

나노재료기술의 윤리적 고찰과 관련 정책제안

이정일^{a*} · 이중원^b · 한일기^a · 정윤선^a · 서상희^c

^a한국과학기술연구원 나노융합소자센터, 서울 136-791

^b서울시립대학교 철학과, 서울 130-743

^c한국과학기술연구원 나노소재기술사업단, 서울 136-791

(2010년 7월 22일 받음, 2010년 10월 7일 수정, 2010년 10월 11일 확정)

나노재료기술이 지속적으로 발전하기 위해서는 기술 개발 못지않게 개발된 기술이 사회에 순조롭게 융납될 수 있는 윤리적 시스템이 개발되어야 한다. 이 논문에서는 나노기술의 윤리적 문제들에 대한 국내외 연구동향을 종합하고, 특히 나노재료의 환경 건강 안전성 관련 윤리적 문제들과 이를 해결하기 위한 실용적인 도구로서 전 세계적으로 개발되고 있는 이해 당사자 간의 소통·규제·인증, 안전지침을 비판적으로 개괄하여 보았으며, 마지막으로 나노재료의 안전한 사용을 위한 윤리적 시스템 구축에 관한 정책 제안을 하였다.

주제어 : 나노재료, 윤리, 소통, 규제, 인증, 지침, 정책

I. 서론

나노기술은 떠오르는 기술이면서 과학 및 실용적 혁신에서 중요한 분야이며, 재료와 소자가 인류 및 환경과 상호작용하는 방식에 대한 우리의 이해를 근본적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 변화는, 의료 진단 및 치료, 물 및 공기 오염 감지, 태양 에너지, 물정화 및 쓰레기 처리 시스템 등을 포함한 다양한 분야에서 사회에 막대한 혜택을 가져다 줄 수 있다 [1-4]. 그러나 이러한 변화는 또한 심각한 위험을 초래할 수 있다. 우선 나노크기의 물질이 자연에 이미 존재하고 있기는 하지만 인공적으로 설계 제조한 나노재료의 특성과 인체 및 환경에 미치는 영향에 대해서는 아직 명확하지 않기 때문이다. 또한 새로운 기술에 대한 대중의 인식도 기술의 지속적인 발전에 커다란 영향을 미친다. 따라서 나노재료기술의 사회·경제·정치 및 윤리적 함의가 중요하다. 나노기술이 가져 오는 기술혁신은 다른 어떤 것보다 더 복잡하고 파급효과가 크므로 새로운 기술의 도입을 관리하는 데 있어서 현재의 접근방법으로는 나노기술의 도전에 대응하기 어렵기 때문이다. 그러므로 전 세계의 정책결정자들은 범지구적이며, 조화롭고, 시민사회를 포함한 모든 이해당사자들의 참여가 이루어진, 나노기술 위험 관리 체계의 개발에 힘쓰고 있다.

교육과학기술부는 이러한 위험관리체계 개발의 일환으로 '나노소재의 안전성 확보를 위한 제조 및 활용기준 확립과 사회적 영향 연구'란 제목으로 2008년부터 21세기 프린티어 사업 나노소재기술개발사업단의 정책연구과제로 수행하고 있다. 이 연구의 주요 내용은 관련 문헌의 데이터베이스 구축, 일반대중의 나노소재기술에 대한 인식 관련 설문조사, 나노소재 국제윤리 워크숍(INEW) 개최, 이를 바탕으로 한 윤리적 시스템 개발 등이 포함된다. 이 논문에서는 지난 2009년 1월과 2010년 3월에 개최된 두 차례의 INEW 국제워크숍에서 논의된 내용을 중심으로 나노재료 기술의 윤리에 대해 고찰해 본다. 우선 나노기술의 일반적인 윤리적 문제들을 둘러보고, 나노재료의 특성, 특히 환경·건강·안전 관련 윤리적 문제들을 정리한 후 이러한 윤리문제들을 해소할 수 있는 도구로서의 소통 문제와 규제, 인증 및 지침에 대해 알아본다.

II. 나노윤리

나노기술의 발전은 최근 들어 나노기술의 윤리, 일명 나노윤리(nanoethics)라는 새로운 분야를 탄생시켰다. 이것은 응용윤리의 일종인데, 나노기술이 가져 올 인간 삶의 모

* [전자우편] jil@kist.re.kr

든 변화들과 밀접히 연관돼 있다. 가령 나노기술의 발전에 따른 경제적인 환경의 변화를 다루는 나노-경제학에서 경제적인 파급효과에 관한 고려는 사실의 영역에 속하는 문제이지만, 그것이 분배정의와 연루된다면 윤리적인 영역의 문제가 된다. 또한 나노기술의 연구 개발 및 상업화 과정에서 발생하는 지적재산권 관련 문제들은 특허법의 새로운 제정과 같은 법의 영역에 속하는 문제지만, 새로운 특허법이 공정한가 그렇지 않은가의 문제는 윤리적인 문제가 된다. 나노기술이 인체 및 환경에 어떤 영향을 가하는가를 규명하는 것은 과학기술의 고유한 연구 영역에 속하는 문제들이다. 그러나 인체 및 환경에 대해 어떤 종류의 실험행위들이 도덕적으로 용인될 수 있는가의 문제는 분명 윤리적인 문제다. 특히 가장 쟁점이 되고 있는 나노물질의 경우 그것의 독성 혹은 위험성에 관한 문제는 과학적인 연구의 대상이지만, 그와 관련된 검사를 공정하게 수행했는가의 문제이나, 나노물질의 안전한 생산과 유통을 위해 공정 과정들이 필요한 규범에 따라 통제를 받았는가의 문제는 윤리적인 문제다. 이와 같이 나노윤리는 사실상 나노기술의 발전과 관련한 모든 부문에 직간접으로 연루돼 있다.

2000년 미국 클린턴 대통령의 연두교서에서 국가 나노기술개발계획이 발표된 이후, 미국과 유럽을 중심으로 매우 활발하게 진행되고 있는 나노윤리의 최근 연구들을 살펴보면, 다음의 다섯 영역에서의 쟁점들이 중요하게 부각되고 있음을 볼 수 있다 [5-17].

1. 규범과 법의 영역

현재 신소재에 관한 특허제도가, 가령 탄소나노튜브와 같은 나노물질에 대해서도 공정하게 적용가능한지, 그리고 제조 과정상의 안전 문제와 관련된 기존의 규범들이 나노물질에 그대로 적용됐을 때 안전성을 보장할 수 있을 만큼 충분한 것인 지가 쟁점이 되고 있다.

2. 공공투자의 당위성

수많은 연구비가 경쟁적으로 나노기술에 편중 투자되고 있는 상황에서, 나노기술에 대한 정부의 과도한 투자가 다른 연구들을 희생시켜도 좋을 만큼 정당한 것인 지가 쟁점이 된다. 편중 투자는 과도한 나노연구자들의 배출, 나노관련 연구소들의 편중 현상, 그리고 과도한 학술지나 세미

나 등 나노 중심의 과학자 사회와 문화의 형성과 같은 부정적인 측면을 낳을 수 있다.

3. 형평성

선진국과 개발도상국(혹은 후진국) 간의 나노기술 격차와 그에 따른 성과물의 불공정한 분배가 쟁점이 된다. 현재 개발도상국이나 후진국의 경우 식수로 사용할 수 있는 물의 부족, 에너지 자원의 고갈, 에이즈와 같은 질병 치료에 필요한 의약품의 부족 등으로 매년 수백만에서 수십억의 사람들이 고통을 당하고 있다. 때문에 나노기술이 발달한 선진국보다 나노기술의 개발 성과물이 우선적으로 공급되어야 하는데, 현실은 이러한 분배정의를 수용하지 못하고 있다.

4. 인체 및 환경과 안전성

나노기술을 연구하는 주요 국가들이 몇 년 전부터 특히 새롭게 개발된 나노물질의 독성과 인체 및 환경에 가하는 위해성, 그리고 이런 나노물질의 관리와 관련하여 실험·연구하고 제조하는 과정의 안전성 문제 등을 주요한 문제로 거론해 왔다. 과거 식면, 유전자변형식품, 핵기술, 생물기술 등에서의 경험이 도움이 될 수 있다.

5. 사생활 침해

최근 유비쿼터스 컴퓨팅 기술의 개발과 함께 가속적으로 발전하고 있는 Radio Frequency Identity Chips (RFID) 기술과 그에 따른 개인 사생활의 통제 및 감시의 문제가 쟁점이 되고 있다. 이 외에도 랩온어칩(lab-on-a-chip, LOC) 기술의 발달로, 칩 위에 유전적 특성 분석에 필요한 여러 가지 장치들을 마이크로 머시닝 기술을 이용하여 집적시키는 것이 가능해 짐으로써, 유전자 수준에서의 개인 생체정보의 보호가 중요한 문제로 부각되고 있다.

앞서 언급하였듯이 오늘날 나노기술과 관련한 윤리적인 문제들은 단순히 윤리학자의 학문적 호기심 차원에 머물러 있지 않다. 작게는 나노물질 연구자나 생산 노동자의 건강을 지키는 문제에서 크게는 통제 불가능한 재앙으로부터 인간과 환경을 보호하는데 이르기까지, 개인의 사생활 보

호는 물론이거니와 위협으로부터 공공 사회의 안전을 지키는 데까지, 그리고 규범이나 법을 제정하는 데서 경제 발전을 위한 안전한 성장 동력을 구축하는 문제에 이르기까지 윤리가 관련되지 않는 부분들이 존재하지 않을 정도다. 이제 나노윤리는 나노기술의 책임있는 연구와 지속가능한 발전을 위한 필수적인 선행조건이 되어 가고 있다.

이러한 문제의식의 공유 하에 2007년 영국에서는 왕립 학회, 투자 자문사인 Insight Investment, 나노기술 산업 연합회(NIA) 등이 중심이 되어 ‘책임있는 나노강령 위원회’(Responsible Nano Code Initiative)가 만들어졌고, 2008년 5월 이 위원회를 통해 ‘책임있는 나노강령’의 골간이 발표됐다. 이보다 조금 앞선 2008년 2월에는 유럽연합 집행위원회("Commission of the European Community" or "European Commission")가 ‘나노과학과 나노기술에 관한 책임있는 연구를 위한 행동강령(Code of Conduct for Responsible Nanosciences and Nanotechnologies Research)’을 채택하여, EU 회원국 내의 모든 대학과 연구소들 그리고 기업들이 이를 수용하도록 권고하였다.

유럽연합의 나노연구 행동강령은 대상과 목표, 일반원칙, 수행지침 등을 포함하고 있는데 그 중에서도 아래 7개의 일반원칙은 이 강령의 근간을 이루고 있다.

5.1. 의미(Meaning)

나노연구활동은 대중이 이해할 수 있어야 하며, 인간의 기본권을 보장해야 하고, 연구의 계획 및 실행, 연구결과와 보급 및 이용의 전 과정에서 시민과 사회의 안녕과 행복이 우선시되어야 한다.

5.2. 지속가능성(Sustainability)

나노연구활동은 안전하고 윤리적이어야 하며 지속가능한 발전에 기여해야 하고, 이런 의미에서 공동체의 지속가능한 목표와 유엔의 ‘새천년 발전목표’와도 부합하여야 한다. 인간, 동물, 식물 및 환경에 해가 되거나 현재와 미래 그 어느 때라도 생물학적, 물리적 또는 도덕적 위협을 유발하여서는 안 된다.

5.3. 사전예방(Precaution)

나노연구활동은 사전예방의 원칙에 입각하여 수행되어야 한다. 이는 환경, 건강, 그리고 안전에 대한 위험요소를 예측하며, 이들이 보호될 수 있도록 예방조치를 취하고 동시에

사회와 환경의 이익을 위한 발전을 장려함을 의미한다.

5.4. 포괄성(Inclusiveness)

나노연구활동에 대한 관리(조직)는 모든 이해 당사자들에 대한 공개성, 투명성, 그리고 정보에 대한 접근의 권리 존중 등의 원칙에 의해 실행되어야 한다. 나노연구활동의 종사자이든 나노연구활동을 우려하는 시민이든 모든 당사자들이 연구정책의 결정과정에 참여하는 것이 허용되어야 한다.

5.5. 우수성(Excellence)

나노연구활동은 연구의 진정성과 올바른 실험실행 등의 의미에서도 최상의 과학적 기준을 갖추어야 한다.

5.6. 혁신(Innovation)

나노 연구활동에 대한 관리(정책)는 혁신과 성장을 위해 창의성, 유연성, 기획능력을 최대한 보장해야 한다.

5.7. 책임성(Accountability)

나노연구자들과 연구기구들은 그들의 연구가 현 세대뿐 아니라 미래의 세대에 이르기까지 사회와 환경, 그리고 인체의 건강에 끼치는 영향에 대해 책임을 질 의무를 가진다.

아직은 더 구체적으로 다듬어져야 할 행동강령이지만 그것의 필요성이 현존한다는 면에서 나노기술 연구개발의 세계 7대 투자국인 우리에게도 시사하는 바가 매우 크다 하겠다.

III. 나노재료와 윤리

나노기술이 다루는 것은 주로 나노재료이므로 앞 절에서 소개된 나노윤리는 곧 나노재료의 윤리라고 할 수 있다. 여기서는 주로 나노재료의 환경, 건강 및 안전에 관한 윤리적 문제점을 중점적으로 조명한다.

나노재료의 윤리적 함의에 대한 연구가 필요한 첫째 이유로 공간에 분포되어 있는 나노입자나 나노튜브가 환경·건강·안전 등에 미치는 영향이 위해할 수 있음을 들 수 있다. 나노입자들은 마이크론 크기의 입자들과 달리 인체에 미치는 독성이 화학적 성질뿐 아니라 입자의 크기, 형상, 면적 등에 따라서도 달라진다고 알려져 있다 [18]. 이는 나

노입자의 위험성이 각 공정에 따라 달라질 수 있음을 의미하는데, 문제는 현재 인류가 가지고 있는 나노입자에 노출되었을 때 일어나는 현상에 대한 정보가 부족할 뿐만 아니라 체계적인 정보축적(data base) 역시 부족하다는 것이다. 나노물질의 독성에 대한 연구를 위해서는 대단히 고가의 장비가 필요할 뿐만 아니라 장기간에 걸쳐 수행되어야 한다는 어려움이 있기는 하나, 나노재료가 인체나 환경에 미치는 영향에 관한 다양하고 구체적인 연구결과를 확보하여 데이터베이스를 만드는 활동이 무엇보다 시급하다 할 수 있다.

둘째, 나노재료에 대한 윤리적 측면에서의 연구가 중요한 다른 이유는 나노입자나 나노튜브 등이 인체에 유독한지 여부가 분명하지 않다는 것이다. 지금까지 알려진 바에 의하면 탄소나노튜브(carbon nanotube : CNT)가 산포된 물에 사는 물고기들의 머리에는 CNT가 축적되고, 또 생체에 CNT가 들어갔을 때 세포들을 죽이는 현상이 발견되기도 하였다. 그러나 비슷한 형상인 탄소나노혼(carbon nano horn)들은 생체에 영향이 없다고 보고되기도 한다 [19]. 다른 예로는 나노입자가 아직 공기 중에 자유롭게 있을 때와 제품이 되었을 때 어떻게 다른지에 대한 연구도 충분하지 않다. 이런 상황으로 미루어 나노입자들이 주변이나 인체에 어떻게 전파되는지의 과정, 위해성을 측정하는 방법의 표준화 등에 대한 연구가 시급하다. 이렇게 나노물질이 인체에 미치는 위해성이 분명하지 않은 상태에서 연구자들은 생명윤리의 관점에서 연구방법을 모색해야 한다.

셋째, 나노재료를 연구하는데 있어 연구자로서의 윤리적 자세가 필요한 또 다른 이유는 실험결과를 해석하는데 상당한 주의가 필요하기 때문이다. 즉 나노구조를 가진 물체들은 체적대비 표면이 크기 때문에 표면이나 접촉에 의한 영향을 많이 받는다. 실제로 이러한 사실을 간과하고 분석한 과거의 많은 나노선 혹은 분자전자공학 관련 실험결과들은 단순히 잘못 해석되었거나 많은 오류를 담고 있다. 이러한 면에서 측정방법 확립과 측정관련 표준화가 대단히 중요함을 알 수 있다. 그러나 다른 한편으로 연구자들은 새로운 결과를 빨리 발표하기를 원하는 경우가 많다. 따라서 잘못하면 자칫 오류가 많은 연구결과를 양산하는 잘못을 범하기 쉽다. 나노과학기술 연구자들은 자신의 연구결과가 정확하고 객관적인지 여부에 대해 항상 검증하는 윤리적 자세를 가져야 할 것이다 [20].

이러한 면에서 연구자들은 나노구조로 이루어진 시스템

은 많은 면에서 불확실하고 복잡하다는 점에 착안하여 나노과학기술이 가진 긍정적인 면과 위협적인 면을 동시에 보아야하며 연구자로서의 윤리적 자세를 가지고 윤리·사회·법적 측면에서의 연구에 관심을 가지는 한편 나노과학기술의 발전에 대해 외부 대중과 혁신과 윤리의 상관관계에 대해 논의하는 자세를 가져야 할 것이다. 이 때 나노기술의 위해가능성에 너무 경도되어 미래에 대해 나쁜 환상을 가지지 않도록 주의하는 것 역시 중요할 것이다. 만약 나노기술 연구자들이 이러한 노력을 게을리한다면 나노기술 역시 핵기술, 석면, 유전자변형 식품과 같은 어려움에 당면할 수 있다.

IV. 시민사회 의식구조

최봉기 등이 발표한 ‘나노기술의 대중 인식도 및 태도 연구’는 2008년 이전까지의 국내외 동향을 잘 요약하고 있다 [21]. 최근에는 나노기술 혹은 그 위험성에 대한 대중의 인식을 분석하는 데에 사회학자들이 보다 복잡한 모델을 사용하게 되었고 [22], 특정 응용분야, 예하면 에너지와 건강 분야를 선택하여 분석한다든지 [23] 심리분석을 동원하거나 [24], 나노영든지나 상징한 모대한 고찰도 진행되고 있다 [25].

나노소재기술개발사업단의 “나노소재의 윤리적 사용 시스템에 대한 연구”의 일환으로 2008년도 나노코리아 전시회 참가자/방문자를 대상으로 실시한 설문조사에서 [26] 1,159명의 응답자 중 87.6%가 나노재료기술은 전체적으로 우리사회에서 이용분야도 많고 이로울 것이라고 인식하고 있는 것으로 나타나(Fig. 1 참고), 2005년도 KISTEP에서

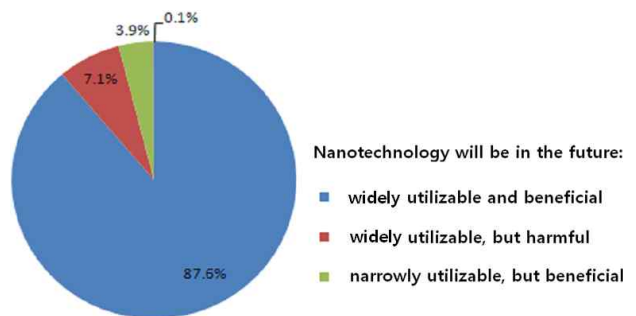


Figure 1. 87.6% answered that nanotechnology will be widely utilizable and beneficial in the future (CNMT 2008) [26].

실시한 설문조사에서의 결과 83.8%보다 약간 높게 [27, 28], 2007년 서울대팀의 조사결과인 77% [29]보다 상당히 높게 나타나고 있다. 또 2008년도 나노기술에 대한 미국인의 인식도 및 태도조사에서 나타난 긍정적인 측면 55%보다는 월등히 높게 나타나고 있어 우리사회가 나노재료기술에 대하여 상당히 긍정적으로 생각하고 있음을 알 수 있었다. 나노기술의 안전성에 관해서도 미국이나 일본에 비해 높은 신뢰를 나타내고 있는 것으로 나타났다 [27] (Fig. 2, 3 참고). 이는 우리나라 일반인들이 과학에 대한 신뢰가 깊으며 정부의 과학연구투자에 신뢰를 갖고 있다는 것을 의미한다.

나노재료의 안전성에 관하여는 나노재료의 관련지식이 많은 대상자의 경우 평균 79%가 나노재료는 큰 위험성을 없을 것이라고 응답하여 나노재료의 관련지식이 거의 없는 대상자의 의견 평균 66%보다 높게 나타나, 나노재료의 관련지식이 많을수록 안전하다고 인지하고 있음을 알 수 있었다. 이는 관련지식이 많을수록 나노기술에 대한 신뢰도가 높다는 소위 “친숙도 가설(familiarity hypothesis)”을 뒷받침한다. 그러나 나노재료를 적용하는 제품의 생산·유통·판매에 대하여는 90% 이상이 정부차원의 규제·관리,

정부차원의 지원·협조, 기업차원의 자율적 규제·관리가 필요하다고 응답하였고, 이에 따라 정부와 관련 기업 공히 규제·관리 지침을 수립할 필요가 있음을 알 수 있었다. 또한 현장에서 나노재료를 취급하는 대상자에 대하여, 소속 기관이 특수건강검진을 실시하는 비율은 일반건강검진 실시 비율에 비하여 1/2 수준, 노출평가 실시 비율은 10% 수준, 노출을 막기 위한 공학적 대책은 50% 수준에 불과하여 이에 대한 적극적 대처가 필요할 것으로 분석되었다.

최근 미국과 유럽에서의 연구조사에 따르면 심층적 분석을 할수록 기존의 설문결과 패턴이 변하고 있음이 나타난다. 기존결과에 따르면 일반 대중이 전문가나 기업보다 나노재료의 안전성에 대해 더 우려하고 있는 것으로 나타났으나(친숙도 가설) [30], 환경이나 인체에 대한 장기적인 영향 등의 일부 주제에 대해서는 오히려 전문가들이 더 우려한다고 나타나는 것이 그것이다 [31]. 일반 대중의 인식을 사회·문화적인 맥락 속에서 분석하려는 경향도 현저히 눈에 띄인다. 가장 두드러진 문화적 배경의 척도로 종교적 신념을 기준삼아 조사한 결과 종교적일수록 나노기술에 부정적이라는 조사 보고도 있다 [32]. 서구의 경우 종교란 기독교를 의미하므로 우리나라와 같이 다종교사회에서는 어떤 문화적 차이점을 보이는 가도 재미있는 비교가 될 수 있을 것이다. 그 외에도 특정한 이념 또는 이익집단을 대상으로 나노기술에 대한 교육의 전과 후로 나누어 비교하는 결과들도 있다 [33].

극심한 수도권 집중현상, 세계적으로 보기 드문 다종교 현상 등 우리나라의 사회적·문화적 특성을 고려하면 2005, 2007, 2008년에 걸쳐 시행된 나노기술의 인식에 관한 우리나라 설문조사들은 효과적이고 실용적인 결과를 유도하기 위해서 다음의 점에서 개선될 여지를 남기고 있다: 1) 설문작성 체계 수립(concept), 2) 조사대상의 체계적 선택(sampling), 3) 정책방향에 도움이 되는 효과적 분석방법 개발.

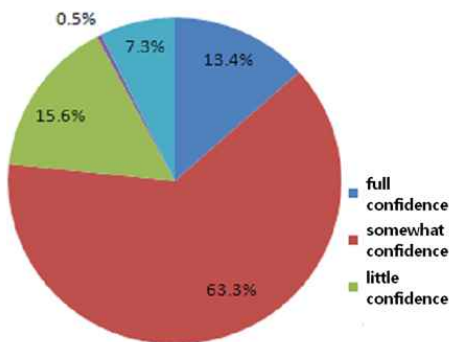


Figure 2. Survey results of the safety of nanotechnology (CNMT 2008) [26].

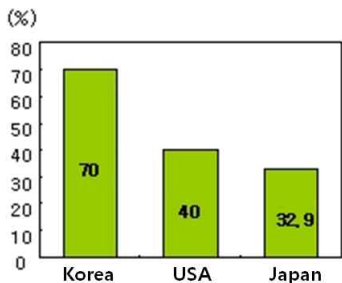


Figure 3. Positive reply in survey results about the safety of nanotechnology in Korea, USA, and Japan (KISTEP 2005) [27].

V. 소 통

소통은 흔히 대중 소통이라 하여 연구자와 대중 간의 소통을 의미하지만, 소통 상대자에 따라 소통의 종류를 분류해 보면 연구자 간의 소통, 다체 간 소통, 학산간 소통, 국민 대 정부, 연구자 대 대중 등으로 나눌 수 있다.

연구자 간의 소통에는 국제 나노평의회(ICON)가 수행하

고 있는 ‘위키나노’ 활동을 꼽을 수 있다 [34]. 유사한 실험 결과가 시간 간격을 두고 발표되었을 때 오히려 나중에 발표된 연구결과가 연구계의 주목을 더 받는 일이 생기는 것을 방지하고 관련 연구결과를 데이터베이스화하여 실시간으로 연구자들이 접할 수 있게 하자는 것이다. 아리조나 주립대학의 Guston [35,36]은 “예비 협치”(anticipatory governance)란 개념을 내세워 나노기술의 연구기획 단계부터 인문사회 전공자가 나노과학기술 실험실에 투입되어 함께 사회적 영향과 윤리적 고찰을 진행해야 한다고 주장한다. 일본 오사카 대학에서는 대학원 수준에서 학제간 소통과 학계 및 산업계간 소통이 대중과의 소통 이전에 행해져야 한다고 주장하기도 한다 [37-39].

경제협력개발기구(OECD)에 설치된 나노기술작업반(WPN)에서는 대중소통 및 참여가 나노기술의 지속적이고 책임있는 발전을 위한 중요한 정책 고려사항임을 인식하여 6개 수행과제 중 하나로 삼고 있으며, 이를 위한 워크숍 등을 통해 다음과 같이 나노기술의 소통을 위한 행사 기획에 다음 8가지 주안점을 작성하였다 [40].

1) 배경·맥락을 확인하라, 2) 목적을 명확히 하라, 3) 참가자를 확인하라, 4) 과정을 기획하라, 5) 활동을 선택하라, 6) 주관자를 확인하라, 7) 목표를 인지하고 성공여부를 확인하라, 8) 배우고 적응하라. 각 항목을 자세히 설명하면 다음과 같다.

1) 배경 및 맥락에는 사회, 문화, 역사, 정치 및 경제적 맥락이 있고, 또한 조직, 기구로서의 맥락과 맥락 그 자체 및 그 활동의 주체, 주체의 자격, 관심있는 그룹에 대한 확인이 필요함. 2) 목적에는 나노기술에 대한 소통인지, 그 응용 및 과급효과에 관한 것인지에 대한 구분이 있고, 특정 주제에 대한 친착인지, 모니터링이나 평가인지에 대한 목표가 명확해야 함. 3) 참가자에 대해서는 목적에 알맞은 규모인지, 그 활동에 적절한 참가자인지, 참가자는 공평하게 구성되어있는지 등의 고려사항이 있음. 4) 과정은 활동의 준비부터, 현실적인 일정과 자원 활용의 극대화, 후속조치 등이 포함됨. 5) 활동의 선택에는 강연, 토론, 실습 및 참관 등 목적에 적절한 활동 종류의 선택이 있음. 6) 주관자 선정에는 왜 특정 그룹의 주관자가 협력해야하는지에 대한 고려. 7) 성공을 위해서는 결과물이 무엇이고, 어떤 기준으로 성패를 결정할 것인지에 대한 고려가 필요하며, 8) 활동을 통해 배울 수 있는 것이 무엇이며 이를 향후 활동에 여하히 활용할 것인지에 대한 방법론이 필요함. WPN에서는 이러

한 점검목록을 회원국의 행사에 적용한 후 이 결과를 정리하여 효과적인 소통행사를 위한 지침을 제정할 예정이다.

한편 네덜란드의 기술평가연구소인 라테나우 연구소(Rathenau Institut)는, 네덜란드의, 특히 정부의 입장에서 나노대화에 필요한 10 가지 교훈을 도출하였다 [41]. (1) 위해성에 대한 논의와 나노기술의 전반적인 사회적 영향에 대한 논의를 구분할 것. (2) 위해 문제를 적극적으로 언급할 것. (3) 정책개발 과정에 NGO를 참여시킬 것. (4) 나노기술 제품, 위해관리 전략 및 아직 불확실한 부분들에 대해 명확한 정보를 제공할 것. (5) 광범위한 지지를 얻는 의제를 만들 것. 이는 생산적인 공공토론의 선행조건이다. (6) 기존의 의제를 기초로 새로운 대화를 기획할 것. (7) 작은 규모의 NGO도 참여할 수 있게 하여 역량을 키울 것. (8) 개별 사회단체의 고유 의제에도 개방적이어야 함. 다양한 토론을 억제하는 것은 불신만을 키운다. (9) 나노기술의 법적·사회적·윤리적 논점에 대해 대중에게 정확한 정보를 줄 것. (10) 소규모 참여활동을 독려하여 대중이 의견개진할 기회를 줄 것(finger on the pulse).

우리나라에서는 나노기술 개발에 대한 정책과정에서 시민들이 효과적으로 참여할 수 있는 모델을 발굴하기 위하여 ‘소비자 모니터링’이라는 방식을 설계하고 그 실행결과를 평가하였다 [42,43]. 이공계 출신 주부들로 구성된 모니터 요원 22명이 일상생활에 사용되는 나노제품 167개를 모니터링하였다. 모니터 요원들은 이번 경험을 토대로, 정부가 나노제품의 안전성을 입증해 주는 인증제도를 조속히 도입할 것을 촉구했으며, 기업이 나노제품의 설명서에 상세하고 신뢰감있는 내용을 담을 것을 요구했다.

이번 모니터링의 경험은 향후 나노기술에 대한 한국의 시민참여 모델 발굴에 두 가지 측면에서 시사하는 바가 크다. 먼저 국내 모니터링을 통해 나타난 소비자의 인식은 기존의 선호취합 방식에 따른 설문조사 결과와 다르다는 점을 발견할 수 있다. 이는 나노기술에 대한 인식과 태도는 주어진 조건과 환경 속에서 얼마든지 다양하게 표출될 수 있다는 사실을 보여준다. 둘째, 이번 모니터링 결과는 속의적 시민참여 모델에 보완적으로 적용할 수 있는 내용을 담고 있다. 시민들이 모니터링처럼 스스로 문제점들을 도출해 낸다면, 기존의 속의적 방식에 비해 좀 더 구체적이고 현실에 와 닿는 질문과 제언을 제기할 수 있을 것이다.

나노소재사업단에서 최근에 홍보 방법으로 시도한 세 가지는 [43], 첫째는 일반 시민을 대상으로 ‘나노란 무엇인

가?’, ‘나노기술의 사회적 영향’이라는 두 가지 주제 중 선택하여 짧은 비디오를 제작 경연하게 하고 우수작 선정 평가에는 전문가 평가 외에 인터넷을 통한 대중평가도 채용하였다. 둘째로는 ‘네이버’에 나노소재 이미지를 소개하여 대중과 소통하고자 하는 방법이었는데 2회 게재하였으며 감상소감을 댓글로 달게 하였다. 셋째로는 강의용 슬라이드 – ‘친환경 나노기술과 자연’의 제작인데, 차년도(2011년)에 실제 대중강연에 활용할 예정이다. 비디오 경연대회에는 응모작이 생각보다 적게 출품되어 행사홍보 방법에 문제가 있었거나, 아직은 일반대중이 나노기술에 대한 관심이 그리 크지 않다고 할 수 있다. 아니면 우리나라의 일반대중이 이러한 행사에 익숙지 않기 때문일 수도 있다. 네이버 영상소개가 2회로 끝난 것은 지적재산권 문제와 관련이 있어 소통에도 지적재산권이 걸림돌이 되고 있음을 알게 되었다.

VI. 규제, 인증 및 지침

소통과 함께 윤리적 정당성을 현실에서 효과적으로 구현하는 장치들이 규제, 인증 혹은 지침들이다. 지난 5년간 나노규제 연례 컨퍼런스를 조직해 온 스위스의 Innovation

Society는 효과적인 규제 개발을 위해 정보 피라미트를 제시하였다(Fig. 4 참고) [44-47]. 이 나노정보 피라미트는 가치사슬 내에서 사용자 중심의 정보자료를 제공하는 것으로 그 1단계로는 광범위한 물질 안전성 데이터 문서이다. 2단계는 이에 기초한 물질 안전성 데이터 시트(MSDS)이고 3단계는 제품에 대한 이용자 중심의 정보를 제공하는 제품 설명서가 되며, 4단계는 나노 표지의 부착이다. 제품에 부착시키는 표지는 제조된 나노물질을 함유하는 나노제품의 특성이나 환경, 건강 안전성에 대한 물성을 표시하는 함축적인 방법이 된다.

당국과 연구자로부터 제공되는 물질 안전성 관련 자료는 표준화, 시험 지침의 제정 등이 선행되어야만 공급이 가능하다. OECD의 제조된 나노물질 작업반(WPMN)이 14종의 대표물질을 선정하여 관련 작업을 하고 있으며 [48], 나노물질의 제조, 특성 측정 등의 표준화는 국제표준기구(ISO) 나노기술위원회(TC 229)이 작업을 진행하고 있다 [49]. 그런데 이러한 작업 특히 독성학 관련 실험은 장기간의 시간을 소요하므로 작업속도는 완만할 수밖에 없다. OECD의 나노기술작업반(WPN)은 이러한 현실에도 불구하고 정책적으로 안전을 보장할 수 있는 규제 방안을 모색하고 있다 [40].

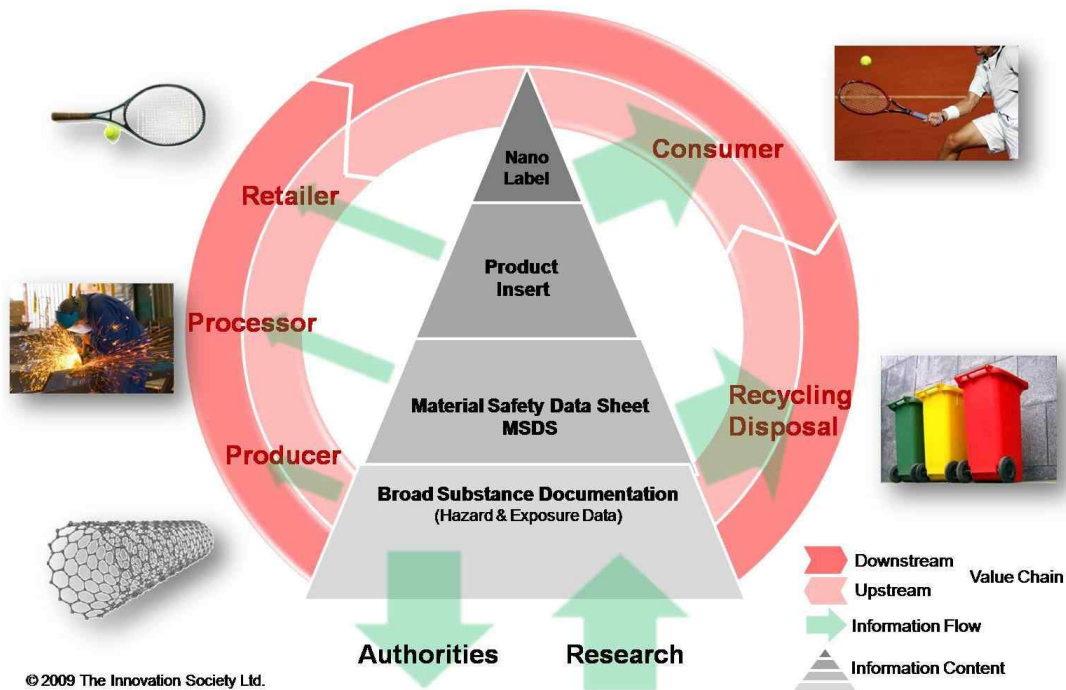


Figure 4. Chain scheme of information pyramid for efficient development of regulation proposed by Innovation Society, Switzerland [45-47].

인증 분야에는 현재 세나리오스(CENARIOS)가 유일한 상업적 인증표준이다 [50]. 스위스의 Innovation Society와 독일의 TÜV/SÜD가 합작한 이 제도는 열 세 단계의 위험관리 시스템으로 해당 제품의 생산과정에서 유통까지의 위험 관리를 인증하며, 유효기간은 1년이다. 타이완에서는 국가에서 나노제품임을 인증하는 '나노마크(Nanomark)'가 시행되고 있어 기업으로부터 호평을 받고 있다 [51]. 그러나 이 제도는 단지 어떤 제품에 나노기술이 적용되었는지의 여부만 인증하며, 환경, 건강, 안전에 대해서는, 예를 들면 '피부 가려움증이 있다' 정도의 매우 경미한 사항만 인증할 뿐 근본적인 정보나 인증을 못하고 있다. 이는 물론 앞서 언급한 대로 그러한 자료는 막대한 시간과 자원이 소요되는 제도이다. 규제나 인증의 개발은 이를 뒷받침할 수 있는 과학적 정보의 부족으로 난항을 겪고 있는 것이 사실이다.

그럼에도 불구하고 나노물질이 생산되고 있는 연구실이나 기업의 작업장에서 예방 원리에 근거한 안전성 보장을 위한 관리 시스템이나 안전 지침 등이 이미 30여개 존재한다 [52]. 미국의 듀폰(Du pont)사와 시민단체인 환경방어기금(Environmental Defense Fund)은 나노물질의 책임 개발·생산·사용·유통 즉 전 주기 평가를 위해 6 단계로 구성된 '나노물질의 위해성 관리 열개'를 개발하여 ISO TC229의 표준문서로 제안하였다 [53]. BASF [54], Bayer [55] 등 기업에서도 자발적 규제 제도를 시행하고 있다.

우리나라에서도 지식경제부 기술표준원에서 작업장/연구실 안전지침을 제정한 바 있다 [56]. 11개 항목으로 구성되어 있고 비교적 간결한 이 지침은 부록으로 작업장 점검 목록과 나노물질의 독성이 첨부되어 있으며, 의무적이 아닌긴 하지만 이를 기초로 기업이나 대학교 연구소 등의 기관에서 나노물질 취급에 대한 안전의식을 고취하였다는 데 의의가 있으며 유사한 자발적 안전지침이 기업이나 기관에서 시행될 것으로 전망된다.

VII. 결 론

이 논문에서는 나노기술의 윤리와 특히 나노재료의 안전성 관련 윤리 문제 및 이를 해결하기 위한 구체적인 수단으로서의 소통과 규제, 인증, 안전지침 등에 대한 국내외 동향을 종합하여 보았다. 우리나라는 2000년 미국의 NNI 발표와 거의 동시에 나노기술의 막대한 경제, 산업적 파급효

과를 예견하고, 나노기술종합발전계획 수립, 나노기술개발 촉진법을 제정, 나노기술연구협의회를 설립하였으며, 국가 팹시설 등 연구지원하부구조 구축에 투자하여, 여러 가지 연구개발 지표에서 세계 선두그룹에 속하는 성과를 기록하고 있다. 그리고 일반대중의 나노기술에 대한 인식도 선진국에 비해 크게 긍정적이다. 그러나 책임있고 지속적인 나노기술 혹은 나노재료기술의 발전을 위한 정책 연구나 안전성 연구 등에 대한 공공투자는 선진국에 비해 다소 미흡한 것이 사실이다. 설문조사에서도 정부 혹은 기업차원에서 안전성 관련 정책·규제·지침의 제정이 필요하며 이를 위해서 독성 연구 뿐 아니라 정책 연구나 경제 사회영향에 대한 연구가 선행되어야 한다는 것이 대다수 응답자의 의견이었다. 국내 부처간, 연구소간 협력 관계 구축이 시급하고, 대중과의 소통도 매우 중요하다. 특히 현재까지는 긍정적인 대중의 인식이 최근 국제적으로 활발해지고 있는 안전성 관련 연구와 토의의 영향으로 바뀔 수 있는 가능성이 있기에, 이러한 협력체제와 소통 통로의 구축은 더욱 시급하다. 이에 다음과 같은 7개 항목에 대한 정책 제안을 한다.

- 1) 나노물질의 안정성과 관련하여, 신뢰할 수 있는 무수한 정보들의 집적과 함께 범지구적 공유 및 누구나 쉽게 접근할 수 있는 개방성을 보장하는 정보 네트워크를 구축하는 국제활동에 참여할 필요가 있으며,
- 2) 나노기술의 위험 평가 및 관리와 관련한 중장기 로드맵 작성이 필요하고,
- 3) 대만의 나노인증마크 제도보다 개선된 우리나라 실정에 잘 맞는 나노기술제품 인증제도의 도입이 필요하며,
- 4) 국내 부처간, 연구소간 협력 관계 구축이 시급하고,
- 5) 독성에 관한 기술적 연구 외에도 위험에 관한 윤리적이고 정치적인 쟁점들에 대한 연구가 동시에 시행되어야 하며,
- 6) 장기적으로 대중들의 참여를 견인하기 위해 주기적인 설문조사 등을 통해 대중의 인식단계를 조사할 필요가 있으며,
- 7) 사업장·실험실에서의 안전 지침제정 및 시행과 나노안전성 문제에 관한 한 연구자와 대중 간의 소통도 매우 중요하다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 '나노소재기술개발사업단'의 지원(과제명: 나노소재의 윤

리적 사용 시스템에 대한 연구, 과제번호: 2009K000481)으로 수행 되었습니다. 이정일은 OECD WPN 활동을 지원해 준 교육과학기술부에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] I. K. Han and J. I. Lee, *J. Kor. Vac. Soc.* **18**, 468 (2009)
- [2] Y. S. Kim, W. S. Song, S. Y. Lee, W. C. Choi, and C. Y. Park, *J. Kor. Vac. Soc.* **18**, 229 (2009)
- [3] I. K. Han, J. D. Song, and J. I. Lee, *J. Kor. Vac. Soc.* **17**, 523 (2008).
- [4] Y. Song and S. J. Kang, *J. Kor. Vac. Soc.* **18**, 488 (2009).
- [5] J. Schummer, *Nanotechnologies, Ethics and Politics* (UNESCO, Paris, 2007), pp.79-98.
- [6] T. Swierstra and A. Rip, *Nanoethics* **1**, 3 (2007).
- [7] R. Sandler, *Nanotechnology: The Social and Ethical Issues* (Woodrow Wilson International Center for Scholars, Washington DC, 2009), pp. 5-59.
- [8] J. E. Hutchinson, *ACS Nano* **2**, 395 (2008).
- [9] E. Fischer, *Technology in Society* **27**, 321 (2005).
- [10] M. C. Roco and W. S. Bainbridge, *J. Nanoparticle Res.* **7**, 1 (2005).
- [11] M. C. Roco and W. S. Bainbridge, *J. Nanoparticle Res.* **5**, 181 (2003).
- [12] T. Fleischer and A. Grunwald, *J. Cleaner Production* **16**, 889 (2008).
- [13] T. Fleischer, M. Decker, and U. Fiedler, *Technological Forecasting & Social Change* **72**, 1112 (2005).
- [14] D. Bowman, *Technology in Society* **29**, 307 (2007).
- [15] C.-F. Chau, S.-H. Wu, and G.-C. Yen, *Trends in Food Sci. & Technol.* **18**, 269 (2007).
- [16] A. Wiek, L. Gasser, and M. Siegrist, *Futures* **41**, 284 (2009).
- [17] D. den Boer, A. Rip, and S. Speller, *Technology in Society* **31**, 295 (2009).
- [18] Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties, Royal Academy of Engineering London (2004).
- [19] *Nanoengineering News*, 240 (2007)
- [20] 임한조, 이정일, *물리학과 첨단기술* **17**, 58 (2008).
- [21] 최봉기, 김경호, 소대섭, 박희제, *공업화학 전망*, **11**, 62 (2008).
- [22] S. C. Currall, *Nature Nanotechnology* **4**, 79 (2009).
- [23] N. Pidgeon, B. H. Harthorn, K. Bryant, and T. Rogers-Hyden, *Nature Nanotechnology* **4**, 95 (2009).
- [24] T. Satterfield, M. Kandlikar, C. E. H. Beaudrie, J. Conti, and B. H. Harthorn, *Nature Nanotechnology* **4**, 752 (2009).
- [25] C. Toumey, *Nature Nanotechnology* **5**, 3 (2010).
- [26] 나노소재 사회적 영향보고서(1차년도), 나노소재기술 개발사업단, 2009.
- [27] 2005년도 나노기술영향평가 보고서, KISTEP/과학기술부, 2005년 12월.
- [28] 한국, 일본, 미국, 영국의 나노기술 인식도 설문조사결과 비교, 나노위클리, 2006.2.24,
- [29] 이정진, 김영훈, 배은주, 이수승, 광병규, 최경희, 이종협, *J. Environ. Toxicol.* **23**, 247 (2008).
- [30] M. Siegrist, A. Wiek, A. Helland, and H. Kastenzholz, *Nature Nanotechnology* **2**, 67 (2006).
- [31] D. A. Scheufele, E. A. Corley, S. Dunwoody, T.-J. Shi, E. Hillback, and D. H. Guston, *Nature Nanotechnology* **2**, 732 (2007).
- [32] D. A. Scheufele, E. A. Corley, T. Shih, K. D. Darlymple, and S. S. Ho, *Nature Nanotechnology* **4**, 91 (2008).
- [33] D. M. Kahan, D. Braman, P. Slovic, J. Gastil, and G. Cohen, *Nature Nanotechnology* **4**, 87 (2008).
- [34] Kristen M. Kulinowski, The 1st International Nanomaterials Ethics Workshop (INEW2009) - Risk Management and Governance of Nanomaterials, KIST, Seoul, January 20, 2009. : <http://icon.rice.edu/>
- [35] D. H. Guston, *Nature* **454**, 940 (2008).
- [36] D. H. Guston, The 2nd International Nanomaterials Ethics Workshop (INEW2009) - Good Practices, Training, and Dialogue for Governance of Nanomaterials, KIST, Seoul, March 21, 2009.

- [37] T. Itoh, H. Akai, H. Ogawa, W.A. Diño, S. Ichikawa, J. Mater. Ed. **28**, 15-20 (2006).
- [38] <http://www.sigma.es.osaka-u.ac.jp/pub/nano/pub/nanokiko/html/english.html>
- [39] T. Itoh, The 2nd International Nanomaterials Ethics Workshop (INEW2009) - Good Practices, Training, and Dialogue for Governance of Nanomaterials, KIST, Seoul, March 21, 2009.
- [40] <http://www.oecd.org/sti/nano>
- [41] Rinie van Eat, 'Ten lessons for a nanodialogue,' Delft OECD Workshop, Oct. 30, 2008, <http://www.oecd.org/dataoecd/36/25/423265438pdf>.
- [42] 김훈기, The 2nd International Nanomaterials Ethics Workshop (INEW2009) - Good Practices, Training, and Dialogue for Governance of Nanomaterials, KIST, Seoul, March 21, 2009.
- [43] 나노소재 사회적 영향보고서(2차년도), 나노소재기술 개발사업단, 2010.
- [44] 이정일, 제5회 나노규제 국제학술회의(5th Nano-Regulation Conference) 참관기, Nano Weekly, 제 336호, 2009. 12. 24.
- [45] 김경호, 나노물질-나노제품의 안전성 담보를 위한 '나노정보 피라밋', 나노정책브리프 제14호, 2010. 4. 13. <http://nanonet.info>
- [46] The "Nnao Information Pyramid": The Innovation Society Ltd. (St. Gallen), www.innovationsociety.ch, January 2010.
- [47] Conference Report 5th Int'l. Nano Regulation Conference 2009: "No data, no Market?": The Innovation Society Ltd. (St. Gallen), www.innovationsociety.ch, January 2010.
- [48] <http://www.oecd.org/env/nanosafety>
- [49] http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=381983
- [50] http://www.innovationsgesellschaft.ch/images/publikationen/Factsheet_CENARIOS_english_arial2.pdf
- [51] T.-T. Su, The 1st International Nanomaterials Ethics Workshop (INEW2009) - Risk Management and Governance of Nanomaterials, KIST, Seoul, January 20, 2009.
- [52] <http://www.nanoceo.net/nanorisks/OHS-Protocols-BestPractices>
- [53] <http://nanoriskframework.com/page.cfm?tagID=1095dupont>
- [54] www.basf.com/group/corporate/en/function/conversions:/publish/contents/sustainability/dialogue/in-dialogue-with-Politics/nanotechnology/images/BASFGuidetosafemanufactureandactivitiesinvolvingnanoparticles.pdf
- [55] <http://www.sustainability2007.bayer.com/en/Bayer-Code-of-Good-Practice-on-the-Production-and-On-Site-Use-of-Nanomaterials.pdf>
- [56] KSA 6202, <http://www.standard.go.kr>

Ethical Issues in Nanomaterials Technology and Relevant Policy Recommendations

Jungil Lee^{a*}, Jungwon Lee^b, Ilki Han^a, Yoon Suh Chung^a, and Sang Hee Suh^c

^a*Nano Convergence Device Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

^b*Department of Philosophy, University of Seoul, Seoul 130-743*

^c*Center for Nanostructured Materials Technology, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

(Received July 22, 2010, Revised October 7, 2010, Accepted October 11, 2010)

For sustainable and responsible development of nanomaterials technology, the establishment of ethical system for sound social acceptance of the technology as well as the development of the technology itself is necessary. In this paper, global efforts to identify and resolve the ethical issues regarding nanotechnology is reviewed, in particular the environmental, health and safety issues in nanomaterials, and the tools such as communication and engagement of stakeholders, regulations, certifications and workplace guidelines are scrutinized. Finally the policy recommendations for the establishment of ethical systems for safe usage of nanomaterials.

Keywords : Nanomaterials, Ethics, Communications, Regulations, Certifications, Guidelines, Policy

* [E-mail] jil@kist.re.kr