Journal of Engineering Education Research
Vol. 14, No. 4, pp. 39~47, July, 2011

공학윤리의 확장: 나노윤리의 모색

최경희[*] · 송성수[**,†] · 이향연[***]
[*]이화여자대학교 과학교육과 교수
[**]부산대학교 기초교육원 교수
[***]이화여자대학교 박사후연구원

Extension of Engineering Ethics: Searching for Nanoethics

Kyunghee Choi[*] · Sungsoo Song[**,†] · Hyang-yon Rhee[***]
[*]Department of Science Education, Ewha Womans University
[**]Faculty of Liberal Education, Pusan National University
[***]Post-doc., Ewha Womans University

ABSTRACT

This paper deals with nanoethics as a sort of extension of engineering ethics utilizing various books, articles, and reports concerning historical, social, and ethical aspects of nanotechnology. After a brief examination on the place and development process of nanotechnology, ethical issues on nanotechnology are analysed including safety problem, impact on environment, violating privacy, social inequity, military use, and human enhancement. The basic principles on nanoethics are proposed such as promotion of public understanding, construction of participatory governance, contribution to sustainable development, commitment to precautionary principle, and compliance with research integrity. Lastly, integrated method in nanoethics education is illustrated putting lecture model, investigation model and discussion model together. This paper can provide the contents available for nanoethics education, and make a basis for the sound development of nanotechnology.

Keywords: Nanoethics, Engineering Ethics, Nanotechnology, Ethical Issues, Ethical Principles, Nanoethics Education

I. 서 론

공학윤리는 엔지니어가 숙지하고 준수해야 할 윤리에 해당한다. 엔지니어는 주로 기술을 매개로 활동하기 때문에 기술을 둘러싼 윤리적 쟁점을 이해하는 것이 공학윤리의 출발점이 된다. 여기서 주목해야 할 점은 기술이 지속적인 변화를 경험한다는 것이다. 기존의 기술이 점차 개선되는가 하면, 새로운 기술이 등장하기도 한다. 따라서 공학윤리는 기술의 변화를 반영하여 새로운 내용을 담아낼 필요가 있다(National Academy of Engineering, 2004). 공학윤리 자체가 고정된 것이 아니라 지속적으로 확장되어야 하는 것이다.

미래 사회를 견인할 대표적인 기술로는 정보기술, 생명공학기술, 나노기술 등이 거론되고 있다. 이러한 첨단기술의 특징 중의 하나로는 해당 기술이 제공하는 편익에 못지않게 부정적 측면에 대한 우려도 커지고 있다는 점을 들 수 있다. 특히, 1960년대만 해도 기술의 역기능에 대한 인식은 대체로 사후적인 것에 불과했지만, 20세기 말 이후에 벌어지고 있는 첨단기술을 둘러싼 논쟁은 기술의 경로가 가시화되기 전에 이에 관한 문제점이 지적되고 있는 양상을 보이고 있다(송성수, 1999).

그 중에서 정보기술과 생명공학기술의 경우에는 정보윤리나 생명윤리를 통해 해당 기술의 윤리적 쟁점이 체계적으로 분석되어 왔지만(Johnson, 1993; Kuhse and Singer, 1998; 추병완, 2005; 권복규, 2007), 나노기술의 윤리는 아직 본격적으로 논의되지 않고 있다. 특히, 국내의 경우에는 나노기술을 알기 쉽게 소개하는 문건들은 다수 발간되었지만(이인식 엮음, 2002; Wilson, et al., 2004; Laurent and Petit, 2006; 강찬형 외, 2006; 이인식, 2009), 나노기술의 사회적·윤리적 쟁점은 간헐적으로 논의되는 정도에 불과하다(이영희, 2004; 이상욱, 2006). 세계적인 차원에서도 나노기술의 연구동향에 대한 본격적인 개요서가 발간되고 있는 것에 대비해 볼 때(Bhushan, 2007), 나노기술의 윤리적 측면에 대한 논의는 아직 걸음마 단계에 있는 것으로 평가할 수 있다. 나노기술에 대한 연구개발과 나노기술에 대한 윤리적 논의 사이에는 상당한 격차가 존재하고 있는

Received April 4, 2011; Revised May 30, 2011
Accepted June, 21 2011
† Corresponding Author: triple@pusan.ac.kr

것이다(Mnyusiwalla, et al., 2003).

이러한 문제의식에 입각하여 이 논문은 공학윤리를 확장하기 위한 연구의 일환으로 나노윤리(nanoethics)에 대해 검토하고자 한다. 특히, 이 논문은 나노윤리에 대한 교육이 담아야 할 내용이 무엇이고, 나노윤리에 관한 효과적인 교육방법은 무엇인지에 주목하고자 한다. 이를 위하여 이 논문에서는 나노기술의 발전과정과 나노기술이 제기하는 윤리적 쟁점을 검토한 후에 나노윤리에 접근하기 위한 몇 가지 원칙과 나노윤리를 가르치는 데 적합한 방식을 제안하고자 한다.

연구방법과 관련하여 이 논문에서는 나노기술의 역사적, 사회적, 윤리적 측면에 주목하고 있는 도서, 논문, 보고서 등을 폭넓게 활용하였다. 특히, 나노윤리에 관한 논의를 촉발한 정부, 국제기구, 과학기술계, 비정부기구 등의 각종 문건들을 수집하여 적극적으로 활용하였다. 필자들은 이러한 자료들을 활용함에 있어 단편적인 정보를 통합적으로 재구성하거나 새로운 각도에서 해석하면서 해당 주제에 대한 논의를 체계화하는 데 많은 노력을 기울였다.

II. 나노기술의 위상과 발전과정

나노(nano)는 희랍어로 난쟁이를 뜻하는 나노스(nanos)에서 유래한 말로서 10억분의 1(10^{-9})을 나타내는 단위이다. 수소원자의 크기가 10^{-10}m 정도이므로 나노기술은 원자 혹은 분자의 단위를 다루고 있는 셈이다. 나노기술은 물질의 특성을 나노 스케일에서 규명하고 제어하는 기술로서 원자 혹은 분자를 적절히 결합시켜 새로운 미세구조를 만듦으로써 기존 물질을 변형 혹은 개조하거나 새로운 물질을 창출하는 것을 목표로 삼는다. 사실상 미세구조를 만드는 일은 이전부터 시도되어 왔지만 나노기술은 기존의 기술과 접근방식에서 뚜렷한 차별성을 가지고 있다. 기존의 기술이 미세화를 위해 큰 덩어리를 조각조각 내는 방식으로 접근해 왔다면 나노기술은 원자 혹은 분자들을 결합하여 미세구조를 만드는 방식을 채택하고 있는 것이다.

나노기술은 "새로운 산업혁명"을 견인할 수 있는 기술로 간주될 정도로 상당한 파급효과를 가지고 있다(현택환, 2002). 일차적으로 나노기술은 기능성과 효율성이 높은 물질의 개발을 통해 소재 산업의 부가가치를 제고할 수 있는 기반으로 작용한다. 또한 나노기술은 정보통신 관련 제품이 가지고 있던 집적도나 속도의 한계를 타파할 수 있고, 유전자 차원에서 질병을 진단하고 치료할 수 있는 방법을 개선할 수 있으며, 환경오염의 원인과 결과를 정밀하게 측정·제어할 수 있는 기초로 작용한다. 사실상 나노기술은 모든 것들이 설계되고 만들어지는 방식을 바꿀 수 있는 잠재력을 가지고 있기 때문에 모든 산업 분야에서 새로운 도구를 제공해 주는 기반기술의 성격을 띠고 있다.

나노기술을 처음으로 예견했던 사람은 미국의 유명한 물리학자인 파인만(Richard Feynman)이었다. 그는 1959년 미국물리학회에서 행한 "바닥에는 풍부한 공간이 있다"는 제목의 연설에서 머지않아 나노 수준에서 사물을 조작하고 제어하는 것이 가능하게 될 것이라고 예측하였다(Feynman, 1959). 나노기술이란 용어는 1974년에 일본 도쿄대학의 노리오 타니구치(谷口紀男)가 처음으로 사용했으나 거의 통용되지 않다가 1986년에 MIT 출신의 드렉슬러(Eric Drexler) 박사가 『창조의 엔진(Engines of Creation)』을 발간하면서 널리 회자되기 시작하였다(Drexler, 1986).

공상에 불과했던 나노기술은 1980년대를 통하여 서서히 현실로 다가오기 시작했다. 1981년에는 원자나 분자를 눈으로 볼 수 있을 뿐만 아니라 조작도 가능한 도구인 주사터널링 현미경(scanning tunneling microscope, STM)이 발명되었다. 1985년에는 미국의 화학자인 스몰리(Richard E. Smalley) 등이 탄소 원자 60개가 자기조립하여 축구공처럼 둥근 구조를 형성한 풀러렌(fullerene) 혹은 버키볼(buckyball)을 발견하였다. 이어 1988년에는 캘리포니아 버클리 대학의 연구자들이 지름이 120㎛이고 회전수가 분당 5백 회인 마이크로 모터를 제작하였다.

1990년대 이후에는 나노기술에 대한 연구개발이 본격적으로 이루어졌다. 1990년에는 IBM이 STM을 활용하여 크세논 원자를 하나하나 움직여 니켈 금속 표면에 "IBM"이라는 글자를 재배열하는 데 성공하였다. 이어 1991년에는 일본의 재료과학자인 이지마 스미오(飯島澄男)가 원통형 구조의 분자로서 우수한 물성을 가진 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 발견하였다. 한편, 1997년에는 미국에서 세계 최초의 나노기술 벤처기업이 탄생함으로써 나노기술의 시대가 본격적으로 개막되었음을 알려주었다. 그 후 나노기술은 정보통신, 생명공학, 의료, 에너지 및 환경, 신소재 등의 수많은 분야에 활용되기 시작하였다.

2000년대에 들어서는 세계 각국의 정부들이 경쟁적으로 나노기술의 개발에 나섰다. 특히, 미국은 1998년부터 지속적인 준비를 거쳐 2000년 2월에 국가나노기술계획(National Nanotechnology Initiative, NNI)을 발표함으로써 나노기술의 개발에 대한 강한 의지를 표방한 바 있다. 그 계획은 좁은 의미의 연구개발은 물론 이를 위한 조직 및 인프라 구축을 강조하고 있으며 나노기술의 윤리적·법적·사회적 함의(Ethical, Legal and Social Implications, ELSI)도 고려하고 있다(송성수, 2002). 이어 유럽과 일본도 나노기술개발에 많은 예산을 투자하기 시

작했으며, 우리나라의 경우에는 2002년에 나노기술개발촉진법을 제정하면서 나노기술개발에 박차를 가하고 있다.[1)]

III. 나노기술의 윤리적 쟁점

나노기술에 대한 논쟁은 과학기술자 사이에서 먼저 시작된 후 전사회적으로 확대된 특징을 보이고 있다. 2000년에 선마이크로시스템즈의 공동 창립자인 빌 조이(Bill Joy)는 "왜 우리는 미래에 필요 없는 존재가 될 것인가"라는 글에서 나노기술이 "창조의 엔진"이 아니라 "파괴의 엔진"이 될 수 있다고 경고하였다. 그는 나노기술을 포함한 새로운 기술을 매개로 자기복제가 가능한 로봇 종이 출현함으로써 인류의 미래를 위협할 수 있다는 묵시록적인 메시지를 표방하면서 위험한 기술을 포기하거나 기술개발에 제동을 걸어야 한다고 주장하였다(Joy, 2000).[2)] 또한 풀러렌을 발견하여 1996년 노벨 화학상을 수상했던 스몰리는 나노기술에 대한 드렉슬러의 상상이 지나치게 기계론적이어서 화학적으로 문제가 있다고 지적하였다. 스몰리에 따르면, 나노 수준에서는 모든 물질이 화학적으로 매우 불안정한 상태에 놓여 있기 때문에 원자들을 특정한 형태로 배열하여 원하는 화학반응을 일으키는 것이 거의 불가능하다(Smalley, 2001).

2002년에는 저명한 소설가로서 <쥐라기 공원>의 원작자인 크라이튼(Michael Crichton)이 쓴 『먹이(Prey)』가 출간되면서 나노기술의 위험성이 대중적 논쟁의 대상이 되었다. 그 소설에는 박테리아와 나노기계를 합성하여 만든 로봇이 등장하는데, 제작자가 로봇에 대한 통제력을 상실하자 세상이 로봇의 먹이가 되어 공격당하는 모습이 그려지고 있다(Crichton, 2004). 이어 2003년에는 캐나다의 비정부단체인 ETC 그룹(Action Group on Erosion, Technology and Concentration)이 나노기술이 사회와 환경에 미치는 잠재적 영향에 대한 보고서인 『거대한 몰락(The Big Down)』을 발표하였다(The ETC Group, 2003). 영국에서는 2003년에 영국의 찰스 황태자가 나노기술의 위험성에 대해 공개적으로 거론한 후 영국 정부의 의뢰로 2004년에 왕립학회와 왕립공학아카데미가 『나노과학과 나노기술: 기회와 불확실성(Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties)』이라는 보고서를 발표하였다(Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004).

그렇다면, 나노기술의 어떤 측면이 쟁점이 되기 때문에 나노기술에 대한 논쟁과 우려가 제기되고 있는 것일까? 이와 관련하여 이영희(2004)는 환경 관련 쟁점, 인체 관련 쟁점, 사회 관련 쟁점으로 구분하여 나노기술의 사회적 쟁점을 분석하고 있는데, 이 논문에서는 나노기술의 안전성, 나노기술이 환경에 미치는 영향, 나노기술과 프라이버시, 나노기술과 사회적 불평등, 나노기술의 군사적 이용, 나노기술과 인간능력의 향상 등으로 세분화하여 해당 쟁점을 검토하고자 한다.

첫째는 나노기술의 안전성에 관한 쟁점이다. 어떤 물질입자의 크기가 나노 규모까지 작아지면 그 물질의 물리적·화학적 특성이 크게 변하게 된다. 이러한 점은 나노기술이 매우 큰 잠재력을 가지게 하는 원천임과 동시에 독성을 야기하는 원인이 되기도 한다. 2003년에는 탄소나노튜브를 용액의 형태로 쥐의 폐에 주입하자 나노튜브가 폐에서 응집하면서 폐 조직을 손상시키는 현상이 발견되었다. 또한 2005년에는 풀러렌을 포함된 용액이 어류의 뇌 조직을 손상시킬 수 있다는 연구결과가 발표되었고, 2006년에는 자외선차단 크림에 사용되는 산화티타늄 나노입자가 쥐의 뇌세포를 손상시킬 수 있다는 가능성이 제기되었다(신동호, 2003; 김명진, 2007). 이러한 연구들은 어떤 물질이 일반적인 크기에서 안전하다고 해서 나노 수준으로 접근할 경우에는 안정성을 장담할 수 없다는 점을 말해 준다. 물론 이러한 연구들은 동물실험에 국한되어 있고, 나노물질이 인체 내에 삽입되거나 이식될 경우에 어떤 일이 발생할 것인지에 대해서는 정확히 알려진 바가 없다.

두 번째 쟁점은 나노기술이 환경에 미치는 영향에 관한 것이다(The ETC Group, 2003; 김명진, 2007). 나노기술은 각종 부품의 내구성을 향상시켜 자원을 절약하는 데 기여할 수 있으며, 나노 수준의 필터를 이용하게 되면 미세오염물질의 환경유입을 차단할 수 있는 것으로 평가받고 있다. 그러나 나노기술이 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)처럼 생물학적으로 분해되지 않거나 분해하기 어려운 새로운 오염물질의 원천으로 작용하여 이른바 나노오염(nanopollution)을 유발할 가능성도 배제할 수 없다.[3)] 이와 함께 나노기술의

1) 한국에서 나노기술에 관한 정책과 제도가 형성되는 과정에 대해서는 이은경(2007)을 참조. 나노기술과 관련된 유용한 정보는 교육과학기술부와 한국과학기술정보연구원이 2003년부터 매년 발간해 온 『나노기술연감』과 한국과학기술정보연구원에서 운영하는 웹사이트인 나노넷(http://www.nanonet.info)을 통해 접근할 수 있다.

2) 빌 조이는 20세기의 NBC 기술과 21세기의 GNR 기술을 대비시키고 있다. NBC는 핵(nuclear), 생물(biological), 화학(chemical)의 앞글자를 딴 것이고, GNR은 유전공학(genetic engineering), 나노기술(nanotechnology), 로봇공학(robot engineering)을 포괄한다. 정부 기관의 실험실에서 개발되었던 NBC 기술과 달리 GNR 기술은 상업적인 용도를 가지고 기업들에 의해 개발되고 있기 때문에 실질적인 통제가 거의 불가능하다는 것이다.

3) 나노기술이 환경에 미치는 영향에 대한 가장 극단적인 전망으로는 드렉슬러가 제시한 회색 점액질(grey goo) 시나리오를 들 수 있다. 인간의 통제를 벗어나 자율적으로 움직이는 나노기계들이 떼를 지어 몰려다니면서 인간을 공격하고 주위 환경에 있는 것들을 모조리 먹어치워 지구를 회색 점액질로 만들어 버린다는 것이다.

효과가 무차별적이기 때문에 생태계에 새로운 위협을 제기할 수도 있다. 예를 들어, 은나노 입자는 상당한 살균 효과를 가질 수 있지만, 이로 인해 인간에게 이로운 미생물까지도 같이 죽여 버릴 수 있고, 사람을 포함한 동물의 세포에도 악영향을 미칠 가능성이 있다. 2006년에 미국의 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)이 은나노 제품을 규제하겠다고 선언한 이유도 이러한 맥락에서 이해할 수 있을 것이다.

셋째는 프라이버시 침해에 관한 문제이다(Laurent and Petit, 2006: 47-58). 나노기술은 정보기술과의 융합을 바탕으로 크기가 작으면서도 성능이 우수한 감지기구들의 등장을 가능하게 한다. 그 대표적인 예로는 무선주파수인증(radio frequency identification, RFID) 기술을 들 수 있다. RFID는 쉽게 제품 안에 숨길 수 있으며, 단지 기업의 재고관리에만 사용되는 것이 아니라 제품이 판매된 후에도 그 제품을 소유한 사람에 대한 정보를 알 수 있다. 게다가 RFID를 체내에 이식하는 것도 가능하기 때문에 위치확인시스템(global positioning system, GPS) 기능을 내장하여 사람의 위치를 파악하는 데에도 사용될 수 있다. 그밖에 랩온어칩(lab-on-a-chip, LOC) 기술의 발달로 칩 위에 유전적 특성 분석에 필요한 여러 가지 장치들을 집적시키는 것이 가능해 짐으로써 유전자 수준에서 개인 생체정보를 보호하는 것이 중요한 문제로 부각되고 있다.

네 번째 쟁점으로는 나노기술에 대한 불평등의 문제를 들 수 있다. 나노기술의 상품화에 가속도가 붙으면 선진국과 제3세계 혹은 부유한 계층과 빈곤 계층 사이에 나노기술의 사용에 대한 불평등이 발생할 가능성이 높다. 국가들 사이 혹은 한 국가 내부에서 나노기술로 인해 사회적 불평등이 심화되는 현상은 나노격차(nano-divide)로 불리고 있다. 예를 들어, 의료 분야에서 나노기술을 활용한 새로운 치료법이 등장했지만 구매비용이 매우 높을 경우에, 가난한 사람들은 이에 대한 혜택에서 소외될 가능성이 높아지는 것이다. 게다가 나노기술의 새로운 성과가 지적재산권을 매개로 특정한 기업에 의해 배타적으로 전유될 경우에는 나노격차가 더욱 커지게 될 것이다.

다섯째는 나노기술의 군사적 이용에 관한 문제이다(이영희, 2004; Altmann, 2004). 현재 미국의 정부기관 중에서 국방성은 국립과학재단 다음으로 나노기술개발에 많은 예산을 투입하고 있다. 예를 들어, MIT의 군인나노기술연구소(Institute for Soldier Nanotechnologies)는 나노기술에 기반을 둔 첨단 고기능 군복을 개발하는 것은 물론 체력 강화, 감각능력 개발, 정신력 개발 등을 통하여 새로운 군인의 모습도 탐색하고 있다. 또한 군사적 목적으로 나노기술을 활용하여 생물학적·화학적 성분을 조절하면 대량 살상이나 파괴를 위한 새로운 무기도 만들어 낼 수 있다. 나노기술의 군사적 이용이 새로운 형태의 군비경쟁을 야기할 가능성을 높인다거나 기술개발에 대한 비밀주의를 만연케 할 것이라는 우려도 제기되고 있다.

마지막 쟁점은 나노기술과 인간능력의 향상(human enhancement)에 관한 것이다(이중원, 2009). 나노기술은 질병 치료를 넘어서 인간의 신체적·정신적·감각적 기능을 향상시키는 데 활용될 것으로 전망되고 있다. 인간능력의 향상에 대한 문제는 신경과학이나 인체보철 분야에서도 제기되고 있지만, 나노기술은 이러한 분야들과 결합하여 인간이 자신의 몸에 본격적으로 개입하고 조작하는 시대를 열 것으로 평가된다. 가까운 미래는 아닐지라도 현재의 인간이 지닌 생물학적 능력을 훨씬 뛰어넘는 새로운 유형의 우생학적 인간이 만들어질 가능성이 존재하는 것이다. 이러한 가능성은 인간이란 무엇인가 혹은 무엇이 인간을 인간으로 만드는 것인가 등과 같은 본질적인 물음을 제기하고 있다.

Ⅳ. 나노윤리에 접근하는 원칙

그렇다면, 이와 같은 나노기술의 윤리적 쟁점에 어떻게 대처할 것인가? 이와 관련하여 이상욱(2006)은 나노기술에 접근하는 실천윤리학적 원칙으로 다음의 네 가지를 들고 있다. 첫째는 “여러 가치를 종합적으로 고려한다”는 원칙으로 다양한 가치에 대한 인정에서 출발하여 상충하는 가치들을 조정하는 방법을 발견할 것을 강조하고 있다. 둘째 원칙은 “윤리적 고려는 사실에 근거해야 한다”는 것인데, 과학적 사실과 사회문화적 사실 모두가 나노기술에 대한 윤리적 판단에서 경험적 제한조건으로 기능해야 한다는 점을 의미한다. 셋째는 “과거로부터 배운다”는 원칙으로 새로운 기술이 사회를 변화시키는 정도가 클수록 예기치 못했던 문제점을 함께 가져온 경우가 많다는 점에 주목하고 있다. 넷째 원칙은 “사회적 수준에서 인지 동의(informed consent)를 얻어야 한다”는 것으로 사회적 파급 효과가 큰 기술에 대해서는 해당 기술에 대한 충분한 정보를 제공하고 이에 대한 대중의 성찰적 활동을 지원한 후 자발적 동의를 얻어야 한다는 의미이다.

이 논문에서는 공학윤리에 관한 논의가 윤리강령에서 출발하는 경우가 많다는 점에 주목하고자 한다. 나노윤리에 대한 대표적인 윤리강령으로는 유럽연합집행위원회(European Commission)가 관련 산업계와 시민사회와의 협력 작업을 거쳐 2007년에 마련한 책임성 있는 나노과학 및 나노기술 연구를 위한 행동강령(Code of Conduct for Responsible Nanosciences and Nanotechnologies Research)을 들 수 있다(European Commission, 2007). 이 강령은 유럽연합의 회원 국가들이나 나노기술에 대한 연구자 집단들에게 구속력을 갖고 있지는 않

지만, 나노윤리에 접근하기 위한 원칙을 검토하는 데에는 좋은 출발점이 될 것으로 판단된다.

유럽연합집행위원회의 행동강령은 다음과 같은 7가지 조항으로 구성되어 있다. ① 의미(meaning): 나노기술에 대한 연구는 대중에게 이해되어야 한다. 그것은 인간의 기본권을 존중해야 하며, 설계, 실행, 확산, 이용의 모든 과정에서 개인과 사회의 행복을 증진하는 관점에서 수행되어야 한다. ② 지속가능성(sustainability): 나노기술에 대한 연구활동은 안전하고 윤리적이어야 하며 지속가능한 발전(sustainable development)에 기여해야 한다. 그것은 현재나 미래에 사람, 동물, 식물, 환경에 해를 끼치거나 위협을 가하지 않아야 한다. ③ 사전예방(precaution): 나노기술에 대한 연구활동은 사전예방의 원칙(precautionary principle)에 입각하여 수행되어야 한다. 나노기술의 산물이 잠재적으로 환경, 건강, 안전(environment, health, and safety, EHS)에 미칠 영향을 예견하면서 보호의 수준에 비례하여 적절한 예방조치를 고려해야 하며, 사회의 이익과 환경을 위한 진보를 고무해야 한다. ④ 포괄성(inclusiveness): 나노기술에 대한 연구활동의 거버넌스는 모든 이해당사자들에 대하여 공개성, 투명성, 그리고 정보 접근에 대한 합법적 권리의 존중과 같은 원칙들에 의해 안내되어야 한다. 나노기술에 대한 연구활동에 관여하거나 영향을 받는 모든 이해당사자들이 의사결정과정에 참여하는 것이 보장되어야 한다. ⑤ 탁월성(excellence): 나노기술에 대한 연구는 연구의 진실성(integrity of research)과 바람직한 연구실 실천(good laboratory practices)을 포함한 최상의 과학적 표준들을 충족시켜야 한다. ⑥ 혁신(innovation): 나노기술활동의 거버넌스는 혁신과 성장을 위한 최대한의 창의성, 유연성, 그리고 기획능력을 고무해야 한다. ⑦ 설명책임(accountability): 나노기술에 대한 연구자들과 연구단체들은 자신의 활동이 사회, 환경, 인체의 건강에 미치는 영향들을 설명해야 할 책임을 가진다.

유럽연합집행위원회의 행동강령에서 가장 중요시되고 있는 것은 대중에 대한 책임으로 판단된다. 그것은 유럽연합집행위원회의 행동강령이 첫 조항인 ①과 마지막 조항인 ⑦에서 나노기술에 대한 대중의 이해와 연구자의 설명책임을 거론하고 있다는 점에서 확인할 수 있다. 즉, 나노기술의 설계, 실행, 확산, 이용의 전 과정에서 공익(public interest)이 우선시되어야 하며, 나노기술이 개인, 사회, 환경에 미치는 영향이 적절히 설명되어야 한다는 것이다.[4] 특히, 이 행동강령은 설명책임(accountability)이란 용어를 통해 나노기술에 대한 종사자들이 일상적인 의미에서 책임(responsibility)을 넘어 자신이 담당하는 활동에 대해 책임 있는 설명을 제공할 것을 강조하고 있다. 이러한 점은 정보에 입각한 동의(informed consent)에 대한 논의로 이어질 수 있다. 정보에 입각한 동의는 어떤 연구나 사업을 추진할 때 영향을 받는 사람들이 사전에 충분한 정보를 받은 상태에서 자발적으로 동의하는 것을 의미하며, 생명공학연구, 지역개발사업, 개인정보수집 등에서 널리 활용되어 온 개념이자 절차에 해당한다.

대중에 대한 책임과 관련하여 유럽연합집행위원회의 행동강령이 주목하고 있는 것은 나노기술에 대한 거버넌스라 할 수 있다. 거버넌스(governance)는 정부(government)에 대비되는 개념으로서 정부의 독점적 통치를 벗어나 시장 혹은 시민사회와의 협력관계를 형성하기 위해 사용되고 있는 개념이라 할 수 있다. 유럽연합집행위원회의 행동강령은 ④에서 나노기술에 대한 거버넌스에 연구활동에 관여하거나 영향을 받는 모든 이해당사자들을 포괄해야 한다고 주문하고 있으며, ⑥에서 나노기술활동의 거버넌스가 혁신과 성장을 고무하는 방향으로 구축되어야 한다고 강조하고 있다. 이와 관련하여 미국이 2003년 12월에 제정한 21세기 나노기술연구개발법(21st Century Nanotechnology Research and Development Act)은 나노기술에 대한 연구개발을 적극적으로 지원하는 것을 천명함과 동시에 나노기술의 사회적·윤리적 쟁점에 효과적으로 대처해야 한다는 점을 고려하고 있다. 특히, 동 법 2조(b) 10항은 나노기술 연구센터들이 사회적, 윤리적, 환경적 우려들을 다루는 활동들을 수행할 것을 요구하고 있으며, 시민패널(citizens' panel), 합의회의(consensus conference) 및 적절한 교육적 행사들과 같은 메커니즘을 활용하여 정기적이고 지속적인 대중 토의를 개최할 것을 주문하고 있다(The Senate and House of Representatives of the United States of America, 2003).[5] 또한 미국의 과학기술학자인 바벤(Daniel Barben) 등은 기술과 사회에 대한 예측, 의사결정에 대한 폭넓은 참여, 기술개발과 기술영향평가의 통합을 지향하는 나노기술에 대한 선견적 거버넌스(anticipatory governance)를 제안하고 있다(Barden, et al., 2008).

유럽연합집행위원회의 행동강령은 지속가능한 발전과 사전예방의 원칙에 대해서도 주목하고 있다. 지속가능한 발전은 주

4) 이와 관련하여 Satterfield et al.(2009)은 대중이 나노기술의 위해보다 이익을 3: 1 정도로 높게 평가하고 있으며, 나노기술에 대한 정보를 접하는 것이 초기 단계에서 긍정적 결과를 유발한다고 지적한 바 있다. 이에 반해 Kahan et al.(2009)은 40% 이상의 시민이 나노기술에 대한 태도를 정하지 못했으며, 논쟁이 시작되고 위험인식이 증폭될 경우 3: 1의 비율이 변할 수 있다는 점에 주목하고 있다.

5) 합의회의를 비롯한 과학기술과 관련된 다양한 시민참여제도에 대해서는 참여연대 시민과학센터(2002)를 참조.

로 환경윤리의 맥락에서 논의된 것으로서 다음과 같은 두 가지 의미를 내포하고 있다. 첫째는 자연환경이 수용할 수 있는 능력에 위험을 주지 않는 범위 내에서만 개발을 추구해야 한다는 것이며, 둘째는 미래 세대가 누릴 수 있는 자연환경을 보존하면서 현재 세대의 수요를 충족시키는 개발을 추구해야 한다는 것이다. 한편, 사전예방의 원칙은 확실한 과학적 증거나 정보가 미약할지라도 최악의 시나리오를 회피하기 위한 적극적 조치를 취해야 한다는 원칙을 말한다. 사전예방의 원칙은 유전자변형생물체(genetically modified organisms, GMO)를 둘러싼 논쟁을 통해 널리 알려졌는데, 앞서 언급한 ETC 그룹은 이러한 원칙에 입각하여 나노기술의 안전성이 입증될 때까지 나노입자의 생산을 일시적으로 중지(moratorium)시켜야 한다고 주장한 바 있다(The ETC Group, 2003).

그밖에 유럽연합집행위원회의 행동강령 중에서 ⑤는 연구윤리(research ethics)에 해당하는 내용을 담고 있다.[6] 연구윤리는 연구의 계획, 수행, 보고 등과 같은 연구의 모든 과정에서 책임 있는 태도로 바람직한 연구를 추진하기 위해 지켜야 할 윤리적 원칙이라고 할 수 있다. 연구윤리의 키워드는 진실성(integrity)이며, 진실성은 절차적 투명성과 내용적 객관성을 포괄하는 개념이다. 이와 유사한 의미를 가진 용어로는 바람직한 연구실천(good research practice, GRP)과 책임 있는 연구수행(responsible conduct of research, RCR)이 있다. 연구진실성과 대비되는 개념이 연구부정행위(research misconduct)이며, 위조, 변조, 표절(fabrication, falsification and plagiarism, FFP)은 가장 대표적인 연구부정행위로 간주되고 있다. 연구윤리는 기본적으로 해당 연구실에서 연구책임자와 연구원의 관계, 자원의 배분과 활용, 연구노트의 작성과 관리 등의 측면에서 바람직한 관행이 마련될 때 적절히 준수될 수 있다.

이러한 논의를 종합해 볼 때 나노윤리에 접근하는 원칙은 다음의 5가지로 정리할 수 있을 것이다. 첫째, 나노기술의 모든 과정은 대중에게 이해되어야 하며, 나노기술 종사자는 나노기술의 영향을 대중에게 설명할 책임을 가지고 있다. 둘째, 나노기술 종사자와 시민사회를 포함한 모든 이해당사자들이 참여하는 거버넌스를 구축함으로써 나노기술의 건전한 발전을 추구해야 한다. 셋째, 나노기술활동은 환경에 대한 영향과 미래 세대에 대한 영향을 감안하여 지속가능한 발전에 기여해야 한다. 넷째, 나노기술에 대한 연구개발은 잠재적 위험성을 최소화하려는 사전예방의 원칙에 입각하여 수행되어야 한다. 다섯째, 나노기술에 대한 연구는 계획, 수행, 보고의 모든 과정에서 연구진실성을 추구하는 방향으로 이루어져야 한다.

6) 연구윤리의 의미와 주요 쟁점에 대해서는 황은성 외(2011)를 참조.

유럽연합집행연합회의 행동강령은 다른 공학단체들의 윤리강령에 비해 대중에 대한 책임을 더욱 강조하고 있으며, 연구윤리에 대해 본격적으로 논의하고 있는 특징을 보이고 있다. 미국을 비롯한 선진국 공학단체의 윤리강령은 대중에 대한 책임, 고용주나 고객에 대한 책임, 전문직에 대한 책임에 주목하고 있는데,[7] 유럽연합집행연합회의 행동강령은 대중에 대한 책임을 논의함에 있어 나노기술의 잠재적 위험성을 적극적으로 부각시킴과 동시에 대중에 대한 설명책임을 강조하고 있으며, 전문직은 물론 모든 이해당사자들의 참여에 입각한 포괄적 거버넌스의 구축을 주문하고 있다. 또한 유럽연합집행위원회의 행동강령은 다른 공학단체의 윤리강령에 비해 고용주나 고객에 대한 책임에는 본격적으로 주목하지 않는 반면 연구윤리에 대해서는 많은 주의를 기울이고 있다. 그것은 나노기술이 본격적으로 상업화의 단계에 진입하지 못했으며, 주로 연구의 단계에 있다는 점을 반영하는 것으로 풀이할 수 있다.

V. 나노윤리에 대한 교육

이상에서 나노기술의 위상과 발전과정, 나노기술의 윤리적 쟁점, 나노윤리에 접근하는 원칙에 대해 살펴보았다. 이와 같은 주제에 대한 논의는 나노윤리에 대한 교육에 필요한 기본적인 콘텐츠에 해당하는데, 그 이유를 생각해 보면 다음과 같다. 우선, 나노기술에 대해서는 학생들이 아직 익숙하지 않은 경우가 많으므로 나노기술의 위상과 발전과정에 대해 살펴봄으로써 나노기술에 친숙해지는 과정이 필요하다. 또한, 윤리교육의 모든 주제가 그렇듯이, 해당 주제가 제기하는 윤리적 쟁점을 살펴보는 것은 필수적이며, 특히 나노윤리의 경우에는 아직 정형화된 분석틀이 없는 상태이므로 관련된 윤리적 쟁점을 풍부하게 이해하는 것이 요구된다. 그리고, 윤리교육은 단순히 쟁점을 이해하는 것에 그치지 않고 이에 대한 대응책을 마련해야 하는데, 나노윤리와 같은 새로운 주제의 경우에는 구체적인 처방은 어렵더라도 적어도 그것에 접근하는 원칙을 도출해 보는 것이 요구된다.

이와 같은 콘텐츠의 구성은 나노윤리에 앞서 특정한 기술의 윤리적 문제를 다루어온 정보윤리와 생명윤리에서도 찾아볼 수 있다. 예를 들어, 정보윤리교육을 다루고 있는 추병완(2005)은 제1장인 정보사회의 개념을 통하여 정보기술의 발전과정을 개관하고 있고, 제3장인 정보사회의 빛과 그림자를 통하여 정보윤리의 쟁점에 대해 다루고 있으며, 제4장인 정보사회에서의 바람직한 인간상을 통하여 정보윤리에 접근하는 원칙을 검토

7) 미국과 한국의 주요 공학단체의 윤리강령에 대한 분석은 송성수(2008)를 참조.

하고 있다. 생명윤리의 예로 Kuhse and Singer(1998)는 기본적으로 주제별 접근을 채택하고 있으면서도 배아, 생식, 유전학, 안락사, 장기이식, 인간 대상 실험, 동물실험 등의 주제를 다루면서 해당 기술의 발전과정과 윤리적 쟁점, 그리고 이에 접근하는 원칙에 주목하고 있다.

이처럼 나노윤리에 대한 교육은 나노기술의 위상과 발전과정, 나노기술의 윤리적 쟁점, 나노윤리에 접근하는 원칙 등을 포괄하는 통합적 콘텐츠를 바탕으로 이루어질 필요가 있는데, 이를 실제적으로 활용할 수 있는 통로로는 공학윤리, 일반적인 교양과목, 나노기술 관련 전공과목 등을 생각할 수 있다. 서론에서 언급했듯이, 나노윤리는 공학윤리를 확장한다는 차원에서 공학윤리교육에서 어렵지 않게 활용될 수 있으며, 나노윤리에 관한 사항이 공학윤리 교재의 일부분으로 포함될 수 있을 것이다. 또한 과학기술과 사회 혹은 과학기술과 윤리와 같은 일반적인 교양과목에서도 나노윤리를 활용할 수 있다. 해당 과목에서 첨단기술의 사회적·윤리적 문제를 다루는 과정에서 나노윤리를 포함시킬 수 있는 것이다. 나노기술을 전공하는 학과(부)의 경우에는 나노과학기술개론의 일환으로 나노윤리를 포함시킬 수도 있고, 공학설계와 같은 과목에서도 나노윤리에 대한 논의를 다룰 수 있을 것이다.[8)]

그렇다면, 나노윤리에 대한 교육은 어떤 방식으로 이루어지는 것이 적절한가? 이와 관련하여 최경희·조희형(2003)은 비판적 사고가 가능한 학생들에게는 비형식적 수업보다 형식적 수업이 더욱 효과적이라고 전제한 후에 과학기술의 윤리적 특성에 대한 교수-학습 모형을 강의 모형, 토론 모형, 조사 모형으로 구분한 바 있다. 여기서 강의 모형은 주제 제시(exposure), 분석(analysis), 입장의 결정(determination), 평가(evaluation) 등의 단계를, 토론 모형은 모둠 편성(arrangement), 주제 제시(exposure), 토론(discussion), 발표(presentation), 평가(evaluation) 등의 단계를, 조사 모형은 주제 소개(topic introduction), 자료 수집 및 분석(data collection and analysis), 입장 혹은 해결책의 결정(resolution and determination), 평가 및 수정(revision) 등의 단계를 거친다.

나노윤리에 대한 교육에서는 원칙적으로 강의 모형, 토론 모형, 조사 모형 모두가 가능하지만, 이 논문에서는 세 가지 모형을 종합한 교육방식에 주목하고자 한다. 종합적 교육방식은 다음과 같은 절차를 거칠 수 있다. ① 교수자가 나노기술의 발전과정과 나노기술의 윤리적 쟁점에 대한 개요를 강의한다. ② 학습자 집단을 몇 개의 모둠으로 편성하고 각 모둠은 나노기술의 윤리적 쟁점에 대한 자료를 수집·분석한다. 이 때 각 모둠은 나노기술의 안전성, 나노기술이 환경에 미치는 영향, 나노기술과 프라이버시, 나노기술과 사회적 불평등, 나노기술의 군사적 이용, 나노기술과 인간능력의 향상 중에서 하나의 주제를 선택하여 협동학습을 수행한다. ③ 나노기술의 윤리적 쟁점에 대한 모둠별 학습이 끝나면 각 모둠은 전체 학급을 대상으로 결과를 보고하면서 다른 모둠의 질문에 대해 답변한다. ④ 나노기술의 윤리적 쟁점에 대한 학습이 완료된 이후에는 모둠별로 나노윤리에 접근하는 원칙에 대해 토론한다. ⑤ 각 모둠은 토론한 내용을 전체 학급을 대상으로 발표한 후 교수자가 나노윤리에 접근하는 원칙에 대해 보충 강의를 실시한다. 여기서 ①은 강의 모형, ②는 조사 모형과 토론 모형의 혼합, ③과 ④는 토론 모형, ⑤는 토론 모형과 강의 모형의 혼합에 해당한다. 이와 같은 교육방식은 나노기술의 윤리적 쟁점이나 나노윤리에 접근하는 원칙에 대해 반복적으로 다룸으로써 해당 주제에 대한 심도 있는 이해를 도모할 수 있을 것이다.[9)]

VI. 맺음말

이 논문에서는 공학윤리의 확장에 대한 사례로서 나노기술의 윤리에 대해 살펴보았다. 나노기술은 매우 활발하게 연구가 진행되고 있는 분야이며, 긍정적 전망은 물론 부정적 전망도 많이 제기되고 있다. 이와 같은 나노기술의 이중적 측면은 일상생활에서 실제로 활용할 수 있는 나노제품이 출현하게 되면 더욱 증폭될 것으로 보인다. 나노기술이 가진 긍정적 측면을 극대화하고 부정적 측면을 최소화하는 것은 인류 사회의 번영을 위해 필수적으로 요청되는 작업이라 할 수 있다.

나노기술을 포함한 오늘날의 첨단기술은 상당한 불확실성을 가지고 있다. 이처럼 불확실성이 높은 기술의 경우에는 기술혁신의 주체가 연구자 공동체에서 이해당사자와 일반 시민을 포함하는 "확장된 동료 공동체(extended peer community)"로 바뀌고, 과학적 사실도 실험 결과뿐 아니라 관련 당사자의 경험, 지식, 역사 등을 포함하는 "확장된 사실(extended facts)"로 바뀔 필요가 있다(Funtowicz and Ravetz, 1993). 이와 관련하여 나노기술에 대한 연구개발이 나노입자의 차원에서 나노시스템의 차원으로 나아갈 경우에는 나노기술에 대한 사회적 통제가 더욱 중요한 논점이 되며 나노기술의 발전방향에 대한 의사결정에 보다 광범위한 사회집단이 참여해야 한다는 주

8) 이와 관련하여 국내에서 널리 활용되고 있는 공학설계 교재인 Voland(2009)는 공학설계의 윤리적 측면에 대해서도 주의를 기울이고 있다.

9) 나노윤리에 대한 교육과 관련하여 이 논문은 어떤 콘텐츠가 필요한지에 대해 논의한 후 적절한 교육방식을 모색하는 것을 목표로 삼았다. 이 논문은 나노윤리에 대한 교육을 직접 실시해 보고 그 타당성을 검증하는 작업을 수행하지 못했다는 한계를 가지고 있는데, 그것은 차후에 별도의 연구가 필요한 것으로 판단된다.

장도 제기되고 있다(Renn and Roco, 2006).

사실상 나노윤리의 쟁점이나 원칙 중에는 정보윤리, 환경윤리, 생명윤리, 연구윤리 등을 매개로 논의되었던 내용이 적지 않다. 프라이버시의 문제, 지속가능한 발전, 사전예방의 원칙, 바람직한 연구실천 등은 그 대표적인 예에 해당한다. 나노기술은 수많은 분야에 활용될 수 있는 기반기술의 성격을 띠고 있기 때문에, 나노윤리의 경우에도 다른 영역의 윤리에서 논의되어온 쟁점과 원칙을 적극적으로 활용할 필요가 있는 것이다. 인간유전체계획(Human Genome Project)의 윤리적·법적·사회적 함의(ELSI)에 대한 연구가 대체로 사후적이어서 실제 기술개발과정에 환류되지 못했다는 평가에 비추어 볼 때, 나노기술에 대한 ELSI의 경우에는 보다 사전적인 연구와 참여를 통해 나노기술의 건전한 발전을 촉진하는 것이 요청된다(Fisher, 2005). 이 논문에서 시도한 것처럼 나노윤리에 대한 콘텐츠를 확보하기 위해 노력하는 것은 물론 이에 대한 체계적인 교육을 실시하는 것이 그 출발점으로 작용할 수 있을 것이다.

VII. 요 약

이 논문은 공학윤리를 확장하기 위한 연구의 일환으로 나노윤리(nanoethics)에 대해 검토했으며, 이를 위하여 나노기술의 역사적, 사회적, 윤리적 측면에 관한 다양한 자료들을 활용하였다. 이 논문에서는 나노기술의 위상과 발전과정에 대해 간략히 살펴본 후 나노기술의 윤리적 쟁점을 안전성 문제, 환경에 미치는 영향, 프라이버시 침해, 사회적 불평등, 군사적 이용, 인간능력의 향상 등으로 구분하여 분석하였다. 이어 나노윤리에 접근하는 원칙으로 대중의 이해 촉진, 참여적 거버넌스의 구축, 지속가능한 발전에의 기여, 사전예방의 원칙의 준수, 연구진실성의 확립을 제안하였다. 마지막으로 나노윤리에 대한 교육의 형태로 강의 모형, 조사 모형, 토론 모형을 종합한 방식에 주목하였다. 이러한 논의는 나노윤리에 대한 교육에서 활용할 수 있는 콘텐츠를 제공해 줄 수 있으며, 나노기술의 건전한 발전을 위한 기초로 작용할 수 있다.

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-006 1058).

참고문헌

1. 강찬형 외(2006). **재미있는 나노과학기술 여행**, 양문출판사.
2. 권복규(2007). **생명윤리 이야기**, 책세상.
3. 김명진(2007). 나노기술의 위험성, 어떻게 대처할 것인가. **함께 사는 길**, 2007년 6월호.
4. 송성수(1999). 현대 기술의 역사와 기술변화의 쟁점. 송성수 엮음, 과학기술은 사회적으로 어떻게 구성되는가, **새물결**, 311-345.
5. 송성수(2002). 미국의 국가나노기술계획. **과학기술정책, 12**(3): 80-90.
6. 송성수(2008). 공학단체의 윤리강령에 관한 비교분석: 미국과 한국의 사례를 중심으로. **공학교육연구, 11**(3): 78-89.
7. 신동호(2003). 나노의 반란? 나노튜브 동물실험에서 독성 확인. **과학동아**, 2003년 4월호.
8. 이상욱(2006). 나노기술의 윤리적 쟁점 및 정책방안. **ELSI 연구, 4**(2): 1-23.
9. 이영희(2004). 나노기술을 둘러싼 사회적 쟁점 연구. **과학기술학연구, 4**(1): 59-82.
10. 이은경(2007). 한국의 나노기술: 초기 정책 형성과 사회적 수용을 중심으로. **과학기술학연구, 7**(1): 91-116.
11. 이인식(2009). **한 권으로 읽는 나노기술의 모든 것**, 고즈윈.
12. 이인식 엮음(2002). **나노기술이 미래를 바꾼다**, 김영사.
13. 이중원(2009). 나노기술 기반 인간능력 향상의 윤리적 수용가능성에 대한 일고찰. **철학연구, 87**: 157-188.
14. 참여연대 시민과학센터(2002). **과학기술·환경·시민참여**, 한울.
15. 최경희·조희형(2003). 과학의 윤리적 특성 교수-학습 방법. **한국과학교육학회지, 23**(2): 131-143.
16. 추병완(2005). **정보윤리 교육론**, 개정판, 울력.
17. 현택환(2002). 거대한 나노기술: 나노기술 개요. 이인식 엮음, **나노기술이 미래를 바꾼다**, 김영사, 127-142.
18. 황은성 외(2011). **연구윤리의 이해와 실천**, 교육과학기술부/한국연구재단.
19. Altmann, J.(2004). Military uses of nanotechnology: perspectives and concerns. *Security Dialogue, 35*(1): 61-79.
20. Barden, D. et al.(2008). Anticipatory governance of nanotechnology: foresight, engagement, and integration. E. Hackett, et al. eds. *The Handbook of Science and Technology Studies*, 3rd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 970-1000.
21. Bhushan, B. ed.(2007). *Springer Handbook of Nanotechnology*, 2nd ed., New York: Springer.
22. Crichton, M.(2004). 김진준 옮김, **먹이**, 총2권, 김영사.
23. Drexler, E.(1986). *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, New York: Anchor Books.
24. European Commission(2007). Code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research. http://ec.europa.eu/research/science-society/index.cfm?fuseaction=public.topic&id=1561.
25. Feynman, R.(1959). There's plenty of room at the bottom.

http://www.its.caltech.edu/~feynman. [국역: 바닥에는 풍부한 공간이 있다. 이인식 엮음, **나노기술이 미래를 바꾼다**, 김영사, 2002, 99-124].
26. Fisher, E.(2005). Lessons learned from the Ethical, Legal and Social Implications program (ELSI): Planning societal implications research for the National Nanotechnology Program. *Technology in Society, 27*(3): 321-328.
27. Funtowicz, S. O. and J. R. Ravetz(1993). Science for the Postnormal Age. *Futures, 25*(7): 739-755.
28. Johnson, D. G.(1993). *Computer Ethics*, 2nd ed., Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall [국역: 추병완 외 옮김, **컴퓨터 윤리학**, 한울아카데미, 1997].
29. Joy, B.(2000). Why the future doesn't need us. *Wired, 8*(4): 238-262 [국역: 왜 우리는 미래에 필요없는 존재가 될 것인가. 이인식 엮음, **나노기술이 미래를 바꾼다**, 김영사, 2002, 288-329].
30. Kahan, D. M. et al.(2009). Cultural cognition of the risks and benefits of nanotechnology. *Nature Nanotechnology, 4*(2): 87-90.
31. Kuhse, H. and P. Singer(1998). *A Companion to Bioethics*, Oxford: Blackwell Publishing Ltd. [국역: 변순용 외 옮김, **생명윤리학**, 총2권, 인간사랑, 2006].
32. Laurent, L. and J. Petit(2006). 손병혁·이수지 옮김, **나노기술, 축복인가 재앙인가?**, 황금가지.
33. Mnyusiwalla, A. et al.(2003). Mind the Gap: Science and Ethics in Nanotechnology. *Nanotechnology, 14*(3): R9- R13.
34. National Academy of Engineering(2004). *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering*, Washington, D.C.: The National Academies Press.
35. Renn, O. and M. C. Roco(2006). Nanotechnology and the need for risk governance. *Journal of Nanoparticle Research, 8*(2): 153-191.
36. Royal Society and Royal Academy of Engineering(2004). *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. http://royalsociety.org/Nanoscience-and-nanotechnologies-opportunities-and-uncertainties-/
37. Satterfield, T. et al.(2009). Anticipating the perceived risk of nanotechnologies. *Nature Nanotechnology, 4*(11): 752-758.
38. Smalley, R. E.(2001). Of chemistry, love and nanobots. *Scientific American, 285*(3): 68-69 [국역: 화학, 사랑, 그리고 나노봇. 박성근 편역, **작은 나노의 큰 세상**, 과학과 문화, 2002, 133-140.
39. The ETC Group(2003). *The Big Down: Atomtech - Technologies Converging at the Nano-scale*. http://www.etcgroup.org/en/node/171.
40. The Senate and House of Representatives of the United States of America(2003). 21st century nanotechnology research and development act. http://www.theorator.com/bills108/s189.html.
41. Voland, G.(2009). 전영록 외 옮김, **공학문제해결을 위한 공학설계**, 제2판, 교보문고.
42. Wilson, M. et al.(2004). 김대준·이내성 옮김, **나노기술의 이해: 보이지 않은 과학의 세계**, 한티미디어.

최경희 (Kyunghee Choi)
1985년: 이화여대 과학교육과 졸업
1987년: 동 대학 교육대학원 석사
1991년: 미국 템플대학교 물리학 석사
1994년: 동 대학 과학교육학 박사
1994년~현재: 이화여대 과학교육과 교수
관심분야: 과학교육, STS교육, 과학윤리
Phone: 02-3277-2615
Fax: 02-3277-2684
E-mail: khchoi@ewha.ac.kr

송성수 (Sungsoo Song)
1990년: 서울대 무기재료공학과 졸업
1993년: 동 대학원 과학사 및 과학철학 협동과정 석사
2002년: 동 과정 박사
1999~2006년: 과학기술정책연구원 부연구위원
2006년~현재: 부산대 기초교육원 교수
관심분야: 공학윤리, 과학기술사, 과학기술정책
Phone: 051-510-3837
Fax: 051-510-3848
E-mail: triple@pusan.ac.kr

이향연 (Hyang-yon Rhee)
1999년: 경희대 물리학과 졸업
2005년: 이화여자대학교 교육대학 원 석사
2011년: 동 대학 과학교육학 박사
2007~2009년: 경인교육대학교 시 간강사
2011년~현재: 이화여자대학교 박 사후 연구원
관심분야: 과학교육, 문제중심학습(PBL), 과학기술윤리
Phone: 02-3277-4328
Fax: 02-3277-2684
E-mail: rheehy@ewha.ac.kr