

## 나노기술 안전성 정책 동향 및 에어로졸 응용 연구 현황

지준호\* · 유일재<sup>1)</sup>

삼성전자 DMC연구소, <sup>1)</sup>호서대학교 GLP 센터

(2010년 6월 10일 투고; 2010년 8월 15일 수정; 2010년 8월 16일 게재확정)

### Policy Trend and Status of Aerosol Application Research on the Safety Issues of Nanotechnologies

Jun Ho Ji\* · Il Je Yu<sup>1)</sup>

DMC R&D Center, Samsung Electronics Co. Ltd.

<sup>1)</sup>Toxicological Research Center, Hoseo University

(Received 10 Jun 2010; received in revised form 15 August 2010; accepted 16 August 2010)

#### Abstract

The number of nanotechnology based consumer products are growing rapidly. Thus, the customer likely to be exposed to such products continues to increase as the applications expand. This article describes the international and Korea's policies on the EHS(Environment, Safety and Health) issues of nanotechnologies. The strategic plan and coordination of OECD and ISO were summarized. This article also examines several new findings of Korean researchers as well as current and future challenges in the aerosol application study of EHS issues on the nanotechnologies.

**Keywords :** Nanoparticle, EHS(Environment, Safety and Health), OECD, ISO, Inhalation toxicity, Exposure

#### 1. 나노기술 안전성 연구의 개요

최근 전자소자, 화장품, 자동차, 의약품, 가전제품에 많은 나노물질이 사용되고 있고, 많은 제품이 나노기술을 이용해 성능을 획기적으로 향상시킨 나노제품으로 홍보되고 있다. 나노제품은 시장에서 눈에 띄게 증가하고 있지만, 아직은 단순한 나노 응용 제품이 대부분이다. 스미스소니언(Smithsonian Institution)

의 연구정책관련 산하기관인 우드로윌슨 국제학술센터(Woodrow Wilson International Center for Scholars)에서 지원하는 “떠오르는 나노기술 프로젝트(Project on Emerging Nanotechnologies)”는 2007년 5월까지 500 여 종의 소비재 나노제품이 등록되었고 2009년 1015개까지 지속적으로 증가하고 있다고 보고하고 있다(<http://www.nanotechproject.org>). 나노룩스 리서치(Nano Lux Research)사의 조사에 따르면 2014년까지 나노기술 관련 제품의 판매량이 2조 6천억 달러로 증가하고, 생산되는 모든 생산품의 약

\* Corresponding author.

Tel : +82-31-279-5224, Email : junho.ji@samsung.com

15%가 나노 기술을 이용한 제품이 될 것으로 예측한다 (Lux Research, 2004). 이와 같이 다양한 기관에서 나노기술을 이용한 제품이 얼마나 사용되고 있는지 혹은 향후 얼마나 성장하게 될지에 관한 예측 보고서가 만들어지고 있다. 나노기술을 접목한 제품은 기업의 광고의 수단으로 선호되기 때문에 소비자들에게 점점 더 익숙해지고 있다. 그렇지만, 아직까지 시장에서 나노로 불리는 제품이 몇 가지나 되는지 또는 어떤 제품을 나노기술을 적용한 제품이라고 규정할 지 명확하지 않다.

나노기술의 산업화로 가는 길은 매우 험난하다. 연구와 개발 단계를 거쳐 사업화를 이루고, 산업화 단계에 이르는 과정에서 많은 어려움이 존재한다. 실험실 수준의 기술을 양산 기술로 전환하는 과정에서 예상치 못한 많은 문제가 발생한다. 공정비와 재료비는 기존의 제품과 경쟁력을 가지도록 낮추어야 한다. 또한 나노기술을 소비제품의 관점에서 마케팅에 적용하려면 소비자들이 친숙하게 받아들일 수 있도록 나노기술을 쉽게 표현할 수 있어야 한다. 이와 같은 기술개발에 관련된 부분이나 마케팅에 관련된 부분 이외에 나노기술이 사업화나 산업화의 길로 나아가기 위해 반드시 검증되어야 하는 부분이 바로 나노물질과 나노제품의 인체, 환경, 생태의 영향이다. 나노기술이 새로운 성장엔진의 핵심적인 역할을 할 것으로 기대되고 있지만, 나노제품의 인체와 환경에 대한 안전성에 대한 의문이 제기되고 있다. 우드로윌슨 국제학술센터의 앤드류 메이나드 박사는 2008년 미국 국가나노기술전략(NNI, National Nanotechnology Initiative) 개정법에 대한 하원청문회에서 나노물질 및 나노제품에 대한 과학적 평가 방법의 부재를 강조하며 다음과 같이 강조했다. "이제 시장으로 진입하는 나노재료들의 증가 추세에 비해 그 안전성에 대한 지식은 형편없이 부족하다. 나노기술들을 어떻게 안전하게 개발할 것인가에 대한 불확실성이 정책 입안자들을 혼란스럽게 하고 나노비즈니스의 발목을 잡고 소비자들을 혼동에 빠뜨리고 있다. 결론적으로, 잠재적인 위험성에 대한 명확한 이해 없이 나노 기술의 미래로 나아가는 것은 눈을 감고 물속으로 다이빙하는 것과 같다". 특히, 석면의 예는 나노기술 안전성 연구에 대한 필요성을 증대시키고 있다. 석면은 내화성, 단열성, 내구성 등으로 3,000여개의 제품에 생산되었지만, 유용성 및

경제적인 이유로 안전문제를 경시하였다. 결국 1급 발암물질로 판명되었고, 전세계적으로는 물론, 우리나라에서도 상당수의 석면 노출에 의한 악성 중피종 환자가 발생될 것으로 추정하고 있다. 최근 영국 대학연구소와 일본의 국립연구소의 연구결과 다중벽 탄소나노튜브가 석면처럼 중피종 같은 발암 가능성을 제시하고 있고, 각 국은 규제조치를 검토하고 있다. 영국에서는 탄소나노튜브를 석면처럼 폐기토록 요구하고 있다. 호주는 나노물질을 신규 화학물질로 규정, 제조나노물질에 대한 국가 의무표지제도 개발을 추진함과 동시에 나노화학품에 대한 성분 표시를 권고하고 작업장의 안전 확보를 위한 활동을 요구하고 있다. 유럽을 중심으로 나노물질의 안전성을 보장할 수 있는 독성자료의 제출을 필수화 하는 등 나노물질에 관한 규제를 국가 정책에 반영하고자 하는 움직임이 나타나고 있다.

이와 같이 매력적인 기능이나 성능을 가진 나노제품이라도 사람의 건강, 보건의나 환경과 생태 등에 잠재된 영향을 미칠 수 있다면, 시장에서 제품이 확산되는데 걸림돌로 작용할 수 있다(지준호, 2007). Figure 1은 나노물질의 제조, 사용, 폐기 및 인체, 생태 노출에 대한 전체 개요를 보여준다. 나노제품을 제조하는 공정이나 사용 중 예기치 못한 노출 뿐 아니라 사용 수명을 다한 후 환경에 버려진 후의 문제에 대해서도 걱정의 목소리가 나오고 있다. 나노물질이 인간이나 동물 등 생명을 지닌 유기체에 미칠 수 있는 잠재적인 영향과 나노제품이 소각이나 매립 등에 의해 자연계의 공기, 물, 토양 등의 환경 시스템에 미치는 영향은 아직 알려진 바가 거의 없다 (Breggin and Pendergrass, 2007; Maynard, 2006; Maynard et al., 2006). 나노제품이 상용화의 문턱을 넘어 서려면 나노기술이 건강, 안전, 환경에 미치는 영향을 밝힐 수 있는 연구가 중요하다. 특히, 소비제품의 경우 나노제품의 사용 중 노출되는 문제와 제품의 전생애 (Life cycle) 관리의 문제가 이슈가 될 수 있다. 나노기술의 환경, 보건 및 안전(Environment, Health and Safety, EHS)연구는 지속가능한 나노기술을 위한 나노기술의 환경, 안전 및 보건 연구 개발 및 규제적 분야를 대상으로 하는 연구 활동으로 정의할 수 있다.

본 논고에서는 먼저 나노기술의 잠재적인 영향에 대한 국내외 정책 동향을 조사하였다. 미국, 유럽,

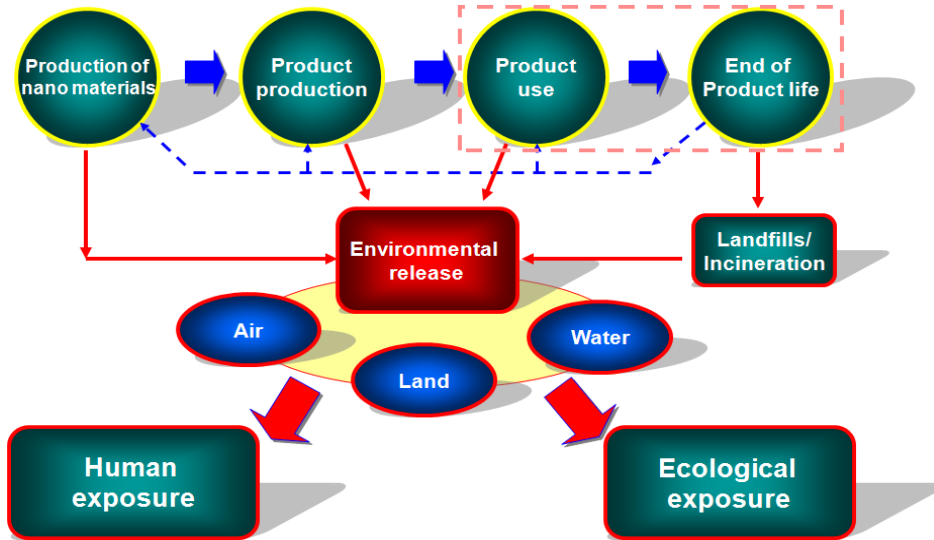


Figure 1. Human and Ecological Exposure of Nanotechnology(Cleverly, 2007).

일본 등 나노기술 선진국 등의 정책동향 뿐 아니라, OECD, ISO과 같은 국제기구에서 국제 공조에 의해 문제를 해결하려는 활동을 정리하였다. 마지막으로 국내 연구자들이 에어로졸 기술을 나노기술 안전성 연구에 적용하여 얻은 국제적 연구 성과를 요약하였고, 나노기술 안전성을 확보하기 위해 필요한 에어로졸 연구 방향에 대해 정리하였다.

## 2. 나노기술 안전성 확보를 위한 정책 동향

나노기술 안전성에 관련된 정책 분야는 네 가지 분야로 분류할 수 있다. 첫 번째는 환경안전보건 분야로 나노기술관련 환경 및 생태독성, 환경역학, 환경노출평가, 환경위해성평가 및 관리, 폐기물 관리 등을 다룬다. 두 번째는 산업안전보건 분야이고 나노기술관련 산업안전보건, 산업독성, 산업의학 역학, 위험성평가, 노출평가, 작업환경 위해성평가 및 관리에 관련된 정책을 다루게 된다. 세 번째는 일반 국민들의 실생활에 가까운 소비자안전보건 분야로 나노기술관련 소비자 안전보건, 소비자노출평가, 소비자 위해성평가 및 관리 등을 다루고, 마지막은 식의약품의료기기안전 분야로 나노기술관련 식품, 의약품, 의료기기 안전 부분을 담당한다.

### 2.1 국외정책동향

미국은 국가나노기술전략(NNI)에서 나노기술의 사회적 영향 문제를 핵심분야로 선정하고 정부차원의 대응책을 강구하고 있다. 2003년에는 나노기술환경보건영향위킹그룹(NEHI WG) 설립하였다. 2008년에는 환경건강안전(EHS, Environment, Health and Safety)분야 국가 대응전략을 마련하였다. 미국 국가나노기술전략의 나노기술 사회적 영향에 관한 주요 연구 분야는 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로 나노기술개발이 환경, 보건, 안전에 미치는 영향 및 위험성을 평가하는 EHS 분야이고, 두 번째는 윤리, 법, 사회적 측면의 나노기술의 영향을 대상으로 하는 윤리, 법, 기타 사회부문(ELS, Ethical, Legal and Societal Issue) 분야, 마지막으로 교육 분야가 있다. 국립산업안전보건연구원 (NIOSH), 환경보호청 (EPA), 국립보건원 (NIH), 과학재단 (NSF) 등 정부부처와 연방기관의 부처간 협력 프로그램(inter-agency program) 운영을 통한 효율적인 나노소재의 안전성 평가기술 확보에 주력하고 있다. 미 의회는 나노재료에 대한 안전성 검증 필요성을 강력하게 촉구하고 있다. 미국 연방정부의 2010 회계연도(2009.10-2010.9)의 나노기술예산은 16.4억 달러이며, EHS 분야의 예산(PCA7 부문)은 8,770만 달러이다. 최근 5년간 전체 NNI 예산이 4.9% 증가한 것을 고려한다면, EHS

부문의 예산이 두드러지게 증가하고 있다. 미국의 NNI 회계예산보고서에 따르면 EHS 부문 예산은 2006년 3770만 달러, 2007년 4830만달러, 2008년 6,790만달러, 2009년 7,150만달러, 2010년 8,770만 달러로 최근 5년간 연평균 23.5%씩 급성장하고 있다 (NNI, 2009).

미국 EPA에서는 세 가지 규제법에 의해 나노물질을 관리하고자 하고 있는데, 모든 나노물질을 대상으로 하는 독성물질규제법인 TSCA(Toxic substance control act), 은나노 및 금속나노 향균제를 대상으로 하는 농약법인 FIFRA(Federal insecticide fungicide rodenticide act), 농약으로 사용되는 나노물질의 식품 오염을 대상으로 하는 의약품화장품관리법인 FFDCA(Federal food drug cosmetic act)이다. 미국 EPA는 은나노를 사실상 살충제로 판정하고 은나노 향균 물질을 코팅한 컴퓨터 주변기기를 판매한 회사에 벌금을 부과('08)하였다. 또한 탄소나노튜브를 신규화학물질로 간주하여 제조전유해성심사제도인 PMN(premanufacture notice) 규정에 적용하여 독성자료 제출을 의무화하였다. 이 제도는 TSCA에 의해 시행하고 있으며 점차 확대 해나갈 예정으로 있다. PMN은 제조전 유해성심사제도로써 우리나라 환경부의 유해화학물질관리법과 산업안전보건법의 유해성 심사제도와 유사한 제도로써 제조 수입 90일전에 유해성 심사를 거쳐 생산, 수입하도록 하는 제도이다. 최근에는 다음 단계의 규제인 CNT의 신규이용규칙(SNUR)을 2009년 6월 공포하였으나 절차문제에 부딪혀 2009년 8월에 철회하였다. 그렇지만, 2010년에 다시 SNUR 시행을 앞두고 있다. 특히, EPA는 은나노 향균제품에 대해 FIFRA법 위반으로 2008년 3월 IOGEAR 회사에 20만불의 벌금을 부과한바 있다. 2009년 11월에는 은나노 규제검토를 위한 과학자문 위원회를 개최하였는데, 이 회의에서 향균제 등록을 위한 데이터의 범위, 가교평가가능성, 노출평가 등에 대한 전문가 토의를 진행하여 의견을 수렴하였다.

2007년 유럽연합의 과학신기술윤리위원회(EGE)는 나노의학에 관한 윤리성 대응방안을 제안하였다. 또한 2008년에는 책임 있는 나노과학 및 나노기술 연구를 위한 윤리강령을 채택하였다. NANOSAFE2 프로젝트를 통하여 나노구조체 및 나노제품의 전과정 리스크 평가를 위한 연구를 진행하고 있으며, 근

로자와 소비자, 환경에 제조 나노물질의 노출을 최소화하기 위한 가이드라인을 개발하였다. EU는 2008년 4월 신화학물질관리제도 (REACH)에서 탄소나노물질을 적용하기로 발표하여, 나노물질의 안전성 데이터를 첨부하도록 요구하였다. 나노물질은 생체지속성이 높으며 생체축적성이 높은 물질로 간주되어 EU의 신화학물질관리제도 (REACH)에 적용을 받게 되고, 화학물질안전보고서(CSR) 및 물질안전보건자료(MSDS) 및 사용자를 위한 노출시나리오 작성을 요구하고 있다. REACH (Registration, evaluation, assessment of chemicals) 제도는 EU영역에서 제조 수입되는 화학물질을 등록, 평가하고, 유해 위험물질을 제한하는 제도이다. "No data, No market"를 표방하며, 안전을 보증하는 데이터가 없다면 제품을 시장에 판매할 수 없도록 제한한다. 또한 프랑스를 중심으로 나노제품의 표지제도 도입이 추진되고 있다. 나노물질을 함유한 제품에 대해서 유전자변형물질(GMO)과 같이 표지하도록 하는 제도이다. 최근 나노물질의 MSDS 자료의 나노정보제공 부실에 대해 각국에서 논란이 되고 있다. ISO/TC 229 WG3에서 현재 나노물질의 MSDS 자료 작성지침에 대한 표준 작업이 우리나라 주도로 추진되고 있다.

일본은 2004년에 들어서면서 나노기술의 사회적 영향 연구에 주목하기 시작하여, 경제산업성에서 나노기술 리스크 평가 및 관리기술 개발을 전략적으로 추진하고 있다. 산업기술종합연구소(AIST), 신에너지산업기술 종합개발기구(NEDO)를 중심으로 나노입자 특성 및 독성평가 연구 프로젝트를 진행하고 있고, 나노소재의 건강영향 및 안전성평가 등 EHS 연구를 강화하여 그 결과를 OECD와 ISO에 반영하고 있다. 탄소나노튜브의 독성평가를 위한 표준물질을 개발하고, 인체 안전성 평가연구를 진행하였다. 후생노동성은 2006년부터 2009년까지 나노소재의 독성평가방법 개발을 추진하였고, NEDO는 2006년부터 2010년까지 나노 입자 특성 평가 방법의 연구개발을 추진하고 있다.

## 2.2 국내정책동향

나노기술의 EHS 분야에 대한 정부 차원의 연구 지원은 제2기 나노기술 종합발전계획(2006-2010)에서 본격화되었다. 제2기 계획에서는 "2015년 선진 3대국 기술경쟁력 확보"의 비전과 함께, 비교우위를

갖는 30여개 이상의 최고수준의 실용화 기술의 확보, 교육 및 공용 연구 인프라 구축, 2014년 세계나노관련시장의 20% 수준(5000억 달러) 점유 그리고 나노기술영향 등 사회적 요구에 대응하는 기술개발 등을 주요 추진 목표로 하고 있다. 나노기술의 EHS 분야에 대한 정책 대응은 최근 들어 더욱 증가하고 있는데, 2006년 이후에는 당해 연도 나노기술 시행 계획에서 EHS 분야는 주요한 중점추진과제로 선정되고 있다. 제2기 나노기술중합발전계획에서 “나노기술 영향 등 사회적 요구에 대응하는 기술개발”이 주요 추진목표로 등장한 이후 나노기술의 EHS 분야에 대한 연구개발이 본격화 되었지만, 지원 규모는 미비한 수준이다. 2006년 2800억 규모의 나노 예산 중 EHS에 해당하는 예산은 0.3%인 7억 뿐이었다.

2009년에도 나노 예산의 2.9% 정도만이 EHS 예산에 배정되었다.

환경부는 2010년부터 2014년 나노물질 안전관리 중장기 계획을 추진하고 있다. 추진 전략은 세 가지로 구분되어 있는데, 기반기술 개발 및 인프라 구축, 위해성평가 및 저감기술개발, 안전성 관리방안 마련 분야이다. 위해성 평가 및 저감 기술분야 중 중점 과제인 독성평가, 노출평가, 위해성 평가 및 저감에 전체 예산의 EHS 관련 예산의 70%가 분배되었다. 또한 안전성 관리방안 마련 분야에는 제도개선에 중점을 두고 나노물질 안전관리단 운영, 리스크 커뮤니케이션 체계구축, 나노물질 안전관리 지침 및 법적제도 마련, 국제적 협력강화 등의 세부과제를 두고 있다.

Table 1. Platform Technology on Risk management for Green Nanoproduct Development.

총괄 과제명	나노제품 안전성 확보를 위한 플랫폼 기술개발
세부과제명	① 나노제품의 안전성 평가 및 인증 시스템 개발 ② 나노제품의 노출평가를 통한 리스크 관리 기술 개발 ③ 안전성 향상을 위한 나노제품 설계 기술
기술개발목표	□ 1단계(2009.11.1~2012.10.31) (플랫폼 구축 : 은나노, TiO <sub>2</sub> , CNT 함유 제품) ○ 나노제품의 안전성 평가 및 인증 시스템 개발 - 나노소재별 나노제품 안전성 평가방법 표준화 : > 5건 - 나노소재별 기능별 나노제품 성능평가방법 표준화 : > 3건 - 나노제품 개발 및 제조자를 위한 윤리지침 제정 - 나노제품 인증을 위한 절차 개발 ○ 나노제품의 노출평가를 통한 리스크 관리 기술 개발 - 작업장 나노소재 노출기준(TLV) 설정 : > 3건 - 나노소재별 나노제품 노출기준(TLV) 설정 : > 3건 - 나노제품 리스크관리 절차서 개발 : > 1건 ○ 안전성 향상을 위한 나노제품 설계기술 - 나노 복합 소재 물성 DB : > 7건 - 나노제품 파손 메커니즘 DB : > 4건 - 신뢰성-노출 시험 장비 개발 : > 4건 - 나노 제품별 안전성 설계 기준 : > 3건  □ 2단계(2012.11.1~2013.10.31) (시범적용) ○ 성과활용 기업체에 리스크 관리 시스템을 도입 적용 - 나노제품 리스크 Framework 도입 - 나노제품 제조, 운송, 사용에 따른 리스크 평가 및 관리 - 피드백 및 나노제품 재설계 ○ 도입의 문제점 도출 및 보완

지식경제부는 나노기술 안전성 분야에 대해 다음과 같은 나노기술표준화기반 구축사업, 나노제품의 안전성 확보를 위한 플랫폼 사업(2009-2014)을 지원하고 있고, 2009년에는 「나노 제품 개발 및 제조에 관한 안전지침」 제정하였다. 또한 나노기술 표준화 관련하여 기술표준원 주관으로 나노기술의 표준화 기반구축사업을 2006년부터 2011년까지 5년간 지원하고 있다. Table 1은 나노제품의 안전성 확보를 위한 플랫폼 사업의 개요를 보여준다.

식약청은 국립독성과학원 주관으로 2007년부터 2011년까지 ‘나노물질 독성기반연구’를 지원하고 있다. 사업목표는 나노물질의 독성평가를 위한 기초 인프라 구축, 나노물질의 독성 평가 기술 개발 및 응용 연구, 향후 나노의약품, 진단제제, 화장품, 의료기기 등의 규격기준마련 및 평가 가이드라인(안) 제정이다. 교육과학부는 2008년부터 2010년까지 나노안전성 관련 기초, 원천연구지원 사업을 진행하고 있다. 현재는 나노안전관리 사업단 연구로 전환하여 2010-2012년까지 식의약품 관련 나노물질에 위해성 평가를 위한 독성자료 생산 및 OECD WPMN 대응자료 생산, 물리화학적 특성자료 생산 및 나노물질의 독성동태시험(toxicokinetics) 자료 산출을 위한 사업을 진행하고 있다.

Table 2는 나노기술 안전성 관련 최근 몇 해 동안의 중점 추진 전략을 나타낸다. 이와 같은 국가 전략은 향후 규제나 법규와 연결될 것으로 보인다. 나

노물질/제품 안전성 및 인증 관련 연관성이 높은 규제법으로는 산업안전보건법, 약사법, 화장품법, 식품첨가물법, 의료기기관리법, 연구실안전환경조성법, 유해화학물질관리법, 품질경영 및 공산품안전관리법이 있다. 나노제품(소비자제품)의 안전성 및 인증과 가장 관련이 있는 법은 공산품 안전관리법이다. 그러나 우리나라에서는 미국의 PMN과 같은 제도가 도입되지 않고 있으며, 은나노 항균제도 부서의 관할이 모호한 형편이다.

**2.3 국제기구동향**

경제협력개발기구(OECD, Organization for Economic Co-operation and Development)

경제협력개발기구는 국가 간 교류 활동을 통하여 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 문제를 해결하고자 노력하고 있다. OECD는 2006년 6월 환경국 화학물질위원회(Checkicals Committee) 산하에 나노소재 작업반(WPMN, Working Party on Manufactured Nanomaterials)을 설립하였고, 세 가지 주제 분야의 작업 프로그램을 진행하고, 6개 프로젝트를 수행하고 있다. Figure 2는 OECD의 나노기술 EHS 관련 조직체계를 나타내고 있다.

나노소재 작업반에는 8개의 SG (Steering Group)이 활동 중이고, 각각의 활동내역은 다음과 같다. SG 1은 나노소재의 인체 보건 및 환경 안전성 (EHS) 연구에 관한 데이터 베이스 개발하고, SG 2는 나노소

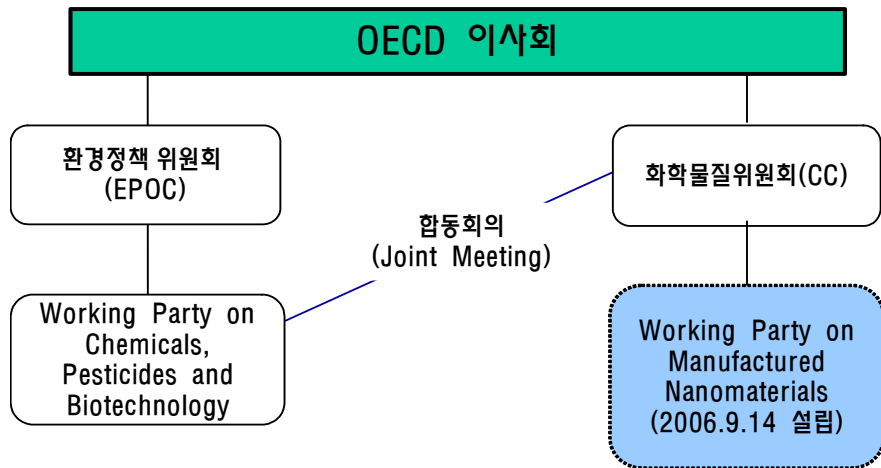


Figure 2. OECD Structure for EHS issue on nanoparticles.

Table 2. Strategic Plans for EHS Issues of Korea.

년도	중점추진과제
2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 나노기술에 대한 ELSI 연구실시 등 나노물질의 안전성 기반구축               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노물질의 안전성 평가를 위한 인프라 구축                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노물질의 특성분석에 대한 기준설정 및 안전평가기술개발</li> <li>- 식품, 세포치료제, 의료기기의 안전성평가 및 안전관리 연구</li> </ul> </li> <li>○ 나노물질 안전성평가의 효율적 운영을 위한 협의체 구축                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- 나노기술의 환경검사 등을 위한 범부처의 정책협의회 구성 검토</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ 21세기 프론티어연구개발사업 등 국가대형연구개발사업에서 나노기술영향평가 실시 권장               <ul style="list-style-type: none"> <li>- '07년도는 테라급나노소자개발사업에 시범 추진</li> </ul> </li> <li>○ OECD 등 국제 나노물질의 인체 및 환경 위해성 이슈에 적극 대응</li> <li>□ 세계시장 선점을 위한 나노기술 표준화 기반 구축               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노기술표준화 로드맵 작성 및 국제표준화 활동 지원강화                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개발 초기단계부터 세계시장에 대응할 수 있는 나노기술 표준화 기반마련</li> <li>- 나노입자 안전성, 나노광학기술, 나노측정기술 등의 표준안 마련</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 나노물질의 안전성 기반 구축               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 국가연구개발사업 추진 시 나노기술영향평가 확대 실시</li> <li>○ 의약품, 식품, 의료기기 등에 사용되는 나노물질의 독성평가 기술 및 안전관리 연구</li> <li>○ 나노물질의 상품화를 대비한 독성평가기반 사전 구축</li> </ul> </li> <li>□ OECD 나노작업반 등 국제활동에 적극 참여하여 정보교류 및 정보 공유에 기여               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노기술 관련 국제 동향을 파악하여 국내의 나노기술 분야 산업체, 학계 및 연구계에 보급</li> </ul> </li> <li>□ 나노기술 개발에 관한 ELSI 연구 강화               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노기술의 위험가능성에 대한 정보취합·분석 및 관리체제 확립</li> </ul> </li> </ul>
2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 제로나노물질 안전관리 및 표준화 마련               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노물질 관련 안전대책 수립 및 관련 가이드라인 보급</li> <li>○ 산학연관 협의체를 통한 나노물질 안전관리 사회적 합의 도출</li> <li>○ 나노바이오 안전성 지원센터 운영을 통한 상용 제품화 지원</li> <li>○ 나노물질의 안전성평가 기준 확립을 위한 ISO 표준화, OECD WPMN(Working Party on Manufactured Nanomaterials) 등 국제기구 대응활동 강화</li> </ul> </li> <li>□ 나노물질의 환경, 보건, 안전(EHS : Environment, Health and Safety) 연구 확대               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노물질과 제품의 위해성 및 안정성 평가 관리기술개발(환경부)                   <ul style="list-style-type: none"> <li>※ 나노물질의 환경노출 영향평가 및 관리기술개발</li> </ul> </li> <li>○ OECD WPMN에서 정한 14개 대표제조 나노물질 중 4개(은나노, 탄소나노튜브, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>) 물질에 대한 시험지침서 작성 주도</li> <li>○ 나노입자 안전성 평가방법의 국제 표준화 주도</li> </ul> </li> <li>□ 나노기술에 관한 윤리적, 법적, 사회적 영향(ELSI : Ethical, Legal and Social Issues) 연구 강화               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노기술이 사회 다방면에 미치는 영향을 사전에 파악하기 위한 관리체제 수립</li> <li>○ 국내 나노기술의 안전관리 연구를 통해 관련 나노 제품의 시장 가치 제고</li> <li>○ '08년 설립된 사회영향특별위원회를 통해 사회영향평가 활동 강화</li> <li>○ 나노제품 개발 및 제조에 관한 윤리성 제고를 위한 가이드라인 제시</li> </ul> </li> <li>□ 나노물질 유해성 측정장비 세계시장 진출               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 나노입자 안전성 평가방법의 국제 표준화 주도로 인한 측정장비 수출 시장 발굴</li> </ul> </li> </ul>

제의 EHS 연구에 관한 국제적 전략 개발을 맡고 있다. SG 3는 나노소재 대표 표본의 안전도 테스트, SG 4는 나노소재에 관한 기존 OECD 테스트 지침의 적절성 평가, SG 5는 국가간 규제 프로그램 및 자발적 규제 계획(Voluntary regulatory schemes)에 관한 정보 교환, SG 6는 나노물질의 위해성평가, SG 7은 나노물질 대체시험법 개발, SG 8은 나노물질의 노출평가 및 노출저감을 담당한다.

특히, SG 3에서 진행되는 나노소재 대표 표본의 안전도 테스트(Project on the Safety Testing of a Representative set of Manufactured Nanomaterials)에는 14개 제조 나노물질의 안전성 지원 사업을 추진하고, 나노물질의 독성자료 확보 및 독성시험법 도출, 노출평가 및 저감 관련 프로젝트가 수행되고 있다.

Table 3은 14종 대표 나노물질에 대한 OECD 스폰서쉽 프로그램에 대한 각 국가별 분담 내용을 나타낸다 (OECD, 2010). SG3 나노물질 안전성평가 지원사업에서 우리나라는 책임스폰서(Leader sponsor)로 은나노입자를 공동스폰서(Co-sponsor)로 MWCNTs, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, 참여자(Contributor)로 polystyrene의 안전성평가 지원을 맡았으며, 특히 은나노입자에 대해서는 2009년 10월 우리나라 ABC nanotech의 은나노물질이 안전성평가 표준물질로 선정되었다. MWCNT나 TiO<sub>2</sub>는 대체 표준물질로 선정되었다. 대체법(Alternative testing methods)은 실험동물의 희생을 줄이기 위해 동물을 사용하지 않고 세포를 이용하거나, 세포나 조직을 세포 외에서 사용하는 생체 외 시스템(ex-vivo system)이나 세포 없이 시험하는 무

Table 3. OECD Sponsorship Arrangements('09, 10).

물 질	Lead Sponsor(s)	Co-Sponsor(s)	Contributor
1. Fullerenes (C60)	일본*, 미국*		덴마크, 중국
2. SWCNTs	일본*, 미국*		독일, 캐나다, 유럽연합, 프랑스, 중국, BIAC
3. MWCNTs	일본*, 미국*	한국, BIAC	독일, 캐나다, 유럽연합, 프랑스, 중국, BIAC
4. Silver nanoparticles	한국, 미국	독일, 캐나다, 호주, Nordic Council of Ministers	유럽연합, 프랑스, 중국
5. Iron nanoparticles	중국, BIAC		캐나다, 미국, Nordic council of ministers
6. Carbon black			독일, 미국, 캐나다, 덴마크
7. Titanium dioxide	독일, 프랑스	한국, 오스트리아, 캐나다, 유럽연합, 스페인, BIAC, 미국*	중국*
8. Aluminum oxide			독일, 미국, 일본*
9. Cerium oxide	영국/BIAC, 미국*	네덜란드, 호주, 스페인	스위스, 독일, 유럽연합, 일본*
10. Zinc oxide	영국/BIAC	호주, BIAC, 스페인, 미국	캐나다, 일본*
11. Silicon dioxide	프랑스, 유럽연합	한국, BIAC, 벨기에	덴마크, 일본*
12. Polystyrene			한국, 오스트리아
13. Dendrimers		스페인, 미국*	
14. Nanoclays			미국, 덴마크

(주) 국가\* : 대체법 사용에 참여하는 국가

(주) 2010년 10월 기준 Carbon black과 Polystyrene이 스폰서쉽 프로그램에서 제외되었고, 금(Gold)이 추가되었다. 금의 책임스폰서는 남아프리카공화국, 공동스폰서는 한국과 미국, 참여자는 유럽연합이다.



세포 시스템(cell free system)을 도입하는 것이다. OECD 스폰서십 프로그램에서는 몇 가지 나노물질에 대해서 미국, 일본 중국이 나노안전성 시험에 대체시험법 적용을 검토하고 있다.

최근 우리나라에서 시행한 은나노 안전성 평가 결과는 SG6의 위해성평가에 이용되고 있으며, 미국 EPA도 우리나라 시험결과를 활용하고 있다. 현재 SG8(노출평가와 노출저감)에서도 14개 나노물질을 대상으로 노출평가에 대한 스폰서십(sponsorship) 프로그램을 계획하고 있으며 각국에서 노출평가 대상 물질의 지원을 요구하고 있다. 특히 안전성 평가의 책임스폰서와 공동스폰서가 대상물질의 노출평가 지원 사업을 수행하도록 요구하고 있다. 우리나라는 SG8의 노출평가 지원 사업에도 앞으로 3개 물질 이상 지원할 계획으로 있으며, 우리나라 사업장의 CNT 노출평가 결과를 OECD에 제출하였다.

국제표준화기구(ISO, International Organization for Standardization)

국제표준화기구는 나노기술의 표준화를 위해 2005년 나노기술을 다루는 229번째 기술위원회(TC229)를 신설하였다. 사무국 및 의장은 영국(BSI)이 맡고 있고, 현재 4개의 작업반(Working Group, WG)이 설립되어 있다. WG1(용어·분류), WG2(측정·특성평가), WG3(보건·안전·환경), WG4(재료 사양 특성)으로 구성되어 있다.

WG3의 로드맵에는 나노물질 작업안전 및 노출관리 지침, 나노물질의 상대적 독성평가 및 스크리닝, 안전한 나노물질 취급, 물질안전, OECD WPMN 지원 등을 포함하고 있다. 환경독성 분야나 나노제품 관련 안전보건, 환경영향 또한 포함하고 있지만 아직은 관련 표준의 개발이 진행되지 않고 있다. 2010년 상반기 현재 WG3(보건, 안전, 환경)는 나노물질의 흡입독성 평가방법, 나노물질의 안전취급과 폐기

Table 4. ISO TC 229 WG 3 project group lists(2010.07).

PG No.	Type	Project leader	Title	Status
1	TR	USA	Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies	Compl.
2	IS	Japan	Endotoxin test on nanomaterial samples for in vitro systems	FDIS
3	IS	Korea	Generation of metal nanoparticles using evaporation/ condensation method for inhalation toxicity testing	FDIS
4	IS	Korea	Characterization of Nanoparticles in Inhalation Exposure Chambers for Inhalation Toxicity Testing	FDIS
5	TR	USA	Guidance on physico-chemical characterization for manufactured nano-objects submitted for toxicological testing	WD
6	TR	UK	Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials	WD
7	TR	USA	Nanomaterial Risk Evaluation Framework	DTR
8	TS	France	Guidelines for occupational risk management applied to engineered nanomaterials based on a control banding approach	WD
9	TR	Korea	Safety Data Sheet (SDS) preparation for manufactured nanomaterials	WD
10	TS	Korea	Detection of surface bound molecules to gold nanoparticles using FT-IR spectroscopy	WD
11	TR	USA	Guidance on Toxicological Screening Methods for Engineered Nanoscale Materials	WD
12	TR	USA	Guidance on Sample Preparation and Dosimetry Methods for Engineered Nanoscale Materials	WD

\*FDIS : Final Draft of International Standard; WD : Working Draft; DTR : Draft of Technical Report

지침 및 작업장의 나노물질 노출관리지침, 나노제품의 리스크관리 지침개발 등 나노소재의 안전성에 대한 평가 표준을 개발 중이다. TC229는 2010년 5월까지 10차 회의가 진행되었으며, WG 3는 Table 4와 같이 2010년 5월 기준 12개의 국제표준문건 중 11건이 진행되고 있고, 1건의 기술보고(TR, Technical Report)가 완료되었다. 우리나라는 국제표준(IS, International Standard) 2건, 기술시방(Technical Specification) 1건, 기술보고 1건을 진행하고 있어 안전보건 표준분야를 주도하고 있다. WG3에서는 2010년에 3건의 국제표준문건(IS, International Standard)이 마무리되어 발간될 예정인데, 이 중 2건의 문건이 대한민국이 제안하여 주도한 나노입자의 흡입독성 연구에 관련된 표준이다. 특히 흡입독성관련 급속나노입자발생에 대한 국제표준은 대한민국이 관련 특허를 가지고 있기 때문에, 해당 기술을 기반으로 응용 연구가 진행된다면, 향후 국제표준의 파급효과를 기대할 수 있다.

TC229에서는 WG 활동 이외에도 필요한 부분에 대해 대책반(Task Group)을 만들어 대응하고 있다. 소비자 안전 대책반(Task Group) 회의(Task group on consumer and societal dimensions of nanotechnologies)는 미국, 말레이시아, 프랑스, 노르웨이, 영국, 한국 등이 참여하여 소비제품에 대한 안전성 관련 협의를 진행하고 있다. 최근 회의에서는 소비자 제품 표지를 위한 나노물질(Nanomaterial)과 나노객체(Nano-object)에 대한 용어 문제에 대해 소비자 그룹은 나노객체에 대한 용어에 대한 이해가 어려우므로 소비자 제품에 대한 용어로 나노물질을 사용하도록 요구하는 등 활발한 활동을 진행하고 있다. 반면, 미국이나 관련 산업체에서는 제품표지를 위한 나노물질(nanomaterial) 용어는 너무 범위가 넓어 적용하기 곤란하다는 문제를 제기하기도 했다. 특히, 나노 소비자 제품에 관한 표준개발로 ISO 26000 처럼 기존의 체제를 탈피한 새로운 표준개발 체제 필요성이 제기되었다. 나노기술 안전성 관련 또 하나의 Task Group에서는 WG2와 WG3의 구성원들이 함께 참여하여 나노물질에 관련된 EHS 이슈에 대한 측정 및 특성화(Measurement and characterization for EHS issues relevant to nanomaterials)을 다루고 있다.

### 3. 나노안전성 확보를 위한 에어로졸 응용 연구의 필요성

나노기술 안전성 연구에 에어로졸 기술이 기여할 수 있는 부분은 첫 번째로 나노에어로졸 발생 및 모니터링 분야이다. 현재 미국이나 EU에 나노물질을 수출하고 미국의 제조전유해성평가 및 신규이용규칙(SNUR)이나 EU의 REACH를 대응하기 위해서는 독성자료를 산출하여 관련 규제기관에 제출해야 하며 가장 어려운 문제인 90일 흡입독성자료를 GLP (Good Laboratory Practice) 수준으로 제출해야 한다. 그렇지만, 90일 흡입독성자료를 만들기 위해서는 미화 200만불 정도의 예산이 소요되며 특히 나노에어로졸 발생과 나노에어로졸 모니터링 기술이 확보되어야 한다.

세포 조직이나 실험동물에 제어된 나노입자를 안정적이고 균일하게 공급하는 것은 나노물질 독성연구의 가장 중요한 부분이다. 향후 정량가능하고 신뢰성 있는 독성연구 결과를 얻기 위해서는 나노입자의 물리화학적인 특성까지도 제어하여 공급해야 할 필요가 있다. 나노입자의 전달 메커니즘의 제어는 안전성 연구뿐 아니라 다양한 미래 연구에 응용될 수 있을 것이다. 특히, 흡입독성 연구에서 에어로졸의 발생 및 공급은 여러 제약 요건을 만족시켜야 한다. 챔버 내에는 고농도의 에어로졸을 공급해야 하지만, 산소농도나 가스상 물질의 농도, 온도, 습도 등에 영향을 미치면 안 된다. 즉, 독성평가의 대상인 입자를 공급할 때, 발생과정에서 불활성 기체를 사용하거나 다른 주변 가스상 물질과의 반응으로 생성된 부산물인 가스상 물질이 동물에 영향을 줄 수 있는지 평가되어야 한다. 또한, 발생장치에서 공급된 공기의 온도가 너무 높으면 동물에 영향을 미칠 수 있고, 습도가 높거나 낮아서 챔버 내의 조건을 안정적으로 유지할 수 없다면 문제가 될 수 있다. Table 5는 현재 ISO/TC229에 국제표준으로 진행 중인 “흡입독성시험에 사용가능한 급속나노입자 발생(기화-응축 방법) 표준”에서 검토하고 있는 입자 발생 조건을 나타낸다.

이와 같이, 나노입자의 흡입독성평가를 위해 기반이 되는 기술은 제어 가능한 나노입자의 발생과 안정된 전달 시스템이다. 그렇지만, 은나노 입자와 같이 상대적으로 제어가 쉬운 구형의 입자에 대해서

Table 5. Nanoparticle generation specifications.

	specifications	note
Test particle purity/impurities	Test particle purity/impurities shall be established to meet objective of the study	
Size range	GMD of nanoparticles shall be less than 100 nm.	
Number concentration	Number concentration shall be measured in unit of particles cm <sup>-3</sup> .	
Nanoparticle shape	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Primary nanoparticles should be nearly spherical.</li> <li>- The desired shape of the primary particle, however, may be different based on the purpose of the study.</li> <li>- Particle shape shall be documented as TEM or SEM images, or other methods, and the degree of dispersion or aggregation/agglomeration should be evaluated quantitatively, if possible, using available methods.</li> <li>- Consideration should be given to the fraction of nonagglomerated nanoparticles.</li> </ul>	Measured at breathing zone following OECD guidelines [OECD TG 403, 412, 413, 1995].
Stability	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nanoparticles should remain in a dispersed non-agglomerated or agglomerated morphology depending on the study objective.</li> <li>- Stability of nanoparticle morphology shall be documented by TEM or SEM, or other methods and the degree of dispersed non-agglomerated or agglomerated morphology should be evaluated quantitatively, if possible, using available methods.</li> </ul>	
Animal exposure	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The nanoparticle generator shall conform to requirements of the inhalation studies.</li> <li>- Duration for use in inhalation studies must be established for the generation system.</li> <li>- 10 to 15 air exchanges (continuous flow) per hour in whole body exposure adequate oxygen content of at least 19 percent and uniform conditions throughout the exposure chamber [EPA, 1998; OECD TG 403 412, 413, 1995].</li> <li>- Animals exposed in flow-past inhalation equipment (such as nose-only) designed to sustain a dynamic airflow that ensures an adequate air exchange of at least 2-3 times the respiratory minute volume of animals exposed (i.e., at least 0.5 Lmin<sup>-1</sup> per exposure port for rats) [OECD No 39, 2009]. Each exposure port should have similar exposure conditions with an oxygen concentration of at least 19% [OECD No 39, 2009].</li> <li>- Estimate weight dose by DMAS and filter sampled dose.</li> </ul>	

도 안정적으로 장기간 나노입자를 발생시키는 것은 쉽지 않다. 최근 국내 에어로졸 발생 연구의 흡입독성연구 적용 예를 살펴보면 다음과 같다. 적극적인 항균물질의 분사의 개념으로 개발되었던(Ji et al., 2007a) 소형나노입자 생성장치가 은나노 물질의 안전성 연구에 시도되었고, 기존의 나노입자 발생장치가 만들어내기 어려웠던 고농도, 비응집 단일입자들을 장시간 안정적으로 발생할 수 있음을 확인하였다(Jung et al, 2006, 2007; Ji et al., 2007c). 새롭게 개발된 금속나노입자 발생장치는 28일 은나노 동물흡

입독성시험에 안정적으로 적용되었고(Ji et al., 2007b), 90일 아만성 은나노(Sung et al., 2008, 2009) 및 90일 금나노 동물흡입독성 연구(Sung et al., 2010)를 성공적으로 수행할 수 있었다. 특히, 아만성 은나노 동물흡입독성연구는 세계최초의 은나노 동물흡입독성 모델로 인체독성에 대한 데이터를 제공할 수 있는 출발점이 될 수 있다는 점과 신개념의 금속나노입자 생성기술을 만성노출시험에 도입하여 세계최초로 나노물질의 무영향농도(NOAEL, no observed adverse effect level)를 제시하여 향후 근로자를 위한 작업환

경노출기준이나 소비자를 보호하기 위한 노출기준을 제정하는 기반을 제공하였다는 평을 받았다.(Hussain and Schlager, 2009) 우리나라에서 시행한 은나노 독성 평가 결과는 OECD SG6의 위해성평가에 이용되고 있으며, 미국 EPA도 우리나라 시험결과를 활용하고 있다. 이와 같은 금속나노입자 발생장치의 새로운 성능 특성과 은나노 독성연구에 성공적으로 적용된 경험을 바탕으로 국제표준협회(ISO) TC229(나노기술위원회)에 “흡입독성시험에 사용가능한 금속나노입자 발생(기화-응축 방법) 표준”과 “흡입독성 챔버에서의 나노입자 모니터링 표준”으로 2건의 국제표준이 채택되었다. 2010년 6월 국제표준초안(FDIS, Final draft of international standard) 단계가 진행 중이며, 문건 작업이 완료되면 2010년 국제규격으로 최종 발간될 예정이다.

CNT는 1군 발암물질(carcinogen)으로 분류되는 석면과 유사한 섬유상 형태로 높은 종횡비(Aspect ratio)를 가지고 있으며, 이로 인해 체계화된 독성 연구가 시급한 상황이다. CNT의 독성연구에서 가장 관심을 끌고 있는 문제는 공기 중 안정적으로 CNT를 분산시킬 수 있는가 하는 점이다. CNT 분산에 관한 연구는 미국의 NIOSH나 일본의 AIST의 연구팀에서 활발히 연구를 진행하고 있고, 독성연구에 적용하기 위해 노력하고 있다. 특히, CNT는 규제대

상물질로 독성물질규제법(TSCA)에 의해 제조전유해성평가(PMN) 대상물질이다. 따라서 미국에 합법 수출하기 위해서는, MSDS(물질안전보건자료) CNT에 대한 물리화학적 특성자료, CNT의 안전관리방안, 그리고 90일 흡입독성자료를 제출하여야 한다. 건강 또는 환경과 관련된 유해성은 늦게는 수십 년 뒤에 나타날 수 있기 때문에, 가까운 미래에 큰 혼란을 야기 할 수 있다. 새로운 기술 개발의 초기 단계에서는 유해성에 관한 연구와 이를 통해 얻은 공인된 데이터는 매우 중요하다. Table 6은 현재 교육과학부의 지원으로 진행 중인 “호흡기 독성평가를 통한 CNT의 위해성평가 기술 개발”에서 기준으로 보고 있는 독성연구에 적용할 수 있는 CNT의 필요 조건을 나타내고 있다.

최근 국제 사회에선 CNT 위해성에 대한 우려가 커지고 있다. 우드로윌슨센터와 에딘버러대학이 가늘고 긴 CNT를 흡입하면 석면과 같은 건강 문제를 일으킬 수 있다는 연구 결과를 발표하였고(Poland et al., 2008), 일본 국립의약식품위생연구소도 CNT를 투여한 쥐에서 석면을 흡입했을 때와 같이 종피종이 생기는 것을 확인했다고 발표했다(Takagi et al., 2008) 일반적인 실험실에서 진행된 실험은 CNT를 인공적으로 쥐의 복강에 주입한 것이라 실제 작업 환경에서 CNT가 유해성을 보일지, 노출이 어떻게

Table 6. Requirements of particle preparation for CNT Toxicity test.

독성연구 필요사항	목적	문제점	해결책
CNT의 분산 in liquid media	in vivo, in vitro 독성시험	분산이 안되고 엉킴	적절한 분산제 적용
CNT의 분산 in air	흡입독성	엉킴에 의해 안정적인 제어가 어려움	사람에게 노출되는 형태로 공기중 비산 기술 개발
CNT의 길이/직경 control	High aspect ratio 독성 용량 규명	길이 제어가 쉽지 않음	길이 제어 기술 개발
CNT의 durability	CNT의 생체지속성 규명	조직내 CNT 지속성 규명방법 곤란	in vitro durability test
CNT의 biopersistent	CNT의 생체안정성 규명	조직 내 CNT 검출이 어려움	조직 내 CNT 검출방법 설정
CNT의 공기역학적 직경	CNT의 측정 및 노출평가	CNT는 섬유형으로 정확한 공기역학적 직경 모름	Mobility 직경, TEM aspect ratio 병행 검토
CNT의 노출평가	CNT 노출관리	CNT의 노출평가 방법과 기준이 없음	CNT에 대한 노출 평가 정성/정량 방법 개발

이뤄지는지를 파악하는 것이 과제이다.

에어로졸 기술이 나노기술 EHS 분야에 기여할 수 있는 두 번째는 노출평가(Exposure analysis) 분야이다. 나노물질 안전성 연구에서 독성 평가와 함께 중요한 부분은 노출평가이다. 위해성평가(Risk Assessment)는 독성과 노출이 함께 고려되어 위험도를 결정하게 되고, 위험도를 근거로 나노입자 노출, 환경 배출 제어 시스템이 설계된다. 특히, 노출평가를 위해 가장 필요한 부분은 나노입자를 효과적으로 모니터링할 수 있는 계측 장치인데, 효과적인 샘플러와 정량적으로 감지할 수 있는 저가의 센서의 상용화는 노출평가와 모니터링 연구에 중요하게 사용될 수 있다. 최근 국내 연구진은 CNT 노출평가를 실시하여, 실제 환경에서의 CNT의 노출 수준을 세계 최초로 측정하였고, 환기장치 등 기계적 시스템에 의해 노출을 현저히 감소시킬 수 있음을 보였다 (Han et al., 2008). 이 연구에서 얻은 우리나라 사업장의 CNT 노출평가결과를 OECD에 제출하여, 국제적으로 CNT에 대한 노출자료로 사용되고 있다. 또한 일곱 개의 탄소나노튜브 작업장의 노출평가를 수행하여 다양한 양상의 노출데이터를 보고하였다(Lee et al., 2010).

#### 4. 요약

나노기술이 인체, 보건, 환경 등에 영향을 미칠 수 있다는 의혹은 제품이 시장에서 확산되는데 주요한 걸림돌이 되고 있다. 제품이 사용되는 실제상황에서는 물리적, 화학적, 생물학적인 상호작용이 복잡하게 일어나기 때문에 나노제품의 건강, 보건, 환경 영향에 대한 연구는 쉽지 않고 진척이 느리다. 나노입자가 환경에 노출된 후 시간에 따라 어떻게 변화하는지, 나노기술이 인간이나 동물 등의 생명을 지닌 유기체에 어떠한 영향은 미칠지, 공기, 물, 토양 등의 환경 시스템에 미치는 영향이 어떠한 지에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

본 논고에서는 나노기술의 잠재적인 영향에 대응하기 위한 국내외 정책 동향을 정리하였다. 미국, 유럽, 일본 등 나노기술 선진국 등의 나노기술 안전성을 확보하기 위해 지속적으로 노력하고 있고, 국내 정부 부서도 최근 나노기술에 관련된 EHS 문제를

해결하기 위해 다양한 정책적 지원을 확충하고 있다. 나노기술 안전성 확보는 나노기술 산업화를 앞당기기 위한 국제 공조가 요구되는 분야이기 때문에, OECD와 ISO는 서로 협력하고 있는데, OECD에서 전체 위해성평가를 담당하고 ISO에서 기반이 되는 독성 평가 방법과 노출 평가 방법 등을 개발한다. 두 국제기구는 나노기술 안전성 문제를 빠른 시간에 해결하기 위해 긴밀한 관계를 유지하고 있다.

마지막으로 국내의 에어로졸 기술을 나노기술 안전성 연구에 적용한 연구 결과를 정리하였고, 나노기술 안전성을 확보하기 위해 필요한 에어로졸 연구 방향에 대해 정리하였다. 최근 한국은 나노안전성 분야 중 은나노 입자에 대한 흡입독성연구를 수행하여 국제적으로 사용되는 데이터를 제공하였고, 나노기술 안전성에 관련된 국제 표준을 주도하여 개발하고 있다. 그렇지만, 이와 같은 성과는 국가 주도의 치밀한 연구 로드맵에 의한 결과라기보다는 제품화를 진행하고자 하는 회사와 독성전문가 등의 다학제적인 연구의 결과이기 때문에 단기적인 연구 성과로 끝날 수 있다. 나노기술의 상용화를 위해서는 나노제품의 EHS 영향에 대해 규명해야 하고, 신기술의 채용 뿐 아니라 소비자들에게 친환경 제품으로 다가설 수 있도록 장기적인 연구기획 및 수행이 필요하다. 높은 성능의 나노제품을 개발하는데 그치는 것이 아니라 나노제품의 인체영향, 환경영향에 대한 의혹을 풀 수 있도록 다양한 분야의 연구자들의 협력이 필요하다.

#### 참고 문헌

- 지준호 (2007). 나노물질과 나노제품 그리고 상용화 문제, 공기청정기술지, 20 (3), pp. 1-9.
- Breggin, L.K. and Pendergrass, J. (2007). Where Does the Nano Go? End-of-Life Regulation of Nanotechnologies, Project on Emerging Nanotechnologies of the Woodrow Wilson International Center for Scholars, July 2007.
- Cleverly, D. H. (2007). Human and Ecological Exposure Issues of Nanotechnology, 17th Annual conference of the International Society of Exposure Analysis.

- Hussain, S. M. and Schlager, J. J. (2009). Safety Evaluation of Silver Nanoparticles: Inhalation Model for Chronic Exposure, *Toxicological Sciences*, 108 (2), pp. 223-224.
- Han, J.H., Lee, E.J., Lee, J.H., So, K.P., Lee, Y.H., Bae, G.N., Lee, S.B., Ji, J.H., Cho, M.H., and Yu, I.J. (2008). Monitoring multiwalled carbon nanotube exposure in carbon nanotube research facility, *Inhalation Toxicology*, 20, pp.741-749.
- Ji, J.H., Bae, G.N., Yoon, S.W., Jung, J.H., Noh, H.S. and Kim, S.S. (2007a). Evaluation of Silver Nanoparticle Generator Using a Small Ceramic Heater for Inactivation of *S. epidermidis* Bioaerosols, *Aerosol Science and Technology*, 41 (8), pp. 786-793.
- Ji, J.H., Jung, J.H., Kim, S.S., Yoon, J.U., Park, J.D., Choi, B.S., Chung, Y.H., Kwon, I.H., Jeong, J., Han, B.S., Shin, J.H., Sung, J.H., Song, K.S. and Yu, I.J. (2007b). Twenty-eight-day inhalation toxicity study of silver nanoparticles in Sprague Dawley Rats, *Inhalation Toxicology*, 19 (9), pp. 857-871.
- Ji, J.H., Jung, J.H., Yu, I.J. and Kim, S.S. (2007c). Long-term stability characteristics of a nanoparticle generator using a small ceramic heater for inhalation toxicity study, *Inhalation Toxicology*, 19(9), pp. 745-751.
- Jung, J.H., Oh, H.C., Ji, J.H. and Kim, S.S. (2007). In-situ gold nanoparticle generation using a small-sized ceramic heater with a local heating area, *Materials Science Forum*, 544-545, pp. 1001-1004.
- Jung, J.H., Oh, H.C., Noh, H.S., Ji J.H., and Kim, S.S. (2006). Metal nanoparticle generation using a small ceramic heater with a local heating area, *Journal of Aerosol Science*, 37, pp. 1662-1670.
- Lee, J.H., Lee, S.B., Bae, G.N., Jeon, K.S., Yoon, J.U., Ji, J.H., Sung, J.H., Lee, B.K., Lee, J.H., Yang, J.S., Kim, H.Y. and Yu, I.J. (2010). Exposure assessment of CNT manufacturing workplaces, *Inhalation Toxicology*, 22 (5), pp. 369-381.
- Lux Research (2004). Sizing Nanotechnology's Value Chain.
- Maynard, A.D. (2006). Nanotechnology: A Research Strategy for Addressing Risk, Project on Emerging Nanotechnologies of the Woodrow Wilson International Center for Scholars, July 2006.
- Maynard, A.D., Aitken, R.J., Butz, T., Colvin, V., Donaldson, K., Oberdorster, G., Philbert, M.A., Ryan, J., Seaton, A., Stone, V., Tinkle, S.S., Tran, L., Walker, N.J. and Warheit, D.B. (2006). Safe handling of nanotechnology, *Nature*, 16; 444(7117): 267-269.
- NNI (2009). The National Nanotechnology Initiative - Supplement to the President's FY 2010 Budget ([http://www.nano.gov/NNI\\_2010\\_budget\\_supplement.pdf](http://www.nano.gov/NNI_2010_budget_supplement.pdf))
- OECD (2010). Preliminary progress report on the sponsorship programme for the testing of manufactured nanomaterials, OECD, Paris.
- Poland, C.A., Duffin, R., Kinloch, I., Maynard, A., Wallace, W.A., Seaton, A., Stone, V., Brown, S., Macnee, W. and Donaldson, K. (2008). Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like, pathogenicity in a pilot study, *Nature Nanotechnology*, 3, pp. 423-428.
- Project on Emerging Nanotechnologies of the Woodrow Wilson International Center for Scholars, <http://www.nanotechproject.org/>
- Sung, J.H., Ji, J.H., Park, J.D., Yun, J.U., Kim, D.S., Jeon, K.S., Song, M.Y., Jeong, J., Han, B.S., Han, J.H., Chung, Y.H., Chang, H.K., Lee, J.H., Cho, M.H., Kelman, B. and Yu I.J. (2009). Subchronic inhalation toxicity of silver nanoparticles, *Toxicological Sciences*, 108 (2), pp. 452-461.
- Sung, J.H., Ji, J.H., Yun, J.U., Kim, D.S., Song, M.Y., Jeong, J., Han, B.S., Han, J.H., Chung, Y.H., Kim, J.Y., Kim, T.S., Chang, H.K., Lee, E.J., Lee, J.H., Yu, I.J. (2008). Lung function changes in Sprague-Dawley rats after prolonged inhalation exposure to silver nanoparticles, *Inha-*

- lation Toxicology*, 20, pp. 567- 574.
- Sung, J.H., Ji, J.H., Park, J.D., Song, M.Y., Song, K.S., Ryu, H.R., Yun, J.U., Jeon, K.S., Jeong, J., Han, B.S., Chung, Y.H., Chang, H.K., Lee, J.H., Kim, D.W., Kelman, B. and Yu, I.J. (2008). Subchronic inhalation toxicity of gold nanoparticles, *Korean Food and Drug Administration, Research report*.
- Takagi, A., Hirose, A., Nishimura, T., Fukumori, N., Ogata, A., Ohashi, N., Kitajima, S. and Anno, J. (2008). Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *Journal of Toxicological Sciences*, 33, pp. 105-116.