

총설(Review)

나노물질의 인체 및 환경유해성에 관한 위해성평가 방안의 고찰

김미숙, 최경희[†], 김영훈[‡], 이종협^{*}

서울대학교 화학생물공학부
151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1

[†]국립환경연구원 화학물질평가부
404-170 인천시 서구 경서동 종합환경연구단지

[‡]광운대학교 화학공학과
139-701 서울시 노원구 월계동 447-1

(2007년 6월 12일 접수, 2007년 8월 20일 채택)

Risk Assessment for Health and Environmental Hazards of Nanomaterials

Mi-Sug Kim, Kyunghee Choi[†], Younghun Kim[‡], and Jongheop Yi^{*}

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University
San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

[†]National Institute of Environmental Research
Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-170, Korea

[‡]Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University
447-1 Wolgye-dong, Nowong-gu, Seoul 139-701, Korea

(Received for review June 12, 2007; Revision accepted August 20, 2007)

요 약

청정기술의 발전을 위하여 나노기술이 융합된 새로운 기술의 도입이 필요하다. 최근 개발된 나노입자, 나노튜브 등은 이미 많은 소비재의 원료로 사용되고 있으며, 인체 및 환경에 쉽게 노출될 수 있다. 이러한 나노입자는 작은 크기와 넓은 비표면적 특성으로 인해 기존물질에 비하여 반응성이 높고 인체나 환경에 독성을 나타낼 커다란 잠재성을 가지고 있으며, 이미 많은 연구결과에서 이러한 나노물질이 인체 및 환경 유해성을 유발하는 원인과 결과에 대하여 보고하고 있다. 본 논문에서는 나노기술 기반 청정기술 발전의 방향을 제시하기 위하여 나노물질의 인체 및 환경 유해성에 관한 위해성평가 방안을 검토하고, 나노물질의 잠재적인 유해성을 살펴보고자 한다.

주제어 : 나노물질, 전과정평가, 위해성평가, 나노독성, 환경/인체/안전(EHS)

Abstract—Fusion technology based on the nanotechnology should be introduced to clean technology for the breakthrough advances. Today, nanoparticles, nanotubes and other engineered nanomaterials are already in use in hundreds of everyday consumer products, and these materials are able to move around the human and environmental media more readily than larger particles of pollution. Because of their extremely small size and large surface area, nanoparticles are known to be more reactive and toxic than larger particles. Consequently, this feature raised many concerns of significant health, safety and environment. Herein, we reviewed risk assessment for health and environmental hazards of nanomaterials, and then revealed the potential hazardous of nanomaterials.

Key words : Nanomaterials, Life-cycle assessment, Risk assessment, Nanohazards, Environment/health/safety(EHS)

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jyi@snu.ac.kr

1. 서 론

리우선언문(Rio Declaration)이 발표된 이후 환경정책 및 환경기술 개발의 방향성 결정에서 가장 부각되었던 환경용어는 “지속가능(sustainable)”이다. 즉, 현재 대두되고 있는 환경문제를 후처리법과 같은 문제가 발생한 다음에 해결하자는 것이 아닌, 환경에 최소한의 영향을 주는 범위 내에서 지속적인 발전이 가능한 대체 기술로 환경문제를 해결해 보자는 의지가 담긴 용어이다. 이는 최근 환경개념인 무방류/무배출 친환경청정 시스템을 요구하는 산업체의 현황과도 일치하고 있다. 또한 이러한 친환경 공정을 달성하기 위해서는 새로운 기술들이 요구되게 된다. 특히 최근에 가장 눈부시게 발전하고 있는 나노/바이오 기술은 우리가 이루고자 하는 친환경청정 시스템 구축에 없어서는 안될 기술로 자리잡고 있다. 그 일례로 기존 후처리 공정에서 처리하지 못하던 극미량의 유해물질의 제거를 위해 나노기공성 흡착제를 사용한 사례와 고효율 나노촉매를 이용한 염소계열의 유해가스를 유용한 자원으로 전환시켜 염소 무방류 공정에 적용한 예를 들 수 있다[1].

그러나 바이오기술이 각광을 받고 있을 때, 농축산업계에서는 병충해에 내성을 지닌 식물자원 및 우량의 축산자원을 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있으나 실제 소비자는 유전자변형 식품(GMO)에 대해서는 거리감을 두고 있어서 기술 적용에 어려움을 겪고 있다. 또한 유전자 조작과정에서 윤리문제가 거론될 정도로 복제기술에 대한 사회적인 인식도 개선될 필요를 느끼고 있다.

따라서 기술발달이 가져다 주는 양면성에 비추어 볼 때, 나노기술을 활용한 제품이나 공정들은 사회적인 문제점 또는 기술적인 부작용을 조래할 가능성을 예측할 수 있다. 나노기술을 청정기술 분야에 활용하다 보면, 현재는 그 적용분야가 적어서 문제점이 나타나지 않지만, 사회전반적으로 활용되기 시작한다면 나노기술을 활용한 청정기술의 부작용이 나타나지 않을 수 없을 것이다. 즉, 현재 그 유해성이 확연하게 드러나지 않았다고 해서 유해성이 없는 것으로 판단해서는 안 된다는 점이다. 본 논문에서는 이러한 기술의 양면성 입장에서 나노기술, 특히 나노물질이 가져다 줄 수 있는 잠재적인 유해성을 살펴보고, 인체 및 환경 유해성에 관한 위험성 평가 방안을 고찰하였다.

1.1. 나노기술의 응용

나노 세계의 장을 처음으로 연 계기가 되었던 1959년의 리차드 파인만의 강연 이후, 나노기술의 현재 위상은 21세기 현대기술 중 최고봉을 차지하면서도 모든 기술의 근간을 이루게 되었다고 할 수 있다. 보다 작고 보다 효율이 좋은 미시의 나노세계로 접근하지 않는 기술은 살아남지 못하게 되고 있다. 나노라는 화두를 중심으로 화학, 물리, 생물, 공학 등 기존의 학문 분야의 계승뿐만 아니라 다학제간의 연구를 통한 기술의 진화를 이루고 있다. 이러한 나노기술의 발전을 확인할 수 있는 방법은 생활속에 얼마나 많은 나노기술이 침투하였는지를 확인해 보면 쉽게 알 수 있다.

매가 타지 않고 물에도 젖지 않는 연일 효과를 이용한 로터산

(Lotusan) 페인트나 더러워지지 않는 옷을 만들 수 있는 나노 섬유(nanotex) 등은 작업장에서도 입을 수 있는 새하얀 바지를 손쉽게 만들 수 있다. 이는 나노수준의 거칠기를 부여할 수 있는 나노돌기를 만들어 물이 젖지 않게 만들어 주는 효과와 산화티타늄 나노입자를 이용한 유기물의 자연분해 기술을 이용한 사례이다. 스포츠 분야에서도 나노기술이 접목된 용품들이 개발되어 선수들의 실력향상에 도움을 주고 있다. 그 대표적인 사례가 탄소나노튜브로 제조한 초경량 고강도 재료를 활용한 야구 배트, 골프채, 테니스라켓 등이 있다. 살균성과 항균성이 뛰어난 은나노 입자는 세탁기, 공기청정기, 냉장고, 에어컨 등 각종 가전 제품 제조에 활용되고 있다. 또한 피부 노화 방지 효과가 있다는 나노화장품 등은 주름 개선용이나 미백용으로 사용되고 있다. 기존의 화장품에 비해 나노캡슐 기술을 이용한 제품은 피부 깊숙이 스며들어 보다 효과적이라고 한다. 자외선 침투를 막아주는 선크림, 선블락은 50나노미터 크기의 산화아연을 이용한 사례로 기존의 선크림 보다 투명한 느낌을 주고 보다 효과적인 자외선 차단 효과를 주고 있다. 젊은이들의 필수품이 되고 있는 ‘아이팟 나노’는 나노기술로 제작한 메모리(삼성)가 핵심 부품으로 자리하고 있음을 보여준다. 이외에도 나노촉매를 활용한 고기능성 배기처리기술, 자연친화적인 에너지 생산을 위한 연료전지 기술, 수천권의 도서 내용을 손톱만한 메모리에 저장할 수 있는 고집적기술 등도 모두 생활속에 침투한 나노기술의 사례로 들 수 있다.

이처럼 나노기술의 발전은 최근의 일상뿐만 아니라 앞으로 다가올 미래가 기술적으로 진보한 세상이 될 것이라는 기대를 갖게 만든다. 이에 기업의 연구소는 물론 국가차원에서 경쟁적으로 나노기술에 대한 연구와 사업 구상에 열을 올리고 있다.

1.2. 국가간 나노기술 전쟁

세계 나노기술 개발 경쟁은 연구개발비의 규모로 평가할 수 있다. 미국을 선두로 하여 일본, 유럽, 중국, 한국 등 정부 차원에서 집중적인 예산 책정을 통한 나노기술 강국을 만들기 위해 노력을 하고 있다. 미국 나노기술개발전략(NNI, National Nanotechnology Initiative)를 시작으로 전 세계는 나노기술 투자에 열을 올리고 있다. 미국 정부는 2007년 초에 2008년도 회계연도(2007.10-2008.9)의 나노기술연구개발비 규모를 지난해 보다 4% 증가한 14억 5천만 달러로 발표한 바 있다. 이 같은 예산규모는 NNI 초기연도인 2001년보다 3배이상 증액된 것으로 지난 8년간 80억 달러가 투자된 셈이며, 이는 범정부 차원에서 나노기술 개발 및 투자에 지대한 관심 보이고 있음을 나타낸다. 일본 역시 나노 강국을 향한 강한 의지를 불태우고 있으며, 미국 NNI의 영향을 받아 본격적으로 나노기술 연구개발 전략을 수립하고 있다. 2006년 3월 일본 종합과학기술회의에서는 향후 5년간을 전망하는 새로운 나노기술전략을 확정하여, 나노전자, 나노재료, 나노바이오 등 29개 중요연구개발과제를 선정하였다. 2005년 일본의 나노기술 및 재료 분야의 연구 투자 예산은 971억엔에 달하고 있다. 중국 또한 최근 수립된 국가 중장기 과학기술 발전 계획(2006-2020)을 통해 나노기술을 핵심적인 연구개발분야로 선정하고 있다. 유럽연합은 연구개발의 통

합 및 조정을 목표로 1984년부터 도입된 프레임워크 프로그램(FP, Framework Program)을 통하여 나노기술분야에 집중 투자하고 있다. 최근에는 7차 프레임워크 프로그램(2007-2013)이 가동되고 있으며, 나노관련 분야에 48억유로가 연구예산으로 책정되었다.

우리나라도 2007년 올해 나노기술발전시행계획 발표를 통해 나노기술 선진 3대국 진입을 위한 기술확보 가속화를 목표로 하고 있다. 이를 위해 과기부, 환경부 등 9개 부처의 유기적인 협조하에 나노기술을 접목한 융합기술개발 지원확대, 나노관련 인프라 활용성 증대 및 체계적인 전문인력 양성, 핵심 원천기술의 지속적 확보 및 조기 산업화 촉진, 국제 경쟁력 제고를 위한 표준화와 사회기술적 영향평가 강화 등의 주요 연구분야를 지원 육성하고 있다. 이를 위해 정부는 올해 2800억원의 예산을 나노기술분야에 투자할 예정으로 있으며, R&D에 72%, 인프라 구축에 22%, 6%에 전문인력 양성에 투자하고 있다.

국가 나노기술 경쟁력은 연구활동 활성화를 통한 논문 및 특허 건수 등으로도 평가할 수 있다. 즉, 논문의 출판을 통한 확산이나 인용분석 등에 기초한 양적 평가지표를 이용해 측정하는 서지적 방법에 의해 평가되고 있다. ISI사의 SCI DB를 이용한 1997년부터 2005년까지의 출판된 논문중 나노기술과 관련하여 10만건 정도가 발표되었다. 97년 전체 SCI중 0.4%(3,848건)에 그쳤던 나노관련 논문은 2005년 2.1%로 전세계적으로 24,084건의 논문이 발표되었다. 우리나라의 경우, 97년에 54편에 불과하였으나 연평균 50%의 높은 증가율로 꾸준히 증가하여 2005년에는 1400여편이 발표되었다. 2006년 국가별 논문 비율로 보면, 미국(28.2%), 중국(16.7%), 일본(12.1%), 독일(8.9%), 프랑스(6.2%)에 이어 6번째로 우리나라(4.9%)가 논문을 발표하는 113개국중 상위 그룹에 속하고 있다.

이와 같이 국내외적으로 나노기술에 관한 선택과 집중적인 투자가 이루어지고 있으며, 국가간의 기술 선점을 위해 전쟁과도 같은 치열한 경쟁을 하고 있다.

1.3. 나노기술과 청정기술의 융합

상기에서처럼 집중 투자되고 있는 나노기술을 청정기술에 어떻게 적용하고 있는지 살펴볼 필요가 있다. 이는 청정기술의 생존을 위한 것으로 기술의 진화, 즉 융합기술의 필요성과도 접목된다고 할 수 있다. 정부에서는 2단계 차세대 핵심환경기술개발사업 추진을 통한 기초 원천연구 및 융합기술 분야 투자 확대 등과 같은 정책과제 제언에서 환경융합기술의 필요성을 언급하였다. 즉, 과학기술의 발전에 따라 발생하고 있는 환경문제에 대응하기 위해서는 새로운 과학기술 지식을 바탕으로 한 환경정책 추진이 불가피하며, 나노기술 등 신기술을 이용한 환경기술개발 수요가 증가하고 있음을 설명하고 있다. 신화학기술의 발전에 따른 새로운 화학물질의 홍수, 나노수준의 환경문제 발생, 환경 위해성 평가 수요 등에 대응하기 위해서는 새로운 과학기술 창출을 위한 환경분야 기초원천연구가 필요하다. 또한 NT, IT, BT, ET 등의 발전으로 이들 기술과의 접목을 통한 융합기술영역은 우리나라가 선진국과 경쟁할 수 있는 영역이라고 할 수 있다.

현재 우리나라는 향후 10년간 "Cash Cow" 역할을 담당하고 이익창출 가능하며 고용효과를 선도할 새로운 환경분야를 필요로 하고 있다. 이를 위해 나노기술과 청정기술을 융합한 새로운 환경기술이 대두되고 있다. 기술간의 융합은 신기술에 따른 환경문제를 해결 할 수 있을 것으로 기대되고 있으며, 기존 환경기술의 한계성으로 간주되었던 후처리중심의 오염물질 처리기술을 대체할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

이와 같이 나노기술과 융합한 청정기술은 고기능성 신제품을 생산하거나 무배출, 무방류 공정을 설계하는데 도움을 줄 것이다. 그러나 최근 부상하고 있는 나노물질의 안전성 논란은 NT-CT(clean technology)의 융합에 있어 위해성 여부를 생각하지 않을 수 없도록 만들고 있다.

2. 나노물질의 유해성

2.1. 잠재된 유해성

차세대의 핵심기술로 인식되는 나노기술은, 공학과 과학기술의 획기적인 개선으로서 사회전반에 커다란 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상된다. 특히, 나노기술의 개발과 그 활용으로 인해 파생되는 경제적인 파급효과는, 향후 나노 기술개발활용의 확산을 가져올 전망이다. 그러나 이러한 나노기술의 기대와 더불어 파생되고 있는 또 다른 문제점은 나노 기술개발에 따른 나노 물질의 유해성이다. 나노기술은 원자와 분자수준의 물질을 제어하여 나노 수준의 구조체인 나노물질을 생성하는데 이러한 나노 물질과 그 부산물이 환경과 인체에 미칠 잠재적인 악영향에 대한 가능성이 높아지고 있다[2-9].

이에, 나노 물질의 환경과 보건 및 안전성에 관한 문제가 주요 정치적 관점으로 대두되면서, 한국과 미국은 나노기술 영향평가에 대해서 법으로 보장하고 관련연구를 진행하게 되었으나 그 활동이 미진한 상태였다. 최근 2-3년 동안에, 이에 따른 연구 지원이 미국, 영국, 일본, 한국, 유럽 등 주요 국가들에서 크게 증가하고 있다. 본 논문에서는 나노기술의 위험성 평가에 대한 연구를 진행하기 위해서 기존의 문헌을 바탕으로 나노물질에 대한 특성, 거동, 독성 정보와 나노물질의 안전성평가 (또는 위험성 평가)에 대해 제안된 연구전략 등을 고찰해 보고, 나노기술의 유해성 연구의 필요성과 잠재적인 노출과 독성연구사례, 필요한 연구분야 그리고 향후 연구방향 등으로 나누어 정리하였다.

2.2. 나노기술의 잠재된 유해성 연구의 필요성

나노기술의 특성상 나노물질의 인체 및 환경 노출의 유해성은 아직 불확실하나 나노물질의 잠재적인 위험성에 관한 의문점과 관심은 미국을 비롯하여 유럽, 영국, 스위스 등에서 증가하고 있다. 특히 미국 EPA에서 발표한 나노기술백서에 따르면 나노기술의 개발과 위해성 평가에 관한 연구를 주요 연구과제로 삼고 구체적인 연구의 진행 방향을 제시하고 있다[3]. 유럽 신규 보건위험과학위원회(Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, SCENHR)는 나노물질에 대한 기존의 자료를 분석하여, 자료간의 차이와 나노물질의 위

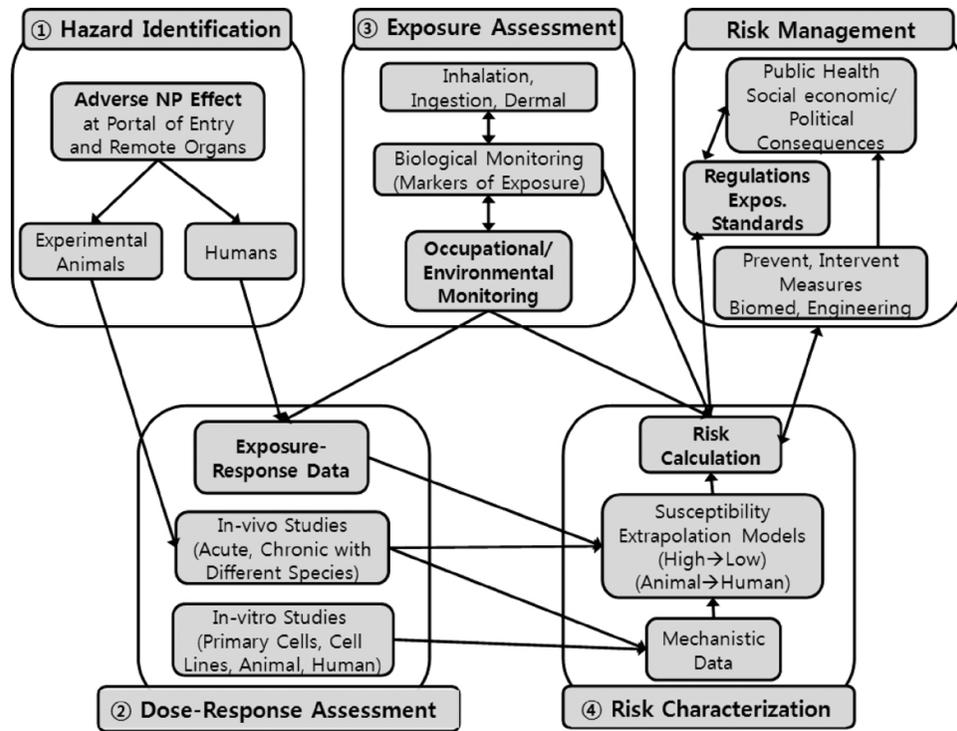


Figure 1. Risk assessment approach and risk management for nanomaterials [2].

해성 평가를 시행하는데 나타나는 몇 가지 문제점의 개요를 정리하고, 나노물질 위험성 평가 시행의 한계성을 극복할 새로운 방법 모색이 중요함을 강조하였다[10]. 미국이나 유럽과 같이 나노물질의 잠재적인 유해성 및 위험성 평가에 대한 구체적인 연구와는 달리, 포괄적인 나노기술의 일반론 연구에 치중해 온 한국은 2006년 10월 OECD 회의에 참여하면서 나노물질의 위험성 문제에 대한 국제적 협력활동을 전개해 나가고 있고, 또한 일본은 나노소재가 건강에 미치는 영향을 조사하는 안전성평가 프로젝트를 추진하고 그 연구성과를 국제회의 등에서 발표함으로써 경제협력개발기구(OECD)와 국제표준화기구(ISO)가 진행하는 안전관리 등의 국제기준에 반영하려는 전망이다.

나노물질의 노출에 따른 위험성(독성)을 파악하고 이해하기 위해서는 무엇보다도 나노물질의 물리 화학적 특성의 이해와 물리적 거동을 파악하고 세포 생리화학적 생체 내 작용의 이해가 필요하며 이를 바탕으로 생산, 환경, 건강에 미칠 수 있는 유해성에 대한 안전지침을 확보해야 한다 (Figure 1)[2-3]. 일반적으로 기존 화학물질에 사용되고 있는 위험성 평가 방법은 유해성 정의, 사용량-반응 평가, 노출평가, 그리고 위해도 특성의 절차로 나누어져 평가되며, 이 방법은 나노물질에도 적용이 가능하다. 그러나, 작은 크기의 입자일수록 그 표면적이 넓어져 생체조직에 대한 반응성과 그에 따른 독성이 증가하므로 나노 크기의 특성을 고려한 나노물질의 새로운 물리화학적 성질과 이로 인한 독성에 대한 조사가 무엇보다도 중요하다. 그러므로 나노물질의 위험성 평가를 하기 위해서는 나노입자의 독특한 특성과 문제점, 거동, 노출 및 독성의 잠재적인 영향에 대한 연구가 필요하다.

2.3. 인간 및 환경에서의 나노물질의 잠재적 노출과 독성 사례

2006년 11월 26일 기준으로 대략 360개 이상의 나노 제품이 상용화되고 있는데, 이러한 소비자 제품 및 친환경 소재로 사용되는 나노물질과 그 부산물이 독성을 지닌다면, 아주 작은 크기의 나노 입자 특성으로 인해 인체 및 환경매체로의 유입뿐만 아니라 매체내의 이송도 용이하여 다양한 종류의 매체에서 그 피해가 발생할 수 있으므로 치명적인 신중 환경오염원이 될 것으로 추정된다.

다양한 합성 방법에 대한 근로자 노출과 몇 가지 상품유형에 따른 소비자 노출의 잠재적인 노출원과 그 노출경로를 Table 1에 나타내었다. 나노물질은 제조과정을 통해 직접/간접적으로 환경에 노출되는데, 주로, 정유과정, 화학약품/재료 제조과정, 오염현장을 개선하기 위한 화학적 정화활동과 같은 산업 배출에 의한 근로자 노출과 나노물질이 이용된 제품을 사용하는 소비자 노출 그리고 소비자 상품이 사용 후 나노물질이 제품에 남겨진 채 재활용 및 매립과 소각 등의 처분과정 중에 인체 및 생태계(환경)에 노출되게 된다. 인체에 노출된 나노물질은 입(섭취), 코(흡입), 피부와 눈 등의 신체 외부에서 유입되어 대상 기관까지 운반되면서 흡수되고 분포하며 화학물질의 특성과 노출 경로에 따라서 물질의 신진대사가 이루어진다.

Figure 2는 US EPA[3]가 제시한 입자와 관련된 연구 문헌의 수를 나타낸 그래프로서 2005년까지 출판된 입자 독성연구에 관련된 문헌 조사는 화학적으로 정의된 초미립자(PM and particle, diesel particle, coal fly ash, oil fly ash, silica, Uf silica, carbon black, Uf carbon black, TiO₂, Uf TiOs)와 인위적으로 생성된 나노물질(fullerene, carbon nanotubes,

Table 1. Exposure pathway and sources to human health [3, 11]

Synthesis process/product	Target	Sources	Exposure route
Gas phase in atmosphere	Laborer	Direct leakage from reactor	Inhalation
		Product recovery from bag filters in reactors	Inhalation, Dermal
		Processing and packaging of dry powder	Inhalation, Dermal
		Equipment cleaning/maintenance	Dermal
Vapor deposition on substrate	Laborer	Product recovery from reactor/dry contamination of workplace	Inhalation
		Processing and packaging of dry powder.	Inhalation, Dermal
		Equipment cleaning/maintenance	Dermal
Colloidal/atrition/liquid suspension	Laborer	If liquid suspension is processed into a powder, potential exposure during spray drying to create a powder, and the processing and packaging of the dry powder	Inhalation, Dermal
		Equipment cleaning/maintenance	Dermal
Sunscreen containing nano-scale material	Consumer	Product application by consumer to skin	Dermal
	Citizen	Release by consumer to water supply	Ingestion
		Disposal of sunscreen container after use	Inhalation, Ingestion
Metal catalysts in gasoline for reducing vehicle exhaust	Citizen	Release from vehicle exhaust to air	Inhalation, Ingestion
Paints and coatings	Consumer, Citizen	Weathering, disposal	Dermal, Inhalation, Ingestion
Clothing	Consumer, Citizen	Wear, washing, disposal	Dermal, Inhalation, Ingestion from surface or groundwater
Electronics	Consumer, Citizen	Release at end of life or recycling stage	Dermal, Ingestion from surface or groundwater
Sporting goods	Consumer, Citizen	Release at end of life or recycling stage	Dermal, Inhalation, Ingestion from surface or groundwater

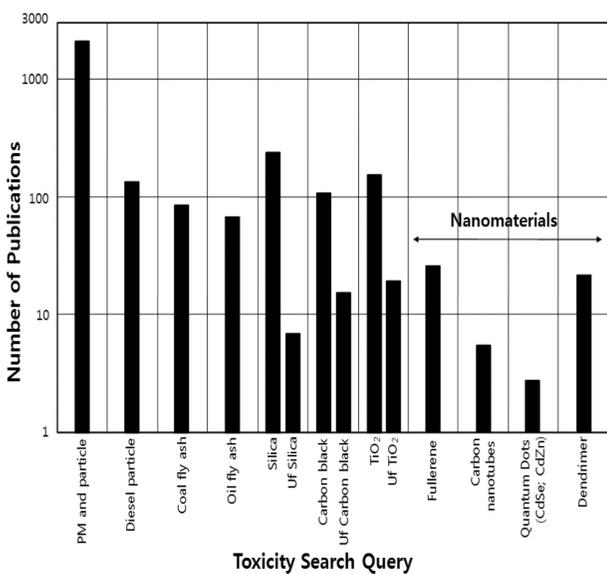


Figure 2. Number of publications for nanohazard [3]. Uf is ultrafine particles under 100 nm size, and PM is particulate matter.

quantum dots, dendrimer)을 대상으로 하였다. 현재까지 진행된 나노물질의 독성연구가 미진한 상태임을 알 수 있었으며 자료도 충분하지 않아 나노물질의 유해성에 대한 정보가 아직은 분명하게 밝혀져 있지 않았다 [12-13].

보고된 문헌[2-9]에 따르면 인위적으로 생성된 나노물질(나노 물질)의 노출과 함께 가장 큰 위험성을 지니는 노출경로(흡입, 섭취, 피부)의 정보는 나노 물질의 특성을 파악하는 것만큼이나 중요하다. 소비자 상품에 함유된 나노 물질들이 환경에 노출되어 피부로 투과되는 경우 피부나 다른 기관의 세포독성, 장기간 노출에 따른 피부나 기관의 축적, 신진대사에 의해 증가된 독성 및 광 독성 등의 문제가 발생하게 된다. 나노입자의 독성 메커니즘은 크게 농도와 입자의 차원(모양과 크기)에 의해 결정되는데, 특히 나노입자의 작은 크기로 인해 표면적이 증가되면서 같은 성분의 큰 입자에 비해 그 독성도 증가하는 것으로 나타났다[14].

나노입자의 폐 침착에 대한 연구결과는 부족하지만 미세입자로 인해 매우 심각한 전신독성반응뿐만 아니라 초기 침착부위에서 국소적인 독성 영향을 일으키는 입자들의 능력에 따라 건강에 악영향을 미친다[15]. 나노 물질의 폐침착으로 인한 악영

향은 여러 연구사례에서도 나타나고 있다[16,17]. 탄소나노튜브(Carbon Nanotube), TiO₂, 풀러린(Fullerenes), 양자점(Quantum Dots), 나노결정(Nano Crystal) 등과 같은 인공 나노소재들은 노출경로(피부, 흡입, 섭취, 눈), 생체분포, 독성 메커니즘, 폐 침착과 제거, 노출연구, 그리고 제어 연구 등에서 많이 이용되었다. 문헌에 따르면, 표면특성(전하와 면적과 반응성) 뿐 만 아니라 다양한 물리화학적 특성(크기, 모양 등)에 의해 잠재적으로 조절되므로 나노입자의 독성은 상당히 복잡하고 다원적이라 할 수 있다.

최근 US EPA[3]에서 언급된 나노기술이 오염방지와 처리를 위한 목적으로 생산한 나노물질을 정리해 보면, 첫째, 할로겐화 탄소(Trichloroethylene, TCE, 또는 Dichloroethylene, DCE)와 중금속에 오염된 토양과 대수층을 처리하기 위한 제로가의 반응성 철 나노 물질 등이 있다. 그러나 제로가의 반응성 철 나노물질이 보다 복잡한 폴리염화탄소(polychlorinated hydrocarbon)를 분해할 경우 그 부산물로 biphenyl과 benzene 이 생성된다. 둘째, 대기 중 질소산화물(NOx)을 줄이기 위한 목적으로 시멘트와 표면 코팅제와 같은 빌딩건축자재 안에 광촉매 TiO₂(titanium dioxide) 나노입자를 혼합하고 있는데 NOx 제거효율에 대한 기대치는 높으나 나노-TiO₂가 기타 다른 대기오염물질과의 반응 정도와 이에 동반되어 건강에 미칠 영향이 어느 정도인지 알려져 있지 않다. 또한, 디젤연료첨가제에 함유된 나노-세륨 산화물은 연료 경비의 절감과 배출량 감소 등의 장점이 있으나 세륨이 대기독성물질(benzene, 1,3-butadiene, acetaldehyde)의 수준을 증가시킬 수 있는 디젤 배기가스의 물리화학적 성질을 상당히 변경할 것으로 보이며 건강에 대한 영향은 아직까지 알려진 바가 없다.

2.4. 나노물질의 인체 및 환경 유해성 연구 동향

작년에 미국 NSF는 과학공학지표(Science and Engineering Indicators) 조사를 통하여 자국내 대중의 과학기술에 대한 태도조사를 실시하였다. 그 중 나노기술의 사회적 위험요인을 분석한 결과, 나노기술로 인한 초소형 감시장비의 개발에 따른 개인 프라이버시 침해(32%), 나노기술 군비경쟁(24%), 나노입자 흡입(19%), 직업손실로 인한 경제혼란(14%), 제어할 수 없는 나노로봇의 유포(12%) 등으로 보고되었다. 이러한 조사를 하게 된 이유는 대중의 80%이상이 나노기술을 낙관적으로 본다는 점과 존재하고 있는 나노기술의 위해성을 간과할 수 없다는 점 때문이다.

나노입자의 유해성에 강한 입장을 나타내고 있는 캐나다의 ETC 그룹은 안정성이 입증될 때까지 나노입자의 생산을 금지해야 한다고 주장하고 있다. 또한 라이스대학 나노기술환경생물센터의 Colvin 소장은 나노입자가 더 확산되기 전에 안정성에 대한 평가를 하는 것이 앞으로 발생하지 모를 피해를 줄이는 최선책을 강조하고 있다. 이와 같은 극단적으로 나노물질의 유해성을 주장하는 그룹을 예로 들지 않더라도, 잠재된 유해성을 무시할 수만은 없다. 이에 나노기술 선진국이라고 자처하는 나라들은 최근 몇 년전부터 나노기술 위해성에 관한 관심을 보이고 있다.

국내의 경우, 2001년 수립된 나노기술종합발전계획에 기반하여, 나노기술개발촉진법 19조와 나노기술개발촉진법시행령 17조에 의거 나노기술 영향평가를 명문화하여 왔다. 국립독성 연구원에서는 2007년부터 나노물질 독성기반연구 사업을 추진하고 있으며, 환경부 차세대핵심환경기술개발사업으로 “나노물질에 의한 환경/인체 위해성 관리 시스템 구축”이라는 과제가 진행되고 있다. 미국은 2003년 8월에 설립한 나노기술환경보건영향위킹그룹(NEHI WG)를 통하여 나노기술의 환경 및 보건영향 부문을 조정하고 있다. 2007년 예산 청구액 중, 환경/보건/안전(EHS, Environmental, health, and safety) 부문에 4,410만 달러가 책정될 정도로 높은 관심을 보이고 있다.

나노기술에 대한 선진국의 EHS 영향 연구에 견주어 우리나라는 연구활동이 미진한 편이다. 보고되고 있는 문헌이나 논문을 보더라도 우리나라는 아직 나노물질의 인체 및 환경유해성 평가시스템 구축에 있어 초기단계임을 알 수 있다. 따라서 중요 시되고 있는 나노물질의 제조표준화 및 안정성평가 표준화 시스템 구축을 위해서도 범정부 차원에서 전략 수립이 요구되고 있다.

3. 나노 물질의 위해 평가 연구 분야

나노 물질의 위해 평가(risk assessment)를 수행하는데 필요한 주요 특성에 대한 영향을 나타내는 Figure 3은 나노물질의 유해성과 관련된 변수들을 이해하는데 필요할 잠재적인 연구분야에 대해 설명하고 있다[9]. Figure 3에 포함된 각 항목별로 보다 상세한 내용이 Morgan(2005)에 의해 보고되었다. 각 항목들은 변수와 위해성평가 분야의 관계도를 보여주었다. 화살표는 가정된 영향력의 진행방향을 나타내는 것으로 만약 화살표가 변수 1에서 변수 2를 향해 있다면 변수 1이 변수 2에 직접 또는 간접적으로 영향을 미칠 것으로 가정된다. US EPA[3]에서는 나노기술의 개발과 위해성 평가에 관한 연구를 주요 연구 과제로 삼고 구체적인 연구 진행 방향을 제시하였다. 그 내용을

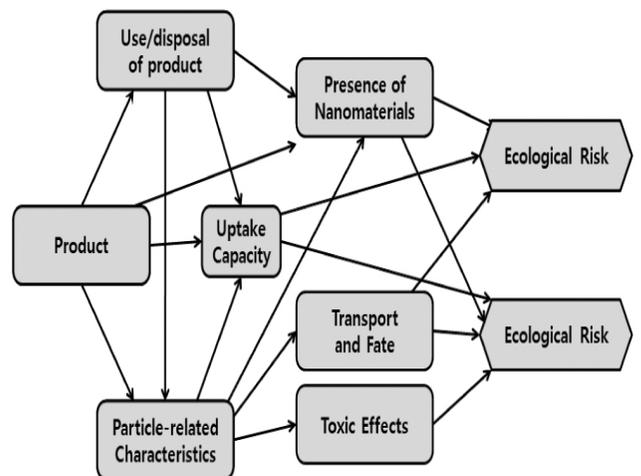


Figure 3. Influence diagram for nanomaterial properties relevant to evaluation of hazard [9].

근거로 물리적 화학적 정의 및 특성, 환경거동, 환경검출 및 분석, 인간 및 생태계의 영향 평가 등과 같은 몇 가지 주요 관점을 정리하였다.

3.1. 나노물질의 물리화학적 정의 및 특성

나노물질의 위해성 평가 절차에서 가장 중요한 첫 단계인 나노물질의 물리화학적 정의와 특성은 일반적으로 독성상과 생태학상의 위해성 평가에 필수적이며, 성분, 구조, 분자량, 녹는점, 끓는점, 증기압, octanol-water 분배 계수, 수용성, 반응성 및 안정성 등을 들 수 있다. 물질의 제조와 공식에 대한 정보는 순도, 제형의 변이성, 성능, 용도 등을 이해하는데 도움을 준다. 그러나 나노물질의 경우 무엇보다도 입자의 크기와 크기분포, 표면과 부피의 비율, 형태, 전자특성, 표면특성, 분산/응집 상태, 전도성 등은 매우 중요한 정보가 될 것이다. 또한, 나노기술 분야에서 사용되는 용어와 나노 크기의 물질의 화학명명에 대한 국제 표준화가 필요하며 이를 개발하기 위해 미국, 유럽 등의 주요 국가들이 적극적으로 참여하고 있다. 예를 들면, 미국의 EPA's OPPT(Office of Pollution Prevention and Toxics), ANSI(American National Standards Institute), ASTM(American Society for Testing and materials), ISO(International Organization for Standardization)와 CAS(Chemical Abstracts Service) 등이다[3].

3.2. 나노물질의 환경거동

나노물질의 환경 내에서의 거동(fate)에 대한 근본적인 특성이 잘 알려져 있지 않고 또한 나노물질의 환경거동에 대한 연구도 아주 적은 편이다. 대기, 수계, 토양 등 환경매체 내에서 입자의 거동에 영향을 주는 주요 인자들로는 물리화학적 특성뿐만 아니라 매체 내 체류하는 시간의 길이, 다른 입자 또는 분자와의 상호작용, 침전하기 전에 매체 내에서 이동한 거리 등이 있다. 환경매체 내에서 입자 거동의 주요 과정으로는 흡착, 응결, 침착(건식 및 습식), 중력침강 등이 있고, 매체 내에서의 나노입자가 흡착되는 강도는 나노입자의 크기, 화학반응, 표면처리, 매체 내 조건 등과 같은 물리화학적 거동 과정뿐만 아니라 생물학적/무생물학적 분해과정들이 있다.

(1) 물리화학적 거동

이미 잘 알려진 대기 내에서 초미립자의 거동과정들은 나노입자에 적용이 가능하지만, 응집되는 것을 방지하기 위해 표면이 코팅되는 나노입자도 있고, 나노입자가 공기 중에 노출된 시간에 따라 대기 중에서의 주요 과정들은 초미립자에 대한 그것들과는 다를 수 있다. 예를 들어, 일반적으로 침적된 나노입자들은 쉽게 공기 중에 다시 부유되거나 에로졸화되지 않는다는 것이다[11].

환경과 토양의 형태와 특성은 나노입자의 이동성에 영향을 미칠 수 있다. 충분히 작은 나노입자는 큰 입자들보다 토양입자간의 아주 작은 공간 내에서 훨씬 먼 거리까지 이동하기에 적합하고 고도의 표면적을 가진 나노입자의 특성 때문에 토양에 강하게 흡착되어 토양의 매트릭스에 갇혀서 부동하게 된다. 나노입자의 특성에 따라 토양에 흡착되는 서로 다른 강도를 고려하

여, 토양과 같은 다공성 매체 내에서 다양한 불용성의 나노입자의 이동 정도와 그 차이에 대한 연구가 진행되었는데 나노입자의 이동성은 토양과 환경의 형태 및 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다 [18].

수계 환경에서의 나노물질의 물리화학적 거동은 물에서의 용해도 또는 분산성과 시스템 내의 나노물질과 자연적이고 인위적인 화학물질간의 상호작용 과정에 의해 조절된다. 일반적으로 물 표면의 나노입자는 큰 입자보다는 훨씬 느리게 침강하지만 고위의 표면적과 질량의 비로 인해 토양이나 침전입자에 흡착될 잠재력을 갖는다. 분산된 불용성 나노입자들 중 약간은 수계 환경에서 안정화될 수 있다.

(2) 무생물학적 분해

나노입자의 광활성 특성은 광분해/광반응/광화학/광촉매 등과 같은 무생물학적 분해과정에 큰 영향을 준다. 수계환경의 상층부나 토양표면 그리고 대기 중의 물방울에 존재하는 입자들은 햇빛에 노출되는데, 이 때, 광반응에 유도되는 빛은 화학물질의 환경거동을 산출하는데 있어서 중요하게 작용하는 경우가 많다. 이러한 반응들은 나노입자의 물리 화학적 특성을 변경시킬 수도 있고 매체에서의 그들의 반응을 변경시킬 수 있다. 어떤 유기물 또는 금속성의 나노물질들은 토양 표면의 표면 광반응에 의해 나노물질의 변형 경로를 일으키는 원인이 될 수도 있고 물 밑바닥의 침전물과 같은 혐기성 조건하에 있는 물질들은 변형을 일으킬 수도 있다. 철 산화물과 같이 유사한 분자구조와 크기를 갖는 어떤 범위의 나노 물질들이 자연적으로 발생하여 매체 내에 존재하기 때문에 매체 조건에서 야기되는 나노물질의 변형에 대한 실제의 연구들은 훨씬 더 복잡해 질 수 있다.

앞 선 연구들에서는 유기물질의 몇 가지 형태들은 일반적으로 혐기성 조건하에서 변형(환원)되기 쉽고 humic colloids와 같은 천연의 유기 물질에 의한 복합성은 혐기성의 침전물 내에서 금속의 변형 반응을 촉진할 수 있다고 보고하고 있다. 금속 산화물 표면에서 발생하는 혼성의 광반응은 용수와 폐수 그리고 지하수 처리 방법으로서 그 이용이 증가하고 있고 또한 나노입자의 광화학은 용수 처리에서의 적용가능성을 고려해서 연구되고 있다. 나노 입자인 TiO_2 , ZnO 와 같은 반도체는 할로젠 물질의 환원이나 다양한 기타 오염물질의 산화와 같은 두 반응 과정에서 효율적인 촉매로 이용되며 혼성의 광촉매 반응은 처리체계에서 물을 정화시키기 위해 이용된다.

(3) 생물학적 분해/생물학적 분해 가능성 및 축적

나노입자의 생물학적 분해는 유기분자의 생물학적 분해에서 전형적으로 보여주는 것처럼 나노입자의 파괴나 물리적 구조 또는 물질의 표면특성에 변화를 초래할 수 있다. 나노 크기의 입자들의 가능한 메커니즘과 생물학적 분해의 잠재력에 조사가 최근 들어서 시작되었으며, 다른 거동과정에서 보여준 것처럼 생물학적 분해과정의 잠재력은 입자의 물리적, 화학적 특성에 강하게 의존할 것이다. 현재 이용되는 많은 나노 물질들은 본래부터 썩지 않을 거라고 여겨지는 세라믹이나 금속 그리고 금속 산화물과 같은 무기물질로 구성되어 있으나, 최근의 발표된 연구[19]에서는 풀러린 탄소가 물질대사의 영향으로 변화되고

C₆₀과 C₇₀ 풀러린이 12주 후에 wood decay fungi(목재 부패 곰팡이)에 의해 분해된다는 것이 밝혀졌다.

또 다른 나노물질들에 대해서는, 생물학적 분해 가능성은 물질의 디자인과 함수에 절대 필요한 요소가 될 수 있다. 예를 들면, 약품의 전달이나 수송에 이용 될 수 있는 생물학적으로 분해 가능한 폴리머의 경우로서, 생물학적 분해가능성은 대체로 입자의 크기가 아니라 화학구조의 함수로 나타나고 있다. 폐기물처리와 환경에서 생물학적 분해가능성은 다양한 요소의 영향을 받을 수 있다. 최근 C₆₀ 풀러린에 대한 실험실 연구는 호기성과 혐기성 조건하에서 박테리아에 독성을 나타내는 안정된 콜로이드 구조가 용수 내에서 성장이 보고됨에 따라 풀러린이 환경조건 하에서 미생물에 독성을 띄는지 여부를 밝히는 연구가 필요하다. 또한 생물학적 분해 가능성을 변경시키는 광반응과 다른 무생물학적인 과정들의 잠재력과 그로 인해 야기될 나노물질의 생물학적 분해율을 고려해야만 한다. 이는 환경 내에서 나노물질의 생물학적 분해에 대한 의의 있는 예측을 하기엔 충분히 알려져 있지 않기 때문에 향후 보다 많은 연구 및 조사가 필요하다는 것을 의미한다.

앞서 언급된 환경거동 과정들은 나노물질들이 미생물에 의해 분해되기 전에 분해하기 어려운 나노물질들을 효율적으로 제거하기에는 너무 느리다. 중력 침강과 같은 물리적 제거과정들은 마이크로 입자들보다 나노입자들에 대해서 보다 느리게 되고, 육생 생물에게 잠재적인 흡입노출이 증가되며, 수생생물에게 수성 콜로이드의 노출이 증가하게 된다. 환경내의 특별한 나노물질의 생물학적 이용 가능성은 입자에 따라 다르다. 금속성 나노물질의 복합체는 생물학적 이용 가능성과 광화학 반응성상의 중요한 상호작용의 영향을 설명할 수 있는 좋은 보기이다. 예를 들어, 철의 생물학적 이용 가능성은 물 속의 철의 자유이온 농도에 좌우되는데 이러한 자유이온농도는 복합체의 영향을 받는다. 복합체는 자유 금속이온농도가 환원되면서 생물학적 이용가능성을 감소시키고 용해된 철은 유기리간드에 의해 정량적으로 복합체를 형성하게 된다. UV 태양복사는 복합체들의 광반응을 통해 이러한 과정들과 상호 작용하게 된다. 또한, 철과 철산화물은 효소의 산화환원 반응에 참여하게 되는데, 이러한 산화환원 반응은 금속의 산화상태, 물리화학적 특성, 그리고 생물학적 이용 가능성을 변경시킬 수 있다.

그러나 철(Fe)과 같은 어떤 나노물질들은 환경내의 반응물로서 배출되도록 고안되었고 화학적 변형의 진행이 가능하다. 철이 철 산화물로 산화되듯이 다른 금속입자들은 공기와 물의 존재할 때 산화물로 전환된다. 자유금속과 비교하여 산화물의 독성정도는 금속에 따라 다르다. 적절한 조건하에서, 어떤 금속 화합물들은 보다 변하기 쉬운 화합물로 전화될 수 있다. 이런 경우, 작은 입자는 그 크기가 작아질수록 반응성이 커질 것이다.

3.3. 나노물질의 환경검출과 분석

환경에서 나노물질을 분석하고 검출하는데 있어서 대두되는 난점은 극히 작은 크기의 입자 뿐 만 아니라 나노물질의 독특한 물리적 구조와 물리화학적 특성, 환경과 또는 환경 내에서 나노물질의 상호작용, 그리고 나노물질의 화학적 표면처리 등에서

야기된다. 물리화학적 특성의 다양성은 특별한 나노물질의 분석에 이용될 수 있는 추출과 분석기술에 영향을 끼치는 주요인자이며, 또한 나노물질의 상호작용과 화학적 표면처리 등으로 인해 나노물질의 분석과 검출이 더욱 복잡해 진다.

인위적으로 제조된 나노물질의 환경시료의 특성을 파악하는데 있어서, 대상 나노입자와 다른 초미립자(석탄연소 또는 산불로 생성된 대기 중의 나노 크기의 입자, 또는 땅 위를 흐르는 빗물과 하수처리 또는 침전물의 재 부상 등으로부터 비롯된 수계 중의 나노크기의 입자)를 구별할 수 있어야 한다. 나노물질을 특징짓는 정보로는 입자 크기와 형태, 표면적, 화학성분의 정보가 요구되며 시료채취 시간에 기상 및 유량 조건에 따라 이송된 지역에 나타난 관측된 나노물질의 농도의 분포정보는 나노물질의 배출원을 식별하는데 유용하다. 나노물질의 분석에 소요되는 노력의 정도와 비용은 환경매체 중 어느 매체에서 시료가 채취 될 것인가 또는 만족할 만한 분석정보의 형태에 따라 다르다. 예를 들어, 나노물질을 분석하기 위해 시료를 준비할 때, 토양 매트릭스가 대기 매트릭스에서 보다 시료추출이나 입자 고립 등의 과정이 포함되기 때문에 훨씬 많은 노력이 요구된다. 이는 분석비용 또한 습득되는 정보의 정도에 따라 다르다. 입자의 형태(풀러린, 양자점, 나노와이어, 등)에 따른 특성에 대한 분석은 단위 부피당 나노입자의 수와 크기 분포 등을 나타내는 number concentration에 대한 시료분석보다 많은 노력을 요구하며 기본 성분분석에 대한 노력 정도도 증가하게 된다.

지난 20여 년 동안 진전되어 온 에어로졸 입자측정기술은 마이크로 크기의 입자 (나노 입자보다 100~1000배 가량 큰 입자)에는 효율적으로 디자인되었지만 대체적으로 나노 크기 입자의 분리 및 분석에는 비효율적이다. 그러나 이러한 기술 중에 고도로 발달된 몇 가지 기술은 나노입자와 관련된 분리 및 분석 자료를 제공하는데 효율적이다. 특별한 나노물질을 식별하려 할 때, 환경시료 중 나노물질의 용적(bulk) 분석정보에는 한계가 있다. 자연적 및 인위적 배출원으로부터 발생한 나노 크기의 입자들은 입자 크기에 근거한 시료 채취법을 이용하므로 대상 나노물질과 분리될 수 없다. 대상 나노물질의 선택적 추출절차가 가능할 경우, 시료채취 중 발생하는 다른 나노 크기의 입자에 대한 신호방해를 피할 수 있다. 자연적/가공된/제조된 나노 물질의 비분리성 혼합물의 경우에, single-입자 분석법의 이용은 가공된 또는 제조된 나노물질에 대한 명확한 분석이 제공될 필요가 있다. Table 2는 나노물질의 검출과 분석에 이용 가능한 분석기와 기술원리 등에 대해 설명하고 있다.

나노물질의 노출을 평가하는데 있어서 잠재적인 유용성을 내포하고 있는 도구로는 모니터링 자료, 노출 모델, 그리고 기존의 화학물질로부터 유추된 자료 이용 등이 있다. 모니터링 자료에는 바이오모니터링 자료, 개인 샘플링 자료, 환경매체 모니터링 자료, 근로자 건강 모니터링, 건강진단 감시 등이 있다. 바이오모니터링 자료는 환경매체내의 모니터링 농도에 의해 포착되지 않은 노출의 정도와 범위, 정보를 이해하는데 가장 유용한 도구가 될 수 있으나, 나노물질의 교역과 이용, 인체와 환경내의 거동에 대한 한정된 지식으로 인해, 바이오 모니터링을 하기 위해 나노 물질을 감정하고 우선순위를 정하기는 어렵다. 바이

Table 2. Measuring technology for nanoparticles [20]

Apparatus	Information	Technology
Micro-Orifice Uniform Deposit Impactors (MOUDIs), Electrical Low-Pressure Impactors (ELPIs)	Aerodynamic mobility	Separation of particles
Differential Mobility Analyzers (DMAs), Scanning Mobility Particle Sizers (SMPSs)	Electrodynamic mobility	Separation and recover of particles
Dynamic Light Scattering (DLS)	Particle size distribution	In-situ analysis of particle size in liquid media
Inductively-coupled Mass Spectrometry (ICP-MS)	Chemical properties	
Single-Particle Laser Microprobe Mass Spectrometry (LAMMS)	Chemical properties of single particle in recovered particles	Analysis of single particle
Electron Microscopy Techniques: Transmission Electron Microscopy (TEM), Scanning Electron Microscopy (SEM)	Particle size and chemical properties of single particle in recovered in vacuum	

오 모니터링이 향후 이용 가능하게 된다면, 근로자와 일반인에게 나노물질의 시간적 공간적 분포를 평가할 좋은 기회가 될 것이다. 개인 샘플링 자료는 개인에 의해 실행된 노출의 평가로서 작업장에서의 중요한 노출인자가 될 수 있으나, 생물학적 과정(흡수, 분포, 신진대사, 그리고 배설) 후에 대상 기관에 공급된 용량의 변화에 대해서 설명할 수 없다. 환경매체 모니터링은 작업장이나 집 또는 일반 환경과 같이 보다 넓은 공간의 농도를 측정하는데, 이러한 환경자료는 전체 인구 중 개인에 대한 개인 샘플링이 수행될 수 없을 때 집단 내의 화학물질의 노출농도를 가정하여 이용된다. 전형적으로 환경자료는 인간의 활동과 인구 통계를 포함한 노출인자에 관한 가정과 함께 노출평가 모델링에서 아주 중요하다. 이러한 나노물질의 자료를 얻기 위해서는 동일한 학명의 다른 화학물질들과는 다르게 분리되는 나노 물질의 정의와 독성화학물질로, 보고할 수 있는 방출/오염물질의 목록에 나노 물질을 첨가하는 그런 방법으로 나노물질을 분류하여야 할 것이다.

3.4. 노출평가를 위한 모델링

실험자료가 없는 물질에 대한 노출평가를 수행할 때, 모델링 기법은 예상자료 (규제결정 근거 제공)를 산출하기 위한 방법이다. 최근 환경 모니터링 자료는 인체의 독성물질의 누적 노출평가 도구로 대기오염독성물질 노출모델 HAPEM(Hazardous Air Pollutant Exposure Model)이 이용되었다. 그러나 HAPEM을 포함한 기존의 다른 모델들은 물리화학적 특성이 아주 다른 나노물질을 평가하는데 유용할 지는 명백하지 않다.

일반적으로 화학물질의 환경거동과 노출을 평가하는 모델들은 인위적으로 생산된 나노 물질에 적용할 수 없다. 화학적 특성 또는 화학변형과정의 타당성에 의존해서, 이러한 나노물질에 대한 예측을 제공할 새로운 모델의 개발이 필요하다. 그러나 모델을 디자인하고 모델의 타당성을 검증할 실험 자료가 없다면 모델개발은 불가능하다. 그러므로 나노물질의 환경거동, 이송, 다매질 분배과정들이 모델에서 잘 묘사되기 위해서는 무엇보다도 우선 인위적으로 생산된 다양한 나노물질에 대한 신뢰성 높

은 실험자료를 얻는 것이 필요하다.

3.5. 나노물질의 유해성(독성 영향) 평가

나노기술과 연관해서 환경과 건강, 생태학적 함축의 정보에는 아주 큰 차이가 있다. 나노입자의 독성에 대한 이용 가능한 정보와 자연 발생적 또는 인위적으로 형성된 나노 크기의 물질들에 대한 정보를 정리할 필요가 있으며, 특히 인위적으로 생성된 나노물질에 대한 파악이 중요하다.

(1) 인체의 유해성(독성)평가

앞서 언급된 바와 같이 상업적으로 이용 가능하거나 또는 개발 중에 있는 나노물질의 다양성과 복잡성으로 인해 인위적으로 생성된 나노물질에 대한 독성평가는 또 다른 도전해야 할 연구분야라 할 수 있다. 같은 형태의 나노물질이라 할지라도 서로 다른 생산과정으로 인해 서로 다른 크기와 모양과 성분, 그리고 잠재적으로 서로 다른 독성 특성을 지닌 상품을 산출하기 때문에, 하나의 나노물질의 형태와 배출원에 대한 독성 평가정보가 다른 과정으로 생성된 같은 부류나 형태의 나노 물질의 독성을 평가하기에 충분하지는 알려져 있지 않다. 독특한 특성을 확장하고 강화할 단일분자의 분산된 부유물을 생성하기 위해서 제조된 나노물질은 표면 코팅 또는 다른 표면수정 처리를 하게 되는데 그로 인한 나노물질 독성의 영향 정도는 알려져 있지 않았다.

문헌 [3-8]를 중심으로 대기 중 나노물질의 인체의 위해(독성 영향)평가에 대해 알아보면, 기존 위해평가는 물질의 유해성(독성과 건강결과)과 노출(노출경로와 정도)의 함수였으나, 나노물질의 위해 평가는 물질의 유해성과 노출뿐만 아니라 나노물질 노출을 정량화하기 위해 측정된 모든 나노물질의 특성(질량 농도와 표면적 농도와 입자수 농도)을 포함한다. 많은 연구를 통해 나노물질 노출을 정량화하기 위한 인자로 질량 이외에 표면적과 입자수에 대한 중요성이 강조되었다[7, 11, 16, 17].

따라서 나노물질 노출을 정량화하기 위한 측정인자, 즉, 나노물질의 질량과 표면적과 입자수 모두를 측정할 것을 추천하고 있다[7, 21]. 모든 세 가지 측정법을 이용하여 동시에 에어로졸

노출을 측정하는 것은 값 비싸고 거대한 장비 없이는 아직까지는 성취할 수 없는 아이디어에 불과하다. 그러나 잠재적인 인체 건강의 영향을 이해할 수 있는 자료를 제공할 어떤 노출측정 방법이라도 얻는 것은 아주 바람직하다. 그 접근 방법으로는 현재 불확실성을 내포하고 있으나 기기반응을 고려할 수 있다.

‘나노물질의 잠재적인 유해성은 입자직경 d 의 α 지수 (d^α)에 비례한다’는 가정은 나노물질의 유해성을 파악하는데 있어서 어느 정도 타당한 것으로 볼 수 있다.

$$\text{Hazard potential} \propto d^\alpha$$

만약 질량농도에 비례한다면 $\alpha = 3$, 표면적농도에 비례하면 $\alpha = 2$, 입자길이 농도에 비례한다면 $\alpha = 1$, 입자수 농도에 비례하면 $\alpha = 0$, 그리고 평균값을 고려한다면 $\alpha(\bar{\alpha})$, $\bar{\alpha} = 1.5$ 이다. 그러나, $\alpha = 0$ 이 입자구조와 잠재적인 유해성 간의 연관성이 없을 경우, 평균은 $\alpha(\bar{\alpha})$, $\bar{\alpha} = 2$ 가 된다. 다시 말해서, $\bar{\alpha} = 2$ 또는 $\bar{\alpha} = 2$ 와 $\bar{\alpha} = 1.5$ 의 사이의 반응을 갖는 기기는 대기 중의 인공 나노물질의 잠재된 건강의 영향에 타당한 정보를 제공할 것이다. 문헌[7]에서는 대기 중 인공 나노물질에 대한 노출 평가를 위해 입자크기($\bar{\alpha} = 2$ 와 $\bar{\alpha} = 1.5$)의 함수인 서로 다른 두 기기의 반응을 비교하였다(Figure 4). 상업용 DC2000CE Portable Diffusion Charger (LQI-DC, Matter Engineering, Switzerland)와 Electrical Aerosol Detector (EAD, model 3070A, TSI Inc., USA)의 두 기기를 사용하였다. 입자크기 30~200 nm사이에서 LQI-DC는 $\bar{\alpha} = 2$ 에 대해서 좋은 결과를 보였던 반면에 EAD는 $\bar{\alpha} = 1.5$ 에 대해서 더 좋은 결과를 보였다. 두 기기 사이에 측정에 대한 불확실성이 있다 할지라도 diffusion charging은 분명 대기 중 나노물질의 노출 측정에 유용한 기술이다.

또한 문헌에서는 안전한 근로환경을 유지하기 위한 노출제어에 대해 언급하고 있다. 노출제어와 관련된 도전과제는 대기 중 나노물질에 대한 기존의 제어 방법의 효율 정도를 파악하는 것이며 정량적인 위해 평가를 위한 정보가 불충분한 상태에서 타당한 제어수준을 제한할 방법을 제시하는 것이다. 제한된 자료라 할지라도 현재 에어로졸 거동에 대한 이해를 바탕으로 국부적인 배기가스 환풍장치, 여과장치, 인공호흡장치(방독면)과 같은 기존의 제어방법은 대기 중의 나노물질에 효율적일 것이다. 그러나 타당한 제어 정도를 평가하기 위해서는 다른 많은 나노물질들에서 나타난 위험성에 대한 충분한 정보를 수집해야 되는데 그러기 위해서는 아주 오랜 시간이 걸릴 것이다. 신뢰성 높은 정량의 정보가 없을 경우 나노물질 노출을 제어할 가능한 반응은 분광(스펙트럼)반응이다. 한 쪽 면에서는 입증될 때까지 유해성이 심한 물질로 가정하는 예방 원칙의 해석이 진행되며 다른 면에서는 입증될 때까지 유해성을 무시하는 휴식상태로 나타난다. 그러나 이러한 위해 평가와 관리에 대한 연구에도 불구하고 잠재적인 위험성을 나타내는 물질과 기술의 종류, 위험성을 띄는 이유, 효율적인 위해 평가와 관리 방법 등 심한 불확실성에 직면하고 있다[7].

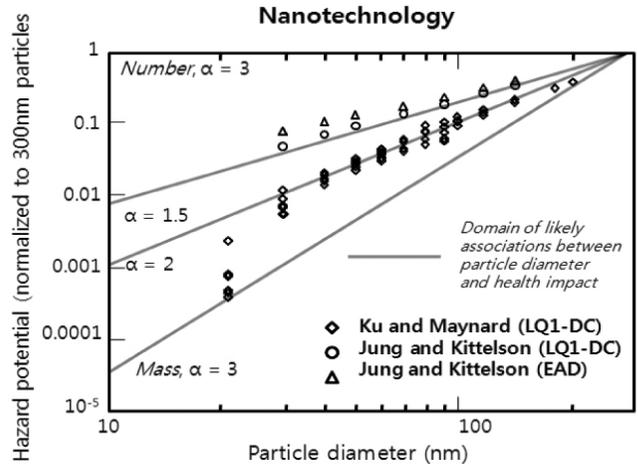


Figure 4. Possible instrument responses as a function of particle size, for evaluating exposure against airborne engineered nanomaterials [7].

(2) 나노물질의 생태학적 영향평가

나노물질은 같은 물질의 훨씬 큰 입자들과는 달리 수생 또는 육생생물에게 영향을 미칠 수 있다. 나노물질의 독성평가는 아주 복잡하고 많은 요소를 가지고 있으며, 크기와 모양 그리고 표면특성 (전하와 면적 그리고 반응성)과 같은 다양한 물리화학적 특성에 의해 잠재적인 영향을 받는다. 그러므로 환경에서 나노물질의 이용은 위험성을 내포한 생산과 소멸에 의해 나타나는 새로운 결과를 초래할 것이다.

현재 나노물질과 유기체를 대상으로 진행된 연구는 아주 미약하나, 동일 물질의 보다 큰 분자의 물리화학적 특성의 유추를 근거로 나노물질이 세포막을 교차하거나 생체 내에 축적되는 경향을 예측할 수 있다. 현재의 지식으로는 환경 내의 유기 탄소와 같은 자연적 물질의 완충영향을 이끄는 정도이지만 광범위한 인공 나노물질을 대상으로 테스트 해 볼 수 있다. 나노물질의 섭취와 분포에 대한 중요한 특성으로 전하, 분자량과 효율적인 횡단면 직경, 화학적 생물학적 특성 등이 있다. 분자량과 효율적인 횡단면의 직경은 수중 생물의 아가미 막과 수생과 육생 생물 모두의 GI tract을 횡단하는 물질의 섭취에 중요한 영향을 미친다. 또한, 수계에서 나노입자의 축적과 독성을 예측할 때, 고려할 필요가 있는 다른 화학적 생물학적 특성들은 용존 유기탄소와 입자성 유기탄소, 지질 함량과 영양수준 등이 있다 [22].

지금까지 생태계를 대상으로 수행된 나노물질의 생태독성에 관한 연구는 아주 미약하다. 수생생태계에 대한 연구들은 주로 물벼룩속과 같은 한정된 수생종을 연구대상으로 풀러린(C60)이나 TiO2, SWCNT와 같이 한정된 나노물질의 생태독성에 관한 연구를 수행하였다[23]. 육생생태계에 대한 연구들에 이용된 육생 생물종은 주로 식물, 야생생물, 토양 내 무척추동물, 또는 토양 내 미생물 등이다. 육생 포유동물에 대한 독성자료로는 인체 건강의 위해성 평가를 위해 수행된 쥐와 생쥐의 독성실험 자료를 이용할 수 있다. 분자량이나 입자크기와 강한 반응성 표면과 같은 나노입자의 특성들은 식물 뿌리로부터의 섭취나 잎을 통한



Figure 5. Fluorescent nanoparticles in water flea (*Daphnia magna*) [3].

이송과 증산작용에 제한인자로 작용하며 최근 식물을 대상으로 한 연구결과[24]로부터 보다 상세한 정보를 얻을 수 있다.

나노물질들은 매우 특별한 특성을 띠도록 제조 또는 가공되기 때문에, 보기 드문 독성영향을 보인다는 문헌보고가 많다. 기존의 화학물질로 언어졌던 경험에 비추어볼 때, 이런 경우에는 급성의 치명상보다 노출로 인한 만성적인 영향이 생태학상의 위험성을 야기하는 중요한 요소가 될 것이다. 수생 및 육생 생물을 대상으로 장기 생존, 성장, 발달, 생식 종말점 (전체 생물과 생리 또는 생화학)을 평가해 온 수많은 기존의 시험방법들은 나노물질에 적용되어야 하며, 나노물질의 평가에 가장 중요한 영향을 미치는 형태를 정확하게 파악하기 위해서 광범위한 종과 종말점을 검사하여 생태계의 영향을 연구할 강한 토대를 만들 수 있다.

4. 결 론

환경문제를 제대로 해결하기 위해서는 환경에 '안전'하다는 것이 증명될 때까지는 '안전'하지 않다고 여겨야 한다. 나노물질에 대한 연구도 같은 개념을 가져야 할 것이다. 이를 위하여 나노기술에 의해 생성된 나노물질의 적용에 따른 인체와 환경의 위해 평가에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하다. 배출된 반응성 나노물질은 다양한 환경매체 (토양, 수계, 대기, 연소배기가스)내에 존재하는 화학적으로 복잡하게 뒤섞인 혼합물과 직접적으로 상호작용하게 되는데 나노물질과 그 부산물로 인한 인체 및 환경의 영향은 미지수이다. 또한, 나노물질의 독성평가는 가장 민감한 개체군들을 보호할 안전노출 수준을 제시하기 위해서 인위적으로 생성된 나노물질의 노출-용량-반응 관계에 대한 보다 많은 정보가 심각하게 필요하다.

1. 나노물질의 특별한 특성을 고려하여 각각의 나노물질의 표면 특성 및 물리화학적 특성의 포괄적인 정보와 독성정보 획득이 우선적으로 요구된다. 현재 이용 가능한 다양하고도 복잡

한 나노물질에 대한 건강 위험성평가 정보를 제공하기 위해서는 나노물질의 물리 화학적 특성 및 독성을 측정할 수 있는 일반적으로 용인될 수 있고 비용효율이 높은 방식의 시험방법에 대한 연구가 필요하다. 시험적인 독성시험 프로토콜과 최종 프로토콜 모두 나노물질에 적용 가능해야 하며 먹이사슬의 생물 축적과 뜻밖의 영향 또는 종료점을 구분하기 위한 현장조사는 나노물질이 노출될 것으로 알려진 시스템에서 수행되어야 한다.

2. 노출관련 정보(노출제어, 노출원, 노출량, 노출 경로 (흡입, 섭취, 피부), 등)의 파악은 나노물질의 위험성 관리 및 평가의 중요한 자료가 된다.
3. 환경매체에 배출된 나노물질의 검출 및 분석을 위한 측정 기기 및 분석 방법에 대한 연구가 필요하다 기존의 에어로졸 측정 기기의 활용 방안에 대한 연구가 진행되고 있으며 측정 결과의 불확실성이 대두되나 향후 개선에 따른 활용 가능성도 제시되고 있다.
4. 환경매체에서의 나노물질의 거동 현상을 과학적으로 규명하고 기존의 독성모델의 이용 가능성 및 개선 또는 나노 물질의 특성을 고려한 모델의 개발이 필요하다. 앞서 얻어진 물질정보 및 배출정보는 모델의 타당성 검증에 매우 중요하며, 검증된 모델은 독성 평가를 위한 중요한 자료를 제공할 것이다.
5. 나노물질의 인체 및 환경의 독성평가는 나노물질에 대한 물질정보(물질의 정의 및 물리화학적 특성), 독성정보, 노출정보, 용량정보 및 반응정보를 통해 나노물질마다의 인체 및 환경의 위해성(독성) 평가를 진행할 수 있으며, 가장 민감한 개체군들을 보호할 안전노출 수준을 제시함으로써 환경 및 나노기술의 정책 결정에 큰 도움이 될 것이다.

위에서 언급된 연구분야는 분야별로 독립적인 연구가 진행되기 보다는 분야간의 상호 협력을 통해 보다 정확하고 신속한 연구를 진행함으로써 나노물질의 유해성을 미연에 방지하고 인간 및 환경을 보호하기 위한 대책을 마련할 수 있을 것이다. 향후 나노기술개발활용의 확산과 더불어 파생될 경제적인 파급효과와 환경적인 파급효과가 긍정적으로 작용할 수 있도록 보다 많은 연구에 대한 노력이 절실히 필요하다.

감 사

본 논문은 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업(Eco-Technopia-21 Project, 090010055)으로 지원받은 과제입니다.

참고문헌

1. Kim, Y., Yoon, C. Y., and Yi, J., "Environmental Application of Organic/inorganic Hybrid Nanoporous Materials", *Polymer Science and Technology*, **15**, 173-183 (2004).
2. Choi, B.-K., Kim, K.-H., So, D.-S. and Yu, I.-J., "R&D Trend on the Environmental, Health and Safety Impacts of Nanotechnology," *Prospectives of Industrial Chemistry*, **10**,

- 48-71 (2007).
3. Kim, Y. and Yi, J. "Risk of Nanotechnologies," *News & Information for Chemical Engineers*, **23**, 338-342 (2005).
 4. U.S. Environmental Protection Agency, Nanotechnology White Paper, EPA 100/-07/001, Feb., (2007).
 5. Maynard, A. D., "Nanotechnology: The next Big Thing, or Much Ado about Nothing?" *Ann. Occup. Hyg.*, **51**, 1-12 (2007).
 6. Maynard, A. D., "Nanotechnology: a research strategy for addressing risk, PEN 03. Washington DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars", Project on Emerging Nanotechnologies (2006).
 7. Maynard, A. D., Aitken, R. J., Butz, T., Colvin, V., Donaldson, K., Oberdrster, G., Philbert, M. A., Ryan, J., Seaton, A., Stone, V., Tinkle, S. S., Tran, L., Walker, N. J., and Warheit, D. B., "Commentary Safe handling of nanotechnology," *Nature*, **444**, 267-269 (2006).
 8. Maynard, A. D. and Kuempel, E. D., "Airborne nanostructured particles and occupational health", *J. Nanopart. Res.*, **7**, 587-614 (2005).
 9. Miller, G., Workplace exposure to nanomaterials: Will nano be the next asbestos?, Friends of the Earth (<http://nano.foe.org.au>) (2006).
 10. Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee, Committee on Technology, National Science and Technology Council, Environmental, Health, and Safety Research Needs for Engineered Nanoscale Materials, the National Nanotechnology Initiative, September (2006).
 11. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies (2006).
 12. Aitken, R. J., Creely, K. S., Tran, C. L., "Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review Research Report 274", Prepared by the Institute of Occupational Medicine for the Health and Safety Executive, North Riccarton, Edinburgh, England (2004).
 13. Lam, C. W., James, J. T., McCluskey, R., Hunter, R. L., "Pulmonary Toxicity of Single-Walled Carbon Nanotubes in Mice 7 and 90 Days after Intratracheal Instillation", *Toxicol. Sci.*, **77**, 126-134 (2004).
 14. Warheit, D. B., Laurence, B. R., Reed, K.L., Roach, D. H., Reynolds, G. A., Webb, T.R., "Comparative Pulmonary Toxicity Assessment of Single-wall Carbon Nanotubes in Rats", *Toxicol. Sci.*, **77**, 117-125 (2004).
 15. Oberdrster, G., Ferin, J., Lehnert, B. F., "Correlation Between Particle Size, In Vivo Particle Persistence, and Lung Injury", *Environ. Health Perspect.*, **1002**, 173-179 (1994).
 16. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. Air Quality Criteria for Particulate Matter. Report Number EPA/600/P-99/002a,bF. October (2004). <http://cfpub2.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=87903>.
 17. Oberdrster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W., Cox, C., "Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain", *Inhal. Toxicol.*, **16**, 437-445 (2004).
 18. Oberdrster, G., Oberdrster, E., Oberdrster, J., "Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles", *Environ. Health Perspect.* **113**, 823-839 (2005).
 19. Lecoanet, H.F., Wiesner, M.R., "Velocity Effects on Fullerene and Oxide Nanoparticle Deposition in Porous Media", *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 4377-4382 (2004).
 20. Filley, R.R., Ahn, M., Held, B.W., Blanchette, R.A., "Investigations of Fungal Mediated (C60-C70) Fullerene Decomposition", Preprints of Extended Abstracts Presented at the ACS national Meeting, American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry 45, 446-450 (2005).
 21. McMurry, P. H., "A review of atmospheric aerosol measurements", *Atmos. Environ.*, **34**, 1959-1999 (2000).
 22. Oberdrster, G., Maynard, A., Donaldson, K., Castranova, V., Fitzpatrick, J., Ausman, K., Carter, J., Karn, B., Kreyling, W., Lai, D., Olin, S., Monteiro-Riviere, N., Warheit, D., Yang, H., "Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy", A report from the ILSI Research Foundation/Risk Science Institute Nanomaterial Toxicity Screening Working Group. Part. Fibre. Toxicol., **2** (2005).
 23. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water. Methodology for Deriving Ambient Water Quality Criteria for the Protection of Human Health (2000) Technical Support Document Volume 2: Development of National Bioaccumulation Factors (2003).
 24. Cheng, S. H., Cheng, J., "Carbon Nanotubes Delay Slightly the Hatching Time of Zebrafish Embryos", 229th American Chemical Society Meeting, San Diego, CA March (2005).
 25. Yang, L., Watts, D. J., "Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles", *Toxicol. Lett.*, **158**, 122-132 (2005).