 18 충격방지 소재 개발에 영감을 제공한 공룡뱀장어

나노 무인 장비

무인 항공기 같은 나노 로봇은 인력감소를 상쇄 및 허용하고, 감시 효과를 개선하며 핵무기 등의 CBRNE의 통제를 가능하게 한다. 미 국방고등연구기획국(DARPA³⁵⁾)은 옥외감시뿐 아니라 실내감시 목적으로 건물에 잠입할 수 있는 나노 벌새를 시연했다.³⁶⁾ 영국은 아프가니스탄에서의 수색정찰활동을 위한 초소형 나노 헬리콥터를 도입했다. 또한 마이크로 위성도 나노기술을 통해 구현될 수 있다.³⁷⁾ 극소형화의 기술로 제작된 거의 눈에 보이지 않는 나노 티끌을 통하여 실시간 모니터링이 가능해질 것이다. 지난 십 년간 무인항공기 또는 드론은 미군의 군사작전에서 거의 빠지지 않고 등장해왔다. 테러와의

35) Defense Advanced Research Program Agency

36) DARPA, "Time Magazine Recognizes Darpa's Hummingbird Nano Air Vehicle," 2011년 11월 24일 <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2011/11/24.aspx>

37) Giulio Monzoni, "Micro and Nanotechnology Applications for Space Micropropulsion" in Nitaigour Premchand Mahalik, ed., 'Micromanufacturing and Nanotechnology' (Dordrecht: Springer, 2006), pp. 197-218.

전쟁(War On Terror)의 요구가 소형화를 포함한 다양한 방식으로 기술의 한계를 밀어내고 있다. UAV 제조업체인 에어로바이런먼트(AeroVironment)사는 크기가 큰 벌새(hummingbird)를 닮은 신형 나노 비행물체를 개발했다. 이 드론은 무게가 AA 배터리보다 가벼울 뿐 아니라 실내에서도 감시활동을 수행할 수 있다. 다른 연구원은 25센트짜리 동전만 한 곤충 크기의 드론을 시연했다.



그림 19 AA 배터리보다 가벼운 나노 벌새

기타 나노 무기

나노기술이 에너지학에 미치는 영향에 대해서, 그리고 치료제를 전달할 새로운 매개체를 위한 생명 및 의료과학 분야에서의 나노기술 연구가 진행 중이다. 미국과 인도 군대는 화생방전 방위 차원에서 나노기술을 연구 중이다. 나노기술을 활용한 폭탄은 중량이 줄어들고 파괴력은 더 커져서, 무게 대 에너지 힘 비율 면에서 핵무기에 견줄 수 있을 정도로 보다 가볍고 더 강력한 폭발력을 가진다. 2007년 러시아 정부는 나노기술을 활용한 열기압 기화폭탄이라는 것을 폭파시켰다. 그러나 이 ‘모든 폭탄의 아버지’라 하는 것이 새로운 나노기술을 포함하고 있는지 아니면 잘 알려진 금속에서 자연 생성된 에너지적 특성에 의존하는지에 대해서는 의견이 분분하다.³⁸⁾ 최근 연구에 따르면, 화학 및 생물학적 영역에서 나노기술의 가장 공격적인 응용은 나노 가공된 구조와 생물학적 체제를 결합하여 새로운 나노기술을 활용한 생화학 무기, 즉 기존의 대응책에 영향을 받지 않는 무기를 만들어 낼 수 있을 것이다. 우리가 상상하는 것처럼 오늘날의 악의 없는 연구적 진보를 생물학적 위협으로 바꾸는 나노기술의 주된 역할이 분자 수준에서 제공하는 구조 내에 있을 수 있다. 이러한 구조는 새로운 체제와 이러한 체제의 설계를

38) BBC News, "Russia Tests Giant Fuel-Air Bomb," 2007년 9월 12일; F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: *Thinking Big about Small Scale Science*, (스톡홀름: 스웨덴 방위연구기관, 2011), p. 33.

확산시키고 안정화하는 데 도움을 주어서 원하던 부정적인 결과를 얻을 수 있게 할 것이다. 나노물질은 위험물질의 안정화를 향상시켜 무기화하는 것을 더 쉽게 하고, 전달 효과를 향상시키거나 감염경로를 바꿀 수 있다.³⁹⁾

또한, 나노기술을 활용한 무기는 면역체계를 파괴시켜서, 대응책을 효과적으로 물리치고 어쩌면 새로운 제재를 만들 수 있도록 개발될 수도 있다.⁴⁰⁾

또 다른 잠정적인 나노 무기는 생물학이나 방사능 무기와 유사한 유독성 나노입자를 이용하는 것이다. 현재, 나노입자의 독성에 대해 많은 연구와 토론이 이루어지고 있다. 나노실버와 탄소나노튜브 같은 흔한 나노 물질은 현재 생산이 수백에서 수천 톤의 범위로 한정되어 있지만 화장품과 페인트에 널리 쓰이고 있는 나노 이산화티탄의 생산은 수백만 톤에 달한다.⁴¹⁾ 나노입자의 대규모 상업적 생산이 향후 15년 동안 급속하게 증가할 것으로 예상된다. 그러한 나노입자의 독성이 연구결과로 입증된다면 미래의 접근 용이성과 낮은 비용으로 인해 나노입자가 ‘재래식’ 대량 살상무기로서의 매력을 갖게 될 수 있다.⁴²⁾ 자기증식 체제와 인공지능에 기반한 자동 분자제조는 명령으로 인해 어떤 이들은 미래가 암울할 것으로 예견한다. 이러한 견해에서 나노기술은 기술적 주도권을 서로 쟁취하려는 새로운 전 세계적이고 이례적으로 비용이 많이 드는 무기경쟁을 야기시킬 것이며, 군사적 불안감이 급속도로 고조되면서 전쟁의 위험성이 증가하게 될 것이다.

나노기술 정의하기

나노기술의 잠재적 또는 현재 사용 평가에서 가장 큰 문제는 용어 정의에 관한 것이다. 나노기술이 국가 안보와 경쟁력에 미치는 잠재적 영향을 평가하려는 시도에 가장 걸림돌이 되는 것은 나노기술이 무엇인지, 또는 심지어 나노스케일이 무엇인지에 대해 합의된 정의가 없고, 결과적으로 그것을 측정하기 위해 비교할 수 있고 신뢰할 만한 자료나

39) Margaret E. Kosal, *Nanotechnology for chemical and biological defense* (New York: Springer, 2009), p. 90.

40) Margaret E. Kosal, *Nanotechnology for chemical and biological defense*, (New York: Springer, 2009), pp. 96–97.

41) Tobias Sonderer, *Risk Assessment of Engineered Nanoparticles Based on Probabilistic Material Flow Analysis*, 석사 논문, (Zurich: Eidgenössische Technische Hochschule, 2009), p. 7.

42) Margaret E. Kosal, *Nanotechnology for chemical and biological defense*, (New York: Springer, 2009), pp. 93–95.

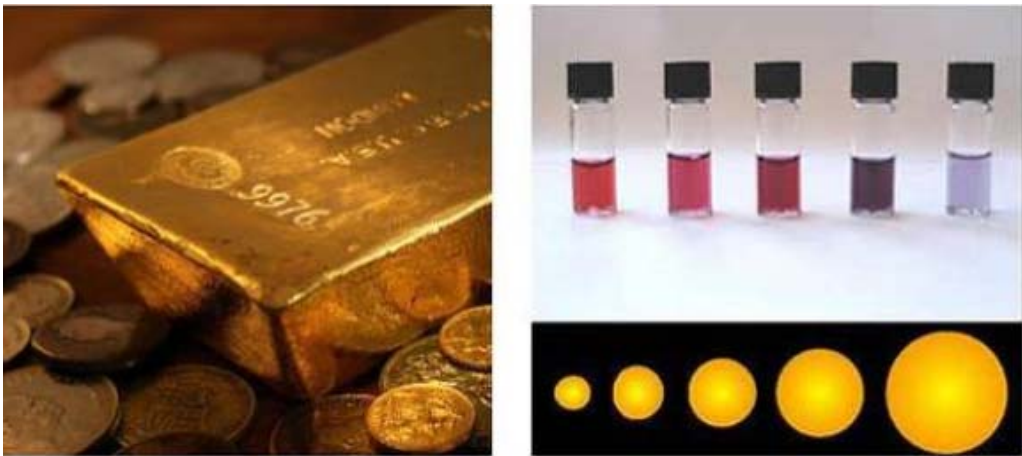
척도도 없다는 것이다. 나노기술에 대한 가장 보편적인 정의는 1나노미터는 십억 분의 1미터라는 나노의 작은 규모에 대한 것이다. 나노기술에 대한 상충하는 정의 중 다수가 주로 크기에 초점을 두고 있다. 대부분은 ‘나노스케일’이라는 용어가 대략 1나노미터에서 100나노미터까지의 크기 범위로 정의된다고 보이지만, 과학적으로 근거한 범위는 원자 크기(0.2나노미터)에서 100나노미터에 이른다.⁴³⁾ 1~100나노미터에 초점을 두는 것은 이 크기에서 관찰되는 양자역학과 다른 영향(특히, 표면지역에 관련된)뿐만 아니라 나노기술, 나노과학 및 나노제품을 구분하기 위해 사용될 수 있는 일부 표준 정의의 편리성과 관련이 있다. 어떤 물질은 1나노미터의 끝에 가까울수록 전형적인 것과는 반대로 보다 양자역학적 효과가 관찰되고, 100나노미터에 가까울수록 전형적인 효과가 더 많이 나타난다. 나노기술의 정의에 대한 부정확성 이외에 그것이 어떤 작용을 하는지, 심지어 그 효과를 정의하는 것도 불분명하다. 현재 나노기술에 대한 합의된 통계적 정의가 없어서 군사적 및 상업적 잠재력, 실제 시장의 가치, 그리고 환경, 보건 및 안전상의 위험에 대한 평가를 내리기 어렵다. 정의가 없다는 것 또한 나노기술의 사용과 생산을 규제하기 위한 노력을 상당히 복잡하게 만든다. 이에 대한 논의는 나노기술의 거버넌스에 관한 부분에서 기술할 것이다. 크게 두 가지 면에 국한하여 통계적인 정의가 어떠해야 하는가에 대한 상당한 논의가 계속될 것이다. 이 크기에서 작동하는 매우 광범위하고 다양한 과학 및 공학 학문들을 고려할 때, 그 용어는 단순히 크기 이상의 공통성을 갖는 일련의 활동과 의미 있게 연결되어야 한다. 나노스케일에서 가능한 새로운 결과와 관련되는 미래 기술과 이머징 테크놀로지를 배제할 정도로 그 용어가 너무 제한적이어서는 안 된다.⁴⁴⁾

43) SCENIHR, “3.2. Definitions and Scope: The Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Products of Nanotechnologies,” 2006.

44) George Khushf, “The Ethics of Nanotechnology. Vision and Values for a New Generation of Science and Engineering,” Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering: 2013년 11월 14-15일 워크숍 발표논문, pp. 29-56, National Academy of Engineering, editor, The National Academies Press, 2004; pp. 33-36.

왜 정의가 중요한가

크기 자체는 안보, 상업상의 위험 또는 규제 관점에서 볼 때 반드시 중요한 사항은 아니다. 나노스케일 물질 자체의 속성과 조작(manipulation)이 새로운 성질과 효과를 산출하기 때문이다.⁴⁵⁾ 크기만을 근거로 한 정의는 자연발생한 나노스케일과 조작된(engineered) 나노스케일 효과를 구분하지 않는다. 예를 들면, 나노스케일에서 금과 은의 입자는 마이크로 스케일과 당연히 근본적으로 다른 성질을 나타낸다. 마이크로 스케일에서 금은 비활성 및 비자성의 노란 금속이다. 하지만 나노스케일에서 금은 양자적 특성을 가지기 때문에 촉매작용을 하고, 절연처리를 하며 자성을 띤다. 서로 다른 크기에서 서로 다른 빛의 파장을 흡수한 뒤, 금 나노입자는 붉은 색, 보라, 검정 또는 녹색으로 보일 수 있다. 이는 일찍이 고대 로마시대에서도 발견된 속성이다.⁴⁶⁾ 조작된 금 나노입자는 나노전자기계 시스템, 생명공학, 전자섬유, 비선형 광학 등에 사용된다.⁴⁷⁾



출처: flickr/wikipedia

그림 20 일반적인 금의 모습(왼쪽)과 크기별로 색이 변하는 금 나노입자(오른쪽)

45) Nanowerk, "Definition of the Term Nanotechnology," 2013.

46) Rosamund Daw, "Nanotechnology is Ancient History," The Guardian, 2012년 4월 24일.
<http://www.theguardian.com/nanotechnology-world/nanotechnology-is-ancient-history>

47) Kenneth Chang, "Tiny is Beautiful: Translating 'Nano' into Potential," *The New York Times*, 2005년 2월 2일; Siegel et al., "Properties of gold nanostructures sputtered on glass," *Nanoscale Research Letters* (2011); Janice L. Speshock et al., "Silver and Gold Nanoparticles Alter Cathepsin Activity In vitro," *Nanoscale Research Letters* 6 (17) (2011)

은은 나노기술 응용에서 널리 사용되는 금속이다. 은 나노입자는 항미생물적 성질(항균성 및 항바이러스성)을 나타내며 상처드레싱과 같은 옷감과 의료용품에 사용되는 나노섬유로 가공된다.⁴⁸⁾ 금과 은 나노입자 모두 생체발광, 생물학 센서, 라벨, 치료법과 같은 의학적 적용과 전하를 절연하거나 전도하기 위한 전자공학 분야의 응용에 유용하다.⁴⁹⁾ 마찬가지로, 탄소나노섬유도 매우 강하고 가볍지만 다른 물질과 연결하기가 매우 어려운 것으로 오랫동안 인식되어 왔다.

미국 회사인 Zyvex Technologies가 수지(Kentara 상표 부착)에 탄소나노튜브(CNT)를 부착시킬 수 있는 방법을 개발했을 때 이 회사는 개발상의 장벽을 넘어섰다. 이 회사의 기술을 상업적으로 응용한 것에는 탄소나노튜브 강화 산악자전거, 야구방망이, 자동차 등이 포함된다.⁵⁰⁾ 나노기술은 반도체 제조에 널리 사용되며 표면적 특성 때문에 에너지 누수는 줄이면서 수십억 개의 작은 트랜지스터에서 나오는 엄청난 연산력을 가능하게 한다. 그러므로 크기는 주요한 요소이지만, 생물학이든, 화학, 물리, 전자공학이든 또는 다른 여러 학문이든 간에 나노스케일에서 물질을 조작하는 것이 새로운 특성을 만든다는 점에 있어서 나노기술이 실현 가능한 기술이라고 할 수 있다.

유럽연합은 나노물질을 정의하는 데 결정적인 요소로 크기를 꼽았다. 나노물질의 정의에 대한 유럽위원회의 권고안 2011/6962에 따르면 ‘나노물질’은 속박되지 않은 상태 또는 집합 또는 덩어리로서의 입자를 포함하는 천연의, 부수적 또는 제조된 물질을 포함 하며, 입도 분포(number size distribution)에서 50% 이상의 입자가 1~100나노미터의 범위를 벗어난 크기를 하나 이상 가질 경우이다. 이 50%의 기준은 환경, 보건, 안전 또는 경쟁력과 관련된 문제에 의해 정당화되는 경우에 완화(waiver)된다. 유럽연합의 정의도 ‘60m²/cm³’의 용적수치에 의한 ‘표면적’을 포함한다. 또한, 플러렌, 그래핀 플레이크, 1나노미터 이하의 하나 이상의 외부 면적을 가진 단일벽 나노튜브(SWCNT)⁵¹⁾와 같은 일부

48) Yasutaka Mori et al., “Antiviral activity of silver nanoparticle/chitosan composites against H1N1 influenza A virus,” *Nanoscale Research Letters* 8 (93) (2013); Sirajo Umar et al., “Silver-organosilane antimicrobial porous nanomembrane,” *Nanoscale Research Letters* 8 (164) (2013); Janice L. Speshock et al., “Silver and Gold Nanoparticles Alter Cathepsin Activity In vitro,” *Nanoscale Research Letters* 6 (17) (2011)

49) Yu Tao, Yuxiao Tao, Biaobing Wang, Liuyang Wang and Yanlong Tai, “A facile approach to a silver conductive ink with high performance for macroelectronics,” *Nanoscale Research Letters* 8 (296), 2013.

50) Margaret E. Kosal, “Nanotechnology Threat Anticipation” 미발표 프레젠테이션, 2012년 9월 3일; p. 16.

51) Single Wall Carbon Nano Tube, 하나의 벽으로만 구성된 탄소나노튜브로 여러 개의 벽으로 구성된 기존 개념에 비해 투명도, 순도, 물성 등이 우수하여 전도성필름, 고분자화합물, 금속화합물 등 응용분야가 넓고 가격이 비싸 부가가치가 높다.

물질은 나노물질로 여겨진다.⁵²⁾

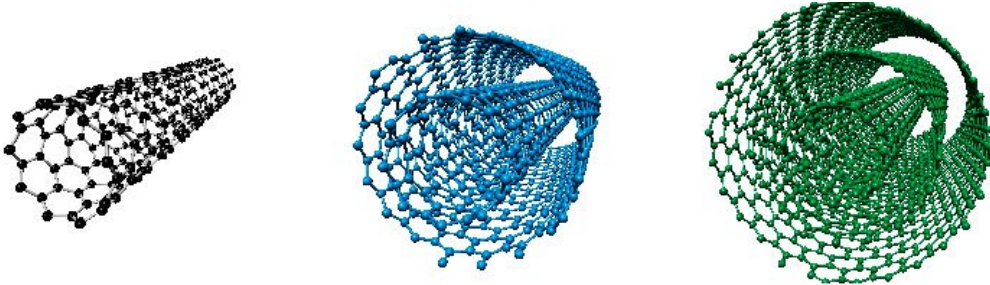


그림 21 단일벽 나노튜브(왼쪽), 이중벽 나노튜브(가운데) 및 다중벽 나노튜브(오른쪽)

국제표준화기구는 나노물질을 ‘나노스케일에서 외적 면적을 가지고 있거나 나노스케일에서 내부구조 또는 표면구조를 가진 물질’로 규정하는 반면, 유럽연합 집행위원회의 신규 보건위험과학위원회(SCENIHR⁵³⁾)는 이를 ‘나노특징이 없는 같은 물질과 비교하여 새로운 특징을 보일 수 있는 하나 이상의 외적 면적 또는 내적 구조를 가진 물질’로 정의한다.⁵⁴⁾ 유럽연합과 마찬가지로 ISO 정의는 나노스케일에서 발견되는 독특한 성질보다 순전히 크기에만 근거한다. 일반적으로 이러한 접근방식을 통해서 모든 나노물질에 대한 규제가 훨씬 더 포괄적이 된다.

미국은 다른 접근방식을 채택하여 크기뿐 아니라 나노스케일의 물질을 조작하는 것에서 야기되는 새로운 특징도 고려하고 있다. 미 국가나노기술계획(NNI)에 따르면, 나노기술은 대략 1과 100나노미터 사이의 크기, 즉 나노스케일에서 물질을 이해하고 통제하는 것으로, 이러한 크기에서 독특한 현상이 새로운 응용을 가능하게 한다. 나노스케일의 과학, 공학 및 기술을 포함하는 나노기술은 이러한 길이의 크기에서 물질의 영상화, 측정, 모델화 및 조작을 수반한다. SCENIHR도 영국 학술원(Royal Society) 및 왕립공학아카데미(Royal Academy of Engineering)의 정의에 근거한 이 접근방식을 택하여, 나노기술을 ‘나노스케일에서 모양과 크기의 통제를 통한 구조, 장치 및 시스템의 디자인, 특징화, 생산 및 응용’

52) 나노물질의 정의에 관한 2011년 10월 18일의 EU 권고안 2011/696/EU

53) Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks of the European Commission

54) ISO, “Nanotechnologies Vocabulary Part 5: Nano/bio interface” (2011); SCENIHR, “3.2. Definitions and Scope: The Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Products of Nanotechnologies” (2006)

이라고 정의한다. 정의상의 문제와 관련하여 두 번째로 큰 문제는 나노기술에 관한 데이터의 이용가능성, 신뢰성 그리고 유효성이다. 이에 관해서는 다음 절에서 기술한다.

데이터의 문제

나노기술의 장래성에 대한 홍보는 부분적으로 나노기술이란 무엇이고, 그 기능은 어떠한가, 군사적 및 상업적 중요성과 그 결과는 어떠한가에 대한 서로 매우 다른 보고서와 데이터로 인해 조장되어왔다. 나노기술에 대한 추산은 데이터 수집가(단지 소수의 회사와 개인들), 시장 규모를 계산하는 기술, 자원(공적 및 민간), 그리고 효과(나노기술의 안보, 경제, 보건 및 환경에 미치는 영향)에 따라 매우 다를 수밖에 없다.

나노기술은 국방 및 개발 정부 관리들의 마음을 사로잡았다. 그 이유는 마가렛 E. 코살이 말한 나노기술의 초기에 그 기술개발을 둘러싼 ‘과장과 공포’ 시나리오 때문이었다.⁵⁵⁾ 그 방정식의 ‘공포’ 측면에서 보면, 자기 복제를 하는 나노로봇이 날뛰다는 통속적인 터무니없는 이야기들이 비정부기관과 소수의 무기규제 지지자들 사이에 이 기술의 부정적인 영향에 대한 우려를 낳게 하였다. ‘과장’이라는 측면에서는, 나노기술이 부족이나 결핍을 없애고, 전 세계 경제가 풍요로움을 누릴 수 있도록 이끌 것이라고 주장한다. 그러한 말은 나노기술이 물과 공기를 깨끗하게 하고, 기아와 가난을 몰아내고, 암을 치료하고, 전쟁과 갈등의 원인이 되는 대다수의 불씨를 제거하고 지역 생산을 통해 세계적인 자본주의를 종식시킬 것으로 예측한다. 미국 정부에서 유엔, 세계은행에 이르는 기관들이 나노기술을 경제발전과 기술 경쟁력을 위한 핵심기술로 지정하면서 나노기술이 혁신을 가져올 것이라는 희망만 더 커졌다. 이러한 요인들은 얼마가 투자되고 있는지, 또 누가, 어떤 분야에, 군사적, 시장 및 사회적 가치에 대해 어떤 예상을 가지고 투자하는지 등 나노기술 데이터에 대한 상당한 요구를 불러일으켰다. 그 다음, 이러한 데이터가 어디서 나오는지, 그리고 그것들이 과연 유용한지에 대한 문제가 대두되었다.

많은 뉴스매체들이 나노기술에 대한 정부와 민간 분야의 투자와 점점 늘어나는 나노

55) Margaret E. Kosal과의 개인적 의사소통, 샌프란시스코, 2013년 4월 2일.

기술 회사와 제품에 대해 언급하고 있다. 그러나 정부, 미디어, 학계 및 사업의 평가에 광범위하게 사용되는 데이터를 오직 소수의 기관만이 제출하기 때문에, 그 데이터가 측정되었다고 주장하는 실제 결과뿐 아니라 그 데이터의 품질수준과 비교가능성을 확인하기가 어렵다.

나노기술 분야에서 민간 기술자문 회사인 Lux Research는 미 국립과학재단(National Science Foundation)의 Mihail Roco와 함께 손을 잡고 나노기술의 경쟁력, 나노기술 제품 및 국제사회의 나노기술 서열에서의 위치를 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 척도와 데이터를 만들었다. 이러한 요소들이 나노기술에 대한 국제적 및 국가적 투자를 형성하는데 특히 막강한 역할을 한다. 사실 공적 및 상업적인 전망을 형성하는 이 요소들의 영향력은 문제가 많다. 나노기술에 대한 정확한 정의가 없고 이 요소들이 서로 다른 방법들을 사용하고 있기 때문이다.⁵⁶⁾ 미국의 고위급 정부 관리들은 이들이 내놓은 데이터가 문제가 있을지 모른다는 것을 알고 있지만, 사실 모든 정부들이 다른 나라들과 비교하여 그들 국가의 위치를 파악하기 위해 이들의 데이터를 사용하고 있다.⁵⁷⁾ OECD는 이 문제를 인식하여, 최근 나노기술 척도에 대한 편찬에 착수했으며, 2011년에는 나노기술 R&D에 대한 데이터를 발간하기 시작했다.⁵⁸⁾ OECD는 미국 Georgia Institute of Technology의 Alan Porter, Philip Shapira와 Jan Youtie가 개발한 방법론에 크게 의존하고 있다.⁵⁹⁾ 이러한 척도에는 나노기술의 시장 가치, 연구개발에 대한 정부, 고등교육기관 및 기업의 지출, 한 나라의 나노기술 회사와 고용인의 수, 나노기술 관련 특허 신청과 허가된 특허 수 및 나노기술에 관한 학술지 게재물 등이 포함된다.

56) ETC Group, "Geopiracy: The Case Against Geoengineering," (2012)은 이 회사들이 사용하는 다른 방법론들을 제대로 분류함. 실상가상으로, Lux Research는 2010년 나노 관련 데이터 편찬을 중단함. Roco에 따르면, Lux Research는 나노기술이 성과를 향상하기 위해 수년간 사용해온 분야인 전자공학 분야를 데이터에 포함하지 않고 있음. Anne Clunan, Mihail Roco와의 개인적 의사소통, 워싱턴 DC, 2013년 5월 30일.

57) Anne Clunan, Mihail Roco와의 개인적 의사소통, 워싱턴 DC, May 30, 2013년 5월 30일; Clunan, 미 과학 기술 정책실(OSTP), 나노스케일 과학, 공학 및 기술(NSET) 소위원회, 조정사무국(NNCO)의 5명의 고위급 인사들과의 개인적 의사소통, 워싱턴 DC, May 30, 2013년 5월 31일. 예를 들어 다음 참조: PCAST, "Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative, 미 대통령 과학기술 자문위원회" (2012)

58) OECD, "OECD, Science Technology, and Industry Scorecard," 2011.

59) 2012년 미 대통령 과학기술 자문위원회는 또한 그들의 작업을 사용하기 시작했는데, 그것은 NSET 소위원회의 일원이 "좋은" 데이터라고 나에게 확인해줌. 학자들은 보다 일반적으로 Porter, Shapira와 Youtie에 의존하는데, 그 이유는 그들이 특허의 양적인 면이나 질적인 면 모두에서 나노기술의 활동에 관해 가장 종합적이고 방법론적으로 엄격한 척도를 내놓기 때문임(Philip Shapira and J. Youtie, "The Economic Contributions of Nanotechnology to Green and Sustainable Growth" (2012); Alan L. Porter et al., "Refining Search Terms for Nanotechnology," *Journal of Nanoparticle Research* 10 (5): 715-728 (2007).

척도의 중요성

국가들의 경제, 정치 및 군사적 위치를 판단하는 데 사용되는 지표와 방법들이 문제가 있다는 공식적인 인식에도 불구하고, 이머징 테크놀로지에서 국가들 간의 기술적 경쟁력의 척도는 국가 정책과 구조를 결정한다.⁶⁰⁾ 측정치는 다음의 예와 같이 매우 다르게 나타날 수 있다. “2007년 나노 시장가치는 누구와 상담을 하느냐에 따라 116억 달러이거나 1,470억 달러”였다.⁶¹⁾ 2001년 미 국립과학재단(NSF)은 2015년까지 나노기술에 대한 세계시장이 1조 달러의 규모에 이를 것으로 예상했지만, Lux Research는 2020년까지 나노기술 제품이 3조 달러의 시장가치를 갖게 될 것으로 전망했다. 2010년 현재, NSF의 나노기술에 관한 수석고문인 Mihail Roco에 따르면 “급성장하는 경제적 영향을 예측할 수 있는데, 이러한 추세로 보건대 나노기술제품과 전 세계 관련 근로자의 수가 매 3년마다 두 배로 늘어나 2020년까지 3조 달러의 시장과 6백만 명의 근로자를 갖게 될 것”이다.⁶²⁾

이러한 예측이 시사하는 바는 나노기술에 대한 지출이 1조 달러 이상으로 증가했다는 것이지만, 시장, 혁신과 안보의 적용 면에서 이것이 실제로 어떤 의미인지는 불분명하다. 이용할 수 있는 데이터는 종종 Lux Research와 Cientifica가 작성하는데, 어떤 명제와 지표가 데이터의 바탕이 되었는지, 또한 그 중요성에 대한 그들의 해석을 완전히 가능하기가 어렵다. 예를 들면, Lux Research는 전반적인 제품의 나노기술 성분이 아닌 완제품의 가치에 근거하여 나노기술 제품의 시장가치를 계산한다. 이것은 나노기술 제품의 실제 시장가치를 상당히 부풀릴 수 있다. 마찬가지로, Lux Research는 나노기술의 영향을 크게 과소평가할 수 있는데, 이는 그 데이터가 전자제품에 대한 응용을 포함하지 않은 것이 사실이라면 그럴 수 있다.⁶³⁾ 이 데이터는 한 지표이긴 하지만, 훨씬 더 크고 복잡한

60) NSET 소위원회의 고위간부가 말한 대로, 데이터가 “지도 전체에 흩어져 있고” 종종 “전혀 다른 것들을” 비교하기 때문에 “매우 주의를 기울여야” 함. Anne Clunan, 개인적 의사소통

61) ETC Group, “Geopiracy: The Case Against Geoengineering,” 2010, p. 7.

62) Mihail Roco, *Nanotechnology research directions for societal needs in 2020 retrospective and outlook*, Chad A. Mirkin, Mark C. Hersam 및 SpringerLink 편집 (United States] Dordrecht; New York: United States: World Technology Evaluation Center; Dordrecht; New York: Springer, 2011a); Mihail Roco, “The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years (사설)(보고서), *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology* 13 (2): 427 (2011b), p. ii.

63) Mihail Roco는 Lux Research가 데이터 수집에 전자공학을 포함하지 않는다고 말함. Anne Clunan, Mihail Roco와의 개인적 의사소통, 2013년 5월 30일.



그림의 일부일 뿐이다. 대다수의 나노기술은 아직 연구개발단계에 있으며, 회사들은 이 기술에 대한 투자 면에서 2006년에서 2009년 사이에 정부를 앞지르기 시작했다. 연구 개발과 신기술의 성공적인 상업화 사이의 크고 치명적인 ‘죽음의 골짜기’가 존재하는 것을 고려할 때, 기존 데이터가 국가안보, 경제적 경쟁력, 또는 이제 살펴볼 나노기술 거버넌스에 대해 어떤 의미를 지니는지는 불분명하다.

제 3 장

나노기술 거버넌스



- 민군겸용기술을 위한 다국간 규제 정책
- 나노기술의 위험과 규제 영향에 대한 서로 다른 접근
- 나노기술의 상향식 규제

제3장
나노기술 거버넌스



Ⅲ 제3장 나노기술 거버넌스

나노기술과 그 밖의 이머징 기술들로 잠재된 국가산업을 완전히 재편하고 군사분야에 일대 혁신을 일으킬 가능성은 국가들로 하여금 경제혁신을 지속적으로 추진하느냐 아니면 국가안보 및 안전을 우선시하여야 하느냐 사이에서 오래된 균형의 문제를 마주하게 한다. 그러한 정책 도전 과제는 나노과학과 나노기술의 확산을 조장하고 나노기술 기반의 제품을 안전하게 개발, 상업화하는 것을 육성하는 반면, 불법 사용을 막고 이 기술의 해로운 결과를 경감시키기 위한 규제를 수반한다. 이 프로젝트의 가장 두드러진 결과 중 하나는 현재까지 군사적 응용을 포함하는 나노기술의 규제에 대한 관심이 걱정스러울 정도로 결여되어 있다는 것이다. 나노입자가 상당한 군사적 잠재력과 유독성의 가능성을 갖고 있음에도 불구하고, 특히 나노기술을 규제하는 국가적 또는 다국간 규제를 개발하기 위한 노력이 거의 전무했다.

나노기술에 대한 민간 및 군사 응용에서 발생할 수 있는 대중의 안전과 국가적 안보에 잠재적인 해로움 중 규제문제의 주된 초점은 환경, 보건 및 안전에 대한 영향에 맞춰졌다. 극히 소수만이 생물학적 또는 화학적 제재의 나노를 목표로 하는 전달 가능성에 집중했다.⁶⁴⁾ 과학자들이 자발적으로 “자기 조립(self-assemble)”을 하는 분자 크기의 성분을 연구하는 가운데, 다른 사람들의 관심사는 생산된 장치보다는 공장 자체에 있다.⁶⁵⁾ 나노 공장은 이론상으로 복잡한 제품을 생산하고 심지어 스스로 복제할 수 있어서 효율을 기하급수적으로 증가시키면서, 실패율과 비용을 엄청나게 낮추어 제조업(그리고 전쟁을 위한 산업적 역량)에 일대 혁신을 일으킬 수 있다. 1조 개의 컴퓨터가 1입방 센티미터 안에 들어갈 수 있다. 이로 인해 나노기술을 통제하기 위한 예방 군비통제체제가 촉구되었고⁶⁶⁾ 다른 한편으로 원자 및 분자 공간을 다루는 Inner Space Treaty가 옹호되었다.⁶⁷⁾ 특히 나노기술,

64) Jürgen Altmann, *Military nanotechnology: potential applications and preventive arms control*, (New York: Routledge, 2006); Margaret E. Kosal, *Nanotechnology for chemical and biological defense* (New York: Springer, 2009).

65) (Initiative); NATO, “The Security Implications of Nanotechnology 179 STCMT 05 E - The Security Implications of Nanotechnology” (2005)

66) Jürgen Altmann, *Military nanotechnology: potential applications and preventive arms control*, (New York: Routledge, 2006)

생명공학기술, 정보기술 등의 신생 과학학문이 융합하여 새로운 초학문적 연구와 응용을 생성하게 되면서 이러한 관심사는 더욱 증폭되고 있다.⁶⁸⁾ 생물학 무기의 경우처럼, 위험한 나노기술을 활용한 무기를 개발하는 데 필요한 장비와 재료의 대부분이 광범위한 과학 연구와 산업 활동에서 합법적으로 사용되고 있다. 이에 대한 예로는 합성 바이러스(합성 폴리오), 미생물의 전달, 확산 및 조작이 포함된다. 결과적으로, 나노기술이 제기하는 거버넌스의 문제는 중대하게 다루어야 할 사안이라고 할 수 있다.

민군겸용기술을 위한 다국간 규제 정책

현재 나노기술만을 위한 다국간 규제제도를 신설하려는 노력은 없다. 이 사실은 나노기술이 대량 살상이나 교란을 가져올 가능성이 크지 않다는 현재의 이해 수준을 반영한다.⁶⁹⁾ 그 대신, 민군겸용기술을 다루는 기존의 공식적 및 비공식적 규제 정책이 현재 나노기술에 확장 적용되고 있다. 나노기술의 대량살상 또는 교란을 일으킬 수 있는 군사적 응용이 화학과 생물학 분야에서 발생할 가능성이 있다. 그러나 이 분야들은 합성생물학의 학제간 발전과 더불어 점점 서로 구분하기 어려워지고 있다.⁷⁰⁾

이 분야에서 기존의 공식적인 다국적 체제는 화학무기금지협약(CWC⁷¹⁾)과 생물독성 무기금지협약(BTWC⁷²⁾)이다. 2013년 화학무기금지기구(OPCW)는 화학무기금지협약을 위한 나노기술의 영향을 고찰하고, 다음과 같이 결론을 내렸다.

67) Sean Howard, "Nanotechnology and Mass Destruction: The Need for an Inner Space Treaty," *Disarmament Diplomacy* 65 (2002년 7-8월).

68) Mihail C. Roco, Bainbridge, William S., Tonn, Bruce, Whitesides, George, "Convergence of Knowledge, Technology, and Society: Beyond Convergence of Nano-Bio-Info-Cognitive Technologies," World Technology Evaluation Center, Inc., 2013.

69) Margaret E. Kosal, *Nanotechnology for chemical and biological defense* (New York: Springer, 2009); OPCW, *Report of the Scientific Advisory Board on Developments in Science and Technology for the Third Special Session of the Conference of the States Parties to Review the Operation of the Chemical Weapons Convention RC-3/DG.1* (2012년 10월 29일)

70) Margaret E. Kosal, "Nanotechnology Threat Anticipation," 미발표 프레젠테이션, 2012년 9월 3일; Margaret E. Kosal, "Strategy, Technology, and Governance: Shift of Responsibility from Nation-states to Individuals," Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies의 제5회 연차총회의 발표용으로 준비된 프레젠테이션, 매사추세츠 주, 보스턴, 2013년 10월 27-29일. p.15.

71) Chemical Weapon Convention

72) Biological & Toxin Weapon Convention

합성 생물학이 발전하면서 나노기술이 금지된 목적에 적용될 수 있는 가능성이 높아졌다. 생화학적 표적에 치료약을 보다 효과적으로 전달할 수 있게 된 것이 유독성 화학물질을 전달하는 데 적용될 수 있다. 더 큰 입자와 비교하여 상당히 개선된 맹독성을 가진 나노입자에 대한 우려에 대해서는 여전히 조사 중이기는 하지만 아직 입증되지는 않았다. 따라서 나노물질이 가하는 이 협약에 대한 위험이 현재로서는 낮다고 인식된다. 과학자문위원회(Scientific Advisory Board)의 우세한 견해는 나노기술이 기존 화학물질의 군사적 활용을 극적으로 개선하지는 않겠지만, 새로운 물질을 개발하는 데 이용될 수 있다는 것이다.⁷³⁾

수출통제정책 면에서 볼 때, 국가들은 경쟁력을 이유로 나노기술 수출 금지를 꺼려왔다. Zyvex Technologies와 같은 미국 기업들은 자신들의 CNT 기술이 미국 탄약목록(미국무부에서 관리하는 국제무기거래규정(ITAR⁷⁴⁾))하에서 통제대상이며, 이에 대한 생산을 해외로 옮기도록 위협을 받았다고 말했다.⁷⁵⁾ 그러한 위협의 심각성이 미 대통령 직속 수출위원회로 하여금 전략물자수출통제(export control)는 “효력을 나타내기 위해선 다국적이어야 한다”⁷⁶⁾는 언급하에 “분명한 군사적 및 국가적 안보 응용” 없이는 나노기술에 대한 일방적인 통제를 거부하게 만들었다.

나노기술에서 미국의 국가 경쟁력을 없애는 것에 대한 우려는 수출통제개혁계획(Export Control Reform Initiative)하에서 미국의 수출통제체제를 개편하도록 이끌었다. 즉, 2013년 10월 현재 나노 적용 기술을 포함해 거의 모든 민군겸용기술은 미 상무국 산업안보국의 통상통제목록(CCL⁷⁷⁾)의 범위에 들게 되었다.

미 국무부에 따르면 통상통제목록은 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 바세나르체제 민군겸용 리스트 품목
- 핵무기 관련 민군겸용 물자(핵공급그룹의 핵위탁 명부에 편찬)

73) OPCW, *Report of the Scientific Advisory Board on Developments in Science and technology for the Third Special Session of the Conference of the States Parties to Review the Operation of the Chemical Weapons Convention RC-3/DG.1* (October 29, 2012); 14. Emphasis added.

74) International Traffic in Arms Regulations, 미국 정부 규정으로 국방 관련 미 군수품 목록에 대한 수출입을 제어하는 것으로 미 수출제한 법안 22장에 근거를 둔다.

75) Margaret E. Kosal, "Nanotechnology Threat Anticipation," 미발표 프레젠테이션, 2012년 9월 3일.

76) J.W. Marriott, Jr, 나노기술에 관한 수출통제 관련 부시 대통령에게 수출위원회에서 보내는 문서, 2006, Jacob Heller와 Christine Peterson의, "Nanotechnology: Maximizing Benefits, Minimizing Downsides"에서 인용, *Nanoscale: Issues and Perspectives for the Nano Century*, pp. 83-96, Nigel M. de S. Cameron 및 M. Ellen Mitchell 편집. (Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 2007), p. 91; *Washington Trade and Tariff Newsletter* 25: 48 (2005년 12월 5일), p. 1.

77) Commerce Control List

- 미사일 기술 규제 정책 리스트의 민군겸용 품목
- CW 전구체, 생물학적 유기체와 독소, 호주그룹 리스트에 있는 CBW 관련 장비
- 대테러, 범죄통제, 총기협약, 지역 안정, 유엔 제재 및 공급부족 이유를 포함하는 미 외교정책 및 다른 목적을 증진하기 위해 규제되는 품목
- 특정 사용 및 사용자를 위한 리스트에 없는 품목(catch-all 규제)⁷⁸⁾

바세나르체제 민군겸용 리스트는 2가지 나노기술 품목을 포함한다. 나노결정질 합금 띠와 나노 임프린트 리소그래피 틀이다. 이 리스트는 또한 200나노미터 미만의 장비생산 품목의 14가지 예를 열거한다. 바세나르 탄약 리스트에는 나노기술에 대한 언급이 없다.⁷⁹⁾ 러시아 연방도 동일한 두 품목과 나노스케일 장비에 대해 약간 더 광범위하게 열거한다.⁸⁰⁾ 핵공급그룹은 알렉산드라이트 레이저라는 민군겸용 품목 하나를 ‘핵 관련 민군겸용 장비, 물질 및 관련 기술의 이동에 대한 지침’⁸¹⁾에서 열거하고 있다. 호주그룹도 나노기술을 구체적으로 언급하지는 않지만, 유전자 변형생물체나 미생물의 병원성 및 그 리스트에 있는 독소와 연관된 화학적으로 합성된 유전적 요소를 구체적으로 언급하고 있다.⁸²⁾ CCL에 대한 미국의 의존은 미국의 수출통제에 대한 새로운 안일한 태도가 “무기 확산을 악화시키고 미국의 안보를 저해할 가능성이 있다”는 비판을 낳고 있다.⁸³⁾

나노기술의 위험과 규제 영향에 대한 서로 다른 접근

앞서 이미 언급한 대로, 합의된 정의가 없다는 것은 나노기술의 경제, 안보 및 안전에 대한 잠재력과 위험을 평가하기 위해 수집되고 이용되는 데이터가 종종 나노물질, 나노

78) 미 국무부, “Overview of U.S. Export Control System,” 2014년 6월 15일.

79) 바세나르체제(Wassenaar Arrangement), List of Dual-Use Good and Technologies and Munitions List, 2013년 4월 12일.

80) 러시아연방기술수출통제국(FSTEC), *Spisok Tovarov i Tekhnologii Dvoynovo Naznacheniiia, Kotorie Mogut Byt' Ispolsovanyi pri Vooruzhenii i Voennoi Tekhniki i v Otnoshennii Kotoriykh Osushchestvliatsia Eksportnyi Kontrol* (무기, 군사장비 및 수출통제대상에 사용될 수 있는 민군겸용 물자와 기술 목록), 2011년 12월 17일.

81) 국제원자력기구, Guidelines for Transfers of Nuclear-Related Dual-Use Equipment, Material and Related Technology, INFCIRC/254/Rev.1/Part 2 Annex, 1992년 7월.

82) 호주그룹, Common Control Lists, 2014년 6월 15일.

83) David Fitzgerald, “Leaving the Back Door Open: How Export Control Reform’s Deregulation May Harm American Security,” *North Carolina Journal of Law and Technology* 15, Online Edition: 65-99, (2014), p. 75.

입자 및 나노기술에 대한 서로 다른 의미와 측정에 기반하고 있다는 뜻이다. 의심스러운 데이터, 서로 다른 정의, 다른 위험의 개념 및 경제적 경쟁이 나노기술 규제에 기반이 되는 국제적 차원은 고사하고 국가 차원의 기준을 마련하기 위한 노력을 어렵게 만들고 있다. 이러한 요인들은 지금까지 민간 상업규제기준과 나노기술 거버넌스에 대한 합의된 국제적 규범 정립의 기반이 되는 나노물질에 대한 전 세계적인 차원의 통계적 정의를 마련하는 데 걸림돌이 되고 있다. 결과적으로, 세계 각국은 나노기술에 대한 국가적 차원의 규제에 대해 서로 다른 규제를 추진하고 있는데, 이러한 규제는 대부분 나노기술과 기술제조에서 발생하는 잠재적 위험에 대해 ‘관망세’나 예방적 차원의 접근을 적용하는데 기반을 두고 있다.

현재, 국제적인 규제에 있어서 가장 큰 원칙적인 차이는 유럽과 미국에 있다. “미국과 유럽이 국내 규제에 예방책을 사용하는 데 일관성이 없을지라도, 국제적 규제 논쟁에서는 서로 다른 입장을 취하게 되었다. 미국이 계속 규제적인 무역제약이 세계무역기구(WTO) 규정을 따르는 ‘건전한 과학’에 근거해야 한다고 주장하는 반면, 유럽연합은 예방적인 기준을 국제적으로 확산하고 환경정책에 우선하여 세계무역기구와 환경정책의 관계 재균형을 이루기 위해 추진하고 있다.”⁸⁴⁾

EU는 특히 2007년 화학물질관리규정을 통하여 미국보다 훨씬 적극적으로 환경, 보건 및 안전에 대한 규정을 정립했다. 이와 반대로, 미국의 규제는 생긴지 30년이 지난 독성물질통제법(TCSA⁸⁵⁾)에 기반하고 있다.

2006년 미 환경보호국(EPA)은 나노실버가 살충제에 해당한다고 결정하고 규제를 요구했다. 2008년에는 CNT가 독성물질통제법에 따른 새로운 화학물질에 해당한다고 규정했다. 그러나 2007년 미 식품의약청(FDA)은 나노에 국한된 라벨링 조건을 거부했다.

앞서 논의한 나노물질에 대한 EU의 정의는 확인할 수 있는 생산자가 있는 조작된 나노물질과 추적과 규제가 더 어려운 디젤 매연과 장작 연기를 포함하는 자연적으로 발생하는 나노물질을 구분하지 않는다. 이로 인해 조작된(Engineered) 나노입자만을 나노물질로 명칭을 붙이는 조건에서 자연적으로 발생하는 나노입자를 포함하도록 조건을

84) Robert Falkner and Nico Jaspers, “Regulating Nanotechnologies: Risk, Uncertainty and the Global Governance Gap,” *Global Environmental Politics* 12(1): 30–55, (2012), p. 34.

85) Toxic Substance Control Act

바꿀 수 있게 되면서, 규제조건에 대한 우려를 낳았다.⁸⁶⁾ 이러한 접근방식에서 EU는 초기의 나노기술 규정에 관한 예방적인 원칙에 의존하는 것 같다. 반대로 미국의 나노물질의 정의는 자연 발생하는 나노물질을 규제에서 배제할 것이다. 이는 현재 미 식품의약청이 취하는 방식이다.⁸⁷⁾ 미국은 일반적으로 나노기술 규제에 대해 단편적인 접근 방식을 따르고 있다. EU와 달리 미국 정부는 상업적 나노기술 응용에 대해 보다 위험을 수용하는 입장이다. 그러나, 이러한 입장에는 많은 반발이 따르고 있다.⁸⁸⁾

국제표준화기구(ISO)는 제품인증을 허용하는 상업기준을 수립하는 데에 핵심적인 역할을 한다. 합의된 나노기술 기준이 없는 상황에서 국가와 산업들은 현재 자국의 산업에 이익이 되는 방식으로 이러한 기준을 세우기 위해 서로 경쟁하고 있다.⁸⁹⁾ 또한 이 경쟁자들은 혁신과 경쟁력을 저해할 수 있는 나노 관련 규제를 도입하는 것을 피하려고 자발적인 거버넌스 메커니즘에 집중하고 있다.

나노기술의 상향식 규제

나노기술의 규제에 관한 기존의 상황은 정부의 간섭보다 개인과 기업의 책임을 강조한다. 부분적으로는 이러한 이머징 테크놀로지에 대한 정의 및 개발, 제조, 이동 및 사용을 모니터링하고 확인하는 데 따르는 막대한 어려움(나노기술이 생명공학과 공유하는 특징) 때문에 민군겸용 항목을 겨냥한 정부규제를 도입하기 위한 노력이 거의 없는 실정이다. 화학무기금지조약을 만드는 데 화학산업이 핵심 참여자인 화학무기의 경우와 달리, 생물공학에는 그러한 단합된 노력이 없다.⁹⁰⁾ 그 대신, 1975년 이래로 산업 및 학계에서 자체규제와 자체감시를 위한 자발적 행동강령을 개발하려는 노력이 있었다.⁹¹⁾ 현재

86) Nanowerk, "Definition of the Term Nanotechnology," 2013.

87) 미 식품의약청, "Considering Whether an FDA-Regulated Product Involves the Application of Nanotechnology," 2011.

88) Carolyn R. Davis, Stanley Goos, 및 Anne M. Schneiderman, "Ninth Circuit Vacates EPA's Approval of Nanosilver-based Pesticide," 2013년 11월 26일.

89) Anne L. Clunan, NSET 소위원회 고위급위원과 개인적 의사소통, 워싱턴, DC, 2013년 5월 31일.

90) Anne L. Clunan, Building Information Networks for Biosecurity, "Terrorism, War or Disease? Unraveling the Use of Biological Weapons," pp. 293-310, Anne L. Clunan, Peter R. Lavoy 및 Susan B. Martin, 편집자, (Palo Alto: Stanford University Press, 2008).

나노기술도 마찬가지다. 기업과 일부 학계의 지지자들이 정부의 관여를 막기 위해 이러한 민간 차원의 규제정책을 옹호하고 있다.⁹²⁾

현재 나노기술 분야에 몇몇 자발적인 제도가 있다. 이 제도들은 환경보호단체인 환경보호기금(Environmental Defense Fund)과 듀폰이 개발한 나노 리스크 제도(*Nano Risk Framework*), 영국에서 개발한 나노 코드(*Nano Code*), 미국 환경보호국의 나노스케일 물질 관리 프로그램, 영국 정부의 조작된 나노스케일 물질을 위한 자발적 보고 제도(*Voluntary Reporting Scheme for Engineered Nanoscale Materials*), 상업적으로 추진된 어슈어드 나노(*Assured Nano*) 승인제도, 2008년 유럽연합 집행 위원회의 나노과학과 나노기술에 관한 책임 있는 연구를 위한 행동강령(*Code of Conduct for Responsible Nanosciences and Nanotechnologies Research*) 권고안 등이다.⁹³⁾ 이 자발적 행동강령의 목적은 특히 ‘사회 전체에 혜택을 주기 위해 유럽 내 통합되고, 안전하며 책임 있는 나노과학과 나노기술연구’에 관한 혁신과 연구를 추구하는 데 있어 회원국들의 행동을 지도하기 위한 것이다.⁹⁴⁾ 이러한 노력이 계속되어 나노기술에 관한 규범 및 규제제도가 각 기업과 과학자들의 책임으로 점차 인식되고 있다.

이머징 테크놀로지의 거버넌스는 아래로 이양되고 있고, 나노기술 생산과 사용을 관리하기 위한 국제적인 규범과 합의를 개발하는 데 관심도 없는 실정이다.⁹⁵⁾ 이러한 태도는 경제적으로 중요한 사안이 21세기의 기술적인 리더십과 경쟁력에 매우 중요한 것으로 인식되는 3가지 첨단기술 분야인 나노기술, 바이오기술 및 정보통신기술의 혁신과 상업화를 촉진한다는 것에서 주로 기인한다.

91) Margaret E. Kosal, “Strategy, Technology, and Governance: Shift of Responsibility from Nation-states to Individuals,” 2013년 10월 27-29일, 매사추세츠 주 보스턴에서 열린 Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies의 제5회 연차총회에서 발표용으로 준비된 프레젠테이션, pp. 10-12

92) Tim Büthe and W. Mattli, *The New Global Rulers: The Privatization of Regulation in the World Economy* (Princeton: Princeton University Press 2011); Stephen M. Maurer, 편집자, *WMD Terrorism: Science and Policy Choices* (Cambridge, Mass: MIT Press, 2009); Stephen M. Maurer, “Five Easy Pieces: Case Studies of Entrepreneurs Who Organized Private Communities for a Public Purpose” (2010년 11월 1일), Goldman School of Public Policy Working Paper No. GSPP10-011,

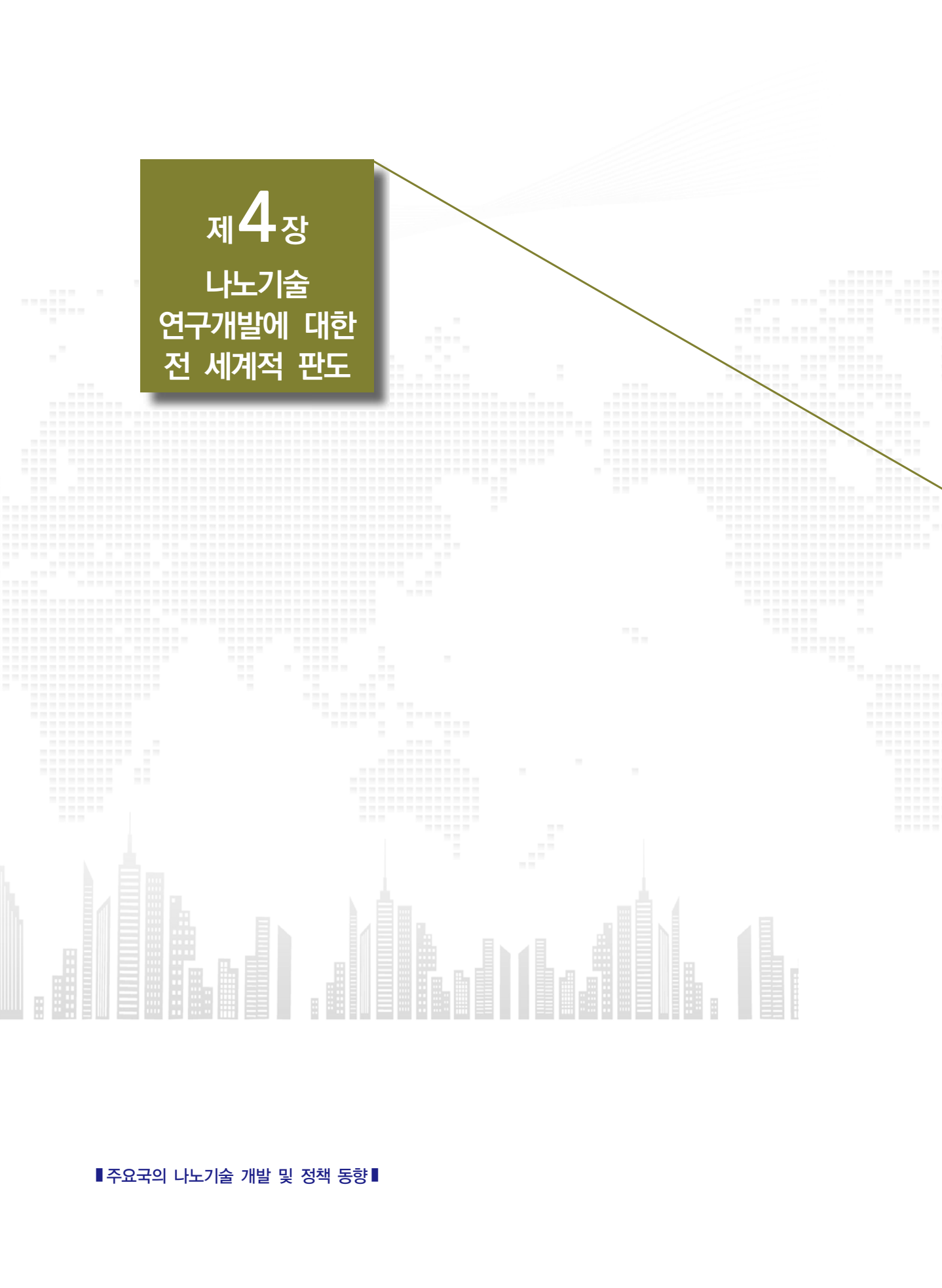
93) Daniel J. Fiorino, *Voluntary Initiatives, Regulation, and Nanotechnology Oversight: Charting a Path*, 이머징 테크놀로지에 관한 프로젝트, 2010; pp. 28-29.

94) Kirsten L. Rodine-Hardy, “Big Government for Small Technology: European Regulation for Nanotechnology,” 2010년 6월 17-21일 동안 아일랜드 더블린에서 열린 European Consortium of Political Research Conference에서 발표용으로 준비된 논문.

95) Margaret E. Kosal, “Strategy, Technology, and Governance: Shift of Responsibility from Nation-states to Individuals,” 2013년 10월 27-29일, 매사추세츠 주 보스턴에서 열린 Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies의 제5회 연차총회에서 발표용으로 준비된 프레젠테이션, p. 15



본 보고서의 다음 절에서는 나노기술 연구개발(R&D)에 대한 전 세계적 판도를 기술할 것이다. 이것은 나노기술이 국가발전의 열쇠로 국가정부들의 상상력을 어느 정도 사로잡았는지에 대해서 강조하게 될 것이다.



제4장
나노기술
연구개발에 대한
전 세계적 판도

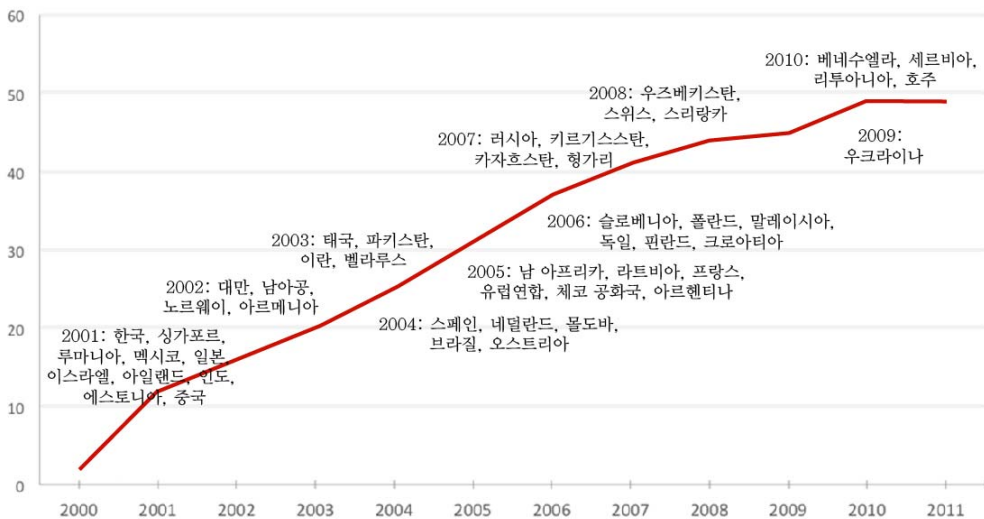
- 나노기술계획이 전 세계에 급속도로 확산된 이유
- 나노기술개발 동향

제4장
나노기술 연구개발에 대한 전 세계적 판도



■ 제4장 나노기술 연구개발에 대한 전 세계적 판도

선진 산업국가에서 신흥 경제국에 이르기까지 60여 개가 넘는 국가들이 2000년과 2012년 사이에 국가나노기술계획을 채택했다. 국가적 차원의 연합된 나노기술 연구개발 프로그램은 미국이 2000년에 수립한 국가나노기술계획(NNI)과 더불어 시작되었다. 스웨덴은 미국과 같은 해에 나노기술계획을 수립하였고 이어서 NNI가 급속도로 확산되면서, 2001년에 12개 국가들이 국가적 차원의 프로그램을 신설했다. 룩셈부르크, 에스토니아, 중국, 캐나다와 일본에 이르는 다양한 국가들이 새로운 프로그램을 개발했다. 그림 22에서 볼 수 있듯이 이때부터 꾸준하게 여러 나라들이 국가적 나노기술 프로그램을 신설했는데, 최근에는 호주(2010)와 이라크(2012)가 포함되었다.



출처: Kirsten Rodine-Hardy Research Team 2014, 원본 데이터세트는 공개된 출처로부터 수집됨.

그림 22 국가나노기술계획의 전 세계적인 확산(1990~2011년)

나노기술계획이 전 세계에 급속도로 확산된 이유

앞장에서 기술한 바와 같이 국가나노기술계획(NNI)은 매우 짧은 시기 동안 이루어졌다. 12년 동안 60여 개국이 나노기술계획을 신설한 것이다. 그렇게 다양한 국가들에서 이렇게 급속도로 NNI의 채택이 이루어진 이유는 무엇일까? 정치과학 및 경제에 대한 일반적 통념은 국제적 시스템에서 정치적, 경제적 강대국, 또는 적어도 시장 강대국의 역할에 초점을 두고 있으며, 큰 국가들이 나노기술의 채택에 앞장설 것으로 예상할 수 있다.

사람들은 소그룹의 고소득 국가들이 초기에 이 계획을 채택하고, 그 뒤에 활동이 저조한 시기가 이어지고, 몇 년이 지나자 수많은 국가들이 이 계획을 채택하게 되면서, 이러한 추세가 유행하게 된 이후에 뒤늦게 동참하는 국가들이 생겼다고 생각할 것이다. 그러나 이와는 반대로, 나노기술의 추세는 꾸준하고 지속적으로 채택이 증가하는 것으로 여겨진다.⁹⁶⁾

어떤 국가가 나노기술 연구개발을 선도하며 국가적 차원의 나노기술계획을 언제 채택할지의 패턴은 진보적 경제 정책뿐 아니라 예상되는 기술 확산 패턴 면에서 이례적이다.⁹⁷⁾ 나노기술 R&D에 대한 국가투자의 규모와 새로운 나노기술계획을 채택하는 시기의 상관관계는 전무하다. 마찬가지로 국가들 사이에 쉽게 확인되는 선발국가와 후발국가 간의 차별도 없다. 그 대신, 전통적인 지리적 또는 정치적 예상을 초월하는 추세가 점차 증가하고 있다. 예를 들어 일본, 미국, 스웨덴이 2000년에 국가적 나노기술계획을 채택한 것은 상당히 일리가 있지만, 어째서 싱가포르, 에스토니아, 아일랜드, 루마니아와 같이 여러 작은 나라들에서 그 다음 해에 이러한 프로그램을 채택했는지, 또는 어째서 아르마니아, 파키스탄, 벨라루스 같은 국가들이 2002년에 채택을 했는지는 불분명하다.

96) Clayton Christensen, *The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail* (Boston Mass.: Harvard Business School Press, 1997); Clayton Christensen, "The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption,(Dialogue on the Effects of Disruptive Technology on Firms and Industries)," *Journal of Product Innovation Management* 23 (1): 39 (2006)

97) Everett M. Rogers, *Diffusion of Innovations, 4th ed* (New York: Free Press, 1995); Kirsten Rodine-Hardy, *Global markets and government regulation in telecommunications*(Cambridge: Cambridge University Press, 2013)

표 2 미 특허청에 등록된 주요국 누적등록 특허건수 및 점유율(2000~2013년)

순위	국가	특허건수	점유율	순위	국가	특허건수	점유율
1	미국	40,750	66.4%	6	프랑스	1,365	2.2%
2	일본	7,448	12.1%	7	캐나다	918	1.5%
3	한국	2,500	4.1%	8	중국	837	1.4%
4	대만	2,239	3.6%	9	네덜란드	768	1.3%
5	독일	2,107	3.4%	10	영국	750	1.2%

더욱이 독일은 가장 규모가 큰 나노기술 시장 중 하나이지만, 유럽연합의 기본 틀이 마련된 2006년이 되어서야 국가적 차원의 계획을 채택했다. 정치적 힘이나 시장의 영향력이 거의 없는 대다수의 작은 국가들(예를 들면 아르메니아, 에스토니아, 루마니아)은 초기에 나노기술계획을 채택했다. 지정학적인 영향력도 왜 그리 많은 국가들이 그렇게 짧은 기간에 국가적 나노기술계획을 채택했는지에 대한 쉽고 분명한 해답이 되지는 못하는 것 같다. 국제사회에 신호를 보내기 위해 여러 국가들이 나노기술계획을 이용하는 다양한 방식이 이례적인 확산 패턴을 설명할 수 있다. 다른 기술 규제 및 계획과 달리, 나노기술은 새로운 기술 및 군사 혁명의 기반으로 환영 받고 있다.⁹⁸⁾ 정치 엘리트들은 첨단 기술을 장기적 경제성장과 경제 및 군사적 위용을 위한 국가적 우위의 근본적인 원천으로 판단하고 있다.

‘기술 혁명’과 ‘와해성 기술’의 개념에 내재한 만연된 통념은 기술이 경제, 사회, 정치 및 전쟁에서의 역사적인 변화를 주도한다는 것이다. 어떤 사람들은 “다음번의 주요한 기술조류로서 나노기술이 과학과 기술적인 면에서뿐만 아니라 사회 및 경제적인 면에서도 일대 혁신을 가져올 것”이라고 말한다.⁹⁹⁾ 많은 사람들에게 있어 정치적으로 당연한 귀결은 기술적 주도권을 차지할 수 있는 국가들이 다른 국가들에 비해 상당한 부와 군사적 힘을 가지게 될 것이라는 것이다. 유엔은 나노, 바이오, 및 정보기술이 성장과 발전을 위한

98) C. Jordan, N. Kaiser, and V. Moore, “Nanotechnology Patent Survey: Who Will Be the Leaders in the Fifth Technology Revolution?” *Nanotechnology Law & Business* 9 (2012년 가을): 122–13; M. Knell, “Nanotechnology and the Sixth Technological Revolution,” *Nanotechnology and the Challenges of Equity, Equality, and Development*, SE. Cozzens and JM Wetmore 편집 (Springer, 2011)

99) P. Singer., F. Salamanca-Buentello, and A. Daar, “Harnessing Nanotechnology to improve global equity: the less industrialized countries are eager to play an early role in developing this technology; the global community should help them,” *Issues in Science and Technology* 21 (4), 2005.

주요 원동력이 되는 기술이 된다고 보고 있다.¹⁰⁰⁾ 나노기술 혁명에 대한 잠재력이 발전과 성장의 가능성을 강하게 부각시킬 수 있었다.

그러나 가능성은 확산과정을 왜곡시켜서, 저개발 소국가들로 하여금 나노기술이 국가 발전을 가속화할 수 있게 할 것이라는 희망을 품고 시류에 편승하게 만들었다. 나노기술에 관한 남미지역의 손꼽히는 전문가의 말에 따르면, 2005년 유엔이 나노기술이 발전의 핵심기술이라고 발표하자 모든 남미국가들이 NNI를 채택했다는 것이다. 그들에게 있어 그것은 발전에 대한 열망과 위신의 문제이다.¹⁰¹⁾ 다른 국가들은 나노기술을 안보의 문제, 정치적 권력 또는 국가적 위신의 문제로 간주한다. 브라질, 러시아, 인도와 같은 국가들에게 있어 국가적인 나노기술계획을 채택한다는 것은 어떤 나라가 세계에서 자국의 역할을 진지하게 고려하고 있으며, 자국의 전략적 이해와 국제적 명망을 추구하고 있다는 것을 국제시장과 정치적 영향력을 가진 국가들에게 알리는 전략적인 신호를 반영하는 것 같다. 반대로, 독일은 나노기술의 군사적 응용을 축소시키고, 그 대신 상업적 가능성에 집중하여 다른 국가들에게 나노기술을 공격용으로 사용할 의도가 없음을 시사하고 있다. 중국은 군사적 응용보다는 나노기술의 경제적 성장의 가능성에 초점을 두고 있는 것처럼 보인다.¹⁰²⁾ 여전히 다른 국가들은 나노기술의 원대한 가능성에 쉽게 미혹되지 않는다. 많은 국가들이 다양한 렌즈를 통해 나노기술을 바라보고 있다. 나노기술을 오랫동안 기다린 기술혁신과 현대화의 열쇠로 인식하는 국가는 나노기술을 안보의 문제로만 여기거나 거의 어떤 문제도 되지 않는다고 여기는 국가와는 다르게 접근하여 채택할 것이다.

100) C. Juma and L. Yee-Cheong, "Innovation: Applying knowledge in development," UN Millennium Project Task force on Science, Technology and Innovation (2005)

101) Anne Ciunan, Noela Invernizzi와의 개인적 의사소통, 매사추세츠 주, 보스턴, 2013년 10월 25일.

102) Anne Ciunan, NSET 소위원회 고위급위원과의 개인적 의사소통, 워싱턴 D.C., 2013년 5월 31일. 본 보고서의 중국 사례연구도 참조.

나노기술개발 동향

2009년, 나노기술에 관한 전 세계 정부들의 지출은 500억 달러에 달하는 것으로 추산된다. 미 정부의 투자는 EU나 러시아 같은 선두국가들의 투자보다 뒤쳐졌으며 중국과는 거의 비슷한 실정이었다. 거의 20억 달러에 달하는 투자액과 함께, 미국 기업들이 민간 나노기술 연구개발에 계속 선두를 유지하고 있으며 그 뒤를 일본 민간 기업들이 바짝 뒤쫓고 있다. 미 국가연구위원회¹⁰³⁾는 바텔연구소 R&D 매거진의 2012년 국제 R&D 보고서에서 전 세계 연구개발비 중 미국이 차지하는 비율이 2010년 32.8%에서 2012년 31.1%로 감소할 것이며, 아시아 국가들이 연구개발비를 늘려, 미국의 경쟁력에 장기적인 도전을 가하게 될 것으로 전망하는 점을 주목했다.¹⁰⁴⁾ “나노기술 활동”과 “기술발전 역량”의 측정에 기반하여, 룩스 리서치(Lux Research)는 2010년에 소규모 강국이 일본, 독일, 한국, 대만이며, 싱가포르, 스웨덴, 한국, 이스라엘과 스위스는 특히 나노기술 틈새 시장을 지배하고 있다고 시사했다. 그 보고서에서는 미국이 전반적인 기술발전역량이 퇴보하면서 “상아탑(현실과 동떨어진) 상황”으로 빠져들고 있다고 밝혔다.

러시아는 브라질, 인도와 함께 “마이네리그”에 속하는 것으로 평가되었다.¹⁰⁵⁾ 반면, 나노기술산업 컨설팅 기업인 사이언티피카(Cientifica)는 미국, 중국, 러시아, 독일, 일본 순으로 나노기술에 대한 투자가 가장 효과적으로 경제활동으로 전환되고 있는 국가들을 선정했다.¹⁰⁶⁾ 이렇게 내용이 서로 상충하는 보고서는 앞서 언급한 문제가 많은 데이터 수집과 평가에 기인한다.

그림 23과 24는 룩스 리서치의 데이터를 근거로 나노기술에 대한 공공 및 민간 차원에서 가장 많은 투자를 하고 있는 상위 10위권 국가들의 2008년에서 2010년 사이의 국가 투자를 나타낸 것이다. 정부 관리들은 이 숫자에 매우 주목한다. 이 수치들은 미국이 나노기술에 대한 정부 및 민간 차원의 지출부문에서 선두의 위치에 있으며, 러시아와 중국의 공공투자가 증가하고 있으나, 미국 정부지출이 2009년에 비해 감소하고 있음을

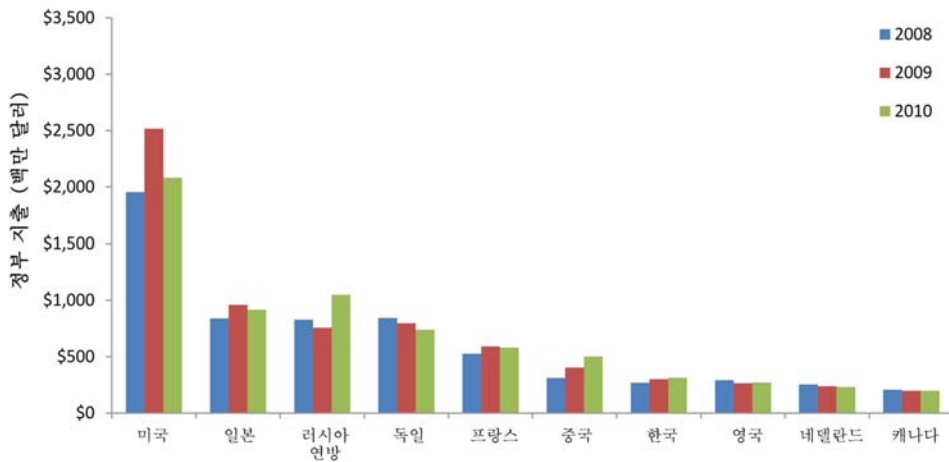
103) 미 국가연구위원회, “Triennial Review of the National Nanotechnology Initiative” (National Academy Press, 2013)

104) Battelle, “2013 Global R&D Funding Forecast” (2012); Battelle, “2014 Global R&D Funding Forecast” (2013)

105) D. Hwang, “Ranking the nations on nanotech,” *Solid State Technology* (2010); Jaideep Rajee, “Commercialisation of Nanotechnology: Global Overview and European Position,” Lux Research (2011)

106) Cientifica, “Global Funding of Nanotechnologies and Its Impact” (2011)

시사한다. 미국의회조사국(Congressional Research Service)도 룩스 리서치의 자료에 근거하여 나노기술에 관한 최근 보고서에서 미 정부 투자가 구매력평가지수(PPP¹⁰⁷)를 바탕으로 중국과 러시아보다 뒤처지지만, 실질적인 달러로 따질 때 여전히 선두를 달리고 있다고 보고했다. 미국 기업들도 약 20억 달러의 투자액을 가지고 민간 나노기술 연구 개발에서 계속 선두를 유지하고 있으며, 일본 민간 분야가 미국의 뒤를 바짝 따르고 있다.¹⁰⁸⁾

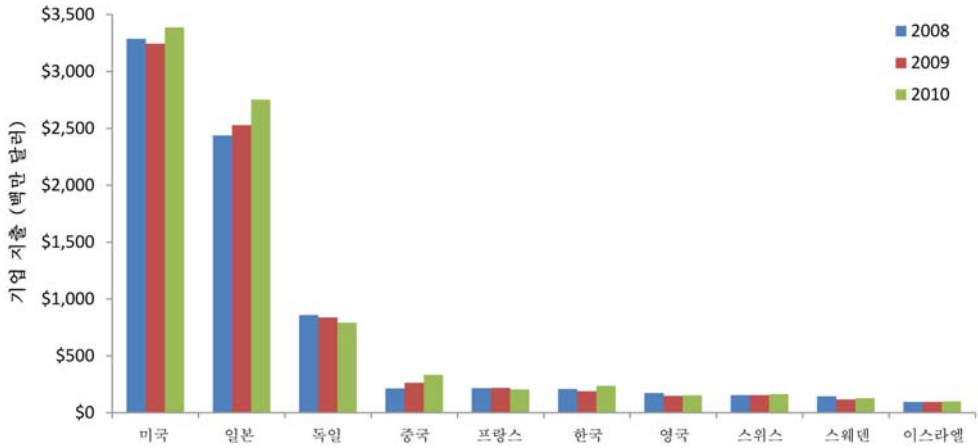


출처: A.Xue and D. Hwang, "Nanotechnology Funding: Corporations Grab the Reins," 룩스 리서치, 2011년 4월

그림 23 상위 10위권 국가들의 나노기술에 대한 국가적 투자

107) Purchasing Power Parity

108) John F. Sargent, Jr., "Nanotechnology: a policy primer.(Congressional Research Service)(Report)" (2010)



출처: A.Xue and D. Hwang, "Nanotechnology Funding: Corporations Grab the Reins," 룩스 리서치, 2011년 4월

그림 24 상위 10위권 국가들의 나노기술에 대한 기업 지원

미 대통령 과학기술 자문위원회는 2012년 “중국, 한국 및 일찍 이 분야에 뛰어든 그 밖의 국가들 이외에 러시아도 나노기술공사(RUSNANO)를 통해 현재 주요국가로 부상하고 있으며, 나노기술 연구개발 지출에 미국 다음으로 2위를 차지하고 있다. 룩스 리서치에 따르면, RUSNANO는 투자금을 10억 5천만 달러로 약 40퍼센트 증가했고 2015년까지 약 15억 달러 수준으로 더 증가하려는 계획을 가지고 있다.”고 보고했다.¹⁰⁹⁾ 미 정부는 RUSNANO의 행동, 특히 투자와 미국 나노기술 창업회사들의 인수에 대해 예의주시하는 한편, RUSNANO 사업이 투자나 투자에 대한 수익 면에서 “이해가 안 되는” 일이라고 언급하기도 하였다.

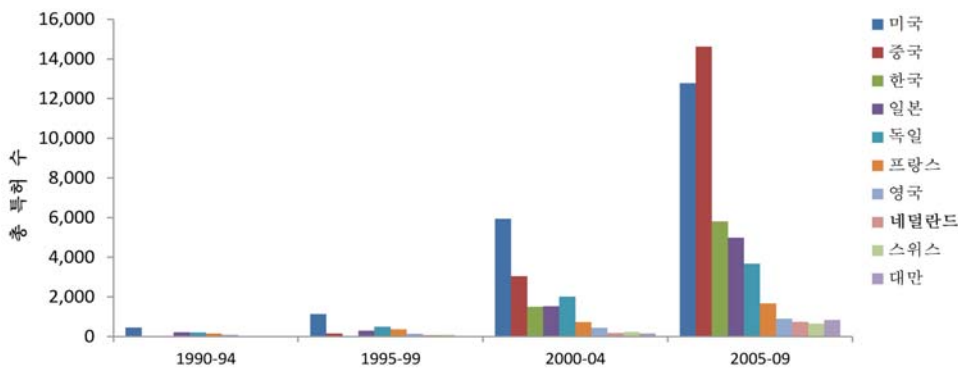
러시아의 투자는 러시아의 나노기술 출판물이나 특허의 점진적인 증가와는 일치하지 않는다. 출판물이나 특허는 모두 혁신과 지적재산권을 나타내는 지표이다.¹¹⁰⁾ 중국의 나노기술 노력에도 이와 유사한 관심이 기울여지고 있다.¹¹¹⁾

109) PCAST, “Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative, 미 대통령 과학기술 자문위원회” (2012), p. 13.

110) PCAST, “Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative, 미 대통령 과학기술 자문위원회” (2012); Evgeny A. Klochikhin, “Innovation System in Transition: Opportunities for Policy Learning” *Science and Public Policy* 40, pp. 657–673 (2013). 러시아의 나노기술 노력에 대한 자세한 분석에 관해서는 다음 참조: F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science, (스톡홀름: 스웨덴 방위연구 기관, 2011); R. Roffey, “Russian Science and Technology is Still Having Problems—Implications for Defense Research,” *Journal of Slavic Military Studies* 26 (2): 162–188 (2013).

일반적으로 미국은 여전히 나노기술 분야에서 리더의 위치를 차지하고 있다고 할 수 있다. 미 대통령이 제시한 2014년 연방예산은 국가나노기술계획에 17억 달러 이상을 배정했는데, 이는 2000년 NNI 설립 이후 미 정부의 나노기술에 대한 투자가 안정적으로 유지되어 온 것을 나타낸다.¹¹²⁾ NNI의 가장 큰 수혜자는 국방부, 국립과학재단과 에너지부이다. 2001 회계연도 이래 2014년을 포함한 미국 NNI의 누적된 투자는 거의 200억 달러에 달한다. 나노기술 분야에서 미국의 리더십은 나노기술에서 개발 중인 자금과 지적 재산의 양적 측면뿐 아니라 질적 측면에도 반영된다.

우선특허권의 경우, 지적재산권 보유자가 비록 한정된 시간일지라도 지적재산권을 주장할 수 있는 독점권리를 청구 및 획득할 수 있는 최초의 사람으로 국제적으로 인정되는 것이다. “우선특허출원은 기술특허패밀리에 관련된 지적재산을 어느 국가가 성공적으로 보유하게 될지를 시사한다.”¹¹³⁾ 질적 측면을 나타내는 또 다른 기준은 출판물의 인용 건수이다. 그림 27은 주저자의 국가당 나노기술 논문의 인용건수를 나타낸 것이다.



출처: L. Kay, P. Shapira J. Youtie, and A.L. Porter, 조지아공과대학 나노기술연구 및 혁신시스템평가 프로그램, 조지아 주 아틀랜타, (아리조나 주립대학, 지원 No.0937591) 나노기술연구센터(Center for Nanotechnology in Society)를 통해 미 국립과학재단으로부터 지원받음. [2010년 1월 현재 자료] PATSTAT은 특허 통계 데이터베이스를 나타내며, 이 데이터베이스는 유럽특허청이 관리한다.

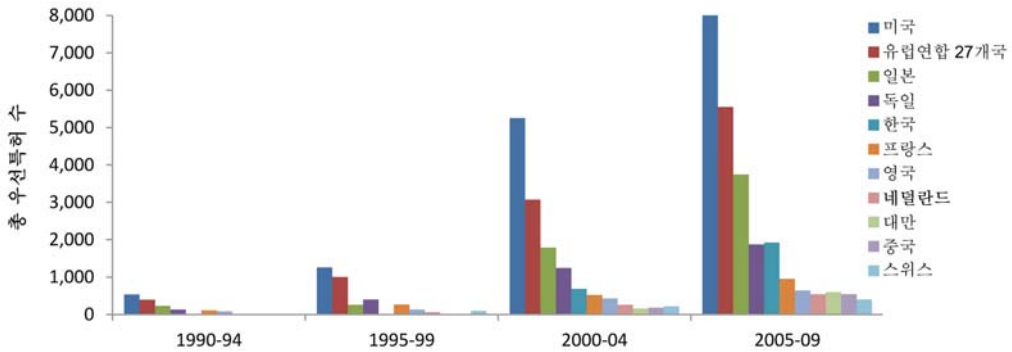
주: A.L. Porter, J. Youtie, P. Shapira, and D. Schoeneck, "Refining Search Teams for Nanotechnology," Journal of Nanoparticle Research, 10 (5): 715-728의 "나노기술"의 정의에 기반

그림 25 나노기술분야 특허출원 수, 연도 및 출원인 국적별(1990~2009년)

111) Anne Clunan, 미 NSET 소위원회 고위급위원과의 개인적 의사소통, 2013년 5월 31일.

112) Matthew N. Eisler, "Department of Energy," In Encyclopedia of Nanoscience and Society, David H. Guston 편집 (Thousand Oaks, CA: Sage, 2010), p. 154.

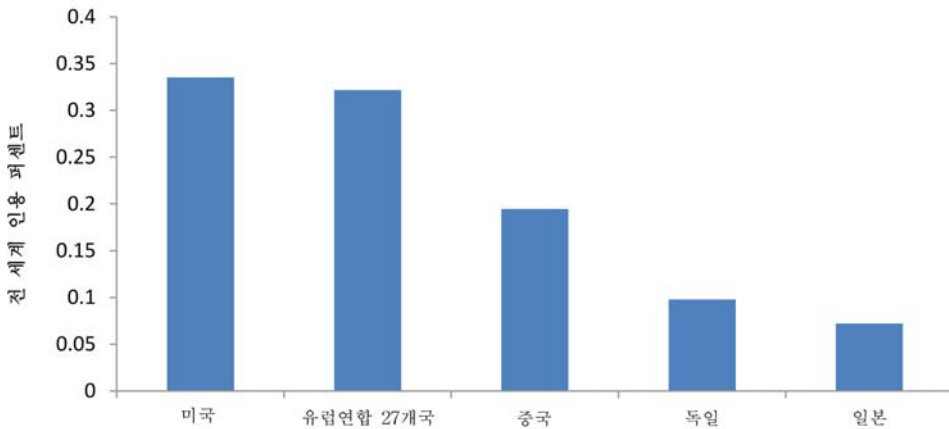
113) PCAST, "Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative, 미 대통령 과학기술 자문위원회" (2012); pp. 5-6.



출처: L. Kay, P. Shapira J. Youtie, and A.L. Porter, 조지아공과대학 나노기술연구 및 혁신시스템평가 프로그램, 조지아 주 아틀랜타, (아리조나 주립대학, 지원 No.0937591) 나노기술연구센터(Center for Nanotechnology in Society)를 통해 미 국립과학재단으로부터 지원받음. [2010년 1월 현재 자료] PATSTAT은 특허 통계 데이터베이스를 나타내며, 이 데이터베이스는 유럽특허청이 관리한다.

주: A.L. Porter, J. Youtie, P. Shapira, and D. Schoeneck, "Refining Search Teams for Nanotechnology," Journal of Nanoparticle Research, 10 (5): 715-728의 "나노기술"의 정의에 기반 우선출원이란 "1"의 우선순위 순서를 보고하는 PATSTAT(특허 통계 데이터베이스)의 특허문서이다.

그림 26 나노기술의 우선특허출원 수, 연도 및 출원인 국적별(1990~2009년)



출처: L. Kay, P. Shapira J. Youtie, and A.L. Porter, 조지아공과대학 나노기술연구 및 혁신시스템평가 프로그램, 조지아 주 아틀랜타, (아리조나 주립대학, 지원 No.0937591) 나노기술연구센터(Center for Nanotechnology in Society)를 통해 미 국립과학재단으로부터 지원받음. [2010년 1월 현재 자료]

주: S. Arora, A.L. Porter, J. Youtie, P. Shapira의 나노기술 과학 출력의 최신동향 파악하기: 출판기록을 위한 검색전략에 기반한 연구, STIP White Paper, 아틀랜타, 조지아, 2011. 이 수치는 2011년 8월 22일 현재, 2009년에 출판된 나노기술 문헌의 분포를 나타낸다.

그림 27 나노기술 관련 논문에 대한 전 세계의 인용 국가별 백분비

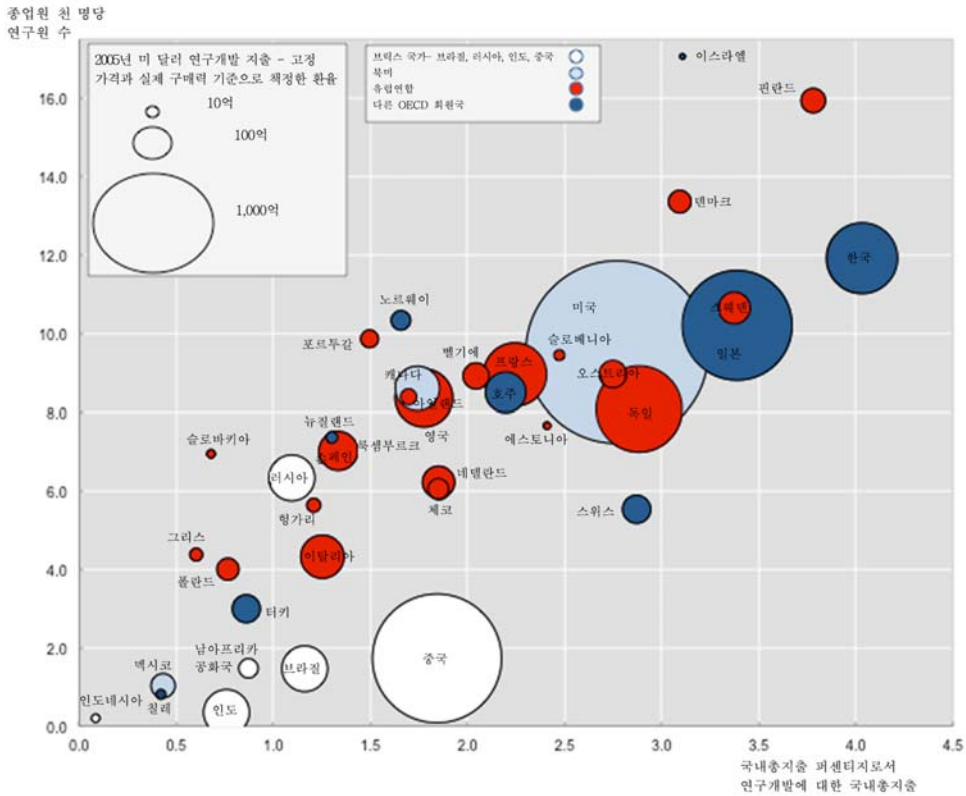
위의 그림들이 시사하는 것은 특허출원과 출판에 있어서는 중국이 미국을 앞질렀지만, 가장 많이 인용되는 출판물의 저자는 미국이나 유럽 출신이라는 것이다.

저명한 3대 과학저널인 *Nature*, *Science* 및 *Proceedings of the National Academy of Sciences*의 출판 및 인용건수는 미국인과 유럽인이 나노기술에 관한 최고수준의 논문을 발표하고 있음을 시사하는 것이다. “미국과 유럽 27개국은 이들 저널에서 아시아 국가들보다 월등히 많은 출판건수로 앞서고 있으며, 전 세계적인 출판비율에서 우세한 위치를 차지하고 있다.”¹¹⁴⁾ 이러한 데이터가 경제 및 군사력에 대한 전 세계의 서열의 판도를 바꿀 수 있는 나노기술의 잠재력에 대해 어떤 의미를 지니는지는 아래에서 논의할 것이다.

경쟁력과 혁신도에 관한 광범위한 데이터가 나노기술에 대한 국가 간의 경쟁이 전개되는 국가적 맥락을 제공한다. 신기술은 기술이 확산되고 초기의 틈새응용에서 변모할 수 있게 하는 폭넓은 국가기반이 있어야만, 경제와 사회에 진정으로 혁신을 일으킬 수 있을 것이다.

여러 요인들이 특허와 과학논문 이외에도 국가의 고등교육제도, 기업분야의 고도화, 재산권 제도, 인프라를 포함하는 결과를 형성한다. 그림 28은 2011년 브라질, 러시아, 인도 및 중국뿐 아니라 OECD 국가들의 전반적인 연구개발의 강도를 나타낸다. 지역적으로, 혁신경제를 창출하는 면에서 위치가 중요하다. OECD는 보고서에서 특히 미국, 일본과 같은 소수의 국가만이 정보통신기술, 생명공학 및 나노기술 등 다수의 최고 지식 집약산업의 본고장이라고 밝혔다.

114) Ibid., p. 35.



출처: OECD 과학, 기술, 산업 관련 국가별 주요 지표, 2013, p. 50.

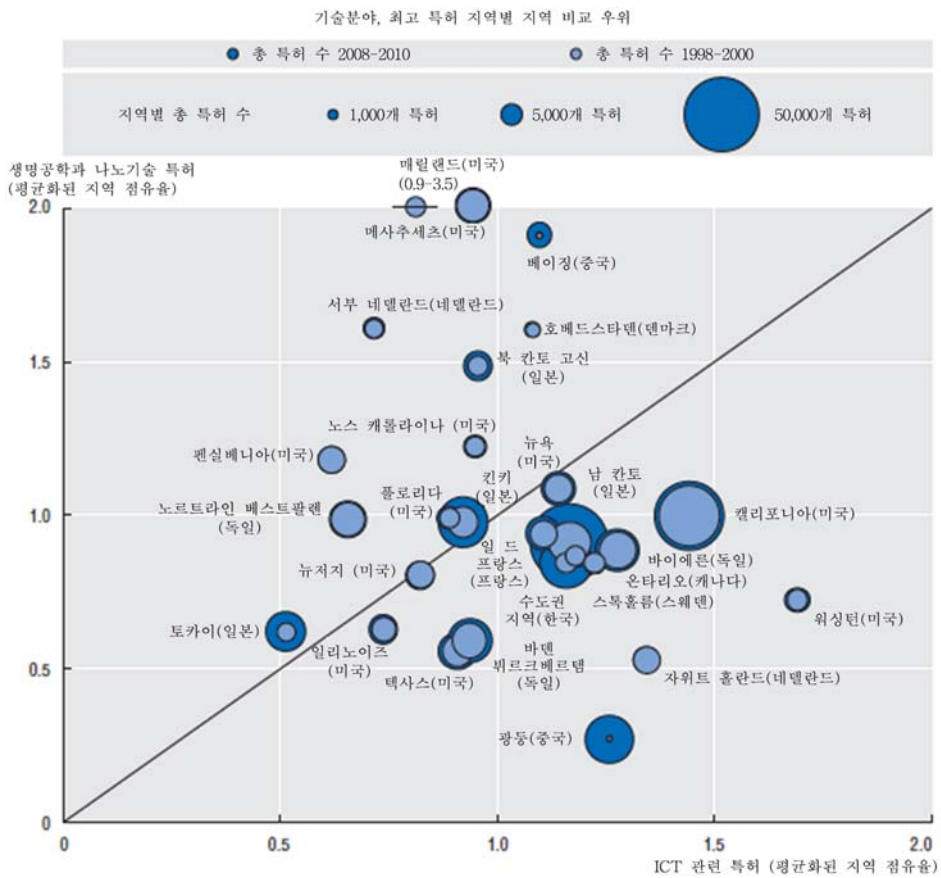
그림 28 OECD 및 주요 동반국의 연구개발 현황(2011년)

그림 29는 시간이 지남에 따라 생명공학, ICT¹¹⁵⁾ 및 나노기술분야에서 특허생산의 선두위치에 있는 지역의 위치를 나타내었다. 이 그림이 시사하는 것은 초기 특허는 이러한 분야에서 핵심적 지적 재산을 반영하고 이후에는 특허가 파생적 지적 재산을 반영하며, 그 다음에는 미국과 동맹국들이 기술적 리더로 남아있을 것이라는 점이다. 이러한 기술에서 중요한 혁신 '핫 스팟'을 가진 국가들에는 미국, 독일, 일본, 스웨덴, 네덜란드, 프랑스, 한국이 포함되며, 중국은 2008년 이후에 이 지도상에 나타나지만 러시아, 인도, 브라질은 전혀 등록되지 않는다. 러시아, 중국, 인도는 다른 나라들을 뒤따라 잡으려는 노력에서 스킨코보(Skolkovo), 쑤저우(Suzhou), 방갈로르(Bangalore)에 각각 새로운 나노기술

115) Information Communication Technology

연구단지를 위한 매우 가시적인 경비를 가지고 ‘기술 클러스터’에 대한 서양 사업 모델을 채택했다.

여러 조직들이 상대적인 경제 및 기술 발전과 혁신의 지표를 개발했다. 여기에는 세계은행의 지식경제지표(KEI¹¹⁶)와 지식지표(KI¹¹⁷)가 포함된다. 이 KI는 지식을 창출하고, 채택하며, 확산할 수 있는 국가의 역량을 측정하고, KEI는 국가의 환경이 지식의 효율적 이용에 도움이 되는지의 여부를 측정한다.¹¹⁸⁾



출처: OECD STIS 2013, p. 55.

그림 29 ICT, 생명공학, 나노기술 분야의 혁신 핫스팟(1998~2000년, 2008~2010년)

116) Knowledge Economic Index

117) Knowledge Index

118) World Bank, KEI 및 KI 지표: World Bank, "Knowledge Assessment Methodology" (2012), (KAM 2012)

KI는 지식을 창출하고, 채택하며, 확산할 수 있는 역량의 측면에서 미국 9위, 독일 10위, 영국 16위, 일본 18위, 러시아 43위, 브라질 55위, 인도 115위로 열거한다. 지식 준비 환경의 측면에서 KEI는 독일 8위, 미국 12위, 영국 14위, 일본 22위, 러시아 55위, 브라질 60위, 중국 84위 등으로 열거한다. 세계혁신지수(GII¹¹⁹)와 세계경쟁력지수(GCI¹²⁰)라는 두 개의 서로 다른 지표도 새로운 지식과 기술을 창출하고 채택하는 국가적 역량에 중점을 둔다.¹²¹ 2013년, 세계혁신지수는 미국, 영국, 독일, 일본을 질적인 측면에서 최상위 4개 혁신국가(순위는 표기된 바와 같음)로 선정했다. 이는 대학, 특허 및 인용의 질적 수준에 기반한 것이다. 중국은 19위, 브라질은 25위로 러시아를 제쳤으며 인도는 31위를 차지했다.¹²² 중국과 인도는 혁신분야에서 유능한 학습국가로 분류되고 브라질은 이들 국가보다 약간 뒤처져 있다. 반면, 러시아는 GDP에 비해 혁신분야에서 성적이 부진하다.¹²³ 세계경쟁력지수도 전반적인 경쟁력과 혁신도 면에서 유사한 순위를 보인다. 독일, 일본, 미국과 영국은 모두 혁신과 고도화 요인에서 최상위 10위 국가 안에 선정되었고, 99위에 선정된 러시아는 중국(34위), 인도(41위), 브라질(44위)보다 훨씬 뒤처졌다.¹²⁴

국가적으로, 특히 러시아, 브라질, 인도는 더 선진화된 경제국가를 앞설 수 있도록 하는 혁명적인 나노기술의 발명으로 수익을 얻을 준비가 가장 안 되어 있는 국가들이다.¹²⁵ 러시아 관리들은 기술개발의 측면에서 서방에 30~40년 정도 뒤처져 있으며, 자신들의 국가가 혁신에 유리한 조건이 결여되어 있다는 것을 인정했다.¹²⁶

중국은 현재 미국 다음으로 가장 큰 R&D 수행국가이다. 미국은 중국에서 행하는 R&D

119) Global Innovation Index, 인사이트(INSEAD)와 인도산업연합(CII)이 세계경제포럼, 세계은행, 유엔 등에서 발행한 자료들을 참조, 각국의 경쟁력과 성장, 사회, 복지, 특허출원, 과학저널발행, 연구개발 지출 등을 기준으로 평가하는 지수이다. 2015년 기준 한국은 20위를 기록하였다.

120) Global Competitiveness Index, 세계경제포럼에서 3대 분야, 114개 항목을 기준으로 국가경쟁력을 평가하여 정하는 지수로 2015년 9월 30일 발표한 자료에서 1위는 스위스, 2위는 싱가포르, 3위는 미국이며 한국은 2014년과 동일한 26위를 기록하였다.

121) Global Innovation Index Report(2013), 세계혁신지수는 코넬 대학, INSEAD, 세계지적재산기구(WIPO)가 공동으로 펴낸 것이며, 세계경쟁력지표는 세계경제포럼에서 출판함.

122) Ibid., p. 26

123) Global Innovation Report 2013, 세계 혁신 지표 (2013), p. 24

124) GCI 데이터 플랫폼: 세계경제포럼, "세계 경쟁력 지표 2013" (2013).

125) F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science (Stockholm: Swedish Defense Research Agency, 2011); R. Roffey, "Global Innovation Index Report Having Problems—Implications for Defense Research," *Journal of Slavic Military Studies* 26 (2): 162–188 (2013).

126) Anatoly Chubais, RUSNANO 책임자, Andrew Kramer의 "Russia Plans to Promote Technology Innovations"에서 인용, *The New York Times*, February 4, 2010; Lyubov Pronina, "Russia, a high-tech laggard, aims to change that," *The New York Times* November 30, 2007; and Andrew Kramer, "Competing Visions for Russia's Economic Future," *The New York Times* May 22, 2014.

양의 두 배를 수행한다. 세계 최고 50위권의 대학 중 34개가 미국에 있으며, OECD 외의 국가 중 최초로 대만의 2개 대학이 50위 안에 들었다. 나머지는 서부 유럽에 있다.¹²⁷⁾

이 데이터는 혁신을 위한 국가적 맥락이 매우 중요한 것을 나타내는데, 왜냐하면 나노기술의 영향력이 국가 경제의 경쟁력과 국가 안보에 영향을 미치기 때문이다. 나노기술의 투자가 혁신환경이 미약한 국가들로 하여금 OECD 국가 내의 기술선도국가들을 앞지르게 할 것이라는 기대는 과장된 것 같다. 더 폭넓은 혁신기반이 이러한 기술선도국가들이 다른 국가가 넘볼 수 없을 정도로 앞서 나갈 수 있도록 하기 때문이다.

전 세계적으로, 한 국가가 신기술, 심지어 혁명적인 기술을 자체적으로 개발하고 상업화하여 기술서열의 최상위로 도약할 수 있는 역량에 대한 가정이 연구개발과 생산의 국제화로 인해 더욱 약화된 것 같다. 국제적인 과학 및 연구협력은 한 나라를 지식 경제로 분류하는 인증표시가 되고 있다. OECD는 대기업들 간에 혁신분야의 협력이 기술적으로 가장 발전된 일부 국가에서 무려 70%에 달하며, 중소기업에서의 협력은 불과 20~40%에 이른다고 발표했다. 협력의 시장요인(예를 들면 공급자, 소비자 및 경쟁자)이 제도적 요인(고등교육과 정부)을 훨씬 앞지른다.¹²⁸⁾ 이는 개발이 안 되거나 상대적으로 약한 기업고도화를 가진 국가들, 특히 러시아¹²⁹⁾ 같은 국가들은 혁신적인 기술을 이용하거나 확산하는 데 있어서 현저하게 불리한 처지에 있을 것으로 예상된다는 것을 의미한다.

국제적 협력은 또한 한 국가의 기업들이 더 폭넓은 지식과 자원을 더 낮은 비용과 위험으로 이용할 수 있도록 하는 경제 경쟁력의 중요한 요소이다.¹³⁰⁾ 브라질, 러시아, 일본은 국가적 파트너에 크게 의존하는 반면, 다른 국가들은 국가적 차원과 국제적인 차원의 균형에 더 치중한다.¹³¹⁾ 연구자들의 국제적인 이동성도 국가적 차원에서 기술적 우위를 형성하고 이를 유지하는 것이 어렵다는 것을 시사한다. 과학자들의 두뇌유출은 기술적 리더국가들, 특히 미국의 역량을 더 강화시키는 경향이 있다. 순 양 국가 간의 흐름(net bilateral flows)의 측면에서 OECD는 1996년에서 2011년 사이에 미국에 러시아가 61%, 인도가 32%, 일본이 17%의 과학분야 저자를 뺏겼다고 추산하고 있다. 일본은 과학

127) OECD, "OECD, Science Technology, and Industry Scorecard," 2011, pp. 50, 54.

128) Ibid., p. 124.

129) R. Roffey, "Russian Science and Technology is Still Having Problems—Implications for Defense Research," *Journal of Slavic Military Studies* 26 (2): 162–188 (2013)

130) OECD, "OECD, Science Technology, and Industry Scorecard," 2011, pp. 128–129.

131) Ibid., pp. 128–129.

분야 저자의 47%를 중국에 뺏긴 것으로 생각한다. 반대로, 중국과 한국은 역두뇌유출을 통해 같은 기간 동안 각각 3%와 24%로 미국보다 더 많은 과학분야 저자를 확보했다.¹³²⁾

여기서 예외는 미국이다. 미국이 가장 많은 수의 과학자와 연구자를 해외에서 유치하고 있기 때문에 외부협력의 필요가 감소하기 때문이다. 미국은 가장 적은 수의 국제협력을 유지하고 있지만, 2003년에서 2011년 사이에 가장 많이 인용된 출판물과 관련된 최고의 퀄리티를 가지고 있다.¹³³⁾ 이와 유사하게 미국에 기반을 둔 저자들이 생명공학, 보건, 나노기술, 정보통신기술 및 환경 분야의 특허에서 인용되는 모든 과학문서의 3분의 1 이상을 차지한다. 이것은 미국의 폭넓고 공정하게 균형 잡힌 지식을 위한 기반이 경제적 혁신 제도로 이동하고 있음을 나타낸다. 중국, 일본, 한국은 나노기술분야에서 미국에 비해 어느 정도 전문화되어 있는데, 미국은 다른 분야보다 정보통신기술 분야에 좀 더 특화되어 있다.¹³⁴⁾ 마지막으로, 나노기술에 대한 대부분의 측정기준과 기술전망은 분명히 국가중심적 출발점을 가진다. 글로벌 연구개발 동맹 및 네트워크가 나노기술 개발에서 수행하는 역할을 강조하는 연구논문은 훨씬 적다.¹³⁵⁾

그러나 연구결과, 나노기술 연구개발에 관한 상당한 다국적인 협력이 진행되고 있으며, 미국이 그 네트워크의 중심에 있다.¹³⁶⁾ 다른 국가들뿐 아니라 미국과 중국 과학자들 간에 나노기술에 관한 방대한 협력이 이루어지고 있다.¹³⁷⁾

나노기술 분야에서 미국이 조만간 중국이나 다른 신흥국가로 대체되는 일은 없을 것 같다. 플러렌을 발견한 Richard Smalley이 1996년 노벨상을 수상한 것에서 알 수 있듯이 미국은 나노기술 개발의 선두개척자였다. 미국은 또한 상업화의 측면에서 다른 나라들 보다 앞서 있다. 비록 아시아 국가들이 급속도로 미국을 따라잡고 있는 것에 대한 미국 관리들 사이의 우려가 사라질 수는 없을지라도 말이다.

132) OECD, Regulatory Frameworks for Nanotechnology in Foods and Medical Products: Summary Results of a Survey Activity, *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers No. 4* (Paris, France: OECD Publishing, 2013), p. 132.

133) OECD, "OECD, Science Technology, and Industry Scorecard," 2011, pp. 133-135.

134) *Ibid.*, p. 136.

135) 대부분의 문헌은 좀 더 일반적으로 연구개발에 관한 것임. 다음 참조: "World Investment Report 2005: Transnational Corporations and the Internationalization of R&D" (2005); 미 국가연구위원회, "Globalization of Materials R&D: Time for a National Strategy," Washington, DC (2005); John H. Dunning and S. M. Lundan, "The internationalization of corporate R&D: a review of the evidence and some policy implications for home countries," *The Review of Policy Research* 26 (1 2): 13 (2009).

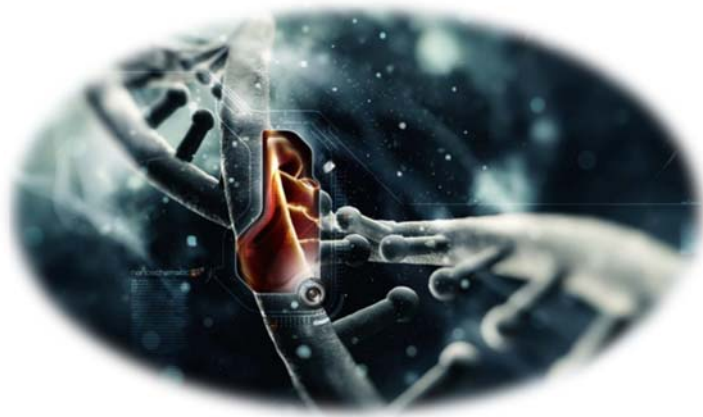
136) NSF, *Science and Engineering Indicators 2012* (2012).

137) Philip Shapira and Jue Wang, "Follow the Money," *Nature* 486 (2 December 2010): pp. 627-628.



제4장

나노기술 연구개발에 대한 전 세계적 판도





제 5 장
주요 국가별
나노기술 R&D
추진 현황

- 미국의 나노기술
- 중국의 나노기술
- 일본의 나노기술
- 러시아의 나노기술
- 유럽연합의 나노기술
- 독일의 나노기술
- 영국의 나노기술
- 브라질의 나노기술
- 인도의 나노기술

제5장
주요 국가별 나노기술 R&D 추진 현황



Ⅰ 제5장 주요 국가별 나노기술 R&D 추진 현황

미국의 나노기술

Ⅰ 국가나노기술계획 Ⅰ

미국은 민간 및 군 영역 모두에서 나노기술의 적용이 가지는 잠재적 가치를 일찍이 파악하고 나노기술을 선도하고 있다. 수많은 정부 기관 전반에서 나노기술 연구개발을 촉진 및 공조할 수 있도록 2000년 2월 국가나노기술전략(National Nanotechnology Initiatives, NNI)을 수립하여 연방정부기관의 효율적인 나노기술개발 예산집행, 새로운 나노연구기관 설립, 나노전문인력 양성, 학제 간 나노연구 네트워크 구축, 나노기술정보의 효율적인 공유, 나노벤처기업 지원 등을 체계적으로 시작하게 되었다. NNI에 포함된 추진분야는 연구 특성을 고려하여 기초연구, 그랜드 챌린지, 우수센터 네트워크, 연구 인프라와 사회적 영향 및 교육 부문 등 5개 분류로 구분되어 있다.

그 후 2003년 12월에는 ‘21st Century Nanotechnology Research and Development Act’를 발효하여 범국가적으로 나노기술개발에 총체적인 지원이 가능하도록 법제화를 하였으며, 계속해서 2009년에는 나노기술개발법을 개정하는 등 나노기술 연구개발을 전략적으로 추진하고 있다. 미국 연방정부는 2015 회계연도에 나노기술 예산으로 2014년과 비슷한 수준인 15억 3,700만 달러를 제안하였으며 2014년 투자액 중 약 1억 5,600만 달러가 국방부 산하기관 및 협력기관에 할당되었는데, 여기에는 미 국방고등연구기획국(DARPA), CBDP(Cheical and Biological Defense Program), 국방위협감소처(Defense Threat Reduction Agency, DTRA) 및 매사추세츠 공과대학교(MIT)와 미 육군이 공동 설립한 MIT 부설 군사나노기술연구소(ISN¹³⁸⁾) 등이 포함된다.

NNI가 발족된 2001년 이래 연방정부는 각 기관 단위로 진행되던 많은 수의 나노기술

138) Institute for Soldier Nanotechnologies

관련 활동들을 한데 모아왔으며, 회계연도 기준으로 2005년 35건의 기관 간 협업을 시작으로 2013년에는 159건에 이르는 등 2005년부터 2014년까지 총 628건의 기관 간 협업을 진행하였고, 2010년 범부처 차원의 조직인 NSI¹³⁹⁾를 구성하였다. NSI는 아래와 같이 5개의 중점 영역으로 구분하여 추진하고 있다.

- 태양에너지의 수집과 전환을 위한 나노기술: 미래에너지 문제 해결에 공헌
- 지속가능한 나노제조업: 미래 산업군 창출
- 2020년 그리고 그 이후를 위한 나노 전자
- 나노기술 지식 인프라: 지속가능한 계획안에서 국가적 리더십을 가능하게 함
- 센서를 위한 나노기술 그리고 나노기술을 위한 센서: 보건, 안전과 환경의 개선 및 보호

또한 나노과학 및 물리/자연과학에 대한 원천적인 연구를 전폭적으로 지원하고 있는 대통령과학기술자문위원회(PCAST¹⁴⁰⁾)는 최근 NNI 추진 성과에 대한 평가에서 연방 정부의 나노기술에 대한 투자로 새로운 종류의 나노단위 구성 요소들을 생성, 연구, 그리고 이해할 수 있는 탄탄한 과학적 기반을 쌓았으며 원천적인 나노과학에 대한 연구는 원자 규모와 거시적 규모 사이를 이어줄 새로운 길을 지속적으로 발견할 것으로 기대하면서 매우 긍정적인 평가를 내리고 있다. 또한 나노기술이 단순히 연구 그 자체만이 목적이 아니라 미국 국민, 더 나아가서는 전 세계 모든 사람의 삶을 향상시키는 새로운 기술 개발이 목적임을 분명히 하고 있다.

139) Nanotechnology Signature Initiatives

140) President's Council Advisory

표 3 미 NNI 분야 연간예산(2011~2013년)

Agency	2011 Actual	2012 Estimate	2013 Proposed
DOE	346.2	315.4	442.5
NSF	485.1	426.0	434.9
HHS/NIH	408.6	409.6	408.7
DOD	425.3	361.2	289.4
DOC/NIST	95.9	95.4	102.1
NASA	17.0	23.0	22.0
EPA	17.4	17.5	19.3
HHS/FDA	9.9	11.8	11.1
HHS/NIOSH	10.0	10.0	10.0
USDA/NIFA	10.0	10.0	10.0
DHS	9.0	7.0	6.0
USDA/FS	10.0	5.0	5.0
USDA/ARS	0.0	2.0	2.0
DOT/FHWA	1.0	1.0	2.0
CPSC	1.8	2.0	2.0
TOTAL	1,847.3	1,696.9	1,767.0

출처: 2012 levels reflect estimates based on 2012 appropriated levels

특히 나노입자 및 나노튜브를 결합하여 나노/메타 단위 시스템 제품 개념으로 발전시키는 것에 대한 관심도 증대 등 최근 10년간의 연구로 원천 과학에 대한 상당한 성과를 거두고 있다. 이를 긍정적으로 평가하면서 최근 2~3년간의 나노기술개발 성공 사례로 LBNL¹⁴¹⁾ 연구소의 나노코팅기술 개발과 미 표준기술연구소(NIST¹⁴²⁾의 화학무기 공격으로부터 인간을 보호해주는 탄소나노튜브로 제작한 의류 개발을 모범 사례로 소개하였다. 미국은 이러한 노력의 결과 나노기술이 비약적으로 발전하게 되었고, 현재 'NNI 2.0'이라는 새로운 나노기술 개발 단계를 맞이하고 있다.

NNI 2.0의 또 다른 중요한 역할은 미국이 다른 국가들과 경쟁해야 하는 분야와 협력해야 하는 분야를 결정하는 것을 돕는 것이다. 2014년 2월 과학기술정책국이 발표한 NNI 전략적 계획에 따르면, 미국은 나노기술 제품 개발과 상업화에 필요한 국제적인

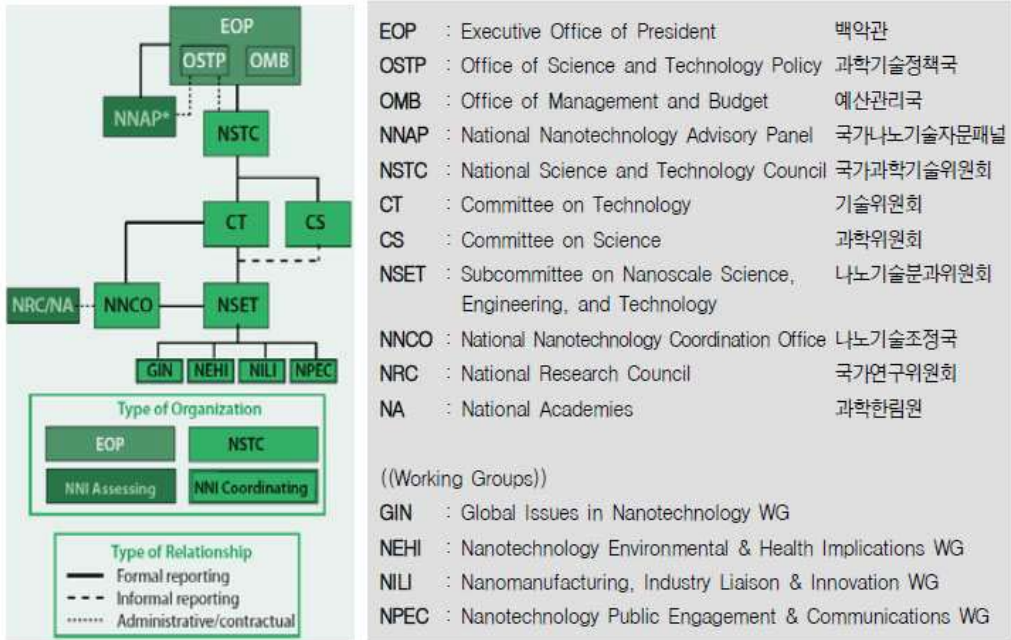
141) Lawrence Berkeley National Lab

142) National Institute of Standards and Technology

활동에 적극 참여해야 한다고 강조하고 있다. 즉, 국제 나노기술 표준 개발 참여 및 선도, 나노기술과 관련된 상업화, 혁신 그리고 무역을 확충하기 위한 쌍무적, 다자간 협업에 참여하고, 이해당사자들이 기술적인 정보 교환 및 시장의 요구, 지적재산권, 그리고 상업화 관련 문제들에 대해 토론할 수 있는 포럼을 지원할 것을 권고하고 있다.

■ 국가나노기술계획 추진체계 ■

미국의 나노기술 관련 정책 수립과 추진은 백악관의 국가과학기술위원회(NSTC)와 과학기술정책실(OSTP)에 의해 관리되며, 추진체계는 크게 대통령실(EOP), 나노기술분과위원회(NSET), 나노기술조정국(NNCO)으로 구성되어 있다. 나노기술분과위원회(NSET)는 국가과학기술위원회(NSTC) 기술위원회(CoT)에 설치된 조직으로 NNI의 전략적 계획을 조정하며 나노기술 연구개발에 대한 부처 간 정보교류 및 예산 조정 기능을 담당한다. 나노기술조정국은 NSET의 업무를 지원하는 사무국으로 산학 연관 및 시민단체 등에 나노기술정보와 NNI 프로그램 정보의 교류를 촉진한다. NSET는 환경보건영향(NEHI), 나노기술혁신 및 산업연계(NILI), 국제이슈나노기술(GIN), 나노기술 대중 참여 및 커뮤니케이션(NPEC) 등 4개의 실무작업 그룹을 운영하며 조정체계를 강화하고 있다. 과학기술정책실(OSTP)은 백악관 내에서 NNI의 활동을 지원하며, 예산관리실은 NNI의 초기 설립부터 NSET에 참여하여 매년 부처별 예산현황정보를 집계, 조정한다. 한편 NNI 프로그램의 추진상황을 민간 차원에서 진단하도록 하는 외부 평가 체계를 보유하고 있다. 국립아카데미(National Academies)의 국가연구위원회(National Research Council), 대통령 과학기술자문회의(PCAST)의 국가나노기술자문패널이 외부전문 평가를 담당하고 있다. 미국 정부는 혁신적 나노기술 연구개발을 위해 8개 정부기관이 참여하여 2001년 NNI를 설립한 이후, 현재는 25개 부처가 참여하고 있는데 이 중 15개 부처가 나노기술 연구개발에 관한 예산을 집행하고 있다.



출처: NSTC 2011

그림 30 미국 NNI 추진 체계

■ 군사분야 나노기술 개발 현황 ■

NNI 전략계획안에서 설명한 대로, 현재 국방부의 나노 관련 예산의 대부분은 센서를 개선하고, 재료과학을 발전시키며, 에너지 효율을 증가시키기 위해 사용되고 있는데, 이 세 가지 모두 미국의 전쟁수행능력과 국가안보를 강화하는 데 있어 상당한 잠재력을 가지고 있다. 이러한 목적 달성을 위하여, 미 국방부는 병사의 건강, 피로 및 인식을 모니터링하는 바이오 표지자와 바이오센서 같은 나노기술에 대한 연구를 추진하고 있다. 나노기술의 군사적 이용을 위한 연구기관으로는 2002년 미 매사추세츠 공과대학에 설립된 나노기술연구소(ISN¹⁴³)가 대표적이다. ISN은 2025년 실용화를 목표로 나노기술의 군사적 이용 방향을 연구하고 있다. 일반적으로 현대 보병이 갖추어야 하는 장비의 무게는 심한 경우 60kg이 넘기도 한다. 그러나 이렇게 무거운 장비에도 불구하고 총탄과 파편, 생화학

143) Institute for Soldier Nanotechnologies

무기에 대한 방어력은 제대로 확보되지 못하고 있다. 또한 병사가 휴대한 다양한 장비들이 통합적으로 운용되지 못하여 전투 효율도 매우 낮은 실정이다. 그러나 나노기술을 이용하여 장비의 크기와 중량은 줄이면서도 물리적 특성과 성능이 개선된다면 이 같은 문제들은 극복할 수 있을 것이다. 이를 위해 나노기술연구소는 5개의 전략적 연구영역을 정해놓고 연구를



그림 31 땀으로 건강상태를 모니터링하는 팔목 밴드 센서

추진하고 있다. 먼저 병사의 기본 전투복에 사용될 경량의 다기능 섬유 및 소재를 개발하고 두 번째는 신속 정확한 응급처치가 가능한 의약품과 의료기기 개발 그리고 이를 전투복에 통합하여 의무병이나 군의관 없이도 전선에서 부상병을 치료할 수 있는 기술을 개발하고 있다. 세 번째는 나노기술을 이용하여 총탄과 파편을 방어해 주는 방탄복과 헬멧의 개발, 네 번째는 화생방 병기를 탐지하고 방호하는 나노기술을 개발하며, 다섯 번째는 이 모든 시스템들을 하나로 묶는 시스템 통합작업을 개발하고 있다. 미 육군연구소(Army Research Laboratory, ARL)는 바이오센서를 응용하여 가벼운 외상성 뇌 손상을 감지하는 것을 입증했다. 이 능력은 전쟁터에서 전방에 배치된 병력의 부상진단을 극적으로 향상시킬 수 있을 것이다. 한편, ISN은 노출된 상처와 전투 중 사망의 주요원인인 출혈성 쇼크에 대한 전장치료를 계속 연구 중이다. 미 국방부는 또한 다른 유해병원균뿐 아니라 생화학 작용제를 포함한 환경적 위협을 감지하고 이로부터 보호하는 센서에 대해 연구하고 있다. 궁극적으로 나노기술의 발전은 그러한 위협을 확인하는 것뿐 아니라 착용형 패치를 통해 의약품, 백신 및 항생제를 현장진단·검사(Point-Of-Care, POC)할 수 있도록 할 것으로 예상된다. 나노생물학 연구도 결국 외상 후 스트레스 장애를 치료하고 전투원의 기억을 회복하거나 개선할 수 있는 신경 임플란트를 생산할 수 있을 것이다.

DARPA와 다른 기관이 중점적으로 연구하고 있는 그러한 기술은 더욱 방대한 형태의 수행능력증진을 위한 길을 열 것이다. 재료과학은 NNI의 또 다른 연구 우선순위 분야로 상당한 군사적 유용성을 지니고 있다. 이 계획의 일환으로, 국방부는 현재 그래핀(Graphene)

의 응용을 연구하고 있는데, 이 물질은 탄소 원자로 구성된 전도성이 매우 높은 물질로 무게는 강철보다 6배 가볍지만 약 200배 강한 물질이다. 그래핀은 현재 생산하기 어렵고 엄청나게 비싸지만 첨단 야시장비 체계와 유연한 방수형 전자장치(예: 접을 수 있는 컴퓨터)에 사용되기 위해 그래핀의 독특한 성질이 연구되고 있다. 약간 열등하긴 하나 비슷한 성질의 물질은 이미 다양한 분야에 광범위하게 응용이 되고 있다. 예를 들면, 초기 실험에서 탄소나노튜브(CNT)로 이루어진 방탄복은 기술성숙도(TRL¹⁴⁴) 6수준(관련 환경에서 성공적으로 입증됨)에 도달했다. 이 CNT 기반의 방탄복은 전통적인 하드 방탄판(Hard Armor)보다 10~19%가량 무게가 덜 나가고 전통적인 소프트 방탄판(Soft Armor) 보다는 30% 정도 가벼워 최대 80%의 무게 감량을 할 수 있을 것으로 간주된다. 앞으로 더 개발될 경우, 이러한 물질은 병력보호를 획기적으로 개선하고 무게로 인한 부담과 비용을 줄이면서 생존력을 높일 수 있을 것이며, 무게를 크게 줄이는 것은 군 전반에 걸쳐 차량의 속도와 민첩성을 추가로 개선시킬 것이다.

표 4 미국의 각 군별 나노기술 연구분야

육군	해군	공군	DARPA
나노복합체	나노구조체	메타재료	메타재료
나노구조 폴리머	나노 와이어, 카본나노튜브	나노구조 폴리머	양자정보기술
나노에너지물질	적외선 투과 나노재료	나노에너지물질	나노기계 어레이(Array)
양자점, IR 센서	나노소자	나노구조소자	스핀트로닉스 소자
나노공학 분체	초미세열차폐 나노코팅	나노센서	바이오-분자 미소체계

또한, 재료과학은 환경변화에 맞춰 외양을 자동으로 바꿀 수 있는 능동 위장술에 획기적인 발전을 가져올 것이다. 이 기술은 아직 전장에서 활용할 수 없지만 해군연구처(ONR¹⁴⁵)가 후원하는 연구진은 최근 전투원을 위한 보다 진보한 위장술을 개발하는 첫 단계로서 광원에 반응하고 적응하는 물질을 개발하였다. 좀 더 예상해보면, 나노기술 연구는 빛을 굴절시켜 대상을 효과적으로 보이지 않게 만드는 위장장치를 가능하게 할 것이다.

144) Technology Readiness Level

145) Office of Naval Research

표 5 미국의 대표적인 군사용 나노기술 연구기관

연구기관	관련기관	설립목적	연구 과제
MIT 개인병사 나노기술연구소 (ISN)	Army 2002년 설립	<ul style="list-style-type: none"> 미래병사체계 연계 및 생존성 향상 - 방호, 경량, 탐지, 치료 	<ul style="list-style-type: none"> 에너지흡수재료 능동방호 재료 센서 및 생화학 탐지 가공 및 분석/시뮬레이션
UCSB 국방나노과학 혁신센터(CNID)	DARPA, DMEA 2002년 설립	<ul style="list-style-type: none"> 나노소자 중심의 신속한 국방 분야 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 영상시스템 스핀트로닉스 반도체 나노소자 통신 및 계산 나노광자학 나노기계 센서 및 장치
NRL 나노과학연구소 (Institute for Nanoscience)	Navy 2001년 설립	<ul style="list-style-type: none"> 나노인프라 및 실험실 구축 해군 전반의 나노연구 - 소재, 소자, 바이오 등 	<ul style="list-style-type: none"> 나노조립 나노광학 나노소자 나노기계

출처: 허선무, 물리학과 첨단기술, 1/2월, 2006년

그러한 장치는 주요한 무기 플랫폼뿐 아니라 각 전투원 은폐에도 사용될 수 있다. 마지막으로, NNI는 나노기술을 에너지를 생산하고 저장하는 수단으로 개발 중이다. 이를 위해, 양자점(quantum dot¹⁴⁶)이라 불리는 작은 반도체 입자가 40% 이상 에너지 효율을 높이기 위한 실험능력에서 사용되는 한편, 카본 나노구조와 실리콘이 배터리 저장용량과 비용효율을 높이기 위해 사용되었다. 결과적으로 이 기술들은 영구군사시설과 전방작전 부대 모두를 위한 에너지 독립을 강화했다. 전방작전부대의 경우에 잠재적으로 취약한 공급망에 대한 의존을 줄이고 더 긴 배치주기를 가능하게 했다. 과거의 나노기술에 대한 미국의 투자 역시 많은 성과를 내었다. 특히, 19그램의 비행 감시 로봇을 개발한 DARPA의 나노 비행체 사업은 특히 도시환경이나 다른 접근제한 지역에서의 정찰과 상황인식 능력에 있어 미군에 중요한 이점을 제공해 줄 수 있는 기술로 입증되었다. 이러한 소형화 발전은 나노 쿼드콥터¹⁴⁷의 탄생도 가능하게 했는데, 이것은 자율적으로 대열을 형성해 비행하고 언젠가 로봇식 무리의 일부분으로 전장에 배치될 수 있게 될 것이다. 이 기술은

146) 화학적 합성공정을 통해 만드는 나노미터 크기의 반도체 결정체를 말한다. 물질의 종류를 달리하는 것보다 효율적으로 입자의 크기 설정에 따라 방출, 흡수 가능한 빛의 진동 수와 파장이 바뀐다. 초미세 반도체, 질병진단 시약, 디스플레이 등 다양한 제품에 적용될 수 있다.

147) 쿼드콥터라고도 하며 로터 4개를 이용하여 뜨고 추진하는 멀티콥터이다. 각 로터는 연직 아래로 향해 있으며 두 개는 시계방향으로, 나머지 두 개는 반시계 방향으로 회전한다. 이들 로터의 회전속도를 조절함으로써 쿼드콥터의 움직임을 제어할 수 있다.

교전 시 공격방어 균형을 극적으로 바꿀 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 이러한 잠재력으로 많은 수의 자율적인 비행체 협조를 통해 적의 방어를 약화시키거나 파괴하기 위해 사용될 수 있을 것이다.

오늘날, 펜실베이니아 대학의 GRASP 실험실이 주도하는 공공-민간 컨소시엄이 이러한 연구를 이끌고 있다. 사실, 미 정부, 교육기관 및 민간 기업이 자금을 지원한 기초 연구 이외에도 상당한 군사적 응용이 포함된 나노기술에 대한 연구가 계속되고 있다. 비록 이러한 활동에 대한 연방정부의 지원이 계속 감소하고 있지만, 미국 기업의 지출은 증가추세이며, 2012년에는 이 비용이 410억 달러에 달했고, 이는 2011년보다 11%가 증가한 액수이다.



그림 32 쿼드콥터로 제작된 드론

■ 나노기술 경쟁력 ■

미 국가나노기술계획은 미국 역사에서 몇 차례 평가되었으며, 가장 최근에 있었던 한 평가는 미국이 아시아 국가들, 특히 중국에게 미국이 보유한 혁신 및 연구개발 활동에서의 우위를 잃게 될 수 있다고 주장한다.¹⁴⁸⁾ 이 절에서는 국가적 혁신에 관한 문헌과 나노기술 데이터의 정확성에 대한 우려를 고려할 때, 이러한 비관적 생각이 타당한지를 평가하면서, 미국의 상대적인 경쟁력에 대해 평가하고자 한다. 최근 재정지원의 감소에도 불구하고 미국은 나노기술 연구에 대한 투자에 있어서 선두적 위치를 유지하고 있다. 그러나 외국 정부들이 나노기술에 대한 군사 및 민간 응용에 상당한 잠재력이 있다고 인식하는 가운데, 미국의 선두적 입지는 갈수록 좁아질 것으로 예상된다. 대통령과학기술자문위원회(PCAST)는 차세대에는 나노규모 컴포넌트에서 복잡한 나노시스템으로, 기반연구에서 나노기술의 상업화로의 움직임이 예상되지만 미국은 나노기술 사업화를 위한 필수 인프라

148) PCAST, "Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative." 미 대통령 과학기술 자문위원회 (2012)

및 인력개발에 있어서 다른 나라에 뒤처지고 있다는 점을 강조하면서 NNI 2.0의 성공을 위한 몇 가지 중요한 제안을 하고 있다.

- 현재의 NSI의 일부 요소들은 유지되어야 하는 반면, 연방정부 및 과학기술정책실이 집중해야 할 나노기술 중점도전과제(Grand Challenges)에 따라 주요한 프로그램 관리 구조는 변경되어야 한다.
- 미국 정부의 나노기술 활동에 대한 평가가 아닌 조언을 해줄 나노기술 다방면에 걸친 전문가들로 구성된 개별적인 상시/상설 위원회의 필요성 및 나노기술 중점도전과제를 위해 기관 간 펀딩 우선순위를 정할 수 있도록 하는 범기관 간 프로세스의 필요성을 재차 강조하였다.
- 정부 나노기술 연구 및 상업화를 위한 펀딩을 보다 체계적인 방법을 통해 정량적으로 평가할 필요성도 강조하였다.

PCAST는 이 밖에도 나노기술분과위원회(NSET)의 지도와 지원을 바탕으로 연방기관들은 나노과학/기술에 전념할 수 있는 제조혁신을 위한 조직을 구성하고, 창의적이고 중요하지만 성패가 불분명한 연구를 수행하기 위해 단일 연구자들을 5년간 지속적으로 지원하는 프로그램을 만들 것과 안전성 평가, 정책결정, 상업화 등의 신속화를 위한 다학제적 나노기술 EHS 생태계 확장개발을 지원할 것 등을 권고하였다.

2012년 이후, 전반적인 미국의 나노기술에 대한 재정지원은 17% 감소했다. 특히 방어 측면에 대한 연구는 2012년 이후 무려 59%가 감소했는데, 앞으로의 전망도 그리 밝지는 못한 것으로 전망된다. 정부, 산업 및 벤처 자본가들의 투자를 포함하여 나노기술에 대한 전 세계의 지출이 2010년과 2013년 사이 해마다 40%씩 증가했으며 앞으로도 줄어들 기세가 보이지 않는 점을 고려하면 특히 그러하다.

오늘날, 오픈 소스 데이터에 의하면 60개가 넘는 국가들이 정부 차원에서 나노기술 사업에 지원을 하고 있다. 이 지원액은 미국을 선두로 일본이 13억 달러, 러시아가 9억 7,400만 달러, 독일의 경우 6억 1,700만 달러에 달한다. 나노기술에 대한 외국 정부의 재정지원에 대한 종합적인 국가별 정보를 확보하기는 어렵지만, 출간된 나노기술에 대한 연구논문 수와 인가된 나노기술에 대한 특허건수라는 두 가지 대용 가능한 측정지표를 고찰함으로써 이 연구에 대한 관심과 국가 연구 사업의 성숙도를 평가할 수 있다. 전자의

경우, 미국은 수년간 상당한 차이로 유럽연합보다 뒤떨어지고 있다. 더욱이 2000년대 초 이래 중국의 관련 논문 수가 기하급수적으로 증가하면서, 미국은 이제 추가적으로 중국보다 뒤처지고 있는데, 중국은 2013년 순산출(net output) 면에 있어서 유럽연합을 앞질렀다. 이러한 것에도 불구하고, 미국은 혁신을 말해주는 척도로서 승인된 특허건수에 있어서 우위를 유지하여, 가장 가까운 경쟁국인 일본, 영국, 독일, 프랑스보다 더 많은 수의 특허를 보유하고 있다. 미국의 경쟁국들의 연구 우선순위가 무엇인지에 대해서는 알려진 바가 없지만, 적어도 이들 국가들의 나노기술 연구의 일부는 나노 비행체, 내구성(hardened) 강화 처리된 무기 플랫폼 및 소형화된 대량살상 무기를 포함하여 잠재적인 군사적 유용성을 가진 기술을 다루고 있다. 따라서 나노기술에 대한 지속적인 노력이 없다면, 미국은 혁신적 외국 군사 기술에 점차 취약해질 수 있다.

나노기술은 미군에 있어 중요 지원수단이자 전력승수의 역할을 맡고 있으며, 수많은 분야 중에서도 병력보호, 수행능력증진, 에너지 안보 및 공세적 전투력에 있어서 상당한 개선을 제공하고 있다. 그러나 외국 정부들이 이 분야의 투자를 계속 확장해가면서, 나노기술 연구에 있어 미국의 선두적 입지는 계속적으로 축소 추세에 있다. 만약 미국이 나노기술의 지원을 통한 군사적 기술의 우위를 앞으로도 계속 유지하고 싶다면, NNI 관련 노력을 강화하고, 방어 중점 사업에 대한 재정지원을 회복시키며, 교육기관과 민간기업들을 계속 장려하여 독자적으로 나노기술 연구를 행할 수 있도록 해야 한다. 그렇지 못한다면, 나노기술의 중요한 혁신을 미국의 경쟁국들에게 넘겨주고 미래의 미국의 군사적 우위를 위태롭게 할 수 있을 것이다.

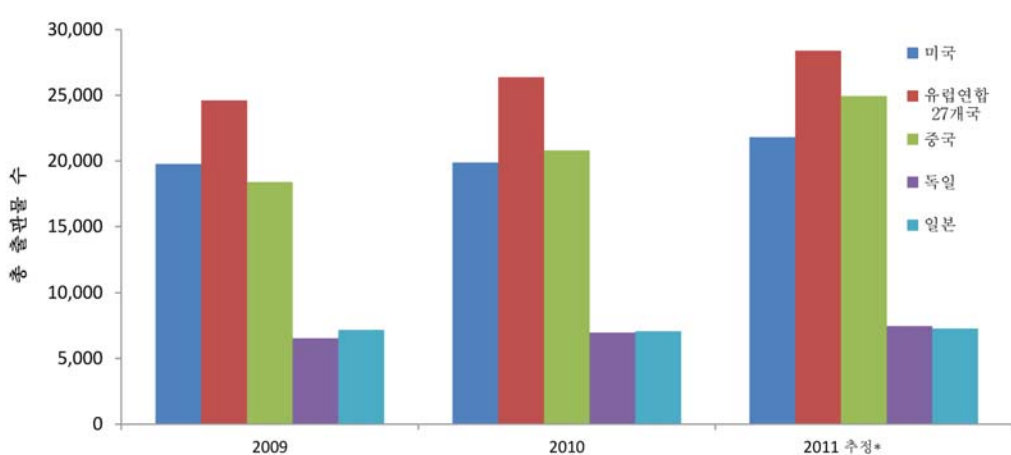
중국의 나노기술

Ⅰ 나노기술 현황 Ⅰ

중국의 국가자연과학기금위원회(NSFC¹⁴⁹⁾)는 80년대 중반부터 나노기술개발을 지원해 왔으나 2000년 이후 국가 차원의 계획이 수립되면서 관련 연구기관이 신설되는 등 본격

149) National Natural Science Foundation of China

적인 연구개발을 해오고 있다. 중국 정부는 나노기술의 성공적인 산업화를 위하여 국가 전략으로 인재·특허·표준이 서로 결합된 전략을 추진하고 있다. 중국은 나노기술 R&D를 2006~2020년 중장기 개발계획에 따른 12개의 대형 프로젝트 중 하나로 지정했다.¹⁵⁰⁾ 어떤 설명에 따르면 국제 나노기술 지표에서 자국의 순위를 높이기 위해 나노기술에 관한 출판과 특허를 위해 박차를 가하고 있다고 한다.¹⁵¹⁾ 중국과학원(Chinese Academies of Science)의 총장은 나노기술 과학자이며, “중국은 나노기술 관련 학문분야가 매우 빨리 성장했으며, 실험실들도 상태가 매우 좋다”고 미국의 한 고위관리가 말했다.¹⁵²⁾ 중국의 나노분야 기초연구는 급속도로 확대되고 있으며 양적인 면이나 질적인 면에서 비약적인 발전 속도를 보이고 있다.



출처: L. Kay, P. Shapira J, Youtie, and A.L. Porter, 조지아공과대학 나노기술연구 및 혁신시스템평가 프로그램, 조지아 주 아틀랜타, (아리조나 주립대학, 지원 No.0937591) 나노기술연구센터(Center for Nanotechnology in Society)를 통해 미 국립과학재단으로부터 지원받음. [2010년 1월 현재 자료]

주: S. Arora, A.L. Porter, J. Youtie, P. Shapira, Capturing new developments in nanotechnology scientific output: A search strategy for publication records, STIP White Paper, Atlanta, Georgia, 2011에 기반

* 2011년 8월 22일까지 확인된 국가수준의 출판물 수에 기반한 연간 출판물 수. 다음 연도에 (예를 들면, 2012년 초) 발표될 것으로 예상되는 수에 추가로 5%를 더한 수치.

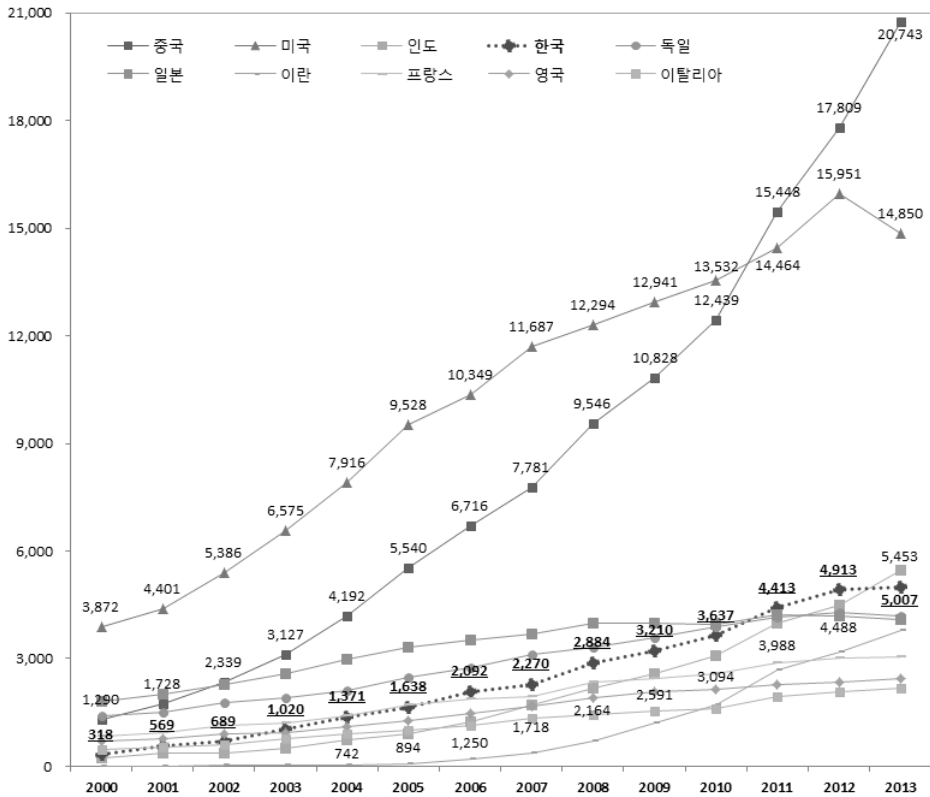
그림 33 국가별 나노기술 관련 출판건수

150) E. O'Rourke and M. Morrison, "Challenges for Governments in Evaluating Return on Investment from Nanotechnology and Its Broader Economic Impact," *OECD Background Paper*, (2012)

151) Anne Clunan, Margaret E. Kosal과의 개인적 의사소통, 2013년 4월 2일.

152) Anne Clunan, U.S. NSET 소위원회의 고위급 위원과의 개인적 의사소통, 2013년 5월 31일.

그림 34는 2000년부터 2013년까지 14년간 주요국의 나노 과학분야 SCI급 논문 활동도 순위를 나타내었다. 중국의 나노분야 논문 수는 2000년대 들어서 확연히 증가하고 있는데 특히 2003년에는 일본을 제치고 미국에 이어 세계 2위로 부상하였고 2011년부터는 미국을 제치고 1위를 차지하였으며 2013년에는 미국은 오히려 감소를 하고 있다.¹⁵³⁾ 또한 일반적으로 논문의 질적인 지표로 고인용 논문(Highly Cited Paper) 수를 보는데 2008~2013년에 중국이 미국 다음으로 2위를 차지하였으며 연구자의 생산성과 영향력을 비교하기 위하여 H인덱스를 많이 사용하는데 주요국의 H인덱스 순위 역시 고인용 논문 수와 유사하게 나타났다.



출처: 2014년 나노기술발전 시행계획, 미래창조과학부 외

그림 34 주요국의 SCI 논문건수와 순위 도표(2000~2013년)

153) 2014년 나노기술발전 시행계획, 미래창조과학부 외

중국은 나노기술 투자에서 서열상 미국 바로 다음에 위치해 있다.¹⁵⁴⁾ 중국은 2013년 까지 나노기술과 관련해 동료 전문가가 평가한 연구 출판물의 수(중국보다 출판건수가 약 70% 이상 많은 미국 바로 뒤에 위치)와 1998년 이후 나노기술 관련 특허 건수에서 각각 2위를 차지했다.¹⁵⁵⁾



출처: 중국과학원, 미래 10년 중국과학발전전략, 과학출판사, 2012

그림 35 주요국의 고인용 논문 수와 H인덱스

또한 중국은 일부 나노 관련 제품 생산을 주도하고 있는데 에어컨용 나노 필터, 항균 특성을 개선한 나노소재 섬유와 의복, 냉장고용 나노 코팅과 플라스틱 및 기름 탱크에 사용된 부식 방지 나노 페인트를 들 수 있다.¹⁵⁶⁾ 중국은 여전히 연구의 질적 측면(즉,

154) Philip Shapira and Jue Wang, "From Lab to Market? Strategies and Issues in the Commercialization of Nanotechnology in China," *Asian Businesses and Environment* 8 (4): 461-489 (2009)

155) China Daily, "China has become a global nanotechnology leader, says the CAS President Bai Chunli (중국어본)," *China Daily* (2013).

156) R. Appelbaum et al., "Nanotechnology as Industrial Policy: China and the United States." 2013 International Studies Association Annual Conference에서 발표된 논문, San Francisco, CA (2013); R. Parker and R. Appelbaum, Can emerging

영향력이 큰 학술지 출판 비율)과 연구의 상업화 측면(즉, 산업별로 나노기술 특허 보유 비율)에서 미국과 유럽 선진국들에 뒤지고 있긴 하지만,¹⁵⁷⁾ 그들 국가의 개발 주기를 따라잡아 뛰어넘을 각오가 되어 있다.

또한 중국은 나노기술에 관한 국제 및 국가 표준 개발을 통해 세계 시장과 연구개발 플랫폼에 따라서 자국의 나노기술 연구개발 통합에 활발히 참여하고 있다. 국가나노과학센터는 제11차 5개년 계획을 위한 나노기술 표준 연구 프로젝트를 이끌었고, 제11차 5개년 계획은 국제 및 국가 기술 표준 목표를 설정하여 “국제 측정 및 연구기관 간의 치열한 경쟁 속에서” 중국이 그 자리를 보전할 수 있도록 하였는데, 이는 그러한 표준이 첨단기술 산업 개발에서 중요한 역할을 수행하기 때문이다. 2011년까지(제11차 5개년 계획의 종료) 중국은 나노기술 국제표준 6종을 개발하고 국가표준 22종을 시행했다.¹⁵⁸⁾

중국은 나노산업의 도약기라 일컫는 2007년 이후 현재까지 나노제품 개발과 응용에서 다원화, 규모화의 특징이 나타났고 나노소재와 나노기술 관련 등록된 기업은 2,000여 개 이상으로 증가하였으며, 나노복합소재, 고무와 섬유 변성 및 나노기능의 코팅소재 분야 등의 생산라인은 100여 개 이상이 되었다. 또한 나노소재 응용은 에너지와 환경 분야에서 상당한 규모를 형성하였으며 정보통신과 바이오 의약 분야에서 나노기술의 응용은 점차 산업화를 이루기 시작하였다. 신흥 산업 육성과 발전 정책을 근간으로 많은 지방정부가 나노과학기술단지를 건설하기 시작하여 베이징, 쑤저우, 우한, 탕산, 안산, 진창 등에서 기술단지가 설립되었다.

또한 베이징, 상하이, 쑤저우 등은 하에나노연맹, 나노협회 등 산업조직을 설립하고 일련의 자금, 인력, 지역 등을 포함한 장려정책을 적극 펼쳐나가고 있다. 특히 혁신 클러스터를 중심으로 산·학·연·관의 단일 융합모델이 두드러지는 특징을 보이고 있다.¹⁵⁹⁾ 독일이나 영국과 비교해볼 때, 중국은 나노기술 연구개발에 대해 하향 접근방식을 보였다. 중국은

technologies make a difference in development? Rachel A. Parker and Richard P. Appelbaum 편집 (New York: Routledge, 2012)

157) Jan Youtie, Philip Shapira, and Alan L. Porter, “Nanotechnology publications and citations by leading countries and blocs.(Report),” *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology* 10 (6): 981 (2008).

158) NCNST, “제11회 Five-Year Plan National Prominent S&T Achievement Exhibition에서 발표된 나노기술 기준 연구 결과 (중국 어본),” 국가나노과학센터 (2011)

159) 홍성범, ‘중국의 나노기술 분야의 전방위 발전 방향’, 과학기술정책연구원, 2014. 11. 26.

나노기술과 같이 중요한 전략적 가치가 있어 보이는 그러한 기술에 우선순위를 매긴다. 그렇다 할지라도 중국은 상업용 나노기술 응용을 군용보다 우선적으로 추구하면서, 나노기술을 주로 중국의 경제적 위상을 높이기 위한 수단으로 간주하는 것으로 보인다.¹⁶⁰⁾

이 절에서는 나노기술에 대한 중국의 접근방식으로 2개의 간략한 사례를 소개한다. 먼저 전략적 기술 개발과 중국 지도부의 국가 안보 및 전략적 가치에 대한 이해 당사자들의 관계를 이해하기 위하여 중국 경제 개혁에 대해 설명하면서 중국이 주요 생산국으로서 나노기술에 이용 가능한 섬유에 대해 이러한 관계를 사례로 설명한다. 그 다음에, 나노기술과 연구개발에 대한 중국의 접근방식을 자세하게 묘사하고 중국이 개발을 위한 주요 상업 분야로서 나노기술을 인식하는 것에 대한 평가를 위해 국내 정치·경제의 전후 사정을 더 폭넓게 제공하며, 중국이 나노기술 적용제품의 상업화를 어떻게 이루어낼 것인지에 대해서 기술한다.

Ⅰ 국가 안보와 기술 인프라 구축 정책 Ⅰ

개혁시대의 중국 입장에서 기술 발전과 인프라 개발은 국가 안보에 관한 중국의 관심사에서 분리될 수 없다. 마오쩌둥 시대 이후와 냉전 시대 이후, 안보상 요구되는 의무는 정치 체제 안정을 유지하는 한편, 이와 관련하여 중국에 반대하는 지역 안보 체제에도 불구하고 세계에서 유일한 주요 공산주의 국가로서 중국의 위상을 유지하는 것이었다. 중국 지도부는 냉전의 종식을 동아시아에서 미국의 군사적 우위확보(military leadership)의 시작으로 여기고, 중국에 반대하는 지역 안보를 겨냥하여 다른 곳에서 정치적 패권이 아니더라도 이데올로기적 패권을 주장한다. 시진핑 주석의 “차이니스 드림”은 체제 목표로서 경제력과 정치적 안정 추구에 민간과 환경 보호를 추가했다. 달리 표현하면, 중국 정부가 경제적 측면에서 전략적으로 여긴 것에 국내 중심적이면서도 본질상 지정학적인 안보 관련 이해타산이 포함된 것이다.¹⁶¹⁾ 요점은 중국 지도부는 외부와 내부 체제 안정

160) Anne L. Clunan, NSET 소위원회 고위급위원과의 개인적 의사소통, 워싱턴, DC, 2013년 5월 31일

161) Christensen과 Segal, 대내외 안보 우려의 공통 사항 논의: Clayton Christensen, *The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail* (Boston Mass.: Harvard Business School Press, 1997); Clayton Christensen, “The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption,(Dialogue on the Effects of Disruptive Technology on Firms and Industries),” *Journal of Product Innovation Management* 23 (1): 39 (2006); S. Anand, P. Segal, and J. Stiglitz, *the measurement of global poverty, The Initiative for Policy Dialogue series* (Oxford: New York: Oxford University Press,

및 중국의 성장과 발전을 저해할지도 모를 정치, 경제 및 사회 요인을 반드시 확인하고 관리해야만 한다는 점을 감지한다는 것이다.

정부 관리들, 상업 부문 및 비즈니스 협회의 지도자들, 국유기업 및 사기업의 경영자들은 불특정한 위협에도 불구하고 국가 기술 능력을 습득하고 중국을 부강하게 만드는 연결을 강조한다.¹⁶²⁾ 1980년대부터 중국은 종합적인 수준에서 시장 경쟁을 도입했지만 국가 안보(지정학 및 정치 안정 포함)에 전략상 중요하고 국가 기술 기반에 상당히 공헌하는 산업의 중앙집권적 통제를 존속시켰다.¹⁶³⁾ 국가 안보 우려와 기술 능력 개발에 자극을 받은 중국은 정치 안정 유지를 위해 국가 기술 기반과 경제적 경쟁력에 기여하는 산업을 전략적인 요소로 간주하고 있다. 정보 제공자들에 따르면 안보의 고려와 “로열티, 이익 및 상대적인 경제적 이득”이 계획적인 국가 관리의 동인으로 확인된다.¹⁶⁴⁾ 어떤 정보 제공자는 기술적 목표와 안보상 요구되는 의무 사이의 관계를 “경제적 안보에 대한 정부의 집착”으로 규정한다.¹⁶⁵⁾ 중국은 내·외부 안보 우려를 중국의 기술 인프라 발전과 통제 및 정보 전파와 인력 시장 관리의 목표와 연결시킨다. 국가발전개혁위원회가 발표한 각종 5개년 계획과 10개년 계획 및 외국인 투자 안내 카탈로그에서 인프라와 첨단 기술 부문은 외국인 직접 투자와 외국 기술 및 자주 발전에서 “흡수와 소화”를 필요로 하는 현대화 분야로 명명되었다. 또한 정보 제공자들은 수출 지향 이외에도 국내 소비를 강조했다.¹⁶⁶⁾ 1986년 국가첨단기술연구개발계획(863계획)과 같이 나노기술을 포함하는 자금지원 계획은 기초과학부터 상업화로의 계획을 활성화시켰다. 최근 2006년에 국무원에서 발행한 지도 의견에 따르면 군용 생산, 전기(송전망 및 발전), 석유, 통신, 석탄, 민간 항공 및 해운이 국가 안보 및 경제적 생존과 경쟁력을 위한 결정적 주요 부문으로 확인되었다.¹⁶⁷⁾

2010), Shambaugh은 “국내 안정”이 언제나 가장 중요하며, 외부 위협은 보통 국내 불안정의 심화 맥락에서 감지된다고 주장함. D. Shambaugh, *Modernizing China's military progress, problems, and prospects* (Berkeley, CA: University of California Press, 2002).

162) 2008년 9월, 국가개혁발전위원회 연구개발센터의 정부 관리와의 개인적 의사소통.

163) 중국에 관한 본 연구는 2005년과 2008년 사이와 2011년에 전·현직 관료와 중앙 및 지방 정부의 관리자, 국유 운송회사의 관리자와 임원, 국내외 투자업체 및 장비 제조업체, 그리고 부문 및 업계 협회와 해외 대표단의 관리자와 동부 해안 및 서부 내륙 지역에서 실시한 반구조화(semi-structured) 심층 인터뷰를 기반으로 함. 기본 자료와 2차 연구로 현장조사를 보충함.

164) Suttmeier 2005, 35-37. Suttmeier, Yao and Tan(2006), 기술 표준 정립, 경제 목표와 안보 우려 사이의 관계 고찰

165) 2008년 9월 23일 베이징에서 과학기술부의 연구센터를 관장하는 전직 북경우전대학교 교수와의 인터뷰

166) 2006년 9월 19일 베이징에서 외국인 투자 네트워크 장비 제조사의 대정부 관계 이사와의 인터뷰에서 인용.

167) 국무원에서 2006년 9월 16일에 발표한 “The Guiding Opinion on Promoting the Adjustment of State-owned Capital and Reorganization of State-owned Enterprises” 참조.

사례) 나노기술이 활용된 산업용 섬유

중국은 나노기술이 활용된 성분을 포함한 산업용 섬유의 주요 생산국이다.¹⁶⁸⁾ 산업용 섬유의 하위부문은 중국 국가 기술 기반에 기여하고, 건설, 항공우주(항공 운송과 우주 탐험 포함) 및 중요한 군사 목적으로 응용되고 있으므로 일반 섬유와 달리 경제적·군사적 측면에서 가장 중요하다. 선저우 우주선 소재를 생산한 텐진공업대학 복합재료연구소는 나노스케일 탄소 섬유, 즉, 군사 및 국가 안보용 고성능 섬유의 기초 연구를 위한 자금을 지원받는다. 환경적 영향을 고려한 공기, 석유 및 휘발유 필터를 위한 핵심적 투입으로서 고성능 나노기술이 활용된 섬유는 기초 연구 및 상업화를 위한 자금지원을 목표로 하는 국가 관료들의 관심을 받고 있다.¹⁶⁹⁾ 이러한 하위부문에서 중국 중앙정부의 해당 관료들은 중앙정부의 제한된 연구개발 자금을 분배하기 위해 부문 협회들과 공동 작업을 하고, 합성섬유와 토목섬유의 국내 능력을 강화하기 위한 기술적 표준을 정한다.¹⁷⁰⁾

산업용 섬유 부문을 전략상 집중 분야로 명확히 지명한 각종 5개년 계획(및 오염 수준이 높은 부문을 예방하거나 금지하는 투자 카탈로그) 이외에도 2000년대 중앙정부의 연구 자금지원은 비록 제한적이었으나 이러한 하위부문에서 기술 및 산업의 대변혁 및 혁신에 집중했다.¹⁷¹⁾ 그러나 UC 데이비스의 섬유고분자공학 판닝 교수에 따르면, “상업화” 측면에서 “나노입자의 마감 처리, 즉 얼룩 방지가 되는 섬유는 최소 5년에서 10년은 더 걸리는데, 심지어 그 이후에도 안보와 관련되지 않은(nonsecurity) 시장은 국내외적으로 소규모이다.”라고 전했다.¹⁷²⁾

168) Margaret E. Kosal이 본 보고서에 기고한 내용 참조(p. 34). R. Parker and R. Appelbaum: *Can emerging technologies make a difference in development?* Rachel A. Parker and Richard P. Appelbaum 편집(New York: Routledge, 2012)

169) 2013년 3월 11일 상하이에서 중국 동화대학 화학공학과 Wang Yimin 교수와의 인터뷰

170) 2006년 4월, 5월 및 9월 장쑤, 저장 및 상하이에서 Polyfelt and Performance Fiber and Ocean Power의 관리자들과 외국인 투자 및 국내 민간 섬유 산업 제조자들과의 인터뷰.

171) 2013년 3월 12일 베이징에서 China Nonwovens & Industrial Textiles Association의 회장 Li Lingsheng과의 인터뷰.

172) 2013년 10월 14일 캘리포니아 데이비스에서의 인터뷰.



출처: 2008년 신화, <http://news.xinhuanet.com>

그림 36 중국의 제3차 유인 우주선 선저우 7호의 우주복

중국식 전략적 가치 및 나노섬유 규제의 정치적 기원

부문별 전략적 가치란 중국에서 경제 부문에 대해 재규제가 발생하는 이유와 경위를 결정하는 요인이다. 또한 그러한 전략적 가치는 산업 전반에 걸쳐 상이할 뿐 아니라 그에 대한 결정 요인은 국가적 차원에서 발생한다.¹⁷³⁾ 경제적 차원에서 전략적 가치는 국가 기술 및 인프라 기반에 대한 부문별 가치 투입과 특정 부문이 다른 부문의 경쟁력과 경제의 나머지 부분에 미치는 기여도에 의해서 정의된다. 내부의 정치 및 사회적 안정, 외부의 안보 및 대외 관계를 포함해, 국가 안보를 위한 부문별 응용성은 전략적 가치가 갖는 객관적 정의의 정치적 측면을 특징짓는다.¹⁷⁴⁾ 중국 시장 재규제가 경제적 계산에

173) 이 부문별 전략적 가치의 개념화는 Roselyn Hsueh의 다음 논문에 의거함. "China and India in the Age of Globalization: Sectoral Variation in Postliberalization Reregulation," *Comparative Political Studies* 45 (1): 32-61 (2012); Roselyn Hsueh, *China's regulatory state: a new strategy for globalization, Cornell studies in political economy* (Ithaca: Cornell University Press, 2011).

174) Kiren Aziz Chaudhry, The price of wealth: economies and institutions in the Middle East, *Cornell studies in political*

미치는 영향만이 아니라 그것이 가장 중요한 의사결정자의 정치적 생존에 미치는 영향에 의해서 중국 시장 재규제의 범위와 본질이 형성된다. 이러한 객관적 정치 및 경제 척도에 대하여 나노기술이 활용된 부직포 섬유 및 산업용 섬유의 하위부문은 안보 중요성에서 높은 점수를 기록하고 경제적 중요성에서 낮은 점수를 기록하게 된다. 전략적 가치의 상대성은 섬유 산업 내 자본 및 노동 집약적인 하위부문 전반에 걸친 시장 조정의 형태와 국가 개입의 정도에 영향을 미친다.

일반적으로 말해서, 중국은 국가 안보를 위한 응용성과 국가 기술 기반에 기여도가 있는 분야의 이익을 극대화하기 위해서 노동 집약적 하위 부문에 외국인 및 민간 진입에 대한 개방성을 반영하고, 자본 집약적 하위 부문에 보다 계획적인 접근방식을 반영한다. 중국은 국가 안보와 국가 기술 기반에 대한 기여도 때문에 비전략적으로 여기는 산업을 통제하지 않고, 전략적으로 여기는 산업에는 통제를 강화한다. 이러한 전략을 실행할 수 있는 국가의 능력은 인력 관리에 대한 중국 공산당의 독점과 비전략적 분야에서의 경제력의 이양에 있다. 그러나 중국 지도부가 전략적 가치를 정의하는 방법은 항상 객관적 척도의 범위 안에 꼭 들어맞지는 않는다. 경제와 정치적 측면 사이의 경계는 실제로 모호한데, 이는 정치 지도자들과 정책 입안자들의 부문별 전략적 가치에 대한 정의와 주장 그리고 이의 제기와 관련된 주관성에 기인한다. 중국의 섬유 산업 사례에서는 전략적 가치의 “객관적” 측정에 대한 주관적 평가 분석이 중국 정부의 시장 지배 목적과 수단에 관한 중요 정보를 제공하고 있음을 보여준다. 전략적 가치 정의에 내재하는 주관성을 고려하면 객관적 척도에 순위를 매기고 점수를 기록하는 중국인들의 방식을 보다 잘 이해할 수 있다.

중국 정부는 국가 안보와 기술 개발의 종합적인 객관적 척도에 근거하여, 나노기술이 활용된 섬유와 기타 산업용 섬유를 전략적으로 여겨야 한다. 중국 정부는 그러한 기술 선진 부문에서 안보 관련 영향 문제를 고려하기 전에 시장 경쟁을 쉽사리 도입할 것으로 기대되지 않으며, 군사, 항공 및 다른 관련 분야에서의 잠재적 응용제품 개발에 기여하는 방식으로 개입할 것으로 기대된다. 산업용 섬유는 첨단 기술 내용이 포함된다. 일부 제품의 범주로서, 군사 응용 제품을 포함하는 건설, 우주 및 항공 부문을 위한 투입이 있다.

economy (Ithaca: Cornell University Press, 1997).

통신과 같은 자본 집약적 산업에 비해, 섬유 산업은 기술 단계의 낮은 층(low end)에 해당하지만, 군사 및 항공의 잠재적 응용 덕분에 전략적 가치 타당성 차원에서 관련 중앙 정부의 장관들이 첨단 고부가가치의 하위부문 산업 개선과 외국인 직접 투자(FDI)가 촉진되도록 개입할 것으로 기대된다. 또한 중앙 정부 및 지방 정부들은 다른 국가의 수출 제한으로 인해 수입품으로 이용할 수 없는 첨단 섬유 장비와 섬유 개발을 장려하도록 재정 보조금 및 기타 보조금을 도입해야 할 것이다.

1980년대 이전, 중국 정부는 통신 산업보다 섬유 산업에 더욱 관료 집중적 지배를 했었다. 그러나 등소평 시대에 시작한 계획적인 국가의 활동은 경제적 이익을 극대화하고 정치 경제학 측면에서 시장과 사익이 더 많아지는 정치적 비용을 극소화하기 위해 시장 조정과 재산권 분배를 재조정하였다. 중국은 국가 안보를 위한 응용성이 거의 없고 국가 기술 기반에 기여도가 적은 제품이나 서비스 통제에 관여를 덜 하면서, 1980년대에 섬유 산업에 경쟁을 도입하고 1990년대 초까지 지방 정부와 통상국으로 시장 조정을 분권화 했다.

전체적으로 전략적 가치가 낮은 섬유와 섬유 산업의 분권화된 시장 지배에서 경로의 의존적인 영향은 섬유 부문과 이슈에 충당된 중앙 정부 자원의 실제적 형태와 양을 제한 한다.¹⁷⁵⁾ 1993년, 섬유산업부의 해체를 통해 섬유 산업에 대한 중앙 정부의 조정은 공식 적으로 종료되었다. 1998년, 섬유 원자재와 가공소재의 유통을 장악했던 국내무역부의 등급 격하는 국유 무역회사의 민영화 및 개편과 마찬가지로 업계 감독을 더욱 분권화했다. 시장 개혁이 통신 산업의 중앙집권적 조정을 강화했던 바로 그 순간에 강등된 섬유 사무소는 아무런 권한도 없이 사무국 수준의 부서처럼 운영되었다. 이러한 기관들의 전개 상황은 민간 부문의 발전과 외국인 직접 투자에 대한 현지 이해관계자들이 급증하는 발판이 되었다. 중국 정부의 활동은 업계를 이끌어갈 거시경제학적 수단에 주로 의존하며, 특정 부문별 조정 방법들을 제한하였다.

중국의 섬유 산업 사례에서 나타난 바와 같이, 중국 정부는 상대적으로 중요하지 않은 섬유 산업에 대한 주관적 이해에 준하여, 나노기술이 활용된 산업용 섬유의 하위부문을 포함해 섬유 산업을 크게 재규제하지 않았다. 중국 중앙 정부의 활동은 나노기술이 활용된

175) 2006년과 2013년, 베이징, 장쑤, 상하이, 선전, 저장에서 섬유 부문 및 업계 협회의 산업용 섬유 생산자 및 직원 대표들과의 인터뷰

섬유를 포함해 섬유 업무를 분권화하였다. 중국 정부는 지방 관료와 시장 행위자에게 시장 규제를 분권화하여 산업 개발의 국가 통제를 포기하고 경쟁을 도입하여 거의 모든 시장의 부문과 하위부문을 민영화하였다. 그러나 나노기술이 활용된 성분과 중요한 연구개발 투입분에 상당한 의존성이 있는 산업용 섬유 세분시장의 전략적 가치에 대한 객관적 척도에 준하여, 중국 중앙 정부의 자금과 제한적 조정을 통해 국가적으로 중요한 지정 사업에 특정 범주에 대한 대학과 과학기술 관료의 연구가 촉진되었다. 이러한 연구에는 중국의 우주 프로그램과 관련된 그 밖의 첨단 복합 재료의 ‘슈퍼 슈트’가 포함된다.

나노섬유의 객관적인 전략적 가치와 자주적으로 생산된 나노섬유를 사용한 ‘슈퍼 우주복’ 생산에 대한 국가적 자부심에도 불구하고, 중국 정부는 본 산업 부문에 상당한 규제적 통제를 가하지 않았다. 군사 및 항공우주 산업에서 나노기술을 활용한 섬유의 응용에도 불구하고, 중국 정부는 시장 발전에 대한 국가 통제를 포기하고, 섬유 산업을 대대적으로 자유화하였다. 섬유 산업은 비국가 시장 행위자가 추진하는 규제완화와 산업 발전을 가장 먼저 경험하는 산업이었다. 경제적 의사 결정의 지방 분권화와 시장 개혁의 촉발 및 부가가치가 있는 섬유 하위부문으로의 정부의 선택적 개입은 중국에 활기차고 유연한 수출 지향의 제조 기반을 마련하고 산업용 섬유의 국내 능력을 발전시켰다. 중국의 전략적 가치 규제 전략의 장기적 효과는 산업 발전에 비교 우위를 가능하게 했다. 이러한 전략은 중국 정부가 가장 중요하게 생각하는 부문과 이슈에 제한적인 자원을 배치함으로써 전체적 규제 능력을 강화시켰다. 중앙 정부를 부문별 이해관계로부터 격리시킴으로써, ‘전략적 가치’ 전략은 중국의 권위주의 체제를 계속 유지시키는 데 일조하였다.

Ⅱ 나노기술 개발 관련 기관 및 리더십 정책 Ⅱ

중국의 나노기술이 급속 발전한 것은 1950년대 이후로 중앙집권제 국가의 계획수립 체계가 과학·기술에 계속적으로 이어져 온 것과 밀접한 관계가 있다. 중국의 중앙집권제 국가의 역할은 중국의 국제적 위상이나 정치적 목적을 드높일 수 있는 연구 분야에 우선 순위를 두고, 이에 따라 이러한 분야에서 획기적인 대전환을 맞이하도록 자원(인적 자원, 자금 및 행정 지원)을 집중하는 특징이 있다. 나노기술과 관련해, 중국은 국가적 차원에서 나노기술 개발을 지휘·조정하는 하향식 제도 마련을 선도하고 있다.¹⁷⁶⁾ 중국 국무원에서

수립한 국가중장기과학기술발전계획(2006~2020년)에 따르면, “나노기술 연구의 혁신적 대전환”은 기초연구의 4대 과학 연구 계획 중 하나이다.¹⁷⁷⁾

나노기술 연구를 우선으로 삼는 중국의 나노기술 개발과 국익 추구는 1980년대부터 소수의 주요 중국인 과학자들이 수행한 영향력 있는 연구에서 기인한다고 할 수 있다. 현 중국과학원(CAS)의 백춘례(Bai Chunli) 원장은 그와 같은 영향력 있는 인물들 중 한 명이다. 백 원장은 1985년에 중국과학원 화학연구소에서 박사과정을 졸업하고 제트추진연구소(JPL)에서 근무하며 캘리포니아 공과대학(Caltech)에서 박사 취득 후 연구원이 되었다. 백 원장은 1987년에 중국으로 귀국해 중국과학원에서 주사터널링현미경(STM)을 이용한 연구 프로그램을 시작했고, 나노스케일 연구를 수행하는 중국 최초의 과학자들 중 한 명이 되었다.

1980년대 중반부터 중국국가자연과학기금위원회(NSFC)와 중국과학원은 주사터널링 현미경 관련 연구의 지원 연구와 나노스케일에서 점진적으로 더 폭넓은 연구 주제를 지원하는 연구를 시작하였다.¹⁷⁸⁾ 1986년, 국가첨단기술연구개발계획(일명 863계획)은 과학기술부(MOST)의 전신인 당시 국가과학기술위원회(SSTC)가 나노소재의 응용 연구를 공적 자금의 우선 분야로 선정하면서 시행되었다. 전체적으로 863계획은 잇따른 5개년 계획을 통해 시행되었고, 1990년부터 2002년까지 천여 개의 나노기술 사업에 대해 총 2,700만 달러의 자금을 지원했다. 특히, 1990년에 국가과학기술위원회는 863계획 목표를 고수하면서 나노소재분야 연구를 지원하기 위해 1990~1999년까지 나노소재 과학에 관한 10개년 “도약(Climbing Up)” 사업을 시작하였다. 한편, 1997년에 백 원장은 중국공산당 중앙위원회의 후보위원으로 진급하였다. 같은 해, 국가과학기술위원회는 일명 973계획으로 알려진 국가중점기초연구발전계획을 수립하고, 나노소재 및 나노구조 개발 지원에 더욱 집중하였다.¹⁷⁹⁾ 973계획은 연구투자에서 863계획을 보완하고, 나노기술 연구 표준화를 개량하였다.

973계획하에서 주목할 만한 2개의 사업은 나노기술(국가나노과학센터의 장차오(Jiang

176) M. Hu, “Nanotechnology development in Mainland China,” IEEE Conference on Technology and Society in Asia (2012)

177) PRC, 중화인민공화국, 국무원 (2006)

178) 중국 과학원, Institutional Repository of Institute of Mechanics (2013); China Daily, “China has become a global nanotechnology leader, says the CAS President Bai Chunli (in Chinese),” *China Daily* (2013).

179) C. Bai, “Ascent of nanoscience in China,” *Science Magazine* (2005)

Chao) 교수 주도)과 도량형 및 측정용 표준물질의 제어 합성(국가나노과학센터의 우샤 오춘(Wu Xiaochun) 교수 주도)에 있어서 주요 측정 기술의 표준화에 관계했다.¹⁸⁰⁾ 1998년, 중국과학원은 자체적 지식혁신공정(KIP)을 선도하며 첨단기술 개발과 기술 이전에서 나노기술에 우선순위를 두었다. 지식혁신공정은 중국과학원 계열 기관별로 첨단기술 창업회사의 보육 계획을 입안하였다.¹⁸¹⁾ 2004년에 백 원장은 장관급 직위의 중국과학원 부원장으로 진급하였다.

중국이 나노기술 개발을 우선시하도록 결정을 내리게 된 계기는 과학계와 중앙정부 양쪽에서 백춘례 원장처럼 유명한 연구 과학자들이 해당 연구를 지지했기 때문만이 아니라, 나노기술 연구의 국제 교류와 나노기술 개발을 위한 정부 지원 사업에서 전 세계적 경쟁으로 인한 동기부여가 있었기 때문이다. 일찍이 1986년에 중국과학원은 주사터널링현미경을 고안해 노벨상을 수상하고 나노기술 연구에서 유명해진 두 명의 연구 과학자 거드 비닝(Gerd Binnig)과 하인리히 로러(Heinrich Rohrer)를 중국과학원으로 초대해 중국과학원의 과학자들과 정보를 교환할 수 있게 하였다.¹⁸²⁾ 하인리히 로러는 1993년 당시 산업 발전에서의 나노기술 출현을 예측한 장쩌민 주석에게 “미래 기술을 소유하는 국가들은 나노스케일을 기술의 신표준으로 삼고 그 연구 개발과 이용을 선도 하는 현명한 국가들이다”라는 편지를 전했다고 한다.¹⁸³⁾

2000년, 미국은 국가나노기술계획(NNI)을 공식적으로 발족하였다. 아펠바움(Appelbaum) 등이 진행한 인터뷰에 따르면, 중국 중앙정부는 미국과 같은 국가들이 국가나노기술 계획을 수립한 후에야 나노기술을 제대로 수용하게 되었고, 이로 인해 백춘례 연구팀은 과학 및 정치 지도자들에게 자신들의 주장을 더 쉽게 펼칠 수 있게 되었다.¹⁸⁴⁾ 같은 해, 국가나노과학기술조정위원회(NSCNN)가 설립되면서 중국의 모든 연구개발 자금제공기관에 대한 국가 정책을 관장하고 자금제공을 조정할 수 있게 되었다. 본 위원회의 회장은

180) D. Jarvis and N. Richmond, “Regulation and Governance of Nanotechnology in China: Regulatory Challenges and Effectiveness,” *European Journal of Law and Technology* 2 (3): 1-11 (2011)

181) 중국과학원, Institutional Repository of Institute of Mechanics (2013)

182) R. Leung, “Doing Nanotechnology in China,” University of Wisconsin-Madison 사회학 박사 (2008)

183) Caijing, “Nano is Coming, Finding the Right Path First (in Chinese),” *Caijing Magazine* (2013)

184) R. Appelbaum, Cao C., R. Parker와 Y. Motoyama, “Nanotechnology as Industrial Policy: China and the United States,” 2013 국제연구협회 연례총회(International Studies Association Annual Conference)에서 발표된 논문, San Francisco, CA (2013)

과학기술부장이 맡고 부회장들은 과학기술부부장들과 중국 과학원부원장 및 중국 국가 자연과학기금위원회 부회장이 맡았다. 국가나노과학기술조정위원회 위원들에는 교육부, 국가발전개혁위원회(NDRC), 중국공정원(CAE) 및 국방과학기술공업위원회 출신의 정부 관리들이 포함되었다.

이듬해, 중국의 장쩌민 주석(중국공산당 중앙위원회 총서기 역임)은 “나노기술과 신소재의 개발을 과학기술에서의 발전과 혁신의 중요 과제로 여겨야 한다. 나노소재와 나노기술의 개발 및 응용은 중국의 첨단기술과 국가 경제 발전에 전략적으로 중요하다.”라고 언급했다.¹⁸⁵⁾ 국가나노과학기술조정위원회는 미국의 국가나노기술계획과 비슷한 전략을 닮은 중국 최초의 나노기술계획안으로서 국가나노기술발전요강(2001~2010년) 초안을 작성했다.¹⁸⁶⁾

국가나노기술발전요강은 2001년부터 2010년까지의 10년 동안 중국의 나노기술 개발의 청사진이었다. 본 요강은 나노기술 개발을 위한 정부 자금 지원 증가의 중요성을 강조하고, 나노기술의 상업화와 유능한 연구개발 인력의 훈련과 연구개발 분야에서의 지식 재산권 인정 및 제10차 5개년 계획(2001~2005년)의 국가 나노기술 혁신 제도 강화를 우선시 하였다. 본 요강에서는 “나노소재 생산 및 조립, 나노스케일 디바이스의 구조 및 통합, 나노조립 기술, 나노스케일 구조 분석 및 성능 시험 기술, 그리고 나노소재 생산 디바이스의 자주 혁신의 기술적 대전환을 공개적으로 요구했다.¹⁸⁷⁾ 또한 군사 기술에서는 “나노기술과 다른 고에너지 화염 기술의 개발, 나노구조 소재와 특수용 도장 기술의 대전환, 나노기술 센서·제어·동작 시스템의 통합 응용 개발, 그리고 마이크로/나노형 항공기, 마이크로/나노위성 시스템과 특수용 통합 기술 플랫폼을 위한 통합 마이크로 전자기계 시스템(MEMS¹⁸⁸⁾) 기술”을 공개적으로 요구했다.¹⁸⁹⁾ 제10차 5개년 계획 또한 단기(나노소재 개발), 중기(바이오나노기술 개발 및 나노의료 기술 개발) 및 장기(나노전자 및

185) Xinhua, “President Jiang Zemin Meets with Delegates of 2001 International Nanomaterials Conference (in Chinese)” (2001)

186) MOST, “National Nanotechnology Development Strategy (in Chinese)” *MOST* (2001)

187) MOST, “National Nanotechnology Development Strategy (in Chinese)” *MOST* (2001); “Guojia Nami Keji Fazhan Gangyao” (National Nanotechnology Development Strategy) (2001–2010), 중국어 원본에서 번역.

188) Microelectromechanical systems

189) MOST, “National Nanotechnology Development Strategy (in Chinese)” *MOST* (2001); “Guojia Nami Keji Fazhan Gangyao” (National Nanotechnology Development Strategy) (2001–2010), 중국어 원본에서 번역.

나노칩의 개발) 목표를 설정하였다.

최근 정부의 여러 정책은 주요 연구 분야의 기술 격차를 뛰어넘어 혁신 시스템을 구축하는 일에 집중되었다. 2000년, 과학기술부는 중국과학원의 지원을 받아 텐진(베이징에서 멀지 않은 지방자치 도시)에 중국나노기술산업화기지(NIBC)를 설립해 나노기술 연구 분할 회사들을 위한 주요 보육센터로서의 역할을 수행하게 했다. 2005년, 과학기술부, 중국과학원과 텐진 지방자치정부는 공동으로 중국나노기술산업화기지의 동 시설 내에 국가나노기술공정연구원(CNANE)을 설립하고, 연구개발 발전 및 연구개발과 상업화 간의 시너지 조성에 역점을 두었다.

제11차 5개년 계획(2006~2010년)에서 중앙 정부는 “90나노미터 이하의 통합 회로용 기술 산업화”와 “정보, 생물 및 항공우주 산업에 절실히 필요한 신소재” 개발을 포함해서, 이전보다 더 강력히 혁신을 강조하였다.¹⁹⁰⁾

■ 나노기술 산업 이해관계자들 ■

정부

앞서 중국의 나노기술 개발의 중단분석에서는 중국의 나노기술 개발에 있어 중앙 정부의 개입 역할을 이미 조명해왔다. 중앙 정부(과학기술부, 중국국가자연과학기금 위원회, 중국과학원, 중국공정원 등)에 있는 정치적 행위자들의 각종 구상안과 계획과는 별도로, 지방 정부 또한 상위 단계의 연구와 하위 단계의 제조업을 통합하는 국가 혁신 시스템 창설에 결정적 역할을 한다는 점을 주목해야 한다. 지방 정부는 지방 나노기술 개발 계획을 위한 지원을 제공한다. 이들 지방 정부 중에서 가장 주목할 만한 사항은 상하이 지방자치정부가 제정하여 나노기술 연구에 자금을 제공하는 ‘등산행동계획’, 그리고 7개 지방대학교와 9개 사기업에 걸쳐서 나노기술에 자금을 제공하고 연구를 조정하는 상하이 나노기술산업발전추진센터(SNPC)이다. 지방 정부는 첨단기술 사업가와 외국 기업체에 인프라 지원, 비즈니스 개발 지원 및 세제와 자금 조달에 있어 일괄 특혜를 제공할 수 있다.

190) Y. Zheng and M. Chen, “China plans to build an innovative state” (Nottingham, UK: China Policy Institute, 2006)

대학 및 국가 후원 연구기관

대학 및 국가가 후원하는 수백 개의 연구기관은 베이징과 상하이에 집중된 최고 유수의 여러 대학 및 기관과 함께 중국 나노기술 연구에 활발히 참여하고 있다. 2003년, 칭화대학, 베이징대학과 중국과학원은 과학기술부, 국가발전개혁위원회 및 교육부(MOE)로부터 추가지원을 받아서 베이징에 국가나노과학센터(NCNST)를 공동 설립하였다. 국가나노과학센터는 나노가공과 나노디바이스, 나노소재와 나노구조, 나노의학과 나노바이오기술, 그리고 나노구조 특성과 시험의 4개 분야 연구에 관여한다.¹⁹¹⁾

또한 2003년, 상하이 나노기술응용국가공정연구센터(NERCN)는 국가발전개혁위원회(NDRC)에 의해 상하이에 설립되었고, 본 센터의 대주주에는 지방 중국과학원 기관, 상하이 자오퉁 대학, 푸단 대학, 화동사범대학, 몇몇 지방 회사 및 상하이 나노기술산업발전 추진센터가 포함되었다. 본 센터는 환경 보호, 재생 에너지, 정보 기술, 의용생체 공학과 신소재를 포함하는 분야에서 나노기술 연구개발에 중점을 두고 있다.¹⁹²⁾

업체

중국의 나노기술 회사는 대략 800~1,000개사일 것으로 예측되지만, 그에 대한 정보는 부족하다.¹⁹³⁾ 나노기술을 위한 국가산업협회가 없고, 정부 단체도 회사의 개수를 추적하지는 않는다. 나노기술 회사의 대다수는 베이징, 톈진(중국나노기술산업화기지의 주관 도시), 상하이(상하이나노기술산업발전추진센터 주관 도시), 쑤저우(쑤저우산업단지 내 나노기술과 생명공학에 중점을 둔 중국 최초의 국제 혁신 단지인 SIP BioBay가 있는 장쑤성의 도시) 및 광둥성에 집중되어 있다. 나노기술 회사 중 80% 이상은 중국 내 또는 해외 대학이나 연구기관과 함께 공동 작업을 한다.¹⁹⁴⁾ 나노기술 회사는 국가 최첨단 계획의 보조금을 신청하기 위해서 “첨단기술 회사” 증명서 신청이 허용될 수 있다. 회사는 그 같은 증명을 받기 위해서 지식재산권 소유권과 고등교육 학위가 있는 근로자들의 최소

191) NCNST, “NCNST 공식 홈페이지 (중국어)” (2013)

192) NERCN, “NERCN 공식 홈페이지 (중국어)” (2013).

193) 이탈리아 무역공사 상하이 사무소, “Market Report on China Biotechnology and Nanotechnology Industries” (2009)

194) 이탈리아 무역공사 상하이 사무소, “Market Report on China Biotechnology and Nanotechnology Industries” (2009)

비율 및 연구개발 전담 수입의 최소 비율과 같은 해당 정부 단체가 규정하는 특정 요구 조건을 반드시 충족시켜야 한다.

중국에서 나노기술의 상업화는 미국과 같은 선진국에 비해 오랜 시간이 걸렸다. 중장기 과학기술발전계획(2006~2020년)에 따르면 나노기술은 공정 분야라기보다는 기초 과학 계획 분야에 속한 것으로 기재되었다. 아펠바움 등에 따르면, 중국 회사의 대다수 나노 제품은 저급 기술로 생산되지만, 중장기과학기술발전계획에 나노기술을 궁극적으로 포함 시키는 것은 중앙 지도부가 백춘례 과학자와 같은 나노과학자들을 신뢰하고 있음을 나타낸다. 그들은 나노기술이 미래에 상업화 수입에서 일궈낼 수조 달러의 놀라운 가능성을 강조한다.¹⁹⁵⁾

기술 동맹단체

중국의 나노기술 개발에서 부상하고 있는 이해관계자는 기술 동맹단체인데, 이 기술 동맹단체는 특정 분야 내에서 업계와 연구기관 양쪽의 가능성과 자원에 레버리지 작용을 함으로써 결정적인 기술 문제 해결을 목표로 한다. 예를 들어 2010년, 중국과학원 고체 물리연구소는 안휘성에 20여 개의 연구기관과 대학 및 기업이 참여하는 안휘성 나노소재 응용기술 혁신전략동맹단체를 설립했다. 초창기에 발생하는 이러한 부류의 느슨한 동맹 단체의 영향력은 현재로서는 예측하기가 어렵다.

언론과 대중

중국의 과학부 기자들은 나노기술 개발에 대해 대체적으로 긍정적이다. 중국과학원이 2000년부터 2009년까지 주요 신문사인 사이언스 타임즈(*Science Times*)와 과기일보(*Science and Technology Daily*)의 나노기술 보도에 관해 조사한 바에 따르면, 나노기술의 부정적 양상에 관한 보도 건수는 전체 보도 중 11%만을 차지했다.¹⁹⁶⁾ 나노기술의 부정적

195) R. Appelbaum et al., "Nanotechnology as Industrial Policy: China and the United States," 2013 International Studies Association Annual Conference에서 발표된 논문, San Francisco, CA (2013); R. Parker and R. Appelbaum, Can emerging technologies make a difference in development? Rachel A. Parker and Richard P. Appelbaum 편집 (New York: Routledge, 2012)

196) C. Fan and L. Li, "Research on coverage of domestic mainstream media on new and emerging technology: in the case

영향력에 관한 언론 보도에서는 나노기술 개발 때문에 일어날 수 있는 폭넓은 사회윤리 문제보다는 오히려 기초 연구 결과에 보도가 치중되었다.

중국의 대중은 사회 정책 의사 결정 과정에서 대체적으로 배제되는 편이지만, 대중들은 나노기술에 관해 대부분 긍정적인데, 이는 중앙 지도부가 ‘중국의 부상’으로 신뢰를 주고 있는 국가 후원 첨단기술 산업에 대한 대중 숭배와 상호연관이 있었다. ‘나노’라는 말은 대중에게 신제품을 광고하는 유행 방식이 되었다. 중국 온라인 매장에서 광고를 검색해 보면 인기제품에는 ‘나노 에너지 컵’, ‘나노 광고 우산’ 및 ‘나노 자석 팬티’와 같은 문구가 있고, 그러한 광고는 대중의 ‘나노기술’ 숭배와 제품 기능을 과장하는 광고에 대한 엄격한 규제가 없다는 것을 이용하고 있는 것이다.

국가나노과학기술조정위원회장은 “나노기술은 고도의 기술로서, 전문가 지식을 필요로 하므로, 일반인들은 전문적 역량이나 지식이 없이 기술 이해나 잠재 위험 평가를 할 수 없다”는 의견을 고수하였다.¹⁹⁷⁾ 국가나노과학센터(NCNST)는 과학 강의와 전시회 및 실험실 방문을 포함해, 일반 대중을 위한 2회의 과학 교육 과정을 주최하였다. 그러나 나노기술과학 교육과 지원의 이러한 기초 활동만으로 일반 대중에게 충분한 정보가 제공될 리는 만무하다.

■ 나노기술 발전에 관한 윤리적, 법적 및 안전상의 우려 ■

2011년 현재, 중국에는 나노소재와 나노입자의 독성 및 환경에 미치는 영향과 나노입자를 제조 상태에서 복구하는 기술에 관한 연구를 수행하는 연구기관이 30개가 넘는다.¹⁹⁸⁾ 그 중 가장 주목할 만한 곳이 2006년 중국과학원의 고에너지 물리학 연구소와 국가나노과학센터에 의해 설립된 나노물질과 나노안전 생물학적 영향 합동연구소(Joint Lab for Biological Effect for Nanomaterials and Nanosafety)이다. 중국 나노기술 발전의 주역인 백춘례는 이 연구소의 설립기념식에서 “우리는 오염된 후 처리하는 식의 낡은 방식을

of GMO and Nanotechnology (in Chinese),” 제5회 중국 과학 기술정책 및 관리 연차 총회 (2009)

197) D. Jarvis and N. Richmond, “Regulation and Governance of Nanotechnology in China: Regulatory Challenges and Effectiveness,” *European Journal of Law and Technology* 2 (3): 1-11 (2011)

198) D. Jarvis and N. Richmond, “Regulation and Governance of Nanotechnology in China: Regulatory Challenges and Effectiveness,” *European Journal of Law and Technology* 2 (3): 1-11 (2011)

따라서는 안 된다. 나노기술 개발을 시작하면서 나노안전도 연구해야 한다. 그래야 부정적인 영향이 사전에 미리 심각하게 연구되고 면밀히 고려되어, 나노기술이 안전하고 인간에게 혜택을 주는 첫 번째 제대로 된 첨단기술이 될 수 있다.”고 언급하였다.¹⁹⁹⁾

2009년 베이징 차오양 병원의 직업병의학부 연구진은 나노입자와 나노입자에 노출된 환경에서 작업하는 근로자의 장기에 가해지는 독성피해를 연결 짓는 세계 최초 연구 결과에 대한 논문을 발표했다.²⁰⁰⁾ 이전의 동물실험과 시험관 실험에서 나노입자가 폐를 손상시킬 수 있으며 다른 독성을 유발한다는 것을 알았지만, 이번이 나노입자가 인간에 미치는 독성을 임상적으로 연구한 최초의 연구였다.

나노기술의 안전문제 이외에도 중국 학계에서는 나노기술 발전으로 인한 사회적 결과에 대해 우려의 목소리가 점점 커지고 있는데, 예를 들어 테러집단에 의해 나노기술이 악용될 가능성이 있고, 부자와 가난한 자 사이에 나노의학을 이용할 수 있는 계층 간 격차가 크며, 나노물질이 생태계 환경에 장기적인 피해를 입힐 수 있다는 것이다. 중국 사회과학원이 발간하는 신문인 *China Social Science Today*는 2010년에 “나노윤리학에 대한 학제간 견해”라는 제목의 특집호를 냈는데(125호), 여기에 우수한 나노기술 연구과학자와 사회과학자들의 견해를 실었다. 전문가들은 나노기술 발전에 대한 윤리, 법적, 사회적 문제가 강화되어야 하며, 나노기술이 여러 학문을 포괄하는 성격이 강하기 때문에 과학계와 사회과학계 간의 대화가 더 많아져야 하고, 나노기술에 연관된 윤리적 문제에 대한 대중의 인식이 더 커져야 하며, 일반 대중이 윤리 및 정책 관련 토론에 참여할 수 있는 통로를 마련해야 한다고 목소리를 높였다.

앞에서 제시한 것처럼, 개발도상국, 신흥경제국 및 선진국들은 나노기술의 군사적, 경제적 가능성, 사회, 환경 및 보건상의 결과나 상업적인 매력에 대한 전망이 불확실함에도 불구하고 앞다투어 국가적 산업전략을 통해 나노기술을 추진하고 있다. 중국은 나노기술이 국제사회의 기술서열에서 자국을 상위로 도약시킬 수 있기를 희망하고 있다.

199) Science Daily, “Joint Lab for Biological Effect for Nanomaterials and Nanosafety is established (in Chinese),” Science Daily (2006)

200) Y. Song, X. Li, and X. Du, “Exposure to nanoparticles is related to pleural effusion, pulmonary fibrosis and granuloma,” *European Respiratory Journal* 34 (3): 559–567 (2009)

일본의 나노기술

일본 역시 나노기술/재료과학을 자원·에너지 제약 등의 문제 및 사회 인프라 노후화 대책 등과 같은 사회적 과제를 해결하는 열쇠로서 큰 기대를 받고 있는 국가 기반기술로 인식하고 있다. 2001년 각의에서 결정된 제 2기 과학기술기본계획(2001~2005년)에서 중점적으로 추진하기로 하는 등 그 중요성이 강하게 인식된 이후 10여 년 이상이 지났지만 여전히 새로운 과학기술의 첨단을 개척함과 동시에 일본의 기간사업을 지탱하는 국제 경쟁력이 높은 핵심기술로서 사회에서의 그 역할이 점차 증대되고 있다.

나노 관련 연구개발은 문부과학성과 경제산업성이 주도하고 있으며, 연구개발 거점 형성, 교육 및 인재양성, 산·학·관 연계, 자금지원, 국제협력 및 표준화 등 다양한 프로그램을 시행하고 있다. 일본의 나노기술분야 예산은 지속적으로 증가추세에 있는데 2011년에는 814억 엔, 2012년에 883억 엔에서 2013년에는 919억 엔으로 전체 과학기술 예산의 5.43%를 차지하였다.²⁰¹⁾ 나노기술·재료과학은 제 2기 및 제 3기 과학기술기본계획에서 중점 추진분야로 자리매김한 뒤 제 4기 기본계획에서는 사회적 연구개발 기반을 뒷받침해 왔으나 그 중요성에 비해 제 4기에서의 계획상의 위상은 명료하지 않다. 제3기 과학기술기본계획(2006~2010년)에 ‘나노기술·재료분야’를 4대 중점분야의 하나로 선정, 추진하고 나노일렉트로닉스 영역, 나노바이오기술·생체 영역, 나노기술·재료분야 추진 기반 영역, 나노사이언스물질과학 영역 등 5개 영역에 중요한 연구개발 과제를 설정하여 추진하였다. 기간 중 주요 성과로는 국가기관 기술 X선 자유전자 레이저, 나노기술 네트워크 등의 인프라 정비, 일본 최초의 오픈 이노베이션 거점 츠쿠바 이노베이션 ‘아레나’(TIA-nano)에 의한 산·학·관 제휴 강화, 원소전략 프로젝트와 희소금속 대체프로젝트 등 의미 있는 진전을 보았다. 이어 제4기 과학기술기본계획(2011~2015년)에서는 횡단적인 기반기술로서의 위치를 부여하고 출구를 확인 후 중요한 과제를 지정, 새로운 디바이스와 시스템으로 정책과제를 해결하며 에너지의 효율적 이용, 자원 리스크의 경감, 환경부하 저감 등의 다양한 정책 연구 과제를 수행하여 나노기술·재료분야에 괄목할 만한 진전을 이루고 있다.

201) 2014년도 나노기술발전시행계획, 미래창조과학부

2014년 6월 각의 결정된 ‘과학기술 이노베이션 종합 전략 2014’에 나노기술이 산업 경쟁력을 강화하고 정책과제를 해결하기 위한 분야의 횡단적 기술로서 중요한 역할을 하는 내용이 명기되어 있으며, 제 5기 과학기술기본계획에서도 그 위상이 한층 명확하고 강화될 것으로 분석된다. 최근 10년 동안 나노기술분야 논문 집필자 평균도 약 3만 명으로 중국, 미국 다음으로 3위이다. 2002년에는 나노기술·재료분야 산업발굴전략을 수립하여 10년 후 세계시장을 주도할 기업군 창출을 목표로 5개 산업²⁰²⁾을 선정하여 중점적으로 추진하여 왔다. 또한 최근에는 30개 중점기술영역을 발굴하여 기술 지도를 전개하고 있다. 기술적 관점에서 5개 대분야로 분류 후, 이를 매트릭스형으로 배치하여 30개의 중점영역을 도출하고 이에 대하여 로드맵을 제시하였다.²⁰³⁾



출처: JST/CRDS

그림 37 최근 10년간 일본의 나노기술 관련 성과

202) 네트워크나노소재산업, 나노바이오산업, 나노환경에너지산업, 혁신적 재료산업, 나노계측가공산업

203) 제2기 국가나노기술지도 총괄보고서, 미래창조과학부, 2014. 2

직경 700nm 두께의 실인 나노 파이버(fiber) 기술을 이용해 약제와 생체흡수폴리머를 한 개의 실로 구현하여 뼈와 연골이 부족한 부분에 채워 재생을 돕는 기술을 상용화 한다. 현재 기존 치료법과 조합해 효과를 높이는 차세대형 의료재료 연구개발에 힘을 쏟고 있으며 향후 헬스 케어 사업의 견인차가 될 것으로 기대하고 있다. 골·연골 재생촉진 기술은 고베대, 오사카부립대와 전기 임상시험을 진행하고 있으며, 2015년에 일본에서 임상연구에 들어갈 계획이고 재생이 어려운 뼈 치료에 유효할 것으로 전망하고 있다.

재료

에너지 문제를 극복하고, 환경 순환형 사회를 실현하기 위해 필요한 재료 기술을 개발하여, 산업경쟁력을 강화하는 동시에 안전하고 안심할 수 있는 사회 구축을 목표로 하고 있다. 문부과학성은 나노 수준의 구조설계로 제어되는 촉매개발이나, 희소한 원소를 대체하거나 사용량을 감소하는 기술개발전략인 ‘원소전략’을 경제산업성과 연계하여 추진한다. 경제산업성도 나노수준에서 제어하여 고강도 강재를 개발하며, 관련된 가공 기술도 개발하고 있다. 최근 새로운 도금의 가능성에 대한 기대로 일본 전역에 걸쳐 많은 주목을 받고 있는 ‘나노 도금’은 후쿠이(Fukui) 현의 기업들과 후쿠이 대학을 비롯하여 후쿠이 공업 대학, 후쿠이 공업 고등 전문학교, 후쿠이 공업 기술 센터 등의 산학 협동으로 진행되는 대단위 프로젝트에서 진행되고 있다. 기요카와(Kiyokawa) 도금 공업이 이 기술을 이용한 전자 부품용 도금 기술로 ‘제 1회 일본 대상’을 수상한 것 외에 현재도 다양한 제품에서의 응용이 진행되고 있다. 나노 도금이라는 용어는 약 10년 전에 생긴 것으로 이와 관련된 기술시도는 꾸준히 진행되고 있다. 나노 도금은 대략 10년 전 당시 기요카와(Kiyokawa) 도금 공업이나 후쿠이 대학교수 연구그룹이 일본 경제산업성의 지역 신생 컨소시엄 개발 사업을 위한 제안서의 주제를 기획하며 정의되었다고 한다.

자외선 등을 이용하여 수지 표면을 개질하는 기술은 이미 알려져 있지만 연구그룹은 특수한 가스를 사용하여 도금하기 쉬운 표면에 개질하는 방법으로 처리 후의 표면 두께를 10~20나노미터 이내까지 발전시켰다. 처리에는 최근 확인된 불소의 성질이 핵심인데, 단순하게 불소 가스 처리에 의해 재료 표면에 불소의 양이 증가하면 발수성이 높아져 당연히 도금이 어렵기도 하지만 빠른 처리 단계에서 물에 친숙해지기 쉬운 단계로 발전

하게 되는데 이를 잘 이용하여 도금의 기초를 마련하는 것이다. 폴리프로필렌은 가격이 저렴하고 강도가 높지만, 도금을 진행할 경우 금방 벗겨지게 된다. 그러나 여기에 불소 가스로 표면 개질을 실시하면 밀착성이 높은 도금이 가능하게 된다. 또한 필요로 하는 불소 가스의 양이 적고 가스 용기 등 설비가 크지 않으면서 대량생산 프로세스에도 적용할 수 있다. 도금 기술과 불소 화학을 결합하여 탄생한 ‘나노 표면 개질’로 이와 같은 기술 개발이 계속해서 순조롭게 진행이 된다면, 산업계가 요구하는 이노베이션에 공헌하는 것이 가능할 전망이다. 연구 그룹은 이 연구가 지역 기업에 도움이 됨과 동시에 향후 동 산업 분야에 대한 연구 참여를 촉진시킬 것으로 기대하고 있다.

나노기술·재료 관련 기반

나노측량, 가공, 시뮬레이션 등 나노기술의 혁신을 촉진하기 위한 기반기술 개발을 지원하고, 또한 인재양성 및 연구 개발 환경정비를 추진한다. 문부과학성은 나노기술·네트워크를 통해서 대학이나 독립 행정법인 등의 연구기관이 보유하고 있는 첨단연구 시설·기기의 공용화를 추진한다. 경제산업성은 타 분야와의 연계를 강화하기 위해 ‘타 분야 타 업종 나노기술 도전’ 프로그램을 추진하고 있다.

나노 사이언스·물질과학

이화학연구소(RIKEN) 등은 나노 수준에서의 성질을 제어하고, 바이오 나노 시스템의 메커니즘 규명 등 기반연구를 진행한다.

나노 전자공학

기존의 실리콘 반도체를 대체가능한 나노기술, 나노 단위의 전자제조기술, 에너지 절약형 친환경 나노기술 등을 확보 추진한다. 경제산업성은 저손실·고기능 편광제어 부품소재 등 광학소자 개발을 추진하고 있으며, 물질·재료연구기구(NIMS)는 나노기술을 활용한 정보통신 재료 개발을 진행 중에 있다. 문부과학성은 실리콘 디바이스의 한계를

타파하는 논리연산 디바이스나 기존의 것보다 100배 이상의 기록 밀도를 가지는 정보 메모리, 차세대 전자현미경요소기술의 개발 등을 추진하고 있다.

러시아의 나노기술

러시아는 나노기술 연구에 뛰어난 후발 주자로서 2007년 모든 폭탄의 아버지(FOA B205)라 불리는 열기압진공폭탄 개발에 성공한 이후 그야말로 ‘나노폭탄’ 수준의 90억 달러의 자금을 지원할 나노기술계획을 수립하였다.²⁰⁶⁾ 러시아의 나노기술 프로그램은 최고수준으로 추진되었는데, 그 시작을 이끈 것은 푸틴 대통령이였다. 푸틴 대통령은 연방의회에 보내는 ‘2007년 연례보고서’에서 나노기술을 러시아의 과학과 기술발전 전략의 원동력으로 지목했다.²⁰⁷⁾ 전직 국방장관이자 당시 제1부총리였던 세르게이 이바노프는 러시아 과학자의 절반이 군사산업시설단지에서 일하고 있으며 과학적 생산의 70퍼센트가 군사적인 성질을 가지고 있다는 점을 강조하면서 2007년 나노기술이 “현대 전쟁에 대한 모든 기존 개념을 크게 뒤바꿀 수 있다”고 말했다.²⁰⁸⁾

러시아 역시 RUSNANO라는 정부가 관리하는 나노기술 벤처자본회사를 세워 전 세계의 나노기술 창업회사의 투자와 인수에 힘쓰고 있다. 러시아는 다른 국가들보다 나노기술을 방어용 군사적 응용뿐 아니라 공격용으로 이용하는 것에 중점을 두고 있다. 이는 아마도 군사력이 러시아의 국제적 위상을 지키기 위한 핵심원천이라고 널리 간주되고 있기 때문일 것이다. 러시아의 과학교육부는 2007년 당시 2011년까지 경쟁력이 있는 나노기술 R&D 분야를 확립하기 위하여 자국의 나노산업을 위한 개발프로그램을 발표했다. 2007년 대통령 이니셔티브 <나노산업 발전 전략>을 기반으로 나노산업의 본격적인 개발 계획을

205) Father of All Bomb, 러시아의 ‘열기압진공폭탄’은 비핵무기 중 가장 강력한 위력을 지녔다. 러시아는 미군 폭탄의 별칭인 ‘모든 폭탄의 어머니’에 비유해 자신들의 것을 ‘모든 폭탄의 아버지’라고 부른다. 미국의 것보다 무려 4배의 강력한 폭발력을 가지고 있는데 그간 잠잠하던 미국과 러시아 사이의 폭탄 개발 경쟁이 다시 재개되는 것이 아니냐는 우려도 나오고 있다.

206) F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science (스톡홀름: 스웨덴 방위연구기관, 2011), p. 34.

207) F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science (스톡홀름: 스웨덴 방위연구기관, 2011), p. 35.

208) “Military Industry Makes Up 70% of Russian Science Production,” RIA Novosti, April 19, 2007.

준비하기 시작하였으며 정부 주도하의 나노산업 발전을 전담하는 국영기업 ‘러시아 나노기술공사’를 설립하였고, 2011년 주식회사 ‘로스나노’와 인프라 및 교육프로그램 재단으로 재구성하였다. 이 분야는 러시아 연방이 세계에서 선진국들과 과학기술의 동등함을 이룰 수 있도록 할 것이다.

2011년까지 2~3년 이내에 산업적으로 생산될 수 있는 새로운 나노기술 제품이 개발되고 그러한 제품의 상업화를 위한 효과적인 시스템이 수립될 것이다. 또한 2008년에는 <2015년 러시아 나노산업 발전 프로그램>을 시작하여 나노산업 발전정책을 제 1단계인 2000년에서 2011년까지의 ‘인프라 설립’과 제 2단계인 2012년에서 2015년의 ‘나노산업 설립’으로 나누어서 집중적으로 실행하였다.

<2015년 러시아 나노산업 발전 프로그램>의 궁극적인 목적은 2015년까지 새로운 유형의 나노산업 제품의 생산량을 크게 증가시키기 위한 기틀을 마련하고, 세계의 첨단 기술 시장에 러시아 기업을 설립하는 것이다.²⁰⁹⁾ 이후 2013년에는 <로스나노 2020년 장기사업전략>과 <인프라·교육프로그램 재단 2020년 장기사업전략>을 수립, 2015년 주요 목표인 ‘나노산업 설립’ 달성 후 국가가 산업에 관여하는 비중을 점진적으로 감소할 계획을 가지고 있다. 또한 이 개발계획에는 출판 및 특허 목표도 포함되었다. 나노산업 설립의 주요성과를 보면 2013년의 나노기술 관련 제품 생산량이 4,161억 루블로 2010년의 1,179억 루블의 약 3.5배를 달성하였고 2013년 로스나노의 비중 역시 2010년의 0.8%(10억 루블)에서 18%(751억 루블)로 매우 비약적인 성과를 달성하였다. 2015년에는 나노기술 관련 제품의 매출 목표를 9,000억 루블로 설정하고 추진하고 있다.

인프라 정책 추진 측면도 살펴보면 2013년 11개의 나노기술센터가 239개의 스타트업을 설립하였고 2020년까지 16개의 나노기술센터와 450개의 스타트업 설립을 목표로 하고 있다. 또한 2013년까지 76개의 교육프로그램을 개발하여 2,804명의 전문가가 교육을 마쳤으며, 2020년까지 150개의 교육프로그램의 개발과 10,000명의 나노기술 전문가 교육을 목표로 하고 있다. 러시아는 나노 전자, 공학, 물질(에너지, 우주, 건축용), 바이오 기술과 안보 시스템을 우선적인 R&D 분야로 지정하였다.²¹⁰⁾ 2012~2015년 러시아 나노

209) F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science (스톡홀름: 스웨덴 방위연구기관, 2011), pp. 39-40, 46.

210) F. Westerlund, Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science (스톡홀름: 스웨덴 방위연구기관, 2011), pp. 43-44.

산업 발전 프로그램을 통해서 나노산업 관련 연구개발예산에 256.6억 루블, 혁신적인 나노산업 발전 프로젝트 지원 예산에 805억 루블 등 총 1,061.6억 루블(32.3억 달러)을 투자하였다.

또한 로스나노는 2014년 나노기술 개발과 관련하여 중국기업에 공동으로 투자펀드를 설립하는 제안을 하였다. 2014년 9월에 개최된 러시아-중국 투자협력위원회 정기총회에서 아나톨리 추바이스 로스나노 대표이사가 제안한 내용을 보면 양측 회사가 각각 50% 투자금을 제공하는 것을 원칙으로 하며, 양 국가 지역에서 실행되는 나노프로젝트에 재정지원을 하게 된다. 러시아는 현재 나노기술에 막대한 자금을 투입하고 있는 중국의 효과를 이용하고자 하는 의도도 있는 것으로 분석된다. 이와 같은 러시아의 적극적인 나노기술 추진이 러시아를 나노기술 연구개발에 대한 최상위 10개 정부지원국의 자리에 올려놓았지만, 러시아의 나노기술에 대한 양과 질, 좀 더 일반적으로 표현하면 나노기술 관련 특허와 출판은 저조한 상황이다.²¹¹⁾

국방 분야가 러시아 혁신의 원천이라고 오랫동안 여겨온 러시아와는 매우 대조적으로, 유럽연합의 나노기술과 안보는 좀 더 복잡한 양상을 보인다. 상대적인 국가적 권력의 중요성과 강한 군사력의 필요성을 강조하는 전통적인 현실적 추정은 EU에서 변화하는 안보의 역동력이나 민군겸용 나노기술을 중심으로 진화하는 규제제도를 제대로 포착하지 못하고 있는 듯하다.

211) Evgeny A. Klochikhin, "Innovation System in Transition: Opportunities for Policy Learning between China and Russia," *Science and Public Policy* 40 (2013), pp. 666-667.

유럽연합의 나노기술

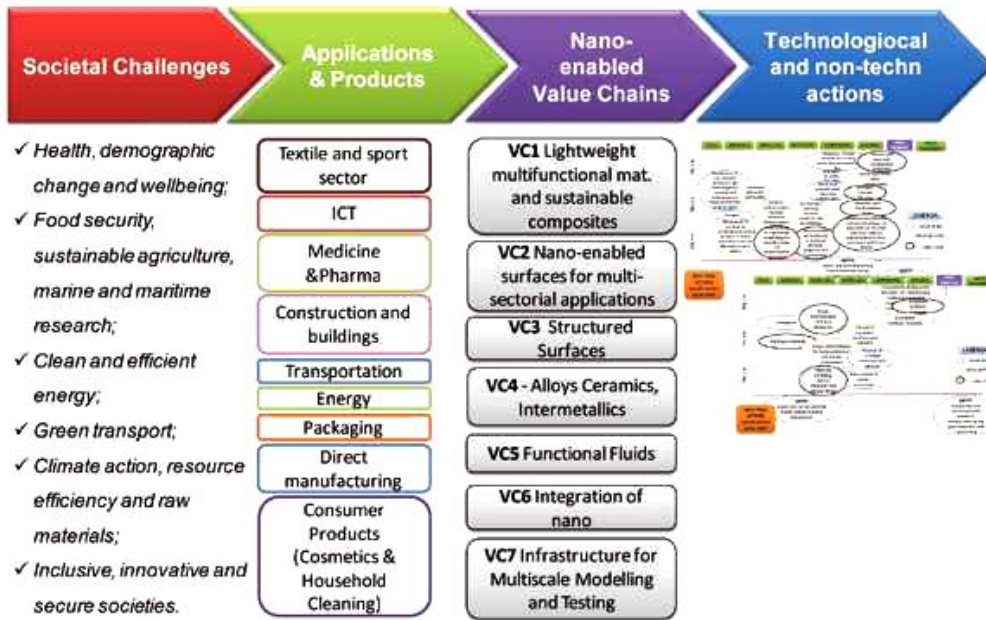
유럽의 안보정책은 EU 공통 안보와 방위정책과 같은 합의와 유럽방위청(EDA²¹²)과 같은 기관의 설립을 통해서, 독특하게도 국가적 틀이 아니라 지역적 기틀을 마련했다. 지난 30여 년간, 규제기관이 정부에서 유럽과 국제적 수준에서 NATO와 EU의 참여를 통해 군사 및 안보문제에 대한 거버넌스로 바뀌었다. 이렇게 점점 국가적인 기관을 제한하는 추세는 EU 국가들에서 국방지출이 감소한 것에서 알 수 있다. 1960년대 이후, EU 국가 전반의 GDP 퍼센티지로 계산한 국방지출이 거의 70%가량 감소했으며 현재는 평균적으로 GDP의 약 2%를 차지한다.²¹³⁾ 영국, 프랑스, 독일을 포함해 유럽에서 가장 막강하고 영향력 있는 국가들 사이에서조차 국방지출을 상당히 감축하고 있으며 점차 지역의 안보에 초점을 두고 있다.

회원국들과 EU 기관이 안보목적으로 공동협력을 통해 나노기술의 연구개발을 추진하는 몇 개의 유럽 차원의 계획안이 제안되었다. 2006년, 유럽 정부들은 경제개발청(EDA)과의 협력하에 2년에 걸친 공동투자프로그램(JIP)을 설립하여 나노기술을 포함하는 신국방 기술에 대한 공동 연구개발을 추진했다. 2008년 제 2차 2개년 공동투자프로그램이 합의 되었다. 합의 내용은 11개의 EU 회원국에서 선정한 자문관들을 포함하고, 1,150만 유로의 공동예산으로 자금을 낸다는 것이다.²¹⁴⁾ 이러한 노력은 다양한 회원국들의 기여와 헌신에 의존하는 다국적인 국방에 대한 접근을 나타내며, 엄격하게 국가적 안보의 문제가 아닌 지역의 문제에 집중된다. 이러한 프로그램의 중요한 특성은 안보뿐 아니라 신나노물질 구조, 새로운 의료 및 치료법 및 대체 에너지원의 개발과 생산을 포함하는 상업적 목적을 위해 나노기술 시장의 확장을 강조해왔다는 것이다. 다수의 이러한 제품들이 잠재적으로 민군겸용으로 응용될 수 있기 때문에, 유럽에서 다양화된 나노기술 시장의 성장은 경제 및 안보의 측면에서 이로운 것으로 간주되고 있다.

212) European Development Agency

213) Frédéric Mérand, *European Defence Policy: Beyond the Nation State*(Oxford University Press, 2008), p. 151.

214) EDA, "European Defence Agency News: EDA Establishes New Joint R&T Programme on," (2008)



출처: Integrated research and industrial roadmap for European nanotechnology, 2012, 7

그림 39 유럽연합이 2025년까지 집중할 나노기술 로드맵

2012년 유럽의 나노전자 분야의 전략적 중요성에 대한 회의에서 경제개발청의 연구기술 분야 부책임자인 Michael Sieber는 “나노전자 분야가 없다면 국방 분야도 존재할 수 없으며, 국방이 없다면 나노전자 분야에 대한 투자도 불가능할 것이다.”라고 말했다.²¹⁵⁾ 이러한 언급은 유럽 수준에서는 안보와 경제적인 문제가 서로 상호의존적이라는 점을 강조한다. 경제개발청에 따르면 위성, 통신과 컴퓨터를 포함하는 다양한 국방 목적으로 사용되는 차세대 나노전자공학이 개발과 생산을 확실히 하려면, 유럽에서 지속가능하고 전 세계적으로 경쟁력 있는 나노기술 시장을 확립하는 것이 매우 중요하다.²¹⁶⁾ 막강한 나노기술 분야를 육성하는 것은 연구개발에 대한 지속적인 투자를 보장하고, 경제성장과 지역의 안보 모두를 위해 필요한 혁신을 추진하도록 도울 것이다. 경제개발청은 또한 수출제한 대상이 될 수 있는 중요자원의 접근과 제한된 물량으로 생산되는 중요물자의 공급에 대한

215) EDA, “European Defence Agency News: Nanoelectronics’ Importance for Defence.” (2012)

216) Ibid.

우려를 불식시키기 위해 전문화된 유럽 공급망을 수립하기 위한 사업에 자금을 댔다.²¹⁷⁾ 나노기술은 유럽연합이 선정한 6개 첨단기술 중 하나로 추진 중이며 2013년까지 나노기술 관련 분야에 31억 8,000만 유로를 투입하였고, 'Horizon 2020(2014~2020)'을 통해 나노 분야에 전체 예산의 5.6%에 달하는 약 77억 유로를 투자할 계획이며 원천기술부터 상용화 까지 하나의 파이프라인으로 추진하고 있다.

번성하는 EU 나노기술 시장이라는 목표를 달성하려면 EU 정책 입안자, 정부 대표자 및 기업을 포함해 다양한 수준에 있는 이해당사자를 위한 전략적 계획과 헌신이 필요하다. 최근 유럽연합은 2025년까지 집중해야 할 나노기술 영역에 대한 로드맵을 작성하였다.²¹⁸⁾ 세부 기술별로 정량지표 중심의 로드맵이 아닌 가치사슬(value chain) 중심의 로드맵으로 경량 다기능 소재, 나노기반 표면, 구조화된 표면, 기능성 합금/세라믹, 기능성 나노집적화, 다차원 모델링/테스트 등 모두 7개의 나노기반 가치사슬이 도출되었다.

독일의 나노기술

나노기술 안보와 경제적 문제 사이의 복잡한 관계는 오랫동안 지속된 국가 규제방식에 영향을 받아 유럽의 차원뿐 아니라 국가적 차원에서도 발생하고 있다. 국가들은 안보와 경제 정책을 정의하는 데 있어서 국가의 역할에 대해 서로 다른 정책적 선호와 태도를 지니고 있다. 유럽연합의 최대 나노기술 시장인 독일과 다음 절에서 기술할 영국에 집중하여 어떻게 서로 다른 국가적 역사가 나노기술 정책에 영향을 미치는지를 살펴볼 것이다. 이러한 차이는 그 국가들이 선호하는 바를 형성하는 독특한 역사적 경험, 정치기관 및 경제구조에 근거한다. 비교적 관점에서 이러한 국가적 차이를 고찰하는 것이 나노기술 거버넌스 문제의 진화하는 특징을 전반적으로 이해하고, 민군겸용기술의 연구개발을 추진하기 위해 국가들이 취한 서로 다른 접근방식을 설명하는 데 도움이 될 것이다. 서로 다른 국가안보에 대한 입장에도 불구하고, 독일과 영국의 사례는 국방에 대한 직접군사

217) Ibid.

218) Integrated Research and Industrial Roadmap for European Nanotechnology, 2012, 7

지출로부터 안보영역에 매우 큰 영향력을 띤 채 상업적 목적의 나노기술 연구개발에 대한 시장주도식 전략으로 커다란 변화가 있음을 부각시키고 있다.

독일 안보정책은 독일의 역사적 경험과 정치 기관에 의해 크게 영향을 받았는데, 그로 인해 군사적 노력과 국방지출에 커다란 제약이 있었다. 2차 세계대전의 종식 이후, 독일의 안보문제에 대한 정책입장은 다자주의와 국제협력에 대한 열망을 반영했다. 국제 안보 정책 면에서 볼 때, 독일은 대부분 더 큰 유럽의 통합과 지역적 의사결정을 옹호해왔다.²¹⁹⁾ 이러한 입장은 영국과 같은 다른 유럽 국가들보다 독일에서 상당히 높았던 EU 공동방위 안보정책에 대한 대중의 지지에서 나타난다.²²⁰⁾ 심지어 ‘국익’에 근거한 국내 정책의 개념이 독일 내에서는 매우 논쟁거리였는데, 그 이유는 그 개념이 독일의 이해는 유럽이나 세계의 이해와 다르거나 상충할 수 있다는 의미였기 때문이다. 역사적 경험을 반영하여, 독일의 대중도 독일이 침략국이라고 인식될 수 있는 공격적인 전략을 활용하는 안보 정책에 대해 경계하고 있다.

선조들의 영향력과 여론의 압력 이외에, 독일의 안보정책은 연방기관과 합의에 기반한 정치제도에 의해 더욱 제약을 받는다. 독일 연방정부 내에는 수많은 견제와 균형이 존재 하는데, 이러한 기관들은 행정부의 권력을 제한하고 외교 및 안보 정책을 정의하는 데 있어 보다 큰 합의를 이끌어내고 있다.²²¹⁾ 그 결과 국가 차원의 입법정책에 지방 및 지역 대표가 더 많이 참여하는 포괄적 의사결정 과정이 진행되고 있다.²²²⁾ 입법과정에 다양한 이해관계자의 참여 이외에 행정부도 다양한 지역구의 요구와 이해에 즉각적인 반응을 보이고 있다. 독일 총리는 연합정치와 더 넓은 기반의 이해를 따라야 하는 필요에 의해 공개적으로 제약을 받는다.

이러한 모든 요인들이 수동적이고, 소극적이며, 다국적 수단을 통한 국제협력을 적극 모색하는 것을 더 지향하는 것으로 특징지을 수 있는 독일의 안보정책을 낳았다. 독일이

219) J. Junk and C. Daase, “Strategic Cultures in Europe: Security and Defence Policies Across the Continent,” H. Biehl, B. Giegerich and A. Jonas 편집. (Springer, 2013).

220) Frédéric Mérand, *European Defence Policy: Beyond the Nation State* (Oxford University Press, 2008).

221) Patrick H. O’Neil, K. Fields, and D. Share, *Cases in Comparative Politics*, 3rd ed(W,W, Norton, 2010); Kate O’Neill, *Waste Trading Among Rich Nations: Building a New Theory of Environmental Regulation* (Cambridge, MA: MIT Press, 2000b).

222) Vivien A. Schmidt, “Procedural democracy in the EU: the Europeanization of national and sectoral policy-making processes,” *Journal of European Public Policy* 13 (5): 670–691 (2006).

경제적 영향력과 EU 내에서 사회와 경제 정책에 관해 적극적인 리더십을 발휘하고 있음에도 불구하고, 외교와 안보 정책에 관한 한 독일은 정책을 규정하기 위해 NATO와 EU 기관에 의존하는 보다 중립적인 역할을 취하고 있다. 이것이 일부 유럽 동맹국가들로 하여금 독일을 EU 안보분야 내에서 “주저하는 패권국”으로 인식시키고 있는데, 이들 동맹국들의 역량은 안보정책을 규정하려는 독일의 야심보다 더 크다.²²³⁾

안보문제에 대한 다국적 협력과 국제 거버넌스에 대한 이러한 선호가 나노기술 규제에 관한 토론에서 우세하게 나타났다. 2004년, 독일의회의 교육, 연구 및 기술결과에 대한 평가위원회(Committee for Education, Research, and Technology Assessment of the Consequences of Technology)는 나노기술의 군사적 사용과 안보 위험 가능성에 대한 내용을 포함한 보고서를 발표했다. 본 보고서는 나노기술로 인한 즉각적인 단기적 안보 위험이 있을 것 같지는 않지만, 오용 가능성을 제한하기 위해, 소총과 화학무기에 관한 대책과 유사한, 책임 있는 개발 생산 및 다국적 계획의 이점을 확실히 하기 위한 국제 협력의 강화가 필요하다는 것을 강조했다.²²⁴⁾ 달리 말해, 독일 정부관리들은 나노 안보의 잠재적인 문제를 다루기 위해 국내 거버넌스 전략보다 국제적인 규제제도가 더 중요하다는 것을 강조했다. 이러한 입장에서 보면 놀랄 일도 아니지만, 미국과 같은 일부 국가들이 안보를 위한 나노기술 개발을 위해 국방예산의 일부를 따로 책정해놓는 것과는 달리, 독일 정부는 군사용 및 심지어 국방의 목적으로도 나노기술 연구개발을 위한 자금을 지원하지 않는다.

그러나 독일은 여전히 유럽에서 가장 큰 나노기술 시장이며, 화학 및 제조 기업을 포함해 나노물질의 개발, 생산 또는 사용과 관련된 기업만도 거의 400개에 달한다.²²⁵⁾ 나노기술의 연구 및 개발은 독일 연방 교육 연구부를 통해 주도적으로 20년 이상 지원이 이루어지고 있다. 지원 초기에는 나노기술 기초 연구 분야에 비중을 두었다면 이후 계속되는 지원을 통해 기술 응용 분야로 확대되었다. 협력 프로젝트를 통해 산업, 특히 중소기업과 학계 간의 밀접한 네트워크가 형성되어 연구개발의 결과를 실제적으로 구현하는데 가장 효율적인 기반이 마련되었다. 2006년 이래로 나노기술 위험성에 대한 연구지원이

223) William E. Paterson, “The Reluctant Hegemon? Germany Moves Centre Stage in the European Union,” *Journal of Common Market Studies* (2011).

224) NATO, “Committee Reports Annual Session 179 STCMT 05 E - The Security Implications of Nanotechnology” (2005)

225) ObservatoryNANO, “European Nanotechnology Landscape Report” (2011)

강화되었으며 인간과 환경에 대한 합성 나노소재의 효과에 대한 연구를 위해 연구기관, 대학기관, 산업기관 간의 협력이 진행되었다. 나노기술 위험성 프로젝트의 핵심 연구 분야는 인간과 환경에 대한 합성 나노소재의 영향 및 나노기술의 책임 있는 사용에 관한 것이다. 2006년 이후 세계 시장의 흐름을 파악하고 전략적으로 장기적 관점에서 상당한 경제적 발전을 이룩할 수 있는 과학, 경제, 정치 분야의 대표들로 구성된 혁신 얼라이언스가 창설되었다. 이 혁신 얼라이언스는 나노기술을 기반으로 유기 발광 다이오드(OLED²²⁶), 유기 태양 전지(OPV²²⁷), 탄소나노튜브(Inno.CNT), 리튬-이온 배터리(LiB2015), 분자 이미징(MoBi-Tech) 기술 분야를 연구하기 시작하였다.

독일 정부는 2011년 나노기술의 지속적이고 안전하며 성공적인 사용을 보장하기 위해 다양한 분야의 전문가들과 협력하여 'Nano Initiative - Action Plan 2015'를 발표하였다. 장기적 관점으로 세워진 'Nano Initiative - Action Plan 2015'의 연구개발 전략은 각 기관별 나노기술 연구개발 전략에 청사진을 제공하였으며 독일 정부는 이를 위해 2011년 나노기술 분야에 약 6억 3,000만 유로를 투자하였다.

또한 이프니츠 연구소 나노기술 네트워크, 프라운호퍼 NANOTECH, 'Nano in Germany' 이니셔티브, 독일 나노기술협회 등 다양한 연구기관은 내부적으로 나노기술 협력 그룹을 구성하여 나노기술 네트워크를 강화할 뿐 아니라 이를 통해 자체적인 나노기술 전략을 세워가고 있다. 또한 정부와 밀접한 연관을 맺고 있는 생태적 환경에서 독일의 나노기술 개발은 개별적이면서 그리고 역동적으로 기관들의 협력하에 진행되고 있다. 유럽연합의 나노기술 지원 정책(제 7차 연구 프레임워크 프로그램, FP7(2007~2013년))을 통해 약 35억 유로가 나노기술 연구에 투자되었으며, 이 중 약 18억 유로가 나노기술 산업 분야에 투자된 것으로 파악되었다.

226) Organic Light Emitting Diodes

227) Organic PhotoVoltaics

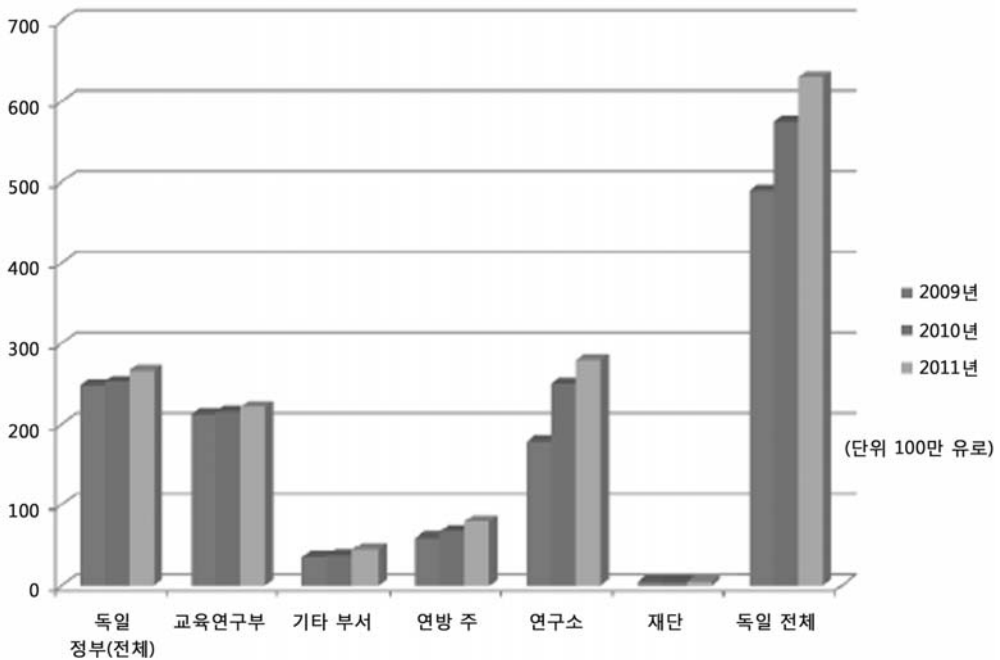


그림 40 독일의 나노기술 지원 현황(2009~2011년)

유럽연합의 나노기술 지원은 전체 지원 프레임워크 프로그램의 18%를 차지하며, 이 중 약 22%가 독일 나노기술에 지원하고 있다. 독일 연방 교육연구부에 따르면, 모든 유럽의 나노기술 기업의 거의 절반이 독일에 기반을 두고 있다.²²⁸⁾ 독일은 또한 2000년에서 2010년 동안 3,730개가 넘는 나노기술 특허를 등록한 나노기술 연구 분야의 선두 국가이다. 이는 유럽의 어느 국가보다도 많으며, 다른 유럽 국가들이 등록한 특허 수를 전부 합친 것만큼이나 많은 수치이다. 이 나노기술 특허 숫자만으로도 독일은 유럽에서 1인당 특허등록건수가 가장 많은 국가이다.

1998년에서 2009년까지 독일의 나노기술 관련 출판건수는 총 6,449건으로 인구 100,000명당 평균 7.86건의 출판건수를 기록하는 등 학문연구 면에서도 선두를 달리고 있다. 이러한 실증적인 증거는 급부상하는 독일의 나노기술분야가 유럽에서 가장 활발하고 혁신적이라는 것을 나타낸다. 이를 좀 더 넓게 보면, 독일은 유럽에서 나노기술

228) ObservatoryNANO, "European Nanotechnology Landscape Report" (2011)

연구개발 분야에서 두 번째로 큰 시장인 영국보다 출판건수가 약 2.5배, 특허 수는 약 4배 더 많았다.²²⁹⁾

독일이 나노기술의 개발을 위해 국방예산자원을 할당하는 것을 꺼리기는 하지만, 독일연방정부는 국가 경제 내에서 나노기술 연구개발을 위한 자금의 최대 공급처 중 하나이다. 사실, 독일은 다른 어느 EU 회원국보다 나노기술에 대한 공공 분야 투자가 높는데, 이는 유럽 집행위원회를 제외하고는 가장 높은 수준이다.²³⁰⁾ 나노기술 연구개발에 대한 공적자금이 연간 5억 유로(미화 6억 7,600만 달러)에 달하며, 해마다 5~10% 사이에서 공적투자가 증가하고 있다고 추산된다. 반면 영국과 같은 다른 국가들에서는 민간분야에서 나노 연구개발에 더 큰 비례투자가 있는데, 이러한 투자가 벤처자금투자를 통해 이루어지고 있는 점이 주목할 만하다. 독일은 나노기술을 경제 분야로 강화하는 데 주도적 역할을 하고 있다. 그러나 독일 산업은 나노기술 투자 면에서 세계 3위에 해당한다. 독일은 세계적인 안보기술 강국으로서 하이테크 전략의 일환으로 독일연방교육부를 중심으로 7개의 성(省)이 연계하여 'Nano Initiative Action Plan'을 추진하고 있다. 독일연방교육부가 발표한 '*High-Tech Strategy 2020 for Germany*'는 나노기술을 미래경제성장의 주요 분야 중 하나로 강조한다.²³¹⁾ 특히 연방정부가 군사와 안보 관점에서 나노기술에 투자하는 것을 주저해온 반면, 국가적으로는 경제성장을 촉진하기 위해서 심지어 안보분야 내에서도 나노 관련 산업의 발전에 적극적으로 관여해왔다. 그러므로 안보 목적을 위한 나노기술에 대한 정부의 입장은 상대적으로 하드파워와 군사력보다는 점점 더 통합되고 있는 유럽과 국제사회에서 상업적인 장려책에 더욱 집중해온 것으로 분석된다.

229) ObservatoryNANO, "European Nanotechnology Landscape Report" (2011)

230) ObservatoryNANO, 2011

231) BMBF, "Nano-Initiative: Action Plan 2010" (2007)

영국의 나노기술

대부분의 유럽 국가들과 마찬가지로 영국에서도 안보와 국방의 문제는 국가의 경계를 넘어 확장되고 국제적 협력과 합의를 요구하는 전 세계적인 차원의 문제가 되고 있다. 이런 맥락에서 국가정부들은 안보의 문제에 대해 더 이상 단독 권한을 행사하지 않고 유럽과 국제적인 차원에서 국제기관을 통해 다른 국가들과 협력하고 있다. 유럽 전역의 경우처럼, 영국도 지난 30년간 국방지출을 크게 삭감해왔다.²³²⁾ 그러나 군사지출에 분명한 감소가 있음에도 불구하고, 영국은 유럽에서 가장 큰 국방비 지출국이며, 그리스와 함께 적어도 GDP의 2%를 국방비로 지출하도록 하는 북대서양조약기구의 조건을 충족하는 유럽의 두 나라 중 하나이다.²³³⁾ 국제안보 의사결정에서 전반적으로 국가의 역할이 감소하고 유럽과 국제수준에서 역량이 커졌지만, 영국의 국방정책 입장은 독일과는 상당히 다르다. 특히, 독일 안보는 본질적으로 유럽의 안보와 연결되어 있고 독일의 국내 목표는 우선적으로 자국적 수단을 통해 추진되는 반면, 영국 정부는 자국의 이익이 걸린 사안일 때마다 독자적으로 행동할 수 있는 역량을 갖추기 위해 노력해왔다. 국제사회의 파트너들을 존중하기는 하지만 영국은 미국 및 프랑스와 각각 쌍무협정을 추진해왔고 최근에는 일방적으로 병력을 파병하기도 했는데, 이 같은 행동은 독일에서는 있을 수 없는 일이다.²³⁴⁾

큰 경제규모와 유럽에서의 영향력에 비해 평범해 보이는 독일의 외교 및 안보 정책과는 대조적으로, 영국은 국제사회의 안보정책에 강한 책임감을 가지고 있다. 여러 면에서, 외교, 경제 및 군사적으로 기꺼이 직접 관여하고자 하는 태도는 세계 강대국으로서의 영국의 역사와 오랜시간 유엔안전보장이사회의 상임이사국이었던 위치에 의해 형성된 것이다. 국제 안보 문제에 계속 관여해온 영국의 이러한 입장은 “2010 영국 국가 안보 전략”에서 확인되었다. “영국의 국익은 우리의 영향력 축소라는 어떤 개념도 거부하도록 요구한다.”라는 문장은 영국이 세계안보 문제에서 적극적인 역할을 유지하고자 하는

232) Frédéric Mérand, *European Defence Policy: Beyond the Nation State* (Oxford University Press, 2008)

233) CSIS, “European Defense Trends 2012: Budgets, Regulatory Frameworks, and the Industrial Base,” D. Berteau, G. Ben-Ari, R. Crotty, J. Hofbauer, P. Hermann and S. Raghavan 편집, (2012)

234) P. Cornish, *Strategic Cultures in Europe: Security and Defence Policies Across the Continent*, H. Biehl, B. Giegerich and A. Jonas 편집 (Springer, 2013)

야망이 있음을 분명히 나타낸다.²³⁵⁾ 여론도 영국의 독자적인 역할을 지지하며 전반적으로 유럽의 공동방위안보정책에 대해 다소 회의적이다. 역사적 경험과 국제 안보문제에 국가가 관여하는 것에 대한 대중인식에 차이가 있다는 것 이외에도, 독일의 연방제도와 비교하여 영국 정부는 권력분리에 제약을 덜 받는다. 정책입안은 총리가 큰 영향을 행사하는 가운데 국가적인 차원에서 주로 행해진다.²³⁶⁾ 결과적으로 여당은 자신의 외교 및 안보 정책안을 추진할 큰 능력이 있다.

안보정책에서 국가의 좀 더 적극적인 역할을 반영하여, 영국은 독일처럼 국방의 목적을 위해 나노기술 연구개발에 자금을 지원하는 것을 금지하지 않는다. 절대적인 측면에서 보면, 영국은 유럽에서 국방 연구개발에 가장 큰 지출을 하고 있으며, 2001년에는 거의 43억 유로(미화 58억 달러)를 지출했다. 그러나, 전반적인 국방지출 삭감에 따라 국방 관련 연구개발에 책정된 자금은 2011년 19억 유로(미화 25억 7천만 달러)로 절반 이상 삭감되었다.²³⁷⁾ 영국 국방부(MOD)는 안보를 위한 나노기술 개발에 대략 연간 150만 파운드(미화 240만 달러)를 할당했다.²³⁸⁾ 그러나 주목할 점은 나노 관련 지출이 연간 국가 과학연구 국방예산의 0.35%에 불과하고, 영국 국방부가 자국의 나노기술 발전이 군사적 필요보다 상업적인 장려책에 의해 주도된다고 여긴다는 것이다. 달리 말해서, 영국과 독일이 안보문제에 있어 국가의 역할에 대해 다른 관점을 가지고 있으며 서로 다른 국방 정책의 입장을 가지고 있지만, 이 두 나라의 나노기술 연구개발은 안보상의 필요보다는 경제적인 이익을 위해 주로 추진되고 있다.

영국은 2010년에 범부처 차원의 국가전략인 ‘영국 나노기술전략(UK Nanotechnologies Strategy)’을 발표하여 나노기술의 경제적 및 사회적 혜택을 극대화하고, 특히 안전하고 책임감 있는 연구개발을 추진하고 있다. 영국은 유럽에서 독일 다음으로 최대 나노기술 시장으로서, 나노물질과 화학물질의 개발 및 생산에 종사하는 기업은 약 250여 개에

235) P. Cornish, *Strategic Cultures in Europe: Security and Defence Policies Across the Continent*, H. Biehl, B. Giegerich and A. Jonas 편집 (Springer, 2013)

236) Kate O'Neill, *Waste Trading Among Rich Nations: Building a New Theory of Environmental Regulation*(Cambridge, Mass.: MIT Press 2000a); Vivien A. Schmidt, "Procedural democracy in the EU: the Europeanization of national and sectoral policy-making processes," *Journal of European Public Policy* 13 (5): 670-691 (2006)

237) CSIS, "European Defense Trends 2012: Budgets, Regulatory Frameworks, and the Industrial Base," D. Berteau, G. Ben-Ari, R. Crotty, J. Hofbauer, P. Hermann and S. Raghavan 편집, (2012)

238) NATO, "The Security Implications of Nanotechnology 179 STCMT 05 E - The Security Implications of Nanotechnology" (2005)

이른다.²³⁹⁾ 영국은 과학 및 기술 연구의 선두국가이며 유럽 내 관련 최대 발표(출판) 국가 중 하나로서 1998년에서 2009년 사이에 발표한 논문의 수가 2,688건에 달한다. 또한 나노 관련 특허를 가장 많이 가진 나라로 2000년에서 2010년 사이에 등록된 특허 수가 942개에 이른다.²⁴⁰⁾ 이로 인해 영국은 유럽에서 가장 발전된 나노기술 연구개발 시장 중 하나가 되었다. 독일의 경우처럼 나노기술 연구개발은 국가정부로부터 고등교육예산 지원회(Higher Education Funding Council for England)와 생명기술과학연구협의회(Biotechnology and Biological Sciences Research Council)와 같은 공공기관을 통해 상당한 후원과 자금지원을 받고 있다. 공적 자금 이외에 민간투자도 영국에서 나노기술연구의 발전과 나노기술 관련 상품과 서비스를 제공하는 소기업에 자금을 제공하는 데에 중요한 역할을 하고 있다.

나노기술 연구개발에 대한 민간투자의 양을 가늠하기는 어렵지만, 영국 시장이 연구와 생산을 위한 공적지원에 주로 의존하는 독일보다 더 다양화된 자금공급처를 가지고 있다. 기업의 지원과 벤처 자본회사가 나노기술 연구개발에 대한 민간투자의 주된 공급처이다. 기업을 위한 투자수준은 두 나라가 비슷할지 모르지만, 영국이 연구개발에 대한 투자를 할 수 있는 보다 발전된 벤처 자본시장을 가지고 있다. 2002년, 영국에서 벤처 자본 투자 액이 25억 4천만 유로(미화 34억 6천만 달러)로 추산되었으며, 이와 비교해 독일의 투자 액은 13억 4천만 유로(미화 18억 3천만 달러)였다.²⁴¹⁾ 이러한 종류의 투자는 특히 초기 창업단계와 확장단계에서 중요한데, 연구활동, 제품개발 및 마케팅을 지원하고 첨단과학 및 지식집약 분야의 신규기업에 자본과 경영기술을 자주 제공할 수 있기 때문이다. 나노 기술 연구개발을 위한 자금조달 기회의 차이는 중요하다. 왜냐하면 독일과 영국 모두가 이 혁신기술의 잠재적인 경제적 이득 때문에 동기부여가 되었지만 이들 각국의 경제 구조가 나노기술 발전에 다른 기회를 제공하기 때문이다.

239) ObservatoryNANO, "European Nanotechnology Landscape Report" (2011)

240) ObservatoryNANO, "European Nanotechnology Landscape Report" (2011)

241) 유럽연합 집행위원회, "Towards a European Strategy for Nanotechnology; Communication from the Commission," Brussels, Belgium: Commission of the European Communities (2004)

브라질의 나노기술

2004년과 2005년 사이에 국가적 나노기술계획을 수립했다. 브라질은 나노기술을 11개의 전략적 정부투자 대상 중 하나로 선언했다. 과학기술문화부는 2004년에서 2008년 기간 동안 나노기술에 연간 평균 5백만 달러를 투자했다.²⁴²⁾ Kay와 Shapira의 말에 따르면, “브라질은 세계 수준에서 볼 때, 나노기술 생산량에서 3류 국가일지 모르지만, [남미]지역에서 나노기술 출판물의 측면에서 볼 때 분명히 선두국가이다. 브라질은 남미(유네스코 2005)의 모든 과학자의 3분의 1을 가진 나라이고, 남미 대륙의 나노기술 연구 산출량의 50% 이상을 차지한다.”²⁴³⁾ 브라질 정부는 나노기술 연구와 관련된 특허 수를 늘리기 위해 기술이전에 관심을 집중하고 있다.²⁴⁴⁾ 전문가들의 말에 따르면, 브라질에는 특허에 관한 ‘열풍’이 불고 있으며, 상업적 응용이 없기 때문에 정부가 대학 및 기업들에게 순전히 위신을 세우기 위해 나노기술 특허를 확보하도록 독촉하고 있다.²⁴⁵⁾ 나노기술은 “이제 브라질에서는 첨단과학”이라고 Paulo Martins은 말한다. 2012년 현재, 브라질 내에 17개 나노기술 네트워크, 8개의 국립 실험실이 있으며, 2,500명 이상의 연구진과 3,000명 이상의 대학원 학생들이 나노기술에 집중하고 있다. 브라질 정부는 나노기술에 대한 투자를 브라질의 증가하는 S/T 기반과 국제적 경쟁력을 위해 반드시 있어야 할 것으로 간주하고 있다고 한다.²⁴⁶⁾

242) E. O'Rourke and M. Morrison, "Challenges for Governments in Evaluating Return on Investment from Nanotechnology and Its Broader Economic Impact," *OECD Background Paper* (2012)

243) Luciano Kay and Philip Shapira, "The Case of Brazil," *Nanotechnology and the Challenges of Equity, Equality and Development*, Susan E. Cozzens 및 Jameson Wetmore 편집 (Springer, 2011)

244) E. O'Rourke and M. Morrison, "Challenges for Governments in Evaluating Return on Investment from Nanotechnology and Its Broader Economic Impact," *OECD Background Paper* (2012)

245) Anne L. Clunan, Luciano Kay 및 Noela Invernizzi와의 개인적 의사소통, 매사추세츠 주, 보스턴, 2013년 10월 28일.

246) Paulo Roberto Martins, "Science for Production x Science for Impacts: Brazilian Development of Nanotechnology in Section XXI," Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies의 제5회 연차총회의 연례회의에서 연설용으로 준비된 프레젠테이션, 매사추세츠 주, 보스턴, 2013년 10월 27-29일.

인도의 나노기술

2001년 나노과학기술계획을 수립했으나 지원과 목표가 낮았다. 2005년 인도방위산업 연구개발원(DRDO) 관리는 인도가 “향후 5년에서 10년 내에 나노기술분야의 리더”가 되는 것을 목표로 삼았다고 언급했다.²⁴⁷⁾ 2007년, 인도는 과학기술부 산하에 나노과학기술의 새로운 미션(나노미션)에 착수했는데, 이를 위해 5년간 대략 1억 4천 5백만 달러의 예산을 책정했다. 그 나노미션은 기본 연구개발에 동일하게 자금을 제공하며, 수질정화와 약물 전달에 집중하고 있다.²⁴⁸⁾ A.P.J. Abdul Kalam 인도 대통령은 로켓 과학자출신이며 나노기술에 대한 인도의 투자에 대한 주요 지지자였고 현재도 마찬가지다. 2009년 그는 “세계에서 중요한 기술국가가 되기 위해 알맞고 시기적절한 조치를 취한다면 나노기술이 우리에게 기회를 줄 것으로 생각한다”고 언급했다.²⁴⁹⁾ 인도는 발전에 주로 강조를 두고 있긴 하지만, 나노기술에 대한 군사적 응용을 강조하는 극소수의 국가 중 하나이다. 인도 국방부의 과학자문관은 2012년 이러한 일부 응용을 강조했다. 즉, “나노기술이 미래의 전투병사들을 더욱 보호하고, 치사율을 높이고, 지구력을 키워주며 자기보호 역량을 높여줄 것이다. 상당한 이점을 얻을 수 있을 것으로 예상되는데, 여기에는 위협감지, 신형 전자 디스플레이와 인터페이스 시스템을 포함할 것이며, 뿐만 아니라 소형화 무인 전투 차량과 로봇의 개발에 중심역할을 하게 될 것이다. 나노기술 역시 소형 휴대용 센서 시스템이 화학, 생물학, 핵, 방사능 또는 폭발성 위협의 색출을 가능하게 할 것이다.”²⁵⁰⁾

247) The Hindu, “India becoming a Pioneer in Nano Technology” The Hindu, 2005.

248) E. O'Rourke and M. Morrison, “Challenges for Governments in Evaluating Return on Investment from Nanotechnology and Its Broader Economic Impact,” *OECD Background Paper, edited by* (2012)

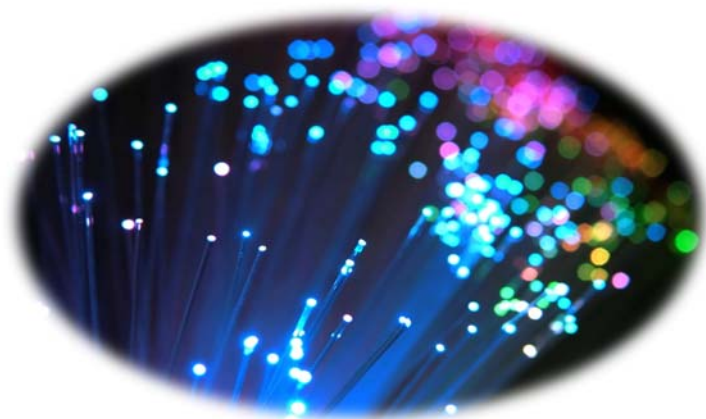
249) A.P.J. Abdul Kalam, “Dimensions of Nano Science and Technology,” 나노기술 워크숍에서의 특별연설, University of Hyderabad, 2009년 11월 14일.

250) DRDO, “Nanotechnology Applications for Defence Applications,” DRDO Newsletter 32:11 (2012년 11월)



제5장

주요 국가별 나노기술 R & D 추진 현황



제 6 장

글로벌 세계에서 기술혁신과 리더십



- 국가적 혁신 역량이 중요

제6장
글로벌 세계에서의 기술혁신과 리더십



Ⅰ 제6장 글로벌 세계에서 기술혁신과 리더십

과학과 기술은 세계권력 서열을 결정하고 경제 성장과 군사적 우위를 가능하게 하는 열쇠이자, 국부, 권력 및 국제사회에서 격상된 국가적 지위의 물적 기반으로 널리 인식된다.²⁵¹⁾ 기술 혁명은 역사를 통해 경제, 군사 및 정치적 힘의 균형을 바꾸어 놓았으며, 이에 따라 정책입안가들도 과학기술혁신에서 국가 우위를 유지하고 혁신기술 혁명에서 주도권을 쥐는 데 매우 관심을 기울이고 있다.²⁵²⁾ 그들도 혁명적인 신기술이 뜻하지 않은 놀라운 결과를 가져올 가능성에 대해 우려하고 있다. 본 장에서는 여러 국가들이 나노기술에 대한 투자를 이용해 자국의 지정학적 지위를 놀랍게 바꿀 수 있는 개연성과 미국의 기술적 그리고 군사적 리더십에 미치는 영향에 대해서 기술하였다.

국가적 혁신 역량이 중요

많은 학자들은 세계화에도 불구하고 국가적 특징이 기술혁신의 성격을 규정지으며, 기술적 우위를 수립하고 유지하는 데도 매우 중요하다고 주장한다. 경영학, 조직 사회학, 경제학 및 정치학 분야에서 수많은 그러한 접근이 경제 성장과 군사적 역량을 유지하는 데 있어 기술이 중추적인 역할을 하도록 한다.²⁵³⁾

251) Michael Barnett and Martha Finnemore, *Rules for the World: International Organizations in Global Politics* (Ithaca, NY: Cornell University Press, 2004); Robert Gilpin, *War and change in world politics*(Cambridge, MA: Cambridge University Press 1981); Immanuel M. Wallerstein, *The modern world-system* (New York: Academic Press, 1974); John W. Meyer and Brian Rowan, "Institutionalized Organizations: Formal Structures as Myth and Ceremony," *American Journal of Sociology* 83 (2): 340-363 (1977); John W. Meyer et al., "World Society and the Nation-State," *American Journal of Sociology* 103 (1): 144-181 (1997); Martha Finnemore, *National Interests in International Society* (Ithaca, NY: Cornell University Press, 1996). 서열의 자체강화 속성에 관해서는 다음 참조: Joe C. Magee and A. Galinsky, "Social Hierarchy: The Self-Reinforcing Nature of Power and Status," *The Academy of Management Annals* 2 (1): 351-398 (2008)

252) 군사의 혁신(RMA)에 관한 문헌은 방대함. 예를 들어, 다음 참조: (J. Arquilla and S. M. Karmel, "Welcome to the Revolution ... In Chinese Military Affairs," *Defense & Security Analysis* 13:255-269 (1997); A.H. Bernstein and M. Libicki, "High-Tech: The Future Face of War? A Debate," *Commentary* 105:28-31 (1998); Thomas G. Mahnken, *Technology and the American way of war*, Inc ebrary 편집. (New York; Chichester, UK: Columbia University Press, 2010)

253) 185번 각주내용 자료 이외에 다음 참조: Lynn Eden, *Whole World on Fire: Organizations, Knowledge, and Nuclear*

경제학에서, 1980년대에 개발된 새로운 방식들이 시장중심의 자유방임주의 견해를 강조하는 핵심 신고전주의 미시경제학 교리에 도전장을 내밀었다.²⁵⁴⁾ 이러한 이론들은 자본과 외국인 직접투자가 아닌 기술이 경제성장을 결정짓는 요인이라고 주장한다.²⁵⁵⁾ 신고전주의 경제이론과 달리, 이 견해에 따르면 기술은 자유롭게 이용할 수 있는 공익이 아니다. 기술과 지식은 국가의 비교 우위를 형성하는 생산의 독립적 요소들이다.²⁵⁶⁾ 사실, 기술은 시장의 실패 때문에 실제보다 낮게 공급되는 경향이 있다. 개인 기업의 연구개발에 대한 투자가 넘치면 경제에서 다른 기업에 공익이 된다. 그러면 투자의 사회 수익률은 투자하는 기업의 사적 수익률의 두 배 이상이다. 기업들은 연구개발에 실제 필요보다 적게 투자하는 경향이 있는데, 그 이유는 투자에 대한 완전한 이익을 얻기가 불가능하기 때문이다.²⁵⁷⁾

이러한 접근방식은 여러 가지 이유에서 기술혁신에 대한 정부지원이 경제성장과 국가 안보를 위해 필요하며, 정부 정책이 국가의 국제적인 기술지위를 근본적으로 형성한다는 점을 강조한다. 신중상주의와 현실주의 이론을 가장 단순한 형태로 고찰하면 이들이 주장하는 것은 국가가 스스로 첨단 군사기술에 투자하고 제조하는 것을 모색하고 그러한 기술을 생산할 수 있는 과학자들로 이루어진 노동력을 구축해야 한다는 것이다.

자생적인 기술발전은 무역장벽과 정부지원을 제공하는 국가산업정책 및 기술 연구 개발을 위한 다른 인센티브를 통해 지원되어야 한다. 이러한 이상적인 경제자립정책에 실패한 국가가 선진국을 따라잡고 앞서 나가려면 선진국으로부터 과학자들과 기술을 구걸하거나 빌리거나 훔쳐야 한다. 이러한 견해에서, 기술은 비밀유지에서 수출 금지나 제한과 지적재산권에 이르기까지 다양한 형태의 통제를 통해 적이나 가상적국으로부터

Weapons Devastation (Ithaca, NY: Cornell University Press, 2004); Donald Mackenzie, *Inventing Accuracy: A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990)

254) 이러한 신고전주의 미시경제의 추정에는 완전히 경쟁적인 시장, 자유롭게 공개적으로 이용할 수 있는 기술, 감소하는 수익의 법칙 및 경제성장을 위한 자본 축적의 중심성을 포함함. 유용한 리뷰에 관해서는 다음 참조: Robert Gilpin, *Global Political Economy* (Princeton: Princeton University Press, 2001) pp. 103-128.

255) Giovanni Dosi, "Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation," *Journal of Economic Literature* 26 (3): 1120-1171 (1988)

256) Paul M. Romer, "Increasing returns and long-run growth," *Journal of Political Economy* 94:1002 (1986); Paul Krugman, "Pricing to Market when the Exchange Rate Changes," NBER Working Papers: 전미경제연구소 (1986); Paul Krugman, "Increasing Returns and Economic Geography," *Journal of Political Economy* 99 (3): 483 (1991)

257) Paul M. Romer, "The origins of endogenous growth, (models for studying growth)," *Journal of Economic Perspectives* 8 (1): 3 (1990)

보호되고 지켜져야 하는 것이다. 기술혁신과 확산은 생존, 경제, 군사 및 정책우위와 위신을 놓고 각축을 벌이는 국가들 사이에 경쟁을 양산한다.²⁵⁸⁾

기술혁신에 대한 다른 접근방식들은 기술변화가 그 기술변화를 낳는 사회경제 및 정치제도에 내생적이라고 이해한다. 여러 학문에서 서로 상이한 명칭 아래 통용되지만 이러한 접근방식은 모두 과학기술 혁신의 사회적 배태성, 즉 기술변화와 비판적으로 그러한 변화의 사회 및 상업적 활용을 육성하는 사회 및 정치 구조와 규범에 주의를 기울인다.²⁵⁹⁾

그러므로 기술변화와 지배는 단순히 기술의 발명이나 소유에 의해 야기되는 것이 아니라 기술을 육성하고 그 기술의 사용과 확산을 가능하게 하는 인간의 선택과 변화를 통해 이루어진다.²⁶⁰⁾ 예를 들면, Lynn White가 저술한 *중세의 기술과 사회 변화*(White 1964)는 화약과 대포제조 기술이 중국, 유럽, 비잔틴 및 이슬람 지역에도 널리 알려져 있었지만 오직 유럽에서만 지도자들이 이러한 기술을 전쟁에 적용하여 유럽이 세계를 제패할 수 있었다는 것을 강조한다.²⁶¹⁾

국가혁신시스템과 각종 자본주의에 관한 문서들은 시장의 힘과 관계자의 세계화에도 불구하고 다양한 국가 형태의 경제, 정치 및 사회 조직을 강조한다.²⁶²⁾ 일부는 지역적인

258) Robert Gilpin, *War and change in world politics* (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1981)

259) A.D. Chandler, *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business* (Cambridge, MA: Belknap Press, 1977); James Hughes, G. Sasse, and C. Gordan, *Europeanization and Regionalization in the EU's Enlargement to Central and Eastern Europe: The Myth of Conditionality* (London: Palgrave Macmillan, 2004); Donald Mackenzie, *Inventing Accuracy: A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990); J. R. Hollingsworth and R. Boyer, *Contemporary Capitalism: The Embeddedness of Institutions* (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1997); S. Bartholomew, "National Systems of Biotechnology Innovation: Complex Interdependence in the Global System," *Journal of International Business Studies* 28 (2): 241-266 (1997)

260) Richard R. Nelson, *An evolutionary theory of economic change* Sidney G. Winter 편집, *Economic change*(Cambridge, Mass.: Belknap Press of Harvard University Press, 1982); G. Dosi, K. Pavitt, and L. Soete, *The Economics of Technical Change and International Trade* (London, UK: Harvester Wheatsheaf, 1990); Keith Pavitt, "The Social Shaping of the National Science Base," *Research Policy* 27 (8): 793- 805 (1998)

261) White의 이러한 해석에 관해서는 다음 참조: (Keith Krause, *Arms and the State* (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1995)

262) NIS에 관해서는 다음 참조: C. Freeman, "The National System of Innovation in Historical Perspective," *Technology, Globalization, and Economic Performance*, D. Archibugi and J. Michie 편집 (Cambridge, MA: Cambridge University Press 1997); 각종 자본주의에 관해서는 다음 참조: (Chalmers Johnson et al., *Politics and productivity: the real story of why Japan works* (Cambridge, Mass.: Ballinger, 1989); Alice Amsden, J. Kochanowicz, and L. Taylor, *The Market Meets Its Match: Restructuring the Economies of Eastern Europe*(Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994); John Zysman and Laura D'Andrea Tyson, *American industry in international competition: government policies and corporate strategies*, *Cornell studies in political economy* (Ithaca: Cornell University Press, 1983); Roselyn Hsueh, *China's regulatory state: a new strategy for globalization*, *Cornell studies in political economy* (Ithaca: Cornell University Press,

첨단기술 경제를 창출하는 실리콘밸리와 보스턴의 128번 도로 주변지역과 같은 지방(subnational) 기술 단지의 개발을 주목했다.²⁶³⁾ 기존의 사회, 정치, 교육, 재정 및 경제 기관과 네트워크는 지도자들로 하여금 이익을 확보하고 다른 추종자들보다 지속적인 기술우위를 유지하여 국제시장에서 계속 핵심 주변구조를 형성할 수 있게 한다.²⁶⁴⁾ 이러한 견해에서 볼 때, 기술은 핵심, 주변 및 반주변적 지위를 규정하고 경로 의존적이며 자체적으로 강화하는 국제서열을 조장한다.²⁶⁵⁾

결과적으로 정부는 과학과 연구개발이 이루어지는 것을 보장하기 위해 과학과 연구개발에 대한 공공투자를 제공하는 데 근본적인 역할을 한다. 더욱이, 정부는 그러한 연구개발의 공적인 격려를 통해 경쟁력 있는 국가의 이득을 창출할 수 있다.²⁶⁶⁾ 이러한 견해에서, (공교육, 기본 연구개발, 과학, 기술, 공학 및 수학(STEM 교육)을 통해) 지식 축적에 대한 무형투자가 경제성장의 주요요인이다.²⁶⁷⁾

기술발전 육성에 있어 국가의 역할에 대한 분석 중에, 과학기술 변화가 기술적으로 낙후된 국가들이 선두국가들을 앞지를 수 있게 할지의 문제는 논쟁거리다.²⁶⁸⁾ 단순한 기술적 차용이나 이전만으로는 기술적으로 낙후된 국가들이 선두국가들을 앞지르는 것은 고사하고 뒤따라 잡는 것도 역부족일 수밖에 없다.²⁶⁹⁾ 그러나, 심지어 회의주의자도 기술적으로 낙후된 국가들이 진정으로 혁명적인 기술을 포착할 수 있다면 우세한 국가들보다 더 멀리 도약할 수 있고, 국제서열순서를 뒤바꿔놓을 수 있다고 제시한다.²⁷⁰⁾ 이로 인해, 나노기술과 같은 새로운 혁명적 가능성을 가진 기술이 대두될 때, 국가들의 위험

2011)

263) Annalee Saxenian, *Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994)

264) M. Porter, C. Freeman, S. Nelson, K. Winter, K. Pavitt, G. Dosi, and P. Krugman, *The Geography of Trade* (Cambridge, MA: MIT Press, 1991); 급진적 대 점진적인 혁신도입에 있어서 기성 대 창업회사의 장점과 단점에 대해 논의하는 유용한 리뷰에 관해서는 다음 참조: V. Mangematin, K. Errabi, and C. Gauthier, "Large Players in the Nanogame: Dedicated Nanotech Subsidiaries or Distributed Nanotech Capabilities?" *Journal of Technology Transfer* 36:640-664 (2011)

265) Paul Krugman, "Increasing Returns and Economic Geography," *Journal of Political Economy* 99 (3): 483 (1991)

266) Michael Porter, *The Competitive Advantage of Nations* (New York, NY: Free Press, 1990)

267) 세계은행, *World Development Report 1991*, 33-5, (Freeman, "The National System of Innovation in Historical Perspective," *Technology, Globalization, and Economic Performance*, D. Archibugi and J. Michie 편집 (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1997);

268) (J. P. Singh, *Leapfrogging Development: The Political Economy of Telecommunications Restructuring* (Albany, NY: SUNY Press 1999)

269) Elise S. Brezis, Paul R. Krugman, and Daniel Tsiddon, "Leapfrogging in International Competition: A Theory of Cycles in National Technological Leadership," *The American Economic Review* 83 (5): 1211-1219 (1993)

270) Ibid.



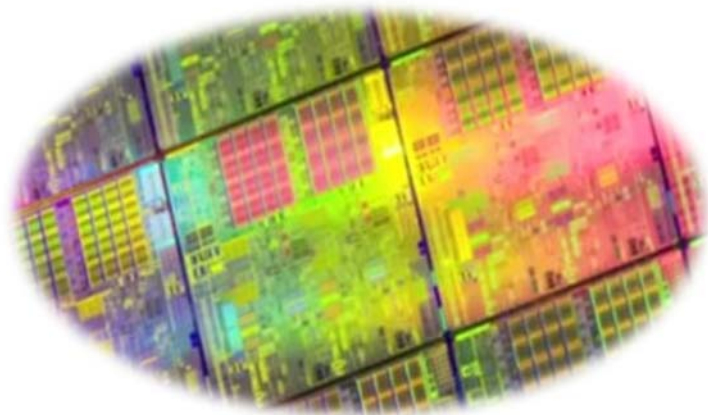
성이 높아진다.

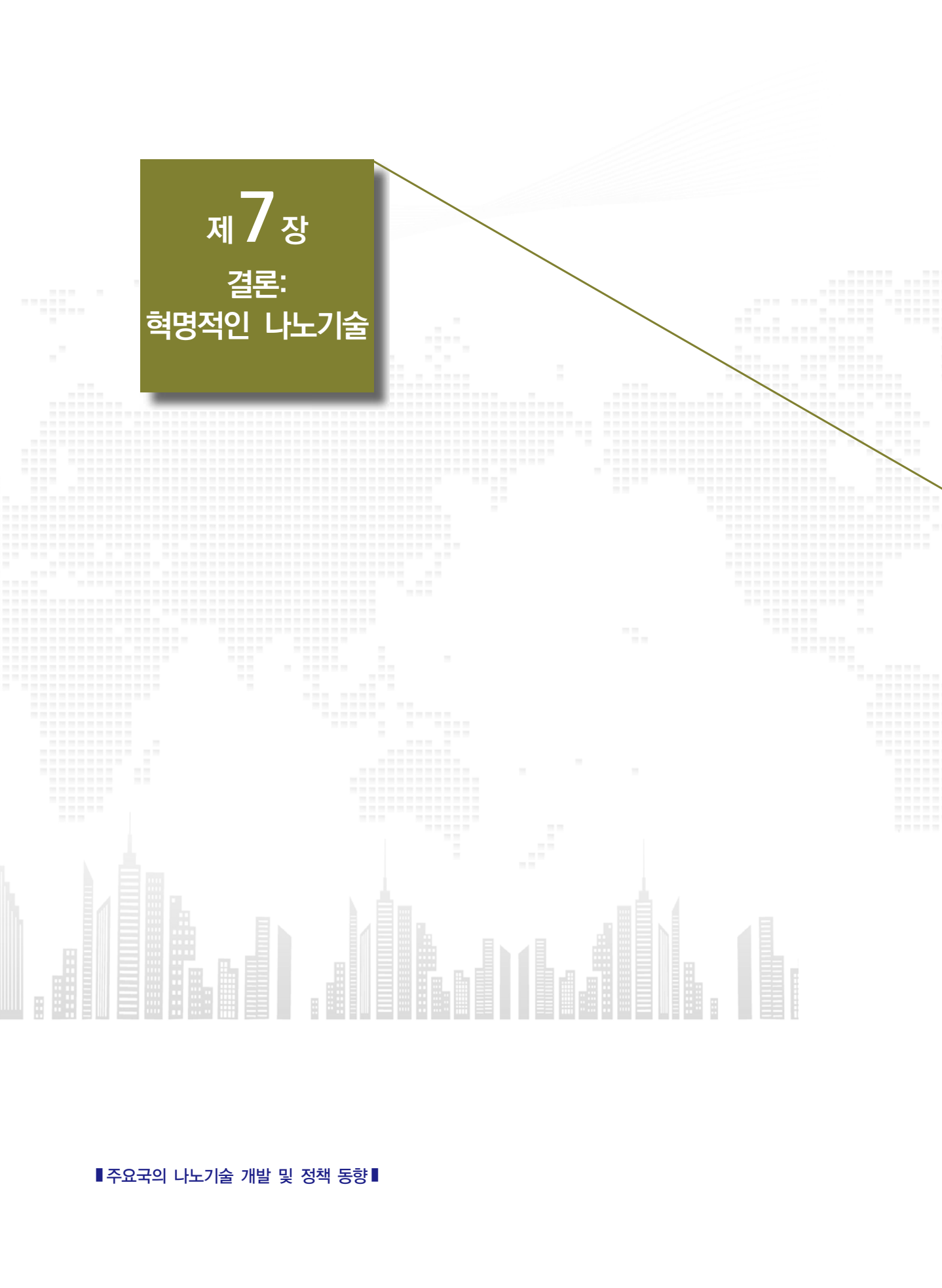
본 보고서에서 제안하는 바와 같이, 나노기술이 미국의 기술적 패권을 위협할 수 있는 국가들이 직면하는 혁신에 대해 보다 폭넓은 국가적 그리고 세계적 차원의 맥락을 고려해야만 한다. 만약 미국과 다른 국가들이 행하는 나노기술에 대한 투자를 고려해보면, 이러한 국가적 그리고 세계적인 차원은 기술혁신으로부터 최상의 혜택을 포착 및 통제하는 것에서, 그리고 다른 국가들의 이러한 혜택에 대한 접근을 통제하는 것에서 결정적인 역할을 할 것이다.



제6장

글로벌 세계에서의 기술혁신과 리더십





제 7 장
결론:
혁명적인 나노기술

• 주요 결론과 권고사항

제7장
결론: 혁명적인 나노기술



Ⅰ 제7장 결론: 혁명적인 나노기술

나노기술은 혁명적인가? 본 보고서에서 밝힌 바와 같이 국가들은 나노기술이 국제제도에서 자국의 위치를 근본적으로 바꿔놓을 것이라는 데 이의를 제기하지 않는다. 이러한 판단들이 제대로 된 것인지는 나노기술이 정말 혁명적인가의 여부에 달려있다.²⁷¹⁾ 기술혁명의 예측에 있어서 문제는 기술혁명이란 오직 지나고 나서야 예측이 가능하다는 데 있다.

무엇이 기술적 혁명과 와해성인가에 대한 서로 다른 견해가 있다. 정치과학자들과 역사학자들이 기술혁명을 말할 때, 경영학과 경제학 문헌은 와해성 및 범용 기술과의 연관성을 지적한다. 정치과학자들과 역사학자들은 기술혁신의 부분적인 원인과 결과인 사회정치적 및 경제적 개편과 같은 보다 폭넓은 현상에 관심이 있다. 이것은 와해성 또는 유지 기술보다는 새로운 “범용 기술”의 도입과 더 일치하는 개념이다.²⁷²⁾ 경영학과 경제학에서 범용 기술은 “사회 전반에 걸쳐 상당한, 만연하는 영향”을 미친다.²⁷³⁾ 반대로 “와해성 기술”은 현재의 제품시장의 패러다임을 극적으로 개선시키거나 신산업을 주도하는 물리적 및 서비스 상품을 생산한다. 이러한 제도 변화는 새로운 제품의 플랫폼을 규정하는데, 이것은 시장이 “오직” 점진적인 혁신을 경험하는 것과는 매우 다르다.²⁷⁴⁾ 반면에 점진적인 혁신은 현재의 기술제품 패러다임을 통해 기존 상품의 성능을 개선시키는 새로운 유지 기술을 통합한다.²⁷⁵⁾ 와해성 기술은 임계점(tipping point)과 같은 시간에 도달하고, 그 기술이 다른 기술들을 대체하기 전까지 서서히 지지자를 얻을 수 있다.²⁷⁶⁾ 2008년 미

271) Elise S. Brezis, Paul R. Krugman, and Daniel Tsiddon, “Leapfrogging in International Competition: A Theory of Cycles in National Technological Leadership,” *The American Economic Review* 83 (5): 1211–1219 (1993)

272) Erwin Danneels, “Disruptive Technology Reconsidered,” *The Journal of Product innovation management* 21 (1): 246–258 (2004)

273) 와해성 기술에 관해서는 다음 참조: R. Kostoff, R. Boylan, and G. Simons, “Disruptive Technology Roadmaps,” *Technological Forecasting and Social Change* 71 (1–2): 141–159 (2004); 범용 기술에 관해서는 다음 참조: J. Youtie, M. Iacopetta, and S. Graham, “Assessing the Nature of Nanotechnology: Can We Uncover an Emerging General Purpose Technology?” *The Journal of Technology Transfer* 33 (3): 315–329 (2007)

274) R. Kostoff, R. Boylan, and G. Simons, “Disruptive Technology Roadmaps,” *Technological Forecasting and Social Change* 71 (1–2): 141–159 (2004), pp. 142–3

275) *Ibid.*, pp. 144.

276) Erwin Danneels, “Disruptive Technology Reconsidered,” *The Journal of Product innovation management* 21 (1): 246–258

국가정보위원회(National Intelligence Council)의 보고서는 와해성 기술을 지정학적, 군사적, 경제 및 사회적 응집성 중 하나 이상의 국력 요인을 격하시키거나 개선할 수 있는 잠재력을 가진 것으로 단순히 규정했다.²⁷⁷⁾

현재, 앞서 논의한 정의상 및 데이터상의 문제에도 불구하고, 우리는 나노기술이 광범위하게 채택된다면 혁명적일 것이라고 잠정적으로 결론을 내릴 수 있다. 잠정성은 나노기술이 경제와 사회를 변혁시킬 수 있을지에 대한 계속되는 논의에서 연유한다. 현재의 온건한 학계의 평가는 나노기술이 범용 기술의 특징을 가지고 있으며, 따라서 경제적 응용을 넘어 사회 및 정치적인 범위에서 혁명적으로 간주될 수 있다는 것이다.²⁷⁸⁾ 그러나 나노기술에 집중하는 정부 관리들은 나노기술이 혁명적인지에 대해서는 동의하지 않는다. 일부는 나노기술이 주로 점진적일 것으로 간주하지만, 한편 다른 일부는 의료와 에너지(특히 태양에너지)와 같은 특정 산업분야만이 혼란을 겪게 될 것이라고 강조한다. 따라서 전자공학과 재료과학 나노기술은 혁명적이라기보다는 오히려 진화적으로 간주된다.²⁷⁹⁾

또 다른 평가는 나노제조와 바이오나노기술이 와해성 기술 분야이기 때문에 나노물질과 나노전자공학에 엄청나게 몰두하고 있는 아시아 국가들이 진화론적 선상에 있다고 시사한다.²⁸⁰⁾ 놀랄 것도 없이, 미국의 나노기술 투자는 생명과학이라는 미국의 핵심역량에 대한 막대한 투자를 반영한다. 반대로 중국과 러시아는 새로운 파괴물질이 나타날 것인지의 여부가 불분명한 물질과학 분야에 특히 강하다.

나노기술은 미국의 기술적 기습(technological surprise)의 사례가 아니다. 그러나 나노기술을 포함한 민군겸용기술이 전략적 또는 전술적인 기습을 초래하는 경우는 극히 드물다.²⁸¹⁾ 미국, 유럽, 일본의 나노기술 연구개발은 40년 동안 지속되고 있으며, 2000년

(2004)

277) 미 국가정보위원회, "Disruptive Civil Technologies: Six Technologies with Potential Impacts on US Interests out to 2025," *Report CR 2008-07*: 미 국가정보위원회(2008), p. i.

278) J. Youtie, M. Iacopetta, and S. Graham, "Assessing the Nature of Nanotechnology: Can We Uncover an Emerging General Purpose Technology?" *The Journal of Technology Transfer* 33 (3): 315-329 (2007)

279) Anne Clunan, 미 NSET 소위원회 고위급위원과의 개인적 의사소통, 2013년 5월 30-31일.

280) K. Miyazaki and N. Islam, "Nanotechnology Systems of innovation—An Analysis of Industry and Academia Research Activities," *Technovation* 27 (11): 661-675 (2007); I. Nazrul, and K. Miyazaki, "An Empirical Analysis of Nanotechnology Research Domains," *Technovation* 30 (4): 229-237 (2010)

281) Ronald F. Lehman, "Unclear and Present Danger: The Strategic Implications of Latent, Dual-Use Science and Technology," *Strategic Latency and World Power: How Technology is Changing Our Concepts of?*, Zachary Davis, Ronald F. Lehman, and Michael Nacht, 편집(Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2014), p. 5.

미국의 NNI의 설립 이전 미국 군대와 정부의 상당한 투자가 있었다. 이러한 투자는 미국을 나노기술의 리더로 만들었다. 따라서 기습의 근거가 있다면 그것은 냉전 이후 20년간 기술 경쟁에서 실질적으로 낙오한 러시아나 21세기에 들어서야 나노기술을 진지하게 받아들이기 시작한 중국과 인도 같은 국가들을 위한 것이다. 중국의 전반적인 연구 개발 성장은 주목할 만하고 인상적인 수준이지만²⁸²⁾, 아직 질적인 수준에서는 뒤쳐져 있다. 기습과 관련된 핵심문제는 비국가 단체가 부정한 목적에 사용하기 위해 나노 적용 기술을 어떻게 응용하느냐 하는 것인데 이 문제는 앞으로 더 연구가 필요하다.

나노기술의 응용은 국방, 에너지 및 일부 소비제품에 이미 널리 퍼져 있으며, 의료분야에서도 그러한 현상이 나타나고 있다. 새로운 나노물질 또는 새로운 나노생명공학물질이 발견될 수 있는 위험과 더불어, 나노기술의 응용으로부터 대량살상 또는 대량파괴 효과의 형태로 기습에 대한 제한적인 가능성이 있다. 나노기술은 특히 새로운 물질의 합성생성과 관련하여 화학 및 생물학적 무기 확산에 대한 기존의 어려움을 더 악화시키지만, 탐지와 감시에서 상당한 이득을 제공함으로써 이를 만회한다.

나노기술은 소형화, 자동화, 스텔스, 정밀 표적 추적 및 에너지 효율을 향한 이미 확립된 추세를 가속화하고 통합시킨다. 생명공학에서 나노기술은 의로서비스의 혁명을 일으키고 있다. 여기서, 진단과 치료는 점차 개인맞춤형이 되고 있다. 생명과학을 환경개선에 응용하는 것은 기아와 식수부족 문제를 해결하기 위해서이다. 에너지에서, 저렴한 태양 전지와 에너지 저장의 개선 가능성이 탄소 후(Post Carbon) 경제를 가리키고 있다. 이것은 더욱 소형화된 자동, 무인화 드론이나 모든 방식의 군사업무를 수행할 수 있는 개인용 디지털 장비를 만들기 위해 계속되는 추세와 다른 다양한 방식으로 국방응용에 막대한 영향을 미칠 것이다. 이 분야에서 나노기술이 주는 혁명적인 가능성은 주로 에너지, 식량 및 물과 같은 주요자원에 대한 갈등을 저감하거나 심지어 없애는 것이다. 국가적인 그리고 세계적인 안보에 대한 영향은 엄청날 것이다. 현재, 가장 놀라운 사실은 나노기술이 이미 얼마나 만연하여 있는지에서 발생하는데, 대중은 일반적으로 이를 알지 못한다.²⁸³⁾ 이러한 기술이 널리 받아들여질 경우, 이 기술의 사회, 경제, 정치적인 영향의 총합이 사회와 경제를 근본적으로 변화시킬 것이다.

282) NSF, Science and Engineering Indicators 2012 (2012), pp. 7-43.

283) NSF, Science and Engineering Indicators 2012 (2012), pp. 7-43.

사회적 요인들이 신기술의 활용을 구체화하고 나노기술의 혁명적인 잠재력에 영향을 미칠 것이다. 기술혁명과 기술 채택의 역사는 단순한 투자와 발명만으로는 기술혁명을 착수하기에 불충분하다는 것을 시사한다.²⁸⁴⁾ 소비자와 좀 더 광범위하게 말해 사회적인 용인이 있어야만 기술이 큰 영향을 나타낼 수 있다는 것이다.²⁸⁵⁾ 나노기술이 채택되고 널리 상업화되어야만 나노기술이 혁명적일 수 있다.²⁸⁶⁾ 이 결과는 확실하지 않은데, 그 이유는 두 가지이다. 나노기술은 예측된 것만큼 빨리 상업화되지 않았다. 벤처 자본가와 민간 자금 제공자들이 기초 및 응용 연구개발과 제품개발로의 확대 사이에서 오랫동안 우려를 해왔기 때문이다.²⁸⁷⁾ 나노기술이 나노제품과 나노제조과정으로부터 환경, 보건 및 안전에 미치는 영향에 대한 상당한 우려를 낳게 되면서 기업과 보험회사들은 사회적 용인에 대해 걱정했다.²⁸⁸⁾ 유럽연합, 미국, 브라질, 중국 사이에 나노기술의 통계적인 정의와 산업기준의 정의를 놓고 상당한 의견의 불일치가 있다.²⁸⁹⁾ 독성연구가 끝나고 나노기술의 보건, 안전, 민간 및 환경에 미치는 영향이 알려지게 되면서, 대중의 반발 가능성이 있다. 실제로 유럽연합에서는 유전자 변형 생물에 대해 이런 일이 있었다. 그러한 반발은 다양한 나노기술 분야의 상업적 실행가능성을 크게 바꾸어 놓고, 나노기술이 일반적으로 긍정적으로 인식되는 나라들, 즉 미국과 중국을 포함한 국가들에 우위를 제공할 수 있다.

284) Keith Krause, *Arms and the State* (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1995); Robert Gilpin, *War and change in world politics*(Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1981)

285) J. Youtie, M. Iacopetta, and S. Graham, "Assessing the Nature of Nanotechnology: Can We Uncover an Emerging General Purpose Technology?" *The Journal of Technology Transfer* 33 (3): 315-329 (2007)

286) E. O'Rourke and M. Morrison, "Challenges for Governments in Evaluating Return on Investment from Nanotechnology and Its Broader Economic Impact," *OECD Background Paper*, (2012)

287) Ibid.

288) Philip Shapira and Jan Youtie, "The Economic Contributions of Nanotechnology to Green and Sustainable Growth" (2012)

289) Anne Clunan, NSET 소위원회 고위급 위원과의 개인적 의사소통, 2013년 5월 30일.

주요 결론과 권고사항

나노기술은 범용 기술로서 정보통신기술, 마이크로일렉트로닉스 및 로봇공학 분야의 계속되는 혁신에 기여하고 있다. 전쟁의 성격도 지난 30년 동안 이미 극적으로 변모했으며 정밀유도무기, 무인차량, 정보지배와 감시의 중요성이 점차 중요해지고 있다. 나노기술은 이러한 추세를 극적으로 확장하고 가속하고 있다. 나노기술이 새로운 대량살상무기의 기반을 제공한다는 증거는 거의 없다. 나노기술은 인간의 건강과 환경의 변혁을 약속하는 다양한 방식으로 화학, 생물학, 인지과학과 융합되고 있다. 나노기술은 무장병사들과 대중의 건강과 회복력을 크게 개선하고, 전쟁의 원인인 자원부족을 보완할 수 있는 가능성도 가지고 있다. 미국은 독일, 일본과 더불어 나노기술의 선도국가이지만 중국을 포함한 다른 아시아 국가들이 자국의 나노기술 기반을 확장하며 개선하고 있다. 미국의 지위를 현재 수준으로 유지하려면, 미 정부는 나노기술에 대한 투자를 계속 유지하고, 기초 연구개발에 대한 헌신을 지속하며 나노기술 응용의 상업화에 대한 지원을 늘려야 한다. 현재까지, 다국적 또는 국가적 차원에서 나노기술의 민군겸용 및 군사적 응용을 관리하려는 시도나 노력은 거의 없는 실정이다. 나노기술은 민군겸용 성질과 거버넌스에 따른 문제에 관하여 생물학적 기술과 마찬가지로의 문제를 제기한다.

극소수의 예외는 있지만, 어떠한 학술 문헌도 나노기술의 군사적 이용을 규제하는 것에 관심을 두지 않는다.²⁹⁰⁾ 국가적 규제의 초점은 대중의 보건, 안전 및 환경보전에 두었다.²⁹¹⁾ 현재, 국가들은 나노기술 문제를 다루기 위해 기존의 핵확산방지와 수출통제제도에 의존하고 있다. 이 제도들은 현재 본질적으로 초학과성 과학의 급속한 발전 속도에 보조를 맞추기에 불충분하다. 한 가지 결과는 국가 안보의 책임을 점차 기업과 개인 과학자에게 전가하는 현상이 나타나고 있다는 것이다.²⁹²⁾ 이같이 자체 규제를 추진하는 것은 무의식

290) John F. Sargent, Jr., *Nanotechnology and U.S. Competitiveness: Issues and Options*, Service Library Of Congress 편집, Washington, D.C. Congressional Research (2008)

291) 2012년 1월, 미 국가연구위원회(NRC)는 나노기술 물질의 안전성을 평가하기 위한 5개년 연구에 착수했음. 나노기술의 영향을 이해하기 위한 지출은 환경과 사회적 영향에 중점을 두는 경향이 있는데, 그것은 미 국립과학재단에서 지원하는 재정이 듀크대학교와 UCLA에서의 나노기술의 환경적 함의와 아리조나 대학, 캘리포니아 산타바바라 대학 및 남부 캘리포니아 대학에서의 나노기술과 사회에 초점을 두고 있는 것에서 알 수 있음. 참고 <http://www.nano.gov/initiatives/government/research-centers>.

292) Margaret E. Kosal, "Strategy, Technology, and Governance: Shift of Responsibility from Nation-states to Individuals," 2013년 10월 27-29일, 매사추세츠 주 보스턴에서 열린 Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies의

적으로 나노기술 물질, 병원균, 또는 전달 플랫폼의 무기화로 이어질 수 있는 과학 활동을 단순히 감시하는 데 엄청난 어려움이 있다는 것에서 대부분 연유한다. 다국적 또는 국가적 차원의 규제를 추진하려는 노력이 결여된 가운데, 정부기관은 학계 및 기업과 연계하여 나노안보 및 민군겸용 인식, 연구개발에 따른 행동강령 문화를 육성해야 한다. 생물보안에서와 마찬가지로, 평화적 물질이 부정한 목적으로 사용될 수 있는 위험을 관리하는 책임을 과학자들에게 지도록 할 수 있다. 이것은 과학자들 사이의 인식과 대화 및 문화적 규범의 추진을 통해서 이루어질 수 있다. 그러한 규범이 나노기술의 민군겸용 위험을 관리하고, 나노기술의 합법적인 개발과 사용과 관련하여 국제적인 규범과 거버넌스 메커니즘을 수립하기 위한 정부 및 정부 간의 협력을 대체할 수 없다. 그러나 현재로서는 그러한 거버넌스 체제나 과학자, 기업, 첩보 및 보안 전문가들 간의 정보 공유 및 범국가적 협력을 위한 기존 네트워크가 없는 상황에서,²⁹³⁾ 미 정부가 나노기술 개발에 대해 국내 외적으로 면밀한 감시를 계속할 필요가 있다. 나노기술의 진보에 대한 인식 문제는 나노기술 연구개발에 대한 기존 지표들의 비교가능성과 질적인 문제로 인해 더욱 악화되고 있다. 파괴적 또는 혁명적인 영향을 미친 유사기술과의 비교분석을 위한 데이터뿐 아니라 나노기술의 군사 및 상업적 응용과 보건, 안전 및 환경에 미치는 영향에 관한 데이터를 수집해야 한다. 미 정부는 과학자, 정책입안자, 국방관계자 및 시장관계자 간의 여러 학문분야를 망라하는 협력을 더욱 장려하여 비교할 수 있는 국가적 또는 국제적 자료의 수집과 축적을 도모해야 한다. 가용자료를 수집하는 것뿐 아니라 그 기술이 누구에게 무슨 의미가 있는지에 대해, 안보와 경쟁력의 관점에서 위협과 기회의 성질을 평가하는 방법에 대해 보다 까다로운 분석적 문제를 질문하는 것이 중요하다. 또 다른 과제는 과학적 연구 및 제조의 생산 네트워크뿐 아니라 국방과 민간 나노기술 생산의 전 세계화가 나노기술의 불법개발과 사용을 통제하기 위한 미국의 노력에 어떤 영향을 미칠지에 대해 더 잘 이해하기 위해 전 세계의 공급망 분석으로부터 분석을 통합하는 것이다.

제5회 연차총회에서의 발표용으로 준비된 프레젠테이션

293) Anne L. Clunan, "Building Information Networks for Biosecurity," *Terrorism, War or Disease?*, pp. 293-310, Anne L. Clunan, Peter R. Lavoy and Susan B. Martin, 편집 (Palo Alto: Stanford University Press, 2008)

■ 주요 결론 및 권고사항(요약)

- 나노기술은 정보 통신기술, 마이크로일렉트로닉스 및 로봇공학분야에서 진행 중인 혁명에 기여하는 범용 기술이다.
- 나노기술은 새로운 대량살상무기나 대량효과를 위한 기반을 제공하지는 않을 것으로 보인다. 그러나 비록 개념적이지만, 그러한 적용은 아마 화학과 생물학 분야에서 가능할 것 같다.
- 광범위하게 적용될 경우, 나노기술은 병사들과 대중의 보건 및 회복력을 크게 향상시키고 전쟁의 원인이 되는 자원부족 문제 역시 잠정적으로 줄일 수도 있을 것으로 보인다. 그러나 환경, 보건 및 안전상의 위협에 대한 상당한 우려가 있다는 점을 고려할 때 광범위한 적용에 대한 판단은 아직 불확실하다.
- 다자간 또는 국가적 수준에서 나노기술을 민군겸용 또는 군사적으로 적용하는 것에 대한 명확한 거버넌스는 일반적으로 부재한 실정이다. 따라서 (미국) 정부기관은 국제적으로 노력하여 나노기술 개발과 사용을 다루는 새로운 다국적 개념과 규정을 신설하고, 학계 및 기업과 공조하여 나노안보의 문화, 민군겸용에 대한 인식 및 연구개발 행동강령을 촉진해야 한다.
- 나노기술 연구개발에 관한 기존 지표의 비교가능성과 질적인 문제가 나노기술 발전에 대한 인식에 부정적 영향을 미치고 있다. 자세한 데이터 수집을 통해 나노기술의 군사적 및 상업적 적용, 보건, 안전 및 환경에 미치는 영향을 파악해야 하며, 과학자, 정책 입안자, 국방전문가, 시장관계자들 간에 여러 분야를 망라하는 협력을 지원하여 비교를 통한 종단적, 국가 간 및 세계적 공급망 데이터 수집과 측정을 활성화해야 한다.
- 이용 가능한 데이터를 근거로 할 때, 미국은 나노기술 분야의 선두를 유지하고 있다. 중국을 포함한 다른 아시아 국가들은 자국의 나노기술 기반을 확장 및 개선하고 있다. 미 정부는 선두를 유지하기 위해 나노기술에 대한 투자를 계속하고, 기본 연구개발 및 나노기술 응용분야 확장과 상업화에 대한 지원을 증가시키기 위해 지속적인 노력을 경주해나갈 것이다.



I 약어

BMBF	Federal Ministry of Education and Research (Germany)	독일연방교육연구부
BRIC	Brazil, Russia, India and China	브라질, 러시아, 인도, 중국
BWC	Biological and Toxin Weapons Convention	생물독성무기금지협약
CAE	Chinese Academy of Engineering	중국공정원
CAS	Chinese Academy of Sciences	중국과학원
CBRNE	Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and Explosive weapons	화학, 생물학, 방사능, 핵 및 고성능 폭탄
CCC	Naval Postgraduate School Center on Contemporary Conflict	미 해군대학원 현대전센터
CCP	Communist Party of China	중국공산당
CNANE	China National Academy of Nanotechnology and Engineering	국가나노기술공정연구원
CNITA	China Nonwovens & Industrial Textiles Association	중국산업방직협회
CNTAC	China National Textiles & Apparel Council	중국섬유산업연합회
COCOM	Coordinating Committee for Multilateral Export Controls	다자간 전략물자 수출통제 조정위원회
CWC	Chemical Weapons Convention	화학무기금지협약
DURC	Dual Use Research of Concern	민군겸용 관련 연구
EDA	European Defense Agency	유럽방위청
EHS	Environmental and Health Safety	환경, 보건, 안전
EU	European Union	유럽연합
FDI	Foreign Direct Investment	외국인 직접 투자
GDP	Gross Domestic Product	국내총생산
IMF	International Monetary Fund	국제통화기금
ISO	International Organization for Standardization	국제표준화기구
ISO	TC Technical Committee of the International Organization for Standardization	국제표준화기구 기술위원회
JIP	Joint Investment Programme	공동투자프로그램
MFA	Multi-Fiber Arrangement	다자간 섬유 협정



MLP	Medium- and Long-Term Plan for the Development of Science and Technology	중장기 과학기술 개발계획
MNC	Multinational Corporation	다국적 기업
MOD	Ministry of Defense	국방부
MOE	Ministry of Education	교육부
MOST	Ministry of Science and Technology	과학기술부
NATO	North Atlantic Treaty Organization	북대서양조약기구
NCNST	National Center for Nanoscience and Nanotechnology	국가나노과학센터
NDRC	National Development and Reform Commission	국가발전개혁위원회
NERCN	Shanghai National Engineering Research Center for Nanotechnology	상하이 나노기술 국립공학연구소
NIBC	Nanotechnology Industrialization Base of China	중국나노기술산업화기지
NIS	National Innovation Systems	국가혁신시스템
NNI	U.S. National Nanotechnology Initiative	미 국가나노기술계획
NPT	Nuclear Non-Proliferation Treaty	핵확산방지조약
NSA	Department of National Security Affairs	국가안보부
NSCNN	National Steering Committee of Nanoscience and Nanotechnology	국가나노과학기술조정위원회
NSF	National Science Foundation	국립과학재단
NSFC	National Natural Science Foundation of China	중국국가자연과학기금위원회
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development	경제협력개발기구
PASCC	Project on Advanced Systems and Concepts for Countering WMD	대량살상무기 전진대응시스템 프로젝트
PRC		중화인민공화국
R&D	Research and Development	연구개발
RUSNANO	Russian Nanotech Corporation	러시아 나노기술공사
S/T	Science and Technology	과학기술
SATI	State Administration of Textile Industry	국가섬유산업총국
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks of the European Commission	유럽연합 집행위원회의 신규보건위험과학위원회



SIP	Suzhou Industrial Park	쑤저우 공업단지
SNPC	Shanghai Nanotechnology Promotion Center	상하이나노기술산업발전추진센터
SSTC	State Science and Technology Commission	국가과학기술위원회
STEM	Science, Technology, Engineering, and Mathematics	과학, 기술, 공학 및 수학
STM	Scanning Tunneling Microscopy	주사터널링현미경
TNC	Transnational Corporation	다국적 기업
UN	United Nations	국제연합
UNESCO	United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization	국제연합교육과학문화기구
USG	United States Government	미 정부
WMD	Weapons of Mass Destruction	대량살상무기
WTO	World Trade Organization	세계무역기구

참고문헌

1. Anne Cluman Ph.D., Kirsan Rodine-Hardy, Ph.D., 〈Nanotechnology in a Globalized World Strategic Assessment of an Emerging Technology〉, PASCSC, 2014. 6. 9.
2. Angela Jones, PH.D., 〈Nanotechnology in the military〉, National Defense Homeland Security, USA, 2014.
3. Mike Phelps, 〈5 ways nanotechnology will change warfare〉, jabba.com, 2015. 6. 29.
4. KIAT, 〈심층보고서, National Nanotechnology Initiatives〉, 산업통상부, 2014.
5. 강상규, 김태연, 〈일본의 나노기술·재료과학 연구개발 방향, 제 7기 나노기술재료과학위원회 회의자료〉, 2015. 3.
6. 국가나노기술정책센터, 〈제 2기 국가나노기술지도 총괄보고서〉, 2014. 2.
7. 김민정, 강상규, 이기성, 〈2015년 러시아의 나노기술정책동향, 2020년 장기사업전략을 중심으로〉, 2015. 3.
8. (주)기술과 가치, 〈나노융합 2020 신산업 발전전략 수립 연구〉, 지식경제부, 2011. 8.
9. 미래창조과학부 외 9개 부처, 〈2014년 나노기술발전시행계획〉, 2014.
10. 배성훈, 신광민, 〈2015년 독일의 나노기술 정책동향〉, 국가나노기술정책센터, 2015. 3.
11. 윤진선, 배성훈, 신광민, 강상규, 〈2015 나노특허동향〉, 국가나노기술정책센터, 2015. 4.
12. 한국과학기술정보연구원, 〈주요 나노기술의 현황과 산업화 동향〉, 2008. 12.
13. 홍성범, 〈중국나노기술분야의 전방위 발전 방향〉, 과학기술정책연구원, 2014. 11. 26.

“Nanotechnology in a Globalized World Strategic Assessment of an Emerging Technology” 에서
 인용한 자료출처

2013. *Global Innovation Report 2013, The Global Innovation Index*,
 (SCENIHR), Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks of the
 European Commission, 2006. 3.1. Introduction: The Appropriateness of Existing
 Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious
 Products of Nanotechnologies, European Commission.
- Allen, George. 2005. “The Economic Promise of Nanotechnology.” *Issues in Science &
 Technology* 2005 (Summer). Online: <http://issues.org/21-4/allen/>.
- Altmann, Jurgen, and Mark Gubrud. 2004. “Anticipating military nanotechnology.” *IEEE
 Technology and Society Magazine* 23 (4): 33-40. doi: 10.1109/MTAS.2004.1371637.
- Altmann, Jurgen. 2006. *Military nanotechnology: potential applications and preventive arms
 control*. New York: Routledge.
- Amsden, Alice, Jacek Kochanowicz, and Lance Taylor. 1994. *The Market Meets Its Match:
 Restructuring the Economies of Eastern Europe*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anand, Sudhir, Paul Segal, and Joseph E. Stiglitz. 2010. *Debates on the measurement of global
 poverty, The Initiative for Policy Dialogue series*. Oxford; New York: Oxford University
 Press.
- Appelbaum, R., Cao C., R. Parker, and Y. Motoyama. 2013. “Nanotechnology as Industrial
 Policy: China and the United States.” Paper presented at the 2013 International Studies
 Association Annual Conference, San Francisco, CA.
- Arquilla, J, and SM Karmel. 1997. “Welcome to the Revolution ... In Chinese Military Affairs.”
Defense & Security Analysis 13:255-269.
- Atlas, Ronald M., and Malcolm Dando. 2006. “The dual-use dilemma for the life sciences:
 perspectives, conundrums, and global solutions.” *Biosecurity and bioterrorism: biodefense
 strategy, practice, and science* 4 (3): 276.
- Australia Group. 2014. *Common Control Lists*. June 15.
<http://www.australiagroup.net/en/controllists.html>
- Azim, S. S., et al. 2006. “Studies on Graphite Based Conductive Paint Coatings.” *Progress in
 Organic Coatings* 55(1): 1-4.
- Bai, C. 2005. “Ascent of nanoscience in China.” *Science Magazine*.
- Bank, World. 2012. Knowledge Assessment Methodology.

- Barnett, Michael, and Martha Finnemore. 2004. *Rules for the World: International Organizations in Global Politics*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Bartholomew, S. 1997. "National Systems of Biotechnology Innovation: Complex Interdependence in the Global System." *Journal of International Business Studies* 28 (2): 241-266.
- Battelle. 2012. "2013 Global R&D Funding Forecast."
http://battelle.org/docs/r-d-fundingforecast/2013_r_d_funding_forecast.pdf?sfvrsn=0.
- Battelle. 2013. "2014 Global R&D Funding Forecast." Accessed 2014-01-25.
http://www.battelle.org/docs/tpp/2014_global_rd_funding_forecast.pdf?sfvrsn=4.
- Bernstein, AH, and M Libicki. 1998. "High-Tech: The Future Face of War? A Debate." *Commentary* 105:28-31.
- BMBF. 2007. Nano-Initiative: Action Plan 2010
- Brezis, Elise S., Paul R. Krugman, and Daniel Tsiddon. 1993. "Leapfrogging in International Competition: A Theory of Cycles in National Technological Leadership." *The American Economic Review* 83 (5): 1211-1219.
- Brooks, Sarah M. 2005a. "Interdependent and Domestic Foundations of Policy Change: The Diffusion of Pension Privatization Around the World." *International Studies Quarterly* 49 (2): 273-294.
- Brooks, Stephen G. 2005b. *Producing security: multinational corporations, globalization, and the changing calculus of conflict*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Buthe, Tim and Walter Mattli. 2011. *The New Global Rulers: The Privatization of Regulation in the World Economy*. Princeton: Princeton University Press.
- Caijing. 2013. "Nano is Coming, Finding the Right Path First (in Chinese)." *Caijing Magazine*. Accessed November 2, 2013. <http://magazine.caijing.com.cn/2013-06-16/112912273.html>.
- Cerny, Philip. 1995. "Globalization and the Changing Logic of Collective Action." *International Organization* 49 (4): 595-625.
- Chandler, A.D. 1977. *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business*. Cambridge, MA: Belknap Press.
- Chang, Kenneth. 2005. "Tiny is Beautiful: Translating 'Nano' into Potential." *The New York Times*, February 22. http://www.nytimes.com/2005/02/22/science/22nano.html?_r=0 2014-04-30.
- Chaudhry, Kiren Aziz. 1997. *The price of wealth: economies and institutions in the Middle East, Cornell studies in political economy*. Ithaca: Cornell University Press.

- Christensen, Clayton. 1997. *The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail*. Boston Mass.: Harvard Business School Press.
- Christensen, Clayton M. 2006. "The Ongoing Process of Building a Theory of Disruption.(Dialogue on the Effects of Disruptive Technology on Firms and Industries)." *Journal of Product Innovation Management* 23 (1): 39.
- Cientifica. 2011. Global Funding of Nanotechnologies and Its Impact.
- Clunan, Anne L. 2008. "Building Information Networks for Biosecurity." In *Terrorism, War or Disease? Unraveling the Use of Biological Weapons*, pp. 293-310, Anne L. Clunan, Peter R. Lavoy and Susan B. Martin, editors. Palo Alto: Stanford University Press.
- Commission, European. 2011. EU Recommendation 2011/696/EU of 18 October 2011 on the Definition of Nanomaterial.
- Cornish, P. 2013. *Strategic Cultures in Europe: Security and Defence Policies Across the Continent*, edited by H. Biehl, B. Giegerich and A. Jonas. Springer.
- Council, National Research. 2005. Globalization of Materials R&D: Time for a National Strategy. Washington, DC.
- Council, National Research. 2013. "Triennial Review of the National Nanotechnology Initiative." National Academy Press. http://www.nap.edu/download.php?record_id=18271.
- Council, National Intelligence. 2008. Disruptive Civil Technologies: Six Technologies with Potential Impacts on US Interests out to 2025. In *Report CR 2008-07*: National Intelligence Council.
- CSIS. 2012. European Defense Trends 2012: Budgets, Regulatory Frameworks, and the Industrial Base. edited by D. Berteau, G. Ben-Ari, R. Crotty, J. Hofbauer, P. Hermann and S. Raghavan.
- Cientifica. 2013. Half Way to the Trillion Dollar Market? A Critical Review of the Diffusion of Nanotechnologies, Market Report, Research Policy.
- Daily, China. 2013. "China has become a global nanotechnology leader, says the CAS President Bai Chunli (in Chinese)." *China Daily*. Accessed November 2, 2013. <http://www.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2013-09-05/content10047265.html>.
- Daily, Science. 2006. "Joint Lab for Biological Effect for Nanomaterials and Nanosafety is established (in Chinese)." *Science Daily*. Accessed November 2, 2013. <http://www.ihep.ac.cn/media/06/060626.htm>.
- Danneels, Erwin. 2004. "Disruptive Technology Reconsidered." *The Journal of Product innovation management* 21 (1): 246-258.

- Davis, Carolyn R., Stanley Goos, and Anne M. Schneiderman, 2013. "Ninth Circuit Vacates EPA's Approval of Nanosilver-based Pesticide." Lexology.com, November 26, <http://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=c76d0d1b-9f49-4b62-b5ca-37268892ad43>
- Dosi, G., K. Pavitt, and L. Soete, 1990. *The Economics of Technical Change and International Trade*. London, UK: Harvester Wheatsheaf.
- Dosi, Giovanni, 1988. "Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation," *Journal of Economic Literature* 26 (3): 1120-1171.
- DRDO, 2012. "Nanotechnology Applications for Defence Applications," *DRDO Newsletter* 32:11 (November) http://www.drdo.gov.in/drdo/pub/nl/2012/NL_November_2012_web.pdf.
- Dunning, John H., and Sarianna M. Lundan, 2009. "The internationalization of corporate R&D: a review of the evidence and some policy implications for home countries." *The Review of Policy Research* 26 (1 2): 13.
- EDA, 2008. "European Defence Agency News: EDA Establishes New Joint R&T Programme on Disruptive Defence Technologies." <https://http://www.eda.europa.eu/infocenter/news/2008/05/25/EDAestablishesNewJointRTProgrammeonDisruptiveDefenceTechnologies>.
- EDA, 2012. "European Defence Agency News: Nanoelectronics' Importance for Defence." <https://http://www.eda.europa.eu/info-hub/news/2012/11/13/nanoelectronicsimportance-for-defence>.
- Eden, Lynn, 2004. *Whole World on Fire: Organizations, Knowledge, and Nuclear Weapons Devastation*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Eisler, Matthew N. 2010. "Department of Energy." In *Encyclopedia of Nanoscience and Society*, edited by David H. Guston. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Elkins, Zachary, Andrew T. Guzman, and Beth A. Simmons, 2006. "Competing for Capital: The Diffusion of Bilateral Investment Treaties, 1960-2000," doi: doi:10.1017/S0020818306060279.
- European Commission, 2004. *Towards a European Strategy for Nanotechnology*; Communication from the Commission. Brussels, Belgium: Commission of the European Communities.
- Falkner, Robert and Nico Jaspers, 2012. "Regulating Nanotechnologies: Risk, Uncertainty and the Global Governance Gap." *Global Environmental Politics* 12(1): 30-55.
- Fan, C., and L. Li, 2009. "Research on coverage of domestic mainstream media on new and emerging technology: in the case of GMO and Nanotechnology (in Chinese)." 5th Chinese Science and Technology Policy and Management Annual Conference.
- Feder, Barnaby J. 2003. "Frontier of Military Technology is in the Size of a Molecule." *New York Times*, April 10.

- Feynman, R.P. 1992. "There's plenty of room at the bottom (data storage)." *Journal of Microelectromechanical Systems* 1 (1): 60-66.
- Finnemore, Martha. 1996. *National Interests in International Society*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Fitzgerald, David. 2014. "Leaving the Back Door Open: How Export Control Reform's Deregulation May Harm American Security," *North Carolina Journal of Law and Technology* 15, Online Edition: 65-99.
- Fiorino, Daniel J. 2010. *Voluntary Initiatives, Regulation, and Nanotechnology Oversight: Charting a Path*, Project on Emerging Nanotechnologies.
- Florida, Richard. 2005. "The world is spiky: globalization has changed the economic playing field, but hasn't leveled it." *The Atlantic* 296 (3).
- Forum, World Economic. 2013. Global Competitiveness Index 2013.
- Freeman, C. 1997. "The National System of Innovation in Historical Perspective." In *Technology, Globalization, and Economic Performance*, edited by D. Archibugi and J. Michie. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Gilpin, Robert. 1981. *War and change in world politics*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Gilpin, Robert. 2001. *Global Political Economy*. Princeton: Princeton University Press.
- Group, ETC. 2010. Geopiracy: The Case Against Geoengineering.
- Heller, Jacob and Christine Peterson. 2007. "Nanotechnology: Maximizing Benefits, Minimizing Downsides." In *Nanoscale: Issues and Perspectives for the Nano Century*, pp. 83-96. edited by Nigel M. de S. Cameron and M. Ellen Mitchell. Hoboken, NJ: Wiley & Sons.
- Hindu, The. 2005. "India becoming a Pioneer in Nano Technology." *The Hindu*. <http://www.hindu.com/2005/03/25/stories/2005032518320300.htm>.
- Hollingsworth, J.R., and R. Boyer. 1997. *Contemporary Capitalism: The Embeddedness of Institutions*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Howard, Sean. 2002. "Nanotechnology and Mass Destruction: The Need for an Inner Space Treaty," *Disarmament Diplomacy* 65 (July-August).
- Hsueh, Roselyn. 2011. *China's regulatory state: a new strategy for globalization, Cornell studies in political economy*. Ithaca: Cornell University Press.
- Hsueh, Roselyn. 2012. "China and India in the Age of Globalization: Sectoral Variation in Postliberalization Reregulation." *Comparative Political Studies* 45 (1): 32-61. doi: 10.1177/0010414011421305.

- Hu, M. 2012. "Nanotechnology development in Mainland China." IEEE Conference on Technology and Society in Asia.
- Huang, Y. 2008. *Capitalism with Chinese characteristics: entrepreneurship and the state*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hughes, James, Gwendolyn Sasse, and Claire Gordan. 2004. *Europeanization and Regionalization in the EU's Enlargement to Central and Eastern Europe: The Myth of Conditionality*. London: Palgrave Macmillan.
- Hwang, D. 2010. "Ranking the nations on nanotech." *Solid State Technology*.
- IAEA. 1992. Guidelines for Transfers of Nuclear-Related Dual-Use Equipment, Material and Related Technology. INFCIRC/254/Rev.1/Part 2 Annex July.
<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infocircs/Others/infocirc254r1p2.pdf>
- Initiative, National Nanotechnology. "Manufacturing at the Nanoscale." Accessed December 20, 2013. <http://www.nano.gov/nanotech-101/what/manufacturing>.
- Initiative, National Nanotechnology. "NNI Accomplishments at the Nanoscale." Accessed May 20, 2012. <http://www.nano.gov/nanotechnology-initiatives/nano-achievements>.
- ISO. 2011. "Nanotechnologies Vocabulary Part 5: Nano/bio interface."
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-5:ed-1:v1:en:term:2,4> 2014-04-28.
- Jarvis, D., and N. Richmond. 2011. "Regulation and Governance of Nanotechnology in China: Regulatory Challenges and Effectiveness." *European Journal of Law and Technology* 2 (3): 1-11.
- Jeremiah, David. 1995. "Nanotechnology and Global Security." (Palo Alto, CA; Fourth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology), November 9.
- Johnson, Chalmers, Laura D'Andrea Tyson, John Zysman, and Berkeley Roundtable on the International Economy. 1989. *Politics and productivity: the real story of why Japan works*. Cambridge, Mass.: Ballinger.
- Jones, Angela, Jeanne Nye and Andrew Greenberg. 2011. "Nanotechnology in the Military: National Defense, Homeland Security." Presentation prepared as part of the *Small Science, Big Decisions* project, University of Wisconsin, Madison Institute for Chemical Education, March. <http://ice.chem.wisc.edu/NanoDecisions/PDF/Military.pdf>
- Jordan, C., N. Kaiser, and V. Moore. 2012. Nanotechnology Patent Survey: Who Will Be the Leaders in the Fifth Technology Revolution? *Nanotechnology Law & Business* 9 (Fall): 122-132.
- Juma, C., and L. Yee-Cheong. 2005. *Innovation: Applying knowledge in development*.: UN

- Millennium Project Task force on Science, Technology and Innovation.
- Juma, Calestous, Lee Yee-Cheong, Technology and Innovation Un Millennium Project, Task Force on Science, and Programme United Nations Development. 2005. *Innovation: applying knowledge in development*. Edited by Calestous Juma, Lee Yee-Cheong, Technology and Innovation Un Millennium Project, Task Force on Science and Programme United Nations Development, *Applying knowledge in development*. London; Sterling, Va.: London; Sterling, Va.: Earthscan.
- Junk, J., and C. Daase. 2013. "Strategic Cultures in Europe: Security and Defence Policies Across the Continent." In, edited by H. Biehl, B. Giegerich and A. Jonas. Springer.
- Kalam, A.P.J. Abdul. 2009. "Dimensions of Nano Science and Technology," Special Address at Nanotechnology Workshop, University of Hyderabad, November 14.
- Kay, Luciano, and Philip Shapira. 2011. "The Case of Brazil." In *Nanotechnology and the Challenges of Equity, Equality and Development*, edited by Susan E. Cozzens and Jameson Wetmore. Springer.
- Khushf, George. 2004. "The Ethics of Nanotechnology. Vision and Values for a New Generation of Science and Engineering." In *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering: Papers from a Workshop*, October 14-15, 2003, pp. 29-56, National Academy of Engineering, editor. The National Academies Press.
- Klochikhin, Evgeny A. 2011. "Public policy instruments in (re)building national innovation capabilities: cases of nanotechnology development in China, Russia and Brazil" Atlanta Conference on Science and Innovation Policy, Atlanta, GA.
- Klochikhin, Evgeny A. 2013. "Innovation System in Transition: Opportunities for Policy Learning between China and Russia," *Science and Public Policy* 40, pp. 657-673.
- Knell, M. 2011. "Nanotechnology and the Sixth Technological Revolution." In *Nanotechnology and the Challenges of Equity, Equality, and Development*, edited by SE. Cozzens and JM Wetmore. Springer.
- Kosal, Margaret E. 2009. *Nanotechnology for chemical and biological defense*. New York: Springer.
- Kosal, Margaret E. 2010. "The security implications of nanotechnology." *Bulletin of the Atomic Scientists* 66 (4): 58-69. doi: 10.2968/066004006.
- Kosal, Margaret E. 2012. "Nanotechnology Threat Anticipation," unpublished presentation, September 3. Copy on file with authors.
- Kosal, Margaret E. 2013. "Strategy, Technology, and Governance: Shift of Responsibility from

- Nation-states to Individuals.” Presentation prepared for delivery at the Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies 5th Annual Meeting, October 27-29, Boston, Mass.
- Kostoff, R, R. Boylan, and G. Simons. 2004. “Disruptive Technology Roadmaps.” *Technological Forecasting and Social Change* 71 (1-2): 141-159. doi: 10.1016/S0040-1625(03)00048-9.
- Krause, Keith. 1995. *Arms and the State*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Krugman, Paul. 1986. Pricing to Market when the Exchange Rate Changes. In *NBER Working Papers*: National Bureau of Economic Research, Inc.
- Krugman, Paul. 1991. “Increasing Returns and Economic Geography.” *Journal of Political Economy* 99 (3): 483.
- Lehman, Ronald F. 2014. “Unclear and Present Danger: The Strategic Implications of Latent, Dual-Use Science and Technology.” In *Strategic Latency and World Power: How Technology Is Changing Our Concepts of Security*, Zachary Davis, Ronald F. Lehman, and Michael Nacht, editors. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory.
- Leung, R. 2008. “Doing Nanotechnology in China.” Doctor of Philosophy Degree in Sociology, Sociology Department, University of Wisconsin-Madison.
- Li, X., Y. Lin, H. Chen, and M. Roco. 2007. “Worldwide Nanotechnology Development: A Comparative Study of USPTO, EPO, and JPO Patents (1976-2004).” *Journal of Nanoparticle Research* 9:977-1002.
- Mackenzie, Donald. 1990. *Inventing Accuracy: A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Maclurcan, Donald. 2005. “Nanotechnology and Developing Countries - Part 2: What Realities?” *AzONano-Online Journal of Nanotechnology* 1.
- Magee, Joe C., and Adam D. Galinsky. 2008. “Social Hierarchy: The Self-Reinforcing Nature of Power and Status.” *The Academy of Management Annals* 2 (1): 351-398.
- Mahnken, Thomas G. 2010. *Technology and the American way of war since 1945*. Edited by Inc ebrary. New York; Chichester, UK: Columbia University Press.
- Mangematin, V., K. Errabi, and C. Gauthier. 2011. “Large Players in the Nanogame: Dedicated Nanotech Subsidiaries or Distributed Nanotech Capabilities?” *Journal of Technology Transfer* 36:640-664.
- Martins, Paulo Roberto. 2013. “Science for Production x Science for Impacts: Brazilian Development of Nanotechnology in Section XXI.” Presentation prepared for delivery at the Society for the Study of Nanoscience and Emerging Technologies 5th Annual Meeting,



- October 27-29, Boston, Mass.
- Maurer, Stephen M., editor. 2009. *WMD Terrorism: Science and Policy Choices*. Cambridge, Mass: MIT Press, 2009.
- Maurer, Stephen M. 2010. "Five Easy Pieces: Case Studies of Entrepreneurs Who Organized Private Communities for a Public Purpose" (November 1). Goldman School of Public Policy Working Paper No. GSPP10-011. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1713329>.
- Meyer, John W., John Boli, George Thomas, and Francisco O. Ramirez. 1997. "World Society and the Nation-State." *American Journal of Sociology* 103 (1): 144-181.
- Meyer, John W., and Brian Rowan. 1977. "Institutionalized Organizations: Formal Structures as Myth and Ceremony." *American Journal of Sociology* 83 (2): 340-363.
- Miyazaki, K., and N. Islam. 2007. "Nanotechnology Systems of innovation-An Analysis of Industry and Academia Research Activities." *Technovation* 27 (11): 661-675.
- Mori, Yasutaka, Takeshi Ono, Yasushi Miyahira, Vinh Quang Nguyen, Takemi Matsui, and Masayuki Ishihara. 2013. "Antiviral activity of silver nanoparticle/chitosan composites against H1N1 influenza A virus." *Nanoscale Research Letters* 8 (93).
- MOST. 2001. "National Nanotechnology Development Strategy (in Chinese)." MOST. Accessed November 2, 2013. <http://www.most.gov.cn/fggw/zfwj/zfwj2001/200512/t2005121455037.htm>.
- Merand, Frederic. 2008. *European Defence Policy: Beyond the Nation State*. Oxford University Press.
- Nano.gov. "One nanometer is a billionth of a meter, or 10⁻⁹ of a meter." Accessed 02-28-2014. <http://www.nano.gov/nanotech-101/what/definition>.
- Nanotechnologies, The Project on Emerging. "Inventories." Accessed May 20, 2012. <http://www.nanotechproject.org/inventories>.
- Nanowerk. 2013. "Definition of the Term Nanotechnology." Accessed June 06, 2013. <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=30804.php> 2014-05-01.
- NATO. 2005. Committee Reports Annual Session 179 STCMT 05 E - The Security Implications of Nanotechnology.
- Naughton, B. 1995. *Growing out of the plan: Chinese economic reform, 1978-1993*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Nazrul, I., and K. Miyazaki. 2010. "An Empirical Analysis of Nanotechnology Research Domains." *Technovation* 30 (4): 229-237.
- NCNST. 2013. "Official website of the NCNST (in Chinese)." Accessed November 2, 2013.

- Retrieved from <http://www.nanoctr.cn/>.
- Nelson, Richard R. 1982. *An evolutionary theory of economic change*. Edited by Sidney G. Winter, *Economic change*. Cambridge, Mass.: Cambridge, Mass.: Belknap Press of Harvard University Press.
- NERCN. 2013. "Official website of the NERCN (in Chinese)." Accessed November 2, 2013. <http://www.nercn.com.cn/content.aspx?classId=10>.
- NNI. 2014. "Frequently Asked Questions." U.S. National Nanotechnology Initiative (NNI) Accessed March 20, 2014. <http://www.nano.gov/nanotech-101/nanotechnology-facts>.
- NSF. 2012. *Science and Engineering Indicators 2012*.
- O'Neill, Kate. 2000a. *Waste trading among rich nations: building a new theory of environmental regulation*. Cambridge, Mass.: Cambridge, Mass.: MIT Press.
- O'Neill, Kate. 2000b. *Waste Trading Among Rich Nations: Building a New Theory of Environmental Regulation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- ObservatoryNANO. 2011. European Nanotechnology Landscape Report.
- OECD. 2011. OECD, Science Technology, and Industry Scorecard.
- OECD. 2013. Regulatory Frameworks for Nanotechnology in Foods and Medical Products: Summary Results of a Survey Activity. In *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers No. 4*. Paris, France: OECD Publishing.
- Office, Italian Trade Commission Shanghai. 2009. Market Report on China Biotechnology and Nanotechnology Industries.
- O'Neil, Patrick H., Karl Fields, and Don Share. 2010. *Cases in Comparative Politics*. 3rd ed: W,W. Norton.
- OPCW. 2012. *Report of the Scientific Advisory Board on Developments in Science and technology for the Third Special Session of the Conference of the States Parties to Review the Operation of the Chemical Weapons Convention*, RC-3/DG.1, October 29.
- O'Rourke, E., and M. Morrison. 2012. Challenges for Governments in Evaluating Return on Investment from Nanotechnology and Its Broader Economic Impact. In *OECD Background Paper*, edited by 2012.
- Parker, R., and R. Appelbaum. 2012. *Can emerging technologies make a difference in development?* Edited by Rachel A. Parker and Richard P. Appelbaum. New York: Routledge.
- Paterson, William E. 2011. The Reluctant Hegemon? Germany Moves Centre Stage in the European Union. *Journal of Common Market Studies*.

- Pavitt, Keith. 1998. "The Social Shaping of the National Science Base." *Research Policy* 27 (8): 793-805.
- PCAST. 2012. Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative. President's Council of Advisors on Science and Technology.
- Porter, Alan L., Jan Youtie, Philip Shapira, and David J. Schoeneck. 2007. "Refining Search Terms for Nanotechnology." *Journal of Nanoparticle Research* 10 (5): 715-728. doi: 10.1007/s11051-007-9266-y.
- Porter, M., C. Freeman, S. Nelson, K. Winter, K. Pavitt, G. Dosi, and P. Krugman. 1991. *The Geography of Trade*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Porter, Michael. 1990. *The Competitive Advantage of Nations*. New York, NY: Free Press.
- PRC. The State Council of the People's Republic of China Accessed November 2, 2013. <http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content183787.htm>.
- Raje, Jaideep. 2011. Commercialisation of Nanotechnology: Global Overview and European Position. Lux Research.
- Roco, Mihail C. 2011a. *Nanotechnology research directions for societal needs in 2020 retrospective and outlook*. Edited by Chad A. Mirkin, Mark C. Hersam and SpringerLink. United States: Dordrecht; New York: United States: World Technology Evaluation Center; Dordrecht; New York: Springer.
- Roco, Mihail C. 2011b. "The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years.(Editorial)(Report)." *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology* 13 (2): 427.
- Roco, Mihail C. Bainbridge, William S., Tonn, Bruce, Whitesides, George. 2013. "Convergence of Knowledge, Technology, and Society: Beyond Convergence of Nano-Bio-Info-Cognitive Technologies." World Technology Evaluation Center, Inc. <http://www.wtec.org/NBIC2/Docs/FinalReport/Pdf-secured/NBIC2-FinalReport-WEB.pdf>.
- Rodine-Hardy, Kirsten L. 2010. "Big Government for Small Technology: European Regulation for Nanotechnology." Paper prepared for delivery at the European Consortium of Political Research Conference in Dublin, Ireland June 17-21.
- Rodine-Hardy, Kirsten. 2013. *Global markets and government regulation in telecommunications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Roffey, R. 2013. "Russian Science and Technology is Still Having Problems, Implications for Defense Research." *Journal of Slavic Military Studies* 26 (2): 162-188.
- Rogers, Everett M. 1995. *Diffusion of Innovations*. 4th ed. New York: Free Press.

- Romer, Paul M. 1986. "Increasing returns and long-run growth." *Journal of Political Economy* 94:1002.
- Romer, Paul M. 1990. "The origins of endogenous growth. (models for studying growth)." *Journal of Economic Perspectives* 8 (1): 3.
- Rosecrance, Richard. 1999. *The Rise of the Virtual State*. New York: Basic Books.
- Russian Federal Technological and Export Control Service (FSTEC). 2011. *Spisok Tovarov i Tekhnologii Dvoynovo Naznacheniiia, Kotorie Mogut Byt' Ispolsovanyi pri Vooruzhenii i Voennoi Tekhniki i v Otnoshenii Kotoryikh Osushchestvliatsia Eksportnyi Kontrol* (List of Dual-Use Goods and Technnologies Capable of Use in Weapons and Military Equipment and Subsequently Subject to Export Control), December 17.
- Salamanca-Buentello, Fabio, Deepa L. Persad, Erin B. Court, Douglas K. Martin, Abdallah S. Daar, and Peter A. Singer. 2005. "Nanotechnology and the Developing World (Policy Forum)." *PLoS Medicine* 2 (5): e97. doi: 10.1371/journal.pmed.0020097.
- Sargent, John F. 2008. *Nanotechnology and U.S. Competitiveness: Issues and Options*. Edited by Service Library Of Congress Washington Dc Congressional Research.
- Sargent, John F., Jr. 2010. Nanotechnology: a policy primer.(Congressional Research Service)(Report).
- Sargent, John F., Jr. 2012. Nanotechnology: a policy primer.(Company overview).
- Saxenian, Annalee. 1994. *Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- SCENIHR. 2006. 3.2. Definitions and Scope: The Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Products of Nanotechnologies.
- Schmidt, Vivien A. 2006. "Procedural democracy in the EU: the Europeanization of national and sectoral policy-making processes." *Journal of European Public Policy* 13 (5): 670-691.
- Sciences, Chinese Academy of. "2013." Institutional Repository of Insitute of Mechanics Accessed November 2, 2013. <http://lxyd.imech.ac.cn/info/detail.asp?info=16874>.
- Sell, Susan K. 2003. *Private power, public law the globalization of intellectual property rights*. Edited by Inc ebrary. Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press.
- Shambaugh, D. 2002. *Modernizing China's military progress, problems, and prospects*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Shapira, Philip, and Jue Wang. 2009. "From Lab to Market? Strategies and Issues in the Commercialization of Nanotechnology in China." *Asian Businesses and Environment* 8 (4):

- 461-489.
- Shapira, Philip and Jue Wang. 2010. "Follow the Money," *Nature* 486 (2 December): 627-628.
- Shapira, Philip, and Jan Youtie. 2012. The Economic Contributions of Nanotechnology to Green and Sustainable Growth.
- Shirk, S. 1993. "The political logic of economic reform in China." In, Berkeley, CA: University of California Press.
- Siegel, Jakub, Olexiy Lyutakov, Vladimir Rybka, Zde,ka Kolska, and Vaclav .vor,ik. 2011. Properties of gold nanostructures sputtered on glass. In *Nanoscale Research Letters*.
- Singer, P., F. Salamanca-Buentello, and A. Daar. 2005. "Harnessing Nanotechnology to improve global equity: the less industrialized countries are eager to play an early role in developing this technology; the global community should help them." *Issues in Science and Technology* 21 (4).
- Singh, J.P. 1999. *Leapfrogging Development: The Political Economy of Telecommunications Restructuring*. Albany, NY: SUNY Press.
- Song, Y., X. Li, and X. Du. 2009. "Exposure to nanoparticles is related to pleural effusion, pulmonary fibrosis and granuloma." *European Respiratory Journal* 34 (3): 559-567. doi: 10.1183/09031936.00178308.
- Speshock, Janice L, Laura K Braydich-Stolle, Eric R Szymanski, and Saber M Hussain. 2011. "Silver and Gold Nanoparticles Alter Cathepsin Activity In vitro." *Nanotscale Research Letters* 6 (17).
- Stopford, John M., John S. Henley, and Susan Strange. 1991. *Rival States, Rival Firms: Competition for World Market Shares*. Cambridge University Press.
- Strange, Susan. 1996. *The Retreat of the State: The Diffusion of Power in the World Economy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tao, Yu, Yuxiao Tao, Biaobing Wang, Liuyang Wang, and Yanlong Tai, 2013. "A facile approach to a silver conductive ink with high performance for macroelectronics." *Nanoscale Research Letters* 8 (296).
- Technology, National Center for Nanoscience and. 2011. Nanotechnology Standard Research result Presented at the 11th Five-Year Plan National Prominent S&T Achievement Exhibition (in Chinese). National Center for Nanoscience and Technology.
- Tilly, C., and G. Ardant. 1975. *The Formation of national states in Western Europe*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Umar, Sirajo, Yuanfeng Liu, Yiguang Wu, Guangtao Li, Jiabo Ding, Runsong Xiong, and Jinchun

- Chen, 2013. "Highly potent silver-organoalkoxysilane antimicrobial porous nanomembrane," *Nanoscale Research Letters* 8 (164).
- UNCTAD, 2005. World Investment Report 2005: Transnational Corporations and the Internationalization of R&D.
- U.S. Food and Drug Administration, 2011. "Considering Whether an FDA-Regulated Product Involves the Application of Nanotechnology."
<http://www.fda.gov/RegulatoryInformation/Guidances/ucm257698.htm>
- U.S. Department of State, 2014. "Overview of U.S. Export Control System," June 15.
<http://www.state.gov/strategictrade/overview/>
- Wallerstein, Immanuel Maurice, 1974. *The modern world-system*. New York: Academic Press.
- Wassenaar Arrangement, 2013. *List of Dual-Use Good and Technologies and Munitions List*. April 12. [http://www.wassenaar.org/controllists/2013/WA-LIST%20\(13\)%201/WALIST%20\(13\)%201.pdf](http://www.wassenaar.org/controllists/2013/WA-LIST%20(13)%201/WALIST%20(13)%201.pdf)
- Weintraub, B., Y. G. Wei, and Z. L. Wang. 2009. "Optical Fiber/Nanowire Hybrid Structures for Efficient Three-Dimensional Dye-Sensitized Solar Cells," *Angewandte Chemie-International Edition* 48(47): 8981-8985.
- Westerlund, F. 2011. *Russian Nanotechnology R&D: Thinking Big about Small Scale Science*.: Stockholm: Swedish Defense Research Agency.
- White, Lynn Townsend, 1964. *Medieval Technology and Social Change*: Oxford University Press.
- Woods, Ngaire, 2006. *The Globalizers: The IMF, the World Bank and their Borrowers*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Xinhua, 2001. "President Jiang Zemin Meets with Delegates of 2001 International Nanomaterials Conference (in Chinese)." Accessed November 2, 2013. Retrieved from <http://www1.peopledaily.com.cn/GB/paper39/3710/455041.html>.
- Yang, D. 2010. *Technology of empire: telecommunications and Japanese expansion in Asia, 1883-1945*.
- Youtie, J., M. Iacopetta, and S. Graham, 2007. "Assessing the Nature of Nanotechnology: Can We Uncover an Emerging General Purpose Technology?" *The Journal of Technology Transfer* 33 (3): 315-329.
- Youtie, Jan, Philip Shapira, and Alan L. Porter, 2008. "Nanotechnology publications and citations by leading countries and blocs.(Report)." *Journal of Nanoparticle Research: An Interdisciplinary Forum for Nanoscale Science and Technology* 10 (6): 981.



Zheng, Y., and M. Chen. 2006. China plans to build an innovative state. Nottingham, UK: China Policy Institute.

Zysman, John, and Laura D'Andrea Tyson. 1983. *American industry in international competition: government policies and corporate strategies, Cornell studies in political economy*. Ithaca: Cornell University Press.

주요국 국방·군사 동향 시리즈 15-03

주요국의 나노기술 개발 및 정책 동향 (Nanotechnology and Related Policy Trend in a Globalized World)

발행일 2015년 11월 16일
발행처 국방기술품질원 방산정보팀
(055) 751-5370
발행인 이현곤
확인 김재우·홍성표
편저 홍현수
편집/발간 전고운 (055) 751-5386
인쇄처 경성문화사 (02) 786-2999

ISBN 979-11-5698-085-8 94390
978-89-97333-61-5 (세트)

GLOBAL DEFENSE MARKET SEMINAR

세계방산시장 전망 세미나

일 시 | 2015년 11월 19일(목) 14:00~17:00

장 소 | 국방기술품질원 국제회의실



주 최  **방위사업청**
Defense Acquisition Program Administration

주 관  **국방기술품질원**
DTaQ Defense Agency for Technology and Quality

후 원  **한국방위산업진흥회**
Korea Defense Industry Association

국방기술품질원

방산기술정보 간행물



국방기술품질원 기술정보부는 전 세계 국방과학기술정보와 방산시장 정보를 수집, 분석하여 국방기술 정보통합서비스(DTiMS)와 정기·비정기 간행물 또는 소식지의 형태로 관련기관에 제공하고 있습니다.

2006년 12월 창간한 격월간「국방과학기술정보」이외에도 2010년 3월부터 일일 소식지 Global Defense News를 국방망을 통해 관련기관에 이메일로 제공하고 있으며, 2009년부터 발간하였던 「국제 방산시장 분석보고서」를 2011년부터는 연감의 형태로 발간하고 있습니다.

또한, 2012년부터 이슈가 되는 전 세계 국방 군사 동향 정보를 「주요국 국방·군사 동향 시리즈」라는 정기 간행물 형태로 제공하고 있습니다.

전 세계 국방 기술정보, 방산시장 및 군사동향 등의 최신 정보가 군사전략 및 획득 정책수립과 방산 업계의 경영전략 수립, 그리고 학계의 연구 활동에 참고자료로 활용되기를 기대합니다.

2015년도 방산기술정보 주요 간행물 현황

- 국방과학기술정보 (매 짝수 월)
- 주요국 국방·군사 동향 시리즈 (5, 8, 11월)
- 획득동향 분석보고서 (12월 예정)
- 2015 세계 방산시장 연감 (11월 예정)

DTIMS를 통해 지난 발간물을 열람할 수 있습니다.

국방망 접속 URL : <http://dtims.mnd.mil>

인터넷 접속 URL : <http://dtims.dtaq.re.kr>

 **국방기술품질원**
Defense Agency for Technology and Quality

<http://www.dtaq.re.kr>
Tel: 055-751-5370

방산기술정보 인터넷 접속 방법



▶ Global Defense News 접속 방법

- 1 www.dtaq.re.kr
- 2 최신기술동향 클릭



▶ 국방과학기술정보 책자 열람 방법

- 1 www.dtaq.re.kr
- 2 홍보관-홍보브로셔 클릭
- 3 발간물 클릭



방산기술정보 국방망 접속 방법



▶ DTMS 회원가입방법

- 1 인트라넷 주소창에 http://dtims.mnd.mil 입력
- 2 상기 화면이 뜨면 우측 상단에 있는 회원가입 클릭하고 회원가입
- 3 회원가입 완료후 로그인

▶ 격월간 국방과학기술정보誌 열람 방법

- 1 http://dtims.mnd.mil → 2 간행물 클릭
- 3 국방과학기술정보 클릭



▶ Global Defense News 및 해외기술 동향 접속 방법

- 1 http://dtims.mnd.mil → 2 해외기술 동향 클릭



군수품 해외 입찰정보 열람안내

방위사업청과 국방기술품질원에서는 방위산업 수출 증진을 위해 수출 희망기업을 대상으로 방산수출 관련 정보제공, 글로벌 방산간소기업 육성, 해외시장 개척활동 지원, 수출품에 대한 정부인증(DQ마크) 사업 등 범정부 차원의 수출 지원 활동을 추진하고 있습니다.

이의 일환으로 '15년 5월부터 수출을 희망하는 우리 기업의 마케팅 활동에 도움을 드리고자 세계 각국의 국방분야 입찰 정보를 수집하여 방위사업청 D4B시스템을 통해 제공하고 있으니 많은 활용 바랍니다.

① "방산수출지원시스템" 인터넷 접속 <http://www.d4b.go.kr/>

번호	입찰공고명(계약)	품목수	종류	연비계약일	입찰기간	입찰국
1	입찰공고명(계약)	2	2015-07-05	2015-07-07	북미/아시아	미국
2	입찰공고명(계약)	1	2015-07-05	2015-07-07	북미/아시아	미국
3	입찰공고명(계약)	1	3,000,000	2015-07-05	2015-07-17	유럽
4	공로 타일 및공기 필터 교체	1	2015-07-05	2015-07-30	북미/아시아	미국
5	사이드로트 렌탈	1	2015-07-05	2015-07-30	북미/아시아	미국
6	컨테이너 보관장	2	2015-07-05	2015-07-30	북미/아시아	미국
7	사이드로트 렌탈용 컨테이너	1	2015-07-16	2015-07-27	북미/아시아	미국
8	군수	5	94,000,000	2015-07-16	2015-08-12	유럽

② "마케팅지원서비스"에서 "해외방산시장정보" 클릭

③ "해외입찰정보" 클릭 후 원하는 정보 (입찰공고명, 입찰기간, 무기체계분야, 입찰국가 등) 검색

- 3-1 해외입찰정보 2 상세 검색결과 예시
- 3-2 해외입찰원문정보(RFQ, Solicitation 등) 열람 예시

※ 추가 필요정보, 상세문의는 담당자(☎ 055-751-5387, 5388, 5392~95)로 연락바랍니다.