

2003년도 技術影響評價 보고서

2004. 3.

과 학 기 술 부
한국과학기술기획평가원

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

“2003년도 국가과학기술 기획 평가에 관한 연구”과제의 “2003년도
기술영향평가 보고서”를 다음과 같이 제출합니다.

2004년 3월

주관연구기관명 : 한국과학기술기획평가원

연구기간 : 2003. 2. 11 ~ 2004. 2. 10

연구책임자 : 박병무(과학기술기획평가단장)

참여연구원 : 이상엽(책임연구원)

정근하(책임연구원)

오세홍(선임연구원)

고대승(선임연구원)

박병원(선임연구원)

최문정(선임연구원)

손석호(원급연구원)

곽창규(위촉연구원)

정혜윤(위촉연구원)

요약문

I. 추진배경 및 법적 근거

□ 추진배경

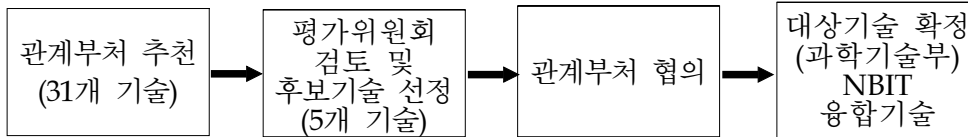
- 인간 게놈 프로젝트, 인터넷, 나노 칩 등 최근 과학기술의 급격한 발전은 국가경쟁력 뿐만 아니라, 일반 국민의 일상과 '삶의 질' 향상의 토대가 되고 있음
- 반면에 미래첨단기술은 예기치 않은 결과를 초래할 수도 있을 것으로 예견되기도 함
- 이에 따라, 과학기술을 우리사회가 바라는 방향으로 발전해 나가도록 효과적으로 관리하는 동시에 사회적 수용성을 제고시키는 것이 매우 중요함
- “기술영향평가”는 이러한 현실적 인식하에 새로운 과학기술의 개발·발전이 사회 다방면에 미치는 영향을 사전에 평가하는 예방적 차원의 제도적 장치로서 '03년에 처음 시범 실시함

□ 법적 근거

- 과학기술기본법 제14조 제1항 및 동법 시행령 제23조
 - 새로운 과학기술의 발전이 경제·사회·문화·윤리·환경 등에 미치는 영향을 사전에 평가(과학기술기본법 제14조)
 - 당해 기술이 국민생활의 편익증진과 관련 산업의 발전에 미치는 영향 분석과 경제·사회·문화·환경에 미치는 영향 및 부작용을 초래할 가능성이 있는 경우 이를 방지할 수 있는 방안 강구(시행령 제23조)

II. 대상기술의 범위 및 평가방법

□ 대상기술의 선정



□ 대상기술의 범위

NBIT 융합기술

나노기술(NT), 바이오기술(BT) 및 정보기술(IT) 등이 상호 유기적으로 융합하여 전혀 새로운 형태와 가능성으로 발현되는 기술 (<그림 1> 참조)

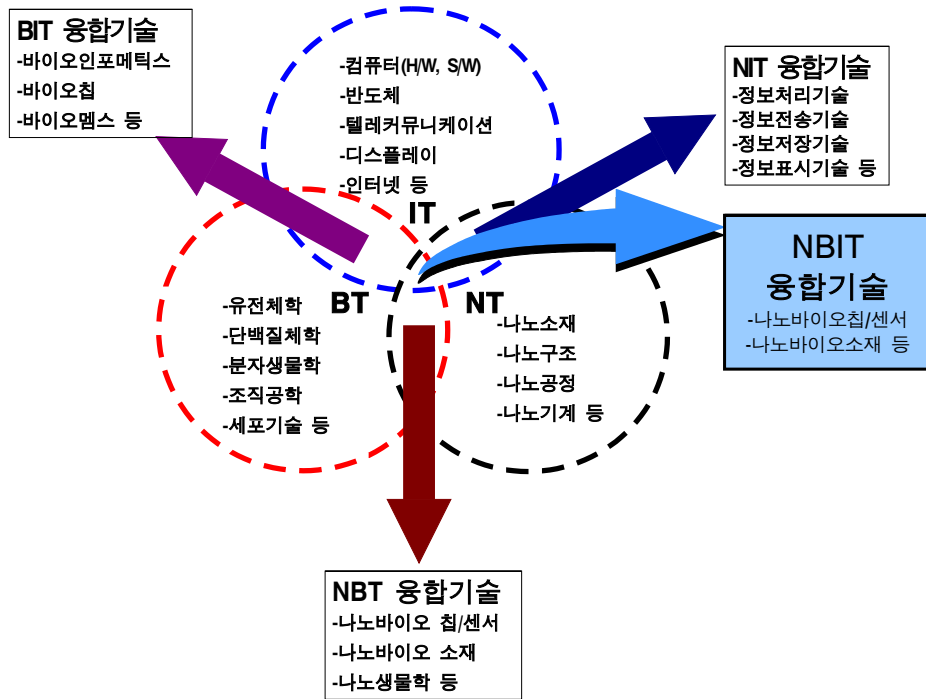
- ☞ "BIT융합"형태 : IT를 기반으로 하는 생명현상과 관련된 생체 콘텐츠의 개발, 공유 및 서비스를 제공하기 위한 핵심 원천 및 응용기술(예: 바이오인포메틱스, 바이오 칩 등)
- ☞ "NBT융합"형태 : NT 또는 BT 분야의 고도로 발전된 기술을 상호 채용하여 기술의 한계를 극복하거나 극복 과정중에 나타나는 신생 기술(예: 나노바이오 칩, 나노바이오 소재 등)
- ☞ "NIT융합"형태" : 기반적 특성의 나노 기술과 시스템적 성격의 정보통신 기술을 접목하여 반도체, 생명, 환경, 정보통신 등 여러 분야에 활용되는 신생기술 (예: 정보처리·전송·저장 기술 등)

□ 평가방법

전문가 패널(45명의 다양한 분야 전문가 참여)로 구성된 3개 전문분과 소위원회별로 "건강-쾌적한 삶의 구현", "국부창출", "사회안전과 국가안보 확보"라는 영향평가 기본 틀 속에서 융합기술이 미칠 영향에 대한 주제발표와 이에 대한 심층 토론 및 결과를 종합하는 방식으로 기술영향평가 실시(<그림 2>참조)

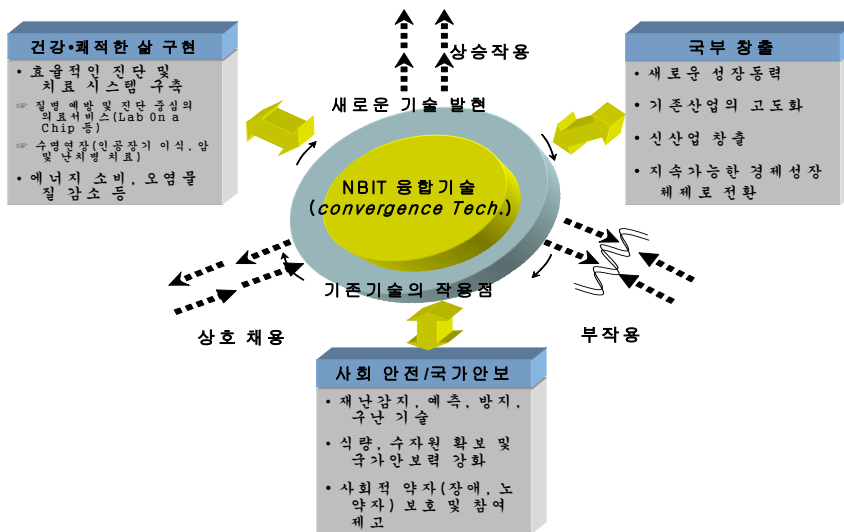
[그림 1]

기술영향평가 대상기술의 범위(예시)



[그림 2]

NBIT 융합기술에 대한 평가의 기본 틀



Ⅲ. 기술영향평가의 주요 내용

1. NBIT 융합기술개발이 산업·경제에 미칠 파급효과

□ 향후 10년에서 20년 사이에 우리의 '건강한 삶' 유지는 물론 국가의 '새로운 성장동력' 산업의 일부로 국부창출, 기존산업의 고도화, 신산업창출 그리고 지속가능한 경제성장체제로의 전환에 중요한 역할을 할 것으로 예상

□ NBIT융합기술의 시장가치

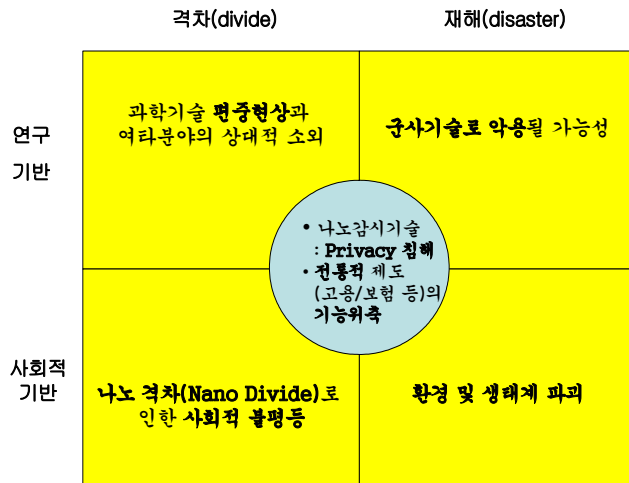
- 현재 NT, BT, IT는 21세기 3대 핵심기술로 획기적 기술혁신을 주도하고 있고, 이들 기술간 융합을 통해 창출되는 기술들은 엄청난 크기의 시장형성과 가치창출이 예상
- NBIT 융합기술의 근간이 되는 NT, BT, IT 3개 분야의 세계 시장 규모는 2010년에 약 9조 4천억 달러로 이중 NBIT 융합기술이 5%만 차지해도 그 규모는 약 5,000억 달러에 이를 것으로 추정됨

□ 현재 개발 중이거나 개발예정인 대표적 융합기술 및 제품

구분	세부기술분야	대표기제품(예)
NBT	나노바이오칩/센서	나노바이오센서, DNA칩, 단백질칩, Lab-on-a-chip(LOC) 등
	나노바이오소재	생체모방 나노소재, 기능성 나노소재 등
	나노생물학	바이오/화학 센서, 광바이오시스템, 생체나노머신 등
NIT	정보처리분야	양자컴퓨터, 나노전지 등
	정보전송분야	나노복합 광통신용 광소자, 실리콘 나노점의 전광소재/소자 원천기술제품 등
	정보저장분야	테라급 초고밀도 자기 정보저장 매체 등
	정보표시분야	차세대 리소그래피 원천기술, MEMS 기술제품 등
BIT	바이오인포매틱스 (Bioinformatics)	DNA해석 소프트웨어, 단백질해석 소프트웨어, 바이오 DB 마이닝 등
	바이오멤스 (BioMEMS)	초고밀도 집적회로, 초소형 기어, 초미세 기계구조물 등

2. NBIT 융합기술개발의 사회문화적 영향평가*

□ 격차형 영향



○ 과학내 편중 현상과
여타 분야의 상대적
소외 현상 발생

- 인간유전체프로젝트
(human genome
project, HGP) 초기에 제
기되었던 연구비 편중
문제

○ 나노 격차(nano divide)
로 인한 사회적 불평등
문제 발생 가능

- 새로운 기술로 인한 혜택과 위험을 균등하게 배분한다는 공평성 (fairness)의 원칙을 적용하여,
- 사회적, 생물학적 약자와 사회적 소수자에 대한 적극적 배려 주장
- ※ Green Peace는 나노 격차가 사회적 불평등을 야기할 수 있다고 경고

□ 재해형 영향

○ NBIT 융합기술이 군사적으로 악용될 경우 엄청난 파괴력 등 파장이
심각

※ 국제 시민사회 조직인 ETC 그룹은 미국 국방성이 미국에서
두 번째로 많은 연구비를 NBIT에 투자하고 있다고 지적

* 선진국의 사회문화적 영향평가 방법은 기술개발의 긍정적 측면보다 예방적 차원에서 위험·재
해 등 부정적 측면을 집중·논의하여 사회적 함의를 모색 하는 것이 일반적 추세임

- 나노 결정론(nano determinism)의 유포로 환경·생태계를 조작의 대상으로 다루는 등 파괴를 가속화할 가능성이 있음
 - ※ 나노 결정론 : 자연현상, 생태계 및 인간을 나노 수준으로 조작할 수 있고, 이를 통해 모든 문제를 해결할 수 있다는 세계관으로 유전자 결정론(genetic determinism)을 비유한 용어

□ 복합형 영향

- 감지와 검출 기술의 발달에 비해 상대적으로 늦은 치료와 처치법의 개발로 고용과 보험과 같은 사회의 중요 전통 제도의 성격 변화 및 사회적 기능을 위축시킬 가능성이 있음
- 극소화와 동시에 성능이 향상된 감시 기술 악용에 따른 프라이버시 침해 및 사회적 갈등을 초래할 가능성이 상존

3. NBIT 융합기술개발의 환경적 영향평가

□ 환경적 편익 측면

- 자원 및 에너지 이용 효율성 증대와 재생가능성 제고
 - NBIT 또는 나노기반 기술은 자원효율(물질+에너지) 증가, 폐기물 저감, 오염물질 배출 저감, 상품주기(Life Cycle)의 확장 등 환경적 편익을 가져다 줄 것으로 전망
 - (예시) • 탄소 나노튜브 → 기존 금속재료 대체 → 유해 중금속 대체
 - 태양전지나 수소저장 연료전지 등에 NBIT 융합기술 활용 → 에너지원의 탈 화석연료화와 지구 온난화 저감
- 환경 오염원의 원인 제거 및 감시기능 강화
 - 기존의 기술로는 분해 혹은 정화하기 어려웠던 환경 오염원 제거 가능(폐기물 처리 및 배출 공정 활용시) 등

□ 환경 유해적 측면

- 인간의 오감으로 식별할 수 없는 초미세 인공물질 등의 출현으로 인해 환경적으로 통제 불가능 상황 발생 가능
 - ※ NBIT 융합기술로 만들어진 나노물질/기술응용「(Quantum dots)」, 나노입자, 나노물질, 나노소자 등은 생물학적으로 분해되지 않거나(non-biodegradable) 분해되기 어려운 새로운 오염물질을 유발시킬 수 있음
- NBIT 융합기술에 의해 만들어진 나노 물질의 자기복제성이 환경에 끼칠 잠재적 위험 및 악영향도 있음
 - ※ 자연환경하에서 자발적으로 기능할 수 있는 나노 로봇이 자기복제성을 이용하여 자연환경(즉, 바이오매스)을 그들의 자기복제물(즉, 나노 매스)로 급속히 대체함으로 발생할 수 있는 악영향

□ 인체 유해적 측면

- NBIT 융합기술 혹은 그 부산물이 기존기술로 개발된 물질보다, 훨씬 강한 독성을 유발할 개연성이 존재
 - ※ 나노 물질이 덩어리(bulk) 형태일 때나 입자 형태일 때, 인체에 대한 독성 여부에 대해서는 선진국에서조차 아직도 논란 중이며, 인간의 유전자 변화를 유발할 가능성까지 언급되고 있음
- NBIT 융합 기술을 활용한 제품이 약물전달시스템이나 수술(나노머신) 등에 임의적으로 활용되어 의도하지 않은 부작용(독성) 발생 가능성도 존재

4. NBIT 융합기술개발의 법적 규율 및 윤리적 문제

- NBIT 융합기술이 매우 전문적이라는 특성만을 고려하면, 연구자 자신의 자율적 규율이 가장 이상적인 방법임
- NBIT 융합기술의 사회적 영향을 고려할 때, 법적 규율은 과학기술의 오용 방지, 공공의 신뢰 확보와 과학의 지속적 발전 측면에서는 효과적인 방법일 수도 있음
- 법적 규율방법에는 매우 다양한 경우와 방법을 고려할 수 있지만, 규율방법에 따른 장·단점과 한계도 있을 것임
- NBIT 융합기술에 대한 과도한 법적 규율이 가져올 법적 역설(paradox)을 염두에 두면서 강력한 법적 규율부터 전문가의 자율적 규율까지 다차원적으로 이루어져야 할 것임
 - ※ 법적 규율 내용 : 연구개발 허용 범위와 관리, 특허보호의 문제, 의료행위 활용시 법적 문제 및 건강보험 적용문제, 나노물질의 인체 이식시 법적 문제 등
- 그러나, 법적 규율에는 한계가 있으므로 이와 병행하여 “연구개발 관련 윤리적 규범”의 확보가 특히 중요함
- 연구자가 지켜야 할 윤리로는 잠재적 위험성 공개 윤리, 연구과정 및 결과의 객관성·공개성 확보 윤리, 연구자의 직업윤리 교육을 들 수 있음
- 이외에도 연구지원 주체가 지켜야 할 윤리, 연구결과를 활용하는 기업·정부가 지켜야 할 윤리도 고려해야 함

IV. 정책제언(policy recommend)

1. 미래기술 확보를 위한 정책제언

- 국제 경쟁력을 높이고 국가 기술을 리드할 진정한 미래형 융합 기술의 발전을 위해 필요한 지원 시스템 확립
 - 실질적인 시설 및 장비, 인적자원 등을 결합한 형태의 Core Center 설립
- NBIT 융합기술과 같은 미래기술연구를 담당할 인력양성 프로그램과 제도 도입이 바람직함

2. 사회제도적 측면의 정책제언

사회문화적·윤리적 측면

- NBIT 관련 신제품이 일부 부유한 사람들의 전유물이 되어서 기존의 빈부격차를 심화시킬 가능성을 방지하거나 억제할 수 있는 구체적이고 현실적인 대책 수립
- 다양한 차원에서 윤리적 논의 및 “연구자 윤리헌장” 마련

관련 교육 측면

- NBIT 관련 연구 종사자들에게 도덕적 책무감과 직업 윤리적 소양을 교육할 수 있는 강좌 개설 및 커리큘럼 개발
- 초등, 중등, 대학교별 특성에 맞는 과학교육 목표의 구체화 및 다양한 통합 과학기술을 반영하는 교육체제(연계전공 개발 등) 구축

□ 환경적 측면

- 예방원칙(Precautionary Principle) 접근 방식 선언
- NBIT의 환경 및 인체 위해성 평가를 위한 R&D 확충 및 예산 쿼터제 도입(예, ELSI 프로젝트의 제도화)

□ 일반 국민의 참여 측면

- 사회적 논의를 위해 일반국민을 대상으로 한 열린 토론향을 개설하고, 이를 법률적 규율과 연계(先 심도 있는 논의, 後 입법화 방식)
- NBIT의 잠재적 위험을 평가하고 공론화시키는 위험 커뮤니케이션(Risk Communication)의 전 과정 공개 등 활발한 대중토론 유도 및 토론 문화 형성

3. 기술영향평가 제도 및 운영측면의 정책제언

- 시범적 영향평가 결과를 토대로 분석틀, 평가기준, 절차를 종합한 “한국형 기술영향평가 모델”을 정립할 필요성이 있음
- 일반국민, 시민단체, 연구자 등 이해집단의 실질적 참여를 통해 영향평가의 속성인 양면성에 대한 사회적 합의 도출이 필요

목 차

I. 개요	1
1. 기술영향평가의 개념과 동향	1
2. 기술영향평가 추진체계 및 절차	12
II. 기술영향평가 대상기술의 범위	20
1. 기술영향평가의 초점(focus)	20
2. 우리 사회의 모습에 대한 전망과 니즈	23
III. NBIT 융합기술의 과학기술적 의미와 파급효과	30
1. NBIT 융합기술의 개념과 발현형태	30
2. NBT(Nano-Bio Technology) 융합기술	34
3. NIT(Nano-Infomation Technology) 융합기술	44
4. BIT(Bio-Information Technology) 융합기술	57
IV. NBIT 융합기술의 영향에 대한 평가	66
1. NBIT 융합기술의 경제(산업)적 영향평가	66
2. NBIT 융합기술의 사회문화적·환경적·법적 영향평가	80
(1) NBIT 사회문화적 영향평가의 국제동향	80
(2) 사회적 측면의 영향평가	86
(3) 환경적 측면의 영향평가	95
(4) 법적 측면의 영향평가	108

V. NBIT 융합기술의 사회적 함의와 정책제언	126
1. 사회적 함의 : 윤리적 태도와 규범	126
2. 정책제언	136
3. 기술영향평가의 제도화	140
VI. 결론	142
참고문헌	147
부 록 : 기술영향평가위원회 명단	149

표 목 차

〈표 1-1〉 영국·독일·덴마크의 기술영향평가제도 비교	6
〈표 1-2〉 기술영향평가 개념과 새로운 기술영향평가 개념	8
〈표 1-3〉 외국의 기술영향 평가주제의 예	8
〈표 1-4〉 5개 후보기술의 도출	18
〈표 3-1〉 융합기술의 활용분야 및 사례	31
〈표 3-2〉 각 융합기술의 범위	34
〈표 3-3〉 NBT 융합기술 응용분야	40
〈표 3-4〉 NIT 융합기술 분야의 분류	46
〈표 3-5〉 NIT 융합기술 분야의 기술별 정의	46
〈표 3-6〉 바이오인포매틱스 기술분야의 내용	61
〈표 3-7〉 바이오 일렉트로닉스 기술 분야의 내용	62
〈표 4-1〉 전 세계 Bio-IT 시장 매출현황 및 전망(2001-2006년)	75
〈표 4-2〉 차세대 성장산업 분야별 세계시장 규모	79
〈표 4-3〉 나노기술의 환경과 에너지 분야 적용사례	96
〈표 4-4〉 POPs의 유해성으로 고려되는 것들	99
〈표 4-5〉 NBIT 융합기술의 환경/인체에 대한 영향평가 시 고려할 점	99
〈표 4-6〉 전주기 관점(Life Cycle View)의 나노기술의 환경적 함의	100

그림 목 차

〈그림 1-1〉 기술영향평가의 추진체계	13
〈그림 1-2〉 2003년도 기술영향평가 주요 추진경위	15
〈그림 1-3〉 기술영향평가 대상기술 선정절차	17
〈그림 2-1〉 노령층 인구 및 생산가능 인구 변화추이	23
〈그림 2-2〉 우리나라 에너지 수입 변화추이	24
〈그림 2-3〉 미래사회 니즈별 중요도 평가결과	25
〈그림 2-4〉 의료서비스 패러다임의 변환	27
〈그림 2-5〉 자연재해 예방 및 저감기술의 비전	28
〈그림 3-1〉 NBIT 융합기술의 개념도	30
〈그림 3-2〉 NT, BT 및 IT의 상호 작용과 영향	32
〈그림 3-3〉 NBT 융합기술	35
〈그림 3-4〉 DNA 칩의 100배 확대사진	37
〈그림 3-5〉 단백질 칩 활용 예	38
〈그림 3-6〉 LOC 개발 사례	39
〈그림 3-7〉 NIT의 응용분야	44
〈그림 3-8〉 나노 코팅을 이용한 데이터 저장기술, 후지필름 개발사례 ·	48
〈그림 3-9〉 나노 저장기기 예	49
〈그림 3-10〉 반도체 기술의 진화	50
〈그림 3-11〉 나노정보처리 기술 활용 예	51
〈그림 3-12〉 NIT 융합기술의 응용사례	51
〈그림 3-13〉 미래형 시스템과 단말이 추구하는 특성	52

〈그림 3-14〉 NIT기술의 발전에 따른 실용화 예상시기(정보저장 분야) · 54	
〈그림 3-15〉 정보통신 사회와 NIT	55
〈그림 3-16〉 미래 정보통신 사회의 서비스 개념도	56
〈그림 3-17〉 BIT의 활용사례	57
〈그림 3-18〉 바이오 인포매틱스 개념	60
〈그림 3-19〉 바이오 인포매틱스 기술분야	61
〈그림 3-20〉 바이오 일렉트로닉스 기술분야	63
〈그림 3-21〉 Healthcare Information Society Technology Market	65
〈그림 4-1〉 SoC(System on Chip) 시장 전망	71
〈그림 4-2〉 전 세계 단백질 칩 시장 규모 전망(2001~2006년)	72
〈그림 4-3〉 전 세계 바이오 인포매틱스 시장 규모	76
〈그림 4-4〉 Global Life Sciences Market (\$Million/Year)	77
〈그림 4-5〉 NBIT 융합기술을 활용한 생태계 복원의 비전	97

I. 개 요

1. 기술영향평가의 개념과 동향

(1) 기술영향평가의 필요성과 개념

정보통신, 생명공학기술, 나노기술과 같은 첨단기술들은 인류 복지의 획기적인 증진, 고부가가치의 신산업 창출, 새로운 첨단 복합기술의 탄생 등 산업·경제적, 사회·문화적 측면에서 이전에 볼 수 없었던 무한한 가능성을 보이고 있다. 최근의 이러한 과학기술의 발전과 가능성은 과학기술의 거대화, 복합화, 융합화로 빚어지는 현상들로 삶의 질 향상 측면에서 국민의 일상생활에 많은 영향을 끼치게 될 것이다. 그러나, 한편에서는 기술이 사회·문화 전반에 걸쳐 미치는 영향이 커짐에 따라 동시에 인간성 상실, 자원낭비, 환경오염 유발, 기존 문화·윤리와의 상충 등과 같은 역기능을 초래할 가능성도 높다는 우려가 있다. 이에 따라, 과학기술과 관련된 사회적 갈등을 완화하고 바람직한 방향의 기술발전을 위해서는 과학기술의 발전에 따라 파생되는 영향에 대해 사전에 예측·평가함으로써 사후에 빚어질 수 있는 사회적 비용을 미연에 방지해야 한다는 주장과 더불어 기술영향평가의 중요성이 점점 강조되고 있다.

기술영향평가의 개념은 기술영향평가의 제도화 단계에 따라 약간씩 다르게 정의된다. 또한 기술영향평가는 한 가지 방법으로 이루어지는 것이 아니다. 즉, 평가대상의 성격과 목적에 따라 적절한 방법을 이용해야 한다¹⁾. 평가방법이나 주제가 같다고 해도 각 나라가 처한 상황에 따라 목적이나 기능이 달라질 수도 있을 것이다. 우리의 경우 우선 과학기술기본법에 근거하여 우리의 현실을 염두에 두고 기술영향평가의 기본목표와 방향에 충실할 필요가 있다. 처음으로 시행되는 만큼 시행착오와 한계를 인정하고, 기술영향평가가 건전하고 지속가능한 과학기술의 발전이 무엇인가에 대한 다양한 의견을 모을 수 있는 장으로서 이해될 필요가 있다.

우리나라 과학기술기본법 제 14조는 “새로운 과학기술의 발전이 경제·

1) 이 때문에 유럽의 전문가들은 “기술적인 문제가 논쟁의 중심이면 전문가-이해관계당사자 참여형태를, 윤리적·도덕적 문제가 집중 논의되는 경우면 대중참여 형태를 권장하고 있다(KISTEP, 2002:45).

사회·문화·윤리·환경 등에 미치는 영향을 사전에 평가"하는 것으로 함축적으로 규정하고 있다. 여기서 과학기술기본법에 제시되어 있는 기술영향평가의 개념을 이해하기 위해 기술영향평가의 앞으로의 역할과 기능적 측면에 초점을 두면 크게 두 가지로 구분할 수 있을 것이다.

첫째, 기술영향평가를 넓은 의미로 과학기술도 일종의 사회현상으로 볼 경우의 그 기능적 측면이다. 적어도 과학기술기본법에 제시된 개념을 올바르게 적용하는데 있어서 기술영향평가는 어떤 기능을 해야 하는가? Eijndhoven(1997)은 기술영향평가가 다음과 같은 8개의 기능을 가지고 있다고 한다²⁾. 여기에서 과학기술을 사회현상으로 볼 경우라도 기술영향평가가 이러한 기능을 전부 수행하는 것이 아니라 필요와 목적에 따라 그 강조점이 달라질 수 있을 것이다.

- ① 과학기술 발전에 대한 폭넓은 정보제공을 통해 의사결정 기능의 강화
- ② 기술의 통제, 대체기술의 개발, 평가에 대한 제안을 통해 현행 정책의 틀 내에서 중·단기 정책지원
- ③ 가능한 개발과 대안에 대한 정보를 제공함으로써 장기적인 정책개발 지원
- ④ 기술개발 초기에 기술개발이 초래할 예기치 않은 결과나 가능한 문제점에 대해 정보를 제공함으로써 조기경보의 기능
- ⑤ 사회집단의 기술개발에 관한 전략형성을 지원함으로써 기술에 대한 지식 및 의사결정 능력 확장
- ⑥ 사회를 위해 바람직하고 유익한 기술적 응용의 조사, 형성, 개발
- ⑦ 일반 대중의 기술수용 촉진
- ⑧ 과학자들의 사회적 책임성 증진

둘째, Coates and Finn(1979)에 따르면, 기술영향평가는 기술개발의 예기치 않은 그리고 의도하지 않은 결과와 관련되어 있다고 볼 수 있다. Coates

2) Eijndhoven, Josée van, 1997, "Technology Assessment: Product or Process?," *Technological Forecasting and Social Change* 54

and Finn은 의사결정자들과 대중이 과학기술에 대하여 더 지혜로운 결정을 내릴 수 있도록 도와주는 한 가지 방법으로서 기술영향평가를 강조하고 있다. 미래기술의 예기치 않은 위험성이나 사회적으로 파급효과가 큰 부분에 대해 그 가능한 결과를 예측하고, 이에 대비한 대책 등을 모색하는 것이다. 한편, Smits and Leyten(1988)은 미래는 다양한 행위자들의 상호작용의 결과로 만들어 지는 것이고 여기에 기술영향평가가 기여해야 한다고 한다.

이러한 맥락 하에서 03년도 기술영향평가는 기술발전과 결과들에 대한 분석 그리고 이러한 분석에 기초한 다양한 논의들로 구성되는 과정으로 “미래기술이 가져올 효과, 특히 사회문화적 파급효과가 큰 것들에 대해 위험적 요인들을 미리 예측하고 대비할 수 있는 사회적, 제도적 장치를 고려해보고 과학연구의 생산성 향상과 부작용 최소화를 동시에 도모할 수 있는 방안을 모색하는 것”이라고 할 것이다.

가타카(Gattaca)는 A,G,C,T 네 개의 유전자 염기 배열을 뜻하는 알파벳을 조합한 것으로, 유전자가 한 개인의 모든 것을 결정하는 ‘신세계’에 대한 우려를 다룬 영화다. 이 영화는 우리에게 사전지식이나 준비도 없이 새로운 사회를 맞이하는 일이 얼마나 위험한 것인가에 대한 경종을 울린다.…인간 게놈프로젝트의 완성이 수년 앞으로 닥친 지금, 현실은 어떤 방향으로 향하고 있는가. 낭포성 섬유증·헌팅턴병·혈우병 등 단일한 유전자 결합으로 유발되는 질병이 먼저 퇴치될 것이고, 고혈압·심장병·당뇨병 등 환경적 영향이 유전적 요소와 결합된 복잡한 질병 역시 미래에는 그다지 두려운 질병이 되지 않을 것이다. …기술은 빠른 속도로 발전할 것이고 다양한 서비스가 ‘합리적 가격’에 제공될 것이다. 유전자치료를 감당할 만한 재력이 있는 부모라면 ‘좀더 건강하고 지능 높고 체격 좋고 다정한 성격의 잘생긴 자녀’를 낳고 싶지 않을까. 결국 경제력에 따라 인류가 유전적 조작을 통해 ‘우월한 계급’과 ‘그렇지 않은 계급’으로 나뉠 것이란 우려를 낳는다.

자료 : 한겨레, [21세기 기획] 유전자 조작통한 인간 개량의 ‘빛과 그늘’ , 1998. 10. 26

(2) 선진국의 기술영향평가 기구 및 형태

과학기술 선진국들은 1970년~80년대부터 과학과 사회의 마찰을 줄이려는 노력을 해왔다(중앙일보, 2003. 7. 2 : 건강·과학면). 의회에 사무국을 두거나 독자적인 기구 설립, 시민단체 활동 등을 통해 과학과 사회간의 중재자 역할을 하도록 한 것이다. 과학기술이 미래 사회에 어떤 영향을 미칠 것인지를 미리 알아봄으로써, 불필요한 마찰을 줄여보자는 취지이다.

일부는 현안을, 일부는 정책 구상단계부터 이해관계자들이 검토에 참여함으로써 활동의 효율을 높여왔다.

1972년부터 95년까지 20여 년간 활동한 미국 의회 산하 기술영향평가국(OTA)이 대표적이다.

OTA 기술영향평가

OTA에서는 74년 이후부터 90년대에 이르기 까지 방법론에 대한 논의가 계속되었다(Wood, 1997). 이런 과정을 거치면서 OTA가 채택한 방법론은 다양한 이해당사자들의 참여를 보장하는, 기술에 대한 일종의 정책분석(policy analysis)이 되었다. OTA의 전형적인 연구의 경우에는 이해당사자들의 자문위원회와 워크샵 등을 포함하고 다단계의 심사과정을 거쳐 하나의 보고서를 만들어내는 복잡한 심사과정과 엄밀함을 추구하는 방법론을 따름으로써 많은 시간과 비용이 소요되게 되었다. 또한, 정치적으로 중립적인 정보를 만들어 내어야 했고 이를 위해서는 치밀한 다단계의 심사과정을 거칠 수밖에 없었다(Bimber, 1996 : Whiteman, 1997; Herdman and Jensen : 1997). 이런 과정을 거치면서 정교화 된 OTA의 방법론은 기술영향평가의 OTA 패러다임이라는 독자적 분류를 만들어낼 정도로 독특한 것이었다. (van Eijndhoven, 1997) 그러나, OTA는 95년 재정지원중단으로 폐쇄되었다. 폐쇄된 이유는 매우 다양했지만 폐쇄이후 내려졌던 여러 비판을 수용해서 새로운 방법론을 고안하려는 흐름도 있다.

자료 : 김병운 등, 2003., 「“과학기술과 사회”의 주요 쟁점 분석 연구」, 정책연구 2003-03, 과학기술정책연구원, pp.79-107

OTA는 미 의회 의원들의 과학기술정책 수립에 필요한 정보를 제공하는 것이 주된 임무였다. 이들의 정보나 기술영향평가는 미국의 과학기술 정책에 많은 영향을 미쳤다. 오존층을 파괴하는 초음속 비행기의 개발을 사전에 막고, 맹독성 농약 등을 시판하지 못하게 하는 성과를 올렸다. 또 과학기술이 경제에 얼마나 중요한 영향을 미치는가를 인과관계에 따라 체계화하기도 했다. 그러나 과도한 예산사용 등으로 활동이 중지됐다.

유럽 각국은 미국의 활동에 자극을 받아 80년대부터 활발하게 이러한 노력을 했다. 유럽의 여러 나라들에서 기술영향평가 기구를 만들게 된 동기는 OTA의 경우와 그리 다르지 않았지만, 구체적인 운영방식이나 형태는 제도적, 문화적 차이 등에 따라 다소 차이를 보였다. 83년 프랑스의

OPECST(Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifique et Technologie)가 설립된 것을 시작으로 네덜란드는 86년 독립기구로 네덜란드 기술평가사무국(NOTA³⁾)을, 독일은 87년 TAB(Technology Assessment Bureau of German Parliament)을, 영국은 89년 의회 과학기술사무국(POST)을 설치했다. 이들 기구들은 대규모 조직형태를 띤 OTA와 달리 10명 내외의 실무진들로 구성되어 있는 게 보통으로 기존의 연구 성과들을 종합하고 의회활동에 도움이 되도록 가공하는 매개자 역할에 치중하고 있다.

합의회의

합의회의는 1987년 덴마크에서 처음 시작되었다. 합의회의는 과학상점, 시민배심원제, 시나리오워크샷, 참여설계, 시민조사위원회 등과 함께 과학기술분야의 시민참여모델의 하나로 계획된 것이다. 합의회의는 사회적으로 논쟁이 되는 과학 및 기술과 관련된 주제에 대해 평가의 임무를 가진 10-16명의 시민들로 구성된 공공적 탐구로 정의될 수 있다. 이들 보통(lay) 사람들이 전문가 패널에 질문과 관심사항을 이야기 하고, 전문가의 대답을 평가하고, 그들끼리 토론하는 과정을 거친다. 그 결과는 회의의 종결과 더불어 보고서의 형태로 대중에게 발표된다. 합의회의는 기존의 전문가들 간의 토론, 또는 이해집단간의 토론을 넘어, 그 범위를 일반시민들에게로 확대한 점에서 기존의 방법과는 큰 차이가 있다. 이것은 과학기술정책이 일반 대중의 삶에 지대한 영향을 미친다는 점에서, 그리고 다른 한편에서 과학기술은 대중의 이해와 지지 없이는 인류의 이익을 위한 방향으로 발전할 수 없다는 점에서 매우 중요하다고 평가된다.

자료 : 김명식, 2001, '생명복제, 합의회의, 심의민주주의', 과학기술학연구 1권 1호, pp. 126-127.

이들 기구는 의회와 행정부, 이해관계당사자 등을 잘 연결하고, 평가과정에서 나타나는 문제를 관련단체에 피드백하여 부정적인 영향을 사전에 막는데 많은 기여를 했다. 이런 차이 외에도 80년대 중·후반부터 네덜란드와 덴마크를 중심으로 합의회의를 기술영향평가의 방법론으로 활용하거나, 구성적 기술영향평가가 모색되었다(이영희·김병목, 1997;김환석·이영희, 1994).

3) 1994년 6월에 라테나우 연구소로 개명되었다.

〈표 1-1〉 영국·독일·덴마크의 기술영향평가제도 비교

구분	영국	독일	덴마크
담당기관	POST (Parliamentary Office of Science and Technology)	TAB (Technology Assessment Bureau of the German Parliament)	DBT (Danish Board of Technology)
설립년도	1989년	1989년	1985년
소속	의회	연방의회 (Bundestag)	교육부 (정치적으로는 의회와 밀접한 연관)
설립목적	- 기술영향평가 - 의회에 과학기술 관련 정보제공	- 기술영향평가 - 정책자문	- 기술영향평가 - 대중계몽 - 과학기술 의제 설정
사무국 직원수 ('02. 10월 현재)	총 15명 (정직원 7명, 객원연구원 3명, 인턴 5명)	총 11명 (정직원 7명, 비서직 2명, 시간제 2명)	총 20명 (연구원 9명, 행정원 6명, 시간제 5명)
1년 예산 ('02년)	-	200만 유로 (운영비 100만 유로, 사업비 100만 유로)	14백만 DKr (약 200만 달러)
연구수행 방법	사무국이 직접 과제 수행	외부 연구소에 연구 위탁	과제담당자가 외부 전문가를 이용
주요 방법론	외부 전문가의 참여와 협조를 통한 POST 내부의 전문가의 연구	외부 전문가 활용	외부 전문가와 일반 시민들의 참여
주요 결과물	- 4페이지 분량의 브리핑 보고서(20편/년) - 100페이지 내외의 연구보고서(2편/년)	- 모니터링 보고서 - 연구보고서 (5-10과제/년) - 소식지	- 뉴스레터 - 연구보고서 (8-15과제/년)
대상주제의 예	- 핵문제 - 질병저지 - 대체농업 - 폐기물재순환 - 일상적인 불법의약품과 그 영향 - 위험평가와 환경보호 - 나노기술 - 건물의 에너지 효율 - 스크린폭력 - 인간유전체 연구 등	- 환경기술과 경제발전 - 정보통신기술 - 유전자치료 - 재생가능자원 - 환경과 건강 - 기술의 양면성과 모순 - 연료전지기술 - 지속가능한 발전 - 이종간 이식 - 인공복제 동물 - 유전자 진단 등	- 지하수자원 - 지속가능한 에너지 시스템 - 도시생태학 - 미래의 도서관 - 식품의 방사선조사 - 인간유전체지도 - 유전자조작동물 - 자가용의 미래 - 동물복제 등

(3) 기술영향평가의 최근동향

80년대에 급격하게 성장한 과학기술사회학과 혁신이론 등의 이론적 성과와 구성적 기술영향평가와 합의회의 등의 실험에 힘입어 80년대 후반부터 90년대 초에는 OTA의 기술영향평가에 비해 ‘새로운’ 기술영향평가 방법론을 강조하는 흐름이 있었다. 이러한 흐름은 과거와는 다른 이론적 기반을 강조하면서 기술영향평가를 과학기술정책의 새로운 관점을 제시해주는 것으로 이해했다(〈표 1-2〉 참조). 또한, 유럽에서는 80년대 후반부터 대중의 과학이해와 위험에 대한 논의에 힘입어 기술영향평가에서도 대중들과의 접점을 강조하는 경향이 나타났다.

OTA에 가까운 접근법을 한다고 알려진 영국의 POST에서도 과학기술계와 사회와의 의사소통을 강조하고, 덴마크의 기술위원회의 경우 연구자 중심의 기술영향평가도 있지만 미래패널(Future panels), 공청회 등을 통해 이해당사자와 일반시민들이 참여하는 다양한 기술영향평가 기법을 활용하고 있다. 네덜란드의 라테나우 연구소는 90년대 중반부터 다양한 행위자들이 서로 다른 가치관, 문제정의방식, 해결책을 갖고 있다는 전제하에 일종의 포럼을 통해 미래에 대한 구상을 만들어 가는 상호작용적 기술영향평가⁴⁾를 제안하고 있다. 유럽연합 수준에서는 제4차 프레임워크 프로그램의 ‘목표지향적 사회경제 연구’(TSER)의 일부로 유럽기술영향평가네트워크(ETAN)가 구성되어 지구 온난화, 노령화와 기술 등 9개 사안에 대한 프로젝트를 수행했다. 역시 TSER의 지원을 받아 수행된 유럽참여기술영향평가(EUROTA) 프로젝트는 유럽 6개국 16가지 사례를 분석하고 참여적 기술영향평가를 수행하는데 도움이 될 수 있는 권고사항들을 제시하고 있다.

여기서 주요국들이 다룬 기술영향평가 주제를 간략하게 정리해 보면 〈표 1-3〉와 같다. 〈표 1-3〉를 살펴보면, 대체로 대상기술의 전반적인 것을 평가하는 경우도 있지만 대부분은 특정한 영향에 대해 초점을 맞추려는 경향이 강하다. 또한 미래의 신기술 뿐 아니라 현재 연구와 개발이 진행 중인 기술도 포함하여 평가하고 있는 것을 알 수 있다.

4) 상호작용적 기술영향평가는 사실과 가치의 불확실성이 높은 조건에서 특히 유용할 수 있다고 제안되고 있다.

〈표 1-2〉 기술영향평가 개념과 새로운 기술영향평가 개념

전통적인 개념의 기술영향평가	새로운 개념의 기술영향평가
과학의 지배적인 역할	연구자와 사용자의 동등한 역할
연구에 대한 높은 기대	기술영향평가 결과에 대한 신중한 기대
결과물의 형태는 연구보고서	결과물의 형태는 연구 및 토론
문제를 정의하는데에는 관심이 적음	문제를 정의하는 데에 관심이 높음
단일한 기술영향평가 기구	다양한 기술영향평가 기구
기술영향평가 정보의 도구적 활용	기술영향평가 결과의 개념적 활용
기술영향평가의 결과와 의사결정의 결합	기술영향평가와 의사결정의 “조정”
자율적인 기술	인간의 창조물로서 기술

자료 출처 : Smits, Leyten, and Hertog (1995 : 280)

〈표 1-3〉 외국의 기술영향 평가주제의 예

국가	평가주제(예시)
미 국	<ul style="list-style-type: none"> • HIV 백신에 대한 역반응: 의학적 · 윤리적 · 법적 이슈(1995) • 네트워크 환경에서 정보보완과 프라이버시(1994) • 생체에너지를 위한 작물생산의 잠재적 환경 영향(1993) • 화학무기의 처리: 대안기술(1992)
프 랑 스	<ul style="list-style-type: none"> • 보건과 환경의 연관성(1996) • 자연재해예측과 방재기술(1995) • 환경보호를 위한 전기자동차의 타당성(1993)
네덜란드	<ul style="list-style-type: none"> • 생명과학에 대한 프로그램 • 정보통신에 관한 공공토론을 위한 의제 • 과학과 윤리기반
덴 마 크	<ul style="list-style-type: none"> • 유전자치료(1995) • 식품과 환경에서 화학물질의 위험성 평가(1995) • 교통정보기술(1994)
영 국	<ul style="list-style-type: none"> • 수송기반에서 터널의 미래역할 • 일상적인 불법의약품과 그 영향 • 나노기술, 영국의 과학과 그 응용
독 일	<ul style="list-style-type: none"> • 열핵융합(2002) • 새로운 매체와 문화(2001) • 유전자 진단 : 현황과 전망(2000)

한편, 미국에서도 OTA 폐쇄 이후, 그동안 OTA에 대해 내려졌던 여러 비판을 수용해서 새로운 방법론을 고안하려는 흐름이 있다. 이를 위해 현재까지 제기된 방법으로는 실시간 기술영향평가(real-time technology assessment)가 가장 두드러진다. 실시간 기술영향평가는 사회과학과 정책연구를 연구개발의 초기단계부터 통합해야 한다는 문제의식에서 출발하고 연구프로젝트의 초기부터 통합되어 있지만 대안적인 기술발전경로를 만들어내려는 목표를 갖고 있지 않다는 점에서도 구성적 기술영향평가와 다르다. 실시간 기술영향평가를 실시하는 방법으로는 인간유전체사업의 윤리·법·사회적 측면 연구(Ethical, Legal, and Social Implications, ELSI)⁵⁾처럼 대형연구개발사업의 일부로 포함시키는 방법을 긍정적으로 제기하고 있다. 실시간 기술영향평가는 최근의 기술정책 연구동향 및 과학커뮤니케이션의 이론적 성과를 적극적으로 수용하여 평가기법으로 활용할 것을 제안하고 있다는 강점이 있다(Guston and Sarewitz, 2002; 김병운 등, 2003).

최근의 기술영향평가는 기술의 발전경로에 변화를 주겠다는 목표아래 다양한 주체들의 예측과 분석을 존중하며 여러 행위자들의 활발한 상호교류를 통한 되먹임 과정을 거쳐 상호이해와 합의형성을 이루어나가려는 노력이라고 할 수 있다. 또한 불확실한 기술이 미래에 어떤 방향으로 전개될 가능성들이 있으며, 그중에서 어떤 가능성이 가장 바람직한 대안이며, 이를 위해서는 어떤 활동들이 필요한 지에 대한 지식을 만들어 내는 과정으로 볼 수 있을 것이다.

여기서 좀 더 구체적으로 각국이 기술영향평가를 어떻게 생산적인 방식으로 이용해 왔는지를 ELSI 연구동향을 통해 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

최근 영국은 바이오테크 산업의 육성에 어떤 나라보다도 적극적인 자세를 취하고 있으면서도 그것이 가져올 사회적 파급효과와 문제점에 대한 연구도 동시에 강조하고 있다. 이를 통해 영국은 바이오테크 산업과 유전체학의 진흥책 저변에 기술발전이 신속하고 유연하게 대응할 수 있는 규제 장치를 확보하

5) 생물학의 아폴로발사계획으로 일컬어지는 게놈프로젝트는 출발부터 그 윤리적 파장을 예견, 총 예산의 약 5%를 윤리·법·사회적 합의(ELSI·엘시) 프로그램에 투입하고 있다. 과학연구사상 최초로 그 윤리사회적 파장을 출발과 동시에 우려한 배려였다. 엘시의 과제는 게놈프로젝트의 진행으로 예견되는 사회적 문제들에 대한 논의와 교육 등이다. 보험사가 가입때 유전자검사를 요구하는 경우, 취업때 유전자 검사를 요구하는 경우, 유전자정보가 본인의 동의 없이 유출되는 경우, 디엔에이 정보은행의 유지·이용 등과 관련된 문제를 논의하고 의료진과 법조인 등을 상대로 한 교육을 목표로 한다. ELSI는 인간게놈 연구의 '윤리적, 법적, 사회적 합의'를 연구하고 그 실천적 대안을 모색하는 것으로 90년부터 추진되어 왔다.

고 있다. 영국은 웰컴기금과 유럽집행위원회 등의 지원으로 생명윤리, 생명법, 바이오테크에 대한 사회적 담론과 태도, 생명윤리 관련 의사결정에 사회적 태도를 통합하는 방안 등이 집중적으로 연구하고 있다.

한편, 생명윤리 문제에 대하여 가장 엄격한 규제를 시행하고 있는 독일은 95년 인간계놈 프로젝트에 처음으로 ELSI 프로그램을 포함시켰고, 구체적이고 실천적 함의가 높은 문제에 관심을 기울이는 경향을 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 90년 후반부터 바이오테크 산업에 대한 정부 지원이 강화되고 있다. 마지막으로 스웨덴의 ELSA 프로그램은 새로운 연구프로젝트와 동시에 미래의 연구자를 발굴하는데 중점을 두고 있으며, 연구비 지원과 함께 다양한 세미나 조직을 지원한다. 구체적으로는 유전학과 사회적 수용, 유전학과 여타 분야의 대화, 유전공학 관련 경제학·기술영향평가 및 법적 보호, 미생물과 식물의 유전학, 유전학 관련 윤리 존중(generic integrity) 등 8개 범주로 구분되어 있다⁶⁾.

최근의 이러한 사례들은 기술영향평가가 과학기술의 발목을 잡는 것이 아니라 지속가능한 발전을 이루고 사회문화적 영향을 고려한 과학기술의 발전에도 모호하기 위해서 꼭 필요하다라는 점을 잘 나타내 보여주고 있다. 다시 말해 기술영향평가는 지속가능한 발전을 위한 고도의 지식 창출 및 사회적 수용성 확보 그리고 대형사고나 큰 규모의 재난을 미리 경고함(early warning)으로써 경제적, 사회적 손실을 줄여 나가는 중요한 사회적·제도적 장치라고 할 것이다.

6) 과학기술부, 인간유전체 연구의 ELSI 기반구축 및 확산 프로젝트, 2003, pp.15-16.

생명 과학윤리 사회적 합의 필요...윤정로 KAIST 과학사회학교수

“과학기술은 미래 국가경쟁력의 운명을 쥐고 있습니다. 그러나 국민들의 공감과 지지가 없이는 더 이상 앞으로 나아갈 수 없습니다.”

과학기술부 프런티어사업단의 ‘엘씨(ELSI : Ethical, Legal and Social Implication)’ 연구 프로젝트를 맡고 있는 윤정로(한국과학기술원^{KAIST} 과학사회학) 교수는 ‘과학자들만 과학을 하는’ 시대는 끝났다고 강조한다. 인간배아 연구와 같이 과학으로 인해 야기되는 문제들은 사회적 합의가 없이는 연구조차 불가능하다는 것.

“국가 전체로 보면 농민 문제와 복지 문제 등 시급한 문제가 한둘이 아닙니다. 그런데 과학기술 연구 예산을 대폭 늘려 국가 전체예산의 5%를 투입하고 있습니다. 농민들이 어떤 식으로 이해할까요?” 윤 교수는 싫든 좋든 과학자들이 사회로부터 동의를 받는 과정을 반드시 밟아야 한다고 주장한다.

엘씨는 과학으로 야기되는 사회적 윤리적 쟁점들을 연구하고 사회적 이해와 합의를 이끌어내는 것을 목표로 한다. 서로간의 충돌되는 가치를 설득해 마찰부분을 최소화하는 한편 필요한 사회적 장치를 만들고 부작용을 견제하는 것이다.

엘씨는 지난 90년 미국에서 구체적인 연구형태를 갖추기 시작했다. 인간게놈 프로젝트를 맡은 왓슨이 초대 소장직을 수락하면서 엘씨 연구의 필요성을 주장, 연구비의 3~5%를 엘씨연구에 지원하겠다고 공언한 것이 계기가 됐다.

이 같은 사회적 합의를 이끌어내기 위해선 국민들이 가진 생각을 조사한 통계자료가 중요하다. 또 다른 나라의 조사결과와 비교할 수 있는 데이터베이스 구축도 필요하다. 윤 교수는 이를 위해 내년 4월 예비조사를 실시하고 9월에 본 조사를 실시할 계획이라고 밝혔다.

자료 : 파이낸셜 신문, 생명윤리, 2001. 9. 19.

2. 기술영향평가 추진체계 및 절차

최근 과학기술의 급속한 발전으로 인해 많은 부작용이 우려되면서 과학연구의 윤리문제와 과학자의 책임에 관한 논의가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 특히 생명연구와 관련된 윤리문제가 중점적으로 다루어지고 있으며, 생명공학의 광범위한 적용으로 인한 법적·사회적·윤리적 문제점을 다룬 본격적인 연구가 증가하고 있다. 이와 관련하여 유네스코 한국위원회는 시민단체들과 공동으로 1998년과 1999년에 '유전자조작식품', '생명복제기술'에 대한 합의회의를 개최하여 이 분야의 문제점을 제시한 바 있다. 이러한 배경에 따라 2001년 7월 17일부로 발효된 과학기술기본법에는 기술영향평가의 도입을 명시하게 되었다.

그 결과로써 2003년도에 시행한 제1회 기술영향평가는 우리나라에서 공식적으로 시행하는 최초의 기술영향평가라는 의의와 함께 향후 기술영향평가의 제도화와 개선을 위한 많은 과제를 안고 있다. 2003년도 기술영향평가의 추진체계와 경과를 살펴보면 다음과 같다.

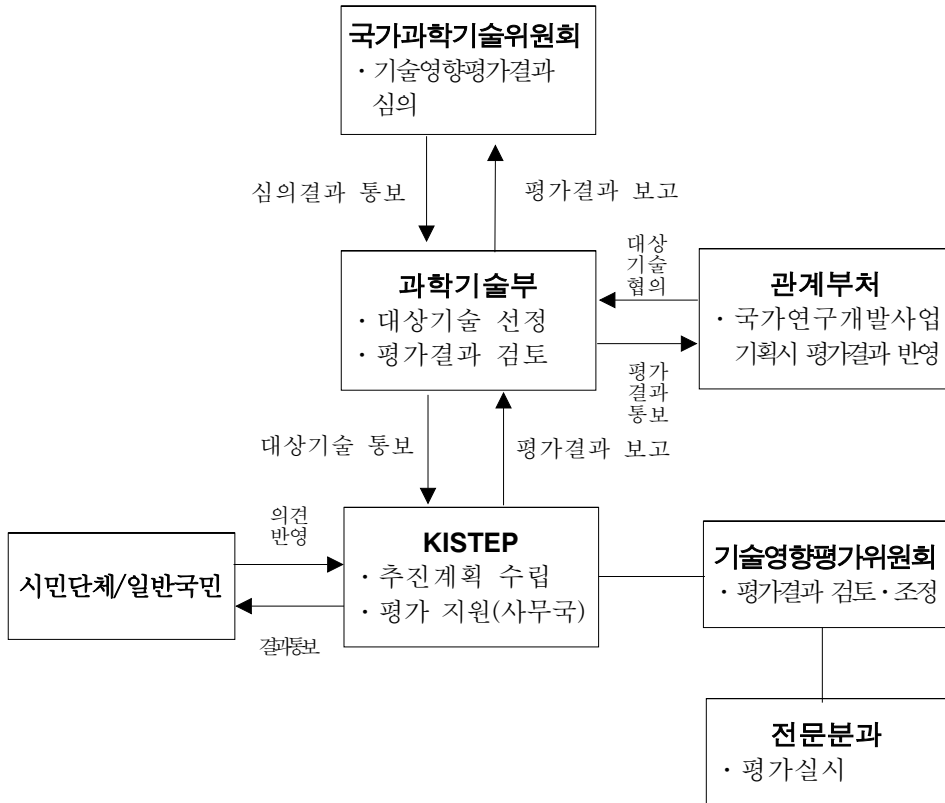
(1) 기술영향평가 추진체계

2003년도 기술영향평가는 우리에게 매우 낯선 제도로 정부차원에서는 처음으로 실시된다는 점을 감안하여 추진되었다. 이에 관계부처와 관련분야 전문가를 비롯한 이해당사자와 시민단체의 참여를 적극적으로 유도하여 기술영향평가에 대한 이해도를 제고하는 방향에 초점을 두었다. 2003년도 사업은 시범사업 성격으로 추진되었으며 향후 수행될 기술영향평가의 방법론 모색 및 문제점 발굴에 중점을 두었다.

〈그림 1-1〉에서 보는 바와 같이, 기술영향평가를 수행할 위원회의 구성은 기본적으로 평가결과를 검토하고 조정하는 역할의 기술영향평가위원회와 분야별 전문가로 구성된 분과위원회로 구성되었다. 기술영향평가위원회는 위원장, 전문분과 위원장, 산·학·연 전문가 시민단체 대표 등 13인으로 구성되었다. 기술영향평가위원회는 전문분과의 활동범위 및 세부내용에 대한 검토 및 조정 역할을 수행하였다.

한편, 전문분과위원회는 과학기술, 산업경제, 사회문화 분과로 나누되, 각

각의 분과위원회는 평가위원회 및 관계부처에서 추천하는 10인 내외의 전문가로 구성되었다⁷⁾. 또한 전문분과의 운영을 원활하게 하기 위해 과학기술분과 이외의 분과에도 평가대상기술 전문가가 반드시 포함되었다. 전문분과는 자율적 운영 및 분과별 특성을 반영한 평가결과 도출에 중점을 두었으며, 분과위원장은 평가위원회에서 수행내용을 주기적으로 발표하도록 하였다.



〈그림 1-1〉 기술영향평가의 추진체계

7) 각 전문분과는 국무조정실 등 7개 부처에서 2인씩 추천을 받아 구성되었다.

기술영향평가의 절차는 기술영향평가위원회에서 논의된 바와 같이 기본적으로 5단계 또는 4단계로 나누어 볼 수 있다. 즉, 기술영향평가의 기본적인 단계는 다음과 같이 범위, 기술, 영향, 정책(STIP, Scope, Technology, Impacts, Policy)으로 구분할 수 있다(기술영향평가위원회, 1차 회의자료). 이러한 기본적인 절차에 따라 2003년 기술영향평가는 <그림 1-2>와 같이 추진되었다.

[1 단계] : 평가주제 선정과 평가의 폭, 시간범위 설정

- 주제는 기술자체 또는 기술을 적용함으로써 발생하는 사회적 문제임.
- 평가의 폭을 설정할 때는 좁게 정의된 기술만을 볼 것인가, 아니면 관련된 여러 기술들을 함께 볼 것인가를 결정함. 이 때 다루어야 할 시간범위까지 결정



[2단계] : 해당기술 또는 문제해결에 핵심적인 것으로 간주된 기술을 면밀하게 기술(記述)

- 주요 기술 뿐 아니라 보완기술과 대안기술, 또는 경쟁기술까지 포함해야 하며, 기술의 진화 경로에 대해서도 주의



[3단계] : 긍정적·부정적 효과에 대한 영향분석

- 긍정적 효과는 해당 기술로부터 발생할 이익, 현재의 기술, 또는 경쟁하는 기술과 비교했을 때의 우월성을 분석
- 부정적 효과는 해당기술에 잠복한 위험과 이로 인해 발생할 수 있는 악영향을 분석
- ※ 이러한 영향분석은 가치와 연관된 문제로써 논쟁의 여지가 많기 때문에 어떤 경우에도 예측가능한 모든 효과에 주의



[4단계] : 정책분석

- 해당기술의 개발과 확산을 위한 정책적 방안을 분석
- 의도되지 않은 효과와 위험을 통제하기 위한 조치와 이런 조치의 실효성에 대한 분석
- ※ 긍정적인 측면만을 지나치게 부각시켜 부정적 영향을 상쇄시킴으로써 기술개발에 면죄부를 부여하거나, 부정적 측면을 과장해서 강조함으로써 우리에게 필요한 기술개발의 걸림돌로 작용하는 우를 범해서는 곤란함

추진일정	내 용	비 고
'03. 6. 5	평가대상 후보기술 도출	제1차 평가위원회
↓		
6. 7~ 6. 21	관계부처 협의 및 대상기술 확정	과학기술부
↓		
6. 23~ 6. 28	전문분과 구성	과학기술부/KISTEP
↓		
7. 3	워크숍 개최	KISTEP
↓		
8. 5	전문분과 결과 발표	제2차 평가위원회
↓		
8. 27	전문분과 결과 발표	제3차 평가위원회
↓		
9. 22	전문분과 최종 결과 발표	제4차 평가위원회
↓		
10.23	전문가간담회 개최	KISTEP

〈그림 1-2〉 2003년도 기술영향평가 주요 추진경위

(2) 기술영향평가 대상기술 선정기준 및 절차

과학기술기본법시행령 제23조 제1항은 “기술영향평가의 대상은 미래의 신기술 및 기술적·경제적·사회적 영향과 파급효과 등이 큰 기술로서 과학기술부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 정하는 기술”로 평가대상을 규정하고 있다. 이와 관련하여 기술영향평가대상에 대해 두 가지 관점에서 그 구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

첫 번째는 평가대상이 기술 자체인가 아니면 기술이 유발하는 영향인가에 대한 문제이다. 기술 자체를 평가대상으로 삼았을 때는 다루어야 할 범위와 주제가 너무 광범위해지고, 한정된 기간과 자원으로 소화하기 어렵다는 문제가 발생할 수 있다. 또한 이와 관련해서는 국가기술지도, 기술예측, 기술수준평가와 같은 국가연구개발 기획은 물론 관련 부처의 국가연구개발사업 기획에서 이루어지는 내용과 많은 부분이 중첩될 우려가 많다. 이러한 현실을 감안한다면 기술이 유발하는 영향에 초점을 맞추어 범위를 명확히 설정하고 평가를 실시하는 것이 바람직하다.

두 번째 문제는 평가시기에 관한 것으로 평가가 연구개발 착상 및 기획 단계에서 이루어지는 사전적 평가인가, 연구개발 진행 중에 이루어지는 평가인가, 연구개발이 끝난 이후에 이루어지는 사후적 평가인가에 관한 것이다. 즉, 기술영향평가를 시행하는 데에는 통제의 딜레마가 놓여있다.

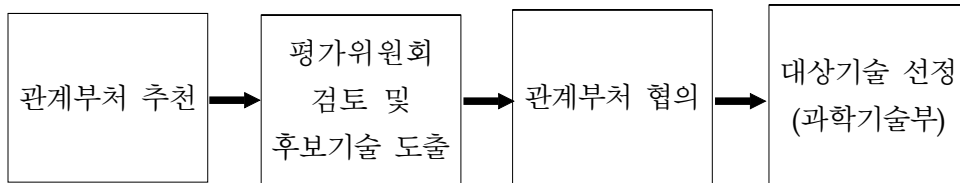
아직 실용화되지 않은 미래의 기술은 아직 변화할 수 있는 가능성이 있기 때문에 사회가 원하는 방향으로 발전시킬 수 있는 가능성이 있지만 충분한 지식이 없기 때문에 어떤 결과가 초래될 지를 예측하기 어려워서 평가가 쉽지 않다. 반면, 현재 논쟁이 되고 있는 기술에 대해서는 충분한 정보를 갖고 있지만 이미 기술이 사회적으로 고착화되어 있기 때문에 변화할 수 있는 가능성은 그 기술을 거부하는 수밖에 없는 경우가 많다.(Coolingridge, 1980) 따라서 기술영향평가의 효과를 높이기 위해서는 어느 시기에 실행해야 하는가는 매우 중요하다⁸⁾.

이와 관련해서 과학기술기본법 제14조에서는 “새로운 과학기술의 발전이 경제·사회·문화·윤리·환경 등에 미치는 영향을 사전에 평가”하는 것으로 규정되어 있다. 연구개발이 진행 중이거나 종결되면 기술의 부정적 영향이 아무리 크더라도 투자된 자원을 다시 거둬들이기 어렵기 때문에 평가가 효율성을 갖지 못하는 경우가 많다. 따라서 기본법에 명시된 바와 같이 연구개발이 본격적으로 진행되기 이전에 영향평가를 수행하고 그 결과를 개발에 반영하는 것이 바람직하다. 그렇지만, 이미 연구개발이 진행

8) 그러나 실제로는 기술의 발전단계 뿐만 아니라 정책의 단계가 더 중요한 경우가 많다는 연구가 있다. 유럽에서 실시된 16건의 참여적인 기술영향평가에 대한 사례연구에서는 정책에 영향을 미치기 위해서는 기술의 발전단계보다는 정책수립 단계가 더 중요하다는 사실이 밝혀졌다 (Joss and Bellucci, 2002).

중인 기술에 대해서도 부정적 영향을 최소화시키고 긍정적 영향을 최대화시키기 위한 평가가 필요하다.

이러한 점을 고려한 2003년도 기술영향평가 대상기술 선정 과정은 <그림 1-3> 과 같다.



<그림 1-3> 기술영향평가 대상기술 선정절차

<그림 1-3> 에 나타나 있는 바와 같이 우선적으로 대상기술에 대해 관계부처의 추천을 받았다. 국무조정실, 국방부, 기상청이 각각 26개, 4개, 1개의 기술을 추천하였다. 그 다음으로 추천 받은 대상기술 중 후보기술을 도출하기 위해 다음과 같은 세 가지 기준이 고려되었다.

- 첫째, 선진국에서 기술영향평가를 실시한 적이 없는 미래기술 과제
- 둘째, 경제사회적 영향 등에 대해 전문가 집단의 구체적 논의가 가능한 과제
- 셋째, 기술영향평가의 결과를 통해 정부의 과학기술 정책기획 등에 기여할 수 있는 과제

관계부처에서 추천된 기술들 중 대다수가 기술영향평가 본래의 목적과는 무관한 현재 각 기관에서 중점적으로 추진하고 있는 사업내용에 해당하는 것들이 많았다. 이에 따라 추천된 기술들 중 기술영향평가 취지와 전혀 무관한 것을 제외한 미래발전 가능성이 크며, 사회·문화적 파급효과가 큰 기술들이 평가위원회에 상정되었다. 평가위원회에서는 상정된 기술들을 검토하여 다음 <표 1-4> 와 같이 5개의 후보기술을 도출하였다.

이상의 5개 후보기술을 대상으로 각각의 장단점을 비교한 결과, 전략적 중요성, 향후 발전전망, 미래기술로서 사회경제적 파급효과, 사안의 민감성을 고려하였고, 또한 금번 기술영향평가가 시범사업 성격이 강한 점을 감안하여 관계부처와의 협의를 거쳐 'NBIT 융합기술'을 대상기술로 최종 선정하였다.

〈표 1-4〉 5개 후보기술의 도출

기술명	주요 내용	장점	단점
NBIT 융합기술	나노 수준의 물질적인 통합에 기반을 두고 NT, BT, IT의 결합으로 가까운 장래에 인간 활동에 큰 영향을 미치게 될 기술	산업경제적 과급효과가 커서 과학기술 관련자들의 관심도가 매우 높으나 미래기술로 이 해당시지가 명확치 않아 사회문화적 영향에 대한 논의가 비교적 용이	기술 분야가 매우 광범위하고 새로이 창출되는 미래기술이기 때문에 과급효과 등을 논의하기에는 시각에 따라 이견이 많을 수 있음
유비쿼터스 네트워크 기술	모든 기기에 컴퓨팅 및 커뮤니케이션의 기능이 부가되어 언제 어디서나 가능한 통신을 실현할 수 있는 기술	미래의 첨단기술로 현재로서는 실체가 명확치 않아 사회문화적인 영향평가가 용이	
미래에너지 기술 (연료전지, 핵융합 기술)	지속가능하고 재생가능한 환경친화적인 청정에너지로 화석에너지 고갈, 국제 환경규제의 강화로 향후 주요 에너지원으로 개발이 가능한 기술	에너지고갈, 환경문제 해결과 산업적 과급효과가 크기 때문에 많은 사람들의 논의 용이	연료전지는 아직까지 구체적인 시장형성이 이루어지지 않았고, 소재 및 원천기술에 한계 핵융합기술은 상대적으로 성공가능성 미흡
유전자 진단 및 치료기술	특정 벡터를 사용하여 치료 목적의 유전자를 생체 내에 주입하여 유전질환, 에이즈, 심혈관 질환, 암 등의 난치성 질환을 치료하는 기술	기술개발이 가시화되어 있고 무병장수에 대한 사회적 관심도가 높아 활발한 논의 가능	기술적·경제적 과급효과 등에 대한 논의는 구체적일 수 있으나 윤리적 문제, 사회적 문제 등 개념화하기 어려운 부분이 있어 결론 도출에 어려움 예상
인공장기 기술	개체의 생명유지를 위한 목적으로 조직과 장기의 기능을 인공제품으로 대응하기 위한 기술		

기술영향평가의 최종적인 대상 기술을 도출하기 위해 기술영향평가위원회에서 논의된 회의 내용의 요지는 다음과 같다(제1차 기술영향평가위원회 회의록, 2003. 6. 5).

“어떤 기술을 어떤 시기에 다룰 것인가가 중요한데, 너무 오래되지 않고 국민이 관심을 가질 수 있는 기술로서 긍정적 측면과 부정적 측면을 모두 다루는 것이 필요하다. 우리나라 입장에서 시급히 다루어야 할 주제들이 많지만 너무 시사적이거나 부정적인 측면이 강하면 실속이 없을 수 있다. 융합기

술의 경우 현재 많은 부처와 조직들이 관심을 가지고 있다. 이러한 논의들을 바탕으로 기술영향평가의 대상기술을 도출하는데 있어 주요 초점은 i) 미래 기술이어야 하고, ii) 정부에 자료 제공을 할 수 있는 것이어야 하며, iii) 기술영향평가를 통한 이슈화로 정책적 제안을 할 수 있는 것에 두는 것으로 정리하기로 한다.”

Ⅱ . 기술영향평가 대상기술의 범위

1. 기술영향평가의 초점(focus)

기술영향평가를 실시하기 위해서는 대상 기술의 내용과 범위를 설정하는 것이 기술영향평가의 출발점이라 할 수 있다. 특히, 기술영향평가 전문위원회별로 대상 기술이 미칠 영향에 대해 논의하고 검토한 다음 종합하는 방식으로 진행되었기 때문에, 영향평가의 대상이 되는 기술에 대해 공통된 개념정의가 필요하다. 대체적으로 기술영향평가의 대상은 현재의 응용기술이나 중기 응용기술(current or medium-term applications)보다는 미래의 혁신적 결과를 초래할 급진적 기술혁신(radical innovation)에 초점을 맞추고 있다. 이는 기술영향평가의 대상이 단순히 경제적 영향뿐만 아니라 기술이 초래하는 근원적 변화 즉, 사회문화적 영향을 고려하여야 하기 때문이다(산업경제 전문분과 위원회 자료, 2003. 8. 27).

기술영향평가의 대상기술로 확정된 NBIT기술은 신생기술(Emerging Technology)로 기술융합형태에 따라 전혀 다른 제품 또는 서비스로 나타나 경제, 사회문화, 환경 등 사회 전반적인 영역에 전혀 다른 모습과 행태로 충격을 줄 수 있다. 다시 말해, NT기술을 기반으로 한 IT기술이 만들어 질 수 있고, IT기술을 기반으로 한 BT기술이 개발되어 전혀 예상치 못한 기술 형태로 발전할 수 있음을 의미하며, 이렇게 창출된 기술은 산업, 경제, 문화, 사회, 환경 등 우리의 삶 전반에 걸쳐 막대한 영향을 끼칠 수도 있다. 사회적 니즈(Needs)에 의해 유발된 융합기술이라 하더라도 사회와의 관계 속에서 전혀 새롭게 활용됨으로써, 사회에 긍정적 영향을 미침과 동시에 수많은 부작용을 초래하기도 할 것이다.

결국 NBIT 기술과 같이 융합형태에 따라 다양한 기술과 제품이 나타날 수 있고, 사회에 미칠 영향이 어떻게 전개될지 불확실한 경우, 기술영향평가를 시작하는 단계에서 논의의 초점을 구체화하고, 미래에 대한 현재의 인식 범위 내에서 가시적인 기술이나 제품 중에서 대표성을 가지는 기술을 중심으로 예견되는 영향에 대해 평가하는 것이 필요하다. 이와 관련하여 기술영향평가위원회에서 논의된 내용을 살펴보면 다음과 같다.

제2차 기술영향평가위원회(2003. 8. 5) 회의록

“기술영향평가의 초점을 어디에 둘 것인가에 대한 논의가 중점적으로 진행되었으나, 현재까지 진행상황을 보면 NBIT라는 하나의 주제를 다루고 있음에도 불구하고 일관성이 없는 것으로 보인다. 예를 들어, 과학기술전문분과위원회는 BT를 중심으로 한 BINT 융합기술에 초점을 두고 있다면, 사회문화전문분과위원회에서는 나노기반 융합기술에 초점을 두고 있다”.

“포커싱(focusing) 문제를 해결하기 위해 융합기술에 따른 사회적 영향을 논하는 화두가 필요하다. 즉, 융합기술(NBIT)을 통해 어떤 제품과 서비스가 발생하고, 이에 따라 사용자 및 미래사회의 모습에 어떤 영향을 미치는지에 대한 추정이 필요하다”.

“융합기술은 미래사회의 개개인에 대해 보편적으로 적용되며, 삶의 질을 향상시키는 방향으로 수렴될 것이다. 고령화 사회의 진전이라는 화두를 염두에 둘 때, 융합기술의 적용은 무병장수 및 부의 증진에 초점을 두고 대상기술을 종합적으로 다룰 필요가 있다. 여기에는 어떤 시점에서 융합기술이 미래사회에 어떤 방식으로 적용되는가에 대한 시나리오가 필요하다”.

“기술은 한번 만들어지면 스스로 자라면서 인간의 통제를 벗어나기 쉽다는 점에서 대상기술에 대한 사회·문화·경제적 영향에 대해 입체적으로 분석하여 정책입안자 및 결정자에게 유용한 정보를 제공할 수 있어야 한다.”

“다양한 범주의 기술을 다루고 상이한 관점에서 보다 풍부한 함의를 이끌어 낼 수도 있다. 전문분과위원회별로 일관성을 가지고 다양한 관점에서 그 역할을 수행한다면 금번 기술영향평가를 통해 매우 긍정적인 결과물을 획득할 수도 있을 것이다.”

“포커싱 문제 외에도 미래사회에서 실제 NBIT 융합기술을 담당해야 할 세대의 ‘교육 및 인력양성의 문제’와 같은 이슈를 찾아서 메시지를 전달하는 것도 중요하다.”

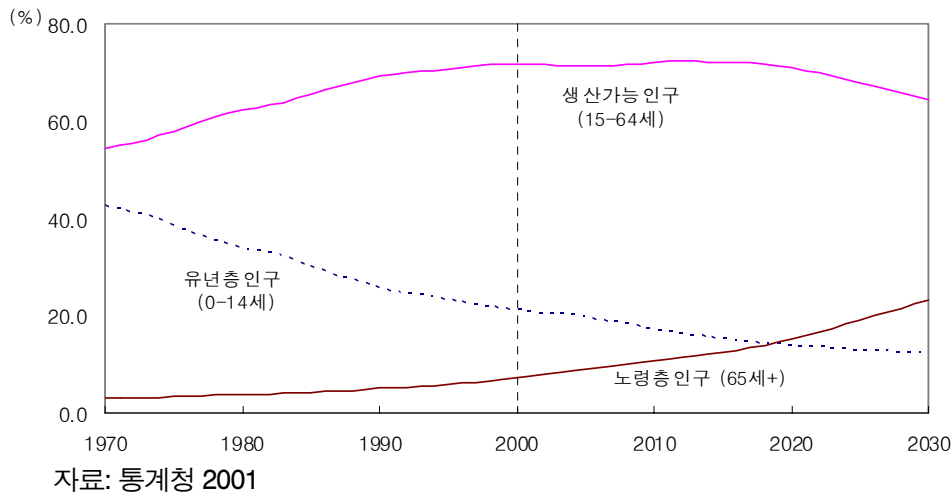
이러한 논의에 따라 제4차 기술영향평가위원회 회의(2003. 9. 29)에서는 대상기술에 대해 NT, BT, IT 기술 모두를 융합한 포괄적인 개념으로 정의하고, 기술영향평가를 실시하는데 있어 어떤 기술을 집중적으로 다룰 것이냐의 문제는 남아있지만 영향평가의 목적에 대한 통일성은 갖추는 것으로 정리하였다.

2. 우리 사회의 모습에 대한 전망과 니즈

우리는 사회에 속해 있어서 의식을 하든 못하든 관계없이 어떠한 형태로든 영향을 받게 된다. 기술영향평가위원회의 회의록에서 제기된 것처럼 기술영향평가를 통해 일반대중, 정책결정자, 이해관계자들에게 기술영향평가의 메시지를 전달하기 위해서는 우리 사회의 모습에 대한 전망과 니즈에 대한 화두를 끄집어냄으로서 기술영향평가의 목적에 대한 통일성을 가질 수 있다. 이와 관련하여 “’03 과학기술예측조사”의 일환으로 실시한 설문조사의 내용 중 우리 사회의 모습에 대한 전망과 미래 니즈에 대해 살펴보면 다음과 같다.

(1) 우리 사회의 모습에 대한 전망

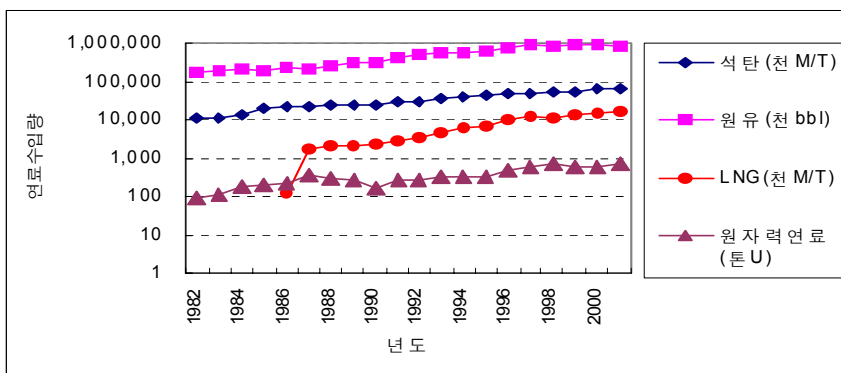
우리나라의 인구는 2020년에 5,065 만 명을 정점으로 인구증가율이 하락하여 2030년경에는 5,029 만 명이 될 것으로 예상되며, 이러한 인구증가 추세로 인해 노령화 인구비율이 2019년에 14%, 2020년에는 20%를 상회하는 고령화 사회가 될 것으로 전망된다. 또한, 여성인력의 사회참여가 절실히 요구되고 핵가족화도 현재보다 심화될 것이다(〈그림 2-1〉 참조).



〈그림 2-1〉 노령층 인구 및 생산가능 인구 변화추이

에너지 사용량은 2030년까지 연 2.3%의 증가율을 보일 것으로 예상되며, 2003년 현재 에너지의 해외의존도 97%는 여전히 변화가 없을 것으로 전망된다. 또한, 물 부족 현상은 2011년에 약 40억 톤에 이를 것으로 예상되며, 그 이후 부족량은 더욱 증가할 것으로 전망된다.

우리나라 식량자원은 주요 식품별 자급율이 일부 품목을 제외하고는 향후 WTO의 압력, FTA 체결 등으로 인해 급격히 낮아질 것으로 전망되며, 농업경쟁력 또한 급격히 감소하면서 식량안보에 위협이 있을 것으로 예상된다. 이와 함께 GMO, LMO 등 먹거리의 안정성 확보를 위한 노력이 더욱 절실해질 것으로 전망되고 있다.



자료: 에너지 경제연구원

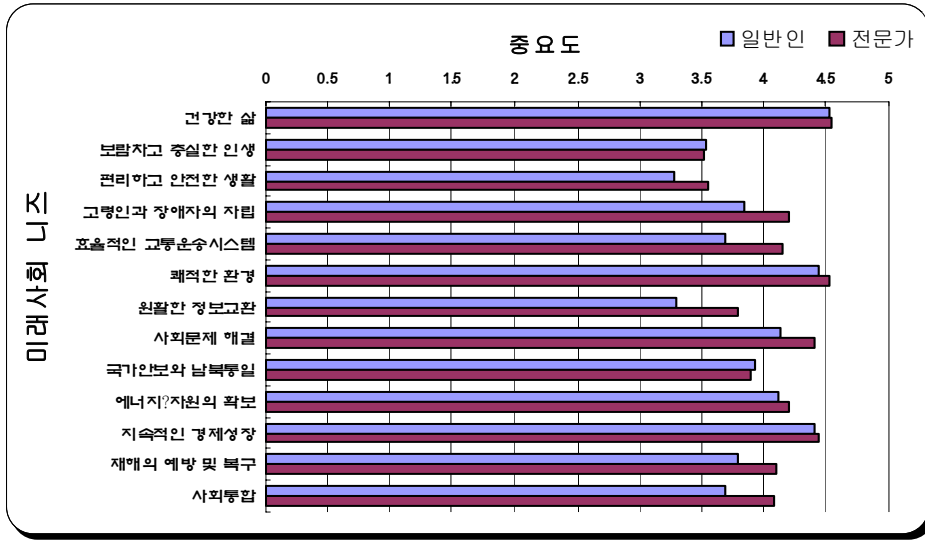
〈그림 2-2〉 우리나라 에너지 수입 변화추이

환경문제에 있어서는 현재의 산업구조 변화추세가 그대로 유지되고 획기적인 온실가스 대책이 시행되지 않을 경우 2020년까지는 배출량이 계속 증가할 것으로 전망되며, 이와 함께 수질오염, 토양오염, 폐기물 재활용 등 이를 해결하기 위한 획기적인 조치가 절실히 요구될 것이다.

이 외에도 전 지구적 환경오염 문제, 통일한국의 진전, 사회구성원의 다원화, 새로운 질병의 출현, 세계화·글로벌화의 진전, 유비쿼터스 사회, 생명공학의 발달 등 2030년까지 다양한 분야에서 변화를 겪을 것으로 전망되었다.

(2) 우리 사회의 미래에 대한 니즈

미래한국사회 전망을 토대로 전문가와 일반인 각각 1,000명의 표본(성별, 연령대, 교육수준, 지역, 전공분야(전문가) 등에 대한 비율고려)을 추출하여 설문조사한 결과를 살펴보면 <그림 2-3> 과 같이 나타났다. 이 설문조사는 미래사회 중요 니즈로 판단되는 13개 항목에 대해 5점 척도로 그 중요성을 선택하도록 하였다.



<그림 2-3> 미래사회 니즈별 중요도 평가결과

2030년까지 미래 한국사회에 우리나라의 중요한 니즈가 될 것으로 예상되는 것을 살펴보면 "건강한 삶의 실현", "쾌적한 환경", "지속적인 경제성장", "사회문제 해결", "에너지·자원의 확보", "고령인과 장애인의 자립" 등의 순으로 나타났으며 일반인과 전문가 모두 미래사회의 중요한 발전방향 요소로 선정하고 있었다. 일반 시민의 경우, 개인의 삶과 직접적으로 연관된 부분에 대한 문제 해결을 최우선으로 요구하는 것으로 판단되며 이는 일반인과 전문가 사이에 큰 차이가 없었다. 또한 해결주체가 국가인 경우의 '국가안보와 남북통일'에 관한 니즈의 경우는 상대적으로 낮게 나타났다.

(3) 미래 니즈 대비 NBIT 융합기술의 바람직한 변화 전망

NBIT 융합기술은 그동안 불가능하다고 여겼던 나노 수준의 물질구성과 기술간 융합이라는 새로운 지평을 열고 있다. 물론 이러한 기술적 발전이 하루아침에 사회의 모습을 변모시키는 것은 아니다. 더군다나 기술발전이 노동문제나 정치, 문화 등의 복잡한 사회문화적 영역에 어떻게 기여할 것인가를 판단하는 것은 그리 쉬운 일이 아니다. 그럼에도 불구하고 NBIT 융합기술이 지닌 비전을 통해 미래사회에 대한 긍정적인 시각과 바람직한 변화유도의 계기를 마련할 수 있다.





나노기술을 기반으로 한 NBIT 융합기술은 인간의 생활양식과 산업구조의 근본적인 변화를 유도할 것으로 전망된다.

첫째, 최근 세포를 나노 수준에서 조작가능하게 되면서 생명을 염기서열로 구성된 하나의 시스템으로 인식할 수 있게 되었다. 이는 NBIT 융합기술이라는 공통의 언어로 이종기술간 의사소통이 가능하게 된 것이다. 이러한 NBIT 융합기술은 단지 새로운 기술로서의 가능성뿐만 아니라 기존 기술의 작용점을 높여준다는 점에서 연구개발 속도 및 역량에 상당한 영향을 끼칠 것으로 예상된다. 일례로 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용하여 시료의 회석, 혼합, 반응, 분리, 정량 등 모든 단계를 하나의 칩 위에서 수행하도록 만든 LOC(Lab-On-a-Chip)를 들 수 있다. LOC에 NT를 활용하게 되면 시료 내의 세포 하나를 임의적으로 선택하여 찾고자 하는 생체분자를 감지하는 단일분자 검출(SMD:single-molecular detection)도 가능해 질 것으로 전망된다.

둘째, 급속하게 진행되고 있는 인구의 고령화⁹⁾는 주된 질병의 유형을 변화시킬 뿐 아니라 그에 상응하는 의료서비스 및 생활환경의 변화를 가져오고 있다. 현재 의료서비스 분야는 사후적인 치료중심에서 예방 및 신속한 진단중심으로 변화하고 있다. 또한, 의료서비스는 점차 병원이라는 한정된 공

9) 우리 국민의 평균수명(2000년 현재 75.9세)은 2010년에는 78.8세로 예측되어 외국에 비해 상당히 빠른 노령화 속도를 보이고 있다. 이와 함께 40세 이후 뇌혈관질환, 심장질환, 간질환, 위암 등 각종 질환에 의한 사망률이 증가하고 있다. 이와 같은 추세로 볼 때, 우리나라의 65세 이상 노령인구는 평균수명 연장 및 출산율 감소로 2000년 현재 7.2%에서 2019년에는 14.4%에 달해 고령사회에 진입하고, 2026년에는 20.0%로 본격적인 초(超)고령사회에 도달할 것으로 전망된다.

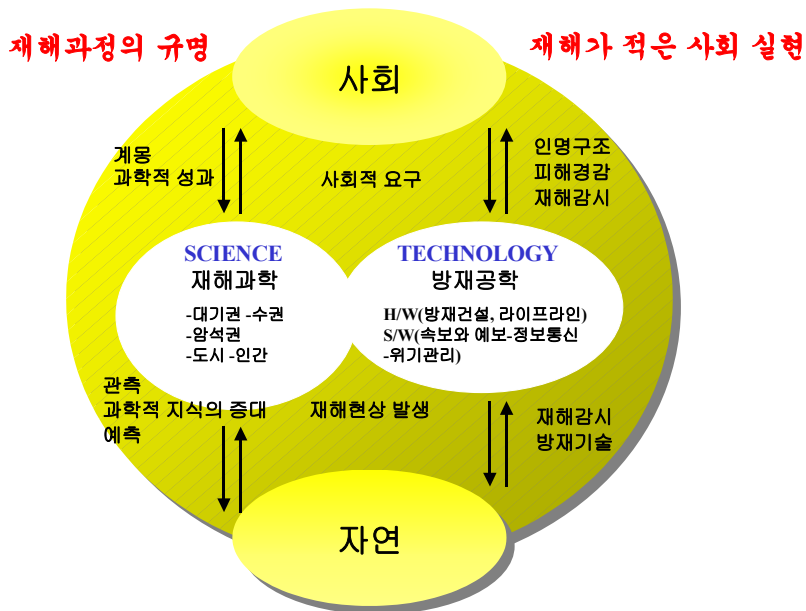
간에서 벗어나 때와 장소를 가리지 않고 환자의 편의를 고려하는 진료환경을 제공하는 데 초점을 맞추고 있다(〈그림 2-4 참조〉). NBIT 융합기술은 의료서비스 패러다임의 변화에 있어 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 아울러, 현대 의학 및 과학기술로도 해결하지 못하고 있는 암을 비롯한 각종 난치병의 치료를 가능하게 할 것이며, 궁극적으로는 인류의 오랜 염원인 생명연장을 실현하는데도 큰 기여를 할 것으로 보인다.

	현재(2002년)	미래(2012년)
의료서비스	특정장소(병원)에 한정 의료진 중심 대형의 실험실 장비 이용 	때와 장소를 가리지 않음 사용자(환자) 친화적 소형화, 휴대화된 기기 이용 
의료기술	치료의학, 평균치료 	예측의학, 맞춤의료, 조기진단 

〈그림 2-4〉 의료서비스 패러다임의 변화

셋째, NBIT 융합기술은 자연재해 및 재난의 감지·예측·방지·구난기술을 확보하여 사회 안전 시스템을 향상시키고 국가안전 확립에 기여할 것으로 보인다. 〈그림 2-5〉와 같이 사회가 복잡해지고 거대화됨에 따라 사회적 안전에 대한 요구는 어떤 시대보다 크다고 할 수 있다. 현대사회와

같이 거대사회에서 재해나 재난과 같은 사고는 대량 인명 피해와 함께 사회의 기능을 정지시킬 수도 있다. 따라서 예기치 않은 재해와 재난에 대한 대비를 위한 NBIT 융합기술의 기여는 매우 클 것으로 예상된다. NBIT 융합기술로 인한 나노바이오센서 등의 기술은 언제 어디서나 자연재해 및 재난의 징조를 사전에 감지할 수 있게 한다. 이는 지진이나 태풍과 같은 대형 재해로 대량 인명 피해가 발생하는 것을 사전에 효과적으로 방지하는데 큰 기여를 할 것이다. NBIT 융합기술의 발전으로 인해 이러한 감지 및 검출기술의 발전은 각종 오염물질의 유출을 정확하고 빠르게 감지할 뿐 아니라 생화학 테러와 같이 인명 살상을 목적으로 하는 행위에 대한 적극적이고 빠른 대처를 가능하게 한다. 이밖에도 식품 등의 신선도 유지 및 검사를 위한 기술의 활용으로 건강하고 안전한 사회를 구현하는데 기여할 것이다.



〈그림 2-5〉 자연재해 예방 및 저감기술의 비전

넷째, 에너지 소비와 오염물질의 감소, 신물질 생산 등 산업발전에 혁명적인 변화를 유도하여 제반 사회시스템의 변화를 촉진할 것으로 보인다. 이러한 변화는 빈부격차의 해소 및 노동여건의 개선을 가능하게 하여 개

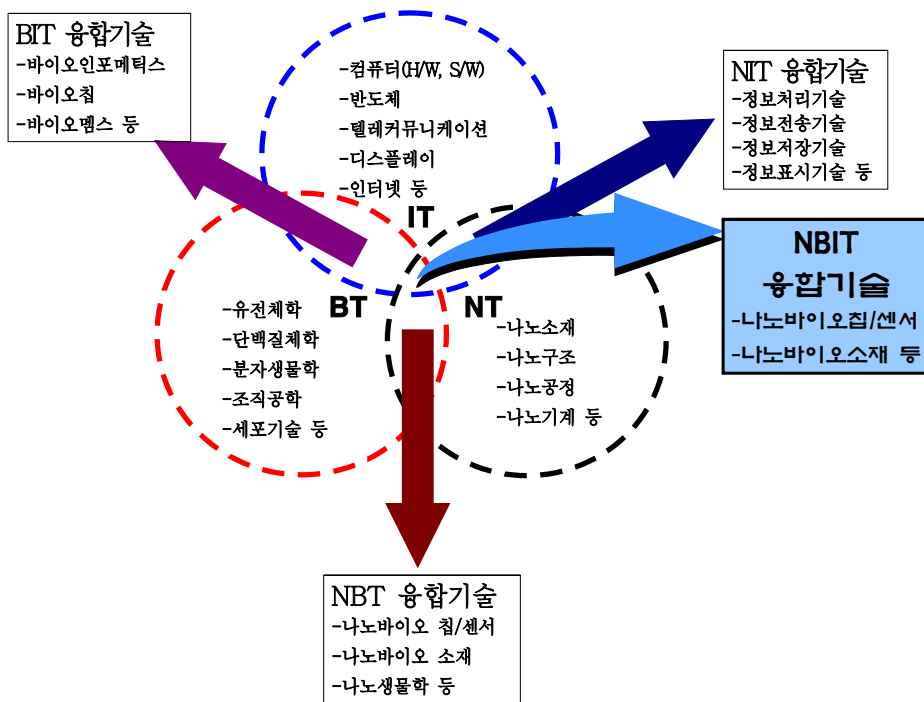
인 삶의 질 개선에 기여할 것으로 전망된다. 예를 들어, 생체물질을 거부 반응이 없이 인체에 삽입하거나 나아가 인체 내의 생체구조보다 기능이 높은 물질로 대체가능하다면, 이들 기술이 삶의 질 향상에 가져올 사회적 파급효과는 엄청날 것으로 예상된다. 또한, NBIT 융합기술을 통해 인체의 조직이나 기관을 대체할 수 있는 인공물질의 제조 및 생산이 가능해 짐에 따라 사회적 약자로 소외되던 장애인과 노약자가 혜택을 받을 수 있는 가능성이 높아질 것이다. 이는 이들이 동일한 능력을 가진 인간으로서 자존심을 회복하는데 큰 도움이 될 수 있으며, 사회적 참여도 보다 증가시킬 것으로 보인다.

Ⅲ. NBIT 융합기술의 과학기술적 의미와 파급효과

1. NBIT 융합기술의 개념과 발현 형태

(1) NBIT 융합기술의 개념

기술영향평가 대상기술로 선정된 NBIT 융합기술은 “나노 수준의 물질제어를 바탕으로 바이오기술, 정보기술을 전혀 새로운 형태의 기술로 발현시키고, 이들 기술 상호간의 작용 과정에서 파생되는 기술변화가 궁극적으로 사회·문화 패러다임까지 변화시킬 수 있는 첨단·신생 기술들”로 21세기를 이끌어 나갈 기술로 주목받고 있다.



〈그림 3-1〉 NBIT 융합기술의 개념도

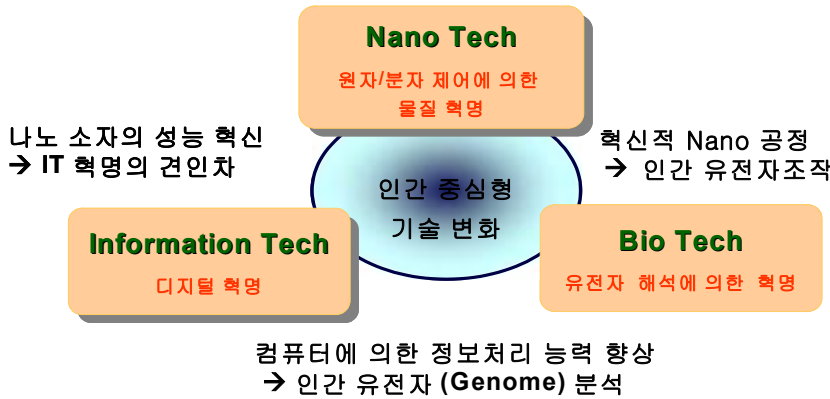
융합형태에 따라 NBIT 융합기술은 예측하기 어려울 정도로 다양하게 발현될 것으로 예상되나, 대체로 아래 〈그림 3-1〉 과 같이 NBT, NIT, BIT와 같은 융합기술 분야들로 구분지어 볼 수 있을 것이다. 좀 더 구체적으로는 i) IT를 기반으로 하는 생명현상과 관련된 생체 컨텐츠의 개발,

공유 및 서비스를 제공하기 위한 핵심 원천 및 응용기술로서의 BIT융합 기술, ii) NT또는 BT분야의 고도로 발전된 기술을 채용하여 상호 기술 발전의 문제점을 극복하거나 새로운 기술 분야를 창출하는 NBT기술, iii) 기반적 특성이 강한 나노 기술과 시스템적 성격이 강한 정보통신 기술을 접목하여 반도체, 생명공학, 환경, 정보통신 등 여러 분야에 활용될 수 있는 신기술의 창출이 가능한 NIT기술, 그리고 iv) NT, IT, BT, ST 및 인지 과학(CT)등이 총망라되어 융합된 시스템 종합 분야로 차세대 국가의 공공 목적과 산업 경쟁력 구축이 될 수 있는 SIT융합 기술 분야로 구분하여 설명할 수도 있다. 국가 R&D관점에서 최근에 과기부, 산자부, 정통부등에서 도출된 10대 신성장 동력의 경쟁력 확보의 측면에서도 이러한 기술 융합의 패러다임은 빼놓을 수 없는 과제가 되고 있다.

〈표 3-1〉 각 융합기술의 범위

구분	세부기술분야	대표기제품(예)
NBT	나노바이오칩/센서	나노바이오센서, DNA칩, 단백질칩, Lab-on-a-chip(LOC) 등
	나노바이오소재	생체모방 나노소재, 기능성 나노소재 등
	나노생물학	바이오/화학 센서, 광바이오시스템, 생체나노머신 등
NIT	정보처리분야	양자컴퓨터, 나노전지 등
	정보전송분야	나노복합 광통신용 광소자, 실리콘 나노점의 전광소재/소자 원천기술제품 등
	정보저장분야	테라급 초고밀도 자기 정보저장 매체 등
	정보표시분야	차세대 리소그래피 원천기술, MEMS 기술제품 등
BIT	바이오인포매틱스 (Bioinformatics)	DNA해석 소프트웨어, 단백질해석 소프트웨어, 바이오 DB 마이닝 등
	바이오멤스 (BioMEMS)	초고밀도 집적회로, 초소형 기어, 초미세 기계구조물 등

(1) NBIT 융합기술의 발현형태



자료: 서수원, 나노기술의 현황분석 및 보건의료기술 적용분야(발표자료)를 재구성

<그림 3-2> NT, BT 및 IT의 상호 작용과 영향

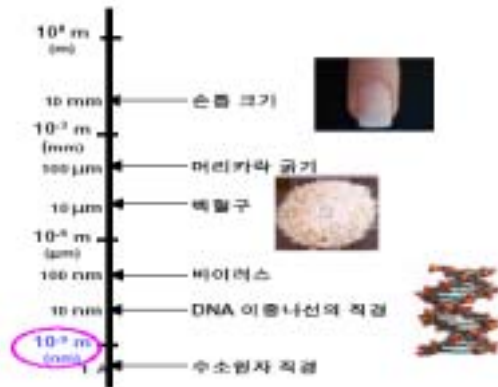
기술의 융합(Convergence)과 복합화(Complex)는 21세기를 열어가는 키워드로서 물리, 화학, 생물, 전자공학, 기계공학, 재료공학 등의 단위기술의 발달이 기술발전을 주도했던 상황에서 기술 간의 융합을 통한 새로운 패러다임의 변화는 창의적인 과학기술, 인간과 사회를 위한 과학기술을 진흥해나가는 형태로 진화해나가는 의미를 내포하고 있다. 이에 따라 최근 IT(정보기술), BT(생명공학기술), NT(나노기술)로 대표되는 미래형 첨단 기술 등의 이중기술이 중첩되는 융합기술은 현재의 과학기술의 한계를 극복하고 새로운 부가가치를 창출하여 궁극적으로 신산업 창출을 통한 고소득 달성 그리고 산업 및 연구 시스템의 융합을 촉발하는 시발점으로 크게 주목 받고 있다.

이러한 융합 신기술은 1980~90년대에 시작된 컴퓨터, 정보통신 기술혁명과 2000년대에 시작된 나노, 바이오 기술 혁명 등 2개의 기술발전이 중첩되는 영역에서 등장하고 있다. 기술의 융합화는 개별 기술의 단순한 개량뿐만 아니라 새로운 돌파형 기술 개발을 가능케 하고 기술혁신을 가속화시킬 것이다. 그러나 융합기술들은 기술적 발현형태 및 전개양상에 따라 10년 또는 20년 뒤 지극히 '건강하고 아름다운 모습'으로 다가올 수 있는 반면, '기형의 몬스터'로 엄청나게 위협스러운 모습으로 바뀔 수도

있을 것이다.

2장에서 살펴본 바와 같이 NBIT 융합기술이 향후 10년에서 20년 사이에 우리의 건강한 삶 유지는 물론 국가의 새로운 성장 동력 산업의 일부로 국부 창출, 기존산업의 고도화, 신산업 창출 그리고 지속가능한 경제성장체제로의 전환, 식량, 환경 및 에너지 문제의 해결과 국가안전 확보에 중요한 역할을 하도록 유인하는 것이 중요하다. 결국, NBIT융합기술로 발현되는 개별기술들 각각이 독자적인 기술 분야로 발전하며 영향을 미칠 수도 있지만, 여기서 보다 중요한 것은 기술상호 간의 융합 그리고 융합 기술들이 총체적으로 미치게 될 가능성과 잠재력에 주목하고 그 과학기술적 의미와 파급효과를 우선적으로 다루는 것이 필요하다.

나노기술은 1 - 100 나노미터 크기의 극미세구조에서 나타나는 새로운 현상과 나노급 물질계의 기본적 이해를 바탕으로, 나노급 크기의 특성과 고기능을 발현하는 물질, 구조, 소자 및 시스템을 창조·이용하고자 하는 미래형 첨단기술이다. 100 나노미터 크기 미만에서 물질의 고기능성 창출을 위한 나노기술의 연구 개발은 원자, 분자 및 분자 집합체들의 조절을 통한 나노구조 형성기술과 나노구조의 집적을 통한 부품 및 시스템기술 등이 대상이다.



[나노의 이미지]

자료: LG 경제연구원, The next big thing is really small, 2003

NBIT 융합기술은 BIT, NIT 그리고 NBT 기술과 같이 상호작용이 기대되는 분야로서 복합적이고 다차원적으로 연구개발 활동이 이루어지고 있으나 아직은 발전 초기단계에 있다고 할 것이다. 미래사회의 불확실성을 가정할 때 이들 융합기술은 아직 연구개발 중에 있거나 시장형성초기단계

로 각 융합기술의 구체적인 활용사례를 찾아내고 그 영향을 평가하기가 쉽지 않은 일이나, 전문가들에 따르면 융합기술은 <표 3-2>와 같은 활용을 통해 인간의 건강한 삶과 사회문화, 환경, 산업경제 등에 전반적인 영향을 미치게 될 것으로 예상된다.

<표 3-2> 융합기술의 활용분야 및 사례

활용분야	활용 사례
건강한 삶 추구	- 효율적인 진단 및 치료 시스템 구축 - 질병의 예방·치료 및 인공장기 이식을 통한 수명의 연장
안정적 식량 확보	- GMO, LMO 기술을 통한 대량 식량생산 - 병해충에 강한 품종개량 등을 통해 식량 증산에 기여 - 농수축산 먹거리의 보관·저장·가공 기술의 획기적 개발
에너지/환경여건 개선	- 화석에너지원의 발굴·채굴·수송·저장의 효율화 - 태양에너지, 수소활용 에너지 등 재생에너지 이용의 활성화 - 자원효율 증가, 폐기물 저감, 오염물질 배출 저감을 통한 환경오염의 원인 제거
국가안전 확립	- 첨단무기와 장비를 통한 군사력 강화 - 자연재해 및 재난의 감지·예측·방지·구난기술 확보에 의한 사회안전 시스템 향상

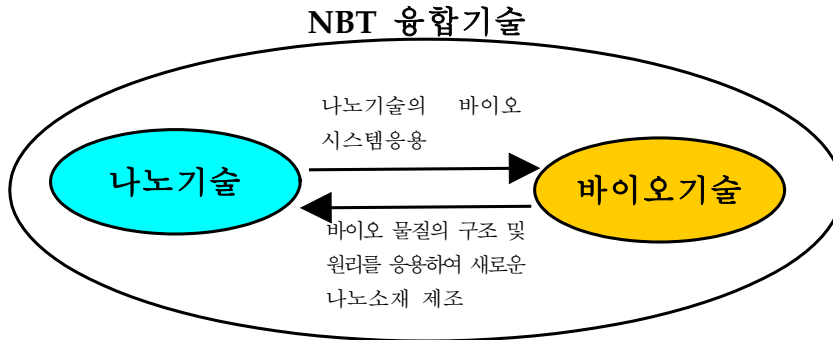
기술영향평가위원회는 NBIT 융합기술에 대한 과학기술적 파급효과를 살펴보기 위해 다소 한계가 있지만, 현재 활발하게 연구개발 활동이 이루어지고 있고, 가까운 미래에 우리의 삶(경제, 환경, 사회, 문화, 윤리)에 미치는 영향이 클 것으로 판단되는 기술, 바이오 센서 기술, 바이오 칩 기술, 바이오 MEMS 기술, 생체모방 나노 소재 기술, 바이오 인포매틱스 기술 등을 가능한 한 모두 포함하되, 크게 NBT, NIT, BIT 융합기술로 구분하여 검토하였다.

2. NBT(Nano-Bio Technology) 융합기술

(1) NBT 융합기술의 정의

NBT 융합기술은 "나노기술의 원리와 기법들을 바이오시스템에 적용하여 세포나 분자수준에서 다룰 수 있도록 하거나, 기존 생체시스템의 원리

를 이용하여 새로운 구조를 갖는 나노소재·시스템을 제조가 가능할 수 있도록 해주는 융합기술 분야"이다.



〈그림 3-3〉 NBT 융합기술

여기에는 나노기술을 이용하여 생명체를 구성하는 바이오 물질을 나노미터 크기의 수준에서 조작·분석하고 제어할 수 있는 기술들과 생명체 혹은 바이오 물질의 구조 및 상호 작용을 모사하여 이를 기반으로 새로운 구조의 나노소재·시스템을 개발하는 생체모사 나노기술들이 포함한다.

이들 기술들은 생명현상과 생명체 운용의 근간이 되는 물질의 구조와 상호 작용에 관한 원리를 원자와 분자 수준에서 규명하고, 극미세 바이오 물질을 조작하고 제어함으로써 질병을 다스리고 인간의 건강과 행복을 증대시키는 의료생명분야에 적용되고 있다. 특히, 의료생명분야에서 사용되는 각종의 소형장비들을 엄청난 규모로 초소형화 시키거나 복잡 다양한 기능들을 일체화시켜 줄 것이고, 또한 장치들과 생체조직 간의 접촉부 특성을 개선함으로써 장기간의 생체 내 사용을 가능하게 해줄 것으로 기대된다.

바이오물질의 구조와 원리에 근거한 나노기술분야는 생명과학기술 지식을 활용하여 기존의 매크로 스케일의 기술로는 가능하지 않은 신 기능의 나노소재·시스템을 개발하고 바이오 산업 뿐만 아니라 그 이외의 분야에서 필요로 하는 새로운 공학적 도구를 개발함으로써 21세기 신(新)산업을 주도할 수 있는 핵심 기술로 평가되고 있다.

(2) NBT 융합기술의 유형

나노기술을 이용한 바이오테크놀로지는 나노기술에 의한 극미세 도구를 이용하여 바이오 물질의 제어, 생물학적 시료의 신체내 전달(약물전달시스템) 등 관련 바이오테크놀로지의 개발에 목적을 두고 있다.

나노도구를 이용한 유전체 구조와 기능을 분석하고 결함을 치료하고자 하는 유전체학, 유전자 정보를 이용한 단백질 합성 및 분석에 관한 단백질공학, 줄기 세포의 배양과 장기 및 조직의 복제, 그리고 바이오 물질 대사 및 조립에 관한 대사공학 등이 NBT 융합기술과 관련된다. 이러한 나노 도구는 많은 양의 바이오 관련 정보를 짧은 시간 내에 정확하게 수집 및 분석하고 안정적으로 재합성하기 위한 것으로, 이를 사용한 바이오 물질의 조작을 통해 나노 영역에서의 바이오 연구를 가속화할 수 있다.

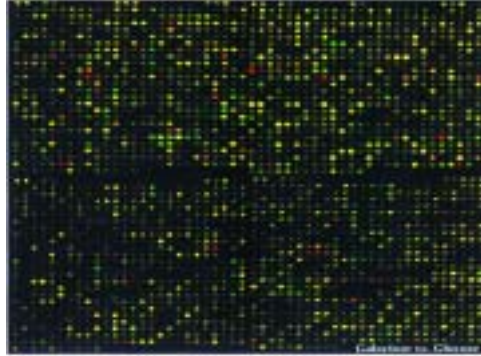
바이오테크놀로지를 위한 나노기술 분야에는 대표적으로 바이오칩/센서 기술을 들 수 있는데, 여기에는 DNA칩, 단백질칩과 초소형 바이오실험실로 표현되는 Lab-on-a-chip (LOC)이 포함된다.

1) DNA칩

현재 많이 사용되고 있는 유전공학 분석 방법은 많은 수의 유전자를 동시에 실험하기에는 한계가 있고, 유전학적 정보가 엄청난 속도로 밝혀지고 있는 반면 이를 사용하고 응용하는 실험들 또한 많은 시간을 필요로 하여 새로운 분석도구에 대한 요구가 있었다. 이에 따라, 1990년대 중반에 시도된 새로운 분석 방식이 DNA칩이다.

DNA칩이란 유전자 검색을 위하여 다수의 DNA를 고밀도로 기판에 부착해 놓아 미리 선정된 유력한 후보군 중에서 필요한 유전자를 찾아내는데 사용된다. DNA칩의 중요한 용도 가운데 하나는 유전자 발현 검색(gene expression profiling)으로, 이는 특정한 순간에 활성화되어 세포가 특정한 단백질을 만드는데 사용하는 유전자를 찾아내는 것이다. 유전자 발현 검색법을 사용하면 인간의 유전자 중 특정한 시간, 특정한 부위에서 활성화되는 유전자를 알 수 있다. 이 과정에서 DNA칩을 사용하면 시간을 두고 반복된 실험을 통해 활성화되거나 비활성화되는 특정 유전자의

전체적인 활동상황을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 이런 DNA칩의 분석 결과를 비교하여 인체 각 부분, 또는 건강한 조직과 병든 조직 사이에서 나타나는 유전자 발현의 차이점도 관찰할 수 있다.



자료: <http://challenger.lg.co.kr/korean/report/2000/science/science02.shtml>

〈그림 3-4〉 DNA 칩의 100배 확대사진

DNA칩 제조 회사들은 대체로 연구 목적별로 그에 맞는 다양한 칩을 판매하고 있으며, 고객이 선택한 프로브를 채택한 맞춤형 어레이를 생산하는 회사도 있다. DNA칩 기술의 목표는 고밀도화, 속도, 정확성, 맞춤형, 가격 등에 초점을 두고 있다.

2) 단백질칩

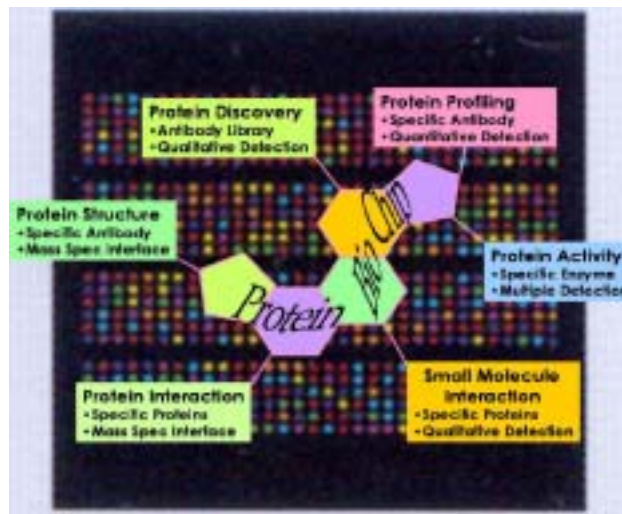
단백질칩은 특정 단백질과 반응할 수 있는 수십에서 수백 종류 이상의 서로 다른 단백질이나 리간드 등을 고체(금속, 유리, 플라스틱 등) 표면에 마이크로어레이화 시킨 후, 이들과 특이적으로 상호 반응하는 생체 분자의 존재 또는 기능 및 역할을 형광, SPR (Surface Plasmon Resonance), 질량 분석기 등의 여러 가지 분석 방법을 이용하여 대량으로 신속하게 분석하는 장치를 의미한다. 바이오칩의 관점에서 보면 단백질칩은 시료 처리부분 뿐만 아니라 시료 전처리 부분과 신호처리기까지 포함하여 보다 넓은 의미로도 정의될 수 있다.

단백질칩은 단백질만이 가지는 고도의 선택성과 칩이라는 관점에서의 대량 검색 기능이 가능하기 때문에 단백질의 분리, 확인, 정량 및 기능 해

석에 이르는 일련의 단백질 분석 작업을 칩 상에서 수행할 수 있다는 잠재성을 가지며, 질병의 원인규명을 유전자 수준에서 단백질 수준까지 확대 규명하는 proteomics 연구 분야와 진단용 바이오센서 분야에 널리 활용될 전망이다.

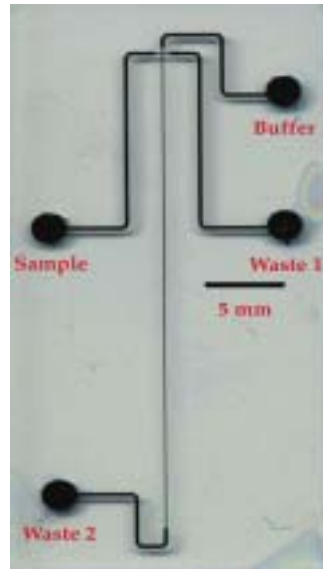
3) Lab-on-a-chip (LOC)

지금까지의 질병 진단은 환자의 혈액 혹은 체액을 채취하여 분석자에게 의뢰를 하면 화학분석을 통하여 수 시간 혹은 수 일 내에 통보해주는 식이었다. 그러나 DNA칩이나 단백질칩이 상용화되면 이의 응용성은 현재의 실험실 수준의 학문적인 연구 분야에만 국한되는 것이 아니라 일반인들이 가정에서 간단히 자신의 신체 이상 유무를 자가 진단할 수 있는 정도로까지 넓은 범위에 이를 것으로 예상된다. 이러한 일반적인 용도의 수요를 충족시키기 위해서는 현재의 DNA 및 단백질칩의 개념이 단순히 DNA 또는 단백질만을 단순 어레이기판에 고정시킨 형태만으로는 적용이 불가능하다. 유전병진단과 같은 질병진단용 칩의 개발을 위해서는 결과의 정확성과 함께 사용의 간편성이 보장되어야 한다. 이를 위해서는 하나의 칩 상에서 시료의 분리와 정제 그리고 증폭 등의 모든 전처리와 그 분석까지도 가능한 Lab-on-a-chip 개념의 유형으로 바뀌어야 한다.



자료: 단백질 칩 연구회 심포지엄, 2003

〈그림 3-5〉 단백질 칩 활용 예



〈그림 3-6〉 LOC 개발 사례

Lab-on-a-chip이란 미세 가공 기술을 이용하여 시료 희석, 혼합, 반응, 분리, 정량 등 모든 단계를 하나의 칩 위에서 모두 수행할 수 있도록 구현한 것을 말한다. 즉, 일반적으로 (생)화학물질의 분석 시 사용되는 분석 장치의 시료 전처리 과정에 필수적인 펌프, 밸브, 반응기, 추출기, 분리시스템 등의 기능을 분석 장치의 센서기술과 접목하여 같은 칩 상에 구현한 것이 바로 Lab-on-a-chip이다.

최근의 개발동향은 Microfluidics와 관련된 MEMS 기술을 기존의 분석 기술에 접목시킴으로써 수 nanoliter에 해당하는 적은 양의 액체시료를 단위 칩 상에서 다룰 수 있도록 시료분석에 필요한 모든 구성요소를 소형화 및 집적화 기술을 사용하여 on-chip화 시키려는 추세이다. 여러 복잡한 단계를 거치지 않고 시료 주입만으로 최종 결과를 얻어낼 수 있는 칩을 개발한다면 의료종사자의 도움 없이도 일반인들이 손쉽게 널리 사용할 수 있게 됨을 의미한다. 이는 칩 사용의 간편성뿐만 아니라, 검사자의 실험상 오류를 최대한 제거하여 얻어진 결과에 대해 신뢰성을 부여함으로써 DNA칩 사용의 보편화에 중대한 역할을 할 것이다.

현재까지는 혼합 부분, 증폭 부분, 센서 부분 등과 같은 하나 혹은 두

가지의 공정을 하나의 칩 상에 구현한 칩들이 개발돼 있는 상태이며, 공정 전체를 하나의 칩에 담은 소자는 아직까지는 상품화되고 있지 않다. 그러나 나노기술(nanotechnology 또는 nanofabrication)의 발전으로 Lab-on-a-chip의 개발 가능성이 점점 높아지고 있다. 나노테크놀로지는 노광전사(photolithography)와 화학적 식각(chemical etching)을 기반으로 하는 MEMS기술과 나노 물질증착과 나노구조가공(nanomaterial deposition and nanostructure patterning) 등의 제조공법과 이 모든 것을 하나로 묶을 수 있는 시스템적인 설계기술과 관련 소프트웨어가 융합된 기술이며, 이를 이용하여 바이오 물질 및 정보의 분석과 조작에 필요한 수십 마이크로미터에서 수십 나노미터에 이르는 크기의 도구들을 개발할 수 있다.

(3) NBT 융합기술 응용분야

나노-바이오 융합기술의 응용분야를 다음 <표 3-3> 과 같이 정리할 수 있다.

<표 3-3> NBT 융합기술 응용분야

구 분	내 용
의약	○ 선택성 신의약, 인체적합 약물전달체계 확립 ○ 부작용이 없고 효과는 5배 이상인 약물 등
생명과학	○ 하이브리드 시스템의 합성피부, 유전자 분석·조작, 혈액대체물질 ○ 인체에 부작용이 없는 인공장기, 인공조직, 세포유전자 치료, 초미세 수술용 로봇 구동장치 등
환경	○ 오염물 감소 및 제거용 소재, 재활용소재 ○ 눈에 보이지 않는 분진, 미세먼지등의 제거 등
에너지	○ 고성능 배터리, 청정연료의 광합성, 양자태양전지 ○ 기존 배터리 용량과 태양 집열판 효율을 3배 이상 향상등
재료	○ 분자단위에서 설계된 고기능성/고성능/고효율 소재 ○ 100℃에서 녹고 강도는 3배 이상인 고분자 소재 등
우주	○ 경량 우주선, 극소형 로봇 시스템 ○ 무인 초소형 비행체(크기는 곤충규모) 등
안보	○ 나노구조 전자장치, 나노로봇, 무인전투차량, 초소형 정찰기, 화학 및 생물학적 탐지기 ○ 여러 기술을 군사기술에 응용한 초소형 무기, 생화학 무기 등

(4) NBT 융합기술의 과학기술적 파급효과

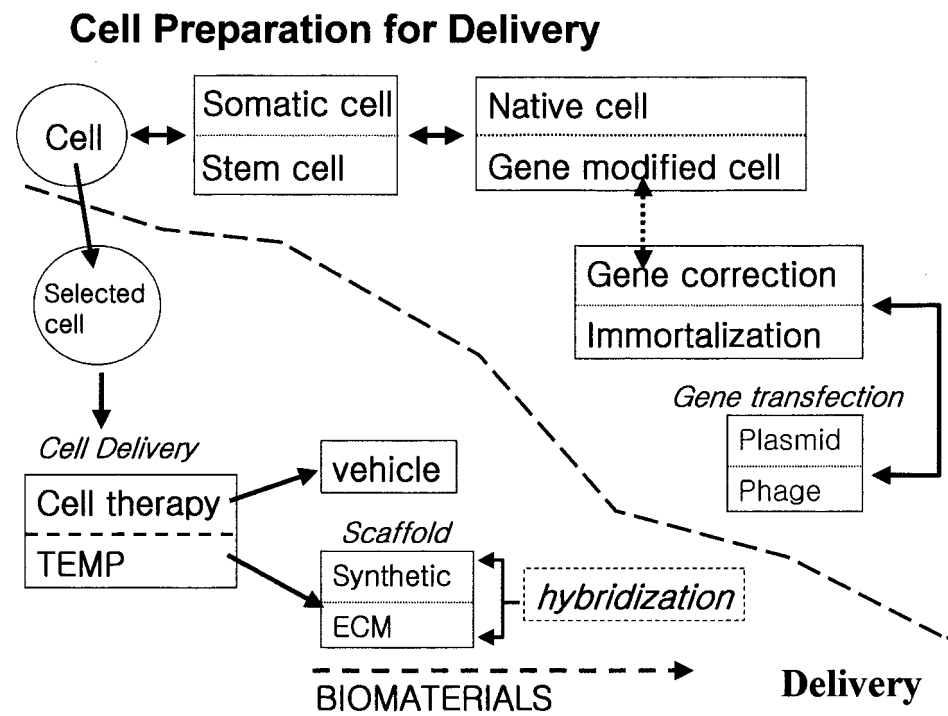
NBT 융합 기술은 의료 건강 관련 분야의 제약 산업과 연구 및 의료용 분석기기 관련분야로의 산업화와 파급효과를 예측할 수 있다.

제약 산업은 고부가가치, 지식기반 산업으로서 고령화 사회의 유망 산업으로서, 국민 소득의 증가에 따라 '삶의 질' 향상을 위해 필수적이다. 그러나 바이오테크 산업의 활성화 이전에는 한가지의 약물을 개발하는데 소요되는 시간이 10년 정도나 되었고 이에 따른 비용과 성공 확률 1/5000을 생각할 때, 고위험-고소득(high risk-high return) 산업이었다. 현재는 조합화학(combinatorial chemistry, combichem)이라는 신약개발도구가 이용되고 있으며, 표적에 적합한 화합물을 찾아내는 과정이 얼마나 대량으로 신속히 처리되느냐하는 것이 관건이다. 여기에 나노기술의 접목이 이루어져 Lab-chip의 기능이 활발해짐에 따라 제약 산업에서의 고 위험 부분을 고정도 처리 도구의 이용으로 상쇄시킬 수 있다. 주목받고 있는 신약 부분으로는 심혈관계 약물, 항암제, 중추신경계 약물, 호흡기계 약물, 대사계 약물, 면역계 약물 및 백신에 관한 것과 특정 백터를 사용하여 치료 목적의 유전자를 생체에 주입하여 에이즈, 암 등의 난치질환을 치료하는 기술을 이용한 유전자 치료제의 개발을 들 수 있다.

또 다른 분야는 연구 및 의료용 분석기기 산업 분야이다. 앞서 언급된 제약 산업이 바이오테크의 결과물이라면 나노기술이 접목된 분석기기는 바이오테크 산업의 도구다. 분석기기는 제약 산업을 위한 도구의 차원을 넘어서 의료용 진단기기 등으로 단일 품목이 갖는 의미도 크며, 질병예방, 진단·치료의 혁신을 가져오게 된다.

NBT 융합기술은 응용 제품들은 대부분 아직 개발 단계에 머물러 있으나, 활발한 기술 개발 노력에 힘입어 상용화가 빠르게 진전될 것으로 기대되고 있다. 현재 나노바이오기술 관련 시장은 연구용 분석기기, 휴대용 측정기기 등이 주를 이루고 있으나, 점차 임상 및 진단과 식품, 농업, 환경 모니터링 분야 등으로까지 확대 응용될 것으로 예상되고 있다. 특히 2005년 중에는 바이오센서, MEMS 기술이 발달하면서 진단용 칩 분야의 신제품들이 대거 등장할 것으로 예상된다.

NBT 융합기술에 의해 인체 조직을 치환하는 소재의 개발은 인공장기, 인공조직, 세포유전자 치료분야의 활성화를 초래할 것으로 예상된다. 기존의 금속, 세라믹, 고분자를 이용한 단순한 해부학적 기능 회복용 소재로부터 환자 자신의 유전자를 가진 성체줄기세포를 응용한 생활성 소재는 대표적 NBT 융합기술의 결과물이다. 이는 체세포 인공 수정을 통해 얻는 배아줄기세포에 대한 윤리적 문제로부터 자유로운 분야라고 말할 수 있다. 구체적으로는 자가 혹은 타가 세포의 유전자를 환자의 유전자로 치환하거나 면역 기능을 제거한 후 배양하여, 직접 환자의 손상된 조직에 투여하는 세포치료제로서, 혹은 세포외기질에 포함된 생리활성 물질과 세포 접착 물질의 patterning을 통한 세포배열 조절을 유도하는 인공 조직체로서, 인공장기의 개발에 직접적인 영향을 미칠 것으로 보인다.



자료 : 서활. MD&D Conference(2004. 1)

 심장근육 이용한 ‘머슬봇’ 개발...암세포 골라죽이는 로봇



인체 내부를 기어 다니며 암세포만을 골라 죽이는 미세 로봇. SF 영화에서나 등장하는 이 ‘꿈의 로봇’이 현실에서 본격적인 출전을 알릴 기세다.

지난달 27일 영국의 과학전문지 ‘뉴사이언티스트’는 미국 로스앤젤레스 캘리포니아대(UCLA)의 카를로 몬테마노 교수가 3년에 걸친 연구 끝에 머리카락의 절반 두께인 50마이크로미터 규모의 움직이는 로봇을 만들었다고 밝혔다.

흥미롭게도 이 로봇의 구동기관은 생쥐의 심장근육이다. 그래서 근육(muscle)과 로봇(robot)이 결합됐다는 의미로 머슬봇(musclebot)이라 불린다. 생체 내의 세포를 이용해 움직이는 로봇을 만든 것은 이번이 처음이다. 과학자들은 이 연구 성과 덕분에 머리카락 10만분의 1 크기의 나노(nano) 로봇이 몸속에서 돌아다니며 치료할 수 있는 시기가 성큼 앞당겨졌다고 평가한다. 바로 심장근육이 이용됐기 때문에 가능해진 얘기다. 인체의 세포 크기는 나노 수준이다. 폭약(칼과 약물)을 탑재한 나노 로봇 군단을 환자의 몸에 투여하면 비슷한 크기의 적(암세포)과 직접 백병전을 벌일 수 있다. 문제는 구동력. 아무리 작다고 해도 모터와 연료 없이 움직일 수는 없는 노릇이다.

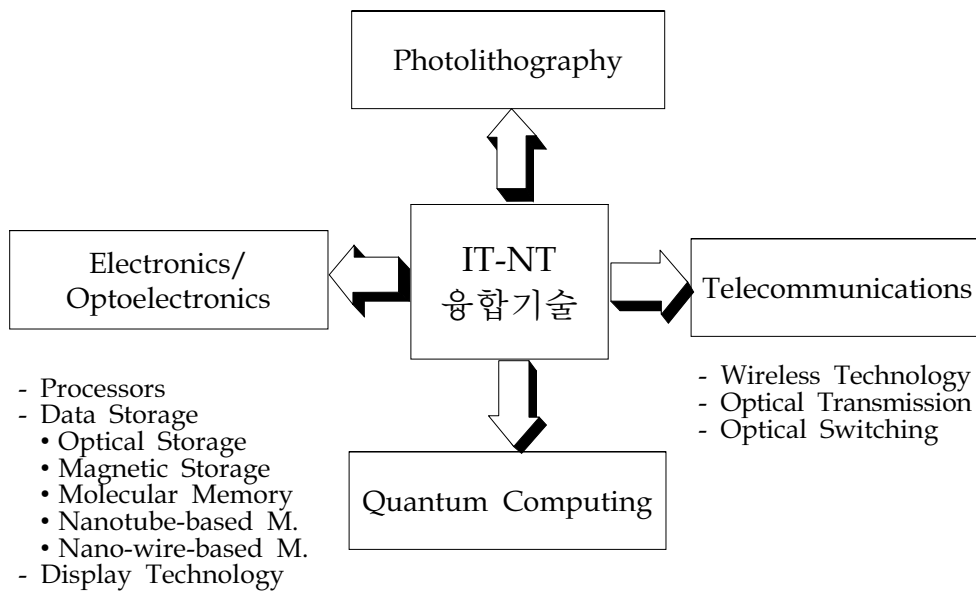
과학자들은 세포 내에서 모터를 찾아내기 시작했다. 대표적으로 근육의 움직임에 관여하는 성냥개비 모양의 미오신, 정자가 꼬리로 헤엄치며 난자를 향해 달려갈 수 있게 해주는 다이네인, 세포 내에서 물질들을 운반하는 세계에서 가장 작은 화물차인 키네신 등의 단백질이 그것. 모두 인체에서 연료를 얻어 자동적으로 작동하는 ‘천연 모터’다. 나노 로봇에 이들을 장착하면 연료 걱정 없이 몸속을 누빌 수 있다는 의미다.

자료 : 동아일보, 2004. 3. 10(A17면)

3 NIT(Nano-Infomation Technology) 융합기술

(1) NIT 융합기술의 정의

NIT 융합기술은 기반적 성격이 강한 나노기술과 시스템적 성격이 강한 정보통신기술이 접목되어 반도체, 생명공학, 환경, 정보통신 등의 여러 분야에 활용될 수 있는 신 개념의 기술창출이 가능한 기술을 의미한다. 현재 IT분야는 미세화, 속도향상, 소비전력 절감 등에 있어서 기존기술이 한계를 드러냄에 따라 NT를 통한 돌파구를 모색하고 있다. 예를 들어 이러한 한계의 극복을 위해 “저전력, 저비용을 실현하면서도 기존 컴퓨터의 능력을 백만 배 이상 향상시킬 수 있는 나노구조 마이크로프로세서 개발”, “현재보다 1,000배 이상 성능이 향상된 테라 비트급 스토리지 디바이스 개발” 등 NT를 기반으로 한 다양한 연구들이 진행 되고 있다. 이러한 연구들을 좀더 구체화 하여 살펴보면 <그림 3-7> 과 같이 NIT 응용분야들을 정리할 수 있을 것이다.



주 : ITFIND 주간기술동향, NIT 및 BIT 융합기술의 개요 및 시장전망(2002. 10)를 일부 재구성함

<그림 3-7> NIT의 응용분야

NIT 연구개발 사례(예시)

- 저전력, 저비용을 실현하면서도 기존 컴퓨터의 능력을 백만 배 이상 향상시킬 수 있는 **나노구조 마이크로프로세서 개발**
- 보다 높은 전송 주파수와 광 스펙트럼의 효율적 이용을 통해 현재 보다 최소 10배의 대역을 제공하는 **통신시스템 개발** →사무용, 교육용, 오락용, 군사용 등으로 활용 기대
- 현재보다 1,000배 이상 성능이 향상된 **테라비트급 스토리지 디바이스**
- 초소형, 저중량, 저소비전력 등의 특성을 지니면서도 방대한 양의 데이터를 수집, 처리, 통신할 수 있는 **통합 나노센서 시스템의 개발**
- 이밖에 교육용, 오락용으로 활용 가능한 가상현실 공간의 실현, 무인 차량 무인 전투기 개발을 위한 **데이터 처리능력의 향상, 화상회의를 위한 전송능력 향상** 등에 응용 기대

자료 : 삼성경제연구소

(2) NIT 융합기술의 유형

NIT융합 기술은 정보통신 시스템의 초소형화, 초고속화, 저소비 전력화, 고성능화를 이루기 위해 정보저장, 정보처리, 정보전송, 정보표시 등 각 정보통신 시스템 분야의 “기반 기술”의 일부 또는 전부가 “NT(나노기술)”로 대체되면서 성립되는 기술분야를 의미한다. IT 기술의 측면에서는 IT 기술의 새로운 영역으로의 확장이라고 단언하기는 어려우나 기반이 되는 기술이 새로운 기술로 대체된다는 측면이 강하다고 할 수 있으며, 다른 의미로는 IT 산업이 NT를 흡수하여 IT산업의 한계를 돌파하는 것을 의미한다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 보았을 때 NT가 IT산업에서 가지는 의미는 매우 크다고 할 수 있으며, NT가 IT에 효율적으로 응용되려면 IT 산업발전이라는 관점에서 NIT 융합 기술의 기초, 응용, 개발 연구 추진을 장기적이고 체계적이며 종합적으로 수행해야 할 것임을 알 수 있다. 위에서 언급한 NIT융합기술의 개념과 응용분야 등을 토대로 NIT융합

기술 분야를 분류하면 <표 3-4> <표 3-5> 에서와 같이 정보저장, 정보전송, 정보처리, 정보표시 등 IT산업 각 부문별로 주요 기술이 NT기술로 대체되는 형태에 따라 구분할 수 있을 것이다.

<표 3-4> NIT 융합기술 분야의 분류

분야	설 명
나노정보저장	기존 정보저장 장치의 기술적 한계를 극복한 대용량 고밀도 저장기술
나노정보전송	미래 광통신에서 요구되는 광대역성을 성취하기 위하여 고전적 동작원리의 한계를 극복하는 양자광 통신소자의 기초기술 등
나노정보처리	기존의 반도체 트랜지스터 소자의 기술적 한계를 극복하기 위한 실리콘 나노소자, 분자 트랜지스터 등의 신기능 나노 전자 소자기술
나노정보표시	휴대성과 이동성이 요구되는 정보표시 단말기를 위한 문자 수준의 나노 소재를 이용한 초저전력, 구부림 가능, 월등한 표시력을 가지고 있는 정보 표시소자 기술

자료: ITFIND 주간기술동향, 2002. 11.

<표 3-5> NIT 융합기술 분야의 기술별 정의

분야	기술	정의	요소기술 등
나노 정보 저장 기술	전자기계식 저장 기술	전자기계식 메카니즘을 이용한 고밀도 정보 저장 기술	하드디스크 기술, 광디스크 기술, 탐침형 저장기술
	고상매체 저장 기술	자성 및 상변화 등 신기능 매체를 이용한 차세대 비휘발성 기억 소자 기술	자기스핀 메모리 기술 상변화 메모리 (Phase Change Machine)
나노 정보 전송 기술	양자점 광통신 소자 기술	전/광, 광/전 변환의 핵심층에 양자점 구조의 양자효과를 가진 양자점의 고품위 광통신용 소자 기술	실리콘 나노 입자 광전 소자 기술, 양자점 반도체 레이저 기술, 양자점 반도체 광증폭 기술, 양자점 VCSEL 기술

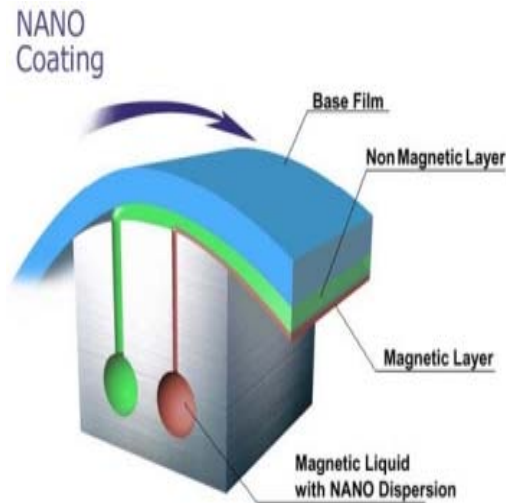
나노 정보 전송 기술	포토닉 밴드 갭 소자 기술	광결정(photonic crystal)에 기초한 나노구조 제조와 광결정을 광통신용 능동 및 수동 소자로 활용하여, 고효율 저소모 전력의 신개념 광통신용 광제어 소자 구현을 위한 핵심 원천 기술	광원용 소자 기술, 집적형 광도파 소자 기술
	양자 통신 기술	전자, 빛 또는 스핀의 양자역학적 성질을 이용하여 정보 저장, 정보 처리, 정보 전송 기술에 있어서 양자 역학적 특성을 동작원리로 하는 미래형 정보 통신 기술	Qubit 소자 기술
나노 정보 처리 기술	반도체 나노 전자소자 기술	정보처리 및 메모리용 신개념의 반도체 나노전자소자	Nonclassical CMOS 기술, Schottky Barrier Tunnel Transistor(SBIT)기술 단전자 로직기술, 단전자 메모리 기술, Nano Flash Memory 기술, 나노 소자 회로 설계 및 전산 모사 기술, 나노 집적회로 기술
	유기 반도체 나노전자소자 기술	반도체적 성질을 갖는 나노크기 유기 분자를 이용하여 정보처리를 위한 분자전자 소자 로직게이트 및 메모리소자 등에 응용 가능한 기술	분자 트랜지스터 소자 기술, CNT정보처리 소자 기술
	양자 전자 소자 기술	초고집적, 초고속, 저전력 그리고 신기능의 미래형 전자소자의 특성을 구현하는데, 양자역학적 동작원리에 기반을 둔 나노 반도체 전자소자 기술	양자 간섭 소자 기술, 양자점 어레이 관통 소자 기술
나노 정보 표시 기술	나노구조 표시소자	무기 및 유기구조를 이용한 초박막의 정보표시소자로 man-machine 간의 모든 정보를 전달하는 멀티미디어 기술	유기나노박막 표시 소자 기술, Electrophoretic 기술, 실리콘 기반 나노 점표시 소자 기술, 카본나노 튜브 표시소자 기술, 형광유기나노 입자 투명 표시 소자 기술
	나노 구조 전지 기술	산화물 입자의 나노화에 의해 발현되는 물리-화학적 특이성을 이용한 태양전지, 이차전지, 슈퍼커패시터를 포함하는 새로운 개념 및 형태의 고효율 전원소자	태양전지 기술, 2차 전지 기술, 슈퍼커패시터 기술

자료: 정보통신연구진흥원, IT-NT 융합기술 기획보고서, 2002

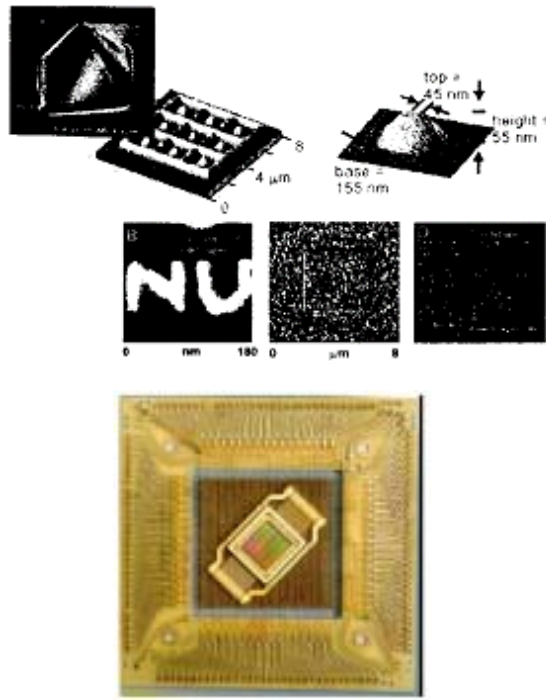
1) 나노정보저장 기술

나노 정보저장 기술은 정보저장 단위를 나노미터 크기로 구현하여 현재의 자성매체를 이용하는 정보저장 장치의 대체 기술, 나노미터 스케일에서 새로운 물리화학적 현상을 이용하여 정보를 기록/재생할 수 있는 기술을 의미한다. IT산업의 발달로 보다 많은 정보를 휴대용 정보기기에 저장해야할 필요성이 증대되면서 정보저장 장치 산업은 반도체 소자에 버금가는 시장을 형성하고 있으며 신규시장 또한 급격히 성장하는 추세이다.

나노정보저장 기술분야에는 하드디스크 기술과 광디스크 기술, 탐침형 저장기술을 포함하는 전자기계식 저장기술과 자기스핀 메모리 기술 및 상변화 메모리 기술을 포함하는 고상매체 저장 기술이 있다.



〈그림 3-8〉 나노 코팅을 이용한 데이터 저장기술, 후지필름 개발사례



자료: NSTC, Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN), 1999

〈그림 3-9〉 나노 저장기기 예

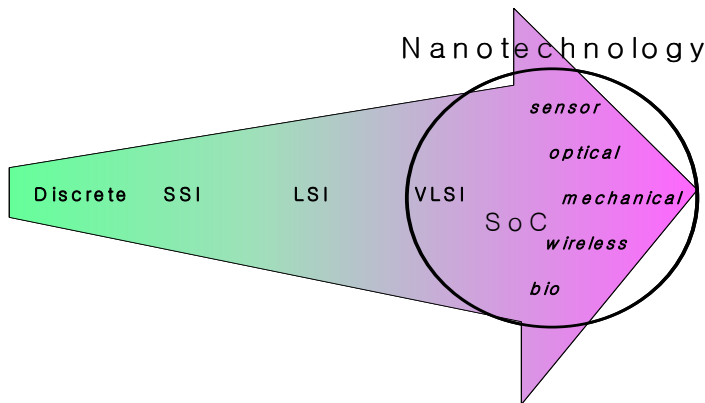
2) 나노정보전송 기술

21세기의 정보통신 분야는 더 많은 정보를, 더 빨리 처리하기 위한 방향으로 빠르게 발전하고 있으며, 이러한 사회의 요구를 충족시키기 위한 새로운 기술적 수단을 개발하기 위한 노력이 집중되고 있다. 현재 지식정보화 사회의 중추신경망 역할을 수행하는 인터넷의 경우만 보더라도, 단순한 데이터 통신에서 음성과 비디오가 통합된 멀티미디어 서비스화 하고 있을 뿐 아니라, 증가세 또한 급격하여 최근에는 3 - 4 개월에 두 배 이상의 용량 증가가 요구되어 매년 400% 이상의 서비스 신장이 이루어지는 실정이다. 최근 미래사회를 선도할 신기술로 대두되고 있는 나노기술을 이용하여 새로운 물리적 특성을 응용함으로써 운반자의 속도를 증가 시키

는 등 신기능의 미래형 정보전송을 위한 새로운 가능성을 제시하였다. 나노정보전송 기술분야는 양자점 광통신소자 기술, 포토닉 밴드갭 소자기술, 양자통신 기술 등의 기술을 포함한다.

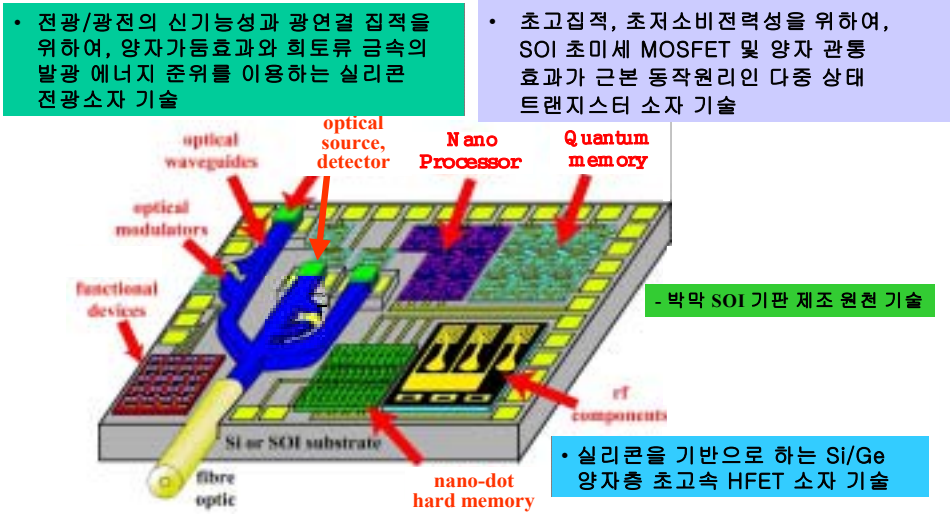
3) 나노정보처리 기술

급증하는 정보통신의 양적 및 질적 수요에 부응하기 위해서는 정보처리 분야에 있어서, 테라비트의 고집적화, 저전력 소모, 100GHz 이상의 고속화 등을 가능하게 하는 하드웨어의 성능향상이 필수적이며 이를 해결하기 위해서는 기존의 반도체 집적회로의 나노 기술을 통한 기술 혁신 및 신개념의 소자 기술 개발이 절실히 요구된다. 나노기술을 이용함으로써 Tera bit급 집적 밀도가 가능하고 이를 통해 정보 저장 및 처리 장치 기술 개발이 가능하게 될 것이다. 또한, 이러한 새로운 개념의 기술개발은 분자 컴퓨터 산업과 같은 신산업의 창출 뿐 아니라 정보통신 산업 전반에 걸친 시장 확대 결과로 고부가가치 창출의 가능성을 한층 더 높일 것으로 기대된다. 나노정보 처리기술에는 반도체 나노 전자소자 기술, 유기 반도체 나노전자소자 기술, 양자 전자 소자기술이 포함된다.



자료: 국가기술지도, 2002

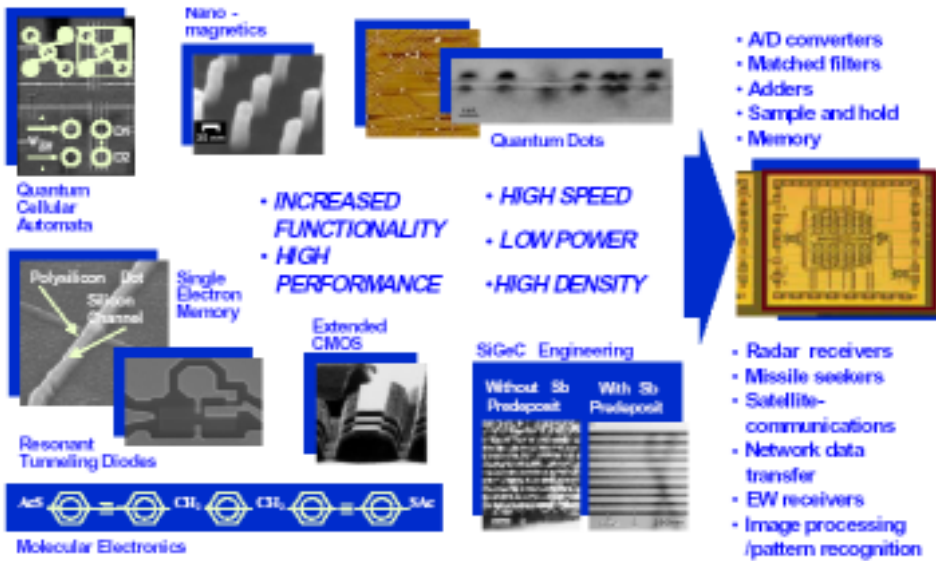
〈그림 3-10〉 반도체 기술의 진화



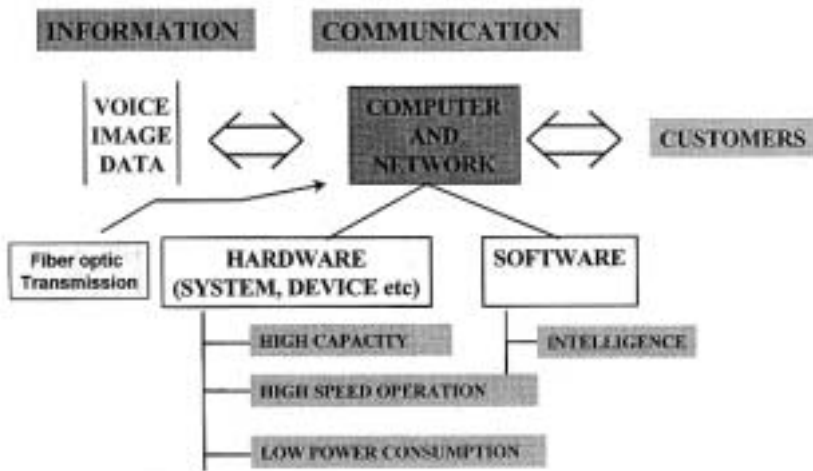
자료: 국가기술지도, 2002

(실리콘 반도체 기반의 미래형 초고집적 고기능형 통신 IC 소자 개념도; System-on-Chip, Network-on-Chip의 개념)

〈그림 3-11〉 나노정보처리 기술 활용 예



〈그림 3-12〉 NIT 융합기술의 응용사례



자료: 정보통신연구진흥원, IT-NT 융합기술 기획보고서, 2002

〈그림 3-13〉 미래형 시스템과 단말이 추구하는 특성

4) 나노정보표시 기술

정보화의 심화 및 보편, 대중화에 따라 인류의 정보에 대한 욕구가 점차 커지게 되었으며, 최근에는 폭발적인 이동 통신의 발달에 따라서 정보 전달의 매체 (Man-Machine Interface)인 표시소자 분야에서는 장소, 시간에 구애됨이 없이 초경량, 저전력의 휴대가 간편하면서도 화질이 우수한 초박막의 표시소자개발이 절실히 요구하게 되었다. 특히, 인터넷, IMT-2000, PDA 등 정보이용 환경의 고도화 및 휴대화에 따라 차세대 표시소자는 응답속도, 시야각, 휘도, 소비전력, 생산성 및 가격 면에서 우수한 신기술은 반드시 확보해야 할 기술로 자리매김하고 있다. 따라서 차세대 나노 구조표시소자기술은 박막화, 실감화, 고화질화를 나타내는 신개념의 플라스틱을 기판을 사용한 정보표시소자 구현기술로서, 구부림이 가능한 Paper-like 디스플레이로 발전할 것으로 예상되므로 선도적인 핵심원천 및 기반기술 확보가 시급한 실정이다. 나노정보표시 기술은 나노구조 표시소자기술(카본 나노 튜브 표시소자기술, 형광 유기 나노 입자 투명 표시 소자 기술 등)과 나노구조 전지기술(수퍼커패시터 기술, 2차 전지 기술

등)을 포함한다.

(3) NIT 융합기술의 과학기술적 파급효과

NT에 기반을 둔 미래 정보 통신 개발은 그 주요 요소인 정보 처리, 전송, 저장, 표시, 재료 및 공정 분야 별로 주요 핵심 원천 기술들이 점차적으로 개발하고 있다.

정보저장분야에서는 정보의 대용량 고밀도 저장 필요성이 증가하여, 기록밀도 면에서 한계에 다다른 하드디스크, CD, DVD 등 기존의 자기, 광디스크 기술의 한계를 대비한 신개념의 자기 기록 기술, 고밀도 광 메모리 기술, 탐침형 저장 기술, 그리고 자기 및 상변화 기억소자 기술 등에 많은 기술 성장을 이룩하여, 상용화를 위한 기술 개발이 한창이다.

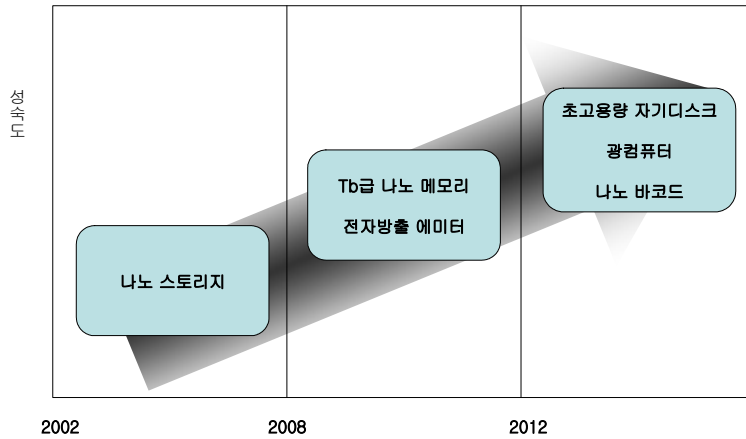
정보전송분야에서는 미래 광통신에서 요구되는 광대역성을 성취하기 위하여 고전적 동작원리의 한계를 극복하는 양자 광 통신소자의 기초 기술을 구현하기 위하여 연구하고 있다.

정보처리분야에서는 기존의 반도체 트랜지스터 소자의 기술적 한계를 극복하기 위해서 실리콘 나노 소자, 분자 트랜지스터, 상전이 트랜지스터, 스핀 트랜지스터 등의 신기능 나노 전자 소자 기술이 연구 개발하고 있다.

정보표시분야에서는 휴대성과 이동성이 요구되는 정보표시 단말기를 위한 분자 수준의 나노소재를 이용한 초저전력, 구부림 가능, 박형의 정보 표시소자의 개발과 미래의 표시매체인 극저전력 소모, 월등한 표시력, 다양성, 크기조절 유연성의 장점을 가진 나노 박막형 플라스틱 종이 디스플레이 원천 기술을 개발하고 있다. 뿐만 아니라 실리콘을 기반으로 하는 ultra-large-scale integration (ULSI) 기술과 양립할 수 있는 표시소자 구현을 위한 실리콘 기반 나노점 전광소자가 연구되고 있다.

정보재료/공정분야에서는 전자 에너지원으로 현재 기술 한계인 전극 소

재의 한계를 극복하는 유-무기 나노입자 합성-제조에 의한 고 에너지 밀도의 전지 제작과 테라급 초고밀도 자기정보 저장매체 개발을 위한 고분자 template 나노구조를 이용한 공정기술을 연구 개발하고 있다.



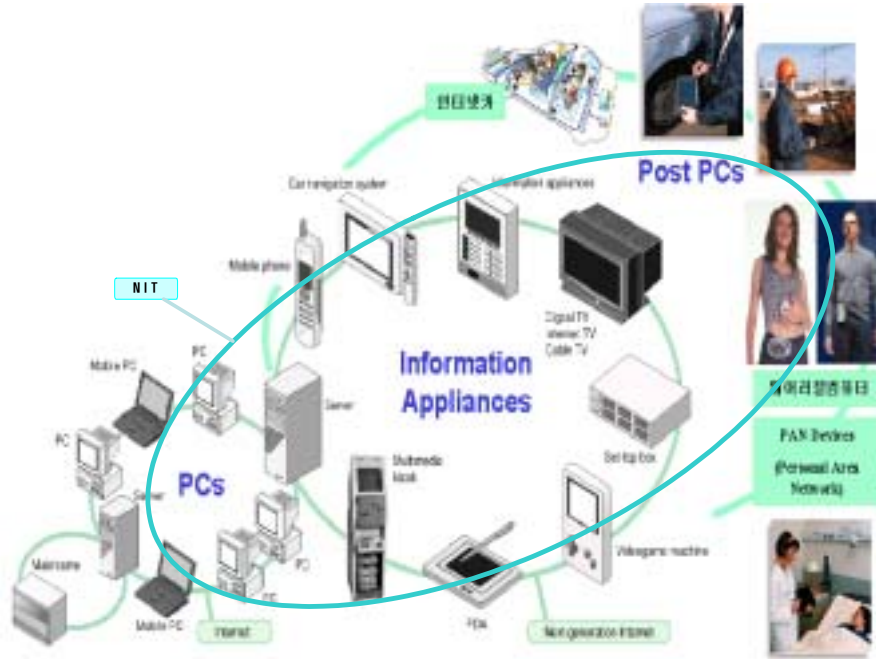
자료: 국가기술지도, 2002

〈그림 3-14〉 NIT기술의 발전에 따른 실용화 예상시기(정보저장 분야)

NIT융합기술은 과학기술 및 정보통신기술의 새로운 영역을 창출하거나, 기존 제품의 고성능화로 21세기의 신(新)산업혁명을 주도할 핵심 기술이다. 21세기는 지능적(Intelligent)이고, 멀티미디어성(Multimedia)이며, 개인 친화적(Personal)이고, 인간화(Humanized)의 정보통신 사회로 특징지어진다. 미래형 정보통신사회는 시스템의 초고속, 초 대용량, 다기능의 특성을 요구하고 있으며, 단위소자 측면에서 초고집적성, 초고속성, 초저전력소모성, 그리고 신기능성의 특성을 필요로 한다. 미래형 단위소자를 창출하기 위해서는, 물리, 화학, 생물 등의 기초 과학과 전자, 재료, 화공 등의 응용 공학이 상호 유기적이고 종합적으로 발전하여야 한다. 미래형 정보통신용 단위소자를 구현하는데 필요한 기반적 기술이 NIT 융합기술이라 할 수 있다.

〈그림 3-15〉 는 미래의 정보통신 사회에 있어서 고품질의 정보통신 서

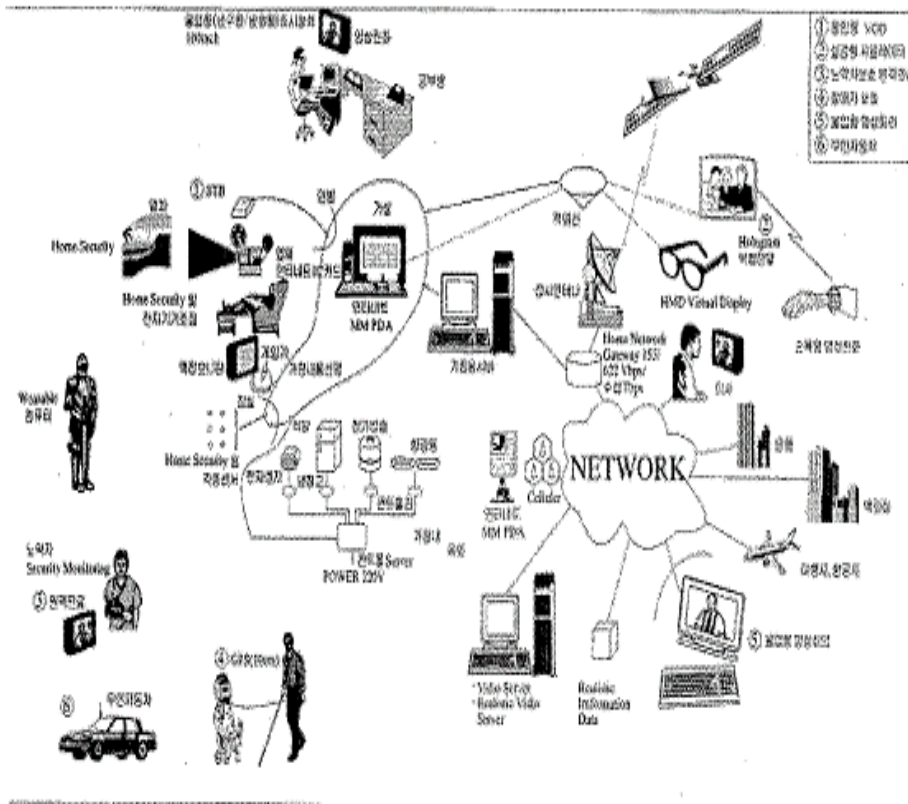
비스를 이용하는 모습을 보여 주고 있다. 이러한 고품질의 정보통신 서비스를 공급하기 위하여, 정보통신 시스템 및 단말기의 대용량화, 초고속화, 저전력 소비화, 그리고 신기능화가 필수적인데 가장 기본이 되는 첨단기술이 NIT 융합기술이다. NIT 융합기술의 파급효과를 고려할 때, NIT 융합 기술의 개발은 국가의 중추 산업으로 부상할 것으로 기대된다.



〈그림 3-15〉 정보통신 사회와 NIT

NIT 융합기술은 미래의 모든 정보통신 고기능 소자에 필수적으로 적용되는 핵심성과 기반성으로 인하여, 세계 수 천억 불의 정보통신 소자 기술 시장에서 일정 부분 이상을 점유할 것이다. 특히, 우리나라의 반도체 부문 수출은 170 억불에 달하며 전체 수출량의 13%를 차지하고 있는데, 이를 계속 유지/확대하기 위해서는 현재의 반도체 소자 기술을 대체할 수 있는 미래형의 NIT 융합기술의 조기 확보가 절실하게 요구된다. 미래 정보화 사회에서는 현재 사용하고 있는 모든 부품을 소형화하는 것이 필수적이며, 이는 소비자의 편의를 더욱 증진시킬 수 있다. 즉, 전자 제품의

소형화는 NIT 융합기술에 의한 기본 단위 소자 및 부품의 축소화에 의해 가능하다.



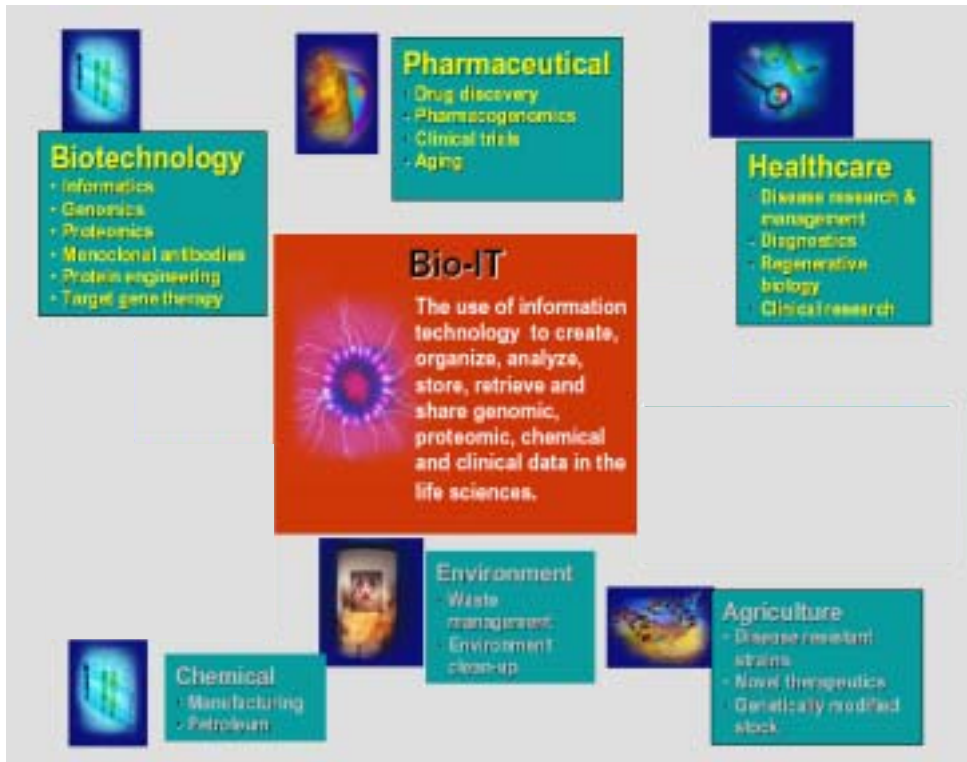
자료: 정보통신연구진흥원, IT-NT 융합기술 기획보고서, 2002

〈그림 3-16〉 미래 정보통신 사회의 서비스 개념도

4. BIT(Bio-Information Technology) 융합기술

(1) BIT 융합기술의 정의

바이오-정보기술은 “정보기술을 활용하여 생체 및 생명현상에 관한 정보기와 소프트웨어 및 콘텐츠를 개발, 공유, 서비스하는 첨단 응용기술 분야”이다. 바이오-정보기술은 정보기술을 활용한 바이오정보의 신속한 추출 및 축적과 관련되는 바이오인포매틱스 기술분야와 바이오기술을 IT 분야의 제품개발에 접목한 바이오일렉트로닉스 기술분야로 나눌 수 있다 (한국전자통신연구원, 2002).



자료: http://webby.ctaalliance.org/MCBI/BioIT_presentations.html,

Presentations from the Bio-IT Workshop, 2003

〈그림 3-17〉 BIT의 활용사례

최근 생명과학의 발전은 새로운 분자생물학 실험 기법의 발달 및 HTS(High Throughput Screen System: 대량분석기술) 기술의 발전으로 인하여 엄청난 데이터들을 쏟아내고 있다. 데이터, 정보, 지식으로 이어질 수 있는 일련의 과정 속에는 생물학의 수준 높은 이해도뿐만이 아니라, 데이터관리, 정보가공, 지식창출로 만들 수 있는 컴퓨터과학기술 및 확률적 접근 방법들이 필요하다. 최근 Human Genome Project 의 성공적인 진행, DNA microarray 실험기술의 발달, SNP(single nucleotide polymorphism) 연구의 중요성들로 인하여 생물 정보학 분야는 그 중요성이 더욱 더 부각되고 있다. 이들 연구 성과들은 궁극적으로 생명현상의 이해라는 커다란 인류의 과제에 많은 결과물들을 제공할 것이며 그 과정 속에서 인간질병의 근원에 대한 이해, 그 치료 방법 등에 대한 많은 정보들을 제공할 것이다(과학기술분과 중간보고서).

바이오인포매틱스가 BT 연구에 본격적인 영향력을 발휘하기 시작한 것은 1980년대 후반으로 개별 과학자들이 발견한 여러 생물의 DNA 정보를 수록하는 공공의 데이터베이스가 만들어지면서부터라고 할 수 있는데, 이들 중 가장 대표적인 것이 미국의 NCBI(National Center for Biotechnology Information)에서 관리하는 GenBank이다. 신약개발에 있어서 유전정보를 데이터베이스로 만드는 바이오 인포매틱스가 더욱 중요시 될 것이며, 인간에게 이식해도 거부반응을 일으키지 않는 유전자를 변형한 동물의 장기가 향후 면역학 발전이 이루어짐에 따라 대량생산될 가능성이 있다(과학기술분과 중간보고서).

대량 획득되는 바이오 데이터의 최대 부가가치 창출을 위해서는 대용량 바이오 데이터로부터 유용한 지식정보를 자동적으로 추출해내기 위한 효율적인 통합분석 기술이 필요하며, 다양한 형태로 분산되어 있는 바이오 데이터 및 문헌정보를 통합하여 연동 및 검색, 관리하는 기술이 매우 중요하다. 또한 바이오 정보가 페타바이트급으로 증가하고 있음에 따라 SAN(storage area network), NAS(network attached storage) 등의 저장장치를 활용하여 대용량 정보를 저장 관리하는 기술이 요구되며, 미래의 고부가가치성 산업인 신약개발 및 의료 진단 분야에 바이오인포매틱스 기술을 효과적으로 활용할 수 있도록 각 분야별 응용지원 기술의 개발이 시

급하다(ETRI, 2002).

현재까지는 인간을 비롯한 각종 미생물 및 동식물의 유전자 서열과 지도를 얻어 방대한 양의 데이터를 만들어 축적하는 연구가 주류를 이루고 있다. 추후 이들 데이터를 토대로 유전자와 단백질의 기능을 밝히고 여기에서 나온 결과를 새로운 의약 및 치료법 개발 등에 이용하는 연구가 중심이 될 전망이다(김한신, 2002).

(2) BIT 융합기술의 유형

1) 바이오 칩

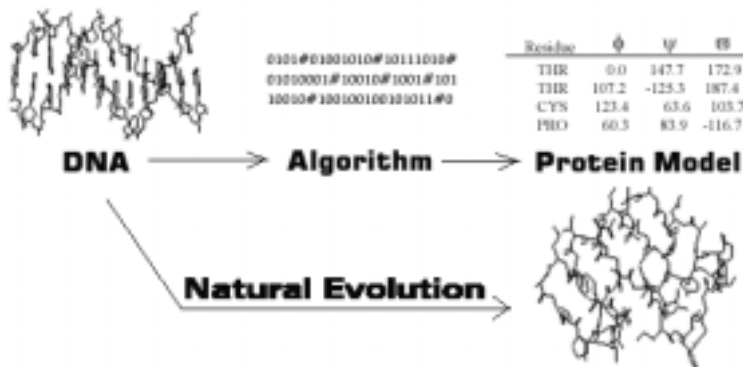
바이오칩 기술은 생명공학 분야에 가장 근간이 되는 기술 중 하나로 생물학적 활성을 갖는 생체분자를 고체상태의 소형박막에 고밀도로 부착하여 반도체 칩 형태로 제작한 것을 말한다. 엄청난 생물정보를 해석하는 생명공학 연구 툴로서 뿐만이 아니라 질병 진단, 초고속 신약개발 등에 반드시 필요한 기술이다. 바이오칩은 크게 마이크로어레이(microarray)와 마이크로플루이딕스 칩(microfluidics chip)으로 구분할 수 있다. 마이크로어레이는 수천 혹은 수 만개의 DNA, 단백질, 탄수화물, 펩타이드 등을 일정간격으로 배열하여 붙이고 분석대상 물질을 처리하여 결합양상을 분석할 수 있는 칩(DNA칩, 단백질칩)을 말하며, 마이크로플루이딕스 칩(또는 Lab-on-a-chip)은 미량의 분석대상 물질을 흘려보내면서 칩에 집적되어있는 생물분자 혹은 센서와 반응하는 양상을 분석할 수 있는 칩을 말한다(과학기술전문분과 보고서).

세계적인 거대 전자업체들이 기존의 반도체 사업을 바탕으로 DNA 칩 검출 분석기술개발을 전개하고 있는 실정이며, 현재는 단백질 칩(Protein chip), 셀칩(Cell Chip), 메타볼릭칩(Metabolic chip), 랩온어칩 등 차세대 바이오 칩 개발에 주력하고 있다. DNA chip의 확대보급에 따라 신약개발, 환경모니터링, 식품검사용으로의 응용도 가능하며, 기존의 IT와 결합하여 재택진료 및 e-Doctor 등의 미래 생활이 앞당겨질 전망이다.

2) 바이오인포매틱스 기술

바이오인포매틱스 기술은 생명과학에 의해 생성된 다양한 생명현상의 정보를 통계적, 전산적인 방법을 이용하여 저장, 분석, 활용하는 기술로 신약 개발, 질병 진단 및 치료, 농산물 품종 개량 등 유전자 정보를 고부가가치 산업에 활용하기 위하여 생명공학 전반에 관한 데이터를 다루는 종합적인 분야이다. 인간 게놈지도의 완성 등 생명체에 대한 이해와 함께 각종 분석 및 정보기술의 발달 등으로 인해 생물체 및 생물체를 구성하고 있는 물질들의 구조에 대한 이해와 관련 정보의 축적이 가능해졌다. 바이오의 정보량은 초고속 계산기의 처리성을 초월하므로 바이오기술의 성패는 방대한 정보에서 얼마나 빨리 유용한 정보를 추출하고 이를 제품화하느냐에 달려있고, 따라서 컴퓨터, 정보통신기술의 발달을 통한 효과적인 네트워크 형성과 데이터베이스 활용이 기술발전의 원동력이 될 것이다.

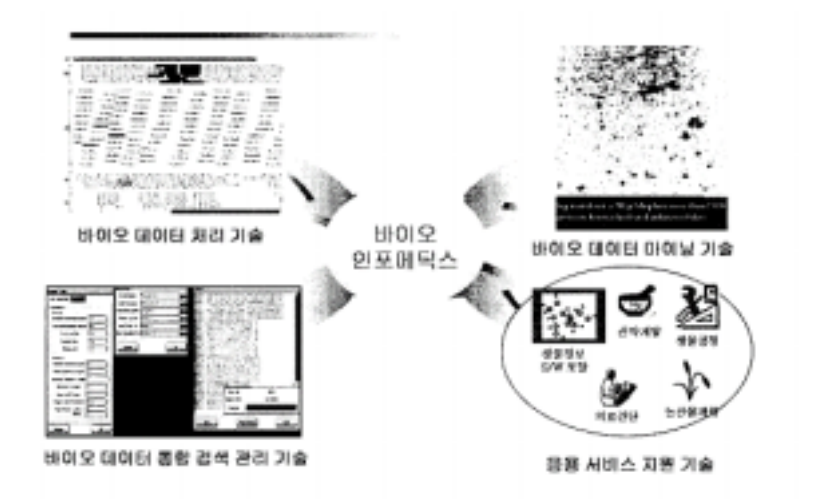
바이오인포매틱스 기술분야는 바이오 데이터 처리 기술, 바이오 데이터 마이닝 기술, 바이오 데이터 통합 관리 기술, 바이오인포매틱스 응용서비스 지원 기술을 포괄한다.



〈그림 3-18〉 바이오 인포매틱스 개념

〈표 3-6〉 바이오인포매틱스 기술분야의 내용

기술명	내용
바이오 데이터 처리 기술	다양한 형태의 바이오 데이터를 처리하여 분석이 용이한 형태로 변환하고 시각화하는 기술
바이오 데이터 마이닝 기술	바이오 데이터를 분석하여 내제된 패턴을 찾아내어 유용한 지식을 생성하는 기술
바이오 데이터 통합 관리 기술	분산되어 있는 다양한 형태의 대용량 바이오 데이터를 저장, 관리하고 통합 검색하는 기술
바이오인포매틱스 응용서비스 지원 기술	통합 관리된 바이오 데이터를 각종 응용분야에 활용하는 기술



자료: 한국전자통신연구원, IT-BT 융합 기술개발 기획연구, 2002

〈그림 3-19〉 바이오 인포매틱스 기술분야

3) 바이오일렉트로닉스 기술

바이오일렉트로닉스 기술은 생체물질과 마이크로 소자를 결합하여 새로운 개념의 소자를 만드는 기술로 바이오 센서 등 생체물질과 전자공학을 결합한 분야, 나노 바이오소자 및 나노소재를 이용한 질병진단 및 치료 기기(LOC 등), 바이오 MEMS(미세기전 집적시스템) 등이 이 분야에 포함된다. 바이오-정보 융합기술의 개발초기에는 정보기술분야가 바이오기술 분야의 성장을 견인하지만 바이오산업이 성숙단계에 이르면 바이오기술을 정보기술분야의 제품개발에 접목하는 식으로 변화가 이루어질 것이다. 예를 들면 생명체의 유전자와 같은 방식으로 정보를 처리하는 컴퓨터, 지능을 가진 로봇, 인체내장형 컴퓨터 등이 등장할 것이다(김한신, 2002).¹⁰⁾

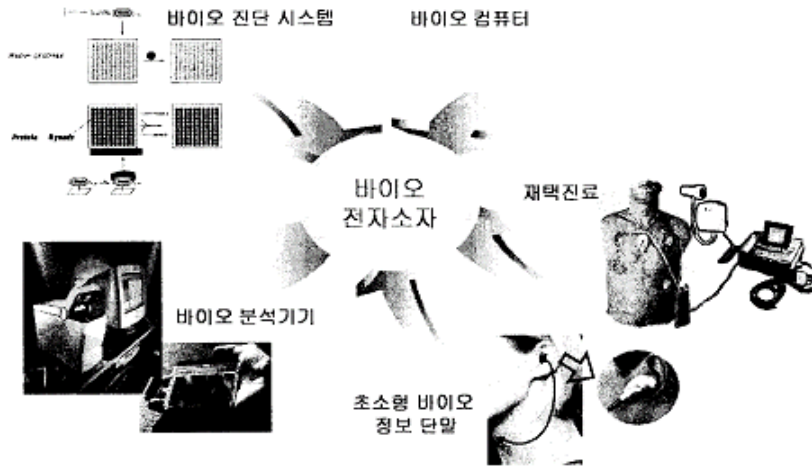
바이오일렉트로닉스 기술분야는 바이오 정보처리 소자 기술분야와 바이오 정보 단말 기술분야의 2개 기술을 포괄한다.

〈표 3-7〉 바이오 일렉트로닉스 기술 분야의 내용

기술명	내용
바이오 정보처리 소자 기술	질병을 감지, 진단, 치료하는 소자를 연구하는 기술 · 바이오 진단 모듈 및 시스템 기술(휴대형 바이오센서, 바이오칩, 진단/치료 복합용 의료기기 등의 소자 및 시스템 기술) · 바이오 컴퓨팅 기술(DNA 등 생체분자의 특성을 이용한 소프트웨어 및 하드웨어 기술) · 인공생체보조기 기술(각종 장기, 뼈, 눈, 피부 등의 인공 제작 및 인공장기의 기능이나 동작을 제어하는 기술)
바이오 정보 단말 기술	감지된 인체 정보를 송수신하는 소자를 연구하는 기술 · 바이오 정보 단말기용 ASIC(주문형 반도체) 기술 및 트랜시버 기술 · 바이오 정보 단말기의 모듈 기술 · 인체-무선 단말기 간의 무선 링크 기술

10) 김한신, “바이오산업”, 한국주력산업의 경쟁력 분석, 삼성경제연구소, 2002).

바이오 컴퓨팅 기술에 대하여 살펴보면, 기존의 컴퓨터는 0과 1로 정보를 나타내지만 DNA 컴퓨터는 DNA의 화학적 단위로 정보를 표시하고 DNA를 합성하여 계산을 수행함으로써 많은 연산을 동시에 수행해 낼 수 있다. 그리고 분자단위에서 화학적, 물리적 정보를 읽고 구분하여 정보를 저장하고 처리함으로써 문제해결이 가능한 능력을 갖게 하는 한편 복잡한 컴퓨터 시스템이 인간의 능력을 능가하는 방식으로 설계될 수 있는 환경을 조성할 수 있다(허두영, 2001)¹¹⁾



자료: 한국전자통신연구원, IT-BT 융합 기술개발 기획연구, 2002

〈그림 3-20〉 바이오 일렉트로닉스 기술분야

4) 바이오 MEMS

바이오 MEMS기술은 silicon, glass, plastic 등을 이용한 초정밀 유체 제어 시스템 설계, 제조공정기술, 대량생산기술, 극미량 시료처리 및 분류, 이송 등을 위한 시스템 지능화 및 자동화 기술이다. 마이크로 미시세계의 유체는 거시세계와 다른 현상을 보이므로 바이오 MEMS는 미세한 양의 시료를 정확하게 이송, 분배, 혼합하는 미세유체제어기술(microfluidics)을 근간으로 하고 있다.

11) 허두영, 테크노퓨처, 거름, 2001.

바이오 MEMS 기술을 기반으로 한 바이오 응용소자는 미량의 시료를 이용하여 빠른 시간 내에 필요한 정보를 처리할 수 있는데, 이는 개인진단용 시스템이나 혹은 약물개발용 HTS 시스템의 특성상 필수 불가결한 요소기술이다. 특히 마이크로/나노 유체조절 기술은 이들 MEMS 기술을 근간으로 하는 바이오 시스템의 핵심기술이며 이러한 MEMS 기술을 기반으로 한 시스템 개발은 바이오 산업 중 가장 고부가가치 산업이다. 최근 마이크로 유체시스템과 소자 부품에 대한 연구개발이 국제적으로 활발하게 이루어지고 있는데, 신 물질 개발과 시료시약의 성분분석을 위한 마이크로 종합분석 시스템이 그 대표적 예이다. 이 시스템은 기술 경제적 측면에서 기존 시스템에 비해 유리하고 그 핵심소자인 마이크로 밸브와 마이크로 펌프가 생체의학을 위한 응용도구로 인정되며 연구가 활발히 진행되고 있다(과학기술전문분과 보고서).

(4) BIT융합기술의 과학기술적 파급효과

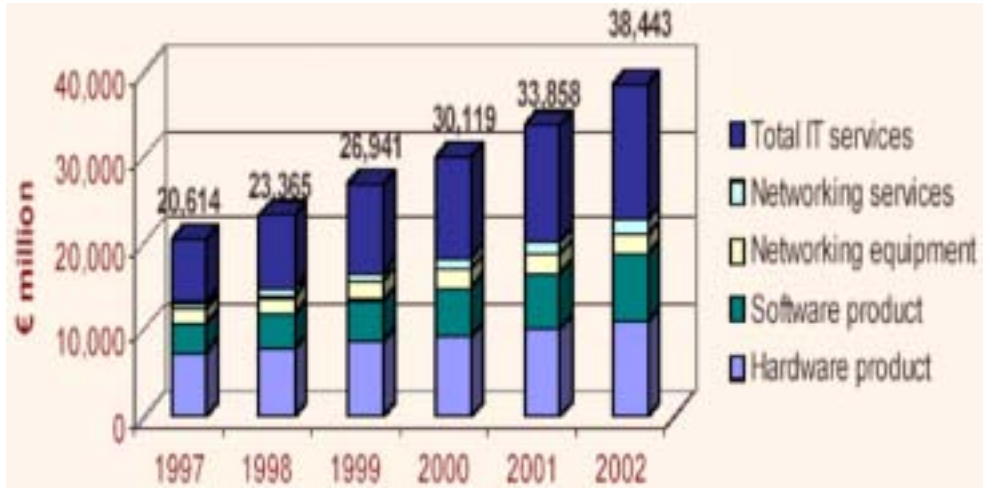
바이오기술과 정보기술의 융합 및 발전은 관련분야에 파격적인 혁신을 가져다 주었다. 바이오 인포매틱스, 바이오칩, 바이오 MEMS 등 관련기술의 급격한 발달과 이의 응용은 기존 제약기업들의 연구개발과정에 영향을 미쳐 그 효율을 파격적으로 높이는 계기를 마련하게 될 것으로 예상된다.

“인간친화적인 첨단 의료복지서비스를 제공하는 e-Health 산업은 생명공학 및 의학지식과 첨단 공학기술이 결합되어 새로운 서비스를 지속적으로 창출해가는 고부가가치 산업으로 인류의 건강증진, 의학, 의료 및 복지를 위한 필수불가결한 21세기 중요한 산업이 될 것으로 전망되고 있다.”(ETRI, 2002)

생명체의 현상 및 기능을 이용하여 기존의 전자공학적인 소자로 불가능한 것을 소자화하려는 기술의 대한 관심과 필요성이 급부상하고 있으며, 이를 위해 생물이 갖고 있는 특징적인 기능, 기구 혹은 구조를 보이는 소자 또는 시스템화 기술 개발이 요구된다. BIT 융합기술의 가장 큰 기술적 성과인 생물소자분야는 향후 10 년 후에는 인간의 생활 전반에 많은 영향을 미치게 될 것으로 기대되며 특히 바이오 컴퓨팅 기술은 전자소자, 정보통신, 항공우주, 방위산업 등 다양한 분야에 응용이 가능할 것이다

이와 같이 향후 바이오산업(BT)의 경쟁력은 정보산업(IT)과의 융합 기술

의 확보 여부에 따라 결정될 것이다. 인터넷기반의 기존 e-Health 시장은 Frost & Sullivan에 의하면 2004년에 20억불에 이를 것으로 예측되고, 네트워크 장비까지 고려한 Gartner Group에 의하면 2002년에 384억불을 예측하고 있다(〈그림 3-21〉 참조).



자료 : Source: Gartner Group, 1999

〈그림 3-21〉 Healthcare Information Society Technology Market

IV. NBIT 융합기술의 영향에 대한 평가

1. 경제(산업)적 파급효과

(1) 경쟁력 향상에 미칠 효과

기술적인 성과가 생산 및 조업과정에서의 유연성과 효율성 향상을 가져오고, 수요 및 시장 니즈에 대한 대응력 그리고 품질향상에 기여할 때 직접적인 경제효과로 나타나게 된다. NBIT 기술의 경우 새로운 차원의 제품을 출시하면서 소비자의 생활 및 구매패턴을 크게 변화시킨다는 점에서 시장지배력을 획기적으로 변화시키는 수단이 될 수 있다. 휴대성과 편리성을 추구하는 기술에 대한 수요가 급격하게 증가하면서 이 부문에 대한 기술투자가 가속화되고 있다. 융합신기술을 기반으로 하는 초경량, 초정밀, 초저전력 소모기술이 발전하면서 단일 생산제품을 생산하는 시스템 전반의 경쟁력을 결정하고, 이는 다시 시장 지배력을 높이는데 작용한다.

미국, 일본, 유럽 등 각국 정부는 바이오산업을 21세기 핵심 첨단산업으로 지정하여 지원을 강화함으로써 국가경쟁력 강화를 꾀하고 있으며, 장래 산업주도권 확보를 위한 경쟁이 치열해질 전망이다. 기업의 입장에서는 이러한 경쟁구도를 주도할 새로운 제품이나 서비스가 필요하다. NBIT 융합기술은 자체적인 기술과 응용제품 및 서비스로 신산업의 창출을 견인할 뿐 아니라, 그 파생기술로 기계, 소재, 전자 등 기존산업을 고도화시켜 고부가가치를 촉진하는 경제적 파급효과를 가져올 것으로 예상된다.

(2) 고용에 미칠 효과

융합기술과 같은 신생기술(emerging tech.)은 소재, 장치, 시스템 등에 영향을 미치면서 생산 공정에 영향을 미치게 되고, 결과적으로 생산과정에 결부되어 있는 노동력의 고용형태와 고용구조에 영향을 미치게 된다. 새로운 장비나 생산시스템, 그리고 우회 생산과정을 통해 공정일부가 체화된 제품에 적용되면서 절대적인 노동투입량을 감소시키면서 생산성을 향상시키는 효과를 가져온다. 동시에 NBIT 융합기술이 소재, 기계 등의 산업에 새로운 기회를 제공하면서 주력산업의 경쟁력을 강화시키고 신산업을 창출할 때, 고용량의 증가를 가져올 수 있다. 따라서 NBIT기술을 통한 신기술의 고용증대 효과를 극대화

하려면 신산업뿐만 아니라 기존 주력산업에 대한 신기술의 적용을 보다 적극적으로 추진하는 것이 필요할 것으로 예상된다.

그러나, NBIT와 같은 신기술의 융합은 초기에는 소수의 과학기술인력이 집중적으로 투입된다는 점에서 고급·핵심기술인력의 고용증가로 나타나게 되지만, 기능인력 및 기존 기술과 생산방식에 익숙한 근로자들에게는 일자리의 박탈을 나타낼 수 있다. 이에 따라 융합신기술과 관련된 전문인력의 적절한 수급대책이 따르지 않는다면 고급인력의 공급부족현상 속에서 기술력이 낮은 집단에서 공급초과현상이 동시에 나타나게 될 것이다. 신기술에 소외된 사람들에게는 새로운 고용기회상의 불평등을 발생시킬 가능성이 높다. 이러한 불평등은 적절한 과학기술인력양성과 함께 기존 산업인력이 적절한 교육-훈련 프로그램이 뒷받침되지 않는다면, 고용구조의 변화에 의한 엄청난 손실이 수반될 수 있다는 점을 예상하게 한다.

(3) 기업구조에 미칠 효과

신기술융합은 나노기술, 바이오기술, 정보기술 그리고 인지과학 및 시스템 접근 등과 밀접한 상호연관성을 갖고 발전하고 있다. 세계화가 가속화되면서 국제적인 신기술개발이 활성화 되고 있으며, 자체 개발보다는 외부기업의 R&D 성과에 대한 의존도가 점점 높아지고 있다. 신기술의 급속한 발전과 융합화는 개별 기업이 모든 기술개발자원과 산업화에 필요한 역량을 갖추는데 한계를 갖게 한다. 연구개발만 전문으로 하는 기업이 활발하게 활동하고 있으며, 세계적인 대기업과 협력하여 R&D, 생산, 마케팅에 대한 역할분담을 통한 핵심역량을 극대화하는 사례가 두드러지게 나타나고 있다. 이러한 현상이 상시적으로 발생함에 따라 개별 기업의 구조도 이에 맞추어 급격하게 변화할 것으로 예상된다.

90년대 후반부터 전 세계적으로 첨단분야 연구를 수행하는데 있어 나타나는 추세가 네트워크형·개방형 R&D 수행체제다. 연구자산을 가진 기술기업을 인수해 신기술 및 신제품으로 개발하는 인수개발(A&D, Acquire and Development), 경쟁기업과 네트워크를 형성하여 신기술, 신제품을 개발하는 제휴개발(C&D, Connect and Development) 등은 이러한 변화의 단면을 보여주는 사례들이다. 이에 따라 국내에서도 융합신기술의 특성을 이해하고, 아이디어가 시장창출까지 이어나가도록 하기 위해 연구개발을 전문으로 하는 기업

을 활성화하는 여건을 마련이 시급하다는 것을 알 수 있다.

(4) 산업발전에 미치는 효과

NBIT 융합기술은 에너지 소비와 오염물질의 감소, 신물질 생산 등 산업발전에 혁명적인 변화를 유도할 것으로 전망된다. 이러한 NBIT 융합기술은 궁극적으로 컴퓨터, 네트워크, 생명공학을 결합해 지금까지는 상상도 하지 못했던 제품을 생산할 것이다. 나노 수준에서 물질을 통제 가능하므로 전혀 새로운 소재나 제품, 의약품, 식품, 자동차 및 비행기, 가전제품을 만들어 낼 수 있다.

이러한 NBIT 융합기술의 발전은 신기술에 기반을 둔 여러 부문·산업간의 결합에 의해 기존 산업의 발전을 촉진하고 신기술 산업과의 융합을 통해 경제성장의 새로운 원천을 마련할 것으로 기대된다. 또한 신기술 융합에 의한 산업 활성화는 신산업 창출 그 자체의 외형적 규모성장을 통해서뿐만 아니라 소재 및 공정, 생산기술의 고도화를 통해 실질적인 고부가가치화를 실현할 수 있다.

나아가 초기단계의 NBIT 융합기술의 산업화 적용 확대는 선진국의 원천기술경쟁력 및 중국 등 개도국의 가격경쟁력 향상에 의해 Nut-Cracker 상황에 직면할 것으로 우려되는 우리나라 산업의 새로운 활로를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 NBIT 융합기술은 자원과 비용이 적게 드는 하이테크 제품을 생산하는 '파워 툴(Power Tool)'을 제공해 세계 경제를 혁신하는데 기여할 것이다. 이는 권력의 근원으로 활용되던 일반 자원 뿐 아니라 식량과 같은 자원의 희소성을 해결해 줌으로써 급격한 사회변동을 함께 야기할 것으로 보인다.

(5) NBIT기술 시장의 규모 및 산업 (예시)

1) NBT 기술시장 : 2015년 1,800억 달러 규모로 성장¹²⁾

NBT 기술의 응용 제품들은 대부분 아직 개발 단계에 머물러 있으나, 활발한 기술 개발 노력에 힘입어 상용화가 빠르게 진전될 것으로 기대되고 있다. 현재 NBT 기술 시장은 연구용 분석기기, 휴대용 측정기기 등이 주를 이루고 있으나, 점차 임상 및 진단과 식품, 농업, 환경 모니터링 분야 등으로까지 확대 응용될 것으로 예상되고 있다. 특히 2005년 중에는 바이오센서, MEMS 기술이 발달하면서 진단용 칩 분야의 신제품들이 대거 등장할 것으로 예상된다. 이와 같은 파급 효과를 고려하여, 시장조사기관인 Frost & Sullivan에서는 나노바이오테크 관련 시장이 2015년경 1,800억 달러에 이를 것으로 전망하고 있다.

따라서 나노바이오테크 관련 시장의 잠재성을 인식한 각 기업 및 연구기관들은 관련 분야 제품 개발에 주력하고 있다. 바이오칩 분야에서는 현재 전 세계 바이오칩의 60%를 생산하고 있는 Affymetrix를 비롯, Motorola, Corning, Agilent Technologies, Nanogen 등이 대표적이며, 인공망막·인공 귀 등 생체 삽입용 칩의 개발에는 MIT, Stanford 등 대학이 주축이 되어 연구를 수행하고 있다. 하루가 다르게 발전하고 있는 나노바이오테크는 독자 기술의 확보가 매우 중요한 분야로, 전 세계적으로 치열한 경쟁이 전개되고 있다. 국내 관련 기업들도 적극적으로 기술 역량을 확보하여 빠르게 변화하는 기술 환경에 효과적으로 대처해야 할 것으로 보인다.

2) NIT 기술시장 : SoC(System on Chip)

미국의 NSF(National Science Foundation)는 2015년 전 세계 나노기술 관련 제품 및 서비스 시장 규모가 1~2조 달러에 달할 것이며, 산업별로 기술혁신과 성장률의 편차가 클 것으로 전망하고 있다. 특히, 나노소재 부분의 시장이 빠르게 성장할 것으로 예측하고 있다. 현재 IT-NT 융합 기술에 투자를 하고 있는 대표적인 기업으로는 Agilent, AMD, Coming, HP, Hitachi, IBM, Lucent, Motorola 등이며, 이들 기업은 나노소재와 전자제

12) 고은지, '나노바이오테크(Nanobiotech)', 주간경제 758호 2003.12.17, LG경제연구원

품의 컨버전스(convergence), 나노기술 기반의 메모리, 스토리지 미디어, 센서, 전지, 연료전지(fuel cells) 등의 제품을 개발하고 있다. Realis의 2002년 발표자료("A Critical Investor's Guide to Nanotechnology")에 따르면, 2015년 전세계 IT-NT 융합기술 제품의 시장 규모가 나노소재(NT-Materials)는 3,000억 달러, 나노가전(NT-Electronics)은 1,000억 달러에 달할 것으로 전망하고 있다.

NT-IT 융합기술은 미래의 모든 정보통신 고기능 소자에 필수적으로 적용되는 핵심성과 기반성으로 인하여, 세계 수천억불의 정보통신 소자 기술 시장에서 일정 부분 이상을 점유할 것이다. 특히, 우리나라의 반도체 부문 수출은 170억불에 달하며 전체 수출량의 13%를 차지하고 있는데, 이를 계속 유지/확대하기 위해서는 현재의 반도체 소자 기술을 대체할 수 있는 미래형의 NT-IT 융합기술의 조기 확보가 절실하게 요구 된다¹³⁾.

NT-IT 융합기술의 시장전망을 살펴보면, 아직 구체적으로 발표된 것은 없지만, 전문가들은 정보통신 산업기술에 직접적으로 이용되어 나노급 IT 부품이 생산되는 시점을 향후 10년 내지 15년 후가 될 것으로 전망하고 있으며, IT관련 나노기술의 시장이 2020년경에는 수천억불이 될 것으로 예측된다¹⁴⁾.

여기서 NIT 기술중 SoC(System on Chip)의 시장 전망¹⁵⁾을 살펴보면 다음과 같다. SoC 기술은 각종 부품을 하나의 반도체 칩에 집적시킴으로써 향후 반도체뿐만 아니라 개별 부품을 모두 원칩화하기 위해 등장한 기술로 주로 연산 소자와 I/O, 로직, 메모리 등으로 구성된다. 컴팩트하고 통합도가 높은 SoC는 고성능, 저소비전력 등을 특징으로 하기 때문에 핸드헬드 정보단말이나 민생 기기용에 적합한 솔루션으로 주목받고 있다. 현재는 LSI 기반으로 마이크로프로세서와 메모리 등을 통합하는 데 초점이 맞춰지고 있으나 궁극적으로 초정밀가공기계기술(MEMS)과 합쳐질 전망이다.

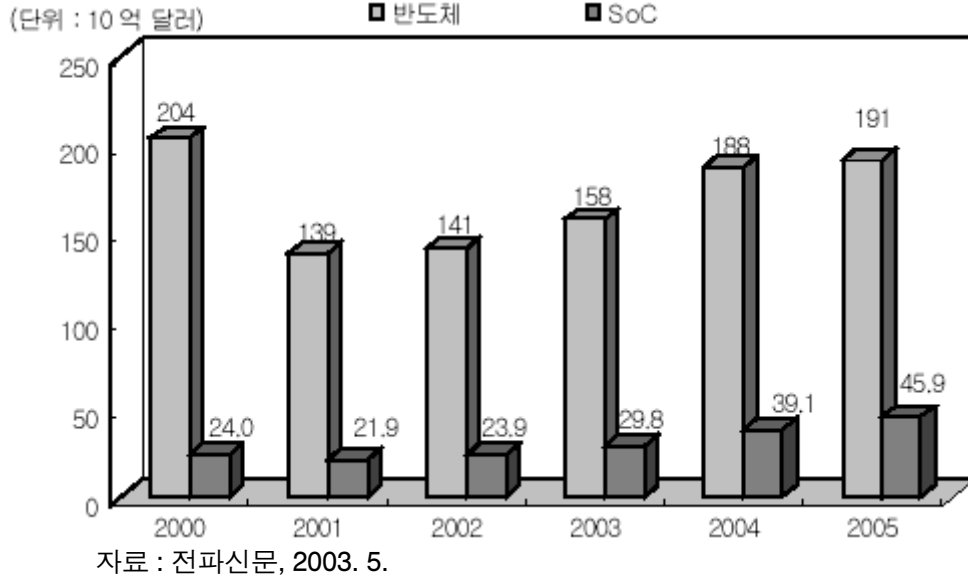
시장조사회사인 Dataquest 등에 따르면 2002년 세계 IC 시장 총 생산액은 1,400 억 달러로서 이 가운데 SoC 솔루션이 전체의 16.8%에 상당하는 127 억

13) 정태형, IT-NT 융합기술 기획보고서, 한국전자통신연구원, 2002. 4. 30

14) 정태형, IT-NT 융합기술 기획보고서, 한국전자통신연구원, 2002. 4. 30

15) IITA, SoC 기술동향 및 시장 전망_15대 품목 시장동향 보고서, 2003. 12. 15.

달러를 차지하고 있는 것으로 분석하고 있다. 시장분석에 의하면 2003년 세계 SoC 솔루션 시장의 생산액은 298억 달러(반도체시장 점유율은 19.1%)에 달할 것으로 보이며, 2004년 및 2005년에는 각각 391억 달러(21%), 460억 달러(24.6%) 규모에 달해 순조로운 시장 확대가 진행될 것으로 예측하고 있다.



〈그림 4-1〉 SoC(System on Chip) 시장 전망

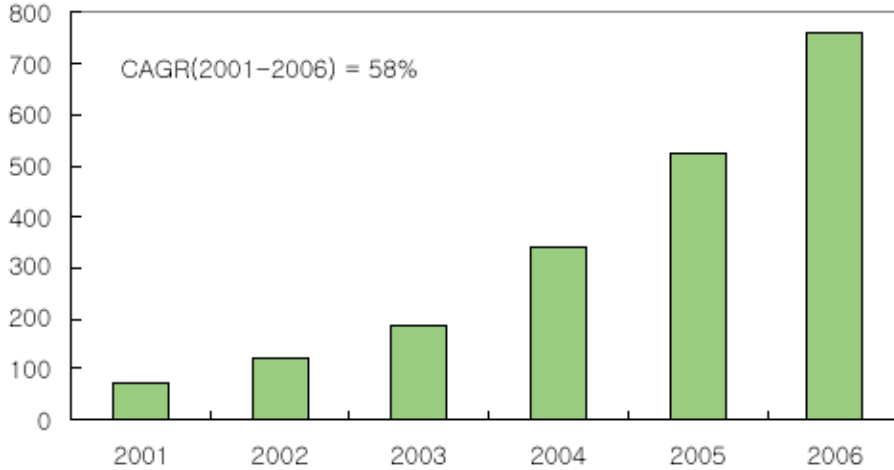
3) BIT 기술시장 : 바이오 칩

바이오 칩은 BT, IT, NT 등 소위 차세대 미래기술이 모두 융합되는 대표적인 제품으로, 융합기술을 통한 제품화 성공 모델을 제시할 분야로 주목받고 있다¹⁶⁾. 바이오인포매틱스(Bioinformatics), 바이오칩(Biochip) 등으로 대표되는 IT-BT 융합 분야의 발전은 바이오산업에도 크나큰 혁신을 가져와, 최근 인간 지놈 프로젝트의 완성에도 지대한 역할을 하였다. 특히 바이오칩(Biochip)은 BT, IT, NT 등 소위 차세대 미래 기술이 모두 융합되는 대표적인 제품으로, 융합 기술을 통한 제품화 성공 모델을 제시할 분야로 주목받고 있다. 바이오칩의 파급 효과를 바탕으로, 각 시장조사기관에서는 바이오칩 시장에 대해 긍정적 전망을 내놓고 있다. Frost & Sullivan에 따르면 2000년 5억 3천만 달러였던 세계 바이오칩 시장은 2004년 33억 달러 규모로 급팽창할 것이라고

16) LG 경제연구원, 'IT산업의 변혁을 주도할 7대 유망기술', 산업정보, LG주간경제(2004. 1. 7),

한다. 현재 바이오칩 시장에는 Affymetrix를 비롯한 바이오테크 기업들과 Motorola, Agilent Technologies 등의 IT 기업들이 참여하고 있다.

(단위: 백만 달러)



자료 : BioInsight, 2002. 3. ETRI 정보조사분석팀

〈그림 4-2〉 전 세계 단백질 칩 시장 규모 전망(2001~2006년)¹⁷⁾

최근 Proteomics 분야의 지대한 관심과 연구개발이 활발히 진행됨에 따라 이에 필수적인 단백질 칩 시장이 크게 성장하고 있다. 2001년도 단백질 칩의 시장 규모는 주도적인 업체인 Biacore AB의 6,000만 달러 매출을 포함하여 총 7,600만 달러이며, 2006년까지 58%의 복합연평균 성장률을 기록하면서 약 7억 5,000만 달러 규모로 성장할 전망이다(〈그림 4-2〉 참조). 2002년 현재 전 세계 단백질 칩을 판매하거나 시장 참여를 준비 중인 업체는 Biacore, CIPHERGEN, HTS Biosystems, Phylos, SomaLogic 및 Zyomyx 등 약 25개로 파악되고 있고, 단백질 칩 개발을 위한 주요 학술연구 프로그램에는 Lawrence Livermore National Laboratory의 Joanna Albala 그룹, Stanford University의 Patrick Brown group 그리고 Harvard University의 Gavin Mac Beath 그룹 등이 참여하고 있다. 올해까지는 Biacore AB의 매출이 시장 규모의 대부분을 차지할 것이지만 2003년부터는 현재보다 10배에 가까운 새로운 업체가 출현하고 경로 데이터(pathway data)와 같은 고속 단백질 분석에 대한 요구가 매우 높아 시장 확대가 가속될 것으로 보인다.

17) ETRI, 전 세계 바이오 칩 시장동향, 35개 품목 시장동향보고서(200?)

Motorola의 경우는 1998년 설립된 Motorola Biochip Systems를 중심으로 바이오칩 시장에 본격적으로 참여하고 있으며, Agilent Technologies는 자체 연구뿐 아니라 Caliper Technologies 제품의 판매 제휴를 통해 랩온어칩(Lab-on-a-chip) 분야에 초점을 맞추고 있다.

이처럼 바이오칩 개발을 위한 기업들의 경쟁이 치열하게 전개되면서, 신약 개발·임상 진단 등의 분야에서 바이오칩의 상용화가 이루어지고 있다. 현재 바이오칩 시장의 대부분은 DNA칩 등 연구개발용 제품이 차지하고 있으나, 향후 2~3년 이내에 진단용 칩의 상업화가 진전되면서 점차 단백질칩, 랩온어칩 등의 비중이 증가할 것으로 보인다. 또한 DNA칩과 Bio-MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술의 융합을 통해 작고 저렴한 고속탐색 시스템(High-Throughput) 관련 시장이 본격적으로 발전할 것으로 예상된다.

나노바이오테크의 응용 분야

나노바이오테크를 이용한 응용 제품들로는 바이오칩(Biochip)과, 바이오센서(Biosensor)를 이용한 휴대용 의료기기, 초고속 신약 후보물질 검색 도구나 초소형 로봇을 이용한 약물전달시스템 등이 대표적이다. 이외에도 나노바이오테크는 소재 분야와도 결합하여 화상 치료 등을 위한 피부 및 뼈의 대체 물질 개발에도 쓰이고 있다.

바이오칩은 유리나 실리콘 등의 무기물 기판 위에 DNA, 단백질 등의 생체 유기물을 결합시켜 유전자 발현 양상이나 단백질 분포, 반응 양상 등을 분석해낼 수 있도록 한 생물학적 마이크로 칩(Biological Microchip)을 말한다. 바이오칩 기술을 응용한 분야 중의 하나인 바이오센서는 분자간의 선택적인 반응성을 이용하여 다양한 생리 활성 물질의 농도를 정량할 수 있는 것으로, 혈액 성분 분석이나 각종 병원균의 정량 등 의료 분야에서 이미 활발하게 응용되고 있다. 최근에는 MEMS(Micro Electro Mechanical System, 극미세 전자기계 시스템)기술을 바이오센서에 도입하여 냄새나 맛을 느낄 수 있는 'Nose on a Chip', '전자 혀(Electronic tongue)' 등이 개발되기도 하였다. 또한 제약 분야에서 나노 캡슐을 이용한 약물전달시스템은 약물의 효능을 개선시키고 부작용을 감소시키는데 크게 기여할 것으로 보인다.

4) BIT 기술시장 : 바이오 인포매틱스(BioInformatics)¹⁸⁾

바이오인포매틱스 분야에는 기존의 소규모 생명공학기업들뿐만 아니라 IBM, Oracle, Sun Microsystems, Compaq Compaq Computer 등의 거대

18) 김윤태, IT-BT 융합기술개발 기획연구, 한국전자통신연구원, 2002. 4. 30,

정보기술(IT)기업들이 참여하면서 경쟁이 심해지고 있다. 이들 IT 기업들은 1990년대 후반 들어 독자적인 생명과학사업부를 설립하는 등 바이오인포매틱스에 대한 활발한 투자를 해왔다.

유수의 IT기업들이 바이오인포매틱스 시장에 주력하고 있는 현재의 경쟁양상은 생명공학 및 정보기술의 발달 양상, 수요 기업들의 전략 방향, 바이오인포매틱스 전문 기업들의 수익성 확보 여부 등에 따라 달라질 전망이다. 당분간은 정보기술 인프라 기업들이 시장을 주도할 것으로 보인다.

선두적인 IBM은 이미 생물학 전용 초고속 슈퍼컴퓨터인 Blue Gene의 개발에 1억 달러, 유전자 코드(A,C,G,T: DNA의 염기서열)의 조직화, 번역 기술 개발에 1억 달러를 투자하였으며 2000년 설립한 생명과학사업부를 통해 신약 후보물질 발굴 소프트웨어의 개발, 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 사이버 임상 시험 시스템의 개발에도 주력하고 있다.

이외에도 Hitachi는 1999년에 Life Science 사업부를 설립하여 전사/단백질의 정보분석 서비스를 제공하고 있다. 최근에는 지노믹스기업인 Myriad Genetics, 소프트웨어 기업인 Oracle과 공동으로 합작 벤처인 Myriad Proteomics를 설립하여 주목을 받고 있다. SGI(Silicon Graphics Inc.)는 서버, 비주얼 워크스테이션(Visual workstation), 스토리지 등의 하드웨어 장치를 제공하는 기업으로 제약기업인 Bristol-Myers Squibb과 1980년대 중반부터 15년 동안의 지속적인 파트너십을 통해 바이오인포매틱스 관련 연구를 꾸준히 해 왔다.

IDC가 제약회사, 생명공학 회사, 바이오-컨텐츠 및 S/W 공급업체, 대학, 정부기관 및 비영리 연구기관 등 250여 곳과의 인터뷰를 토대로 분석한 2001년부터 2006년까지의 Bio-IT 시장 자료에 따르면, 2001년 126억 6,300만 달러 규모에서 2006년까지 약 24.3%의 복합 연평균 성장률을 기록하면서 376억 달러 규모의 시장을 형성할 전망이다(〈표 4-1〉 참조).

〈표 4-1〉 전 세계 Bio-IT 시장 매출현황 및 전망(2001-2006년)

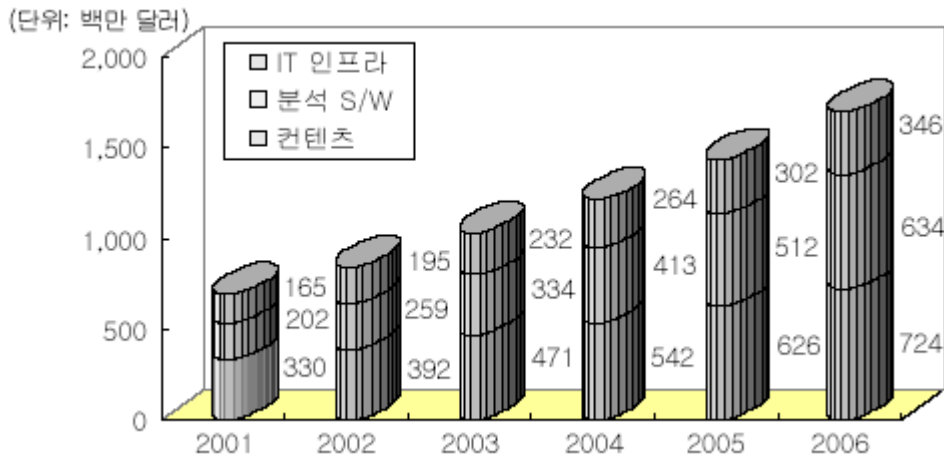
(단위: 백만원, %)

구분 \ 연도	2001	2002	2003	2004	2005	2006	CAGR ('01-'06)
서브/클러스터	3,480.1	4,054.3	4,743.5	5,597.3	6,504.1	7,935.0	17.9
데스크탑	1,225.6	1,305.2	1,399.2	1,501.3	1,603.4	1,747.7	7.4
스토리지	2,926.1	3,862.5	4,978.8	6,572.0	8,583.0	11,844.5	32.3
S/W	2,749.4	3,216.8	3,763.7	4,365.8	5,195.3	6,702.0	19.5
서비스	1,806.0	2,347.8	3,075.6	4,090.6	5,481.4	7,399.8	32.6
네트워킹	367.1	499.2	674.0	896.4	1,210.1	1,621.5	34.6
기타	109.5	130.3	156.3	197.0	260.0	356.2	26.6
합계	12,663.7	15,416.1	18,791.0	23,220.4	28,837.3	37,606.8	24.3

자료: IDC, 2002

이러한 성장은 생명과학 및 제약산업 내의 다양한 부문에서 새로운 생물학적 애플리케이션과 방법의 신속한 수용과 인포매틱스-기반의 신약 설계에 의해 촉진될 것으로 전망된다. 서버와 클러스터, 데스크톱, 그리고 스토리지와 같은 H/W가 지속적으로 인프라 구축의 핵심 컴포넌트로 남겠지만, 시장이 성숙되고 생산성과 효율성 향상에 대한 요구가 커질수록 S/W와 서비스도 인프라 공급업자들에게 매력적인 기회를 제공할 것으로 보인다.

2002년 신약 발견/개발을 위한 전세계 Bioinformatics 시장 규모는 8 억 4,600 만 달러에 이르고, 2003 년부터 2006 년까지는 증가하는 데이터 생성과 분석의 영향으로 18% 의 복합연평균 성장률을 기록하면서 약 17 억 달러 규모로 성장할 전망이다(〈그림 4-3〉 참조). 또한 Sillico Research 가 2000 년 10 월 조사한 자료에 따르면, 1999 년 바이오인포매틱스 플랫폼 S/W 시장 규모는 약 5200 만 달러를 형성 하였고 데이터 용량의 증가, 제약분야의 구조 조정, 기술에 대한 신뢰성 증가 그리고 바이오인포매틱스 도구의 진화 등이 시장을 촉진 시켜 2004 년에는 1 억 1 천만 달러 규모로 성장할 것으로 전망하고 있다.



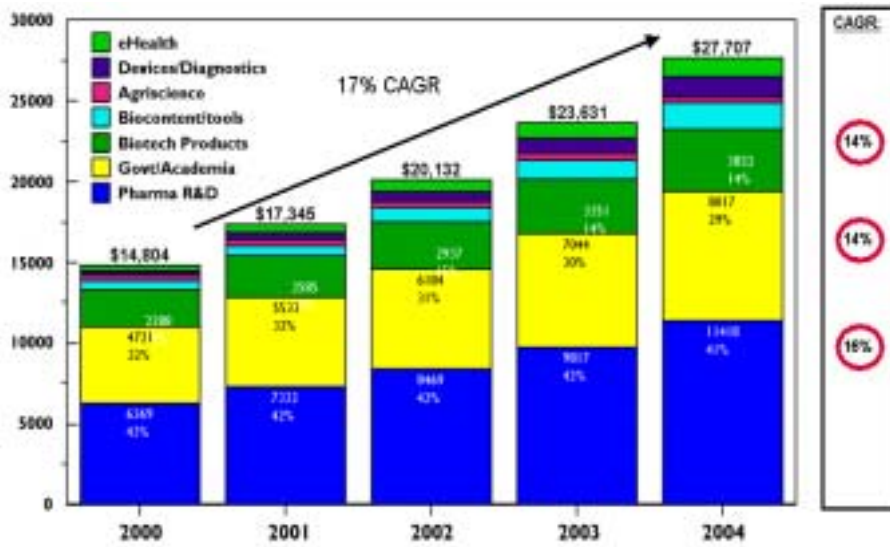
자료 : Front Line Strategic Consulting, Inc., 2002.(재구성) ETRI 정보조사분석팀
 <그림 4-3> 전세계 바이오인포매틱스 시장 규모

국내 바이오인포매틱스 시장의 규모는 아직 시작 단계에 머물러 있어 산업화가 진전되지 못한 상황이라 추정하기가 어려우나 국내 바이오산업의 규모와 성장 정도, 지노믹스 등의 첨단기술에 대한 수용 능력 등을 고려해 볼 때 2000 년 약 250 억원 규모로 추정된다. 국내 바이오산업의 발전 전망과 제약 등 관련 기업의 바이오 관련 IT 기술 확보 노력 정도, 생물정보 생산 체제의 혁신 정도에 따라 그 시장 규모가 크게 달라질 전망이다. 정부 및 기업들의 연구개발 투자가 활발해지고 제품화의 속도가 진전된다면 국내 바이오인포매틱스 시장의 규모는 연평균 40%의 성장을 거쳐 2005 년경 약 1,345억원에 이를 전망이다(LG경제연구원, 2002).

5) BIT 기술시장 : e-Health

상업적인 파급효과가 지대할 것으로 예측되는 개인정보단말을 이용한 차세대 e-Health 서비스 시장이 현재 형성되어 있지 않아서 이에 대한 정확한 시장전망은 어렵다. 그러나, 이와 관련된 핵심 소자 및 인터넷기반 건강관리 중심의 e-Health 시장 현황 자료로 추정 가능하다.

<그림 4-4> 에서 볼 수 있듯이 생명과학 관련 바이오산업 전체 시장은 2001년에 173억불에서 2004년에 277억불로 연평균 15% 정도의 성장이 예측된다.



자료 : Source: Frost & Sullivan, September 2001

〈그림 4-4〉 Global Life Sciences Market (\$Million/Year)

인터넷기반의 기존 e-Health 시장은 Frost & Sullivan에 의하면 2004년에 20억불에 이를 것으로 예측되고, 네트워크 장비까지 고려한 Gartner Group에 의하면 2002년에 384억불을 예측하고 있다. 세계 진단 시장 규모는 2003년에 230억불에 이를 것으로 예상(IVD Technology, 2001년)되고, 통신 기술과 접목될 경우 그 시장 규모는 크게 확대될 것으로 예상된다.

(6) 경제(산업)적 측면의 정책의제

일본 노무라 연구소는 최근 21세기 산업간 경쟁의 본질적 변화차원에서 조립보다는 원천기술, 디자인, 소프트웨어 등 기초과학이나 지식집약도가 경쟁의 원천이 되고 있다는 내용의 보고서를 발표하였다. 미국 국가조사위원회(NRC)는 “과학과 산업간의 거리가 짧아지면서 산업구조가 「공학주도」에서 「과학주도」로 바뀌고 있으며 과학이 산업혁신을 주도하는 시대가 왔다”고 지적하고 있다(삼성경제연구소, 2003).¹⁹⁾

21세기 들어오면서 생명과학 분야에서는 과학 및 기술 혁명의 통합이 진행

19) 삼성경제연구소(2003), 바이오산업, 「한국 산업의 경쟁력-현상과 과제」.

되어 관련된 IT시장과 기술에 상당한 영향을 주는 등 다양한 산업부문에 영향을 미치기 시작하고 있다. 컴퓨팅, 스토리지, 시각화 및 DB 기술은 이렇게 새롭게 출현하는 지식과 분석 인프라를 구축하는데 필수적인 도구로 인식되고 있다. 생명과학 시대는 기본적으로 새로운 사업과 새로운 유형의 제품 및 서비스, 그리고 이러한 애플리케이션을 지원하는 IT 시장에서의 급격한 성장을 초래할 것이며, 이러한 추세는 앞으로 적어도 수십 년간 전개될 것으로 전망된다 (ETRI, 2002).

이미 많은 전문가들은 21세기가 Fusion 기술의 시대가 될 것으로 단언하고 있다. 현재까지의 기술혁신을 IT가 주도했다면 10년 후, 20년 후의 기술 혁신은 NT, BT, IT, CT(Cognitive Science) 등이 유기적으로 결합된 Fusion 기술이 주도할 것이라는 주장이다. 보다 장기적으로는 NBIC기술의 컨버전스를 예측하기도 한다. 전문가들은 기술의 Fusion화가 가능하게 된 배경으로 단연 NT의 등장을 꼽고 있다. 물질의 최소단위로부터 출발하는 NT의 접근방법은 이전까지 독자적인 발전 또는 단순한 혼용에 그쳤던 다양한 기술체계를 아우르면서 화학적으로 결합하게 만드는 동력으로 작용하게 될 것이다.

자료 : 홍정기, 'Fusion 기술 시대', 주간경제 제 702호(2002. 11. 20), LG경제연구원.

미국, 일본, 유럽 등 각국 정부는 바이오산업을 21세기 핵심 첨단산업으로 지정하여 지원을 강화함으로써 국가경쟁력 강화를 꾀하고 있으며, 미래 산업주도권 확보를 위한 경쟁이 치열해질 전망이다. 기업의 입장에서는 이러한 경쟁구도를 주도할 새로운 제품이나 서비스가 필요하다. NBIT 융합기술은 자체적인 기술과 응용제품 및 서비스로 신산업의 창출을 견인할 뿐 아니라, 그 파생기술로 기계, 소재, 전자 등 기존산업을 고도화시켜 고부가가치를 촉진하는 경제적 파급효과를 가져올 것으로 예상된다. NBIT 융합기술의 근간이 되는 IT, BT, NT 3개 분야의 세계시장 규모를 전망해 보면, 전체 시장은 다음 <표 4-2> 과 같이 2010년에 약 9조4천억 달러에 이를 것으로 보인다. 이 중 NBIT 융합기술이 1%만 차지한다고 해도 그 규모는 약 1,000억 달러에 이르는 거대한 시장이 형성될 것이다.

〈표 4-2〉 차세대 성장산업 분야별 세계시장 규모

(단위: 억달러, %)

기술분야	2002	2003	2005	2010	연평균증가율 (2005~2010)
IT	32,580	36,630	46,361	83,544	12.5
BT	3,094	3,292	3,732	5,113	6.5
NT	2,591	2,822	3,345	5,125	5.9
계	38,265	42,744	53,438	93,782	

자료: 산업자원부, 기술정책, 2002

기술이 급속하게 발전하는 글로벌 시대, Fusion 기술시대에 소위 “Killer Applications”을 창출하여 신산업을 주도하기 위해서는 전략수립이 중요하다. 포트폴리오를 관리한다든가 지적재산에 대한 전략이라든가 표준화에 대한 전략이라든가 partnership 또는 alliance를 맺는 전략, 그리고 인재양성 등이 경쟁구도에서 주도적인 위치를 점할 수 있는 중요한 요소가 된다.

기술과 시장의 연계에 의한 혁신적 아이디어가 도출되어야만 기술이 가치로서 자리매김 하게 된다. 기술의 진보와 시장 요구간 시너지를 촉진하는 메카니즘을 만들어 내지 못하면 경쟁구도에서 뒤쳐질 수밖에 없다. 다시 말해 ‘우리가 잘 할 수 있는 분야가 무엇인지’, ‘어떻게 투자를 할 것인지’, ‘국가차원의 현재 시스템이 실효성을 확보할 수 있는지’ 그래서 ‘이 모든 것들이 우리사회를 건강하고 바람직한 방향으로 이끌 것인가?’ 등의 의제를 중심으로 다양한 의견을 수렴하고 예견되는 상황에 대비해 나가야 한다. NBIT 융합기술과 같이 신생기술이면서 동시에 Disruptive 기술인 경우 출발점부터 선두에 서기 위해 기술영향평가의 생산적 활용에 적극적으로 나서야 하고, 그 과정에서 새로운 성장동력을 개발해야 할 것이다.

2. NBIT 융합기술의 사회문화적·환경적 영향평가

지금까지 사회, 문화, 또는 사회문화적이라는 말은 정치, 경제 등을 제외한 영역으로서 다른 분야에서 다루어지지 않고 남는 문제들을 다루는 영역으로 애매하게 다루어지는 경향이 있었다. 그러나 80년대 후반 이후 수립된 학문적 접근방식인 과학기술학의 관점에서 본다면 사회는 과학과 별개로 존재하는 실체가 아니며, 그동안 별개로 다루어진 분과학문들의 영역들이 긴밀하게 맞물려 있는 "사회적인 무엇(the social)"이 있는 것이다. 따라서 과학기술에 대한 사회문화적 이슈 혹은 영향은 그 자체로 독립적인 문제라기보다는 과학기술, 정치경제, 안전, 윤리 등 다른 영역에서 제기되는 문제들이 포괄되고 중첩되는 양상을 띤다.

NBIT 융합기술의 비가역성이라는 문제 역시 단지 자연 생태계에 대해서만 적용되는 것이 아니라 사회에 대해서도 마찬가지로 적용되며, "사회적 비가역성(social irrevocability)"이라 불릴 수 있는 측면에 대해서도 주의를 기울여야 한다. 이 기술이 사회나 국가의 구성원들의 건강과 환경에 영향을 줄 수 있을 뿐 아니라 사회 시스템에도 큰 영향을 줄 수 있다는 점에서 사회적 함의에 대한 고려가 필요하다.

(1) NBIT 사회문화적 영향평가의 국제동향

2000년대에 들어와 전 세계적으로 NBIT의 사회문화적 영향에 대한 기술영향평가가 활발하게 이루어지고 있는데, 이러한 기술영향평가는 일차적으로는 개인 연구자들에 의해 이루어지는 것들이 많다. 그런데 개인 연구자들에 의해 수행된 연구는 그 수가 매우 많기 때문에 여기서 일일이 소개하기에는 어려움이 있어, 여기에서는 정부나 의회와 같은 공공기관에서 NBIT를 대상으로 행한 기술영향평가만을 다루고자 한다. 아울러 NBIT 중에서 생명공학(BT)과 정보기술(IT)에 대해서는 이미 많은 영향평가들이 이루어져 왔기 때문에 여기에서는 주로 나노기술을 대상으로 한 연구결과들을 살펴보기로 하겠다.

1) 미국

미국은 2000년 연두교서에서 클린턴 대통령이 나노기술개발을 지원하겠다고 밝히고, 동년 11월 미국 의회가 국가나노발전계획(NNI: National Nanotechnology Initiative)을 승인함으로써 NBIT 국가연구개발체제를 확립하였다. 그런데 기술영향평가와 관련하여 주목되는 것은, NNI를 구성하는 다섯 개 주요 연구 분야중의 하나가 나노기술의 사회적 함의에 대한 분석이라는 사실이다.

이러한 맥락에서 NNI를 종합조정하는 범부처적 기구인 미국 국가과학기술위원회(NSTC) 산하 나노과학기술소위원회(NSET: Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology)는 2000년 국립과학재단(NSF)에서 “나노과학과 나노기술의 사회적 함의들”이라는 주제로 워크숍을 조직하여 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가를 시도하였다. 그리고 이 워크숍에서 발표된 논문들은 다음 해인 2001년에 단행본으로 출간되었다. 이 워크숍에서는 주로 나노기술이 의료, 환경, 고용, 국가안보, 윤리, 법, 그리고 문화 등에 미칠 영향에 대한 논의가 이루어졌고, 특히 대중 및 이 분야에 종사하는 연구자들에 대한 교육방안도 중요한 비중으로 다루어졌다.

국립과학재단(NSF)은 이 워크숍의 후속작업으로 2002년 1월에 이탈리아에서 유럽연합과 공동으로 "나노기술: 혁명적 기회와 사회적 함의"(Nanotechnology: Revolutionary Opportunities and Societal Implications)라는 이름의 워크숍을 조직하여 나노기술의 사회문화적 영향에 대해 유럽의 연구자들과 함께 다시 논의하는 기회를 가지기도 하였다. 그런데 이 자리에서도 이전의 국립과학재단 워크숍에서와 마찬가지로 주로 나노기술의 사회적, 윤리적, 환경적 함의들과 함께, 나노기술에 대한 일반 대중의 사회적 수용성을 제고할 커뮤니케이션 방법 및 교육방안 등이 논의되었다.

그러나 이 두 번에 걸친 기술영향평가 워크숍에서 발표된 글들은, 아직 나노기술이 이제 막 등장하고 있는 신생기술이라는 점에서 대체로 나노기술에 대한 체계적인 영향평가라기보다는 영향평가를 위해 향후 수행해야 할 연구방향 정도를 제시하는 데 그치고 있다.

한편 올해 미 상원이 제출한 “21세기 나노기술연구개발지원법”(S. 189)은 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가를 전담하는 American Nanotechnology Preparedness Center를 설립하여 국립과학재단에서 매년 5백만불씩을 지원받을 수 있도록 하는 내용을 담고 있다. 만약 이것이 실현되면, 1990년대에 시작되었던 인간계놈프로젝트에 대해 전체 연구비의 3-5%를 반드시 윤리적, 법적, 사회적 함의(ELSI: Ethical, Legal, and Social Implications) 연구에 할당하도록 함으로써 생명공학에 대한 기술영향평가가 활발히 수행될 수 있었던 것처럼, 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가 역시 본격적으로 이루어질 것으로 전망할 수 있다.

2) 영국

지난 2003년 4월 찰스 황태자가 나노기술이 가져올 수 있는 재앙에 대한 우려를 표시한 이후, 영국 내에서도 나노기술의 긍정적 측면과 부정적 측면을 둘러싼 논란이 제기되어 왔다.

이러한 상황에서 지난 6월 초 영국 정부는 왕립협회(Royal Society)에 나노기술의 잠재적인 혜택과 위험을 분석해 보고하라고 지시한 바 있었는데, 이 기술영향평가 작업은 캠브리지대학 기계공학과 앤 도울링(Ann Dowling) 교수가 이끄는 연구팀에 의해 수행되고 그 결과는 내년 봄에 발표될 예정이라고 한다.

이 기술영향평가 과정에는 통계적 의견조사, 포커스 그룹(focus group) 등의 연구방법이 포함되고, 관련 전문가만이 아니라 일반시민도 참여하는 “참여적” 기술영향평가를 지향하게 될 것이라고 알려져 있다.

3) 독일

독일 연방의회 산하 기술영향평가 기구인 기술영향평가국(TAB: Technology Assessment Bureau)에서도 헤르베르트 파셴(Herbert Paschen) 박사를 책임자로 하여 2001년 11월부터 2003년 4월까지 나노기술의 현황, 가능성, 그리고 사회적 영향 등을 연구하였는데, 이 연구에서 다루어진 주요 내용들은 아래와 같다.

- 나노기술의 발전 전망
- 나노기술의 바람직한 적용을 촉진하는 데 요구되는 조건들
- 나노기술 발전에 대한 사회적 수요
- 나노기술의 잠재력을 발전시키기 위해 요구되는 독일의 교육 및 연구시스템의 개혁방향
- 나노기술의 사회적, 환경적, 그리고 신체적 위험
- 나노기술의 군사적 적용가능성 및 이러한 군사적 적용이 국제안보체제와 군비통제노력에 미칠 영향
- 나노기술이 지속가능한 발전에 기여할 가능성

4) 네덜란드

네덜란드의 대표적인 기술영향평가 조직인 라테나우연구소(Rathenau Institute)에서는 2003-2004년 기술영향평가 사업 중의 하나로 나노기술을 선정하여, 나노기술의 현황, 발전전망, 그리고 사회적·환경적 함의에 대해 연구를 진행하고 있는 중이다.

5) NGO

앞에서 살펴본 것처럼 현재 미국과 영국 등의 정부 차원에서 나노기술의 사회문화적 영향을 평가하는 것 이외에도 환경단체를 비롯한 NGO들도 근래 들어 나노기술 영향평가를 시도하고 있다.

가장 먼저 캐나다 Winnipeg에 본부를 두고 있는 환경단체 The ETC Group이 나노기술의 영향에 대한 비판적 평가서를 발표하였다. 이들은 2003년 1월에 "The Big Down"이라는 보고서를 출간하여 나노기술의 발전 동향과 그것이 산업, 기술, 그리고 사회에 미칠 영향을 분석하였는데, 이 보고서에서 The ETC Group은 "예방원칙"(precautionary principle)에 입각하여, 안전성이 입증될 때까지 전 세계적으로 나노입자의 생산을 금지해야 한다고 주장하였다.

NT기술영향평가 사례

[미국]

- 미국 국가과학기술위원회(NSTC) 산하 나노과학기술소위원회(NSET : Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology)는 국립과학재단(NSF)에서 “나노과학과 나노기술의 사회적 함의들”(2000)이라는 주제로 워크 샷을 조직하여 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가를 시도하였음
 - 나노기술이 의료, 환경, 고용, 국가안보, 윤리, 법 그리고 문화 등에 미칠 영향에 대한 논의가 이루어졌고, 대중 및 동 분야의 연구자들에 대한 교육방안도 중요한 비중으로 다루어졌음
 - ※ 2000년 대통령 연두교서에서 국가나노발전계획(NNI:National Nanotechnology Initiative)을 발표
- 미국 국립과학재단(NSF) 그 후속작업으로 2002년 1월에 이탈리아에서 유럽연합과 공동으로 “나노기술 : 혁명적 기회와 사회적 함의”(Nanotechnology : Revolutionary Opportunities and Societal Implications)라는 이름의 워크샷을 개최
 - 나노기술의 사회적, 윤리적, 환경적 함의와 나노기술에 대한 일반대중의 사회적 수용성을 제고할 커뮤니케이션 방법 및 교육방안 등에 대해 논의
 - ※ 나노기술이 신생기술이라는 점에서 체계적인 영향평가라기 보다는 향후 수행해야 할 연구방향 정도를 논의
- 미 상원은 “21세기 나노기술연구개발지원법”(S.189) 제출
 - 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가를 전담하는 American Nanotechnology Preparedness Center 설립, 매년 500백만불 지원
 - ELSI(Ethical, Legal and Social Implications) 연구에 계놈프로젝트 전체 연구비의 3~5%할당

[영국]

- 칼스 황태자, 나노기술이 가져올 재앙에 대한 우려 표시(2003. 4)
- 영국 정부, 왕립학회(Royal Society)에 나노기술의 잠재적 혜택과 위험을 분석 보고하라고 지시(캠브리지 Ann Dowling 교수에 의해 수행)
 - 일반시민도 참여 하는 “참여적” 기술영향평가 지향

[독일]

- 기술영향평가국(TAB:Technology Assessment Bureau), Herbert Paschen 박사를 책임자로 하여 나노기술 현황, 가능성, 사회적 영향 등 연구(2001. 11~2003. 4)
 - 나노기술의 바람직한 적용 촉진 조건, 나노기술발전에 대한 사회적 수요, 나노기술의 잠재력 제고시키기 위한 교육 및 연구시스템의 개혁방향, 사회적·환경적 그리고 신체적 위험, 군사적 적용가능성과 미칠 영향, 나노기술이 지속가능한 발전에 기여할 가능성

[네덜란드]

- 라테나우연구소(Rathenau Institute), 2003~2004년 기술영향평가사업의 일환으로 나노기술을 선정
 - 나노기술의 현황, 발전전망, 그리고 사회적·환경적 함의에 대해 연구 진행

[NGO]

- The ETC Group(환경단체), 나노기술의 영향에 대한 비판적 평가서 발표
 - 2003년 1월에 “The Big Down” 보고서 발간 : “예방원칙”(precautionary principle)에 입각, 안전성 입증될 때까지 전 세계적으로 나노입자 생산 금지 주장
- The Ecologist(2003년 5월), 나노기술을 특집으로 다룸
 - 나노기술의 발전동향과 사회와 생태계에 가져올 수 있는 위험성을 집중적으로 소개하고 일반시민대중의 정책결정과정에서의 참여를 주장
- Greenpeace, "Future Technologies, Today's Choices" 발간(2003. 7)

자료 : 기술영향평가위원회, 사회문화전문분과위원회

또한 생태주의를 표방하는 대표적인 잡지인 The Ecologist 2003년 5월 호도 나노기술을 특집으로 다루면서 나노기술의 발전 동향과 나노기술이 사회와 생태계에 가져올 수 있는 위험성을 집중적으로 소개하였다. 이들 역시 일반시민대중이 이처럼 사회적, 생태적으로 커다란 영향을 미치게 될 신기술의 개발에 대한 정책결정과정에 참여할 수 있어야 함을 주장하였다.

한편 세계적인 환경단체인 그린피스(Greenpeace) 역시 최근에(2003년 7월) 나노기술이 인간사회와 생태계에 미칠 영향을 분석한 보고서("Future Technologies, Today's Choices")를 발간하였다. 그린피스는 이 보고서에서 나노기술이 가지고 있는 긍정적인 잠재력도 분명히 인정하지만, 부정적 잠재력이 발현될 가능성에 더 주의를 기울이고 있다.

지금까지 살펴본 것처럼, NGO는 비록 나노기술이 갖는 긍정적인 측면을 전혀 무시하고 있는 것은 아니지만, 정부와는 달리 나노기술에 대해 대체적으로 매우 비판적인 자세를 견지하고 있음을 알 수 있다. 그러나 물론 앞서도 언급한 바와 같이 정부 측이나 NGO측의 기술영향평가가 체계적인 조사에 기반을 두고 있는 것은 아니고 전반적으로 볼 때 아직은 시론적인 수준에 머무르고 있는 것으로 평가된다. 요컨대 선진 국가들의 경우, 현재는 본격적인 기술영향평가 수행을 위한 제도적 장치를 마련하는 데 주력하고 있는 상황이라고 할 수 있는데, 가까운 장래에 이러한 제도적 장치가 마련되고 나면 나노기술 및 NBIT융합기술에 대한 본격적이고 체계적인 기술영향평가가 추진될 수 있을 것으로 전망된다.

(2) 사회적 측면의 영향평가

1) 과도한 기대로 인한 사회적 손실

우리는 생명공학의 발전과정에서 생명공학에 대한 지나친 기대로 멀지 않은 장래에 무병장수의 시대가 올 것이라는 환상이 사회적으로 유포된 경험을 가지고 있다. 질병발생의 메커니즘에서 유전적 요인은 다양한 요인들 중 일부에 불과하다. 더군다나 질병의 유전적 요인이 밝혀질 수 있을지 여부도 분명치 않은 상황에서 일부 기관이나 연구자들이 직간접적으로 암을 비롯한 불치병의 극복을 시사해온 것이 그 사례에 해당할 것이다.

이러한 과도한 기대는 사회적, 문화적, 윤리적으로 많은 문제를 야기하는 잠재적 요인이 될 수 있다. 미국과 유럽의 경우, 나노기술과 나노기술을 기반으로 한 융합기술 분야에서 연구비를 획득하고 자신이 속한 학문분야의 지위 향상을 위해 일부 학자들이 NBIT 융합기술의 장래를 과장하고 부풀리는 경향이 있다. 이러한 경향은 영국 경제사회연구위원회(ESRC)의 “나노기술의 사회경제적 도전(The Social and Economic Challenges of Nanotechnology, 2003)”를 비롯한 여러 보고서에서 공통적으로 지적되고 있다.

NBIT 융합기술에 대한 과도한 기대가 사회적으로 증폭되어 나타날 수 있는 역기능의 예를 몇 가지 들자면 다음과 같다.

첫째, 아직 실현되기까지 많은 시간이 소요되는 연구주제를 실용화의 항목으로 과장함으로써 인해 발생할 사회적 손실이다. 연구 주제를 당장 실용화될 수 있는 기술로 과장할 경우, 민간이나 공공 연구비가 필요한 시기에 집중되지 못하고 초기에 중복, 과다 투자되는 사회경제적 손실을 야기할 수 있다.

둘째, 특정분야에 대한 가수요가 발생해서 다양한 과학연구 분야에 충원되어야 할 인적 자원이 일부 분야에 편중될 수 있다. 이것은 단기적으로는 특정 분야 출신자들의 취업 문제를 야기할 뿐 아니라 장기적으로는 과학기술의 발전에 장애가 되는 연구 분야의 불균형 발전으로 이어질 수

있다.

셋째, 특히 의료기술과 결합된 분야에서 NBIT 융합기술이 열어줄 진단과 치료에 대한 과장된 기대로 일반인들이 건강을 유지하기 위해 취해오던 운동이나 섭식(攝食)과 같은 전통적인 방법을 상대적으로 게을리하면서 국민건강의 손실이 발생할 수 있다.

2) 나노 격차(nano divide)로 인한 사회적 불평등 문제

기술발전과 적용은 진공 상태에서 이루어지는 것이 아니라 사회적 맥락(social context) 속에서 이루어진다. NBIT 융합기술의 적용 역시 우리 사회의 불평등한 요소를 반영할 가능성이 크다. 따라서 해당기술이 계층과 집단에게 미치는 영향을 고려하고, 개발단계에서부터 불평등을 심화시키지 않는 방향으로 진행될 수 있도록 노력하는 일은 매우 중요하다.

우리는 이미 정보기술의 발전과정에서 개인의 사회적 향상에 중요한 자원이 되는 정보에 대한 접근과 활용이 일부 국가와 계층에 편중되는 이른바 디지털 격차(digital divide)의 문제를 경험했다. 디지털 격차는 정보기술의 발전으로 산업시대의 노동소외와 불평등 문제가 해소되리라는 초기의 믿음과는 달리 기술이 발전할수록 계층간의 격차를 벌어지게 만드는 심각한 문제점을 낳았다. 또한 최근 생명공학기술의 발전을 통해 실현된 백혈병 치료제의 경우에서도 알 수 있듯이 고가로 책정된 약값은 서민층에게 오히려 상대적 박탈감을 유발하고 있다. 이와 같은 우려는 새롭게 등장하고 있는 NBIT 융합기술에도 적용되는 것이다. 이에 최근 세계적 환경단체인 그린피스는 NBIT 융합기술로 인해 나노 격차(nano divide)라는 새로운 사회적 불평등이 야기될 수 있음을 경고하고 있다.

NBIT 융합기술이 가져올 수 있는 잠재적 위험 역시 사회 계층에 따라 그 파급력이 다를 수 있다는 점도 고려해야 한다. 동일한 위험에 대해 사회 계층과 집단에 따라 다른 위험 인식(risk perception)을 할 수 있으며, 위험에 대처하는 능력도 저마다 다를 수 있기 때문이다. 따라서 새로운 기술로 인한 혜택과 위험을 균등하게 배분한다는 민주주의의 기본 토대로 공정성(fairness)의 원칙에 따라 사회적, 생물학적 약자와 사회적 소수자에 대한 적극적 배려가 필요하다.

3) 전통적인 제도(고용, 보험 등)의 기능 위축

기술적 변화는 사회의 복합적인 구조와 폭넓은 상호연결성을 갖는다. 근대 이후 이루어진 기술발전은 기술의 급격한 발전이 사회 제도에 큰 변화를 일으킨다는 사실을 보여주었다. 새로운 기술의 등장으로 제도의 변화가 일어나는 것은 자연스러운 과정이다. 그러나 NBIT 융합기술의 전례를 찾아볼 수 없을 정도로 빠른 발전 속도는 나름대로 장점과 가치를 가지고 있는 전통적인 제도를 위축시킬 위험이 있다.

신기술은 고용과 실업에 큰 영향을 미친다. 역사적으로 지금까지 일어났던 대량 실업 사태에는 직간접적으로 신기술의 사회적 적용 과정이 영향을 미쳤다. 실업의 문제는 단순히 일자리의 감소를 뜻하는 것만은 아니다. 실업은 노동 양식과 노동의 수요공급체계의 구조 변동, 노동에 대한 사회적, 문화적, 심리적 인식의 변화, 교육 프로그램의 변화 등을 포함한 다양한 사회적, 문화적 요소들이 관여하는 복합적 변동의 한 양상이다.

최근 NBIT에서 가장 두드러진 감지와 검출 기술(sensing and detecting technology)의 발달은 생명공학 기술과 의료기술과 결합되면서 많은 사회적, 윤리적 문제를 야기할 수 있다. 예를 들어, 생명공학과 결합해서 질병의 유전적 원인을 검출하는 데 큰 성공을 거두었다더라도 그에 따른 치료법이나 적절한 처치법이 뒤따르지 못한다면 감지와 검출이 당사자에 대한 차별로 곧바로 이어질 가능성이 있기 때문이다. 실제로 생명공학기술에서 나타나고 있는 진단과 처치의 괴리는 “사실을 환자에게 통보할 것인가?”라는 윤리적 문제를 낳았고, 그와 함께 아직 질병이 발생하지 않은 환자라는 기묘한 개념마저 낳았다. 감지와 검출 기술의 발달에 비해 상대적으로 늦은 치료와 처치법의 개발은 고용주나 보험회사에 의해 일차적으로 활용될 가능성이 높다. 그 경우, 고용과 보험과 같은 우리 사회의 중요한 제도의 전통적인 성격이 급격히 변화되고, 사회구성원에게 일자리를 제공하고 예상할 수 없는 불확실성과 위험으로부터 보호한다는 사회적 기능이 위축될 수 있다. 그밖에도 NBIT를 통해 발달하는 감지기술은 현재의 감시 장치를 한층 더 극소화시키고 효율성을 향상시켜서 감시기술로 악용되거나 개인의 프라이버시를 침해할 우려도 있다.

또한 NBIT의 발달이 가져올 노동력 절감 효과는 일차적으로 단순 반복적인 노동을 줄이는 형태로 적용되면서 빈곤층을 비롯한 사회적 약자의 대량실업 사태로 이어질 수 있다. 이것은 신기술이 개인의 차별을 넘어 사회적 차별을 강화시키는 심각한 결과로 이어질 수 있다.

4) 군사기술로 악용될 위험성

과학기술의 역사는 새롭게 출현하는 기술(emerging technology)이 예외 없이 군사적 목적과 결합되어온 사례들을 잘 보여주고 있다. 2차 세계대전과 원자력 기술, 냉전과 정보기술의 연관성이 대표적인 사례라 할 수 있다. 냉전 종식 이후 이러한 기술들이 평화적으로 이양되어 사회적인 유용성을 높이는 경우도 있지만, 그 기술들이 전쟁과 냉전에 이바지하는 측면들을 간과해서는 안된다.

최근 이라크전에서 잘 드러났듯이 이른바 “전자전과 정밀유도 무기의 환상”이 군사적 공격이나 전쟁 자체를 합리화시킬 수 있다는 점에서 NBIT 융합기술이 군사적으로 이용될 경우 야기할 파장은 매우 크다. 캐나다에 기반을 둔 국제적인 시민사회 조직인 ETC 그룹은 이미 미국 국방성이 미국에서 두 번째로 많은 연구비를 NBIT에 투자하는 가장 확실한 고객으로 부상하고 있다는 점을 지적했다. 실제로 2002년 3월에 미 육군은 병사들의 전투능력을 향상시키기 위한 기술을 개발하기 위해 MIT에 병사나노기술연구소(Institute for Soldier Nanotechnology)를 세우고 5천만 달러를 투자했다.

또한 최근 안보의 개념이 확장되어 과거 열전 시절의 좁은 개념에서 식량, 경제, 심지어 문화까지도 안보의 영역으로 끌어들이는 추세 속에서 "군사기술(military technology)"의 개념은 넓은 맥락에서 이해될 필요가 있으며, 이러한 맥락에서 NBIT 융합기술이 국가간의 과도한 경쟁과 전쟁에 악용될 위험을 고려해야 한다.

5) 과학내 편중 현상과 여타분야의 상대적 소외 현상

거대과학(big science)은 흔히 2차 세계대전 이후 과학 연구 프로그램에서 나타나는 특징적인 경향성을 지칭하는 말로 첫째, 규모의 거대함(투여

되는 인적, 물적 자원의 규모), 둘째 연구개발의 목적과 방향이 연구자 개인의 자연 탐구에 대한 열망이나 창의성에서 비롯되는 것이 아니라 국가나 자본과 같은 대규모 조직이 주도하는 경향, 셋째 연구의 관료화, 연구의 수직적 위계체계 등과 같은 특성을 가진다. NBIT가 특정한 과학이론이라기보다 방법론이나 접근방식의 측면을 띠고 해도 역시 그 성격상 거대과학의 특성을 가진다고 할 수 있다. 일반적으로 거대과학의 양상은 “특정 목표에 대한 집중 육성(making the peak higher)”으로 특징지워지는 데, 여기에서 집중은 특정 과학기술 분야, 인적 물적 자원, 상품, 접근 방식, 인식적 경향성 등이 모두 포괄된다.

생명공학의 경우 인간유전체프로젝트(human genome project, HGP) 형성 초기에 많은 생물학자들이 연구비가 지나치게 분자적 접근에 쏠리는 문제점을 지적했다. 이것은 한정된 자본, 인적 물적 자원, 제도적 사회적 자원을 어떤 연구에 배분할 것인가의 우선권 문제이기도 하다. 특정 분야에 자원이 집중되는 경향은 결과적으로 과학연구의 자율성과 다양성을 침해하고 특정 분야 이외의 연구를 위축시킬 수 있다. 동시에 이것은 단지 과학의 내적 문제로 국한되지 않고, 우리의 사회 체제가 새롭게 등장하는 기술들을 기반으로 재편될 수 있다는 점에서 사회전체의 범주(societal scope)의 영향을 미칠 수 있다.

실제로 국가주도라는 개념 자체가 과학기술의 정상적인 속도의 발전보다는 군사적, 경제적 등의 특정 목적을 위해 해당 기술의 발전 속도를 높히려는 발상에서 시작된다는 점에서 국가주도 기술은 천성적으로 특정 목적에 대한 편향을 배태하는 측면이 있다.

6) 인식적 측면의 우려

NBIT 융합기술의 발전은 자연을 바라보는 관점에서 나노적 관점이 자연을 인식하는 지배적인 관점(dominant view)이 될 수 있다는 인식적 문제를 야기한다. 생명공학의 경우 HGP를 통해 생물 또는 생명현상을 분자적으로 이해하는 관점이 사회적으로 팽배하면서 여러 가지 문제를 낳았다. HGP의 전개과정에서 “분자적 생명관”과 “조작적 생명관”이 과도하게 유포되면서 유전자가 생로병사의 문제를 근본적으로 해결해줄 수 있다는 과도한 유전자 결정론(genetic determinism)을 유포한 것은 이미 주지

의 사실이다.

마찬가지로 현재 막대한 비용이 NBIT 융합기술 분야에 투입되고 있고, 언론 등이 이 기술의 가능성을 둘러싸고 과도한 기대를 보도하고 있는 양상에 비추어 볼 때 또 다른 형태의 나노 결정론(nano determinism)이 유포될 가능성을 배제할 수 없다. 이것은 세계에 대한 인식에서 환원주의와 조작주의적 관점을 강화시킬 수 있다는 우려이기도 하다. 이러한 관점은 자칫 인간을 제외한 생물과 세계를 조작의 대상으로만 간주하면서, 환경문제와 생태계 파괴를 한층 더 가속시킬 수 있다. 특히 생명공학의 발전으로 이러한 인식이 상당히 확산된 상황에서 NBIT 융합기술이 일종의 시너지 효과를 일으킬 수 있다는 점을 감안해야 한다.

7) 사회적 측면의 정책 의제

① NBIT 융합기술에 대한 과장이나 열광주의를 막기 위한 의식적 노력 : 연구자 윤리헌장 채택 등 제도적 노력

이것은 현 단계, 즉 발생기 단계에서 취해야 할 가장 필요한 조치 중 하나이다. 생명공학의 전례를 거울삼아 나노기술 및 정보기술과의 융합으로 더욱 영향력이 커진 NBIT 융합기술의 경우 이러한 문제가 재발하지 않도록 연구자들에게 NBIT 융합기술의 사회적, 윤리적 측면을 교육할 수 있는 강좌를 개설하고 커리큘럼을 개발해야 한다. 또한 연구자들의 내부적인 규율을 위한 장치를 마련하거나 윤리헌장 채택 등의 제도적 노력이 필요할 것이다.

나노 유토피아라는 과도한 기대와 같이 NBIT에 대한 지나친 기대는 그에 대한 반발로서의 NBIT 디스토피아라는 지나친 반발을 야기할 수 있다는 점에서도 체계적으로 억제될 필요가 있다. 그러기 위해서는 NBIT 융합기술의 미래에 대한 다수의 관점을 인정해야 한다. 가령 자기 복제하는 나노로봇(nanorobot)과 같은 기술이 앞으로 실현된 기술로 상상되고 있지만, 상당수의 학자들은(George MWhitesides, Richard E. Smalley 등) 현재의 접근방식으로는 불가능할 것이라는 다른 견해를 가지고 있다. 기술개발의 초기단계부터 사회적 공론장에 이러한 대안적인 견해들을 함께 제공하는 것이 균형 잡힌 대중적 논의를 촉진하고 성숙한 사회적 학습을 장려하는데

도움이 될 것이다.

② 시민참여의 활성화와 투명한 위험 커뮤니케이션 확보

NBIT 융합기술의 불확실성과 예측불가능성으로 인한 문제점을 최소화시키기 위한 가장 바람직한 방안은 기술개발의 초기 단계부터 시민들의 인식, 관점을 포괄하기 위해 활발한 대중토론을 장려하는 것이다.

이것은 단지 시민들의 견해를 수렴하기 위한 노력으로 그치지 않고 새로운 기술에 대한 사회적 학습을 촉진하는 과정이며 신기술 개발과 그 사회적 적용에 대한 시민적 거버넌스(governance)를 확보하는 과정이다. 시민적 거버넌스는 과학기술의 건전하고 균형적인 발전이 민주주의를 지탱하는 토대라는 점에서 참여정부가 적극적으로 추진해야 할 핵심 과제이다.

또한 NBIT 융합기술의 잠재적 위험을 평가하고 공론화시키는 위험 커뮤니케이션(risk communication)의 전 과정은 투명하게 공개되어야 한다. 우리는 광우병의 인체 유해성을 둘러싼 위험 커뮤니케이션을 전문가 중심의 밀실행정으로 처리해서 유럽은 물론 전 세계적으로 엄청난 인적, 물적 피해를 초래했던 영국의 경험을 반면교사로 삼아야 한다.

따라서 우리나라의 상황에 적합한 시민참여와 위험 커뮤니케이션 방안에 대한 연구와 실험을 체계적으로 수행할 “시민참여 위험커뮤니케이션 위원회” 구성이 필요하다. 이 위원회의 기능으로 위험 평가, 위험에 대한 대응방식 등에 관한 시민들의 다양한 관점을 수렴하고, 대중적 토론을 활성화시키고, 공론화와 사회적 학습을 수행할 수 있는 방안 마련 등을 들 수 있다.

③ 과도한 상업화의 경계와 과학기술의 공공성 견지

새로운 기술의 경제적 측면은 중요하지만 일방적 상업주의의 문제점을 경계해야 할 것이다. GMO의 경우, 다국적 곡물기업과 일부 생산국들이 과도한 상업주의로 안전성에 대한 충분한 조사없이 상품화를 서두르는 과정에서 유럽에서는 프랑켄푸드라 불리며 기피의 대상이 되었고, 아직까지도 안전을 둘러싼 논란은 그치지 않고 있다.

상업주의는 그동안 과학기술의 중요한 규범적 토대였던 과학기술의 공공성을 크게 훼손하면서, 일부 기업이 특허 등의 제도를 악용해 과학지식을 전유함으로써 건전한 과학기술의 발전을 저해하는 문제를 낳고 있다. 오늘날 정부와 과학자 사회에 대한 일반 대중의 “신뢰의 위기”에는 과학의 과도한 상업화와 공공성의 심각한 훼손이 작용하고 있음을 간과해서는 안된다.

④ 실업과 사회적 불평등 확산에 대한 경계

근대 이후 이루어진 기술발전은 기술이 급격한 발전이 사회적으로 승자와 패자를 낳는다는 사실을 보여주었다. 신기술의 적용과정에서 고려되어야 할 문제는 “누가 이익을 얻고, 누가 피해를 보는가?”이다. 신기술의 사회적 영향에서 또한 신기술의 적용으로 새로운 일자리가 창출되어도 이전에 실업의 피해를 당했던 사람들에게 주어지지 않는다는 점도 염두에 두어야 한다.

NBIT 융합기술의 발달이 가져올 노동력 절감 효과는 일차적으로 단순 반복적인 노동을 줄이는 형태로 적용되면서 빈곤층을 비롯한 사회적 약자의 대량실업 사태로 이어질 수 있다. 특히 NBIT 융합기술이 일차적으로 감지와 검출 기술의 측면에서 개발되고 있기 때문에 자동화의 적용에 따른 노동력 감소는 숙련도가 낮은 노동의 영역에 집중될 가능성이 높다.

⑤ 기술 적용에 따른 안전성 확보에 대한 고려

NBIT 융합기술의 잠재적 위험이 아직 분명하게 밝혀지지 않은 상황에서 일차적인 피해가 저소득층이나 사회적 약자들에게 집중될 수 있다는 점을 고려해야 한다. 이러한 집단은 정보 수집, 대응 수단 등 사회적 자원을 동원할 수 있는 능력이 취약하기 때문에 잠재적 위험에 무방비 상태로 노출될 수 있다.

특히 다음 대상의 안전을 확보하기 위한 노력이 절실하다.

첫째, NBIT 융합기술을 연구하는 실험실의 연구자와 대학원생.

둘째, 이미 생산 단계에 돌입하고 있는 나노 입자 업종과 바이오 업종

에 종사하는 노동자.

셋째, 노인, 여성, 어린이 등 NBIT 융합기술에 의해 치명적인 피해를 입을 수 있는 집단.

넷째, 외국인 노동자 등 사회적 보호 장치가 충분치 않은 계층.

⑥ 군사적 이용을 억제하기 위한 국제적 협력

NBIT의 군사적 악용을 가능한 한 억제하기 위해서는 국내적 노력만으로는 미흡하다. 유엔을 비롯한 국제기구 차원에서 “NBIT의 군사적 이용을 억제하기 위한 의정서”를 마련하는 등 국제적 협력을 촉진하기 위한 조치가 필요할 것이다.

(3) 환경적 측면의 영향평가

NBIT 융합기술은 가능성의 기술이다. 환경에 있어서 NBIT 융합기술은 “지속가능한 성장을 위한 기술”인 동시에 검증되지 않은 기술로서 잠재적 위해성을 가진다. 한편으로 NBIT 융합기술은 청정기술(Green and Clean Technology)의 실현 등 신개념의 환경기술로의 발전 가능성을 지니고 있다. 그러나 동시에 검증되지 않았기 때문에 환경 위해성을 잠재적으로 내포하며, 인간의 오감으로 식별할 수 없는 초미세 인공물질 등의 출현으로 인한 통제 불가능의 상황이 출현할 수도 있다.

1) 환경적 편익

NBIT 융합기술의 환경적 편익은 자원효율(물질 + 에너지) 증가, 폐기물 저감, 오염물질 배출저감, 상품주기(Life Cycle)의 확장으로 요약된다. 즉, 작은 규모의 긍정적 측면으로 물질 및 에너지 투입량이 줄어들고 아울러 엔트로피의 증가도 억제할 수 있는 것이다.

① 자원 및 에너지 이용 효율성 증대와 재생가능성

현재의 기술수준에서 인간이 이용할 수 있는 자원과 에너지는 한정되어 있다. 현재의 산업 경제적 번영을 가능하게 했던 석유에너지는 고갈단계에 접어들고 있으나 아직 이를 대체할만한 경제성을 갖춘 에너지나 자원이 개발되지 못한 상태이다. 이러한 상황에서 자원 및 에너지 이용의 효율성과 재생가능성에 대한 관심은 어느 시대보다 높으며, 앞으로도 그 중요성은 더욱 강조될 것으로 보인다.

이러한 자원 및 에너지 효율성 면에서 NBIT 융합기술에 기대되는 가능성은 매우 높다. 기존에 존재하지 않던 신물질을 만들어내는 것 뿐 아니라 기존에 존재하던 물질을 나노수준에서 통제하고 재형성할 수 있기 때문이다. 이는 물질을 재생 가능한 자원으로 재구조화할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 자동차나 항공기를 비롯하여 가전제품에 이르기까지 활용되는 각종 소모성 부품에 열과 마모 등에 대한 내구성향상과 자기 수복성 부여를 통해 일상적으로 소모되는 자원을 절약할 수 있다. 뿐만 아니라 부품소모로 인한 제품의 성능저하를 방지함으로써 상품주기를 향상시키는 효과를

가져 올 수 있다.

〈표 4-3〉 나노기술의 환경과 에너지 분야 적용사례

	적용 분야	비고
환경과 에너지에의 적용	청정기술	
	물 정화 및 처리	- 나노 입자, 나노 튜브 - 분자 막
	토양 정화	- 나노로봇, 나노 기계
	환경 모니터링	- 바이오 센서, 지능 표면(Intelligent Surface) 등. IT와 결합 강함.
	환경친화적 코팅	- 연꽃효과 표면(Lotus-effect surface) - 자기정화 유리(Self-cleaning glass)
	환경친화적 효율적 에너지	- 태양 전지, 수소 저장 연료 전지 등
	지구 온난화 저감	- 환경친화적 에너지 활용으로

자료: M. A. H. Hyder(2003)

또한 NBIT 융합기술을 통해 발전기의 반응수준을 나노수준까지 향상시킴으로서 기존의 에너지 생산과정의 효율성을 증대시킬 수 있다. 뿐만 아니라 에너지 생산에 있어 장소 및 규모의 제약성을 극복함으로써 생산에서 이용에 이르는 최단거리 수송을 가능하게 하여 에너지 수송과정의 손실을 최소화할 수 있다.

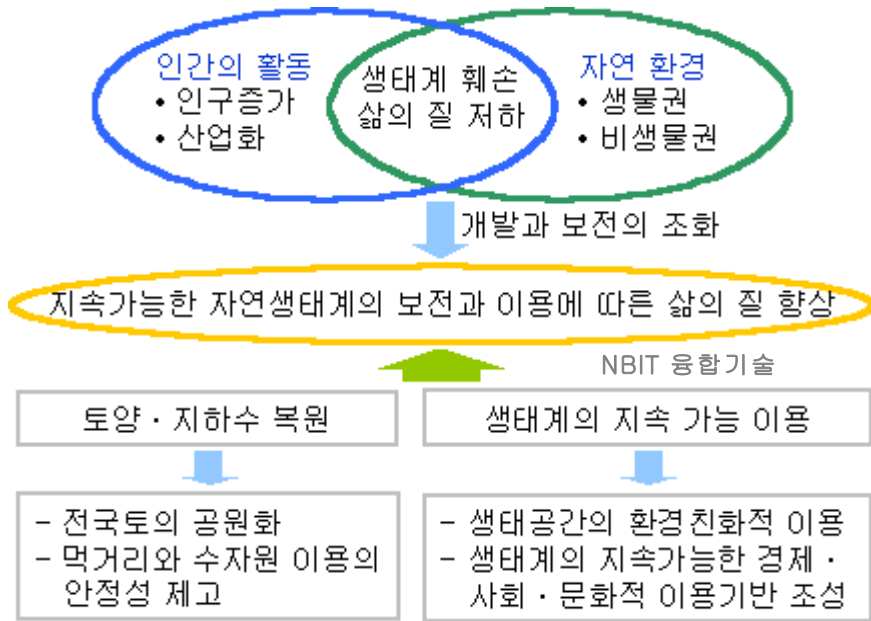
이외에도 NBIT 융합기술을 응용한 전자 종이나 탄소나노튜브와 같은 제품의 개발은 환경적 측면에서 자원이용의 효율성을 향상시키는 역할을 할 것으로 보인다. 가령 탄소나노튜브의 경우, 기존의 금속재료를 대체함으로써 대상광물의 채광을 줄이고, 인체 및 환경에 유해한 중금속을 대체할 수 있을 것으로 전망된다.

태양전지나 수소저장연료전지 등에 NBIT 융합기술을 활용할 경우, 이러한 재생가능 에너지 이용을 촉진함으로써 화석연료와 같은 비재생에너지에 대한 의존을 줄일 수 있다. 이는 에너지원의 탈탄소화 또는 탈화석연료화에 기여하여 환경친화적 에너지 활용 뿐 아니라 지구온난화 저감과

같은 효과를 가져 올 수 있다.

② 환경 오염원의 원인제거 및 감시기능 강화

NBIT 융합기술이 환경과 에너지 분야에서 편익을 가져 올 수 있는 분야로는 청정기술과 물 정화 및 처리, 토양 정화, 환경 모니터링, 환경친화적 코팅, 환경친화적·효율적 에너지, 지구 온난화 저감 등을 들 수 있다.



〈그림 4-5〉 NBIT 융합기술을 활용한 생태계 복원의 비전

NBIT 융합기술을 폐기물 처리에 활용할 경우, 폐기물 배출공정에 청정기술을 도입함으로써 기존의 기술로는 분해 혹은 정화하기 어려웠던 환경오염원을 제거할 수 있을 것으로 보인다. 즉, 나노 수준의 필터나 분자 막 등을 이용하여 미세오염물질의 환경유입을 원천적으로 차단할 수 있다. 또한 유독한 물질을 원자수준에서 재구성하여 자연 분해 시키고, 풍부한 태양에너지를 나노 기계의 에너지로 활용하여 대기 중의 이산화탄소 등을 제거하는데 활용할 수도 있다.

이처럼 NBIT 융합기술은 대기와 토양, 수질을 직접적으로 정화시키는 기술에 응용될 수 있을 뿐 아니라, 바이오센서나 지능표면 등을 통해 환경오

염이 발생할 수 있는 상황을 지속적이고 효과적으로 모니터링 하는데도 활용될 수 있다.

2) 환경·인체 유해성

NBIT 융합기술이 환경적 측면에 미치는 영향을 고려함에 있어 주의해야 할 점은 이들 기술을 사용하는데 있어 편익이 있더라도 그것의 생산단계(즉, 나노물질의 생산), 폐기단계에서 새로운 환경 문제가 발생할 수 있다는 것이다.

NBIT 융합기술의 환경적 영향평가는 기본적으로 나노물질이 새로운 인공물질이라는 점에서 출발한다. 즉, 생태계에서 자연적으로 쉽게 분해되지 않을 가능성이 존재한다. NBIT 융합기술로 인해 발생 가능한 오염원의 형태는 원료 물질 자체, 완제품, 그리고 그 두 가지의 생물학적으로 전환된 중간물(bio-transformationed intermediates)이 될 수 있다. 이런 점을 고려할 때, NBIT 융합기술의 환경적 영향을 평가함에 있어 '석유시대'의 가장 큰 난분해물질인 잔류성 유기오염물질(POPs; Persistent Organic Pollutants)의 유해성의 특징을 원용하여 살펴볼 필요가 있다.

NBIT 융합기술로 인해 발생 가능한 오염원이 <표 4-4> 와 같은 POPs의 특성을 모두 갖지 않을지라도 많은 부분을 공유할 가능성이 있다. 즉, 나노물질/기술응용은 그 크기 자체 때문에 많은 매체를 오염시킬 수 있다. 나노 규모의 물질은 그 크기 자체 때문에 많은 매체를 오염시킬 수 있다. 나노 규모의 물질은 바이러스(10-100 nm)보다 작고 점점 더 크기가 작아 지므로, 기존의 재래적인 처리 과정들을 무사통과할 수 있으며, 따라서 환경과 인간에 축적될 수 있다.

〈표 4-4〉 POPs의 유해성으로 고려되는 것들

POPs의 유해성	특 징
비가시성	오염이 진행된 후, 생태계에 치명적인 영향을 나타낸 후 문제를 인식할 가능성이 있음.
미량성	ppm, ppb의 미량으로도 심각한 오염 유발 가능
잔류성 및 생물농축 (bio-accumulation)	환경에 배출되면 쉽게 분해되지 않고 생물체에 축적되어 장기간에 걸쳐 피해가 발생할 수 있음. 또한 먹이사슬로 올라갈수록 생체 내 축적 정도가 커짐.
확산성	바람 해류 등을 타고 장거리(수백, 수천 km)로 이동하여 오염 지역이 확산될 수 있음. 특히 대량생산시 문제

따라서, NBIT 융합기술의 환경 및 인체 영향을 고려할 때는 다음과 같은 항목에 유의해서 추적·평가할 필요가 있다(〈표 4-5〉 참조).

〈표 4-5〉 NBIT 융합기술의 환경/인체에 대한 영향평가지 고려할 점

평가 항목	평가 내용
인체독성	발암성, 면역독성, 생식독성, 기형독성, 일반 독성(유전자 식품의 경우: 알레르기) - 단기/장기 노출 - 대상 : a) 직업인(제조공장, 실험실 등) b) 일반인(특히, 노약자)
환경영향	- 단기/장기 노출 - 대상 : 생태계(먹이사슬, bio-accumulation 등 고려) ※ 지구 4대 순환에 미치는 영향 a) 대기순환 b) 물순환 c) 양분순환(토양→식물→동물→미생물→토양) d) 양분순환(심해 바닷물 용승)
오염경로 및 환경거동	- 제조과정(in-house 폐수, 폐기물, 폐가스), 유통 및 사용과정, 폐기과정의 오염물질 배출 - 매체 : 토양, 물, 지하수, 대기, 생물체(인간 포함)

① 환경적 유해성

NBIT 융합기술과 같이 검증되지 않은 새로운 기술의 탄생은 환경 위해성을 잠재적으로 내포하며, 인간의 오감으로 식별할 수 없는 초미세 인공물질 등의 출현으로 인한 통제불가 상황이 발생할 수 있다는 막연한 두려움을 불러일으키기도 한다.

NBIT 융합기술로 만들어진 나노물질/기술응용[(Quantum dots), 나노입자, 나노물질, 나노소자 등]이 POPs같이 생물학적으로 분해되지 않거나(non-biodegradable) 분해되기 어려운 오염물질의 새로운 그룹을 만들어 낼 수 있다. 또한 나노물질은 활성화된 큰 표면을 제공하는데, 그 표면은 카드뮴 같은 중금속과 유기물질 같은 더 작은 오염물질을 흡착케 할 수 있다(Greenpeace 2003). 따라서 자연적으로 발생하는 콜로이드와 같이 폐기물 또는 유독오염물질을 토양 및 지하수를 통해 장거리까지 이동케 할 수 있다. 나노기술의 원자재의 환경적 함의를 먼저 요약하면 다음 <표 4-6> 과 같다.

<표 4-6> 전주기관점(Life Cycle View)의 나노기술의 환경적 함의

구분		생산			사용			폐기		
		물질강도	에너지강도	독성	물질강도	에너지강도	독성	물질강도	에너지강도	독성
나노기술의 원자재 (나노생산물)	나노물질	○	○	○	*	○	○	×	×	○
	탄소나노튜브	×	×	×	×	×	×	×	×	×
나노기술의 응용	연꽃효과 표면 (Lotus-effect surface)	×	×	×	*	*	×	×	×	×
	자기정화 유리 (Self-Cleaning Glass)	×	×	×	*	*	×	*	*	×

자료: Hyder, 2003

주) ○ : 환경적 약점/리스크, * : 환경적 편익, × : 데이터/정보의 부족(구체화된 것 없음. 몇몇은 현재의 연구 영역임.)

〈표 4-10〉에서 보듯이, 나노물질의 경우 생산시 물질 및 에너지 투입 부하가 발생하고 독성을 일으킬 수 있으며, 사용시 물질적 측면에서는 환경적 편익을 낳으나 에너지 강도 및 독성의 측면에서는 부정적 영향을 줄 수 있다. 또한 폐기시 물질 및 에너지 강도에 대한 데이터/정보는 부족하나 여전히 독성에 대한 우려를 가지고 있다.

탄소나노튜브의 경우, 모든 항목에 대한 데이터/정보가 부족한 것으로 나타난다. 이는 현재 나노물질(탄소 나노튜브를 포함)의 환경 리스크에 대한 연구가 진행되고 있기 때문으로 보인다.

한편, 나노기술 응용 경우, 환경적 함의를 연꽃효과 표면과 자기정화 유리의 예를 들어 요약할 수 있다. 연꽃효과 표면의 경우, 〈표 4-10〉과 같이 사용시 물질 및 에너지 절감에 기여하는 것으로 나타난다. 그러나 그 외의 항목에 대해서는 데이터 및 정보가 부족한 것으로 나타난다.

자기정화 유리의 경우, 생산시 물질 및 에너지 강도가 커지나 독성 측면에 대한 데이터는 부족한 것으로 나타난다. 사용시 물질 및 에너지 강도의 측면에서는 환경적 편익을 낳으나 독성 측면에 대한 데이터는 부족하다. 폐기시 물질 및 에너지 강도에 대해서도 역시 환경적 편익을 낳으나 독성 측면에 대한 데이터는 부족하다.

이러한 일반적인 환경 위해성 외에도 잠재적이기는 하나 NBIT 융합기술에 의해 만들어진 나노물질이 자기복제성을 가지는 경우에 환경에 끼칠 수 있는 악영향에 대한 우려도 존재한다. 자연환경에서 자발적으로 기능할 수 있는 나노 로봇의 자기복제성이 신속히 자연환경(즉, 바이오매스)을 그들의 자기복제물(즉, 나노매스)로 지구적 차원에서 전환시킬 수 있다는 것이다. 그러나 건조(建造)되기 쉬운 복제물은 자동차 또는 산업로봇 같이 비탄력적 기계이며, 이러한 복제도 우연히 일어나지 않을 것이라는 지적도 만만치 않다(Fretas, 2000). 자기 복제에 의한 파국의 위험이 적더라도, 그 접근은 신중해야 한다. 군사적 공격을 위해 나노기술을 사용하는 것과 같이 의도된 오용을 통해 심각한 문제가 발생할 수도 있기 때문이다. 따라서 분자기계와 그 생산물이 안전하고 책임 있는 방식 하에서 개발되도록 지침 제정 및 규제를 검토할 필요가 있다.

② 인체 유해성

NBIT 융합기술 혹은 그 부산물로 인해 발생할 수 있는 인체에 대한 부작용에 대해서는 물질 자체가 가질 수 있는 독성과 인체와의 적응가능성, 부작용이 발생했을 때의 사후적인 치료가능성 등을 고려할 수 있다²⁰⁾.

나노물질의 독성 유무

NBIT 융합기술 혹은 그 부산물의 인체 유해성에 대해 가장 많이 언급되는 것이 나노물질의 독성과 관련된 것이다. 가령 나노물질이 덩어리(bulk) 형태일 때나 입자 형태일 때, 인체에 유해한 독성을 가질 수 있는가에 대해서는 아직도 논란이 계속되고 있다. 더군다나 세포에 영향을 줄 수 있는 크기라는 점에서 인간의 유전적 변화를 유발할 가능성까지 언급되고 있다.

NBIT 융합기술이 환경적 측면에서 인체에 미칠 수 있는 영향은 나노입자로 구성된 물질이 인체 내에 삼입되거나 이식 혹은 무의식중에 흡입되는 경우 우려되는 부작용에 관한 것을 들 수 있다. 나노물질이 환경에 널리 퍼질 경우, 유해한 성분들(가령 농약이나 PCB와 같은 경우)과 결합하여 인간에게 투과할 가능성이 있다. 나노입자들이 살아있는 세포를 관통하여 동물기관(organs)에 축적될 수 있기 때문이다(ETC 그룹, 2002). 또한 나노물질에 독성 원소와 결합하여 박테리아 내부로 들어가거나, 혈액흐름에 따라 이동할 가능성도 있다(Greenpeace, 2003). 한편, 나노물질 자체의 화학적 성질이 독성을 띠 가능성도 존재한다. 1990년대 초 탄소나노튜브를 구성하는 풀러렌(fullerene) 물질이 발암물질일 수 있다는 경고가 있었으나, 아직도 그 정체에 대한 논란이 있다. 또한 극미세 산화금속을 이용해 자외선을 차단하는 썬크림이 기존의 썬크림과 달리 얼굴이나 몸에 잔뜩 바르지 않아도 효과를 나타내지만, 피부에 쉽게 침투해 DNA나 세포에 영향을 줄 수 있음이 제기되었다. 그러나 이러한 가능성에도 불구하고 나노물질이 생명체(living systems)에 어떠한 효과를 가져 오는 지에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다(Greenpeace, 2003).

이런 나노물질이 인체 내에 삼입되거나 이식될 경우에 어떤 일이 발생

20) 한편, 이 경우 부작용을 발생시킨 행위의 성격과 책임소재에 대해서도 고려해야 하며, 이는 NBIT 융합기술의 법적 영향 부분에서 자세히 다루기로 한다.

할 수 있는가에 대해서는 아직 정확히 알려진 바가 없다. 그러나 현재와 같이 NBIT 융합기술에 대한 연구가 활발히 이루어지는데 반해 결과물이나 연구과정에 대한 법적·제도적 규제가 뒤따르지 못하는 상황에서 의도하지 않은 부작용에 대한 우려는 결코 과도하다고 볼 수 없다. 특히 나노물질의 개발과정에서 발생하는 폐기물이나 부산물에 대한 독성검사나 관리문제는 결코 소홀히 다룰 수 없는 문제이다.

스위스의 일부 과학자들은 나노튜브를 다루는 사람들은 호흡기를 통해 혈관이 오염될 수 있다고 우려하기도 하였다. 극미세 입자가 자연계나 식품 속에 노출되면 문제가 더욱 심각하다는 것이다. 또한 영국 캠브리지 대학의 리스 교수는 2003년 6월 발간된 “인류 최후의 시간”에서 나노기술이 발전하게 되면 자기복제를 하는 악성 초미세 기계가 마치 꽃가루처럼 사방으로 퍼져가는 상황도 예상할 수 있다고 경고하기도 했다.

향후 수십 년 내에 나노튜브는 인간의 삶에 다양하게 활용되고 생태계 어디에서 존재할(ubiquitous) 가능성이 있다(Colvin, 2002). 이러한 나노튜브는 이미 생산단계에 있다. 그러나 대량의 나노튜브가 인체에 흡수될 때 무슨 일이 일어날 것인가에 대해서는 아직 확인된 바가 없다. 잘 알려진 하나의 우려는 나노튜브와 석면간의 구조적 유사성과 관련이 있다. 석면과 같이 나노튜브 섬유는 엄청난 내구성이 있어서 인체에 흡입될 시, 아주 긴 주기 동안 폐에 머무를 잠재성이 있다(2003년 미국 항공우주국의 쥐 실험결과²¹⁾ 참조). 또한 이러한 극미세 나노물질은 사람 몸의 간, 중추신경, 심장혈관까지 파고 들 우려가 있음이 제기되고 있다. 나아가 극미세 물질의 인체 침투에 의해 DNA 혹은 세포에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있는 가능성도 우려되고 있다.

나노스케일의 무기물질은 일반적으로 생물학적 작용을 일으키지 않는다

21) 미국 항공우주국(NASA)의 연구결과는 실험용 쥐에 탄소나노튜브 용액을 주입한 결과, 폐에서 나노튜브들이 뭉치면서 질식사할 일으키는 독성을 일으킴을 보고하고 있다(0.1-0.5mg의 탄소나노튜브를 주입하고 90일 동안 관찰; 미국화학학회 2003년 3월호). 한편, 2003년 미국 로체스터대학의 오베르되스터 교수는 폴리테트라플루오로에틸렌(PIFF)으로 만든 지름 20nm의 나노입자를 쥐에게 15분 동안 호흡하게 한 결과 대부분 4시간 이내에 죽었다고 밝혔다. 반면 130nm 크기로 입자를 만들어 흡입시켰을 때에는 쥐가 죽지 않았다. 즉, 덩어리(bulk)일 때에는 문제가 없던 물질이 나노 크기의 입자가 되면 높은 독성을 지닐 가능성이 있다는 것이다.

고 생각하기 쉽다. 그러나 인공 합성된 나노물질에 대한 특정한 데이터 없이 어떠한 생리적인 효과가 일어날지, 혹은 어떠한 노출수준까지 허용해야 할지 사전에 아는 것은 불가능하다(Colvin, 2002). 이처럼 나노물질이 지닐 수 있는 독성에 대해서는 원래 물질자체가 독성을 지니고 있는가를 확인하는 것도 중요하지만, 독성이 발현될 수 있는 특정조건을 검증하는 것이 중요하다. 더군다나 인체의 감각기관으로는 나노물질을 감지할 수 없기 때문에 나노물질이 독성을 지닐 경우, 인체에 치명적인 위해를 가하기 위한 목적의 테러나 범죄 등에 악용될 소지도 있다. 장시간 체내에 축적되어 나타나거나 유전되는 독성물질과 같이 그 부작용이 나타나는데 시간이 걸린다면 일반 독성물질보다 극미세 나노물질의 부작용 문제는 더욱 크다고 할 수 있다.

나노물질의 인체 내 적용가능성

NBIT 융합기술을 약물전달시스템이나 수술 등에 활용할 때 삽입되거나 이식된 나노물질에 대한 인체의 거부반응이 문제가 될 수 있다.

NBIT 융합기술을 통해 개선된 약물전달시스템은 특정 약물을 특정 부위 혹은 특정 조건에서만 방출하여 효과적 치료를 가능하게 하도록 개발 중이다. 이를 위해서 소화액이나 위산 등을 견디는 것은 물론 인체 내의 이물질에 대한 방어기제를 견디도록 설계하는 것이 중요하다. 또한 일반적인 수술이나 심장혈관 등 중추기관에 대한 수술작업 시 절개 등의 특정 기능을 가진 나노로봇을 최소 혹은 무침습적으로 인체 내에 투여하여 수술부위에서 작동하도록 하는 개발이 진행 중이다. 이 때에도 인체의 방어기제를 견디는 것은 물론 나노머신의 작동 시 발생하는 열을 최소화하는 것이 중요한 문제로 다루어지고 있다. 이러한 기술개발이 성공적으로 이루어진다면 뇌나 심장질환 등의 치료에 있어 의료혁신을 가져올 것으로 예상된다.

그러나 한편으로 인체의 면역기체 혹은 방어기체에 대한 완전한 연구결과가 나타나지 않은 시점에서 나노물질의 의료적 사용에 대한 과도한 기대를 경계할 필요가 있다. 가령 미량일 때에는 문제가 없다가 체내에 축적되거나 체내에서 벌크형태로 결합하는 경우에 이를 이물질로 인식하여 거부반응을 나타낼 수도 있다. 특히 나노물질의 활용가치가 높은 뇌나

심장 등 중추기관에 대한 치료행위 시에 이러한 거부반응이 발생할 경우에는 생명에 치명적인 위해를 가져올 가능성이 존재한다.

또 다른 한편으로 나노물질이 인체의 면역기제를 무력화시켜 면역체계에 또 다른 변이를 가져올 가능성도 존재한다. 인체의 면역기제는 생명활동을 위한 자연스러운 반응이다. 이러한 면역기제가 나노물질을 인식하지 못하거나 인식하고도 반응하지 못한다면, 인체의 전체적인 면역기능이 저하되거나 변화될 수 있다는 것이다. 또한 인체 내에서 나노물질을 인식하지 못한다면 인체 내에 투여되거나 이식된 나노물질이 대상부위가 아닌 다른 부위나 기관으로 흘러들 경우에도 이로 인한 부작용을 일차적으로 방지할 수 있는 가능성이 낮아지는 것이다.

사후적인 처리 가능성

건강 측면에서 부정적 효과를 가져 올 수 있는 NBIT 융합기술의 영향으로 나노물질 자체의 독성여부와 인체 내 적응성 문제가 인체 내에 나노물질을 삽입 혹은 이식하기 이전에 고려할 수 있는 문제라면, 이러한 나노물질을 회수 혹은 폐기하는 문제는 사후적인 것이라 할 수 있다. 즉, 인체 내에서 나노물질이 정상적인 기능을 수행한다고 가정할 때 기능을 다한 나노물질을 어떻게 회수할 것인가의 문제이다. 이는 나노라는 특징상 그 크기와 관련된 문제일 수 있다. 일반적인 의료목적의 보철물이나 삽입물의 경우에는 교체나 제거를 위한 과정이 삽입이나 이식과정과 유사하지만, 나노물질의 경우에는 눈으로 확인할 수 없기 때문에 보다 정밀하고 복잡한 과정이 될 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 이는 인체가 나노물질을 인식하지 못한다면 인체의 신진대사활동에 의해 자연적인 체외배출을 기대하기 어려울 수 있기 때문이다.

이처럼 인체 내의 나노물질이 정상적인 기능을 수행할 때에도 그 회수 및 폐기과정이 복잡할 수 있다는 점에서 나노물질이 인체 내에서 오작동 혹은 부작용을 일으켰을 때의 문제는 보다 심각하다는 것을 예상할 수 있다. 가령 인체 내에 삽입된 나노물질이 자기장 등의 특정한 환경에 이상반응을 일으킬 경우를 상상할 수 있다. 특히 뇌질환이나 심장질환 등에 활용도가 높을 것으로 전망되는 NBIT 융합기술이기 때문에 신속하고 정확한 사후적 치료가 이루어지지 않으면 생명을 위협할 수 있음을 알 수 있다.

또한 인체의 신진대사에 의해 자연스럽게 체외로 나노물질이 방출되는 경우에도 문제를 일으킬 소지가 있다. 특정한 질병이 있는 사람에게서 방출된 나노물질이 그대로 자연환경에 방치될 경우에 이는 사용한 주사기를 방치하는 것보다 훨씬 심각한 문제를 야기할 수도 있다. 나노물질의 경우, 피부의 땀구멍이나 호흡기 등을 통해 인체 내로 유입될 수 있기 때문이다. 또한 체외로 방출되지 않은 나노물질이 인체의 수명이 다한 뒤에 대기나 토양 등으로 유출되는 경우도 예상할 수 있으며, 이때에도 역시 인체에 유해한 물질이 될 가능성이 존재한다.

3) 환경적 측면의 정책 의제

① 예방원칙(Precautionary Principle) 접근 방식 선언

하나의 시스템에 어떤 변화가 생길 때 그 변화는 예측하기 어려운 방식으로 전체 시스템에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 예방 원칙은 과학적 확실성이 아직 규명되지 않았더라도 그 피해가 심각하거나 비가역적인 것으로 예측되는 경우에는 효과적인 조치를 강구하여야 한다는 원칙이다. NBIT의 인체 및 환경영향 관련 데이터가 비록 거의 없지만 나노 입자·물질 자체나 나노 바이오 물질의 독성이 보고 되고 있고, 그에 흡착된 유독 화학물질의 동물체 투과성 및 토양, 지하수 등의 오염 가능성도 제기되고 있다. 나노 규모의 물질은 기존의 재래적인 처리과정들을 무사 통과할 수 있으며, 생명체의 면역시스템을 무사 통과하여 유입될 수 있다. 아울러 장기적인 경고이기는 하지만 나노/바이오 소자 및 기계의 자기복제의 가능성도 제기되고 있어, NBIT의 연구개발의 접근에 있어 예방원칙을 선언하고 관철하는 것이 필요하다.

② NBIT 융합기술의 환경 및 인체 위해성 평가 R&D 확충 및 예산 쿼터제 도입

NBIT의 총 R&D 예산에 환경 및 인체 위해성 평가 R&D의 쿼터 배정(예: 10% 내외)을 정량화하여, 위해성에 대한 풍부한 과학적 데이터가 산출되도록 해야 할 것이다. 예를 들어, 나노 물질의 인체에 미치는 효과에 대한 데이터가 거의 없다.

③ NBIT의 자기 복제에 대한 지침 및 규제 정립

사전예방차원에서 연구의 지역제한(예: 생물학적 봉쇄)등 통제성(controllability)의 제고가 필요하다. 아울러, 공익당국의 요청에 따른 데이터 및 Method 공개 의무화도 필요하다.

(4) 법적 측면의 영향평가

NBIT 융합기술은 이제 더 이상 공상과학소설의 소재가 아니라 우리의 현실에 깊이 들어온 과학기술의 하나가 되었다. NBIT 융합기술이 야기할 수 있는 자연계 및 인간사회에 대한 영향, 그리고 인식능력 및 인식의 변화를 생각할 때, NBIT 융합기술의 사회적·법적 영향을 검토하는 것은 이미 늦은 감이 없지 않다. NBIT 융합기술을 구성하는 각각의 정보통신기술과 나노과학기술, 생명과학기술은 그 자체가 하나의 분야이기도 하지만, 한편으로는 다른 과학기술의 기반이 되는 방법론적 성격을 지니며, 이들이 융합되어 나타나는 NBIT 융합기술은 정의자체에서 매우 복잡한 성격을 지닌다. 즉, 나노과학기술의 경우 물질을 나노단위에서 다룬다는 의미 측면과 나노과학기술의 핵심적 내용 중 하나인 조립자 문제 등은 나노과학기술의 독자적인 연구분야이다. 또한 나노과학기술로 인하여 생산된 생산물을 재료로 하여 생명과학기술이나 정보과학기술의 발전을 촉진하는 것도 역시 중요한 역할 중 하나이다²²⁾. 따라서 NBIT 융합기술의 법적 영향에 대해 논의하는 경우에 NBIT 융합기술의 기반이 되는 각각의 기술들의 고유한 법적 함의, 그리고 이들이 기반이 되어 응용된 NBIT 융합기술의 법적 영향을 같이 검토하는 것이 중요하다.

NBIT 융합기술과 같이 과학기술의 융합화현상이 일반적으로 법에 대한 인식 및 적용에 미치는 영향을 고려해 보면, 기술로 인한 가치와 규범의 변화를 예상할 수 있다. NBIT 융합기술은 전 사회의 네트워킹을 강화하여 개인과 커뮤니케이션 및 협동을 강화시킬 것이며, 이는 기술발전으로 인한 물질적 진보와 함께 기존의 가치 및 규범으로는 해결할 수 없는 새로운 문제를 야기할 가능성을 내포한다. 더군다나 NBIT 융합기술의 전개방향이 아직 불분명한 시점에서 기술에 대한 법적 규율에 대한 가능성은 신중히 논의될 필요가 있다. 또한 NBIT 융합기술은 기존의 거대 과학기술에 비해 소규모로 이루어질 가능성도 있다는 점에서 법적 규율의

22) 이러한 점에서 나노과학기술은 재료학으로서의 성격을 지닌다. 최근의 나노과학기술에 대한 논의들이 나노기반 융합기술이라는 용어를 사용하는 것도 이와 같은 이유에서이다.

실효성을 확보하는 것도 중요하게 다루어질 필요가 있다.

보다 구체적으로 NBIT 융합기술의 법적 영향을 논의하기 위해서는 연구단계와 실용화단계로 구분하여 살펴보는 것이 필요하다. 먼저 순수하게 NBIT 융합기술이 연구되는 단계가 있다. 두 번째로 NBIT 융합기술의 실용화단계가 있는데, 이 단계는 다시 두 단계로 구분할 수 있을 것이다. 첫 번째 실용화단계는 NBIT 융합기술을 이용한 의료소재나 약물들이 인체에 적용되는 단계이다. 두 번째 실용화단계는 NBIT 융합기술을 이용하여 만들어진 소재 등이 인체와 융합되는 단계이다²³⁾.

1) NBIT 융합기술의 연구개발 활동과 관련된 법적 문제

① 정부가 주도적으로 추진하고 다루어야 할 영역

NBIT 융합기술이 연구실에서 연구되는 수준에 머물러 있는 경우에는, 여타의 과학기술에서 고려되어야 할 법적 문제들과 동일하게 고려되어야 한다.

NBIT 융합기술이 아직 초기단계에 머물러 있다는 점이나 그 사회적 파급효과가 상당하다는 점 등을 고려할 때, 국가가 주도권을 가지고 연구를 수행하는 것도 하나의 방안이 될 수 있다. 그러나 연구라는 행위가 가지는 특성과 나노기반의 NBIT 융합기술 연구가 소규모로 이루어질 수 있다는 점, 그리고 헌법 제22조가 보장하고 있는 연구의 자유 등을 생각할 때 국가차원에서 주도적으로 연구하고 다루어야 할 영역을 설정하는 것이 필요하다. 현재 법률화된 「나노기술개발촉진법」의 사례를 보면, 기본시책의 강구(제3조), 나노기술종합발전계획의 수립(제4조), 시행계획의 수립(제5조) 등을 정부가 하도록 규정하고 있지만, 제8조에서 민간기술개발을 지원하도록 규정함으로써 정부와 민간 모두 연구의 주체가 되도록 하고 있다. 따라서 NBIT 융합기술의 경우에도 민간연구의 자율성을 보장하는 한편, 민간연구의 특성상 수행되기 어려울 것으로 생각되는 NBIT 융합기술분야의 측정표준체계 확립이나(“나노기술개발촉진법” 제15조), 공공영역에 이익이 되는 과학기술의 연구, NBIT 융합기술기술의 위험성을 평가

23) 이러한 단계의 구분은 시간적 흐름에 따른 것이 아니다. 연구단계와 실용화단계는 혼재되어 나타날 수 있으며, 특히 실용화의 두 단계는 서로 겹쳐서 현실화될 수도 있다. 이와 같은 단계의 구분은 각각의 단계에 따른 법적 함의가 상이하다는 점을 염두에 둔 것이다.

할 수 있는 연구 등은 정부가 주도적으로 수행하여야 한다.

② 연구개발 허용 범위와 관리

연구개발 허용 범위와 관리와 관련한 고려사항으로 다음과 같은 내용이 검토되어야 할 것으로 보인다.

첫째, NBIT 융합기술의 개발에 있어서 어떠한 연구를 허용하고 어떠한 연구는 허용하지 말아야 할 것인지를 결정할 필요가 있다. 연구의 수행이나 결과가 인간이나 사회에 대한 위험성이 크다고 판단되는 경우에는 그와 같은 연구행위를 사회적·윤리적 예방 차원에서 사전에 금지하여야 할 필요성이 있다. 하지만 이와 같은 결정은 먼저 NBIT 융합기술의 위험성²⁴⁾에 대한 판단을 할 수 있는 기술체계가 확립되어야만 가능한 것이다.

자기복제 물질의 발생가능성과 법적 문제

NBIT 융합기술에 의하여 자기복제 물질이 발생할 경우, 이를 어떻게 법적으로 파악하여야 할 것인가의 문제는 NBIT 융합기술의 법적 영향을 고려함에 있어 가장 중요한 사항인 동시에 어쩌면 고려의 필요성조차 없는 사항이기도 하다. NBIT 융합기술의 나노관련분야 중 하나는 나노단위의 원자들을 조작하는 조립자를 만드는 것이다. 그런데 일반적으로 사용하는 조립자는 인간이 프로그램 한 지시에 따라 원자들을 조립하여 원하는 물질을 생산하는 것이다²⁵⁾. 조립자들은 어떠한 원자간의 배열도 가능하게 하기 때문에 특정한 조건이 주어지면 주어진 원자들을 이용하여 어떠한 구조도 만들 수 있다는 것이 나노기반 NBIT 융합기술의 이론적 배경이다. 그런데 문제는 이러한 조립자들이 인간의 프로그램에 의한 생산활동을 넘어서서 자기 스스로를 복제할 수 있는 능력을 가지게 되어²⁶⁾, 세상의 모든 물질들을 자신의 복제물로 바꾸는 상황을 예상할 수 있다²⁷⁾. 이와 같은 자기복제적인 조립자들이 인공지능을 획득할 경우, 인간과 경쟁하여 인간을 대체하고 인간을 멸종시킬 수도 있다는 우려가 나노기반 NBIT 융합기술의 최종적 문제점으로 제시되고 있다. 이와 같은 우려로 Joy와 같은 과학자는 몇몇 영역의

24) 가령 자기복제가 가능한 나노로봇 등의 위험성은 이미 언급한 바가 있다.

25) 보편조립자(universal assembler)에 대한 간략한 설명은 K. Eric Drexler, Ibid., p.14를 참조할 것.

26) 이론적으로는 스스로를 복제할 수 있는 능력을 가지는 것은 불가능한 일이 아니다. 왜냐하면 보편조립자는 어떠한 물질의 생산이나 공통적으로 작동할 수 있는 능력을 보유할 것을 전제로 하고 있기 때문이다. 다만 문제는 인간의 도움 없이 보편조립자가 스스로의 생존 및 재생산에 사용할 수 있는 에너지를 창출할 수 있는가 하는 점이다.

27) 이러한 문제를 소위 "gray goo"문제라고 한다. 세계적인 컴퓨터 과학자이며 선마이크로시스템(Sun Microsystem)의 대표이사이자 공동설립자인 Bill Joy는 인공지능을 가진 나노로봇에 의하여 인간 종의 종말이 올 수 있다는 점을 우려하면서 특히 나노과학기술이 악의를 가지고 있는 개인들이나 소규모 그룹에 의하여 악용될 경우를 우려하고 있다(Bill Joy, "Why the Future Doesn't Need Us," Wired, April 2000.).

나노과학기술에 대한 연구는 포기하거나 금지하여야 한다고까지 강경한 주장을 하기도 한다.

하지만 자기복제 나노물질이 스스로 생존할 수 있을지는 의문이며²⁸⁾, 또한 인공지능을 획득한다는 것이 인간을 멸종시키고 세계를 지배할 수 있는 유일한 요건인지에 대해서도 의문이 제기되고 있다²⁹⁾. 만일 자기복제 나노물질의 생산이 가능하다고 인정한다면 그와 같은 물질의 연구와 생산을 금지하여야 할 것인지, 금지를 한다면 어느 정도까지를 금지하여야 하는지³⁰⁾, 그리고 어떠한 규율방식을 통하여 원치 않는 조립자가 고의적 혹은 우연적으로 생산되는 것을 금지할 것인가의 문제가 논의되어야 하며, 만일 자기복제 조립자의 출현을 허용하거나³¹⁾ 의도하지 않았지만 그와 같은 물질이 출현한다면 그들의 법적 지위는 어떻게 파악하여야 할 것인가의 문제 등이 논의되어야 할 것이다³²⁾. 자기복제 물질의 통제방안으로는 자기복제 물질의 출현으로 발전할 것이 예상되는 연구를 전면적으로 금지하는 방안과 연구는 허용하되 자기복제 물질이 연구실로부터 탈출하지 못하도록 하는 규율방안 등이 고려될 수 있을 것이다.

둘째, NBIT 융합기술의 연구로 인하여 발생할 수 있는 위험을 극소화하기 위하여 시설기준이 확립되어야 하며³³⁾, 어떠한 방식으로 NBIT 융합기술을 연구하는 것이 적절한 것인가를 과학적 관점에서 평가하는 정도관리가 이루어질 수 있어야 한다.

셋째, NBIT 융합기술로 만들어지는 생산물은 아직 자연계에 존재하지 아니하는 물질인 경우가 많기 때문에 이러한 물질이 자연계에 그대로 방출될 경우 어떠한 영향을 일으킬 것인가가 분명하지 아니하다. 특히 그 크기가 나노 단위의 원자수준의 물질인 경우에는 환경의 문제뿐만 아니라

28) 특히 에너지의 창출과 관련하여 열역학적 법칙을 고려할 때, 자기복제적 나노물질의 출현이 회의적이라는 주장이 강력하게 대두되고 있다. 자기복제적 나노물질이 우연히 발생하는 것은 아니며, 의도적으로 그와 같은 물질을 만들어내는 것도 거의 불가능에 가깝다는 주장도 있다. 이에 대한 보다 자세한 설명은 Rober A. Freitas Jr., "Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Replicators, with Public Policy Recommendations", <http://www.foresightorg/NanoRev/Ecophagy.html>을 참조하기 바란다.

29) Glenn Harlan Reynolds, *Forward to the Future: Nanotechnology and Regulatory Policy*, Pacific Research Institute, November 2002, p. 7.

30) 나노기반 NBIT 융합기술은 - 특히 아래에서 위로의 방식(bottom-up approach)에 의한 나노기반 NBIT 융합기술의 경우에는 - 조립자의 존재를 전체로 하는 것이기 때문에 모든 조립자에 대한 연구 및 생산을 금지하는 것은 NBIT 융합기술의 금지와 거의 같은 효과를 발휘할 수도 있다.

31) 인간과 자기복제 물질이 공생하는 것도 상상 불가능한 상황은 아니다.

32) 참고로 「나노기술개발촉진법」은 자기복제 나노물질에 대한 연구나 생산을 금지하는 규정을 가지고 있지 않다.

33) 1999년의 서울대 원자핵공학과 폭발사고와 2003년 5월 13일 KAIST 실험실 폭발사고 등은 우리나라 연구실의 안전실태가 상당히 미흡하다는 사실을 여실히 보여주고 있다.

인체에 대한 위해를 야기할 수도 있다. 나노 입자는 그 크기가 작기 때문에 인체의 물리적 방어기제가 작동할 수 없으며³⁴⁾, 또한 나노단위의 물질의 특성이 벌크물질의 특성과 다르고, 인체가 적응할 시간적 간격이 주어지지 아니한 채 갑자기 자연계에 출현하기 때문에 이러한 물질에 대한 생물학적 방어기제가 작동할 수 있을지도 의문이다. 따라서 연구실에서 NBIT 융합기술을 연구하는 단계에서도 연구수행 중 발생하는 폐기물이 자연계에 그대로 방출되어 환경에 영향을 미치지 않도록 하여야 할 것이며, 나아가 안전성이 확인되지 않은 상태에서 생성된 나노 단위의 물질들이 연구실 외부로 유출되지 않도록 하여야 할 것이다. 특히 NBIT 융합기술에 의해 인체에 위해가 발생한 경우에는 아직 이에 대한 위험이 충분히 평가되지 않은 상태이므로 그 인과관계의 입증에 용이하지 않아 위험에 대한 판단이 가능할 때까지는 입증책임을 완화하거나 전환하는 것을 고려하여 볼 필요가 있을 것이다.

③ 특허 보호의 문제

NBIT 융합기술의 경우, 특허법에 의한 보호를 어떻게 하여야 하는가는 매우 어려운 문제이다. 특허제도는 “발명을 보호·장려하고 그 이용을 도모함으로써 기술의 발전을 촉진하여 산업발전에 이바지”(“특허법” 제1조) 하기 위한 제도이다. 따라서 특허법은 발명을 보호하고 있는데, “발명”이라 함은 자연법칙을 이용한 기술적 사상의 창작으로서 고도한 것을 말한다.(“특허법” 제2조 제1호) 그런데 NBIT 융합기술을 이용하여 단일한 원자로 물질을 나눈 경우 자연 상태에서 존재하는 물질이기 때문에 그 자체로서는 발명이 아니라 발견이라고 하는 것이 타당할 것이다³⁵⁾. 하지만 단일한 원자들을 특정한 환경 하에서 특정한 구조로 구성시키는 것은 경우에 따라서는 발명이라고 볼 수 있을 것이다³⁶⁾. 이 경우 어느 정도까지의 구조물을 특허의 대상으로 보아야 할 것인가의 경계선을 긋는 것이 매

34) 예를 들어 원자단위의 물질은 코로 흡입되어도 코 등에서 걸러지지 않기 때문에 그대로 폐포까지 흡입되어 호흡장애를 일으킬 수 있다.

35) 이는 생명과학기술을 통하여 인간의 유전체를 분석한 경우 분리된 개별의 유전체는 발명품이라기보다는 발견물이라고 보는 것이 적절한 것과 같다.

36) 예를 들어 탄소원자를 조작하여 특정한 환경 하에서 특정한 구조를 가진 탄소나노튜브를 만드는 경우.

우 어려운 문제일 수 있다. 한편 NBIT 융합기술을 통하여 특정한 구조물이나 나노단위의 물질을 조작하는 방법의 경우에는 특허의 대상이 될 수 있다고 할 것이다.

2) NBIT 융합기술을 의료행위에 활용하는 경우의 법적 문제

나노과학기술을 기반으로 하여 생명과학적 응용이나 의학적 응용을 하는 경우, 그와 같은 과학기술의 활용은 인간의 질병예방과 진단 및 치료에 엄청난 이익을 가져올 수도 있다. 나노기반 NBIT 융합기술의 바이오 칩이나 나노바이오센서 등의 분야는 현재 연구가 활발히 추진되고 있는 분야이며, 이 분야에 대한 우리나라의 초기투자도 대부분은 이와 같은 나노과학기술을 기반으로 한 생명과학기술의 연구에 초점이 맞추어져 있다.

나노기반 NBIT 융합기술은 인간의 생명 및 신체에 대한 과학기술의 개입이라는 점에서 생명과학기술의 법적 논의가 그대로 적용된다. 그와 더불어 기반이 되는 나노과학기술의 독특한 특성으로 인하여 몇 가지 법적 논의가 추가적으로 논의되어야 할 것이다.

신약을 개발하여 사용하거나 혹은 나노로봇과 같은 소재를 제조하여 인체에 투입함으로써 암조직이나 혈관에 존재하는 혈전 등을 제거하는 데에 사용하는 것³⁷⁾과 같이 인체와 완전히 결합에 이르지 않은 단계에서는 인체에 나노물질을 투여한다는 점 때문에 발생하는 몇몇 법적 문제가 검토되어야 한다.

NBIT 융합기술이 연구실의 실험에 머무는 것이 아니라 인체에 적용될 경우에는 보다 엄격한 안전성과 정도관리가 이루어져야 한다. 즉, 인체에 대한 위해성 여부가 보다 엄격하게 검증되어야 하며 신약개발이나 새로운 치료방법의 적용과 같은 엄격한 절차를 거쳐서 실용화되어야 한다.

37) 일반적으로 NBIT 융합기술을 이용하여 동맥을 막고 있는 혈전을 제거하는 것은 비교적 빠른 장래에 현실화될 것으로 예측되고 있다(Fredrick A. Fiedler/Glenn H. Reynolds, "Legal problems of nanotechnology: An Overview", Southern California Interdisciplinary Law Journal, Winter 1994, p. 610.).

① 인체에 투여되는 물질의 법적 성격 문제

NBIT 융합기술에 의하여 제조된 물질을 인체에 투여하는 경우, 그 물질의 법적 성격을 어떻게 파악하여야 하는가의 문제가 발생한다. 통상적인 의약품과 마찬가지로 섭취하여 약물의 효과를 발휘하도록 하는 경우에는 의약품으로 파악하는 데에 의문이 없겠지만, 혈관을 막고 있는 혈전을 용해하여 혈관으로부터 박리하거나 암세포를 선택적으로 괴사시킬 목적으로 인체에 나노물질을 투여하는 경우에는 보다 복잡한 문제가 발생한다.

현재의 법이론에 의하면 의약품은 화학적 작용 혹은 생물학적 작용을 통하여³⁸⁾ 효과를 나타내는 물질임에 반하여, 의료기기는 물리적, 기계적 방법에 의하여 효과를 나타내는 물질이다. 그런데 개별적인 원자단위에서는 화학적 작용, 생물학적 작용, 물리적 작용이라는 구분은 적절하지 아니할 수 있는데, 왜냐하면 결국 개별 원자단위에서 결합을 깨거나 혹은 결합시킴으로써 효과를 나타내기 때문이다. 게다가 혈전을 박리할 목적으로 혹은 암세포를 괴사시킬 목적으로 인체에 투여된 나노로봇의 물질이 화학물질을 방출하여 원자들의 결합을 느슨하게 한 후 물리적 힘을 가하여 혈관으로부터 혈전을 혹은 정상세포로부터 암세포를 박리해 낸다고 할 경우, 화학적·생물학적 작용과 물리적 작용이 혼재되어 나타나게 된다³⁹⁾. 치료목적으로 인체에 투여되는 나노물질을 의약품으로 분류할 것인가 아니면 의료기기로 분류할 것인가에 따라 그 물질의 허가기준이 달라지게 되기 때문에 이 문제는 실질적으로 상당히 중요한 문제이다⁴⁰⁾.

38) “약사법” 제2조 제4항 제3호는 “약리학적”이라는 표현을 사용하고 있다.

39) 화학적·생물학적 작용과 물리적 작용이 혼재된 경우에는 허가기준이 보다 엄격한 의약품으로 분류하고자 할 수도 있지만 산업계의 경우에는 그와 반대의 주장을 할 수도 있을 것이다.

40) 일반적으로 말하면 의약품의 경우에는 신약으로 허가되어 임상에 사용되기 위하여 상당히 엄격한 기준을 충족하여야 함에 반하여 의료기기의 경우에는 상대적으로 허가가 용이하다. 그리고 수입의 경우에도 의약품의 경우에는 엄격한 심사를 거치지만, 의료기기는 그러하지 아니하다. 의료기기에 대한 규율에 대해서는 <의료기기법>을 참조하기 바란다.

② 건강보험 적용의 문제와 의료행위 개념정립

NBIT 융합기술을 이용한 의약품 내지 의료기기 혹은 치료기술을 실제 임상에 사용하는 경우, 사용 초기에는 빈부격차로 인한 문제가 발생할 수 있다는 점이다. 우리나라의 경우 현재 국민건강보험에 의하여 전 국민이 강제적으로 의료보험에 가입되어 있는데, NBIT 융합기술이 의료영역에 응용되는 경우 초기에는 새로운 의료기술이기 때문에 건강보험에 의하여 의료비가 지급되기 어려울 것이다. NBIT 융합기술이 의료영역에 응용되는 초기단계에서는 그 비용이 상당히 클 것이며, 또한 아직 보편적 의료행위로 정착된 단계가 아니기 때문에 질병에 대한 예방 혹은 치료적 효과가 인정되는 경우에도 경제적 요인에 의하여 환자에게 적용할 수 없는 상황이 발생할 것이다. 따라서 어느 정도의 효과가 입증된 경우 어떠한 절차에 따라 건강보험의 대상이 되도록 할 것인가가 중요한 문제로 부각되게 된다.

“의료법” 제2조는 의료인을 “보건복지부 장관의 허가를 받은 의사·치과의사·한의사·조산사 및 간호사”라고 규정하고 있다. 하지만 넓은 의미의 의료인에는 위에 규정된 자들 이외에도 의료기사, 약사, 한약사 등이 포함된다. 또한 “의료법”상의 치료행위는 “의료인이 행하는 의료·조산·간호 등 의료기술의 시행”(“의료법” 제12조)라고 정의되고 있다. 그런데 NBIT 융합기술에 의하여 제조된 나노물질이 암을 괴사시키거나 혈관을 막고 있는 혈전을 박리하기 위하여 인체에 투여된 경우, 외부에서 컴퓨터를 통하여 미리 프로그램된 나노물질을 조작하게 될 것이다. 이 경우 프로그램된 나노물질을 조작하여 혈관의 혈전을 파괴하거나 암을 괴사시키는 행위의 주체가 누구인가의 문제가 발생한다. 대상기술에 정통하고 컴퓨터를 조작하여 프로그램을 할 수 있는 자가 행위의 주체라고 한다면 이와 같은 행위는 의료행위가 아니라고 보아야 할 것이며, 의료인이 진단을 하고 처방을 한 후 그에 따라 과학기술자가 행위를 할 수 있도록 허용해야 할 것이다. 한편 대법원은 “의료행위라 함은 질병의 예방과 치료행위뿐만 아니라 의학적 전문지식이 있는 의료인이 행하지 아니하면 사람의 생명, 신체나 공중위생에 위해를 발생시킬 우려가 있는 행위를 포함한다.”⁴¹⁾

41) 대판 1994. 5. 10, 93도2544

라고 판시하고 있는데, 이와 같은 판시에 기초할 때 나노물질을 인체에 투여하여 암세포를 괴사시키거나 혈전을 박리시키는 행위는 당연히 의료행위에 포함되며, 따라서 의료인에 의하여서만 행하여질 수 있는 행위라고 하여야 할 것이다. 결국 의료인, 특히 의사가 치료 목적으로 이용되는 NBIT 융합기술에 대한 지식과 기술을 습득하여 위와 같은 행위를 행하거나,⁴²⁾ 혹은 의료기사 중 나노물질을 조작할 수 있는 업무영역을 신설하여 의사의 지시에 따라 의사와 공동으로 시술을 하도록 하여야 할 것으로 보인다.

3) NBIT 융합기술(나노물질)의 인체이식에 있어서의 법적 문제

NBIT 융합기술을 임상행위에 적용할 경우, 장기적으로 고려할 수 있는 것은 특정한 행위를 수행하도록 프로그램된 나노 물질을 인체에 투여하여 세포 혹은 조직, 장기 등에 영구적으로 이식하는 단계이다. 이와 같은 행위는 선천성 유전질환과 같은 난치병을 치료하거나 혹은 후천성 질환의 세포단위의 치료를 목적으로 한다. 나아가 경우에 따라서 인간의 특성을 변화시키기 위한 목적으로 이용될 가능성도 배제할 수 없다.

① 나노물질의 인체 내 이식의 허용문제

나노물질도 인공적인 물질이고 이것이 치료목적으로 이용되는 이상 인공장기와 같이 의료적 행위로 허용되어야 할 것으로 보인다. 다만, 그 허용범위에 대해서는 논의가 필요할 것이다. 나노물질을 세포 내에 이식하여 특정 질환을 치료하는 것은 유전자치료의 경우와 비슷하게 생각할 수 있을 것이다. 현재의 다수적 견해에 의하면, 생식세포에 대한 유전자치료가 아닌 체세포에 대한 유전자치료는 허용될 수 있다고 보는데, 이와 같은 논리는 나노물질의 인체 내 이식에도 동일하게 적용될 수 있을 것이다. 물론 유전자 이식의 경우에는 생물학적 물질인 유전자가 대체·이식되는 것이기 때문에 나노물질과 같은 물리적 물질을 이식하는 것과 동일할 수 있는가 하는 의문이 있지만 적어도 치료 목적의 이식의 경우에는 특별히 다른 법적 판단을 할 필요는 없을 것으로 보인다. 그런데 치료목적이 아닌 인간의 특성을 변화시킬 목적으로 나노물질을 인체 내에 이식하는 것이 허용될 수 있는가의 문제는 그리 간단하게 결정할 수 있는 문제가 아

42) 경우에 따라서는 새로운 분야의 전문의가 필요할 수도 있을 것이다.

니다.

현재 유전자 이식의 경우, 가령 지능을 증진시키거나 외형을 변화시키는 등 특정한 특성을 변화시킬 목적으로 유전자 이식을 하는 것은 일반적으로 윤리적이 아니라고 여겨지고 있으며, 법적으로도 금지하여야 한다는 견해가 일반적으로 지적되고 있다. 이와 같은 논리를 그대로 나노물질의 인체 내 이식에 적용할 경우 인간의 특성을 변화시킬 목적으로 나노물질을 인체 내에 이식하는 것은 금지되어야 한다는 결론에 도달하게 될 것이다. 그러나 달리 생각하면 체세포에 대한 이식만을 허용할 경우 다음 세대로 습득된 특성이 유전되지 아니하고, 또한 성형수술의 경우 성형보조물의 인체 내 이식이 의료행위로 인정되고 있는 점을 생각할 때 나노물질의 인체 내 이식이 언제나 금지되어야 하는가는 의문이 있을 수 있다⁴³⁾. 따라서 나노물질의 인체 내 이식의 허용범위와 적용 등에 대해서는 좀 더 많은 논의가 필요한 부분이다.

② 이식된 나노물질의 법적 지위 문제

나노물질의 인체 내 이식을 허용한다고 할 경우, 이식된 나노물질의 법적 지위를 어떻게 파악할 것인가의 문제가 고려되어야 할 것이다. 나노물질이 신체에 이식되지 아니한 채 외부에 존재하고 있는 경우에는 법적으로는 물건으로 파악되게 되지만, 일단 신체에 이식된 이후에는 어떻게 파악하여야 하는가의 문제가 발생할 수 있는 것이다. 신체의 일부가 신체로부터 분리된 경우에는 물건으로 취급되고 인공장기나 인공치아 등도 신체에 부착된 경우에는 신체의 일부로 취급된다는 현재의 통설적 견해에 의하면⁴⁴⁾, 물리적 물질인 나노물질이 세포 내에 이식된 경우에는 이

43) 물론 성형보조물은 세포차원이 아니라 장기차원이나 조직차원에서 이루어진다는 점에서 나노물질을 세포차원에서 이식하는 경우와는 적어도 구분된다는 견해가 있을 수 있다. 그러나 조직차원의 이식은 결국 당해 조직의 세포와 이식물이 결합하여야만 성공할 수 있는 것이므로 양자의 구별이 언제나 분명한 것은 아니다. 특히 물리적 성형보조물이 아니라 생물학적 성형보조물의 경우에는 세포 내에 이식되어 특성을 변화시키는 나노물질과 그 작용에서는 크게 구별하기가 쉽지 않을 것으로 생각된다.

44) 그러나 이와 같은 견해는 경제적 상황에서는 약간은 이해하기 힘든 결론을 도출할 수도 있다. 가령 이와 같은 논리를 극단적으로 따를 경우 수혈을 위하여 헌혈을 받아 보관하고 있는 혈액은 물건임에 분명한데, 인체로부터 인체로 직접 수혈하는 경우에는 인체에서 튜브로 나오는 순간 혈액이 물건이 되었다가 다시 인체로 들어가는 순간 인체의 일부가 된다는 결론에 도달한다. 또한 이식을 위하여 인체로부터 분리된 장기도 장기공여자로부터 분리되

또한 신체의 일부로 파악하여야 할 것이다.

③ 이식된 나노물질의 인간 종의 개념 파악 문제

나노물질을 인체에 이식하는 것이 허용된다면, 인간이라는 종의 개념을 어떻게 파악하여야 하는가의 문제가 발생한다. 인공장기의 이식 이전에는 출생하여 사망하는 순간까지의 인간을 법적 인간으로 파악하면 되었다. 그런데 인공장기 이식의 경우에는 생물학적 물질이 아닌 물리적·기계적 물질이 인체로 이식된다는 점에서 인간 개념이 약간 확장되는 상황이 발생하였다. 나노물질이 인체에 이식되는 경우는 물리적·기계적 물질을 이식한다는 점에서는 인공장기를 이식하는 경우와 비슷하다고 파악할 수도 있겠지만, 인공장기의 경우와는 세포단위에서 나노물질과 인간의 유전자가 결합하는 등의 과정을 통하여 인간의 특성을 바꿀 수도 있으며, 나아가 인공인간의 출현을 예상할 수도 있다. 따라서 종래의 인간 개념의 확장이 아니라 새로운 인간 개념의 정립 문제가 발생할 여지도 있을 것이다⁴⁵⁾.

4) 법적 측면의 정책 의제 : 법적 규율 문제

NBIT 융합기술은 그 기간기술인 생명과학기술과 마찬가지로 인간생활의 전 영역에 영향을 미치고 인간의 인식능력의 변화 및 인식방법의 전환을 야기할 수 있을 뿐만 아니라 인간 개념 자체의 재정립까지도 고려하게 만들 수 있는 분야이기 때문에 NBIT 융합기술의 사회적·윤리적·법적 함의들도 지속적으로 고려하여야 한다는 점에는 의문의 여지가 없다.

그래서 NBIT 융합기술을 법률에 의하여 규율하여야 하는가 하는 점은

어 장기를 이식받는 환자에게 이식되기 전의 중간단계에서는 물건으로 취급하여야 한다는 결론에 도달한다.

45) 인공지능의 개발이나 인간을 닮은 로봇의 개발, 그리고 인간의 유전자와 나노물질이 혼합된 존재의 출현 등은 인간 개념을 더욱 혼란스럽게 만들뿐만 아니라 인간 종의 종말을 야기할 것이기 때문에 이와 같은 결과를 야기할 수 있는 연구나 기술개발은 금지되어야 한다는 견해도 있다(대표적으로 Bill Joy, Ibid.). 한편, 인공지능을 가진 존재와 인간의 공생관계를 받아들이기 수밖에 없을 것이라는 암시를 하는 견해도 있다(예를 들어, Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines: What Computers Exceed Human Intelligence*, Penguin USA, 1999.).

또 다른 논의를 필요로 한다. NBIT 융합기술이 앞으로 어떠한 방향으로 전개되어 나갈 것인지는 불분명하기 때문에 법적 규율에 대한 가능성은 신중한 논의를 필요로 한다. 또한 NBIT 융합기술이 과연 법적으로 규율할 수 있는 대상인가에 대한 논의도 필요하다. 설령 법적으로 규율하여야 한다는 요구가 있다고 할지라도 그 규율의 대상이 법적으로 규율하기에는 적합하지 아니한 경우에는 법적 규율은 실패할 수밖에 없다.

NBIT 융합기술은 기존의 거대과학기술에 비해 소규모로 작은 자본만을 가지고도 연구가 이루어질 수 있다는 특성이 있기 때문에 사실 법적 규율의 대상으로 할 경우, 그 규율의 실효성을 확보하기가 쉽지는 않을 것이다. 그러나 NBIT 융합기술로부터 발생할 수 있는 사회적 영향이 매우 심대하고, 우리가 생명과학기술에 대한 법적 논의와 입법과정에서 겪은 경험과 지식을 바탕으로 효율적인 법적 규율의 방법과 한계를 제시할 필요가 있다⁴⁶⁾. 법적 규율은 완전한 금지에서부터 군사적 목적으로만 NBIT 융합기술을 허용하는 것, 중간 정도의 규율, 매우 자유로운 규율에 이르기까지 다양할 수 있다. 각각의 규율방법들은 나름대로의 어려움을 가지고 있으며 각각의 결과들을 가지고 있다.

① '연구의 포기 및 금지' 방법

일부의 반과학운동가들은 NBIT 융합기술의 근간이 되는 나노과학기술에 의하여 발생하는 위험들이 물리적 해악이건 혹은 사회적 해악이건 그 해악의 발생을 미리 방지하여야 할 만큼 충분히 위험한 것이라고 생각하고 있다. 이는 NBIT 융합기술에 대해서도 그대로 적용될 것이며, 이러한 견해에 의하면 연구의 시작단계부터 금지하는 것이 위험을 방지할 수 있는 최선의 방법이 될 것이다.

NBIT 융합기술에 대한 전면적 금지는 실효성이 있을 것으로 생각되지는 않지만, 연구의 전면적 금지라는 주장이 전혀 근거가 없는 것은 아

46) 생명과학기술 전반의 법적 규율에 대한 보다 자세한 내용은 정규원, "생명과학기술의 법적 문제", ELSI 연구 제1권 제1호, 2003, 85-109면을 참조하기 바란다. 또한 인간배아복제에 대해서는 정규원, "인간배아복제의 법적 문제", 의료법학 제2권 제2호, 2001, 76-97면을, 인간 유전체기능연구의 문제에 대해서는 정규원, "인간 유전체 기능 연구의 법적 문제", 생명윤리 제3권 제1호, 2002, 23-46면을 참조하기 바란다. 최근에 발표된 <생명윤리 및 안전에 관한 법률안>에 대해서는 "정규원, "생명윤리및안전에관한법률안"에 대한 검토", 법과 사회 제22호, 2002, 281-295면을 참조하기 바란다.

니다. 예를 들어 선택적으로 암세포를 파괴할 수 있는 동일한 기술이 결국 목표한 면역세포나 신경세포를 선택적으로 파괴할 수 있으며, 그 결과 건강이 아니라 사망이나 질병을 야기할 수도 있다. 자기복제적인 조립자들은 세상의 모든 다른 물질들을 자신의 복제물로 바꿀 수도 있는 소위 "gray goo"문제를 야기할 수도 있을 것이다. 놀랄만한 잠재력을 가진 컴퓨터를 생산할 수 있는 능력은 더 많은 발전을 이룰 수 있을 것이지만, 또한 인간을 대체할 수 있는 가능성을 가진 인공지능을 만들 수도 있을 것이다.

나노과학기술의 경우, 이미 「나노기술개발촉진법」이 입법되어 시행되고 있고, 나노과학기술의 원리들이 이미 일반적으로 연구되고 통용되고 있는 현재의 상황에서 NBIT 융합기술에 대한 전면적 금지는 이익보다는 혼란을 가져올 가능성이 크다. 또한 전면적 금지라는 정책이 성공하기 위해서는 그와 같은 금지는 이해 가능하여야 하며 강제적이어야 한다. 그러나 NBIT 융합기술로 인하여 발생할 것으로 예상되는 이익들을 고려할 때 전면적 금지라는 규율방법은 성공 가능성이 없다고 보는 것이 옳을 것이다.

NBIT 융합기술을 완전히 금지시키고자 하는 접근방법은 상당한 비용을 들여서 예상 가능한 모든 해악을 예방하고자 하는 것이다. 그러나 99.9%의 연구를 금지하더라도, NBIT 융합기술을 이용하고자 하는 목적을 가진 국가들에 의하여 지원을 받는 몇몇 비밀 프로젝트들이 그물망을 빠져나갈 것이기 때문에, 결국 완전한 금지는 가능하지 않게 되는 것이다.

② '군사적 목적의 연구'만을 허용하는 방법

전면적 금지보다 약간 완화된 방식은 NBIT 융합기술의 연구를 군사적 목적에 한정함으로써 NBIT 융합기술에 관한 모든 지식과 경험을 군사적 기밀로 보호하려는 접근방식이다. 이와 같은 규율방식을 채택할 경우 다수의 비밀연구들을 군사적 영역으로 끌어들일 수 있게 될 것이다. 예를 들어 미국의 원자력법(Atomic Energy Act)과 유사한 법률들을 제정하여 NBIT 융합기술의 사적 연구를 제한하는 방식이 그와 같은 접근방식이다.

이와 같은 규율방식은 적어도 일정기간 동안은 효율적으로 기능할 수 있을 것이고 또한 국가적 이익에 합치하는 방향으로 연구가 이루어질 수 있기 때문에 일부의 군사 전략가들이 이와 같은 규율방식을 선호한다⁴⁷⁾. 이와 비슷한 형태의 법적 규율은 원자무기 개발과 관련하여 널리 사용되고 있다⁴⁸⁾. 하지만 이와 같은 규율방법은 현행법의 태도와 일치하지도 않으며, 상당한 문제점을 가지고 있다. 특히 NBIT 융합기술의 경우에는 연구의 역치가 낮고 기술적 지식의 전파가 더 광범위하다는 특성, 그리고 과학의 자유와 일반적으로 언론의 자유에 더욱 민감하다는 점 때문에 이와 같은 규율방법을 채택하기는 곤란하다. 또한 군사적 독점화는 정치적 위험을 내포하고 있다.

NBIT 융합기술은 컴퓨터의 능력을 극적으로 증진시키는 것으로부터 암이나 노화와 같은 질병들의 치료에 이르기까지 비군사적 목적으로 이용될 수 있는 기술이다. 만일 NBIT 융합기술을 군사적으로 독점시킨다면 이와 같은 이익을 포기하게 할 것이며, 혹은 그러한 이익들을 군사 전략가들의 통제 하에 놓이도록 할 것이다.

③ '온건한 규율'과 '자율적 규율' 방법

통상적으로 과학연구는 「헌법」에 의하여 보장되는 자유를 누리기 때문에 일반적으로는 법률에 의하여 연구가 제한되지는 않는다. 하지만 그 과학기술이 사회적으로 상당한 영향을 미칠 가능성이 있고 그로 인하여 위험이 발생하거나 법익의 침해가 발생할 가능성이 있다면 법적 규율은 불가피하다. 그러나 법적 규율의 경우에도 연구의 자유를 고려하여 필요한 최소한에 그쳐야 하며, 특히 형법적 규율의 경우에는 비례성의 원칙이나 형법의 최후수단성 등을 고려해야 한다. NBIT 융합기술에 대한 법적 규율은 생명과학기술의 법적 규율에 대한 논의로부터 많은 시사점을 얻을

47) 이에 대한 보다 자세한 설명은 Glenn Harlan Reynolds, Ibid., pp.9-12를 참조하기 바란다.

48) 연구를 군사적 영역으로 제한하여 기밀로 보호하는 방식에 대한 일반적 설명은 Richard G. Hewlett, "'Born Classified' in the AEC: A Historian's View", Bull. At. Sci., Dec. 1981, pp.20-27을 참조하기 바란다.

수 있다⁴⁹⁾.

NBIT 융합기술이 매우 전문적이라는 특성을 고려할 때 연구자 자신의 자율적 규율이 가장 이상적인 규율방법이라고 할 수 있을 것이다. 그러나, NBIT 융합기술의 사회적 영향을 고려하려 볼 때, 연구자들의 자율적 규율과 더불어 법적 규율이 필요하다는 사고가 더 일반적이다. 일부 과학자들은 법적 규율은 지나치게 개입적이라고 비판하고 있지만, 법적 규율은 과학기술의 오용을 방지하고 공공의 신뢰를 유지하고 과학이 지속적으로 발전하는 데에 효과적임이 입증되고 있다. 이와 같은 규율 방법은 많은 신약들과 새로운 치료방법을 개발하였으며, 새로운 하이테크산업을 창출하였다.

NBIT 융합기술의 연구단계에서는 「헌법」 제22조에 의하여 연구의 자유가 보장되기 때문에 원칙적으로 연구단계의 NBIT 융합기술을 법률로 금지할 수는 없다고 할 것이다. 다만 연구의 결과가 외부로 발표되거나 응용의 단계로 넘어가는 경우에는 “국가안전보장·질서유지 또는 공공복리를 위하여 필요한 경우에 한하여 법률로써 제한할 수”(「헌법」 제37조 제2항) 있다. NBIT 융합기술 연구의 경우에는 자기복제적 나노물질에 대한 연구가 「헌법」 제37조 제2항의 규정에 의하여 제한될 수 있을 것이다. 만일 자기복제적 나노물질의 연구를 허용한다면, 그와 같은 물질이 연구실에서 탈출하거나 유출되어지는 것을 방지할 수 있는 장치가 마련되어야 하며, 그 방식은 재조합 DNA 연구에서 제시되고 있는 “물리적 봉쇄”와 “생물학적 봉쇄”라는 방식이 사용될 수 있을 것이다. NBIT 융합기술의 진정한 문제는 사고가 아니라 오용에 있다고 할 수 있다.

연구실의 연구단계를 넘어서서 NBIT 융합기술이 실용화되는 단계의 법적 규율은 나노물질의 오용이라는 문제를 고려하여야 할 것이다. 나노물질의 오용을 방지할 가장 좋은 방안은 연구자들의 자율적 통제와 적절한

49) 생명과학기술의 법적 논의가 NBIT 융합기술에 대한 법적 논의에 유용한 시사점을 주는 이유는 다음과 같다. 먼저 전통적인 과학기술과는 달리 생명과학기술과 NBIT 융합기술은 인간 사회에 혁명적 변화를 가져올 수 있다는 공통점이 있다. 두 번째, 생명과학기술과 NBIT 융합기술은 모두 인체에 직접적인 영향을 줄 가능성이 있다는 특징이 있다. 세 번째, 생명과학기술과 NBIT 융합기술은 원자력과학과 같은 거대과학과는 달리 소규모의 인원과 소규모의 자본으로 비밀리에 수행될 수 있다는 특징을 공유하고 있다. 또한 양자는 그 발달의 방향을 예측하기 어렵다는 특징도 공유하고 있다.

수준의 법적 규율이다. 법적 규율만을 통하여 효과적으로 NBIT 융합기술을 규율하는 것은 불가능하다. NBIT 융합기술의 법적 규율의 목표는 어떻게 NBIT 융합기술을 위협적인 형태가 아니라 온건한 형태로 발전시킬 것인가 하는 점일 것이다. 과도한 법적 규율은 법률의 실효적 작동보다는 오히려 부작용을 일으킬 가능성도 존재한다. C. Sunstein은 지나친 법적 규율은 몇 가지 이유에서 자멸적(self-defeating)일 수도 있다고 주장한다⁵⁰⁾.

첫째, 과잉의 규율은 과소한 규율을 야기하게 된다. 법적 규율이 과도로 강한 경우에 법을 집행하는 기관들은 법의 집행에 소극적인 경향을 보이게 된다⁵¹⁾.

둘째, 새로운 위험에 대한 강력한 규율은 오히려 전체 위험을 증가시킬 수도 있다. 새로운 기술들은 대개는 이전의 기술들 보다 안전하지만, 정치적인 이유 때문에 정착된 산업에 새로운 규율을 가하는 것보다 새로운 기술들에 새로운 규율을 가하는 것이 더 쉽다. 예를 들어 새로운 자동차를 생산하는 경우, 그 자동차가 지나치게 환경을 고려할 것을 요구하면 결국 자동차의 생산비용이 증가하게 되고, 그에 따라 구매비용도 증가하기 때문에 사람들은 새로운 자동차보다는 오래된 자동차를 계속 운전하려고 할 수도 있다. 그럴 경우 결국 오래된 자동차로 인한 환경문제는 지속되게 되고 그로 인한 위험은 새로운 자동차를 사용할 때보다 증가하게 된다. “문제는 오래된 위험들이 지속될 것이라는 것뿐만 아니라, 규율 체계 바로 그 자체 때문에, 그와 같은 위험들이 보다 보편적이 되고 그렇지 않았다면 지속되었을 것보다 더 오랜 동안 지속될 것이라는 것이다.”⁵²⁾

셋째, 최선의 기술을 사용하도록 요구하는 것은 기술의 발전을 지연시키는 결과를 야기한다. 만약 최선의 이용 가능한 기술들을 기업들에 요구한다면, 기업들이 연구와 새로운 기술들을 발전시키고자 하는 의욕을 적극적으로 저하시키는 결과를 야기하게 된다. 왜냐하면 만일 그러한 요구를 한다면 기업들은 그들이 원하건 아니건 특정한 결과물들을 채택

50) C Sunstein, "Paradoxes of the Regulatory State", 75 U. Chi. L. Rev., 1990, p. 407.

51) C. Sunstein, Ibid., p. 416.

52) C. Sunstein, Ibid., p. 417.

하도록 강제되기 때문이다. “부당하게, ‘최선의 이용 가능한 기술’을 채택하도록 강제하는 것은 결국 혁신에 대한 동기를 사라지게 할 것이고, 그리고 실제로 혁신자들에게 경제적 처벌을 가함으로써 혁신에 대한 의욕을 저하시키는 결과를 야기한다.”⁵³⁾

이와 같은 법적 규율의 특징적인 역설들은 기피하여야 할 몇몇 특정한 규율방식들이 무엇인지를 제시하여 주고 있다. 보다 일반적으로 말하면, 이와 같은 특징적 역설들은 규율자들이 당면 문제들을 더 악화시키지 않으려면 규율자들이 점진적으로 움직이며 보다 조심스럽게 움직일 것을 제안하고 있다. NBIT 융합기술에 대한 법적 규율은 그와 같은 점을 염두에 두면서 다차원적으로 이루어져야 할 것이다.

NBIT 융합기술의 법적 규율에서 먼저 고려하여야 할 점은 접근의 제한이다. 즉, 신뢰할 수 있다고 생각되는 자격을 가진 전문가들만이 NBIT 융합기술에 대한 일을 할 수 있도록 허용하여야 할 것이다. 이때 신뢰할만한 자격의 요건으로는 자신의 연구행위가 어떠한 사회적·윤리적·법적 함의를 가지고 있는지를 이해하고 전문가의 윤리에 합당한 연구행위를 수행할 수 있는 것도 포함될 것이다. 두 번째로, NBIT 융합기술이 악의를 가진 연구자나 집단으로 유출되는 것을 막을 수 있는 방안을 마련하여야 할 것이다. 이 문제는 국제적 협의를 필요로 하는 부분이기도 하다. 세 번째로, 가장 중요한 것은 전문가의 윤리의식을 고양시키고 전문가 지침을 제정하는 것이다. 생명과학기술에 대한 법적 논의에 있어서 이 점은 매우 강조되어 왔으며, 어느 정도 성과를 보이고 있다. 이와 같은 규율방법에 대하여 특히 관심이 있는 것은 이러한 규율방법이 강력한 법적 규율이 아니라 전문가의 자율적 규율, 문화 그리고 기대라는 대체로 “약한 법률(soft law)”라는 점이다.

이와 같은 접근방법을 NBIT 융합기술에 적용하는 것은 많은 장점이 있다.

첫째, 일반적으로 NBIT 융합기술 연구자들이 긍정적인 가치들(positive values)을 지키는 한, 정부당국들이 인식하지 않을 것으로 생각되는 적절치 못한 행동을 밝혀내고 그것에 반응할 수 있는 수많은 규율자들을 생성해낼 수 있다는 점이다.

53) C. Sunstein, *Ibid.*, p. 420.

둘째, 이와 같은 규율방법이 NBIT 융합기술분야에 종사하는 사람들에 의하여 지켜진다고 한다면, 공적인 법률적 통제가 기능하지 못할 수 있는 상황에서도 이러한 규율방법은 준수될 수 있을 것이다.

셋째, 전문가의 자율적 윤리지침은 스스로 지속적으로 NBIT 융합기술의 발전에 상응하게 재정립되어 갈 것이며, 처음 그 기준을 받아들인 사람들 뿐만 아니라 그들과 같이 일을 하는 사람들에게도 전파될 수 있다는 장점을 가지고 있다.

넷째, NBIT 융합기술의 내재적 안전성을 보장할 수 있는 방안을 마련하여야 한다. 이러한 방안을 통하여 사고나 오용, 남용 등을 예방하여야 할 것이다. 예를 들면, 세포 내에 이식된 복제할 수 있는 나노소재들의 유전체는 재프로그램이 더 어렵도록 암호화될 수도 있을 것이며, 돌연변이가 발생할 시 의미 없는 지시(nonsense instructions)를 야기하도록 안전하게 만들 수도 있을 것이다. 또한 소재가 재생산될 수 있는 횟수가 제한되도록 할 수도 있을 것이다. 이와 같은 보호수단들이 나노소재를 처음 생산할 때 내재적으로 프로그래밍화 된다면, 사고를 예방하는 데에 매우 효과적일 것이고 오용을 예방하는 데에도 도움이 될 것이다.

V. NBIT 융합기술의 사회적 함의와 정책제언

1. 사회적 함의 : 윤리적 태도와 규범

NBIT 융합기술이 본격화 될 경우, 과학기술의 융합과 네트워크의 강화로 인해 사회가치와 규범이 크게 변화할 가능성이 높다. 과학기술의 융합은 단순히 기술의 수렴에 그치지 않고, 사람들을 하나의 네트워크로 연결하는 계기가 된다. 이러한 연결을 통해 연구자 개인의 역할 자체가 더 중요하게 되고, 연구개발 목표를 달성할 수 있는 더 많은 기회가 부여된다. 또한 네트워크가 강화됨으로서 서로 다른 문화, 언어, 전문직종, 연령 등의 차이로 인한 거리감이 해소될 것으로 보인다. 즉, 원활한 협동과 커뮤니케이션으로 국제적 동반자 관계가 증대하고, 그룹이나 조직의 생산성이 크질 것으로 전망된다.

NBIT 융합기술의 사회적 함의를 고려함에 있어, 간과하지 말아야 할 점은 연구개발 과정에서의 연구자뿐만 아니라, 이러한 연구를 지원하는 정부와 기업이 윤리적인 측면에서 지켜야 할 규범문제도 발생한다는 것이다. 또한 연구결과를 실용화하는 단계에서 지켜야 할 윤리적 문제도 고려되어야 한다. 고려되어야 할 윤리적 주제들은 단순히 도덕적 원리에 대한 논의에 머물러서는 안 되겠지만, 동시에 일반적 도덕원리의 내용과 함의를 정확히 이해하는 것이 특히 필요하다. 그럼에도 불구하고 과학기술연구와 관련된 윤리적 논의는 우선적으로 문제가 되고 있는 과학기술의 구체적인 내용과 과학기술자 사회, 연구단체, 자금지원단체 등 관련행위자들의 구체적인 활동에 집중해서 이루어져야 한다. 과학기술연구와 관련된 윤리적 논의가 규범윤리학의 내용을 단순히 '응용'하는 정도라고 생각하기 보다는 당면할 윤리적 문제들을 적극적으로 찾는 것이 필요하다.

결국, 추상적인 지식으로서 정형화된 과학기술의 윤리가 아닌, 과학기술 활동이 이루어지는 정치, 사회, 문화적 요인들을 고려하고 이를 적극적으로 반영해야 한다는 것이다. 좀 더 구체적으로 말하자면 규범윤리학의 해묵은 논쟁이 어떤 방식으로 종결되는 가와는 무관하게, 현재 한국사회의 정치·문화적 상황과 한국사회가 앞으로 어떤 방식으로 바뀌어 나갈 것인가를 고려하여, 정당화가 가능하고 현실적인 '윤리적 태도들과 규범'들을 찾아

낼 때, 그 함의가 크질 것이다.

(1) 연구개발과정에서 지켜야 할 윤리 I : 연구자가 지켜야 할 윤리

1) '잠재적 위험성 공개'윤리

나노수준의 입자들을 인공적으로 생산해 내는 것은 우리가 예상할 수 없었던 혜택을 가져올 것으로 전망된다. 그러나 동시에 이전에 존재하지 않았던 인공물이라는 점에서 그것이 가져올 부정적 영향 역시 정확히 예상하기는 어렵다. 농업생산력을 극대화하기 위해 개발됐던 화학 살충제가 오히려 생태계를 교란시키는 요인이 되었다는 사실에서도 알 수 있듯이, 연구개발과정에서 쉽게 간과할 수 있는 요소가 심각한 문제를 야기할 수도 있다. NBIT 융합기술로 개발될 나노센서와 같은 미소장치의 경우에도 우리의 생활 속에 광범위하게 활용됨에 따라 개인 사생활의 침해와 같은 민감한 문제가 발생할 소지가 있다.

신기술을 개발하려는 연구자들은 흔히 이러한 잠재적 위험의 발생가능성을 간과하거나 과소평가하기 쉽다. 그 주된 이유는 새로운 기술이 가져올 수 있는 이로움 점은 대체적으로 연구 목표와 쉽게 연결될 수 있는 것들이어서 예상하기 쉬운 반면, 그 부작용은 연구개발 목표에서 쉽게 추론하기 어렵다. 또한 잠재적인 부작용을 연구개발목표에 기술하는 경우는 매우 드물기 때문에 예상 가능한 것이라 하더라도 그 정확한 피해의 규모를 짐작하기 어렵다. 한편 새로운 기술개발을 적극적으로 홍보해야 하는 동기가 확실한 연구자들은 새로운 기술의 잠재적인 부작용에 대해 그다지 많은 시간을 투자하여 생각하지 않는 경향이 있기도 하다.

이러한 관점에서 우리는 나노수준의 신물질을 연구하고 개발하는 일만큼이나 아무리 확률적으로 낮다 하더라도 그것의 잠재적 위험성(특히, 인간의 복지와 관련된)에 대한 연구도 상당한 수준으로 장려해야 한다. 여기서 잠재적인 위험성이 있으면 당장 관련 연구를 보류해야 한다는 식의 단순한 '예방원리(Precautionary Principle)'를 적용하는 것이 아니라 신물질의 상업적, 긍정적 효과만큼이나 환경적, 부정적 효과도 동일한 수준으로 연구하는 적극적인 도덕 원리를 적용해야 함을 의미한다. 부정적 효과를 제거하거나 최소화할 수 있는 방법을 찾기 위한 연구를 통해 NBIT 융합기

술이 인류를 위해 올바르게 사용될 수 있도록 노력하는 것을 의미한다. 이를 위해서는 연구과정에 나타날 수 있는 잠재적 위험성을 공개하여 사회적인 공론을 유도하고 대안을 마련해야 한다.

2) 연구과정 및 결과의 '객관성·공개성 확보' 윤리

나노수준의 과학기술연구와 관련된 모든 사람들은 현재의 NBIT 융합기술 수준에서 예상되는 긍정적·부정적 효과와 미래의 NBIT 융합기술에 잠재하는 가능성 및 위험성 모두를 최대한 객관적인 방식으로 평가하고 그 위험성과 NBIT 융합기술 연구로부터 얻을 수 있는 긍정적인 효과를 공정하게 비교하려는 노력을 해야 한다. 그리고 그 비교의 최종결과는 미리 결정되어 있어서는 안 되고, 주어진 구체적인 상황과 내용에 따라 결정되어야 한다.

이러한 연구과정 및 결과의 객관성과 공개성을 확보하는데 있어 고려해야 할 사항은 '공짜 점심은 없다(No Free-Lunch Principle)'라는 원칙이다. NBIT 융합기술과 관련된 과학기술로부터 긍정적인 측면이 기대되는 것은 분명한 사실이지만, 그것의 부작용이 전혀 혹은 무시할 만 할 것이라고 낙관적으로 예상하는 것은 매우 순진한 생각이다. 수많은 역사적인 사례에서 알 수 있듯이, 새롭고 혁신적인 과학기술은 우리에게 상당한 혜택을 가져옴과 동시에 그에 상응하는 불확실성을 내포한다. 기존의 지식과 기술로 해결할 수 없는 불확실성 하에서 신기술에 대해 무조건적으로 열광하여 부작용을 간과하거나 숨기려 하는 일은 경험적 증거를 고려할 때 옹호되기 어렵다. 초기에 인과관계를 밝힐 수 있는 부작용의 경우, 그 대응 비용은 감내할 수 있는 수준이 될 수 있지만, 사소한 오차라도 누적된다면 어느 순간 초기엔 상상할 수도 없었던 막대한 부작용을 가져오는 경우가 대부분이다.

NBIT 융합기술이 내포하는 불확실성에 따른 위험에 대응하는 가장 효과적인 방법은 연구과정을 엄밀하게 관리하는 것 외에도 과정상의 결과를 과학 공동체나 시민사회 등에 공개함으로써 초기에 위험을 분산시키고 연구의 객관성을 검증받는 것이다. 따라서 NBIT 융합기술 연구자들은 자신의 연구가 가져올 긍정적 효과와 부정적 효과에 대해 자신이 알고 있는 지식의 범위 내에서 최대한 합리적이고 공정한 판단을 이끌어내어 이를

사회구성원들과 공유하려는 노력을 해야 한다.

3) 연구자의 '직업'윤리교육

NBIT 융합기술은 매우 엄격한 직업윤리를 필요로 한다. 첨단 과학기술이 생명현상의 인위적 조절 및 조작에 적용될 수 있으며, 이는 곧바로 생명윤리와 사회가치에 직접적으로 관계된다. 따라서 전문화된 첨단 지식 및 기술뿐만 아니라 그것이 갖는 사회적, 문화적, 윤리적 측면에 대한 건전한 인식이 함께 교육되어야 한다.

NBIT 융합기술의 연구개발 과정과 관련된 여러 사안들의 윤리적 민감성을 고려할 때, 이 분야 종사자들은 자신들이 수행하는 연구의 사회적, 윤리적 함축에 대해 충분한 이해를 가지는 것이 매우 필요하다. 어떤 조건에서는 연구자는 자신이 속한 연구팀과 다른 독자적인 판단을 내릴 수도 있다는 사실을 정확히 숙지해야 한다. 그리고 그러한 판단에 따라서 도덕적으로 옹호 가능한 방식으로 행동하는 것이 어떤 경우에 정당화될 수 있으며, 어떠한 제도적 보호장치가 존재하는지에 대해서도 알고 있어야 한다.

이를 위해 NBIT 융합기술 연구종사자들에 대한 직업윤리(Professional Ethics) 교육이 매우 중요하다. 직업윤리 교육에는 과학과 기술이 인류전체의 복지를 위해 기여해야 한다는 일반적 도덕원칙에서부터 연구자들의 지적 공정함과 정보공개 투명성에 대한 강조, 그리고 자신들이 수행할 연구가 지닐 윤리적, 사회적 함의에 대해 독자적인 평가와 판단을 내릴 수 있는 능력을 키워주는 내용이 포함되어야 한다.

(2) 연구개발과정에서 지켜야 할 윤리 II : 연구지원 주체가 지켜야 할 윤리

과학기술연구에 수반되는 윤리적 측면을 논의하는 데 있어 연구자의 윤리를 강조하는 것 못지않게 정부와 기업 등의 연구지원주체의 윤리적 문제도 중요하다. 연구의 기획과 과정관리, 결과의 모든 연구단계에 있어 연구자가 직접적인 영향과 책임을 지게 되지만, 대다수의 이러한 연구들은 개인 연구자가 아닌 기업이나 정부의 목적에 부합하는 지원 및 규제 하에 이루어지게 된다. NBIT 융합기술에 대해 정부는 이미 공개적으로 대규모

투자과 연구 장려를 천명한 바가 있다. 현 시점에서는 NBIT 융합기술 연구가 정부주도로 추진될 가능성이 매우 크다.

정부주도 연구개발이라 하더라도 연구개발 관리방식, 연구개발 수행자에 따라 세부적인 윤리적 문제들이 달라질 수 있다. 예를 들어, 정부는 연구자금을 지원하고 대학연구소와 정부산하 연구소, 그리고 기업체 연구소 모두가 이 연구개발 자금을 놓고 경쟁하는 방식이 있을 수도 있고, 기업체 연구소가 이 과정에서 제외된 정부주도와 민간주도로 이원화되어 추진되는 방식이 있을 수 있다. 어느 경우든 연구주체 선정과정과 연구비 집행과정 그리고 연구성과의 기대효과와 예상되는 부작용 등에 대한 정보공개과정에서 투명성이 요구된다. 현실적으로 민간주도 사업의 경우 이러한 투명성을 정부주도 사업의 수준으로 요구하기는 어려운 점이 많다. 그럼에도 불구하고 가능한 범위 내에서 연구개발의 여러 측면과 관련된 투명성을 보장하려는 노력이 요구된다.

1) 정부주도의 사업 추진과 관련된 문제

정부주도 사업의 투명성 요구는 정부가 사용하는 연구비가 궁극적으로는 국민의 세금에서 나온다는 사실로 정당화된다. 다시 말해, 정부예산의 집행과 관련한 '책임성(accountability)' 요구는 연구개발비의 집행과 관련해서도 당연히 요구되어야 한다. NBIT 융합기술 연구는 현재까지 자연에 존재하지 않았던 특징을 갖는 새로운 물질의 생성이라는 연구주체의 특수성을 고려할 때 더욱 더 높은 수준의 투명성이 요구된다. 특히, 정부의 한정된 연구개발예산을 특정 연구주체에 집중하는 일이 정당화되려면, 그러한 집중이 연구예산사용의 효율성과 기대효과 극대화의 관점에서 옹호되어야 한다.

이러한 문제는 미국에서 최근 논란이 되었고 결국은 포기된 초전도 초고속 가속기(SSC: Superconductor Super Collider) 건설과 관련하여 미국 물리학회 내에서 벌어진 논쟁과, 최근 성공적으로 완료된 인간 유전체 프로젝트(HGP: Human Genome Project)와 관련하여 미국 생물학회 내에서의 논쟁에서 잘 나타나 있다. 두 경우 모두 한정된 연구예산을 입자물리학 분야와 유전학, 분자생물학 연구에 집중하려는 시도에 대해 다른 분야를 연구하는 물리학자와 생물학자들이 그 정당성에 의문을 제기하였다. 결론

적으로 입자물리학자들은 가속기 건설을 통해 다른 물리학 분야의 연구주제를 수용할 수 있다는 확신을 불러일으키는데 실패했다. 반면 유전체 프로젝트의 경우에는 생태학이나 진화 생물학 연구, 인간 유전체 연구의 윤리적·법적·사회적 함의를 연구하는 분야에 상당한 예산을 배정하여 어느 정도 반대파를 설득시키고 난 후에야 채택되었지만 결과적으로 연구를 성공적으로 마칠 수 있었다. 이 두 가지 사례의 각기 다른 결과는 NBIT 융합기술 연구의 미래와 관련하여 시사하는 바가 많다.

NBIT 융합기술과 같은 신기술의 연구를 지원하는 주체로서 정부는 연구주제의 선정과정의 투명성을 확보하기 위해 노력해야 한다. 또한 연구사업 진행시 발생할 수 있는 윤리적 문제에 대한 대안을 연구기획서에 첨부하도록 제도화 하는 기준을 마련할 필요가 있다. 마찬가지로 이유로 예산 집행과정에서도 연구의 경쟁력을 손상시키지 않는 범위 내에서 투명성을 보장하여야 하고, 연구결과의 심사도 장기적 연구의 가능성을 인식하는 범위 내에서 투명성이 보장되어야 한다.

2) 민간주도의 사업 추진과 관련된 문제

공익적 측면에서 연구의 과정이나 성과에 대한 지속적인 평가와 관리가 비교적 용이한 정부주도의 사업추진과는 달리 민간주도의 연구개발사업은 철저히 시장의 논리에 근거하고 있는 경우가 많다. 기업의 연구지원 목적은 대체적으로 신기술 개발을 통한 시장 점유율의 확대와 이윤창출 등에 있다고 할 수 있다. 그 결과로서 새로운 산업과 고용이 창출되고 출시된 제품을 이용함으로써 삶의 질이 향상되는 효과가 있기도 하지만, 정부주도의 사업과 비교해 볼 때, 사회문화적 영향을 고려하는 비중이 상대적으로 작다고 할 것이다.

멀지 않은 미래에 형성될 NBIT 융합기술 시장은 예상되는 규모만큼이나 많은 자본이 투자되고 형성될 것으로 보인다. 거대자본에 의한 시장형성의 가능성이 높은 만큼 기술개발의 방향성에 대해 사회적으로 관심을 가지고 간여하는 일은 매우 중요하다. 특히 자본의 논리에 의해 연구자의 윤리와 책임이 희석되지 않도록 사회적 제도화 필요성이 강조되어야 한다. 또한 시장경쟁에서 발생할 수 있는 연구자간 혹은 기업간 정보의 폐쇄성을 국가나 사회가 어떠한 수준에서 관리해야 하는지에 대한 진지한

논의가 필요하다.

또한 민간주도로 사업이 추진될 경우, 투자를 통해 성공한 기술뿐 아니라 성공하지 못한 기술의 처리도 중요한 관심사로 취급되어야 한다. NBIT 융합기술은 기본적으로 기존에 존재하지 않던 나노수준의 물질을 만들어 내는 것이므로 일단 만들어진 물질에 대해서는 최종적인 처리에 대해서도 연구자의 책임이 요구된다. 즉, 신기술 개발로 발생한 부정적 효과에 대한 원상복구의 책임을 이행하고 이를 감시할 수 있는 제도적 장치의 마련이 중요하다. 이처럼 민간주도로 NBIT 융합기술 개발이 추진될 경우에도 정부주도의 사업추진 못지않은 연구개발단계의 투명성이 요구되며, 이들을 법적·제도적 테두리 내에서 확보하기 위한 노력이 이루어져야 한다. 또한 연구결과의 부정적인 측면에 대해서도 이를 공개하여 대안을 마련토록 노력해야 한다.

(3) 연구결과의 활용(실용화) 단계에서 지켜야 할 윤리

1) 지적소유권과 관련된 이해관계 문제

대학이 지적소유권을 통해 직접적으로 상업적 이익을 추구할 수 있게 됨으로써 대학과 산업체간의 본격적인 협동연구가 가속화되고 있다. 연구를 통한 성취감과 이에 따른 부의 창출이 가능하게 됨으로써 각종 연구가 활성화되고 있다. 또한 기술이나 제품에 대한 시장의 평가를 통해 빠르고 정확한 피드백이 이루어지고 있다. 이는 NBIT 융합기술과 같은 신기술의 제품화를 앞당김으로써 인류의 삶의 질을 향상시키는데도 기여할 것으로 보인다. 그러나 한편으로는 대학에 소속된 연구자가 기업체의 상업적 이익과 직결된 연구를 할 때 대학과 기업체 문화의 가치차이로 말미암아 여러 가지 윤리적 문제가 발생할 수 있다.

우선 기업체 연구비를 받고 대학에서 연구된 연구결과에 대한 지적소유권의 문제를 어떻게 해결할 것인가의 문제가 있다. 나노기술의 혜택이 사회전반에 확산되어야 한다는 점과 기업의 연구투자의욕을 유지시킬 수 있어야 한다는 점을 모두 고려한 선택이 요구된다. 이 경우 생명공학에 대한 미국의 사례는 지나치게 기업의 이윤추구를 보장해준 사례로 좋은 참조의 대상이 된다. 또한 대학의 연구자가 자신의 연구의 잠재적 위험성을 사회

적으로 알려야 한다고 믿을만한 충분한 근거가 있고, 이러한 공표가 연구자금을 지원한 기업의 상업적 이익과 상충할 때 연구자가 사리에 맞는 판단을 할 수 있는 제도적 장치가 마련되어야 한다. 이는 '내부 고발자'에 대한 보호 장치와 함께 내부 고발자의 대상에 대해 가능하면 명확한 기준이 마련되어야 함을 요구한다.

2) 연구결과의 비평화적 목적으로의 사용 문제

과학기술의 역사에서 이른바 신기술 혹은 첨단 과학기술개발과 군사기술분야는 상당히 밀접한 연관을 가지고 있다. 달을 향한 인류의 꿈을 실현시킨 우주로켓기술이 원거리에서 인명을 살상하기 위한 로켓기술에 기반을 두고 있다는 것이 좋은 예이다. 이외에도 원자력에너지의 평화적 이용이나 각종 백신 등의 개발의 사례에서도 과학기술이 활용하기에 따라 인류에게 득이 될 수도 있고 해가 될 수도 있음을 보아왔다. 이처럼 과학기술의 이중적 측면을 어떻게 활용할 것인가라는 문제는 NBIT 융합기술이라는 새로운 시대의 시작점에서 있는 우리에게 시사하는 바가 매우 크다.

인류의 복지를 위해 기여해야 할 NBIT 융합기술이 군사기술에 사용된다는 것은 윤리적인 측면에서 수동적인 안전의 보장이라는 최소한도 내에서 허용되어야 한다. 특히 나노 관련 기술이 가져 올 수 있는 인간의 건강에 대한 잠재적 위험을 고려할 때 위해성이 있는 군사기술로의 이용은 더더욱 옹호될 수 없다. 그럼에도 불구하고 역사적 경험을 기억해 볼 때, 나노 관련 NBIT 융합기술이, 특히 그것이 가지고 있는 놀라운 잠재력을 고려해 볼 때 군사기술로 전용되지 않으리라고 믿는 것은 현실성이 없어 보인다. 그렇다면 우리는 나노 관련 군사기술 개발을 최대한 억제하는 동시에 그것이 현실화 될 경우 인류와 환경에 대한 피해를 극소화시킬 수 있는 방안을 모색해야 한다.

이를 위해 우선적으로 대인지뢰 금지협약의 예에서 볼 수 있듯이 NBIT 융합기술을 응용한 군사기술 중 그것의 피해가 지나치게 비인도적이라고 생각되는 것들에 대해서는 개발과 이용에 대한 금지와 함께 인도적이고 평화적인 방향으로 연구를 진행하도록 유도하는 것이 필요하다. 그리고 나노기술을 이용한 소자와 같이 비교적 기존의 전기전자 기술과 연속성을 갖는 경우에는 그것의 개발과정에서 군사기술이 인류와 환경

에 대해 가져올 수 있는 잠재적 위험성에 대한 연구가 반드시 병행되어야 한다. 특별히 개인 사생활을 침해하거나 나노 물질의 대량생산에 기초하여 환경을 교란시킬 수 있는 군사기술은 그 개발과정이 면밀하게 통제되어야 하고 어떤 경우에도 단순히 전략적으로 유용할 수 있다는 점에서 무조건적인 정당화가 이루어져서는 안 된다.

3) NBIT 융합기술의 일상화에 따른 문제

NBIT 융합기술은 향후 형성될 시장의 거대한 규모만큼이나 우리의 일상생활 곳곳에 많은 영향을 미칠 것으로 보인다. 의료분야에서 현재의 의약품이나 치료 및 진단도구를 획기적으로 개선 또는 대체할 것으로 보이며, 나아가 인체의 일부를 대체 가능하게 만들 것으로 전망된다. 또한 나노 바이오센서 등을 활용하여 대기 및 수질 정화와 감시, 생화학테러에 대한 대비를 하는 등 환경개선과 사회 안전 강화에도 기여할 것으로 보인다.

그럼에도 이러한 나노기반의 미소장치들이 우리 일상생활 속에 광범위하게 활용될 경우에 발생할지도 모르는 사생활 침해 등의 문제에 대한 우려가 있는 것도 사실이다. 나노바이오센서를 이용한 극소 형태의 센서가 사회 안전이라는 목적을 넘어 오용되거나 남용될 경우에 권력기관이나 기업 등에 의한 통제의 수단으로 활용될 수도 있다는 것이다.

나아가 NBIT 융합기술을 응용한 여러 장치들이 인간의 몸을 여러 수준에서 대체할 때 우리는 어떤 상황에서 이러한 '인간+사이보그'에 대한 윤리적 책임을 물을 수 있는가의 문제가 발생할 수 있다. 또한 이들을 법적 권리와 의무를 가지는 인간으로 볼 수 있을 것인가에 대한 문제는 아직은 요원한 미래의 상황이지만 기술의 발전에 따라 우리가 봉착하게 될 가능성이 높은 것이다. 보다 급진적인 경우에는 나노수준의 물리화학적 과정이 자기 복제성과 나노수준의 자연선택과정에 의하여 일종의 생명체적 특징을 가지게 될 수도 있다. 나아가 그 결과가 '지능(intelligence)'이라고 부를 수 있는 단계까지 올라갈 수도 있다. 이러한 상황이 도래하면 우리는 인류와 질적으로 다른 지적인 존재에 대응하는 법을 익혀야 할지도 모른다.

비록 이러한 가능성이 현재로는 매우 가설적이고 제한적인 수준에 머물고 있지만, 현재 진행되고 있는 NBIT 융합기술 연구의 열기는 장차 이러한 연구의 결과물들이 우리의 일상생활에서 익숙한 것이 되어 버렸을 때 이들을 어떻게 이해할 것인가에 대한 보다 진지한 철학적·사회학적 논의의 필요성을 제기하고 있다.

2. 정책 제언

다양한 전문가 및 시민의 적극적인 참여를 통한 기술영향평가는 일회적으로 종료되는 활동이 아니라 그 결과가 관련 정책의 결정과정에 반영되고⁵⁴⁾ 환류되는 연속적인 과정이다.

(1) 미래기술 확보를 위한 정책제언

국제 경쟁력을 높이고 국가 기술을 리드할 진정한 미래형 융합 기술의 발전을 위해 필요한 지원 시스템은 실질적인 시설, 인적자원 등의 융합의 형태로 효율적인 기술 발전을 위해 반드시 필요하다.

이러한 시설, 인적자원 등의 융합을 가장 효율적으로 시행 할 수 있는 방법으로는 Core center를 제안할 수 있다. Core Center의 개념은 연구소 인력이든 대학 인력이든 소속기관에 얽매이지 않고 일을 할 수 있는 기관을 말한다. 그 형태는 정부출연금으로 설립된 법인이 적절하나, 현실적으로 시설이 갖추어지기 전까지는 Virtual Center로 운영되는 것도 필요하다. 이에 대한 참고 모델로는 영국의 에딘버러 Scientific park, 일본 오카자키 연구센터, 리켄 연구소 및 독일 프라운호퍼 연구소 등을 예로 들 수 있으며 리켄 연구소 방식이 가장 적합할 것으로 판단된다.

한편, 이러한 지원시스템의 마련과 함께 NBIT 융합기술과 같은 미래기술연구를 담당할 인력양성이 시급하다. 국내 대학의 경우 미래의 융합기술을 이끌어갈 인재 양성 프로그램이 전무한 것이 당면 현실이다. 연구인력의 양성을 위해서 다음과 같은 프로그램 및 제도를 도입함이 바람직하다.

- virtual education system을 운영하여 다학제간 교육 프로그램을 개발
- 국내 대학의 기존 과 운영 시스템이 아닌 한 과에서도 교수의 다학제간 구성 도입(미국식)
- 학생의 자유로운 이동을 위한 국가 박사 제도 도입(프랑스 식)
- 산·학 연구원 제도 적극 장려 (실질 임금 보장, 세제 혜택 등 정부 실질 보조)

54) 과학기술기본법 제14조 참조

또한, 기술이 급속하게 발전하는 글로벌 시대에 소위 “Killer Application”을 창출하여 신산업으로 연결시키기 위해서는 미래 기술에 대한 시장분석과 산업경제에 미칠 효과에 대해 철저한 준비가 필요할 것이다. 이러한 측면에서 볼 때, 산업경제적 영향평가를 위한 방법론의 개발이 시급하다. 기술의 산업경제적 영향평가는 과학기술·사회문화적 측면보다는 정량적 측면이 강조되고 있으며 기술개발이나 기술 확산에 환류되어 사용되어지는 것이 일반적이다. 따라서 보다 정치한 방법론에 근거한 세부적인 도구개발이 요청된다. 최근의 기업 R&D활동은 시장의 잠재적 수요를 사전에 파악하여 반영하는 형태로 이루어진다는 점에서 기술영향평가와 연계될 경우 사회적 비용을 크게 감소시킬 수 있다.

(2) 사회제도적 측면의 정책제언

NBIT는 특정 계층이나 집단이 아닌 우리사회 또는 인류 전체의 복지에 기여할 수 있도록 연구되고 활용되어야 한다. NBIT 관련 신제품이 일부 부유한 사람들의 전유물이 되어서 기존의 빈부격차를 심화시킬 가능성에 대해 이를 방지하거나 억제할 수 있는 구체적이고 현실적인 대책이 수립되어야 한다. 예컨대 건강관련 나노소재의 초기 개발단계에서 저소득층도 그 혜택을 볼 수 있는 보조금 정책과 같은 것이 필요하다.

NBIT 융합기술 개발과 관련하여 다양한 차원에서 윤리적 논의가 중요하게 제기될 수 있다는 사실을 연구자나 관련활동 종사자들이 구체적으로 인식할 필요가 있다. 이와 관련하여, 연구자들 스스로가 자율적으로 규율할 수 있도록 연구자 윤리지침 등이 마련되어야 할 필요가 있을 것이다. 아울러 NBIT 관련 연구 종사자들에게 도덕적 책무감과 직업 윤리적 소양을 교육할 수 있는 강좌를 개설하고 커리큘럼을 적극적으로 개발해야 할 것이다.

또한, 나노 수준의 미세입자의 대량생산이 가져올 수 있는 환경오염이나 인류의 건강을 위협할 가능성에 대해 충분한 기초조사와 대응방안이 연구되어야 한다. 구체적으로 NBIT의 환경 및 인체 위해성 평가를 위한

R&D 확충 및 예산 쿼터제를 도입하는 것도 한 방법이다. NBIT의 사회적·윤리적 측면에 대한 기술영향평가는 보다 구체적인 수준에서 지속적으로 이루어져야 하며, 그 활동은 각 분야의 전문가들이 참여하여 통합적인 방식으로 의견을 교환하고 합의를 도출하는 형식이 되어야 한다. 이러한 기술영향평가의 한 방식으로 인간게놈프로젝트의 경우처럼, 전체 연구예산의 3-5%를 NBIT의 사회문화적 영향평가에 쓰도록 하는 ELSI(Ethical, Legal and Social Implication) 프로젝트를 제도화하는 것도 생각해 볼 수 있다.

나노 관련 기술이 군사적인 목적으로 사용되는 것에 대해 적절한 통제와 제한을 가능하게 해 줄 수 있는 법적, 제도적 장치가 마련되어야 한다. 특별히, 그것이 가져올 수 있는 전략적 효과 이외에도 민간인들에 대한 오용의 가능성, 그리고 오염물질의 무분별한 확산가능성에 대한 본격적인 연구가 포함되어야 한다. 또한, 자기복제 나노물질의 허용 여부를 포함하여 어떠한 연구를 허용하고 어떠한 연구를 허용하지 않을 것인가에 대한 사회적 논의를 바탕으로 법률적 규율을 위한 입법이 이루어져야 할 것이다. 아울러 특허의 문제 및 의료행위와 관련된 문제에 대한 보다 심도 있는 논의를 통해 입법이 이루어져야 한다.

마지막으로 시민참여의 활성화와 투명한 위험 커뮤니케이션의 확보가 필요하다. NBIT의 불확실성과 예측불가능성으로 인한 문제점을 최소화시키기 위한 가장 바람직한 방안은 기술개발의 초기 단계부터 시민들의 인식, 관점을 포괄하기 위해 활발한 대중토론을 장려하는 것이다. 또한 NBIT의 잠재적 위험을 평가하고 공론화시키는 위험 커뮤니케이션(risk communication)의 전 과정 역시 투명하게 공개되어야 한다.

(3) 교육적 측면의 정책제언

NBIT는 과학기술, 정치경제, 법률 및 행정, 윤리 등 우리 사회의 다양한 분야에 직접적이고도 광범위한 영향을 미칠 것이 예상되며, 이에 따른 즉각적이고 적극적인 사회적 대응을 필요로 한다. 하지만, NBIT가 갖는

고도의 전문성과 응용성에 의해, 그것이 교육의 제 측면에 미치는 영향은 상대적으로 간접적이라고 생각할 수 있다. 이는 우리 사회에서 교육 문제가 대부분 초·중·고 수준에 초점을 맞추고 있으며, 대개의 경우 교육에 대한 사회적 관심과 쟁점 또한 이 수준에 집중되어 있기 때문이다.

초중고 학교 교육을 뛰어넘는 확장된 개념으로서의 교육의 기능을 받아들인다면, NBIT가 갖는 사회문화적 영향과 그 대처 방안의 모색은 자연스럽게 교육의 문제와 연결되며 따라서 이에 대한 다양한 방안들이 강구될 수 있을 것이다. 이에 여기에서는 현대 사회의 기반을 급속히 변화시키고 있는 NBIT의 효율적 발전을 위한 기반 구축과 이로부터 파생하는 문제점들에 대처하기 다음과 같은 사항을 검토하는 것이 바람직하다.

- 학교급별 특성에 맞는 과학교육 목표의 구체화
 - 고등학교 저학년까지의 학교 과학교육의 목표는 “과학적 소양(scientific literacy)”에 집중
 - 고등학교 고학년의 경우, 진로에 따라 보다 특성화된 과학교육의 목표 설정
 - 대학 이상의 수준에서는 학제적·통합적 과학기술교육 장려
- 다양한 통합 과학기술을 반영하는 교육체제 구축
 - 범부처간 조정기구를 마련하여 과학이 핵심교과로 포함되는 교육과정 마련
 - 복합과학기술 분야의 교육을 지향하는 통합교과목 개발
 - 다양한 “연계전공”의 개발(학부제 교육, 다전공 복합분야 개발 등)
- 직업 및 직업윤리 교육의 강화
 - 일반교육과 직업교육의 연계 강화(영국 등 유럽의 종합학교 체제)
 - 초중고 과학기술 교과 내용에 진로지도 내용 강화
 - 대학 및 대학원 교육에서의 직업윤리 교육 강화
- 학교 밖 과학교육 및 시민과학교육의 강화

- 전문연구기관, 프로그램의 개발, 전문인력의 양성 등에 대한 지원
- 과학문화, 과학커뮤니케이션 등 시민과학교육을 위한 프로그램 개발 및 전문가 양성
- STS교육을 위한 교수-학습 자료의 개발과 보급
- 특성화된 과학영재 교육의 확대 및 내실화
 - 미국의 AP(Advanced Placement)⁵⁵⁾코스, 영국의 GCSE A-level 등과 같은 상급학교와의 연계 체제 구축
 - 과학고 등에서 NBIT와 같은 특성화된 다양한 복합과학기술 교과목 개발 운영

3. 기술영향평가의 제도화

그 동안의 기술영향평가에 대한 여러 이론과 국내외의 사례(NEIS, 새만금)에서 밝혀진 것처럼 기술기획 및 기술개발과정과 기술영향평가는 밀접히 연계되어야 한다. 기술개발 초창기에 리스크를 고려한 새로운 대안을 충분히 고민하지 않았을 때에는 차후 리스크 발생 가능성이 높아져 커다란 사회적 갈등이 발생하거나 막대한 예산과 노력이 투자된 프로젝트가 중단되어 커다란 사회적 비용이 발생할 수 있기 때문이다.

동시에 기술영향평가는 단순히 규제만을 위한 제도가 아니라 사용자와 소비자들이 개발될 제품과 기술에 대해 느끼는 것을 예측하고 추정하는 정보를 창출하는 과정이라고도 할 수 있다. 따라서 기술영향평가와 기술기획 및 개발이 밀접하게 연계되면 이 정보들을 효과적으로 활용하여 소비자의 수용성이 높고 안전한 기술을 개발할 수 있다.

한편 기술기획 및 개발과 기술영향평가가 연계되기 위해서는 기술영향

55) AP 코스는 대학의 기초 과정을 고교에서 미리 이수하는 제도이다.

평가가 그것을 담당하는 특정 전문기관만이 수행하는 활동을 넘어 혁신주체들이 일상적으로 기술기획과 연구개발활동을 수행하는 과정에서 이루어지는 활동으로 자리를 잡는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 보았을 때, 기술기획에 필요한 정보를 조사·분석하는 과정, 종합발전계획 작성과정, 기술지도 작성과정, 협의회 운영 및 국가과학기술위원회의 의사결정과정에서 기술영향평가의 관점과 요소들이 반영되고 운영되는 것이 필요하다. 이를 위해서는 다음과 같은 사항에 대한 고려가 필요하다.

첫째, 우선 과학기술기본법에 명시된 조항을 구체적으로 기술평가프로그램화 할 수 있는 기본계획의 수립이 필요하다. 이에 대한 필요성은 본 연구를 수행하는 과정에서 필요한 자료, 자원, 전문가 풀 구성조차 갖추어져 있지 않기 때문에 더욱 절실하다. 적어도 지속적인 기술영향평가가 계속되어야 하며, 더욱 발전하기 위해서는 '기술영향평가추진을 위한 5개년 계획' 등과 같은 기본계획의 수립이 필요하다

둘째, 정책(Policy), 사업(Program), 기술과제(Project)별 기술영향평가가 이루어져야 한다. 모든 정책·사업·기술과제에 대한 영향평가를 동시에 실시하는 것은 물론 불가능하다. 그러나 정책평가를 위한 방법론 개발, 사업평가를 위한 방법론 개발과 시범 평가, 주요 기술과제에 대한 영향평가 등은 당장이라도 실현 가능하다. 이 경우 정책적 중요성, 예산의 가용성, 과학기술적·사회문화적 측면의 시의성을 전략적 선택의 근거로 삼는 것이 바람직하다.

셋째, 기술영향평가는 다양한 분야에 걸쳐 나타나는 영향을 평가하는 것이지만 평가의 편의를 위하여 분야별로 나누어 수행할 수밖에 없다. 따라서 분야별 네트워킹 및 학습과정이 각 분야의 전문가에게 환원되는 제도적 장치가 필요하다. 이를 위해 전문가 집단을 사회 각 분야로 다양화

하고, 이러한 전문가회의를 정례화하는 노력이 필요하다.

넷째, 기술영향평가를 위해서는 기존의 사회·경제·문화적 집단 및 노력에 대해 개방적이어야 한다. 예를 들어, 과학기술부 프론티어사업의 일부로 수행 중인 ELSI(인간유전체연구의 윤리·법·사회적 함의)와의 연계 내지는 교류가 필수적이며, 현재 활동 중인 환경관련 단체, 경실련 등 시민단체의 참여도 필수적이다.

VI. 결 론

NBIT 융합기술은 BT와 NT, IT의 산업적 기반과 거대한 시장성을 바탕으로 상호융합화를 통해 새로운 기술로의 도약을 기약한다는 점에서 그 성장가능성이 무한한 것으로 여겨지고 있다. NBIT 융합기술은 이러한 경제적 혜택뿐만 아니라 에너지와 환경문제의 근본적 해결, 각종 질병의 진단 및 치료를 통한 건강한 삶의 구현과 같이 개인과 사회, 환경적 측면에서 상상에만 머물던 가능성을 현실화할 수 있다. NBIT 융합기술은 이제 출발단계에 있지만, 앞으로 인류에 미칠 파급효과가 막대하다. 그럼에도 불구하고 우리는 그 잠재적인 역기능에 대한 주의도 필요하다. NBIT 융합기술의 혜택이 불균등성을 가지거나 ‘부의 불균형’을 심화시키는 계기가 되지 않도록 해야 할 것이다. 또한 초소형 장치의 출현에 따른 사생활 침해 문제도 심도 있게 다루어야 한다. 초미세물질의 등장에 따른 환경오염의 가능성 역시 NBIT 융합기술의 잠재적 역기능으로 중요하게 다루어져야 한다.

결론적으로 NBIT 융합기술이 미칠 수 있는 사회·문화적인 영향 및 미래에 발생할 수 있는 다양한 가능성을 고려하고 이를 토대로 거시적인 연구계획을 세우고 연구지원을 할 필요가 있다. 이런 점에서 NBIT 융합기술의 역기능을 예측하고 방지 또는 최소화하기 위한 연구에 정부차원의 적극적인 투자가 요망된다. 또한 NBIT 융합기술에 대한 극단적인 낙관주의와 비관주의를 극복하고 사회적인 합의를 통해 신기술이 긍정적인 방향으로 발전할 수 있는 제도적 장치를 만드는 것이 필요하다. 이를 위해서는 NBIT 융합기술이 초래할 수 있는 잠재적인 위험에 대해 앞으로도 지속적으로 사회적인 공론화를 유도하고 대안을 마련할 필요가 있다.

참고문헌

1. 국내문헌

- 과학기술부 외(2003), “2003년도 나노기술발전시행계획”
- 과학기술정책연구원(2003), 「과학기술중심사회 구축방안 대토론회 자료집」, 과학기술부
- 고은지(2002), 「바이오인포매틱스」, LG경제연구원
- 국양 외(2001), 「국가나노기술개발계획」, 한국 과학기술평가원
- 기초기술연구회(2003), 「생명공학 TRM 및 전략 분야 기획 연구 - 제6권 나노바이오기술 분야 기획」
- 김기범(2002), “작게 만드는 기술” : 이인식(엮음), 나노기술이 미래를 바꾼다, 김영사, pp.143-144
- 노화준(1995), 정책평가론, 법문사
- 보건복지부/한국보건산업진흥원(2003), 「나노보건기술개발사업을 위한 사전 기획연구 II」
- 산업자원부(2000), 「One-Chip 초소형 자동화 Protein Chip System 개발과제 산업분석」
- 유네스코 한국위원회 편(2001), 『과학연구윤리』, 당대.
- 유네스코 한국위원회 편(2001), 『과학기술과 인권』, 당대.
- 이종일(1997), 「다지선택모형(Multiple Choice Model)을 이용한 기술개발지원체도의 효과분석」, 한국산업기술정책연구소
- 일본 미쯔비시, 「21세기 기술과 산업」
- 정규원(2001), “인간배아복제의 법적 문제,” 의료법학 제2권 제2호, pp.76-97
- 정규원(2002), “생명윤리및안전에관한법률안”에 대한 검토,” 법과 사회 제22호, pp. 281-295
- 정규원(2002), “인간 유전체 기능 연구의 법적 문제,” 생명윤리 제3권 제1호, pp. 23-46
- 정규원(2003), “생명과학기술의 법적 문제,” ELSI연구 제1권 제1호, pp.85-109
- 전자통신연구원(2002), 전세계 Bioinformatics 시장동향, 35대 품목시장동향보고서.
- 제레미 스미스, 톰 웨이크포드(2003), “누가 통제하는가 - 새로운 기술의 개발에 있어 대중이 중요한 역할을 수행해야 한다”, 번역 이명재, 시민과학 Vol.6 N0.7(7/8월호), 참여연대 시민과학센터

- 참여연대시민과학센터 엮음(2002), 『과학기술, 환경, 시민참여』, 한울아카데미.
- 한국개발연구원(1997), 「장기경제사회발전」
- 한국개발연구원(1985), 「2000년을 향한 국가장기발전구상-총괄편」
- 한국보건산업진흥원(2002), 『나노보건기술개발사업을 위한 사전 기획연구: 제 II권 중점과제별 기술동향분석보고서』, 보건복지부.
- 한국생명공학연구원(2003), 「생명공학 TRM 및 전략 분야 기획 연구: 제6 권 나노바이오기술 분야 기획」, 기초기술연구회
- 현병환(1999), 「특허의 경제적 가치평가 방법」, 한국기술혁신학회 콜로퀴엄
- 현병환(1999), 「기술거래 평가제도의 현황」, 생명공학연구소
- 현병환(1999), 「생명공학 연구 경제성 분석 방법과 연구사례」, 생명공학연구소
- 홍성욱(2002), 「20세기 과학연구의 지형도: 미국의 대학과 기업을 중심으로」, 『한국과학사학회지』 제24권 2호, pp. 200-37.
- 홍성욱, 이두갑, 신동민, 이은경(2003), 『선진국 대학연구체계의 발전과 현황에 대한 연구』, 과학기술정책연구원.

2. 국외문헌

- Amall, Alexander Huw(2003), Future Technologies, Today's Choice: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies, the Greenpeace Environment Trust.
- Anton, R. Silbergliitt, J. Schneider(2001), 「The Global Technology Revolution: Bio/Nano/Materials Trends and Their Synergies with Information Technology by 2015」, RAND
- C Sunstein(1990), "Paradoxes of the Regulatory State," 75 U. Chi. L. Rev.
- Colvin, V.(2002): Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News. EurekaAlert!; Nanotechnology In Context: Nov 2002 (<http://www.eurekaalert.org/context.php?context=nano&show=essays&essaydate=1102>)
- Drexler, Eric(1992), Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, New York: John Wiley & Sons.

- Drexler, Eric/Peterson, Chris/Pergamit, Gayle(1991), *Unbounding the Future : The Nanotechnology Revolution*, Harpercollins
- Economic & Social Research Council(ESRC), "The Social and Economic Challenges of Nanotechnology", (2003)
- ETC Group (2002): *No small Matter! Nanotech Particles Penetrate Living Cells and Accumulate in Animal Organs*. ETC Group Communiqué; (76) May/June 2002 [online].
http://www.etcgroup.org/documents/comm_NanoMat_July02.pdf
- ETC Group(2003), *The Big Down: from genomes to atoms*, the ETC group.
- Fiedler, A. Fredrick/Reynolds, H. Glenn(1994), "Legal problems of nanotechnology : An overview," *Southern California Interdisciplinary Law Journal*
- Ford, D.(1988), "Develop Your Technology Strategy," *Long Range Planning*, Vol.21, No.5.
- Fraumeni, Barbara & Okubo, Sumiye(2002), 「R&D in The National Income and Product Accounts: A First Look at Its Effect on GDP」, Conference on Research in Income and Wealth, Washington, DC
- Freitas, R. A.(2000): *Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations*. Foresight Institute
- Greenpeace(2003): *Future Technologies, Today's Choices - Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies - A report for the Greenpeace Environmental Trust by Alexander H. Arnall*, ISBN 1-903907-05-5.
- Hall, H. Bronwyn(2003), 「Adoption of New Technology」, NBER working paper, 9730
- Hewlett, G. Richard(1981), "‘Born Classified’ in the AEC: A Historian’s View," *Bull. At. Sci.*
- Ho, Wilson(1999), "Inducing and Viewing Bond Selected Chemistry with Tunneling Electrons," *Acc. Chem. Res.* 31Holister, Paul(2002), 「Nanotech: the tiny revolution」, CMP Cientifica

- House of Lords Select Committee(2000), "Science and Technology 3rd Report"(London; HMSO)
- Hyder, M. A. H.(2003), Nanotechnology and Environment - Potential Applications and Environmental Implications of Nanotechnology, Master thesis, Technical University of Hamburg-Harburg, Germany.
- Joy, Bill(2000), "Why the Future Dose n't Need Us," Wired, April 2000.
- Joy Frechtling, Westat(2002), 「The 2002 User-Friendly Handbook for Project Evaluation」, NSF
- Lee, Jinjoo, Zong-tae, Bae, & Dong-kyu Choi(1988), "Technology Development Processes: A Model for a developing country with a global perspective," R&D Management, Vol. 18, No.3
- National Science Foundation(NSF)(2001), Societal Implication of Nanoscience and Nanotechnology
New York(1998), 「Theta Report」, NY
- Kurzweil, Ray(1999), The Age of Spiritual Machines : When Computers Exceed Human Intelligence, Penguin USA
- Parr, Douglas(2003), "Small Stuff, Big Questions", Newscientist, Vol.179, No.2405
- Rainsbury, Joseph(2000), "Biotechnology on the RAC-FDA/NIH Regulation of Human Gene Therapy," 55 Food & Drug L. J.
- Resnik, D.(1998), The Ethics of Science: An Introduction, London: Routledge.
- Reynolds, H. Glenn(2002), Forward to the Future : Nanotechnology and Regulatory Policy, Pacific Research Institute
- Sitti, Mettin /Hashimoto, Hideki(2000), "Controlled Pushing of Nanoparticles: Modeling and Experiments," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
- Smith, H. Richard(2001), "Social, Ethical, and legal Implications of Nanotechnology," in: National Science Foundation, Societal Implications of Manoscience and Nanotechnology
- Stix, Gary(2002), "Little Big Idea," in: Scientific American, Understanding

- Nanotechnology, Warner Books,
- Timp, Gregory(ed.)(1999), Nanotechnology, New York: Springer-Verlag.
- USB Warburgs Accelerating Biopharma R&D report, 2000, 8
- V. W. Ruttan(2000), 「The Role of The Public Sector in Technology Development: Generalized from General Purpose Technologies」, Harvard Univ. Center for International Development.
- Weiner, Charles(1999), "Is Self-Regulation Enough Today?: Evaluating the Recombinant DNA Controversy," 9 Health Matrix: Journal of law-Medicine

<부록> 기술영향평가위원회 명단

○ 기술영향평가위원회

구분	성명	소속	직위
위원장	이장무	서울대	교수
위원	박은정	서울대	교수
	송상용	한양대	석좌교수
	염재호	고려대	교수
	이덕승	녹색소비자연대	사무총장
	이 번	ETRI 반도체원천기술(연)	소장
	이찬휘	SBS	한국과학기자협회 회장
	이희연	LG전자기술원 정보기술연구소	소장
	최지용	환경정책·평가연구원	정책연구부장
	한문희	생명벤처협회	명예회장
산업경제분과 위원장	이종일	산업기술재단	경영기획본부장
사회문화분과 위원장	이영희	가톨릭대학교	교수
과학기술분과 위원장	서 활	연세대	교수
간사	이상엽	과학기술기획평가원	기술기획전략실장

○ 과학기술 전문분과

성명	소속	직위	전공	비고
서활	연세대학교	교수	의료용생체재료학	위원장
김태송	한국과학기술연구원	미래기술연구본부장	재료공학	
김진곤	포항공대	교수	나노구조제어 고분자재료	
정봉현	생명공학연구원	생물공정연구실 실장	생명공학	
박순섭	전자부품 연구원	센터장	재료공학	간사
김상수	생명공학연구원	센터장	물리화학	
김종대	ETRI	부장	전자공학	
정연규	연세대	교수	환경공학	
이순일	아주대	교수	고체물리학	
조경목	KISTEP	소재화학 전문위원	재료공학	

○ 산업경제 전문분과

성명	소속	직위	전공	비고
이종일	산업기술재단	경영기획본부장	기술경영	위원장
임채성	그리스도 신학대	교수	기술경영	
현병환	생명공학연구원	연구위원	기술경제	
장진규	STEPI	연구위원	기술경제	
이명운	인하대	교수	응용경제	
정은미	산업연구원	연구위원	기술경제	간사
박영서	한국과학기술정보연구원	실장	응용화학	
장준근	서울대	교수	의공학	
김윤태	ETRI	부장	전자공학	

○ 사회문화 전문분과

성명	소속	직위	전공	비고
이영희	가톨릭대학교	교수	기술사회학	위원장
이상욱	한양대	교수	과학철학	
김동광	과학세대	대표	기술사회학	
송진웅	서울대	교수	과학교육	
송위진	STEPI	연구위원	기술정책	간사
김부균	숭실대	교수	광통신	
김철민	부산과학대	조교수	분자유전학 및 생물정보학	
정규원	한양대학교	교수	법학	
신용현	표준과학연구원	진공기술센터장	물리	
유의선	시민환경연구소	연구위원	환경공학	