

복합적 기술위험에 대한 정책대응: 나노기술을 중심으로

성지은(과학기술정책연구원) · 정병걸(동양대)

1. 서론

그동안 우리나라는 추격 국가로써 선진국의 기술뿐만 아니라 위험관리에 대한 지식마저도 모방·학습해 왔다. 이에 따라 외형적인 면에서 볼 때 선진국에서 활용되고 있는 다양한 기술위험관리와 관련된 제도와 정책, 정책 수단들을 상당부분 갖추고 있다. 기술위험에 대한 기술영향평가에서부터 기술위험의 통제와 완화를 위한 다양한 정책 수단들이 도입·활용되고 있다.

그러나 최근 우리나라 기술위험 관리의 중요성이 제기되고 있다. 과거에는 존재하지 않았던 새로운 기술 위험이 생겨나고 있으며, 특정 기술부문에서는 '세계 최초'라는 타이틀을 두고 전세계와 치열한 경쟁을 치러야 하는 상황이 전개되고 있다. 기존의 법적, 제도적 틀 속에서 해결할 수 없는 새로운 문제가 끊임없이 제기되고 있으며, 외국의 유사한 사례를 모방, 학습하던 것에서 벗어나 새롭게 제도를 탐색하고 설계해 나가야 할 상황이라고 할 수 있다.

본 연구는 한국형 기술위험관리 거버넌스 설계와 관리를 위해 선진국의 경험과 우리나라의 관리 현황을 살펴보고자 한다. 특히 본 연구는 복합적 기술위험에 대한 관리 및 정책 대응에 초점을 두고 있으며, 사례 연구로 나노기술을 분석한다. 나노는 대표적인 GRIAN 기술로, 지식과 사실들은 불확실하고, 가치는 논쟁 중에 있으며, 이해관계는 복잡하고, 결정은 긴급하다. 전문가가 가장 잘 안다고 가정할 수 없으며, 과학만으로 해결될 범위를 넘어서는 그런 문제인 것이다(라베츠, 2007).

본 연구는 나노 기술을 중심으로 선진국의 기술위험 관리 방식은 어떻게 나타나고 있으며, 그 과정에서 주로 나타나고 있는 주요 위험 관리 수단을 살펴본다. 나노기술은 그 위험의 확률과 영향의 크기가 거의 알려져 있지 않을 뿐만 아니라 기술위험의 성격과 대응방식에 대한 사회적 합의가 거의 이루어져 있지 않다. 나노기술 위험은 지식의

부족과 합의의 부족이라는 문제가 복합적으로 결합된 유형으로 이 유형 하에서 이루어진 기술 위험 관리 및 대응 방식을 도출하는데 핵심적인 사례가 될 수 있다. 또 외국의 경험에 비추어 우리의 기술위험관리의 문제점을 파악하기 위해 선진국 사례 분석과 함께 우리나라 나노기술 위험 관리에 대해서도 살펴본다. 이에 기반하여 현재 우리나라 상황에 맞는 기술위험관리에 관한 정책 대안과 조건들을 제시하고자 한다.

2. 기술위험 관리와 기술위험 유형별 사례 및 대응전략

2.1. 다면적 과정으로서 기술위험관리

위험관리는 다양한 측면으로 구성된 다면적 과정(multifaceted process)으로 지속적으로 이루어지는 감시 과정(oversight process)이다. 위험관리의 범위는 위험 예측에서부터 예방까지 포괄하는 것으로 위험관리 과정에는 위험 인지 혹은 식별(risk identification), 위험의 평가(assessment), 통제와 완화(control and mitigation), 위험정보 전달(risk communication) 등이 포함된다. 따라서 위험관리는 개선이 지속적으로 이루어지는 반복적(iterative) 과정(As/Nzs, 1999)으로 위험을 완전히 없애는 것이라기보다는 최소화(minimizing)하는 것이다(Scalliet, 2006: 275). 위험과 관련된 지식을 확보하는 위험 평가(assessment)와 의사결정과 집행에 해당하는 위험관리를 구분하는 경우도 있지만(예: Renn, 2005: 13) 일반적으로는 위험 인지 혹은 식별(identification), 위험 평가와 통제·완화를 포함하는 위험 대응을 포함하는 과정으로 볼 수 있다¹⁾. 위험 인지, 평가, 통제와 완화의 단계를 거쳐 위험관리가 이루어지는 전 과정에 걸쳐 관련자들 간에 이루어지는 정보와 대안을 상호 교환하는 위험 커뮤니케이션이 이루어진다. 특히 최근에는 위험으로 인한 갈등과 피해를 줄인다는 차원에서 위험과 관련된 이해 관계자들간의 위험에 대한 정보와 의견을 교환하는 위험커뮤니케이션(risk communication)의 중요성이 부각되고 있다(박희제, 2004).

1) 위험관리의 과정은 다양한 단계로 구분된다. 예를 들면 IRGC의 경우 위험의 사전적 사정- 위험 평정(risk appraisal)-수용성 판단-위험 관리의 순환적 과정으로 구분하기도 한다. 그러나 본질적으로 이러한 구분이 식별-평가-대응의 단계구분과 차이가 있는 것은 아니며 일부 단계를 세분화 하는 등의 차이가 있을 뿐이다.

<그림 1> 위험 관리의 과정



2.2 기술 위험의 유형과 유형별 대응 전략

Douglas와 Wildavsky(1982)는 지식의 불확실성과 합의 가능성을 두 축으로 기술위험의 유형을 구분하고 있다. 기술위험의 유형에 따라 해결방법과 곤란성의 정도는 달라진다. 지식의 불확실성이 낮고 합의 가능성이 높은 경우 기술위험의 해결은 상대적으로 쉽게 이루어질 수 있다. 낮은 불확실성으로 인해 단순한 계산을 통해 쉽게 해결할 수 있기 때문이다. 그러나 극단적으로 반대의 상황 즉, 지식축적의 부족으로 인한 지식의 불확실성이 높고, 합의의 가능성도 낮은 경우 기술위험의 해결은 매우 어려운 문제가 된다. 지식과 합의 가능성에 있어서의 높은 불확실성으로 인해 문제 해결을 위한 대안의 발견이나 해결책의 선택이 매우 곤란해지기 때문이다. 각 유형별로 특징과 기술위험 전략을 살펴보면, 다음과 같다.

첫째, 기술 자체의 위험이 이미 알려진 기술 위험 유형이다. 성숙기의 기술이거나 선진국의 앞선 경험을 통해 위험 지식의 불확실성은 낮으며 추격 단계를 거치면서 국가경쟁력이나 경제 성장을 위해 필수불가결한 기술로 받아들여진 기술이다. 그러나 이 경우에도 그 사회의 고유한 제도적 맥락과 상황에 따라 사회적으로 위험이 새롭게 구성되거나 우리나라처럼 사회가 민주화되고 시민사회가 성숙되면서 기술의 인식 차원에서 갈등을 가져올 수도 있다. 이 유형하에서는 위험평가(risk assessment), 비용편익분석(cost-benefit analysis) 등 정확한 위험 평가와 분석이 주요한 대응전략이 된다.

둘째, 지식의 불확실성이 높은 기술 위험 유형이다. 기술 위험이 새롭게 등장하여 그 원인뿐만 아니라 작용기제 및 해결책에 대해 명확하게 알 수 없는 유형이다. 광우병, 환경 호르몬 등이 그 예에 속한다. 위험에 대한 문제 정의는 합의가 가능하지만 위험에 대한 지식이 불충분하다. 가장 중요한 위험 관리 전략은 예방이며, 사건의 확률과 피해의 범위를 밝히는 조사 및 연구, 즉 지식 축적이 위험 관리의 한 축이 된다. 위험에 대해 합의가 있기 때문에 국내외 공조체제가 쉽게 이루어질 수 있다.

셋째, 사회적 합의가 곤란한 기술 위험 유형이다. 대표적 사례로 IT융합기술, 비접

촉무선인식기술(RFID), 유비쿼터스컴퓨팅기술(UCT II) 등 IT 기술을 들 수 있다. 사생활 침해, 보안 문제 등 기술의 활용 단계에서 기술 위험과 부작용이 나타나면서 어디까지 기술을 개발하고 활용할 것인가에 대해 민감하게 반응하는 등 기술저항과 갈등을 유발하게 된다. 이 경우에는 담론 형성, 합의 절차 강조 등 갈등을 관리하고 사회적 합의를 이끌어낼 수 있는 전략이 더욱 중요해진다.

넷째, 위험 지식의 불확실성이 높고 사회적 합의가 어려운 복잡한 기술 위험 유형이다. GRAIN(유전체학, 로봇공학, 인공지능, 나노기술의 약자) 기술이 여기에 속한다. 현재 논란이 되고 있는 줄기세포와 복제, 광우병(BSE), 유전자조작식품(GMO) 등의 기술이 이러한 유형으로 볼 수 있다. 일부 GRAIN 기술은 매우 복잡하고 오류가 발생하기 쉬우며, 아직 초기 기술에 머물러 있다(라베츠, 2007). 따라서 기술의 불확실성이 높고, 기술의 편익 가능성이나 위험에 대한 합의 또한 매우 어려운 경우이다. 불가피하게 기술의 불확실성과 위험을 둘러싸고 다양한 정치적 반대에 부딪히게 되는데, 신기술 확보와 시장 개척뿐만 아니라 기술 위험에 대한 관리도 중요한 과제가 된다. 이에 따라 기술적 대응책과 법·제도 설계가 함께 이루어지며, 다양한 사전적 예방 대책과 사후적 대응전략이 상호보완적으로 탐색해 나가게 된다. 이런 상황에서는 전문가뿐만 아니라 일반 시민 모두가 중요한 정책 행위자가 되며, 오차수정을 허용하고 절차적 정당성을 강조하는 등 민주주의적 기제를 따르게 된다.

<그림 2> 기술 유형별 사례와 주요 해결책

지식의 불확실성

		낮음	높음
갈등 가능성	낮음	대표적인 사례: 다리 붕괴, 댐 건설, 핵 폐기장 건설 문제 성격: 기술적 문제 해결책: BC 분석 등 계산 I	대표적인 사례: BSE, 환경호르몬 문제 성격: 지식 부족 해결책: 조사연구를 통한 지식축적 II
	높음	대표적인 사례: RFID, 휴대폰 전자파 문제 성격: 합의 곤란(갈등) 해결책: 이해갈등조정 및 사회적 합의 III	대표적인 사례: GMO, 나노 기술 문제 성격: 지식부족+합의곤란 해결책: 조사연구, 이해갈등조정 및 사회적 합의 IV

3. 나노의 개념과 기술유형

3.1. 나노기술과 기술위험의 성격

나노(Nano)는 희랍어로 난쟁이를 뜻하는 '나노스'에서 유래한 말로 10억분의 1을 의미하는 접두어이다. 따라서 1나노미터(nm)는 10억분의 1미터이다. 나노기술이란 물질을 구성하는 직경 1nm 이하의 원자나 분자를 나노 영역에서 조작해 실생활에 유용한 것으로 만드는 기술을 통칭한다. 이에 따라 기존의 마이크론 이상의 크기 수준에서 알고 있는 것과는 다른 이론과 모델이 적용되며, 기존에 보지 못했던 독특한 특성과 거동이 나타날 수 있다고 한다. 그러므로 나노기술을 이용할 경우 기능을 대폭 향상시키거나 새로운 기능을 갖는 소재를 개발할 수도 있게 된다(조선일보, 2006/12/22; 이영희, 2004; 송해룡 외, 2007).

1974년 동경대의 노리오 타구니치 교수가 나노기술이라는 개념을 처음으로 사용하였으며, 실제로 물리학이나 화학분야에서 나노 기술에 관한 연구가 본격적으로 진행되기 시작한 것은 1980년대에 들어오면서부터이다. 1981년에는 원자나 분자를 눈으로 볼 수 있을 뿐만 아니라 조작도 가능한 도구로서 주사터널링현미경(STM)이 발명되었는데, 이 STM으로 인해 비로소 나노기술의 시대가 열리게 되었다고 평가된다(이인식, 2002; 이영희, 2004).

최근 나노기술에 대한 유해성 문제가 국제적으로 부각되고 있다. 나노기술은 지식의 불확실성이 높고 기술에 대한 합의 가능성은 낮아 지식과 합의의 문제가 동시에 나타나는 분야로써, 문제의 성격이 복잡하며, 위험의 원인 또한 복잡성을 띤다. 즉, 사건 가능성, 피해의 범위 등 주요 위험 산정 기준에 대해 상대적으로 높은 불확실성의 특징을 보이며 이에 따라 기술의 사회적, 윤리적, 법적 갈등이 발생할 가능성이 높다. 여기에 더하여 나노기술의 응용범위가 넓어짐으로써 기술의 성격도 더욱 복잡해지고 있다. 기술의 복잡성이 증가할 경우 불확실성은 높아지며 이로 인해 기술 위험에 대한 과학적 평가나 적절한 위험 수준을 결정하는 것은 더욱 곤란해진다. 이처럼 나노기술의 위험에 대해서 정확히 알려진 바 없기 때문에, 나노기술이 갖고 있는 불확실성은 매우 높다.

3.2. 나노기술 위험을 둘러싼 주요 쟁점

나노기술에 대한 평가와 응용에 대한 의견은 다양하다. 나노기술의 산업적 차원이 강조되는 반면, 동시에 이 기술이 동반할 위험에 대한 논의 역시 엄청난 관심을 불러 일으키고 있다(송해룡 외, 2007: 188). 나노기술을 둘러싼 주요 쟁점은 크게 환경관련 쟁점, 인체관련 쟁점, 사회관련 쟁점으로 나누어 살펴볼 수 있다(이영희, 2004: 70-77).

1) 환경쟁점

환경 관련 쟁점에서 나노기술이 자연환경에 어떠한 영향을 미치게 될 것인가에 대해서 현재 긍정적인 영향을 강조하는 쪽과 부정적인 영향을 우려하는 쪽이 팽팽하게 맞서고 있다. 우선 긍정적인 영향을 강조하는 입장에서는 나노 수준의 물질 제조는 자원효율을 증가시키고, 폐기물과 오염물질의 배출을 줄여줌으로써 환경적 편익을 증대시킨다고 주장한다. 나노기술과 환경과의 결합은 기존의 문제를 해결하는 '하중경감의 효과', 즉 소재의 절감, 환경에 부정적인 부산물의 축소, 에너지 전환 효율의 개선 그리고 에너지 소비의 절약 효과가 있다는 것이다(송해룡 외, 2007).

반면, 부정적인 영향을 강조하는 입장에서는 나노기술과 같이 검증되지 않은 새로운 기술의 탄생은 환경 위해성을 잠재적으로 내포하며, 인간의 오감으로 식별할 수 없는 초미세 인공물질 등의 출현으로 인해 통제 불능의 상황이 발생할 수도 있다고 본다. 즉, 나노 입자, 나노 물질, 혹은 나노소자 등의 나노기술은 잔류성 유기 오염물질(POPs)처럼 생물학적으로 분해되지 않거나 분해되기 어려운 새로운 오염물질이 될 수 있다는 것이다²⁾. 이 논쟁의 중심에는 통제되지 않은 나노입자의 방출과 유출이 가져올 문제점이 자리잡고 있다(이영희, 2004; 송해룡 외, 2007).

2) 인체관련 쟁점

인체관련 쟁점은 나노기술의 영향을 평가함에 있어 가장 쟁점이 되는 부분으로, 나노기술이 인간의 몸에 어떠한 영향을 끼치게 될 것인가에 초점을 두고 있다. 나노기술이 인체에 긍정적인 영향을 미치게 될 것이라고 관련된 과학자들은 전망하고 있으며, 특히 나노 로봇의 의료적 이용에 큰 기대를 걸고 있다. 즉 나노기술의 발전은 의약분야에서 새로운 치료와 진단방식을 가능토록 하고, 이것의 활용이 경제적 유용성, 의학

2) 나노기술의 환경 위해성에 대한 가장 극단적인 전망은 에릭 드레슬러(Eric Drexler)가 제시한 "회생점액질" 시나리오이다. 이는 1980년대 중반에 이미 스스로 자기 복제를 거듭하는 나노봇(nanobot)이 인간의 통제를 벗어나 마치 꽃가루처럼 바람을 타고 이동하면서 주위 환경에 있는 것들을 모조리 먹어치워 생태계를 불과 며칠 만에 회색 먼지내지 회색 점액질로 바꿔버릴 지도 모른다는 최악의 시나리오이다(김명진, 2004).

적 유용성을 가져온다는 것이다(송해룡 외, 2007).

반면, 인체에 대한 나노기술의 부정적 영향에 대해서는 주로 환경 단체 또는 기관에서 많은 문제를 제기하고 있다. 이들은 주로 나노입자로 구성된 물질이 인체 내에 삽입되거나 이식 혹은 무의식중에 흡입되는 경우 나타날 수 있는 부작용들을 우려하고 있다. 예를 들어, 나노물질이 환경에 널리 퍼질 경우, 나노입자들이 살아있는 세포를 관통하여 동물기관에 축적될 수 있으므로, 유해한 성분들(농약이나 PCB 등)과 결합하여 인간에게 투과될 가능성이 있다고 보고 있다(The ETC Group, 2003).

이처럼 나노 기술의 경제적 잠재성과 유해성에 관한 연구 상황은 매우 제한된 연구 결과만이 존재하며, 여전히 신뢰도가 낮다. 동시에 큰 격차가 존재하고 부분적으로 모순되는 모습을 보인다. 나노물질이 인체 내에 삽입되거나 이식될 경우 어떤 일이 발생할 것인가에 대해서는 정확히 알려지지 않아 이처럼 나노기술이 갖고 있는 불확실성 문제는 나노기술에 대한 규제논란으로 이어지고 있다(이영희, 2004; 송해룡 외, 2007).

3). 사회 관련 쟁점

사회 관련 쟁점과 관련해서 나노불평등 문제, 인권문제, 군사적 이용의 문제 등이 주로 논의되고 있으며, 이러한 쟁점은 환경단체, 시민사회단체들에 의해 제기되어 왔다³⁾.

첫째, 나노기술로 인해 국가 간 또는 한 국가 안에서 불평등이 심화될 가능성이 있다는 것이다. 즉, 향후 국가의 기술 경쟁력과 직결될 나노기술개발능력이 뛰어난 선진국과 그렇지 못한 후진국 사이의 빈부격차가 지금보다 더욱 커지게 됨을 의미한다. 그리고 한 국가 내부에서의 나노불평등은 나노기술을 활용한 제품과 서비스를 구매할 능력이 있는 가진 자와 그렇지 못한 자 사이의 불평등을 의미한다. 예를 들어, 의료분야에서 나노기술을 이용한 새로운 치료법이 등장하였지만 그것에 대한 구매비용이 매우 높을 경우, 지불능력이 있는 자들은 이러한 신기술을 적극적으로 향유할 수 있다. 반면에 지불능력이 없는 자들은 여기에서 소외됨에 따라 이들 간의 격차는 더욱 커지게 된다. 생명공학의 경우에서처럼, 대기업에 의해 개발된 나노 관련 신기술과 신치료법 등이 특허나 지적 재산권 등에 의해 배타적으로 전유될 경우 이러한 나노불평등은 더욱 커질 수밖에 없을 것이다(The ETC Group, 2003; Arnall, 2003).

둘째, 나노기술이 시민적 권리, 즉 인권에 미치는 영향이다. 나노기술은 기본적으로

3) 유럽에서 유전자공학 기술의 위험 논쟁을 불러일으키는데 기여한 민간기구 ETC Group, 영국의 Demos Group, 그리고 그린피스가 나노기술의 잠재적 위험을 논하고 있다. 이들은 위험인지와 평가 문제를 제기하면서 새로운 차원의 논쟁을 이끌어내고 있다(송해룡 외, 2007).

작고 값싸고 오래 지속되는 센서와 같은 감지기구들이 등장할 수 있는 기술적 기반이 된다. 특히 나노기술과 정보기술이 융합됨에 따라 원거리 감지기구의 복잡한 네트워크가 컴퓨터와 연동될 수 있다. 이처럼 아주 작아진 감지기구들은 개인이나 집단에 대한 은밀한 감시도구로 활용됨으로써 개인의 프라이버시를 침해할 가능성이 제기되고 있다 (The ETC Group, 2003; The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004).

셋째, 나노기술의 군사적 이용문제에 대해서도 많은 우려가 제기되고 있다. 현재 나노기술개발을 선도하고 있는 미국은 국립과학재단 다음으로 국방성이 나노기술개발에 많은 예산을 투입하고 있다. 이는 나노기술개발이 군사적 목적과 매우 밀접하게 연관되어 있음을 의미하는 것이다. 나노기술의 군사적 이용 가능성은 국가 간 새로운 형태의 군비경쟁을 야기할 가능성이 높고, 나노기술개발에 관련된 과학기술자 공동체의 비밀주의를 만연케 할 것이라는 우려도 제기되고 있다(Arnall, 2003; The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004; 이영희, 2004).

나노기술을 둘러싸고 다양하게 제기되고 있는 쟁점을 긍정적인 입장과 부정적인 입장으로 나누어 종합하면 다음과 같다.

<표 1> 나노기술을 둘러싼 주요 쟁점 종합

쟁점	긍정적 입장	부정적 입장
환경 관련	·나노기술은 지구 환경문제 해결에 기여	·나노기술은 새로운 오염물질의 원천 ·희생 점액질의 문제
인체 관련	·나노 로봇에 의한 질병 정복 ·인간의 신체 능력 향상	·나노 물질의 독성 창출 가능성 존재
사회 관련	·국가경쟁력, 삶의 질 향상	·나노불평등 심화 ·프라이버시 침해 등 인권 유린 ·나노기술의 군사적 활용
기 타	·과학기술자들의 자율규제	·기술개발 일시중지(모라토리움), 또는 항구적인 폐기

자료: 이영희(2004)

4. 나노기술의 위험관리: 선진국의 경험과 우리나라 현황

4.1. 선진국의 나노기술위험 관리

1) 위험성 연구: 위험 인지와 평가를 위한 지식축적

잘 알려지지 않은 기술위험의 완화와 통제를 위한 대응방식을 결정하기 위해서는 위험원과 위험간의 인과관계에서부터 위험의 가능성과 확률, 위험이 초래할 영향의 정도 등을 파악해야 한다. 따라서 기술 위험관리를 위한 가장 기본적인 대응의 출발은 관련 정보나 지식을 수집, 탐색하거나 확충하는 것이다. 어떤 위험이 존재하며 그러한 위험이 발생할 가능성과 위험이 발생했을 때 초래할 위험에 대한 지식의 축적이 필요하기 때문이다. 차원에서 나노기술의 개발과 활용을 추진하고 있는 국가들은 나노기술의 위험성을 파악하기 위한 연구도 추진하고 있다. 이러한 맥락에서 주요 선진국들은 <표 2>에서 볼 수 있듯이 나노기술 예산의 일부를 나노 위험성 연구에 배정하고 있다.

<표 2> 국가별 나노기술 위험성 연구 투자

국가	내 용
미국	2006년 나노분야 총 예산 10억5400만 달러. 3.7%인 3850만 달러 인체·환경 영향평가에 배정
일본	2006년 나노기술인프라 구축에 20억5000만 달러 투입. 2007년까지 1억 2000만 달러 위험성 연구에 투자
유럽	EU: 2002~06년 나노분야 총 예산 15억 8000만 달러. 5%인 7900만 달러 인체·환경·사회 영향 평가에 배정 영국: 2005년 환경식품농업부 나노입자 위험성 검증 연구에 870만 달러 투자 계획 발표

<http://www.nano.or.kr/bbs/news/view2.asp?board=news&page=&idx=1133&prevnumber=1132&nextnumber=1134§or=news>.

선진국에서 나노기술의 위험과 관련된 지식축적을 위한 연구는 환경보건안전성 영향을 파악하는데 초점이 맞추어져 있다. 구체적인 내용은 다음과 같다(한국과학기술정보연구원, 2007; 최봉가·김경호·소대섭·유일재, 2007).

미국에서 나노기술의 환경보건안전성 영향에 관한 연구는 나노기술개발전략의 핵심요소이다. 2000년에 수립된 제1차 국가나노기술전략(NNI)은 연구 성격별로 5가지 투자분야를 설정하면서 나노기술의 사회적 영향을 주요한 자원 부문으로 설정하였다. 미국의 나노기술개발은 과학기술위원회(NSTC) 산하에 설치한 나노기술분과위원회(NSET)를 통하여 추진되고 있다. NSET에는 여러 개의 워킹 그룹이 결성되어 있는데, 나노기술의 환경 및 보건영향부문은 2003년 8월 연방정부의 12개 부처가 참여하여 설립한 나노기술 환경보건영향워킹그룹(NEHI WG)을 통하여 조정되고 있다. 2007년 회계연도의

예산청구액을 살펴보면, 환경보건안전부문(EHS)은 4,410만 달러, 윤리법기타 사회부문(ELS)은 3,800만 달러로, EHS와 ELS의 비율은 54:46 정도이다. NNI에 참여하는 미국의 부처별 EHS와 ELS의 예산 투자현황을 분석하면, 두 분야 모두 과학재단(NSF)의 투자가 과반수이상을 점유하고 있다. EHS 부문에 예산을 활용하고 있는 부처는 6개이며, 부처별 점유율은 NSF(58.1%), EPA(18.1%), HHH(10.4%), NIOSH(6.8%), NIST(4.1%), DOD(2.3%), CSREES(0.2%) 순이다(과학기술부KISTEP, 2007).

<표 3> 나노기술의 환경·보건·안전에 관한 주요 부처별 연구 내용(미국)

부 처	연구 분야	연구 내용
NSF	연구개발 기초분야, 나노입지전달 등	<ul style="list-style-type: none"> · 16개 NSECs와 13개 NNIN 노드가 EH, 윤리, 법 및 사회적 문제, 교육, 일반인 교육활동(outreach)에 관한 활동 전개 · 기초연구 - 나노기술 개발의 환경, 보건, 안전 영향
EPA	인공으로 제조된 나노입자의 환경영향 연구	<ul style="list-style-type: none"> · 나노소재의 독성, 소멸, 수송, 변환, 생물학적 이용도 및 인간 및 다른 종에 대한 노출에 관한 연구 지원 · EPA, NSF, NIOSH 공동으로 나노크기 물질의 독성, 운명, 수송, 변환에 관한 연구 지원
NIH	인체내 나노입자의 영향 연구	<ul style="list-style-type: none"> · NIEHS 등 - 국가독성프로그램(NTP)에 기반하여 나노크기 물질의 독성 연구(NIH의 NIEHS, NIOSH, NCTR 참여) <ul style="list-style-type: none"> - 피부 흡수, 기도흡입, 구강 노출 등 연구 - 결정형 형광 반도체(양자점 등)의 크기와 조성에 따른 생물학적 성질의 변화 - 탄소기반 재료의 장·단기 연구(단일벽·다중벽 탄소나노튜브, 풀러렌) - 나노크기 결정형 반도체 재료 및 탄소 나노소재의 입자중심과 표면의 조성에 따른 면역독성(immunotoxicity) 평가 · 산업설비 및 소비자 제품에 사용되는 금속산화물 나노입자 등의 광독성(phototoxicology)연구(이산화티타늄 등) · 국립암연구소(NCI)의 나노기술 특성분석 연구소(Nanotechnology Charactererization Lab, NCL), 나노입자기반 제품의 영향에 대한 연구 기반시설 제공 · 암 치료용 나노소재의 잠복기 특성을 규명하는 연속특성 평가 장치(characterization cascade)개발 · NCL, 나노입자의 물리적 특성 연구, 시험관 내 생물학적 특성과 동물 모델을 이용한 생체 내 적합성 연구
NIOSH	나노입자의 작업장 안전문제 연구	<ul style="list-style-type: none"> · 노동자 안전과 건강을 위한 프로그램 지원, 나노기술 사용 평가, 나노재료의 잠재적인 해로운 노출 효과 · NIOSH 나노기술센터 설립, 나노기술 종사자의 안전문제 전담 · 작업장의 나노입자 노출 평가 · 인공으로 제조된 나노입자 처리지침 마련, 다른 NSET기관 공동으로 나노재료 관리의 모범사례 마련

자료: 과학기술부KISTEP(2007).

EU는 나노기술개발시행계획을 통하여, 인공으로 제조된 나노물질이 노동자, 소비자 및 환경에 노출되는 것을 최소화하려는 방안을 마련하고, 나노기술제품의 전 라이프사이클을 포괄하는 위험성 평가를 위험용어, 가이드라인 등의 표준을 개발해 나가고 있다. 유럽신규보건위험과학위원회(SCENIHR)는 2006년 3월 나노기술제품의 잠재적 위험성을 진단하는 기존의 기법들에 대한 평가 작업을 진행하여 기존의 방법으로 나노 입자의 위험성을 평가하는 것이 한계가 있다며 새로운 위험평가방법을 모색해야 한다는 권고안을 제시하였다(과학기술부KISTEP, 2007).

<표 4> EU의 나노기술의 영향평가에 관한 프로젝트

프로젝트	예산(유로)	연구내용
NanoSafe	323,000	· 나노입자 독성 기초연구
NanoSafe2 (www.nanosafe.org)	7,000,000	· 나노입자 안전성
NanoTox (www.impact-nanotox.org)	400,000	· 나노입자의 확산경로, 오염 및 추적 · 산학연 공동연구 · 가이드라인 제안 예정
Nanologue (www.nanologue.net)	340,000	· 나노기술 제품의 잠재적인 윤리, 법, 사회적 문제 · 3개의 나노기술시나리오 작성
Nano Dialogue (www.nanodialogue.org)	850,000	· 나노기술에 대한 사회적 논의 촉진 · 전시회 모듈생산 및 쌍방향 웹사이트 운영

자료: 과학기술부KISTEP(2007).

일본에서 나노기술의 사회적 영향 문제에 주목하고 있는 기관으로는 산업기술종합연구소(AIST)가 대표적이다. 현재 AIST는 나노소재가 건강에 미치는 영향을 조사하는 안전성평가 프로젝트를 추진하고, 연구 성과를 국제회의 등에서 발표하며, 경제협력개발기구(OECD)와 국제 표준화기구(ISO)가 진행하는 안전관리 등의 국제기준 재정에 반영시킨다는 전망을 세우고 있다. 그 외 문부과학성의 나노기술종합지원프로젝트센터는 나노 기술의 사회영향에 관한 주요국의 연구논문, 보고서 등의 문헌조사를 실시하였다. 후생노동성은 나노소재의 독성평가방법 등을 개발하는 3개년 연구 과제를 시작하였으며, 신에너지 산업기술종합개발기구(NEDO)는 “나노입자 특성평가 방법의 연구개발” 프로젝트를 추진 중이다(과학기술부KISTEP, 2007).

<표 5> 일본의 나노기술 환경·보건·안전 분야 연구현황

기관	사업 내용
NEDO	<ul style="list-style-type: none"> - 나노입자 특성평가 방법의 연구개발 - 사업비 3.7억엔(2005년), 연구개발기간 3년 - 공업나노입자 특성연구방법 개발, 폭로평가방법개발, 유해성평가방법개발, 위험성 평가 및 적정 관리방법 구축
AIST	<ul style="list-style-type: none"> - 안전성 평가 프로젝트 - 2006년 6억엔(5년간 총 20억엔 투자) - 독성 시험, 계측기술 개발, 인체내 축적되는 나노물질의 양 측정 - 산업의대, 히로시마대학, 카나자와대학, 돗토리대학 공동 연구팀 조직 - 연구성과를 OECD와 ISO가 진행하는 안전관리 등의 국제기준 제조에 반영
후생노동성	<ul style="list-style-type: none"> - 나노소재의 독성연구 - 나노소재 독성 평가방법 개발, 동물실험

자료: 과학기술부KISTEP(2007).

2) 기술영향평가의 실시: 위험에 대한 예측과 평가

기술영향평가는 기본적으로는 기술발전의 긍정적인 측면은 극대화하고, 반대로 부정적인 측면은 최소화시킬 수 있도록 현재 혹은 미래의 과학기술이 사회에 미치게 될 영향을 체계적으로 미리 예측, 평가하는 것이다. 기술위험에 대한 체계적 예측과 평가를 목적으로 한다는 점에서 기술위험에 대한 기존의 지식이 활용된다. 또 기술영향평가는 사회적 합의를 촉진하는 중요한 계기로 활용 될 수도 있다. 기술영향의 평가과정에서 사회적 합의 형성을 위해 일반시민을 포함한 다양한 관련자들을 참여시킴으로써 기술위험관리의 전략과 수단 선택에 대한 사회적 합의를 촉진하는 수단으로 활용될 수도 있다. 또 기술영향평가의 결과로 시민참여와 같은 사회적 합의 촉진을 위한 권고안이 제시되기도 했다.

나노물질의 환경 및 인체 유해성 문제가 이슈로 부각되면서 미국과 유럽을 중심으로 나노기술의 사회문화적 영향에 대한 기술영향평가(technology assessment)가 활발하게 이루어지고 있다. 미국은 2000년 클린턴 대통령의 나노기술개발 지원 선언과 동년 11월 의회에서의 국가나노발전계획 승인으로 나노기술 국가 연구개발체제가 확립되었다. 그런데 기술영향평가와 관련하여 주목되는 것은 국가나노발전계획을 구성하는 다섯 개 주요 연구 분야 중의 하나가 나노기술의 사회적 합의에 대한 분석이라는 점이다.

이러한 맥락에서 NNI를 종합 조정하는 범부처적 기구인 미국 국가과학기술위원회

(NSTC) 산하 나노과학기술소위원회(NSET)는 2000년 국립과학재단(NSF)에서 “나노과학 나노기술의 사회적 함의들”이라는 주제로 워크숍을 조직하여 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가를 시도하였다. 국립과학재단(NSF)은 이 워크숍의 후속작업으로 2002년 1월에 이탈리아에서 유럽연합과 공동으로 “나노기술 : 혁명적 기회와 사회적 함의”라는 이름의 워크숍을 조직하여 나노기술의 사회문화적 영향에 대한 유럽의 연구자들과 함께 다시 논의하는 기회를 가지기도 하였다. 여기에서도 주로 나노기술의 사회적, 윤리적, 환경적 함의들과 함께 나노기술에 대한 일반 대중의 사회적 수용성을 제고할 커뮤니케이션 방법 및 교육 방안 등이 논의되었다(Roco & Tomellini, 2002). 그러나 이러한 기술영향평가의 내용은 아직 나노기술이 이제 막 등장하고 있는 신생기술이라는 점에서 대체로 나노기술에 대한 체계적 영향평가라기보다는 영향평가를 위해 향후 수행해야 할 연구방향 정도를 제시하는데 그치고 있다(이영희, 2004).

한편, 2003년 미 상원이 제출한 “21세기 나노기술연구개발지원법”은 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가를 전담하는 American Nanotechnology Preparedness Center를 설립하여 국립과학재단에 매년 5백만 불씩을 지원받을 수 있도록 하는 내용을 담고 있다. 이는 나노기술에 대한 사회문화적 영향평가 역시 본격적으로 이루어질 것을 의미하는 것이다.

유럽의 경우에도 각국에서 기술영향평가가 실시되었다. 영국은 2003년 4월 찰스 황태자가 나노기술이 가져올 수 있는 재앙에 대한 우려를 표시한 이후, 영국 내에서도 나노기술의 긍정적 측면과 부정적 측면을 둘러싸고 사회적으로 논란이 크게 제기되어 왔다. 이러한 상황에서 영국정부는 왕립 학회와 왕립 기술 아카데미에게 나노 기술의 발전 가능성, 잠재적 위험성 등을 조사해 달라고 요청했다. 조사 결과는 2004년 7월에 「나노 과학과 나노기술: 기회와 불확실성」이라는 보고서로 발표되었다⁴⁾. 이후 전세계 언론에서 꼬리를 물며 나노 과학과 관련된 문제를 여론화하기 시작했다(루이 로랑장클로드 포티, 2006).

이 보고서는 나노기술이 전반적으로 유익할 것으로 보이지만 안전하게 사회적으로 수용되기 위해서는 적절한 규제도 필요하다고 주장하였다. 환경전 과정평가 도입, 나노 튜브의 영향 연구를 위한 다학제 연구센터 설립, 나노입자와 나노튜브에 대한 환경영향이 명백해질 때까지 배출의 최대한 억제, 나노기술의 사회 윤리적 문제에 대한 연구 지원, 나노기술에 대한 일반시민 의식조사 실시와 나노기술에 대한 공공토론 진행 등

4) 이 기술영향평가 과정에는 통계적 의견조사, 포커스 그룹 등의 연구 방법이 포함되었고, 영향평가 과정에 관련 전문가만이 아니라 일반시민들도 부분적으로 참여하였다. 이 보고서에서 연구팀은 전반적인 나노기술개발 현황과 개요를 소개하고 나노기술이 환경, 건강, 안전, 윤리, 사회에 미치는 영향을 진단한 후, 영국 정부에 21개의 권고안을 제시하였다.

을 권고안으로 제시했다. 이외에도 독일이나 네덜란드 등의 유럽국가에서 기술영향평가가 시행되었다5).

<표 6> 나노기술 영향평가에 대한 주요국의 정책 추진 현황

시기	한 국	미 국	일 본	E U
2003 이전	<ul style="list-style-type: none"> · 나노기술종합발전계획(2001.7) · 나노기술개발촉진법(2001.12) · 과기부, 기술영향평가 전문가 간담회(2003.10.23) 	<ul style="list-style-type: none"> · 국가나노기술전략(NNI)(2000.1) · NSF, 대규모의 사회영향 워크숍 개최(2000.9.28) · 사회영향 학회 개최(2003.12.3~5) · 21세기 나노기술 개발법(2003.12) 	<ul style="list-style-type: none"> · 제2기 과학기술 기본계획-나노기술을 4대 중점 분야로 선정 · 나노기술·재료분야 전략(2001.9) 	<ul style="list-style-type: none"> · FP6, 나노기술을 핵심연구개발 분야로 선정 · 영국, ESRC 나노기술을 둘러싼 이전 조사 분석
2004	<ul style="list-style-type: none"> · 과기부, NBIT 융합 기술영향평가 	<ul style="list-style-type: none"> · NSF, 나노기술의 책임있는 개발을 위한 국제대회 개최(2004.6.17-18) · 라이스대학, 나노기술사회영향 문제에 대한 데이터베이스 구축(ICON)(2004.10) 	<ul style="list-style-type: none"> · AIST, 나노기술과 사회 토론회(2004.8~2005.3) · 이후일본 내에 나노기술 사회영향 문제에 대한 논의 확산됨 	<ul style="list-style-type: none"> · EC, 나노기술전략(2004.5) · 책임 있는 나노기술 개발에 중점을 둠
2005	<ul style="list-style-type: none"> · 과기부, 2005년도 나노기술영향평가 · 과기부, 제2기 나노기술종합발전계획 수립 - 나노기술사회 영향 등 4대 목표 선정 	<ul style="list-style-type: none"> · 대통령과학기술자문위원회(PCAST), NNI평가보고서 발행(2005.5)-NNI 사회영향대응에 대한 호평 	<ul style="list-style-type: none"> · AIST, 심포지움 나노기술과 사회(2005.2.1) · AIST, 나노기술의 사회수용 촉진을 위한 조정연구 워크숍(2005.9 2번 개최) 	<ul style="list-style-type: none"> · EC, 나노기술 개발 시행계획(2005-2009) 수립(2005.6) · 나노기술 사회영향에 대한 국제회의(2005.14-15)
2006	<ul style="list-style-type: none"> · KISTEP, 2차 나노기술영향평가(나노소재분야) 	<ul style="list-style-type: none"> · Wilson Center, 나노기술 사회영향 평가 프로젝트 추진 	<ul style="list-style-type: none"> · 3기 과학기술 기본계획-“나노기술의 사회수용” 부문을 나노기술의 10대 연구과제로 선정(2006.3) · 문부과학성, “나노기술의 사회수용 촉진에 관한 조사연구”(2005.7~2006.3) · 후생노동성, AIST - 나노독성 연구 프로젝트 연구 	<ul style="list-style-type: none"> · SCENIHR, 나노기술 위험성 평가에 대한 제언(2006.3)

자료: 과학기술부KISTEP(2007).

5) 독일연방 의회 산하 기술영향평가 기구인 기술영향평가국(TAB)에서도 헤르베르트 파셴(Herbert Paschen) 박사를 책임자로 하여 2001년 11월부터 2003년 4월까지 나노기술의 현황, 가능성, 그리고 사회적 영향 등을 연구하였다. 이 연구에서는 나노기술의 발전 전망, 나노기술의 바람직한 적용을 촉진하는 데 요구되는 조건들, 나노기술 발전에 대한 사회적 수요, 나노기술의 군사적 적용 가능성 및 이러한 군사적 적용이 국제안보체제와 군비통제노력에 미칠 영향, 나노기술이 지속가능한 발전에 기여할 가능성 등을 검토하였다. 네덜란드의 대표적인 기술영향평가 기관인 라데나우연구소에서는 2003-2004년 기술영향평가 사업 중의 하나로 나노기술을 선정하여, 나노기술의 현황, 발전전망, 그리고 사회적·환경적 함의에 대해 연구를 진행하고 있는 중이다(이영희, 2004).

이와 함께 선진국에서는 국가적 차원에서 나노기술에 대한 영향평가와 더불어, 환경단체를 비롯한 NGO에 의한 나노기술영향평가가 시도되고 있다. 캐나다에 본부를 두고 있는 환경단체 ETC Group⁶⁾은 2003년 1월에 “The Big Down”이라는 보고서를 출간하여 나노기술의 발전 동향과 그것이 산업, 기술, 그리고 사회에 미칠 영향을 분석하였는데, 이 보고서에서는 “예방원칙(precautionary principle)”에 입각하여 안전성이 입증될 때까지 전세계적으로 나노입자의 생산을 금지해야 한다고 주장하였다(The ETC Group, 2003).

또한 생태주의를 표방하는 대표적인 잡지인 <The Ecologist>는 2003년 5월에 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(The Ecologist, 2003).

한편 세계적인 환경단체인 그린피스 역시 2003년 7월에 나노기술이 인간사회와 생태계에 미칠 영향을 분석한 보고서를 “미래의 기술들, 오늘의 선택”이라는 이름으로 발간하였다. 그린피스는 이 보고서에서 나노기술이 가지고 있는 긍정적인 잠재력도 분명히 인정하지만, 부정적 잠재력이 발현될 가능성에 더 주의를 기울이고 있다(Arnall, 2003).

이와 같은 NGO의 나노기술 영향평가는 비록 나노기술이 갖는 긍정적인 측면을 무시하고 있는 것은 아니나, 정부에서 이루어지는 기술영향평가와 달리 나노기술에 대해 대체적으로 매우 비판적인 입장을 견지하고 있다. 그러나 대체적으로 이와 같은 기술영향평가는 체계적인 조사에 기반을 두고 있기 보다는 아직은 시론적인 수준에 머무르고 있다고 평가된다(이영희, 2004: 67-68).

3) 위험 커뮤니케이션: 위험 정보 공개와 대중 참여의 권고

지난 2002년부터 진행된 제 6차 EU 환경실천프로그램은 환경과 건강에 관한 정보 공개를 강조하고 화학물질과 그로 인한 위험성을 평가하고 관리할 수 있는 시스템의 도입을 언급하고 있다. 이와 관련해서 EU환경위원회는 나노 위험에 관한 꾸준한 워크

6) ETC그룹은 침식, 기술, 집중에 관한 행동그룹(Action Group on Erosion, Technology and Concentration)의 약칭이며, 1977년 11월 캐나다에서 설립된 국제 농촌 개발협회(RAFI)의 후신이다. 이 그룹은 나노기술의 이름을 '원자 기술'이라고 바꾸고 나서 나노 기술의 위험성을 경계하는 강력한 성명서를 발표했다(루이 로랑·장클로드 프티, 2006).

샵 개최를 통해 정보를 공개와 확산을 위해 노력하고 있다. 이러한 노력의 하나로 유럽 공동체의 보건소비자보호국(Health and Consumer Protection Directorate General of EC)은 나노 기술 물질로 인한 사람과 환경에 잠재적 유해성, 노출 및 위험성을 조사하기 위해 2004년 3월 Brussel에서 17명의 다양한 분야의 국제적 전문가들을 초청하여 워크샵을 개최하였다. 이 워크샵에서 전문가들은 나노 기술발전 모니터링 단체설립, 의사결정 과정에서 대중의 참여 12개의 권고사항과 함께 미래 정책의 선택사항을 9가지 제시하였다.

<표 7> EC의 미래 나노 정책을 위한 선택사항

선택사항	내 용
1. 연구 및 개발	현재 불완전한 정보부족은 독성학적, 생태독성학적, 노출 평가 자료를 요구하고 있음. 궁극적으로 새로운 위해성 평가 자료의 산출, 기존 데이터의 재사용이 촉진될 수 있도록 할 것
2. 국제적 명명법 기준, 지침 및 권고사항	과학적인 교류, 기존 데이터의 사용, 실험데이터의 상호비교를 촉진하고 소비자와 환경보호를 강화, 시장 투명성을 개선, 무역을 증진시키며, 나노기술의 세계화를 이루기 위해 필요함
3. 국제협력	건강관련정보를 모으고 나노기술개발을 모니터링하기 위해 필요함. 특히 나노기술개발 모니터링을 위한 국제적 감시기관을 설치하는 것도 국제협력을 필요로 함
4. 입법화	기존 법체계를 최대한 이용해야 하며, 나노 기술의 독특한 특성상 필요시 기존 법체계를 재검토해야 함. 특히 나노 기술에 있어서 인간과 환경보건 안전에 대한 규제의 투명성이 보장되어야 함
5. 위해성 평가	위해성 평가가 나노 기술의 고안, 연구개발, 제조, 판매, 사용, 폐기 등 모든 라이프 사이클에서 행해져야 함
6. 대중의 이해와 나노기술의 형상화	공정한 정보에 기반한 나노기술에 관한 판단을 소비자가 할 수 있도록 대화의 장을 열고 나노기술을 형상화하는데 대중이 참여할 수 있도록 장치가 필요. 대중참여 포럼같은 것을 조직하는 방법이 있으며, 이러한 방법들은 위해성에 대한 전달에 효율적인 수단이 될 수 있음
7. 향후 나노기술의 국제적 교류	나노 기술의 국내, 국제교류를 통해 나노 기술에 대한 사람과 환경·보건·안전 정책을 마련하고 위해성 평가를 촉진토록 할 필요가 있음
8. Privacy, 보안, 기타사항	기타 나노기술에 대한 Privacy나 보안 사항 등은 사전행동으로 지켜져야 함
9. 좋은 실천(good practice)	산업체, 중진국/선진국을 포함하는 모든 이익집단들이 나노 기술의 책임있는 발전을 위해 국제적인 건전한 실천 규율을 정의하고 실천토록 촉진해야 함

자료: 맹승화·유일재(2005).

영국 Royal Society는 2004년 보고서에서 현재 마련되어있거나 반드시 필요한 나노기술관련 규정들을 집중적으로 다루었다. 이 보고서는 현재 나노기술을 위해 특별규정의 추가적 제정을 할 필요는 없다는 입장을 보이고 있고, 특히 ETC Group의 나노기술에 대한 모라토리엄(일시중지) 요구에 대해서는 회의적 의견을 드러냈다. 물론 Royal Society 역시 새롭게 확인된 나노입자들의 특수성질을 고려하기 위해 현재 마련되어있는 법률을 수정 보완할 필요가 있다고 주장하였다. 무엇보다 이 보고서는 REACH가 합성나노입자를 신소재의 하나로 추가시키고 다른 화학물질들과 함께 관리해야 한다고 권고하였다. 이와 같은 요구에 부응하여 지난 2005년 10월 본에서 열린 컨퍼런스에서 EU환경위원회 대표는 EU차원에서도 REACH와 GHS정책을 통해 합성나노입자의 위험성을 관리해나갈 것이란 의지를 밝혔다.

이와 함께 독일에서는 합성나노입자의 위험에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 일반 대중들 사이에서는 정보의 부족과 인식의 부재로 나노입자의 위험에 관한 인식이 널리 확산되어 있지 못하다. 또한 학계, 산업계, 시민, 행정당국 등 각 이해당사자들 서로 간에도 이해가 많이 부족한 실정이다. 따라서 합성나노입자 리스크커뮤니케이션의 일환으로 지난 2005년 10월 독일환경부는 합성나노입자가 건강과 환경에 미치는 영향에 대한 각계의 인식과 의견을 파악하고자 설문조사를 실시하였다. 이번 설문조사의 대상으로는 합성나노입자 문제의 가장 중요한 이해관계당사자(Stakeholder)들인 행정당국, 학계, 산업계, 사회단체(환경, 소비자, 사회단체 및 관련 산업 노조)가 포함되었다. 합성나노입자에 관한 인식조사 참여대상들은 대부분 합성나노입자의 위험성에 관한 객관적 논의에 큰 관심을 보이고 있으며 정확한 정보의 전달을 중요하게 평가하였다. 특히 대부분 합성나노입자 관련 산업종사자들의 건강과 안전 문제를 가장 우선적으로 다루어야 할 것이라 평가하였다. 그러나 합성나노입자의 관리를 위한 법적수단 강구에 대해서는 현재의 규정들만으로 충분하다는 의견부터 새로운 나노입자 허가절차 규정 도입까지 다양한 의견이 제시되었다(<http://www.dialog-nanopartikel.de/downloads.html>).

4) 통제와 완화: 나노기술의 법적 규제에 대한 논의

위험예측이 불확실한 나노기술에 대한 우려의 목소리지면서 나노기술을 위한 정치적 법적 규제 및 관리 수단에 대한 요구도 증가하고 있다. 그러나 구체적으로 규제가 이루어지고 있는 것은 아니며 여전히 논의가 진행 중인 경우가 대부분이다.

유럽의 경우 2003년 10월 29일 새로운 EU 규제 프레임워크를 제안하였다. REACH(Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals)로 불리는 새로운 시스템 하에서 연간 1톤 이상을 제조하거나 수입하는 사업은 중앙 데이터베이스에 등재하게 되어 있다. 이러한 규제의 목적은 인간의 보건과 환경보호를 개선하기 위한 것이며 EU의 화학 산업의 능력을 혁신하는데 일조하였다. REACH는 이후 제품이 EU시장에 소개되기 전에 소재의 안전도에 대해서 회사에 입증하게 유도하였다. 2005년 7월 EC는 위험영향평가를 연구개발, 생산, 배포, 사용, 그리고 폐기 등을 포함하여 위험을 지각하는 순간 시작하도록 제도적으로 보강하였다. 이러한 실행법안은 위험 관리 과정이 인위적인 나노소재의 대량생산을 시작할 때부터 다루어져야 한다는 것을 밝히고 있다. 따라서 나노소재가 안전하다는 것을 확실히 증명하지 않고는 나노소재가 생산되고 판매될 수 없다는 것을 의미한다. 이에 따라 영국은 과학기술안전위원회의 사전 승인 없이는 나노 연구를 마음대로 할 수 없도록 규제 장치를 마련했다. 또 같은 물질이라도 나노 규모로 작아지면 물성이 크게 바뀐다는 점에서 신물질로 분류해 기준을 따로 적용하는 제도 정비도 추진되고 있다(http://society.kisti.re.kr/php/sub_body4_4.php?no=9658&table=scinews06).

반면, 미국에서는 인공나노입자에 대해 생산, 사용, 수송 및 배포에 대한 규제 등은 이루어지지 않고 있다. 독극물제어법(TSCA: Toxic Substances Control Act)의 가이드라인하에서 환경보호청(EPA)이 상용화된 나노소재가 직접적인 또는 잠재적인 위험요소를 갖고 있는지, 그리고 나노소재가 완전히 새로운 화학물질인가를 판단해야만 하는 것이다(과학기술부-KISTEP, 2007: 139-140).

4.2 우리나라의 나노기술위험 관리

1) 기술위험 발전 현황과 주요 쟁점

우리나라에서 나노기술은 21세기 국가 과학기술경쟁력의 확보와 국가 경제 및 사회의 지속적인 발전을 위한 핵심기술로 인식되어 왔다. 국가차원에서 나노기술정책을 지속적·체계적으로 추진하기 위해 나노기술종합발전계획('01.7)을 수립하였으며, 이어 나노기술개발촉진법('02.12) 및 동법 시행령('03.6)을 제정하여 나노기술 육성을 위한 법적근거를 마련하였다.7) 이에 따라 한국의 나노기술 경쟁력은 나노기술종합계획이 수립된

7) 우리나라의 나노기술 연구개발 정책은 2001년 수립된 "나노기술종합발전계획"에 기반하고 있으

2001년 이후 비약적으로 상승하였는데, 2001년에 선진국 대비 기술수준이 25%이었으나 2005년도에는 66%에 이를 만큼 괄목한 성과를 이루었다.

그러나 나노수준의 구조체가 인체와 환경에 잠재적인 역효과를 줄 수 있다는 우려가 제기되면서 이에 관한 정부 차원의 대응이 요구되어 왔다. 우리나라는 나노기술개발촉진법 19조에 “나노기술 영향평가”에 관한 조문을 명시하여 나노기술의 사회영향에 대한 평가 작업을 법적으로 보장하고 관련 연구를 진행하고 있다(최봉가·김경호·소대섭·유일재, 2007: 48-49).

2) 나노기술에 대한 대응과 관리

나노기술의 기술위험에 대한 우리나라의 대응과 관리를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 기술위험의 인지와 기술영향평가의 기초가 되는 나노기술의 위험에 대한 지식축적에 있어서는 선진국과 비교했을 때 상당히 미진한 상황이다. 나노기술 중 가장 위험성이 큰 분야는 나노 소재인데, 그럼에도 나노소재기술개발사업단은 따로 위험성 연구를 하고 있지 않다. 나노기술의 위험성과 관련한 지식이 축적되어 있지 않기 때문에 위험 관리 대응 절차나 방법도 아직까지 선진국(주로 미국)을 모방하는 단계에 해당되며, 여전히 위험 관리도 정부 주도로 진행되고 있는 실정이다. 국내의 나노입자 안정성 연구는 최근 들어 태동하기 시작하였는데, 국내에서 흡입독성 챔버를 갖추고 흡입독성시험연구를 할 수 있는 기관은 다음과 표와 같다.

<표 8> 국내의 흡입독성연구기관

기관	대표 학자	흡입챔버 보유현황	GLP 적용여부	나노입자 연구 가능/진행여부	연구 나노입자	비고
한국생활환경 시험연구원	유일재	전신노출챔버 두부노출챔버	Yes	진행중	은나노, 용접흡	
서울대학교 수의대	조명행	전신노출챔버 두부노출챔버	No	진행중	마그네틱 나노입자	
산업안전 보건연구원	양정성/ 김현영	전신노출챔버 두부노출챔버	Yes	-	-	준비중
안전성평가 연구소	한상섭/ 송창우	준비중	준비중	-	-	준비중

자료: Nano Weekly(2007), 제237호.

며, 현재 제2기 나노기술종합발전계획인 추진 중에 있다.

이처럼 국내 여건상 나노입자의 흡입독성연구를 위한 시설과 인력 인프라가 미흡하다고 지적 받고 있다. 따라서 나노입자의 환경노출에 대한 기본적인 조사나 작업환경에서의 근로자의 노출에 관한 기본적인 조사 및 연구가 이루어지지 않고 있다. 부분적으로 식품의약품안전청 산하 국립독성연구원에서는 2007년부터 “나노물질 독성 기반연구”사업을 추진하여 2011년까지 총 55억원이 투자(2007년도 예산은 10억원)된다. 구체적인 사업목표는 나노물질의 평가체계 구축 및 관련 지침 재정, 나노물질의 독성평가 기술개발, 독성저감화 등으로 설정하고 있는 실정이다. 환경부는 2010년까지 건강영향평가제를 실시해 나노기술의 유·무해성이 최종 입증되기 전까지 유해한 것으로 보고 조사한다는 계획이다. 이처럼 나노기술의 환경보건안전성 영향에 관한 주요 선진국(미국, 일본, EU)과 달리, 우리나라에 경우에는 관련된 연구 활동이 미진한 상태이다(최봉가·김경호·소대삼·유일재, 2007).

둘째, 위험평가의 차원에서 이루어지는 기술영향평가를 들 수 있다. 우리나라는 나노기술개발촉진법(19조)과 나노기술개발촉진법시행령(17조)에 “나노기술 영향평가”를 명시화하여 나노기술의 사회적 영향에 대한 평가를 법률적으로 보장하고 있으며, 제2기 나노기술종합발전계획은 나노기술의 사회적 영향에 대한 문제를 4대 목표 중의 하나로 설정하고 있다. 목표 중에는 나노기술에 대한 ELSI 연구실시 등 나노물질의 안전성 기반구축을 위한 전략이 포함되어 있으며, 구체적으로 나노물질의 안전성 평가를 위한 인프라 구축, 나노물질 안전성평가의 효율적 운영을 위한 협의체 구축, 21세기 프론티어연구개발사업 등 국가대형연구개발사업에서 나노기술영향평가 실시 권장, OECD 등 국제 나노물질의 인체 및 환경 위해성 이슈에 적극 대응 등이 주요 내용이다.

현재까지 3회에 걸친 나노기술영향평가는 과학기술부와 과학기술기획평가원을 통하여 추진되어 왔다. 2006년에는 나노소재의 안전성 평가에 초점을 맞추고, 주요 정책제언으로 “나노소재 기술 영향평가 센터” 설립을 제안하였다. 이와 관련하여 구체적으로 나노소재 특성자료의 수집 및 보완(개발과제 결과의 수집/분석/공개), 나노소재 특성자료의 체계화 주도(표준화, 위해성 평가), 나노소재 활용의 가이드라인 제정(제품인증, 안정성 인증), 나노소재의 기술영향평가에 관한 국제적 동향의 파악 및 적극참여, 나노소재 기술에 관한 교육 및 홍보(초중고 학생, 일반인) 등을 제시하였다. 현재 우리나라 나노기술 사회영향 연구는 미국, 유럽과 같은 구체적인 나노소재의 환경, 인체 및 안전(EHS)에 대한 연구와 윤리, 법, 사회적 측면(ELS)의 연구와는 다르게 포괄적인 나노기술의 일반론적 연구에 치중하고 있다(최봉가·김경호·소대삼·유일재, 2007: 54).

셋째, 우리나라는 나노 기술의 경제적 효과에 치우쳐 있으며, 나노 기술 위험에 관한 커뮤니케이션이 거의 이루어지지 못하고 있다. 2006년에 진행된 나노소재기술영향

평가도 정부 주도의 요식 행위로 진행되면서 나노기술의 위험을 부각시키기 보다는 나노기술의 활용을 통한 성장 잠재성을 부각하고 원천기술의 확보 방안에 초점을 맞추고 있다. 민-관 모두 나노 소재가 건강 및 환경에 미치는 영향에 대해 적극적인 조사를 진행하고 있지 않기 때문에 이에 대한 충분한 정보도 없는 상태이다. 이 때문에 나노 물질의 위해성을 평가할 수 있는 전문가나 전문 연구소도 없으며, 나노기술에 대한 규제 가이드라인 또한 초기 단계에서 논의되고 있을 뿐이다. 그동안 나노 기술 위험에 대한 논의가 소수의 전문가와 일부 정부부처 위주로 진행되어 왔으나, 최근 나노기술의 안정성 문제가 심각하게 부각됨에 따라 NGO 단체와 환경 단체가 조금씩 참여 주체로서 활동하고 있다. 그러나 나노기술에 대한 지식이 없기 때문에 상대적으로 공론화는 일어나고 있지 않으며, 일부 전문가(학자)들에 의해서 시민의 합의를 통한 나노기술의 관리가 논의되고 있다.

4.3. 선진국의 기술위험관리의 합의와 비교

선진국의 나노기술의 기술위험에 대한 관리는 국가별로 차이를 보이고 있다. 선진국의 기술위험관리에 대한 합의를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 선진국의 경우에는 나노기술을 통한 경제적 이익 추구가 가능하다는 점에 동의하고 있으나, 반대로 나노기술의 독성이나 위험성에 관해서도 우려하고 있다. 즉, 나노기술에 대한 의견이 분분한 가운데 실제로 그러한 영향이 검정되어가는 과정이지만, 현재까지도 이와 관련한 지식이 불확실하고 이에 따라 합의 또한 어렵다는 것이 선진국에서도 공통적으로 나타나고 있다. 또한, 선진국의 경우에는 나노기술의 안전성과 위험수준을 검증하기 위하여 지속적인 기술영향평가 등의 제도적 기제를 갖추어 가고 있다는 점에서도 유사하다.

둘째, 나노기술은 지식이 불확실하기 때문에 합의로 진행하려는 경향과 합의 문제가 지식의 불확실성을 야기하기도 하면서, 서로 복잡하게 얽혀 진행되는 부분이 강하다고 할 수 있다. 즉, 각 국가별로 지식축적과 사회적 합의는 경중에 차이가 있지만 따로 가는 것이 아니라 함께 결합되어 공진화 하는 것으로 파악해야 할 수 있을 것이다. 앞서 논의에서 볼 수 있듯이 미국을 비롯하여 각 국가들은 나노기술개발과 동시에 나노기술 영향평가에 대한 조문을 함께 명시하여 관련 연구를 진행하고 있다.

셋째, 선진국에서도 나노기술의 환경적 측면, 인체적 측면, 사회적 측면 등 다양한 쟁점 가운데 기술의 편익과 위험에 대해 극명하게 나뉘지고 있다. 즉, 나노기술이 질병

치료와 노화방지뿐만 아니라 인간의 신체적 능력을 높이는 데도 활용되는 등 다양한 기술 파급효과의 이점이 있으나, 그 이면에는 나노기술의 독성문제가 주요 이슈화 되고 있다. 즉, 나노기술이 인체에 해로운 영향을 미친다는 직접적인 증거는 존재하지 않으므로 나노기술개발에 대한 규제는 불필요하거나 아니면 최소한으로 그쳐야 한다는 입장이 있는 반면에, 나노기술의 유해성 여부가 알려질 때까지 나노기술개발을 일시 중지하거나, 아예 나노기술개발 자체를 포기하자는 비판적 견해도 존재하고 있다. 그러나 현재까지도 나노기술의 안전성의 부재와 경제적 효과라는 두 가지 상반된 면을 검증하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있는 실정이다.

넷째, 나노기술에 대한 지식이 불확실함에 따라 관련된 논의는 소수의 전문가중심으로 이루어졌으며, 최근에 이르러 환경단체 등의 시민단체와 기술영향평가 등의 제도를 통해서 점차 일반인들이 참여주체로서 조금씩 영역을 넓히고 있는 실정이다. 이러한 점을 고려해볼 때 과거에 비해 일반인들의 기술 인식의 문제는 지속적으로 발전되었다고 할 수 있으며, 국가차원의 나노기술육성전략에서 일반 대중의 인식과 의견을 반영하기 위한 제도적 기제 등이 조금씩 자리를 잡아가고 있는 실정이라 할 수 있다.

다섯째, 선진국의 나노기술에 대한 대응과 관리는 크게 두 가지 흐름으로 나누어 살펴볼 수 있다. EU는 나노기술에 대한 과학적 확실성이 없기 때문에 나노기술이 과학적으로 안전하지 않다는 판단 하에, 사전예방적 차원에서 접근하는 입장을 취하고 있다. 즉, 확실한 과학적 증거나 정보가 미약할지라도 만약 최악의 시나리오를 예상할 수 있다면 이를 회피하기 위한 적극적 조치를 취해야 한다는 원칙에 따라 과학기술에 대응 및 관리하고 있다. 반면에 미국은 나노기술에 대한 과학적 위험성에 대한 명확한 증거가 없고, 기술의 유용성이 더 높다는 판단하에, 사후원칙 또는 실질적 동등성의 원칙을 취하고 있다. 즉 EU가 사전예방원칙을 바탕으로 나노 기술의 규제를 강화해 나가는데 반해, 미국은 나노의 성분, 형태, 생태학적 특징이 기존의 기술과 유사하다고 보고 위해성이 증명되었을 경우 사후적으로 처방해야 한다는 원칙을 채택하고 있다.

5. 결론과 정책적 시사점

본 연구는 한국형 기술위험 관리 방안을 도출하기 위해 선진국과 우리나라의 기술 위험 관리를 나노 기술 사례를 통해 살펴보았다. 나노기술 사례를 통해 선진국과 우리나라의 기술위험 관리의 현황과 특성을 정리하고, 이를 바탕으로 우리나라 기술 위험

거버넌스를 설계하고자 한다.

선진국과 비교했을 때 우리나라 기술 위험 관리 방식은 기술에 대한 지식과 전문가가 부족할 뿐만 아니라 기술의 정당성과 합의를 도출해 나가는 과정도 민주적·공개적으로 이루어지지 못하고 있다. 그동안 우리나라는 추격국의 독특한 상황, 즉 위험과 실패에 대한 인식이 부족하고 경제발전이나 국가경쟁력을 강조함에 따라 절차적 정당성은 무시되는 등 위험 규제나 관리가 미흡하다고 할 수 있다. 과거 발전 년대를 거치면서 형성된 제도적 유산으로 인해 국민의 건강보다는 국익과 경제발전 위주로 위험관리가 이루어지고 있으며, 위험 여부를 시민들에게 투명하게 공개하지 않고 있다.

선진국의 경험을 바탕으로 향후 정책적 시사점을 도출하면 다음과 같다.

첫째, 기술위험을 '발전'의 프레임이 아니라 '안전'의 프레임에서 인식하고 접근하는 관점의 전환이 필요하다. 안전의 틀에서 볼 때 기술위험관리는 사회적 안전을 강화함으로써 삶의 질을 향상시키는 긍정적 요인이지만 발전의 프레임에서 볼 때 기술위험관리는 기술개발과 관련 산업계에 부담을 부과하는 부정적 요인이다. 따라서 발전과 국가경쟁력의 틀로써 기술을 바라볼 때 기술위험 관리는 최소한의 수준에 머물 가능성이 높다.

둘째, 기술위험관리를 발전의 프레임이 아니라 안전의 틀에서 인식하고 대응하기 위해서는 기술위험관리의 기능을 기술 개발의 육성과 지원을 담당하는 정부부처의 기능과 분리하는 것이 필요하다. 기술육성과 해당 산업의 지원을 담당하는 부처의 관점에서 볼 때 기술위험관리는 부차적인 목표나 임무일 수밖에 없으며 해당 기술 육성과 산업발전에 부정적 영향을 미치는 요인으로만 인식된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 기술위험관리를 '안전'의 틀에서 인식하고 접근하는 부처를 신설하거나 이관하는 것이 필요하다.

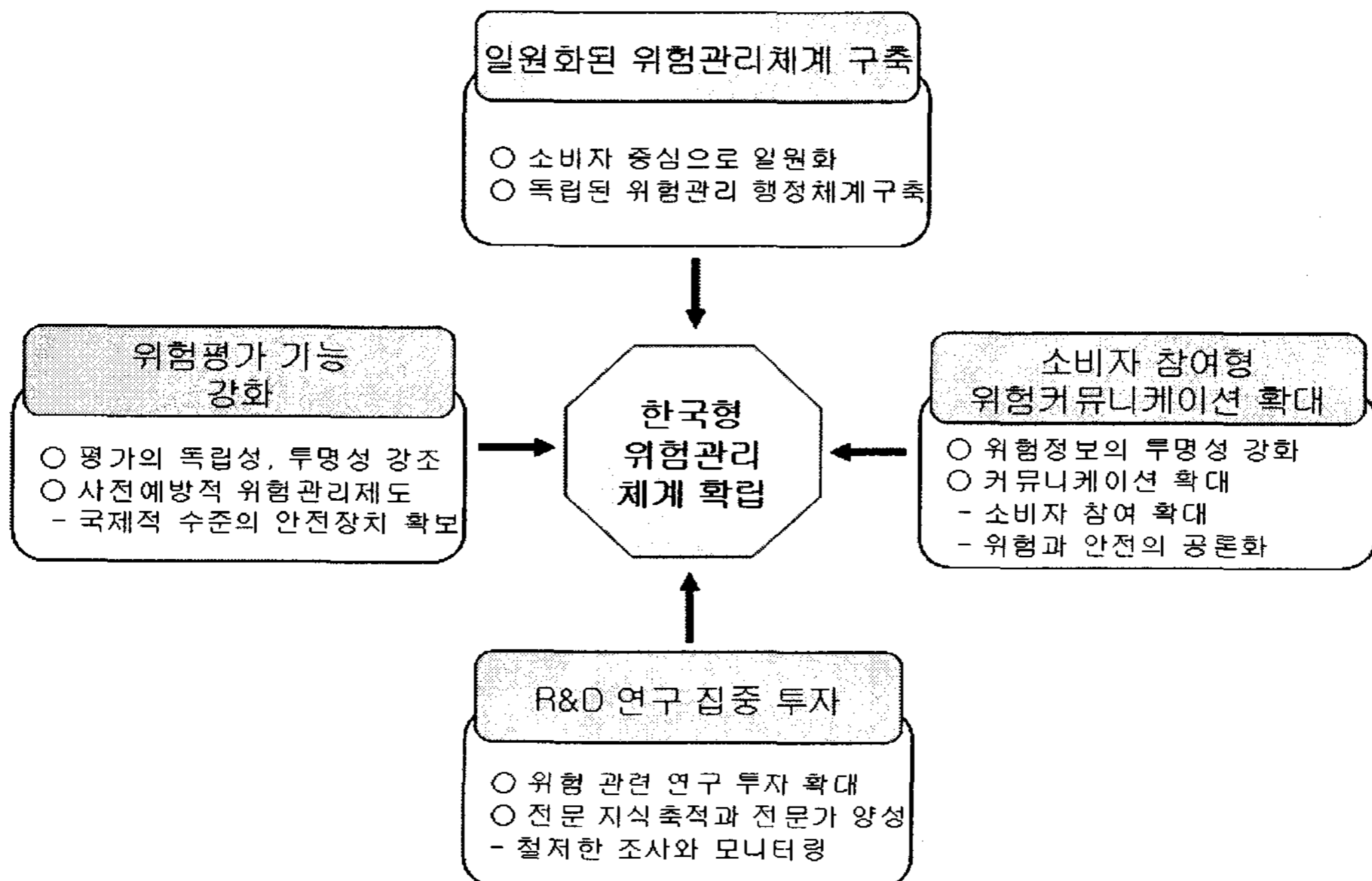
셋째, 기술영향평가가 기술의 긍정적 측면만을 부각하는 것에서 벗어나 부정적 영향으로서의 기술위험에 대한 적절한 대응이 이루어지도록 하기 위해서는 보다 참여적인 기술영향 평가가 이루어져야 한다. '참여적 기술영향평가'는 전문가나 이해당사자뿐만 아니라 일반시민들이 참여하는 방법으로 결과뿐만 아니라 과정을 중시하며 '사회적 논쟁'과 '사회적 학습'을 유발시킨다. 이를 위해서는 기술의 정당성을 강조하는 요식 행위가 아닌 과학적 근거에 따라 위험을 인식하고 평가할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 과학자, 전문가의 독립성 뿐만 아니라 위험 평가 기관의 독립성, 투명성이 강화되어야 한다.

넷째, 기술위험 커뮤니케이션의 활성화가 필요하다. 현대 사회에서의 위험은 위험 정보에 관한 의사소통 전략의 설계에 의해서도 영향을 받는다. 효과적인 위험 커뮤니

케이션은 기술위험에 대한 갈등적 관점에 대한 용인을 촉진하고 개인적 결정의 근거를 제공하며, 기술위험관리와 관련된 제도적 수단에 대한 신뢰를 만들어낸다는 점에서 적절한 위험커뮤니케이션이 필요하다. 행정부 중심의 폐쇄적 정책결정 구조는 기술위험관리의 제도나 정책수단에 대한 신뢰를 손상시킴으로써 위험에 대한 불안감을 고조시킬 가능성이 높다.

다섯째, 기술위험관리를 위한 정책과 제도의 형식화를 해결하기 위해서는 기술위험정책의 집행이 실질적으로 이루어질 수 있는 제도적 장치를 마련하는 것이 필요하다. 국제적 기구나 단체의 기술위험에 대한 규제 권고 기준 설정이나 의정서 채택과 같은 국외적 요인이 규제의 도입이나 결정에 중요한 영향을 미치기도 한다. 이러한 상황에서 기술위험 관련 제도나 정책은 정당성의 논리에 기반하여 도입될 가능성이 높아지고 제도나 정책의 형식화로 이어질 가능성이 높아진다. 따라서 정책이나 제도의 형식주의화의 문제를 해결하기 위해서는 정책집행을 담보할 수 있는 제도 설계가 필요하다.

<그림 4> 한국형 위험관리 체계 확립을 위한 과제



자료: 김영호(2007). 일부 참조.

□ 참고문헌

- 과학기술부·KISTEP. (2007). 「2006년도 나노소재 기술영향평가 보고서 Part1[사회적 파급효과]」. 한국과학기술기획평가원 연구보고서.
- _____. (2007). 「2006년도 나노소재 기술영향평가 보고서 Part2[기술동향분석]」. 한국과학기술기획평가원 연구보고서.
- 김영호. (2007). 식품안전관리의 국내외 동향. 한국식품연구원.
- 김명진. (2004). “나노기술, 꿈인가? 악몽인가?”. 「창비 웹매거진」. 6월호.
- 루이 로랑·장클로드 프티. (2006). 『나노기술, 축복인가 재앙인가?』. 이수지 옮김. 민음 in.
- 라베츠, 제롬. (2007). 『과학, 멋진 신세계로 가는 지름길인가?』. 이해경 번역. 도서출판 이후.
- 맹승희·유일재. (2005). “나노 독성의 개념 및 나노입자에 대한 위해성 평가의 필요성”. 「J. Toxicol. Pub. Health」, Vol.21. NO.2. pp.87-98.
- 송해룡 외. (2007). 『나노와 멋진 미시세계』. KSI 한국학술정보(주).
- 이영희. (2004). “나노기술을 둘러싼 사회적 쟁점 연구”. 「한국과학기술학연구」. 제4권 1호.
- 이은경. (2007). “한국의 나노기술: 초기 정책 형성과 사회적 수용을 중심으로”. 「한국과학기술학연구」, 제7권 1호.
- 이인식. (2002). “나노시대가 온다: 이인식 편. 『나노기술이 미래를 바꾼다』. 김영사.
- 조선일보. 2006. 12. 22. <나노 차원에서 법과 제도 만든다>.
- 최봉기·김경호·소대섭·유일재. (2007). “나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구동향”. 「공업화학전망」, 제10권 제1호.
- 한국과학기술정보연구원. (2007). “나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구동향”. 「Nano Weekly」. 제237호.
- 현택환(2002). “거대한 나노기술: 나노기술 개요”. 이인식 편. 『나노기술이 미래를 바꾼다』. 김영사.
- Arnall, A. (2003). *Future Technologies, Today's Choice: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics*. Greenpeace Environmental Trust.
- As/Nzs. (1999). *Australian/New Zealand Standard on Risk Management*.
- Drexler, E. & C. Peterson, 한정환 외 역(1995). 『나노 테크노피아』. 세종서적.
- Renn, Ortwehn & Graham, Peter. (2005). *Risk Governance: Towards an Integrative*

Approach. Geneva, Switzerland: International Risk Governance Council.

Roco, M. & R. Tomellini. (eds). (2002). *Nanotechnology: Revolutionary Opportunities and Societal Implications*, 3rd Joint EC-NSF Workshop on Nanotechnology.

Scalliet, Pierre. (2006). Risk, Society and System Failure. *Radiotherapy and Oncology*, 80: 275-281.

The Ecologist(2003). Special Report: Nanotechnology. *The Ecologist*. May

The ETC Group(2003). *The Big Down: From Genomics to Atoms*. The ETC Group.

The Royal Society & The Royal Academy of Engineering(2004). *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. The Royal Society & The Royal Academy of Engineering.

<http://www.nano.or.kr/bbs/news/view2.asp?board=news&page=&idx=1133&prevnumber=1132&nextnumber=1134§or=news>.

http://society.kisti.re.kr/php/sub_body4_4.php?no=9658&table=scinews06.

<http://www.dialog-nanopartikel.de/downloads.html>.