

나노기술 개발동향

나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구동향

최 봉 기[†]·김 경 호·소 대 섭·유 일 재*

한국과학기술정보연구원, *한국생활환경시험연구원

R&D Trend on the Environmental, Health and Safety Impacts of Nanotechnology

Boong-kee Choi[†], Kyung-Ho Kim, Dae-Sup So, and Il-Je Yu*

Nanotechnology Information Analysis Team, Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI)

*Korea Environment & Merchandise Testing Institute (KEMTI)

Abstract: 나노기술은 원자와 분자수준의 물질을 제어하고 조작하는 기술로, 제2의 산업혁명을 이끌어 나갈 핵심기술로 인식되고 있다. 그러나 나노수준의 구조체가 인체와 환경에 잠재적인 역효과를 줄 수 있다는 우려가 제기되면서 이에 관한 정부차원의 대응이 요구되고 있다. 본 연구는 이러한 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 미국, 일본, EU 등의 주요 나노기술개발국가와 OECD, ISO 등의 국제기구 등의 대응현황을 살펴보고, 주요 주제분야별 연구개발 동향을 진단하였다. 또한, 계량정보분석기법을 사용하여 연구개발동향의 정량적 분석을 시도하였다. 연도별 논문발행 추이 및 주요 연구자, 연구기관, 국가별 연구개발현황을 분석하였으며, 인용빈도수, 네트워크 분석 등을 통하여 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 세계적인 연구개발 추이를 진단하였다. 나노기술의 책임감 있는 개발을 위해서는 시기별, 분야별 연구로드맵의 작성과 국가적 차원의 전략개발이 요구되고 있다.

Keywords: nanotechnology, risk assesiment, nanotoxicity, bibliometrics, policy analysis

1. 서 론

나노기술은 “물질을 나노크기의 수준에서 조작·분석하고 이를 제어할 수 있는 과학기술”로 제2의 산업혁명을 이끌어 나갈 핵심기술로 인식되고 있으며, 과학기술의 획기적인 개선을 통하여 새로운 의료기술의 등장, 유비쿼터스 사회의 완전한 실현, 고효율의 자원 활용시스템 및 친환경기술 등과 같이 사회전반에 커다란 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다.

나노기술의 경제적 파급효과는 기술개발의 긍정적 효과의 대표적인 예로서 거론되고 있다. 나노기술은 이미 국내 주요 산업에 활용되고 있으며 2005년 약 35조원(전체 산업 대비

2.4%) 규모에서, 2010년 104조원(5.5%), 2020년 593조원(17.7%)에 이르는 등 비약적으로 확대될 것으로 전망되고 있다[1]. 미국의 나노비즈니스 얼라이언스(NanoBusiness Alliance), 과학재단(NSF)[2], Lux Research 등은 향후 10년에서 15년 이내에 나노관련 산업의 세계 시장 규모가 수조 달러 규모로 급성장할 것이라고 예측하고 있다. 특히, Lux Research는 나노기술을 응용한 제품 시장이 2004년 당시 전 세계 제조업 부문의 0.1% 이하인 130억 달러수준이지만 2014년에는 15%까지 성장해 2조6천억 달러에 이를 것이라는 전망을 내어 놓아 나노기술개발 붐을 조성하고 있다[3].

하지만, 나노기술개발에 대한 이러한 희망적인 기대에도 불구하고 나노기술개발에 따른 사회적 영향문제에 대하여 적극적으로 대응해야 한다는 입장이 국내외에서 크게 주목을 받

[†] 주저자(E-mail: boongkee@kisti.re.kr)

고 있다. 이는 기술개발에 따른 나노격차(nano divide), 노동구조의 변화, 개인프라이버시 침해, 시민사회의 저항, 윤리적 문제 등 사회적으로 부정적인 영향이 예견되고 있기 때문이다[1].

다양한 사회적 영향문제 중에서도 특히, 나노물질의 환경 및 인체 유해성문제는 시급한 과제로 부각하였다. 이는 나노소재의 잠재적 독성에 관한 규제 조치 없이 일부 화장품 등의 소비자 제품에 이미 나노입자가 사용되고 있는 것에 대한 우려가 제기되고 있기 때문이다. 미국의 우드로 윌슨 국제학술센터(Woodrow Wilson International Center for Scholars)는 현재 300여개 이상의 나노제품이 상용화되고 있음을 보여주고 있다[4]. 나노소재의 환경, 보건, 안전성에 관한 문제는 최근 미국, 영국 등에서는 정치적 이슈로 부각되는 양상마저 보이고 있다. 지난 2006년 9월 21일 미국 하원은 주목할 만한 청문회를 개최한 바 있다. 청문회의 요지는, 현 체제로서는 나노기술의 환경보건안전(EHS)분야에 대한 부처간 연구우선분야의 설정 및 조정 기능이 극히 미비하다는 대정부 정책비평이었다. 이러한 미국의 나노기술 안전성문제에 대한 정치권의 관심과 압력은 미국의 정책변화를 예고하고 있으며, 당장 세계적인 반향을 야기할 전망이다. 실제로, 미국의 환경보호청(EPA)은 1년 전까지만 해도 나노소재를 이용한 세탁기에 대한 살충제법 적용을 고려하지 않겠다는 입장이었지만, 국내 기업이 제조하는 '은나노세탁기'에 대해서는 규제를 고려할 수 있다는 입장으로 선회하고 있다[5].

한국의 나노기술 경쟁력은 나노기술종합발전계획이 수립된 2001년 이후 비약적으로 상승하였는데, 2001년에 선진국 대비 기술수준이 25%이었으나 2005년도에는 66%에 이를 만큼 괄목한 성과를 이루었다[6] (한국과학기술정보연구원, 2005). 또한 미국의 나노기술산업 전문분석기업인 Lux Research는 미국, 일본, 독일과 함께 우리나라를 나노기술 4대 핵심 개발국가로 선정하였다[7]. 하지만, 국내에서는

나노기술의 안전성 영향에 관한 국가적 전략 수립과 범부처적인 협력활동이 미진한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 현 시기에 급격하고 부상하고 있는 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구동향을 정책, 연구, 문헌분석 등을 통하여 입체적으로 고찰하면서, 국가 나노기술 개발정책 수립 시에 고려해야 할 몇 가지 시사점을 도출하였다.

2. 연구정책 동향

나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구지원이 최근 2~3년 동안에 주요국을 중심으로 크게 증가하고 있다. 한국과 미국은 나노기술의 사회영향에 대한 평가 작업을 법적으로 보장하고 관련연구를 진행하고 있다[8,9]. 한국은 나노기술개발촉진법 19조에 "나노기술 영향평가"에 관한 조문을 명시하여 나노기술의 사회영향에 대한 평가작업을 법적으로 보장하고 관련연구를 진행해 나가고 있다.

2.1. 국외 동향

2.1.1. 미국

나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구는 미국 나노기술개발전략의 핵심 요소이다[10]. 2000년에 수립된 제1차 국가나노기술전략(NNI)는 연구성격별로 5가지 투자분야를 설정하면서 나노기술의 사회적 영향을 주요한 지원 부문으로 설정하였으며, 이러한 중점전략노선은 미국의 나노기술개발법 제정에 따라 2004년 12월 미국의 국가과학기술위원회(NSTC)가 향후 5~10년을 내다보며 수립한 제2차 국가나노기술전략에서도 그대로 이어진다. 기존의 5개의 투자지원 분류체계 대신에 새롭게 4개의 목표와 7개의 프로그램구성 영역(Program Component Area, PCA)으로 재편되었다. PCA는 부처별로 추진하고 있는 나노기술개발 프로젝트를 7개의 비슷한 연구

Table 1. 나노기술의 사회적 영향에 관한 주요국의 정책 전개 현황

시기	한국	미국	일본	EU
2003 이전	<ul style="list-style-type: none"> · 나노기술종합발전계획 (2001.7) · 나노기술개발촉진법 (2002.12) 및 시행령 (2003.6) 	<ul style="list-style-type: none"> · 국가나노기술전략 (NNI)(2000.1) · NSF, 사회영향위크샵 개최 (2000.9.28-29) · 21세기 나노기술개발법 (2003.12) 	<ul style="list-style-type: none"> · 제2기 과학기술기본계획 - 나노기술을 4대 중점 분야로 선정 · 나노기술·재료분야전략 (2001.9) 	<ul style="list-style-type: none"> · FP6, 나노기술을 핵심 연구개발분야로 선정 · 영국, ESRC 나노기술을 둘러싼 이견 조사분석
2004	<ul style="list-style-type: none"> · 과기부, NBIT 융합기술영향평가 	<ul style="list-style-type: none"> · NSF, 나노기술의 책임있는 개발을 위한 국제회의 (2004.6.17-18) · 라이스대학, 나노기술 사회영향 데이터베이스구축 (ICON) (2004.10) 	<ul style="list-style-type: none"> · AIST, 나노기술과 사회 토론회 (2004.8~2005.3) 	<ul style="list-style-type: none"> · EC, 나노기술전략 (2004.5) - 책임 있는 연구개발 중점
2005	<ul style="list-style-type: none"> · 과기부, 2005년도 나노기술영향평가 · 제2기 나노기술종합발전계획 - 나노기술사회영향 등 4대 목표 선정 	<ul style="list-style-type: none"> · 대통령과학기술자문위원회 (PCAST), NNI 평가 보고서 발행 (2005.5) - NNI 사회영향대응에 대한 호평 · EPA, 나노기술백서 발간 	<ul style="list-style-type: none"> · AIST, 심포지움 나노기술과 사회 (2005.2.1) · AIST, 나노기술의 사회수용촉진을 위한 조정연구 워크숍 (2005.9 2번 개최) 	<ul style="list-style-type: none"> · EC, 나노기술개발시행 계획 (2005-2009) (2005.6) · 나노기술사회영향에 대한 국제회의 (2005.7.14-15)
2006	<ul style="list-style-type: none"> · 제3차 한미나노포럼 - 나노기술 환경영향분야 연구 교류 (2006.4) · 식품의약품 안전청 - “나노물질 독성기반연구” · 과기부, 나노소재기술영향평가 	<ul style="list-style-type: none"> · Wilson Center, 나노기술 사회영향 평가 프로젝트 추진 · NSET, 인공으로 제조된 나노입자의 환경보건안전영향보고서 발행 (2006.9) · 미 하원, 나노소재 인체환경안전에 관한 공청회 (2006.9) 	<ul style="list-style-type: none"> · 3기 과학기술기본계획- “나노기술의 사회수용” 부문 10대 연구과제 선정 (2006.3) · 문부과학성, “나노기술의 사회수용 촉진에 관한 조사 연구” (2005.7~2006.3) · 후생노동성, AIST - 나노독성 연구 프로젝트 추진 	<ul style="list-style-type: none"> · SCENIHR, 나노기술 위험성 평가에 대한 제언 (2006.3)

영역으로 분류한 것으로 5개의 연구분야 PCA1 (나노기초원리), PCA2 (나노소재), PCA3 (나노소자와 시스템), PCA4 (메트롤로지 및 표준화), PCA5(나노제조)와 2개의 연구지원부문 PCA6 (연구시설), PCA7 (사회영향)을 포함하고 있다. 이 중 PCA7 (사회영향) 부문은 크게 2개 영역으로 세분화되어 추진되고 있는데, △환경, 보건, 안전 부문(Environmental, Health and Safety, 이하 EHS로 표기)과 △윤리, 법, 기타 사회 부문(Ethical, Legal, Societal Issue, 이하 ELS로 표기)이다. 2007회계연도의 예산 청구액을 분석하면, EHS는 4,410만 달러, ELS

는 3,800만 달러로, EHS와 ELS의 비율은 54:46이다. 미국의 나노기술개발은 과학기술위원회(NSTC) 산하에 설치한 나노기술분과위원회(NSET)를 통하여 추진되고 있다. NSET은 미국 NNI의 목표, 우선순위, 추진전략 등을 수립하는 주체이며, 부처별로 투자하고 있는 나노기술 연구개발 예산의 적절한 균형을 유지하고, 연구개발분야에 대한 충분한 지원이 이루어지도록 조정하는 역할을 하고 있다. 또한, 산업계, 학계 그리고 지역 및 주정부의 나노기술 그룹과의 정보교류 활동을 촉진하는 역할을 수행하고 있다. NSET에는 여러개의

Table 2. 미국 NNI의 나노기술의 사회적 영향(PCA7)에 관한 주요 연구 분야

부 문	내용	예산 (백만 달러) / (전체 NNI 예산 대비 비율)		
		2005 (집행액)	2006 (추정액)	2007 (요청액)
EHS	나노기술개발이 환경, 보건, 안전에 미치는 영향 및 위험성 평가	34.8 (2.9%)	37.5 (2.9%)	44.1 (3.5%)
ELS	윤리, 법, 사회적 측면의 나노기술의 영향	33.3 (2.8%)	34.1 (2.6%)	38.0 (3.0%)
교육	교육과정, 일반인 교육자료 등 개발(EHS와 ELS를 통하여 예산 집행)	-	-	-

워킹그룹이 결성되어 있는데, 나노기술의 환경 및 보건영향은 2003년 8월 12개 부처가 참여하여 설립된, 나노기술환경보건영향워킹그룹(Nanotechnology Environmental and Health Implications Working Group, NEHI WG)을 통하여 조정되어지고 있다.

NNI에 참여하는 미국의 부처별 EHS와 ELS의 예산 투자현황을 분석하면, 두 분야 모두 과학재단(NSF)의 투자가 과반수 이상을 점유하고 있다. EHS 부문에 예산을 할당하고 있는 부처는 6개이며, 부처별 점유율 순은 NSF (58.1%), EPA (18.1%), NIH (10.4%), NIOSH (6.8%), NIST (4.1%), DOD (2.3%), CSREES (0.2%) 순이다.

2.1.2. 일본

일본의 나노기술개발 정책추진은 문부과학성과 경제산업성을 통하여 주로 이루어지며, 문부과학성은 물질재료연구기구(NIMS), 이화학연구소(RIKEN) 그리고 일본원자력연구소(JAERI) 등의 독립행정법인 연구기관과 대학의 연구개발 활동 지원, 경제산업성은 신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)와 산업기술종합연구소(AIST)의 나노기술 연구개발을 지원한다. 이 중에서 나노기술의 사회적 영향문제에 주목하고 있는 기관으로는 산업기술종합연구소(AIST)가 대표적이다. 현재 나노소재가 건강에 미치는 영향을 조사하는 안전성평가

프로젝트를 추진하고, 연구 성과를 국제회의 등에서 발표하며, 경제협력개발기구(OECD)와 국제표준화기구(ISO)가 진행하는 안전관리 등의 국제기준 제도에 반영시킨다는 전망을 세우고 있다. 그 외 문부과학성의 나노기술종합지원프로젝트센터는 나노기술의 사회영향에 관한 주요국의 연구논문, 보고서 등의 문헌조사는 실시되었다. 경제산업성의 나노기술 정책연구회는 △나노기술사회영향포럼 개최, △나노기술 안전성 및 최적 규제 검토, △안전성 평가체계 정비, △표준화 활동과의 제휴, △안전성 문제에 대한 기업의 적극적 대응 등을 제안하였고 후생노동성은 나노소재의 독성평가방법등을 개발하는 3개년 연구과제는 시작하였다. 신에너지 산업기술종합개발기구(NEDO)는 「나노입자 특성평가 방법의 연구개발」프로젝트를 추진 중이다.

2.1.3. EU

2005년 6월 유럽연합집행위원회는 유럽연합의 나노기술개발시행계획(2005~2009)을 발표하였다(EC, 2005). 1년간의 준비기간을 걸쳐 공식적으로 발표된 집행위원회 전략은 7개 분야별로 집행위원회와 회원국가의 실행방안을 제시하고 있다. 핵심적인 전략안은 △대폭적인 예산확보, △연구개발 기반시설의 확대, △다학제 연구 인력의 양성, △상업화 지원 강화, △보건, 안전, 환경문제에 대한 적극적 대

Table 3. NSF의 나노물질의 독성연구 사업(2004~2006년)

사업명	연구기관	예산(달러)	시작
SGER: Size Dependant Neural Translocation of Nanoparticles	Univ of Rochester	200,000	2004
SGER: Reverse Engineering Cellular Pathways from Human Cells Exposed to Nanomaterials-Development of Novel Risk Assessment Methods	Houston Advanced Research Center	200,000	2004
Biochemical, Molecular and Cellular Responses of Zebrafish Exposed to Metallic Nanoparticles	Univ of Florida Center for Environmental and Human Toxicology	350,000	2005
Cross-Media Environmental Transport, Transformation, and Fate of Manufactured Carbonaceous Nanomaterials	Virginia Polytechnic Institute and State Univ	350,000	2005
Gene Expression Profiling of Single-Walled Carbon Nanotubes: A Unique Safety Assessment Approach	Houston Advanced Research Center	300,000	2005
Lung Deposition of Highly Agglomerated Nanoparticles	U Minnesota Twin Cities	400,000	2006
The Life Cycle of Nanomanufacturing Technologies	Univ of Illinois at Chicago	200,000	2006
International Research Needs Assessment	Rice Univ	70,000	2006
Experimental and numerical simulation of the fate of airborne nanoparticles from a leak in a manufacturing process to assess worker exposure	U Minnesota Twin Cities	400,000	2006
Aggregation and Deposition Behavior of Carbon Nanotubes in Aquatic Environments	Yale Univ	400,000	2006
계		4,270,000	

응, △국제협력 증진 등으로 요약할 수 있다 [11,12].

나노기술의 사회적 영향부문에 관한 정책은 주로 “사회적 차원의 통합”과 “공중보건, 안전, 환경, 소비자 보호” 부문을 통하여 추진된다. “공중보건, 안전, 환경, 소비자 보호”부문에서는 나노기술의 이용과 응용에 관계된 안전성 문제의 구체화를 시행한다. 또한, 인공으로 제조된 나노수준의 물질이 노동자, 소비자, 환경에 노출되는 것을 최소화하는 방안을 마련하고, 나노기술제품의 전 라이프사이클을 포괄하는 위험성 평가를 위하여 용어, 가이드라인 등의 표준을 개발해 나갈 예정이다. 유럽연

합 회원국에게는 인공적으로 제조된 나노 개체 등의 사용과 노출에 관한 목록을 작성하고, 나노기술의 응용과 사용에 관한 국가규제책을 검토할 것을 요청하였다. 또한 나노입자를 EU 가맹국정부에 제시하는 법안 지시문서인 디렉티브(Directive) 67/548/EEC 아래에서 신규물질 신고계획(New Substances Notification Scheme)의 강제규정 대상으로 삼을 것과 세계적으로 인정 받고 있는 CA (Chemical Abstract) 서비스 등록번호(Registry Number)와 나노소재용 재료안전데이터 시트(Material Safety Data Sheets for Nanomaterials)의 채택을 지원할 것을 요청했다. 유럽신규보건위험과학위원회

(Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, SCENIHR)는 2006년 3월 나노기술제품의 잠재적 위험성을 진단하는 기존의 기법들에 대한 평가 작업을 진행하여 기존의 방법으로 나노입자의 위험성을 평가하는 것이 한계가 있다며 새로운 위험평가 방법을 모색해야 한다는 권고안을 제시하였다 (SCENIHR, 2006[13]).

2.1.4. OECD

경제협력개발기구(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)는 국가간의 교류활동을 통하여 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 문제를 해결하고자 노력하고 있다. OECD는 2005년 6월 OECD 최초의 나노기술 EHS분야의 특별 세션을 개최하여 나노기술의 잠재적 부정적 영향에 대한 회원국 정부차원의 논의가 필요하다는 인식을 확산시켰다. 화학물질위원회(Chemicals Committee)와 화학물질, 농약 및 생명공학 작업반(Working Party on Chemicals, Pesticides and Biotechnology)의 합동회의(Joint meeting)는 인공으로 제조된 나노소재의 인체 보건 및 환경 안전성에 관한 잠재적 영향에 관한 특별 세션을 개최하면서, 관련분야의 연구 활동에 대한 검토가 필요하다는 공감대를 회원국내에 형성하고, 화학물질위원회(CC) 제38회 합동회의(2005. 6. 8~10)에서 인공으로 제조된 나노소재의 안전에 관한 워크숍을 개최하기로 결정하였다.

이러한 논의는 OECD 제1회 나노소재 안전성 워크숍 개최(워싱턴, 2005.12.7~9, Workshop on the Safety of Manufactured Nanomaterials)로 이어졌으며, 10개월 후 환경국(ENV) 화학물질위원회(Chemicals Committee) 산하에 나노소재 작업반(Working Party on Manufactured Nanomaterials, WPMN)이 설립(2006. 9. 14)되는 계기를 제공하였다. 그리고 2006년 10월 제1회 WPMN 회의(2006. 10. 26~27)가 영국 런던에서 개최되었으며,

회의 성과물로 마련된 작업 프로그램(Programme of Work, 2006~2008)은 제40회 화학물질위원회(2006. 11. 15~17)에서 승인 받았다[14]. 작업 프로그램의 3가지 주제 분야는 (1) 감정, 특성분석, 정의, 용어 표준, (2) 테스트 기법, 위험성 평가 (3) 정보 공유, 협력, 확산 등으로 선정되었으며, 6개 프로젝트로(△나노소재의 인체 보건 및 환경 안전성(EHS) 연구에 관한 데이터 베이스 개발, △나노소재의 EHS 연구에 관한 국제적 전략 개발, △나노소재 대표 표본의 안전도 테스트, △나노소재에 관한 기존 OECD 테스트 지침(화학제품 안전도)의 적절성 평가, △국가간 규제 프로그램 및 자발적 규제 계획(Voluntary Regulatory Schemes)에 관한 정보 교환, △위험성 평가 및 노출 측정 공동협력 등이 추진된다.

2.1.5. ISO

나노기술 표준화는 향후 잠재적인 파급효과가 매우 클 것으로 예측되는 핵심적인 사안이기 때문에 미국, 유럽 등의 주요 국가들이 적극적으로 참여하고 있다. ISO (국제표준화기구, International Standardization Organization)는 나노기술 분야의 국제표준화를 추진하기 위해 229번째 전문위원회(ISO/TC229)를 신설하였다. 사무국 및 의장에 영국(BSI)이 맡고 있다. ISO/TC229는 제1회 총회를 2005년 11월에 영국 런던에서 개최하여 나노기술 개발 이용의 촉진 및 사회의 이해촉진에 기여하는 것을 목적으로 하여 국제표준화 활동을 개시하였다. 회의 결과 3가지 분야에 대한 워킹그룹(Working Group, WG)을 설립하기로 결정하였다. WG1 (용어·분류)의 담당은 캐나다, WG2 (계측계량·특성평가)는 일본이 그리고 WG3 (보건·안전·환경)은 미국이 각각 담당하고 있다.

한편, 제3차 총회가 2006년 12월 서울에서 20개국의 151명(한국측 27명 참석)이 참가한 가운데 개최되었다(2006. 12. 4~12. 8, 서울, 올림픽 파크텔). 회의 결과로는 WG1 분야는

용어정의에 따라 원천특허의 해당분야와 관련이 있어 용어와 분류를 구분하여 2개의 스티디 그룹의 구성을 검토기로 결정하였으며, WG2 분야는 탄소나노튜브에 대한 평가물성과 평가방법을 결정하고 규격을 주도할 국가(한국, 미국, 일본 3국)를 선정하였다. WG3분야는 미국 암연구소, 일본 AIST, 한국생활환경시험연구원, OECD 등에서 나노분말의 독성 현황을 발표하고 “작업현장에서 나노물질 취급을 위한 가이드라인”을 수정하였다. 또한, ISO/TC 229과 연계기관으로 되어 있는 CEN, OECD 등과 협조체제 구축을 통한 업무중복 방지를 협의하였다.

우리나라가 얻은 주요 실적으로는 WG1에서 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 제작한 “나노기술분야 용어”를 반영기로 하였으며, WG2에서는 “열분석법에 의한 CNT 순도평가 방법”과 “CNT 튜브 타입 분석방법” 분야에서 미국과 우리나라가 공동리더를 수임하고 공동 신규작업항목제안(New Work Item Proposal)을 제출하기로 하였다.

2.2. 국내동향

우리나라의 나노기술 연구개발 정책은 2001년 “나노기술종합발전계획”을 수립하여 법정부차원에서 본격적으로 추진되었으며, 현재 제2기 나노기술종합발전계획이 추진 중에 있다 [15]. 제2기 나노기술종합발전계획에서 나노기술의 사회적 영향에 대한 정부차원의 전략을 마련하였으며, 관련법률 제정을 통한 법적 근거가 마련되는 등 나노기술의 사회적 영향을 분석하는 연구가 최근 2~3년 사이에 국내에서도 주요하게 부각되고 있다.

현재까지 3회에 걸친 나노기술영향평가는 과학기술부와 과학기술기획평가원을 통하여 추진되고 있다. 2006년에는 나노소재의 안전성 평가에 초점을 맞추고, 주요 정책제언으로는 “나노소재 기술 영향평가 센터” 설립을 제시하였다[16]. 구체적으로 센터에서 추진해야 하는 업무로 △나노소재 특성자료의 수집 및 보

완(개별과제 결과의 수집/분석/공개), △나노소재 특성자료의 체계화 주도(표준화, 위해성 평가), △나노소재 활용의 가이드라인 제정(제품 인증, 안전성 인증), △나노소재의 기술영향평가에 관한 국제적 동향의 파악 및 적극참여, △나노소재 기술에 관한 교육 및 홍보(초중고 학생, 일반인) 등을 제시하였다.

우리나라 나노기술 사회영향 연구는 미국, 유럽과 같은 구체적인 나노소재의 환경, 인체 및 안전(EHS)에 대한 연구와 윤리, 법, 사회적 측면(ELS)의 연구와는 다르게 포괄적인 나노기술의 일반론 연구에 치중하였지만, 2007년부터 구체적 연구사업 전개 될 전망이다. 식품의약품안전청(식약청) 산하 국립독성연구원 에서 2007년부터 “나노물질 독성기반연구”사업을 추진한다. 2011년까지 총 55억원 투자(2007년도 예산은 10억원)되며, 구체적 사업 목표는 △나노물질의 평가체계 구축 및 관련 지침 제정 △나노물질의 독성평가기술 개발 △독성저감화 등으로 설정하고 있다.

또한 국제협력활동도 강화될 전망이다. 환경부는 2006년 10월 OECD 회의에 참여하였으며, 나노물질의 위해성 문제에 대한 국제적 협력활동을 전개해 나가고 있다. 환경부가 정부간의 대표접촉창구를 담당하며 환경기술분야의 나노기술응용과 나노물질의 환경위해성분야 연구사업을 추진해 나갈 방침이다.

3. 연구개발 동향

3.1. 나노소재별 안전성 연구현황

인공으로 제조된 나노소재의 대표적인 사례인 풀러렌(Fullerenes), 탄소나노튜브(Carbon Nanotube), TiO₂, 양자점(Quantum Dots), 나노결정(Nano Crystal) 등의 위험성 및 독성연구현황을 정리하였다.

3.1.1. 풀러렌(Fullerenes)

대표적인 나노소재인 풀러렌의 잠재적인 환

경 및 보건 위험성에 관한 다양한 연구들이 90년대 후반 이후 현재까지 지속적으로 진행되고 있다. 그러나, 아직까지 표준 독성학 시험법을 이용하여 풀러렌 노출에 의한 폐 독성을 연구한 결과는 없다. 연구사례는 다음과 같다. 풀러렌의 복강투여 후 풀러렌은 혈액, 비장, 간에서 검출이 되었으며[17], 태반장벽을 건너 배아와 난황낭에 분포된 것이 발견되었다[18]. *In vitro*에서 풀러렌이 사람과 쥐(rat) 간 대사 효소에 미치는 영향을 연구한 결과 풀러렌의 글루타치온의 활성을 감소시켰다[19]. 풀러렌을 생쥐 피부에 도포하여 아급성 독성시험으로 발암의 개시(initiation)와 촉진(promotion) 현상을 조사한 바 DNA 합성에 영향이 없는 것을 발견하였다. 그러나, 상피종양은 증가하지 않았음에도 불구하고, 상피종양을 촉진하는 효소의 활성이 촉진되는 것을 발견하였다[20]. Sera 등(1996)은 3종류의 살모넬라에게 풀러렌을 대사활성효소(S9)의 존재하에 가시광선을 조사하였을 때 변이원성을 관찰하였지만, Zakharenko (1997)[21] 등은 *in vitro*에서 *E. coli* (대장균)과 초파리의 유충에게 풀러렌은 아무런 변이원성을 발견하지 못하였다. Kamat 등(1998)은 *in vitro*에서 풀러렌(12.5 μ g C60-cyclodextrin)은 간의 마이크로솜(microsomes)에 산화전손상을 유도한다고 보고하였다. 이런 손상은 항산화제나 유리기체 제거제(free radical scavenger)등에 의해 조절될 수 있었다. Oberdoster 등(2004a)[22]은 어류에서 풀러렌이 과산화물(peroxide)의 발생에 미치는 영향을 연구하였는데, 0.5 ppm의 농도에서 어류의 뇌에서 유의성 있는 지질 과산화(lipid peroxidation)의 증가를 관찰하였다.

3.1.2. 탄소나노튜브(Carbon Nanotube)

탄소나노튜브는 경량이며 강한구조를 가지면서 열발산 효과가 높은 성질을 지니고 있기에 와이어(wire), 반도체, 컴퓨터 기억소자, 축도된 전자기계나 고효율 공기청정기에 적용할 수 있는 가능성을 지니고 있다. 그러나 이런

물질의 유출은 특히 우주선이나 공학적 작업의 밀폐된 공간에서는 건강문제를 야기할 수 있다. 실제적으로 탄소나노튜브가 폐에 도달하는 양은 소량이지만 어떤 조건에서는 적은 크기가 공기 중에 있게 되어 폐에 도달할 수 있다(Maynard *et al.*, 2004)[23].

Lam 등은(2004)[24] 3종류의 SWCNT (단일벽 탄소나노튜브)를 기관지에 단회 투여하여 폐 독성을 연구하였는데 3종류의 SWCNT는 정제된 나노튜브는 2%의 잔류 Fe를 함유하였으며, 비 정제된 탄소나노튜브는 27%의 Fe 함유, 26%의 Ni와 5%의 이트륨(yttrium)을 함유하였다. 3종류의 탄소나노튜브 투여동물에서는 정제여부와 상관없이 염증반응과 육아종을 관찰하였다. 육아종은 폐 간질에서 발생하였으며, 0.5 mg 투여농도로 Ni를 함유한 탄소나노튜브는 높은 사망률(5/9)을 보여주었고, Fe를 함유한 나노튜브는 정제여부에 상관없이 사망을 보여주지 않았다. 높은 농도에서는 여러 가지 폐의 육아종을 포함한 임상적 증상을 보여주었지만, 대조군으로 사용한 카본 블랙은 아무런 자극성이나 육아종을 보여주지 않았다. 따라서 나노튜브의 흡입은 염증반응 육아종(granuloma), 생체 기관 내의 섬유 조직 발생 및 증식(fibrogenic) 영향을 보여주며 기존의 무게에 기준을 둔 허용농도는 불충분하다는 의미있는 결과가 제시되었다.

Warheit 등(2004)은 기관지 주입법(intra-tracheal instillation)에 의해 SWCNT (50~60% 30 nm nanotube, 30~40% 비정형 탄소, 5% Ni, 5% Co)를 수컷 쥐(rat)에 투여하였는데, 5 mg/kg에서 15%의 사망률을 보였다. 이는 상기도의 기관지가 막혀서 호흡곤란으로 죽었으며, 염증반응과 폐 세포의 분열, 폐의 다수의 육아종(granuloma)을 관찰할 수 있었다. Warheit의 연구와 Lam의 연구는 탄소나노튜브의 세포독성을 말해주고 있다.

Huczko 등(2001)은 기니아 피크을 이용하여 25 mg의 SWCNT를 폐에 투여하여 폐 기능을 조사하였는데, 폐 기능에 대한 영향을 발견

할 수 없었고, 폐와 기관지 세척액(bronchoalveolar lavage)에서도 영향을 관찰할 수 없었다. Huezko 등(2001)은 탄소나노튜브의 피부와 눈에 대한 영향을 조사하였는데, 탄소나노튜브를 함유한 패치(patch)를 지원자에게 부착한 결과 아무런 자극이나 감작성을 관찰할 수 없었으며 토끼의 눈에 주입했을 때 안 자극을 관찰할 수 없었다.

Shedova 등(2003a, 2003b)은 SWCNT는 사람의 케라티노사이트(keratinocytes)에게 양반응 관계로 세포의 생존을 감소시키며 산화적 스트레스(oxidative stress)를 증가시켰으며, 지질 과산화화(lipid peroxidation)를 증가시켜, 근로자의 노출은 피부독성을 유발할 수 있을 것이라고 제시하였다.

Zheng 등(2003)[25]은 적절한 직경과 전기적인 특성을 가진 탄소나노튜브는 *in vitro*에서 단일가닥 DNA (single strand DNA)를 풀 수 있다고 하며, Cui 등(2005)[26]은 SWCNT가 세포의 증식을 억제하며 사멸을 유도하며, 인간의 신장배아세포가 배아에 부착하는 것을 감소시켰다고 보고하였다. Jia 등(2005)은 SWCNT, MWCNT, 풀러렌의 기니아 피크의 폐대식세포를 이용하여 세포독성을 비교하였는데, 풀러렌은 세포독성이 없었으며, SWCNT가 MWCNT보다 독성이 높았으며, 석영보다도 독성이 높다고 보고하였다. SWCNT는 MWCNT보다 적은 양에서 거식세포의 탐식작용을 감소시켰다.

Pantarotto 등(2004)[27]은 사람과 쥐의 섬유세포를 이용하여 SWCNT를 리신(lysin)과 결합했을 때 세포막을 통과하여 핵에 축적되는 것을 관찰하였다. Wang 등(2004)[28]은 수산화(hydroxylation) 한 SWCNT를 실험동물의 복강에 주사한 결과 뇌를 제외한 체내에 분포하였고, 뼈에 축적되었다고 보고하였다. 다른 경로 즉 혈관, 경피, 경구 경로는 수산화된 SWCNT의 분포에 영향을 주지 않았다. 복강 투여 후 11일 이후에는 80%의 수산화된 SWCNT가 배설되었는데 94%는 소변으로 6%

는 대변으로 배설되었다. Cherukuri 등(2004)[29]은 쥐에서 탄소나노튜브는 복강의 대식세포에 의해 탐식될 수 있다고 보고하였으며, Monteiro-Riviere 등(2005)[30]은 사람의 케라티노사이트의 공포에서 탄소나노튜브를 발견할 수 있었으며, 세포의 생존을 감소시키고, 인터루킨(interleukin)-8과 같은 염증반응 마커(marker)가 증가하여 탄소나노튜브가 세포를 통과하여 자극반응을 일으킬 수 있다고 보고하였다.

3.1.3. TiO₂

자외선 차단제에 포함된 TiO₂의 잠재적 피부흡수는 자유 라디칼(free radical)을 생성하고 DNA의 변화와 잠재적 암 유발 가능성을 제기한다. TiO₂는 사람, 토끼, 쥐(rat)의 피부에 흡수될 수 있다고 보고되고 있는데, Ladmann 등(1999)는 TiO₂ (17 nm)의 코팅된 나노캡슐(coated nanocapsule)은 사람의 피부의 단단한 층(keratin)층을 넘어 피부에 유의하게 침투하지 않는다고 보고하였으며, 이런 결과는 Schulz 등(2002)[31]도 다른 TiO₂ 제제를 사용한 경우도 비슷한 결과를 가져와 TiO₂는 피부 층을 통과하여 혈관을 타고 운반되지 않으리라고 생각된다.

Oberdorster 등(1994)[32]의 20 nm와 250 nm TiO₂ 입자를 이용한 흡입독성시험에서 같은 농도에서 작은 입자가 폐에 많이 정체하였고, 간질을 통과하여 폐의 림프절에서 발견되었다. 20 nm 입자가 폐에서 제거되는 데에는 훨씬 많은 시간이 소요되었다. 20 nm가 250 nm보다 염증반응의 지표들의 증가를 보였으며, 폐의 표피세포와 간질의 섬유화와 대식세포 기능의 변화를 보여주었다. 미국 국립독성연구원(Oberdorster *et al.*, 2005)에서는 작은 크기의 TiO₂의 노출기준을 낮추기를 권고하고 있다.

Hohr 등(2002)[33]은 20~30 nm의 TiO₂를 쥐(rat)의 폐에 주입한 결과 폐에서 초기 염증의 지표인 호중구(neutrophil)가 증가함을 관

찰하였지만, 180 nm를 주입한 폐에서는 이런 현상이 관찰되지 않아 표면적이 중요하다는 것을 제시하였다.

Lucarelli 등(2004)[34]은 *in vitro* 실험에서 SiO₂와 코발트 나노입자(Cobalt nanoparticle)는 사람의 척수단핵세포(myelomonocyte)에 염증반응의 선행증상을 보여주었지만, TiO₂와 ZrO₂는 아주 미세한 반응을 보여주었다. 비슷한 결과를 Peters (2004)[35] 등도 관찰하였다.

Hillyer & Albrecht (2001)[36]은 경구로 콜로이드 금(colloidal gold) 나노입자를 투여하였을 때, 소장에서 섭취되어 혈관을 따라 뇌, 폐, 심장, 위, 간, 비장으로 분포하는 것을 관찰하였다. 이런 현상은 입자가 작을수록 훨씬 잘 분포하였다.

Paciotti[37] 등(2004)과 Hainfeld 등(2004)[38]은 콜로이드 금 나노입자를 직장압과 유방압을 가진 실험동물의 혈관으로 투여하였을 때 중앙조직에 우선적으로 분포하였으며, 간, 비장, 다른 정상적인 기관에는 분포의 정도가 미미하였다. 이를 이용하여 치료에 사용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

Sayes (2006)[39] 등은 TiO₂는 적절히 디자인 된다면 자외선 하에서 RS (reactive species)를 생산하며, 이를 이용하여 자가 청소 유리나 저비용의 태양열 cell을 만들 수 있다는 결과를 보고했다. Sayes 등은 2006년 상대적으로 높은 수준의 농도인 100 µg/mL 농도에서 세포독성과 염증반응을 관찰하였다. 이런 세포반응은 전형적인 양반응을 보였으며 시간이 지나면서 증가하였다. 이 연구에서는 물질의 표면적에 따라 반응을 하는 것이 아니라 물질의 titania의 위상성분(phase composition)에 따라 반응하였다.

아나타제(Anatase)의 TiO₂는 같은 양의 루타일(rutile)의 TiO₂보다 100배나 독성이 높았다. 세포독성이 높은 물질이 RS를 많이 생산하였다. EX-vivo상의 UV에 의해 생성되는 RS의 생산과 좋은 상관관계를 보였다. 따라서 나노입자들중 RS를 잘 생산하도록 디자인된

TiO₂가 더 많은 TiO₂를 생산할 것으로 추론된다. Ex-vivo의 결과는 세포독성을 스크리닝하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이라고 생각된다.

3.1.4. 양자점(Quantum Dots), 나노결정(Nano Crystal)

양자점은 형광을 가지고 있어 의료진단에서 영상의학에 이용되고 있는데 이들의 광학적 성질과 펩티드(peptide)나 항체, 핵산이나 다른 저분자 물질과 공유결합을 할 수 있다. 이런 물질들은 암세포를 표적으로 하거나 다른 장기를 표적으로 디자인되기도 한다. 몇몇 연구에서 양자점의 무독성을 보여주었지만, 이런 물질들은 너무 안정적인 물질이라서 장기간 시험을 하여 분해되어 제거되는지 여부를 평가하여야 할 필요가 있다. Derfus 등(2004)[40]은 양자점의 세포독성과 표면의 산화에 의해 발암물질로 알려진 Cd+2 이온을 생산하였다. ZnS에 의한 캡슐(capsule)화는 이런 현상을 감소시켰으며, 혈청에 의한 캡슐화는 완전히 이런 현상을 제거하였다.

3.2. 주제별 안정성 연구 현황

3.2.1. 나노 입자 피부투과의 평가

나노 크기의 TiO₂, ZnO를 함유한 로션, 선스크린이나 나노 섬유(nano fiber)를 함유한 방수처리나 때 안타는 섬유들에 의해 나노입자의 노출우려가 있다. 피부투과는 1) 피부나 다른 기관의 세포독성, 2) 장기간의 노출 후 피부나 기관의 축적, 3) 대사에 의해 증가된 독성 4) 광독성 문제이다. 100 nm 이하의 TiO₂, ZnO 입자들은 UV를 차단하기 위해 사용되고 있는데, 특히 TiO₂는 아나타제(anatase), 루타일(rutile), 비정형(amorphorous)의 형태를 가지고 있는데 아나타제는 반도체에서 385 nm 이하의 UVA, UVB를 흡수하여 전자쌍을 발생하는데 이 전자쌍이 물이나 산소와 결정체의 표면에서 반응하여 hydroxyl radical이나

singlet oxygen, superoxide같은 유해산소를 발생한다(Konaka *et al.*, 1999). 나노 크기의 아나타제를 비추어 발생된 ROS는 항균작용을 가지고 있으며 물에서의 오염물질을 산화할 수 있다. 그리고 CHO나 mouse lymphoma cell line에서 유전독성을 보여주며 HeLa 세포, 인간의 fibroblasts, CHO 세포, 인간의 직장암 세포 인 Ls-174-t 세포에서 세포독성을 보여 준다. 아나타제를 실리카, 알루미늄, zirconium의 oxide으로 코팅은 UV 조사에 의한 ROS 발생을 저감시킨다(Mills and Le Hunte, 1977). 따라서 TiO₂, ZnO를 코팅은 ROS를 제거할 수 있으나 최근의 Brezova *et al.* (2005) [41] 연구에서 이런 선스크린 상품에 300 nm 이상의 UV 조사는 ROS를 생성한다고 보고하였다.

나노입자의 투과를 연구한 몇 가지 논문에서 8%의 10~50 nm의 TiO₂를 포함한 선스크린을 2~6주 동안 인간에 도포 후 표피를 분석하여 연구하였는데, 나노크기의 입자의 투과 가능성을 제시하였다(Tan *et al.*, 1996). Lansdown and Taylor (1997)은 TiO₂를 castor oil과 같이 도포하였을 때 토끼 피부를 침투하였지만 Schultz (2002)와 Pflucker (2001)은 TiO₂가 인간의 피부를 침투하지 않는다고 보고하였다. Bennat and Muller-Goymann (2000) [42]은 TiO₂를 물의 현탁액과 물과 오일의 현탁액에 섞어 도포하였을 때, 물과 오일의 현탁액으로 섞은 것이 잘 침투하였으며, 털이 많은 피부가 더 잘 침투하여, 털구멍을 이용하여 투과할 가능성을 제시하였다.

이런 가능성은 Lademann *et al.* (1999)[43], Toll (2004)[44]에서도 제시되었다. 피부투과 가능성에 대한 향후 연구는 피부투과 물질의 특성화 즉 monodispersed vs aggregated, anatase vs rutile의 연구가 있어야 하며, 피부층을 구분하여 투과를 분석하는 방법이 필요하며, 도포 후의 피부의 상태를 점검하는 것이 필요하다.

3.2.2. 나노입자의 생체분포

Kreyling (2002)[45] 등은 이리듐(iridium)-192 나노입자를 이용하여 나노입자의 생체분포를 조사하였는데, 쥐(rat)에게 15 nm와 80 nm 입자를 흡입으로 노출시켰을 때, 간, 비장, 심장, 뇌에서 이리듐을 관찰하였고, 이런 현상은 15 nm 입자가 80 nm 보다 2배 이상의 분포를 보여주어 나노입자가 폐의 혈관을 따라 분포함을 보여주었다.

Oberdorster 등(2002)은 20~29 nm 탄소-13 나노입자를 흡입시켜 생체분포를 조사했는데, 폐에서의 간으로의 나노입자의 이동을 관찰하였다. Oberdorster 등(2004b)[46]은 장기간 흡입시험에서 탄소-13 나노입자의 뇌 이동을 연구했는데, 소뇌와 후각신경에 나노입자가 이동한 것을 관찰할 수 있었는데, 폐에서 혈관을 따라 뇌혈관장벽(blood brain barrier)을 건너거나 흡입에 의해 후각 신경을 따라, 축색을 따라 뇌로 이동할 수 있다고 제시하였다.

Zhang 등(2000)은 코발트 나노입자와 5 micron 입자를 기관지에 주입하여 영향을 조사하였는데 나노 cobalt가 훨씬 더 염증반응이나 폐 표피 세포에 영향을 주었다. 역학적인 연구에서도 나노 크기의 카본블랙이 노출될 수 있는 사업장에서 잠재적인 호흡기 질환이 높을 수 있다고 제시하였다(Gardiner *et al.*, 1992).

3.2.3. 나노입자의 독성 메카니즘

최근 일련의 독성연구에서 나노입자의 폐 독성이 같은 성분의 큰 입자에 비해 증가한다고 보고되고 있으며, 특히 입자의 표면적이 폐 독성에 중요한 역할을 한다고 제시되고 있다. 2년간의 25 nm 초미세 TiO₂와 미세 TiO₂, 300 nm의 흡입독성시험에서 미세입자의 1/10 정도 보다 낮은 농도에서(10 vs 250 mg/m³) 거의 같은 수준의 폐암이 유발되었다(Heinrich *et al.*, 1995[47]).

Bermudez *et al.* (2004)[48], Oberdorster *et al.* (1994)의 연구에서도 초미세 입자가 미세

입자보다 염증반응을 증가시키는 것을 볼 수 있었다. 나노의 독성 메카니즘으로는 1) 화학적인 조성에 따라 상대적으로 저용해성인 나노물질로부터 분해되면서 높은 표면적/부피비로 독성 이온의 방출과 2) 세포와의 결합성, 화학적조성과는 상관없이 세포독성은 나노입자들의 세포막투과나 세포와의 결합성이 높기 때문이며, 3) 모양, 즉 CNT와 가인 섬유상물질들의 경우 세포를 뚫을 수 있기 때문이다.

Borm & Kreyling (2004)[49]는 나노입자나 초미세입자 같이 흡입에 의해 흡수되는 물질에 대해 5D라는 가설을 제시했는데, dose (양), deposition (침착), dimension (차원), durability (지속성), defence (방어) 메카니즘을 제시하였다. 나노의 경우 dose-dimension의 관계는 표면적 농도와 관련이 있고, 폐 부위의 잠재적 독성은 농도와 입자의 차원(모양, 크기)에 의해 결정되기 때문이다. 폐에서의 나노입자의 침착은 입자의 성질에 의존성이 있으며, 지속성은 비수용성 입자가 폐에서 쉽게 분해되거나 제거될 수 없기 때문에 지속성이 높다. 만약 지속적인 노출에 의해 대규모의 국소 축적이 발생하게 되면, 독성은 나노입자를 제거하기 위한 호흡기 방어기전의 효율성에 따라 발현될 수 있다.

3.2.4. 나노입자의 폐 침착과 제거

나노입자의 폐 침착에 대한 연구결과는 부족하지만 나노입자는 거의 100% 가까이 폐에 침착하게 된다. 만약 20 nm의 입자가 폐포지역에 50% 가량이 침착한다면, 후두부의 100배, 기관지 부분의 10배가 침착하는 것이므로 이런 입자의 호흡기의 침착 분포는 건강영향과 제거에 많은 영향을 미치게 된다(Kim and Jaques, 2000[50], Jaques and Kim, 2000[51]). 침착된 PSP (poorly soluble particle) 입자 중 초대입자들은 1차적으로 기관지 점막을 싸고 있는 섬모세포에 의해 상기도로 이동하여 가래로 배출되어 소화기에 제거되며, 폐포에서는 거식세포가 PSP를 탐식하여 분해

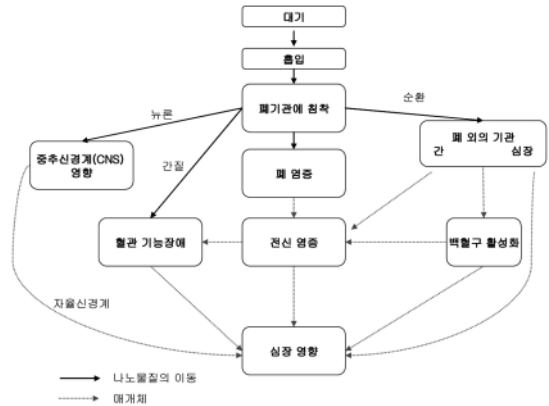


Figure 1. 초미세입자 흡입의 잠재적 영향(Dr. Oberdorster 2005a[53]의 편집).

가 가능하면 제거되고 아니면 거식세포가 PSP를 점액질로 운반하여 상기도로 배출하여 소화기에 의해 제거되기도 하지만, 보통 이런 과정은 반감기가 100일 정도 소요된다(Oberdorster, 2005b[52]).

3.2.5. 나노입자의 노출연구

나노입자에 노출되는 사람들의 현황에 대해서는 아직 연구결과가 부족하여 파악이 안되고 있다. 2005년 CBAN 대변인은 NEHI 모임에서 노출 군을 특성화 할 수 없었다고 말하고 있고, 2006년 4월 NNI 대변인도 나노 인력을 특성화할 수 없었다고 한다. Woodrow Wilson 연구소의 Maynard는 2006년 3월 교육 수준이 높은 사람이 노출될 가능성이 많으며 Aitken, Creely & Tran (2004, HSE, Inst. of Occupational Medicine[54]) 등은 대학, 연구소나 회사에서 노출근로자에 대한 정보를 파악할 수 없었으며 영국의 경우, 대학, 연구소 사설기관에서 약 2000명이 나노 관련직종에 근무하고 있으며, 제약업을 포함하여 100,000명 정도가 미세분진에 노출되고 있으며, 1,000,000명의 근로자가 용접이나 제련에서 비의도적으로 노출되고 있다고 보고했다.

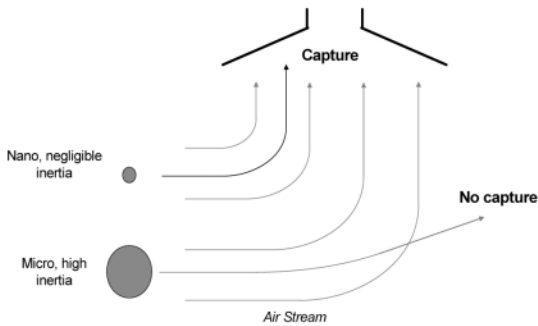


Figure 2. 나노입자의 제어.

3.2.6. 나노입자 제어연구(보호구 및 산업환기 연구)

나노입자 노출의 저감이 요구되는 작업환경에서는 우선적으로 산업환기와 같은 공학적인 대책이 필요하다. 나노입자는 Figure 2와 같이 아주 미세한 관성을 가지고 있어 gas와 같이 기존의 국소배기시설로 제어가 가능할 것으로 예측되나, 아직까지는 나노입자를 이용한 국소배기의 성능시험연구결과가 없어 이 분야의 지속적인 연구가 필요하다. 그리고 공학적인 대책을 수립할 수 없거나 공학적인 대책이 불가능한 작업환경에는 개인보호구의 사용이 권장된다. 나노입자는 이론적으로 보호구를 했을 때 입자의 제거가 가능하다고 생각된다. Dawson (1969)의 이론을 Lee and Lieu (1982)가 실험적으로 증명한 바에 따르면, 1 micron 이상의 입자는 관성(inertia)에 의해 포착하게 되고 10 nm 이상의 입자는 확산(diffusion)에 의해 포착하게 되는데 가장 포착이 어려운 입자의 크기가 500 nm 정도의 크기이다. 그러나 최근에는 나노입자에 의한 실험이 이루어지지 않았으며 다양한 종류의 제조된 나노입자가 생산됨에 따라 이 실험의 유용성에 대한 검증이 필요하다고 생각된다.

3.3. 국내 연구동향

3.3.1. 나노입자 안정성 연구

우리나라에서의 나노입자 안정성 연구는 최

근 들어서 태동하기 시작하였지만, 산업안전보건연구원의 유일재(현재, 한국생활환경시험연구원) 그룹이 나노 크기의 입자연구에 대해 1998년부터 진행해 나오고 있다[55]. 산업장의 나노크기 입자의 노출에 의한 근로자의 건강 문제로 우리나라에서는 1997년부터 용접흡(평균 입자 크기 100 nm)의 노출에 의한 호흡기 장애와 망간중독에 의한 파킨슨 증후군의 근로자들이 빈발하게 보고되어 용접흡의 유해성평가에 대한 연구를 진행하였다. 이들은 원숭이에게 용접흡을 세계 최초로 노출시켜 신경계의 영향을 MRI 등의 영상의학기법을 적용하여 규명하고 있다. 한국생활환경연구원 그룹은 최근에 개발된 은나노 발생장치를 이용하여 우리나라에서 광범위 하게 사용되고 있는 은나노의 호흡기 독성을 규명하기 위한 흡입독성시험을 성공적으로 수행하여 은 나노의 아급성 독성을 규명하고 있다.

또 하나의 세계 수준의 연구실은 서울대 수의대 조명행 교수의 연구실로 4주 동안 마그네틱 나노입자를 생쥐의 복강에 투여한 연구가 2006년 Toxicological Science에 발표되었다. 이 연구는 진단용으로 사용될 마그네틱 나노입자를 복강에 투여했을 때 여러 조직에 이동하였으며 특히 뇌혈관장벽(blood brain barrier)을 건너 뇌에도 이동하였지만, 뚜렷한 독성현상은 보이지 않았다고 보고하였다. 이들은 최근 나노입자의 흡입독성연구를 준비하고 있다. 국립독성연구원은 나노 종합발전 계획에 따른 독성평가의 포컬포인트(focal point) 기관으로 나노입자의 독성을 입자의 폐의 주입이나, 경구, 복강 투여에 의한 독성을 조사하고 있다.

나노 입자의 *in vitro* 독성연구에 대해서는 국내에서도 초기단계에 있으리라고 예상된다. 국내의 맹승희 등이(2005)[56,57] “나노입자의 독성과 산업보건에서의 대응방안연구”에서 시도했는데, 나노독성의 기초 단계로서 우리나라에서 연구, 제조되어 사용되고 있는 12종의 나노입자에 대한 세포독성과 시험관내 소핵유발

Table 4. 국내의 흡입독성연구기관

기관	대표회사	흡입챔버 보유현황	GLP 적응여부	나노입자 연구 가능/진행여부	연구 나노입자	비고
한국생활환경 시험연구원	유일재	진신노출챔버 두부노출챔버	Yes	진행중	은나노, 용접흡	
서울대학 교수의대	조명행	진신노출챔버 두부노출챔버	No	진행중	마그네틱 나노입자	
산업안전보건 연구원	양정선/ 김현영	진신노출챔버 두부노출챔버	Yes	-	-	준비중
안전성평가 연구소	한상섭/ 송창우	준비중	준비중	-	-	준비중

정도를 비교해 봄으로써 나노 입자의 크기와 형태에 따른 독성 차이를 찾고자 하였다.

3.3.2. 나노흡입독성연구

나노입자의 흡입독성연구를 수행하기 위해서는 흡입독성 챔버와 나노입자 발생기를 갖춘 시설이 필요하며 독성학자, 산업위생학자, 병리학자, 공학자들의 협력연구가 필요하나 국내의 여건상 이런 시설과 인력 인프라를 갖춘 기관이 아주 부족하다. 반면에, 세계적인 나노입자 독성전문기관들은 먼저 나노입자가 비산되어 제일 먼저 노출되는 근로자의 건강영향을 규명하기 위해 흡입독성연구에 주력하고 있다. 특히 나노상태의 입자를 발산하여 나노 크기 상태로 호흡기에 흡입될 수 있도록 하는 기술이 이 독성연구의 관건으로 미국의 NIOSH (국립산업안전보건연구원)는 폴리렌, 탄소나노튜브, 용접 흡 연구에 주력하고 있으며, 이들을 발산하여 실험동물에 노출시킬 수 있는 장치개발에 노력하고 있다. 미국의 Rochester 대학의 Oberdorster 교수 그룹과, Du Pont 연구소의 Warheit 박사그룹, 뉴멕시코의 흡입독성연구원, 노스캐롤라이나주의 CIIT (Chemical Industry Institute of Toxicology)의 흡입독성전문기관도 나노입자의 흡입독성에 주력하고 있으며, 일본의 AIST도 흡입독성연구를 위해 최근 세계 각국의 나노입자 흡입독성연구기관

을 직접 탐방하여 동향을 분석하고 있다. 국내에서 나노입자의 *in vivo* 흡입독성 챔버를 갖추고 흡입독성시험연구를 할 수 있는 기관은 Table 4와 같다.

3.3.3. 나노입자의 환경 및 작업환경 노출평가, 공학적 대책, 보호구 연구 동향

국내에서는 나노의 환경노출에 대한 기본적인 조사나 작업환경에서의 근로자의 노출에 관한 기본적인 조사 및 연구가 없으며, 나노입자의 크기 때문에 가스와 비슷한 움직임을 할 것이라고 예상되지만, 산업 환기 같은 공학적 제어 및 대책 연구가 거의 없다. 또한 나노입자는 이론적으로 필터에 의한 확산 메카니즘으로 포획(capture) 되리라고 예상되지만, 실제 보호구가 나노입자를 제어하는지에 대한 연구도 전무한 형편이다.

4. 문헌 정보 분석

문헌정보분석은 특정기술영역별로 등장하는 키워드(keyword)를 이용하여 문헌자료를 분석하는 것으로 정성적인 연구개발동향분석과 함께 기술개발동향을 가늠해 보는 주요한 정보를 제공해 준다. 본 연구는 ISI의 Web of Science SCI-Expanded (Science Citation Index

Table 5. 문헌정보의 검색식

검색어	검색1-TI 검색	검색2-TS검색
cyto-toxi*, cytotoxi*, eco-toxi*, genotoxi*, nanotoxi*, toxi*, health*, danger*, risk*, safe*	417	1,431

※ (검색조건) 문헌종류=전체, 언어=전체, DB명=SCI-EXPANDED, 시간대=1986-2006, 검색날짜=2006. 12. 검색

Expanded) DB를 대상으로 문헌정보분석을 수행하였다. 검색 커리(query)는 안전성(safety), 위험성(risks)과 관련된 safety, risk, toxicity, health effects 등으로 선정하였다. 문헌정보분석 방법은 크게 2가지 방식을 병행하였다. 첫 번째 방법은 문헌제목(title)에 한정하여 검색을 실시하였으며(TI검색), 두 번째 방법은 문헌정보 DB 중 초록(abstract), 제목(title), 핵심어(keyword) 부분에 특정 검색어가 포함되어 있는 문헌정보를 추출하였다(TS검색). 네트워크 분석은 Vantage Point (version 4.0)을 이용하였으며, Web of Science에서 제공하는 기본적인 문헌 통계정보를 참조하였다.

4.1. 통계 분석

4.1.1. 연도별 추이 분석

문헌발표경향은 최근 들어 급격하게 증가하는 경향을 보여 주었다. 문헌제목에 한정하여 TI 검색 및 문헌제목, 키워드, 초록을 검색한 TS의 경우 모두 2000년 이후를 기점으로 문헌발표건수가 대폭 증가하는 경향을 보였다. TI 검색의 경우, 1985년 이후부터 5년간의 시간대로 문헌발표량을 집계한 결과 2001~2005년 사이에 발표된 문헌이 전체 문헌 발생량의 52%를 차지하였다. 2006년을 포함한 2001년 이후 발표된 문헌의 비율은 전체의 85%에 달하였다.

4.1.2. 문헌 종류별 추이 분석

문헌종류별 분석을 통하여 최근의 연구발표 형태 및 학술 대회 연구발표 동향 등을 알 수

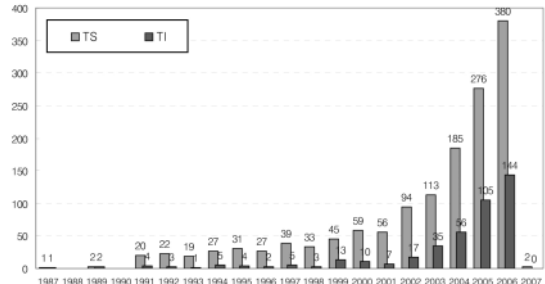


Figure 3. 연도별 문헌발표 추이.

가 있다. 문헌종류별 추이분석 결과는 Article 이 2002년 이후부터 급격하게 증가하는 경향을 보이며, 전체 문헌 증가추세를 결정지은 것으로 나타났다. 논문 증가와 함께 뉴스량도 대폭 증가하는 경향을 보여 주었는데, 이는 관련 연구활동의 활성화와 연구성과의 사회적 관심을 보여주고 있다. 뉴스 게재건수는 SCI-Expanded DB에서 지정한 저널에 게재된 것이기에, 일반 신문, 방송의 게재건수와 직접적인 비교를 할 수는 없다. 하지만, 학술저널에서 주목하는 주요한 뉴스를 보여주기, 연구자의 주요관심사를 간접적으로 확인할 수 있게 해준다. 뉴스 발생건수는 2006년 들어 17건이 발생하였는데, 이는 전체 뉴스건수의 44% 수준으로 최근 들어 관련분야에 대한 관심이 매우 높아졌음을 보여준다.

4.1.3. 국가별 추이 분석

논문 발표건수는 미국이 85건(27.7%)으로 다른 국가에 비해 압도적으로 많게 나타났으며, 다음으로 프랑스가 38건(12.4%), 독일이 35건(11.4%)으로 집계되었다. 한국은 11건

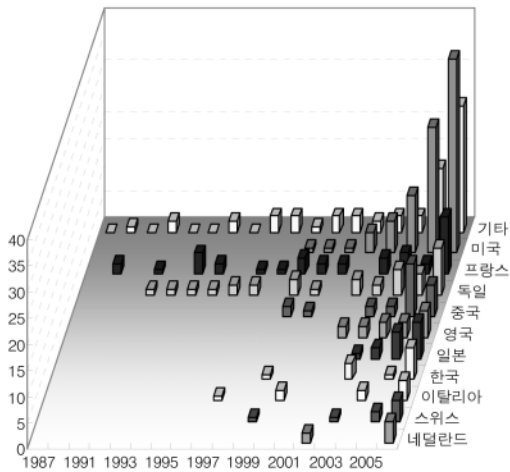


Figure 4. 국가별 문헌발표 추이.

(3.6%)으로 중국 23건(7.5%), 일본과 영국 15건(4.9%) 다음의 문헌건수비율을 점유하고 있다. 문헌발표량 상위 10개국에 전체 문헌의 80%를 점유하고 있어 실질적인 연구개발성과물의 대부분이 상위 10개국을 중심으로 이루어지고 있음을 알 수가 있다. 한국은 2003년 13.0%에 달하기도 하였지만, 전체적으로는 관련분야 연구활동이 5% 수준 이하인 것으로 나타났다.

4.1.4. 주요 기관 분석

독일의 Free Univ Berlin이 논문 9건에 12회에 등장하였으며, 중국 과학원(CAS)은 논문 9편에 18회에 등장하여 제일 많은 논문을 발표한 것으로 집계되었다. 중국 과학원(CAS)의 경우는 하부 연구소 별로 독자적인 연구가 진행되고 있기에, 단일 기관으로 보기는 어렵지만 분석의 편의상 동일 기관으로 간주하였다. 다음으로는 미국의 Rice Univ이 8편의 논문을 발행하였다. 우리나라의 경우는 상위 10위권에는 진입하지 않았지만, 한양대학교(4건), 서울대학교(2건)에서 관련 연구문헌을 발표하였다.

4.1.5. 저자별 분석

국가별 분석에 적용했던 Article 및 Review 논문 270건의 저자를 분석한 결과, 모두 1,124명의 저자가 검색되었다. 주요 연구자로는 독일 Free Univ Berlin의 Muller, R H가 12건으로 제일 많은 문헌을 발표한 것으로 집계되었다. 다음으로는 프랑스 INST GUSTAVE ROUSSY의 Couvreur, P가 8건, 독일 Univ Frankfurt의 Kreuter, J이 6건, DuPont Haskell Lab의 Warheit, D B는 4건을 기록하였다. 미국의 독성학자인 Oberdorster, G (Univ Rochester)는 1편의 논문을 발행한 것으로 집계되어 주요 연구자 순위에서는 밀려났지만, 이는 검색식의 제한으로 인한 결과로 보이며, 인용 정보분석에서는 상위 순위로 랭크 되어 있기에 실제 나노기술의 환경·보건·안전성분야의 연구에 큰 영향을 주고 있는 것을 확인해 주고 있다.

4.2. 인용 분석

인용 통계(Citation statistics)분석은 분석대상문헌의 참고문헌을 통한 후-인용분석과 Web of Science의 인용분석정보를 통한 전-인용분석을 실시하였다. 전-인용분석은 분석논문집단의 발행이후에 인용이 된 피인용수를 조사한 것으로 현재 및 미래의 활용도에 관한 정보를 제공한다. 후-인용분석은 분석논문집단이 참조했던 참고문헌을 대상으로 문헌정보분석을 실시한 것으로, 주요한 저자, 저널, 논문에 대한 정보를 제공해 준다. 그러나 SCI-E DB에서 제공하는 참고문헌 정보는 제1저자에 국한되어 있다.

4.2.1. 전-인용 분석

피인용 수가 제일 많은 문헌은 Warheit DB, Laurence BR, Reed KL, *et al.* (2004)의 "Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats" 인 것으로 집계되었다. 2004년 4회, 2005년 40회, 2006년 66회 등 현재까지 110회 인용되었다.

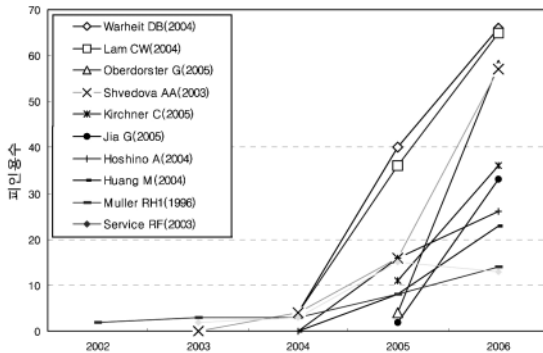


Figure 5. 문헌별 피인용수의 연도별 추이.

다음으로는 Lam CW, James JT, McCluskey R, *et al.* (2004)의 “Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation”이 105회 인용되었다.

Figure 5는 피인용수가 높은 10개의 주요 문헌의 연도별 추이를 보여주고 있다. Warheit와 Lam의 문헌은 2004년까지는 대부분 5회 이내의 인용수를 보이지만, 2005년부터는 40회 이상으로 폭증하는 추이를 보여주고 있다. 2005년 발행된 Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J의 논문 “Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles”은 2006년 들어 집중적으로 58회가 인용된 것으로 집계되었다. 피인용수가 높은 20개의 문헌 가운데 10개는 2003년 이후에 발행된 것이며, 특히 피인용수가 높은 10개의 문헌 중 9개는 2003년 이후에 발행된 논문이었다. 이는 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구가 최근 들어 매우 활발하게 전개되고 있음을 보여주고 있다.

4.2.2. 후-인용 분석

TI검색을 통하여, 1985년 이후 부터 현재까지 발행된 문헌 417건이 인용한 참고문헌을 조사분석하였다. 전체 참고 문헌수는 7,337건으로 문헌 한 편 당 17.6건의 참고문헌을 게재한 것으로 집계되었다.

Table 6은 최근 3년간 인용이 많이 된 논문을 각각 10편씩 정리한 것으로, 2004년까지는 미국 라이스 대학의 Colvin VL (2003) 문헌이 최다 피인용 논문이었지만, 2005년 들어 Warheit DB (2004), Lam CW (2004), Oberdorster E (2004), Maynard AD (2004) 등의 문헌이 더욱 많이 인용되었다. 2006년 들어서도 이 들 논문의 인용도는 지속적으로 매우 높게 나타났으며, Oberdorster G (2005) 논문이 새롭게 피인용도수 상위 4위권에 진입하였다. Oberdorster G는 2004, 2005년의 논문이 모두 최다 피인용 논문 20위권에 진입하여, 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 연구분야의 핵심 연구자로 활동 중인 것으로 파악 되었다.

최다 피인용저자는 Warheit DB가 63회로 최다 인용 저자인 것으로 집계되었으며, 다음으로 Lam CW (50회), Oberdorster G (49회), Shvedova AA (37회) 순으로 나타났다.

4.3. 네트워크 분석

4.3.1. 공동연구자

동일한 문헌의 공동저자에 대한 분석을 실시하여, 연구 그룹을 분류한 결과, 공동연구자는 미국을 중심으로 형성되어 있으며, 중심 노드는 DuPont의 Warheit DB인 것으로 나타났다. 분석도구는 Vantage Point에서 제공하는 Auto Correlation Map 기능을 활용하였다.

Warheit DB는 미국 내의 다른 연구자와 활발한 공동연구를 진행하고 있는 데, 공동저자로 활동한 사람으로는 Reed KL, Sayes CM, Webb TR (4편, Figure 6에서 실선으로 표시됨), Colvin VL (3편), Maynard AD (2편), Lam CW (1편) 등이다. 우드로 윌슨 국제학술센터의 Maynard A. D는 Warheit DB 이외에, James JT, Arepalli S, Castranova V, Stone V, Donaldson K 등과 공동저자로 1회 활동하였다. 영국 Napier University의 Stone V는 4편의 논문을 발표하였는 데, 공동 연구

Table 6. 최다 인용 논문

2004년	2005년	2006년
Colvin VL (2003)	Warheit DB (2004)	Warheit DB (2004)
Mosmann T (1983)	Lam CW (2004)	Lam CW (2004)
Muller RH (1995)	Oberdorster E (2004)	Shvedova AA (2003)
Nemmar A (2002)	Maynard AD (2004)	Oberdorster G (2005)
Crichton M (2002)	Colvin VL (2003)	Maynard AD (2004)
Masciagioli T (2003)	Sayes CM (2004)	Monteiroriviere NA (2005)
Mastrangelo CH (1994)	Shvedova AA (2003)	Oberdorster E (2004)
Michalske TA (1998)	Derfus AM (2004)	Colvin VL (2003)
Moghimi SM (2001)	Monteiroriviere NA (2005)	Jia G (2005)
Gerion D (2001)	Service RF (2003)	Sayes CM (2004)

Table 7. 최다 피인용 논문 (누적 건수, 85년 이후)

1저자	년도	저널	권수	쪽수	2004	2005	2006	계(85년 이후)
Warheit DB	2004	TOXICOL SCI	V77	P117	1	22	31	54
Lam CW	2004	TOXICOL SCI	V77	P126	1	20	26	47
Shvedova AA	2003	J TOXICOL ENV HEAL A	V66	P1909	1	7	20	28
Maynard AD	2004	J TOXICOL ENV HEAL A	V67	P87		9	17	26
Oberdorster E	2004	ENVIRON HEALTH PERSP	V112	P1058	1	11	14	26
Colvin VL	2003	NAT BIOTECHNOL	V21	P1166	5	7	13	25
Monteiroriviere NA	2005	TOXICOL LETT	V155	P377		6	15	21
Oberdorster G	2005	ENVIRON HEALTH PERSP	V113	P823		3	18	21
Sayes CM	2004	NANO LETT	V4	P1881		7	12	19
Oberdorster G	2004	INHAL TOXICOL	V16	P437	1	5	11	17
Mosmann T	1983	J IMMUNOL METHODS	V65	P55	4	2	4	15
Nemmar A	2002	CIRCULATION	V105	P411	3	4	8	15
Derfus AM	2004	NANO LETT	V4	P11		7	7	14
Jia G	2005	ENVIRON SCI TECHNOL	V39	P1378		1	13	14
Oberdorster G	1994	ENVIRON HEALTH PERSP	V102	P173	2	3	8	13
Huczko A	2001	FULLERENE SCI TECHN	V9	P251	1	5	6	13
Cui DX	2005	TOXICOL LETT	V155	P73		1	11	12
Nemmar A	2001	AM J RESP CRIT CARE	V164	P1665	2	3	5	11
Oberdorster G	2002	J TOXICOL ENV HEAL A	V65	P1531	2	3	6	11
Pantarotto D	2004	CHEM COMMUN 0107	P16		2	9		11

자는 Univ Edinburgh의 Donaldson K (3편), Institute of Occupational Medicine의 Tran, L (2편) 등이었다.

4.3.2. 공동 연구기관 네트워크

나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관

한 미국내의 주요 공동 연구기관은 Dupont, Rice Univ, NASA, 우드로 윌슨 국제학술 센터 등으로 나타났다. 이는 주요 공동연구자 네트워크 분석결과와 일치하는 것으로, Dupont의 DuPont Haskell Lab의 Warheit DB, 우드로 윌슨 국제학술센터의 Maynard AD, NASA

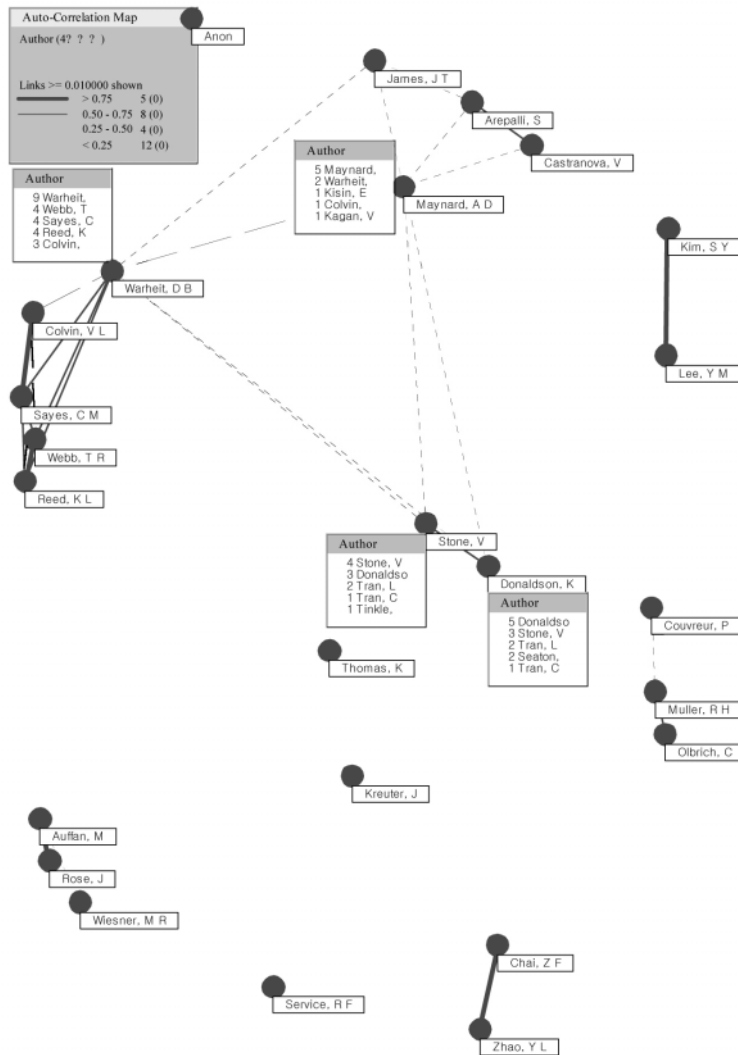


Figure 6. 공동연구자 네트워크 분석.

라인던 B. 존슨 우주센터(Lyndon B. Johnson Space Center)의 Lam CW 등은 각 소속 기관의 주요 논문 저자들이다. NASA는 Texas Univ, 미국 국립산업안전보건원(NIOSH)과 공동연구를 진행하였고, 또한, NIOSH는 영국의 Institute of Occupational Medicine과 공동연구를 진행하였다.

4.3.3. 국가 네트워크

공동으로 논문을 작성한 국가별 네트워크

현황을 분석 한 결과 미국과 공동연구를 진행한 나라는 프랑스, 캐나다, 독일, 일본, 중국, 한국, 영국, 벨기에, 헝가리, 이탈리아, 네덜란드, 네덜란드, 스위스 등으로 집계되었다. 네트워크 분석을 통하여 미국을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있음을 알 수가 있다. 프랑스는 독일, 미국, 이탈리아, 스위스, 이집트, 멕시코, 스페인, 터키 등 독일은 프랑스, 러시아, 네덜란드, 영국, 미국 등과 공동연구를 진행하였다. 그러나, 한국의 경우는 다양한 국가

와의 연구 교류가 이루어 지지 않고 있음을 확인 할 수가 있었다. 한국은 전체 11편의 논문 중 2편에 미국이 참여하였다.



참고 문헌

5. 결론 및 시사점

한국의 나노기술 경쟁력은 나노기술종합발전계획이 수립된 2001년 이후 비약적으로 상승하였다. 하지만, 나노기술의 환경·보건·안전성 영향에 관한 주요국의 정책동향 및 연구개발 현황에 대한 정성적 및 정량적 분석을 수행한 결과는 미국, 일본, EU에 견주어 우리나라의 연구 활동이 미진하며, 연구시설 및 연구 인력이 제한적인 것으로 드러났다. 이러한 EHS 부문의 주요국의 정책현황과 연구개발동향, 문헌정보분석 등을 수행하여 우리에게 요구되어지는 몇 가지 시사점을 도출하였다.

먼저, 현재 국내에서 수행중인 EHS 관련 연구과제에 대한 정밀한 검토를 통하여 우리나라가 취약한 연구분야를 도출해 내고 취약한 부문을 극복하는 새로운 범정부적 차원의 전략 수립이 요구된다. 범정부적인 전략수립이 현실적으로 어려울 시에는 부처별 연구전략을 상호 조정하는 작업을 통하여, 우선연구분야를 부처별로 분산하여 관리하는 부처간 협동 노력이 필요하다.

또한, 국제공동협력 활동을 주목할 필요가 있다. 국내의 연구동향은 네트워크 분석을 통해 나타났듯이 미국과 한정되어 있으며, 그 활동규모도 미비한 수준이다. 연구협력국가수, 협력기관이 한정되어 있다는 것은 국제 정보망에서 매우 취약한 위치에 있는 것이다. ISO, OECD 등을 통한 국제협력 활동과 연구기관 및 연구자 사이의 교류협력 활동을 지원하는 대책이 요구되고 있다.

1. 한국과학기술기획평가원, 2005년도 나노기술영향평가 보고서 (2005).
2. M. C. Roco, William Sims Bainsbridge ed, Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, Kluwer Academic Publishers, pp. 3~4 (2001).
3. Lux Research, Sizing Nanotechnology's Value Chain (2004).
4. Woodrow Wilson, A Nanotechnology Consumer Products Inventory (<http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>) (2006).
5. Washington Post (2006, 11, 23).
6. 한국과학기술정보연구원, 나노기술연감 2005 (2006).
7. Lux Research, Ranking the Nations: Nanotech's Shifting Global Leaders (2005).
8. 최봉기, 김경호, 소대섭, 이호신, 한국, 미국, 일본의 나노기술 정책 비교 분석, 제9회 한국과학기술정보인프라 워크숍(KOSTI 2004) 논문집 pp. 31~46 (2004).
9. 최봉기, 소대섭, 배국진, 김경호, 나노기술의 사회적 영향 연구에 관한 고찰, 제10회 한국과학기술정보인프라 워크숍(KOSTI 2005) 학술대회논문집, pp. 471~480 (2005).
10. 최봉기, 소대섭, 배국진, 김경호, 나노기술의 환경 및 안전영향에 관한 미국의 정책동향분석, 제11회 한국과학기술정보인프라 워크숍(KOSTI 2006) 학술대회논문집 I, pp. 426~437 (2006).
11. EC, Towards a European Strategy for Nanotechnology, COM(2004) 338 (2004).
12. EC, Nanosciences and nanotechnologies: An action plan for Europe 2005-2009, COM (2005).
13. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCE-

- NIHR), The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies (2006).
14. OECD, Report of the OECD Workshop on the Safety of Manufactured Nanomaterials: Building Co-operation, Co-ordination and Communication, Joint Meeting of the Chemicals Committee and the Working Party on Chemicals, Pesticides and Biotechnology, EN/JM/MONO(2006)19. OECD, Paris (2006).
 15. 과학기술부 외, 나노기술종합발전계획 (2005).
 16. 한국과학기술기획평가원, “2006년도 나노소재 기술영향평가 공개토론회” 자료집 (2006).
 17. F. Moussa, M. Pressac, E. Genin, S. Roux, F. Trivin, A. Rassat, R. Ceolin, and H. Szwarc. Quantitative analysis of C60 fullerene in blood and tissues by high-performance liquid chromatography with photodiode-array and mass spectrometric detection. *J Chromatogr B Biomed Sci. Appl.* **696**, 153 (1997).
 18. T. Tsuchiya, I. Oguri, Y. N. Nakajima Yamakoshi, and N. Miyata, Novel harmful effects of [60] fullerene on mouse embryos in vitro and in vivo. *FEBS Lett.*, **393**, 139 (1996).
 19. N. Iwata, T. Mukai, T. N. Yamakoshi, S. Hara, T. Yanase, M. Shoji, T. Endo, and N. Miyata, Effects of C60, a fullerene, on the activities of glutathione s-transferase and glutathione-related enzymes in rodent and human livers. *Fullerene Science and Technology*, **6**, 213 (1998).
 20. M. A. Nelson, F. E. Domann, G. T. Bowden, S. B. Hooser, Q. Fernando, and D. E. Carter, Effects of acute and sub-chronic exposure of topically applied fullerene extracts on the mouse skin. *Toxicol. Ind. Health*, **9**, 623 (1993).
 21. L. P. Zakharenko, *et al.*, Determination of the genotoxicity of fullerene C60 and fullerol using the method of somatic mosaics on cells of *Drosophila melanogaster* wing and SOS-chromotest *Genetika*. **33**, 405 [Article in Russian] (1997).
 22. E. Oberdorster, Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. *Environ Health Perspect.* **112**, 1058 (2004a).
 23. A. D. Maynard, P. A. Baron, M. Foley, A. A. Shvedova, E. R. Kisin, and V. Castranova, Exposure to carbon nanotubes material: aerosol release during the handling of unrefined single walled carbon nanotube material. *J. Toxicol. Environ. Health*, **67**, 87 (2004).
 24. C. Lam, J. T. James, R. McCluskey, and R. L. Hunter. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicological Sciences*, **77**, 126 (2004).
 25. M. Zheng, A. Jagota, M. Strano, A. Santos, and P. Barone, Structure-Based Carbon Nanotube Sorting by Sequence-Dependent DNA Assembly. *Science*, **302**, 1545 (2003).
 26. D. Cui, F. Tian, C. S. Ozkan, M. Wang, and H. Gao, Effect of single wall carbon nanotubes on human HEK293 cells. *Toxicol Lett*, **155**, 73 (2005).
 27. D. Pantarotto, J. P. Briand, M. Prato, and A. Bianco, Translocation of bioactive peptides across cell membranes by carbon nanotubes. *Chem Comm*, 16~17 (2004).
 28. H. Wang, J. Wang, X. Deng, H. Sun, Z.

- Shi, Z. Gu, Y. Liu, and Y. Zhao, Biodistribution of carbon singlewall carbon nanotubes in mice. *J. Nanosci. Nanotech.*, **4**, 1019 (2004).
29. P. Cherukuri, S. M. Bachilo, S. H. Litovsky, and R. B. Weisman, Near-infrared fluorescence microscopy of single-walled carbon nanotubes in phagocytic cells. *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 15638 (2004).
30. N. A. Monteiro-Riviere, R. Namanich, A. Inman, Y. Wang, and J. Riviere, Multi-walled carbon nanotube interactions with human epidermal keratinocytes. *Toxicol. Lett.*, **155**, 377 (2005).
31. J. Schulz, H. Hohenberg, F. Pflucker, E. Gartner, T. Will, S. Pfeiffer, R. Wepf, V. Wendel, H. Gers-Barlag, and K. P. Wittern, Distribution of sunscreens on skin. *Adv Drug Deliv Rev* 54 (Suppl 1), S157-63 (2002).
32. G. Oberdorster, J. Ferin, and B. E. Lehnert, Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. *Environ. Health Perspect.*, **102**, (Suppl 5) 173 (1994).
33. D. Hohn, Y. Steinfartz, R. P. Schins, A. M. Knaapen, G. Martra, B. Fubini, and P. J. Borm, The surface area rather than the surface coating determines the acute inflammatory response after instillation of fine and ultrafine TiO₂ in the rat. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **205**, 239 (2002).
34. M. Lucarelli, A. M. Gatti, G. Savarino, P. Quattroni, L. Martinelli, E. Monari, D. Boraschi, D. E. Woolley, and L. C. Tetlow, Innate defence functions of macrophages can be biased by nano-sized ceramic and metallic particles. Mast cell activation and its relation to proinflammatory cytokine production in the rheumatoid lesion. *Eur Cytokine Netw.*, **15**, 339 (2004).
35. K. Peters, R. E. Unger, C. J. Kirkpatrick, A. M. Gatti, and E. Monari, Effects of nano-scaled particles on endothelial cell function in vitro: studies on viability, proliferation and inflammation. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, **15**, 321 (2004).
36. J. F. Hillyer and R. M. Albrecht, Gastrointestinal persorption and tissue distribution of differently sized colloidal gold nanoparticles. *J. Pharm. Sci.*, **90**, 1927 (2001).
37. G. F. Paciotti, L. Myer, D. Weinreich, D. Goia, N. Pavel, R. E. McLaughlin, and L. Tamarkin, Colloidal gold: a novel nanoparticle vector for tumor directed drug delivery. *Drug Deliv*, **11**, 169 (2004).
38. J. F. Hainfeld, D. N. Slatkin, and H. M. Smilowitz, The use of gold nanoparticles to enhance radiotherapy in mice. *Phys. Med. Biol.*, **49**, N309-15 (2004).
39. C. M. Sayes, R. Wahi, P. A. Kurian, Y. Liu, J. L. West, K. A. Ausman, D. B. Warheit, and V. L. Colvin, Correlating nanoscale titania structure with toxicity: A cytotoxicity and inflammatory response study with human dermal fibroblasts and human lung epithelial cells, **92**, 174 (2006).
40. A. M. Derfus, W. C. W. Chan, and S. N. Bhatia, Probing the cytotoxicity of semiconductor quantum dots. *Nanoletters*, **4** (2004).
41. V. Brezova, S. Gabcova, D. Dvoranova, and A. Stasko, Reactive oxygen species produced upon photoexcitation of sunscreens containing titanium dioxide (an EPR study). *J. Photochem. Photobiol. B*,

- 79, 121 (2005).
42. C. Bennat and C. C. Müller-Goymann, Skin penetration and stabilization of formulations containing microfine titanium dioxide as physical UV filter. *Int. J. Cosmet. Sci.*, **22**, 271 (2000).
 43. J. Lademann, H. Weigmann, C. Rickmeyer, H. Barthelmes, H. Schaefer, G. Mueller, and W. Sterry, Penetration of titanium dioxide microparticles in a sunscreen formulation into the horny layer and the follicular orifice. *Skin. Pharmacol. Appl. Skin. Physiol.*, **12**, 247 (1999).
 44. R. Toll, U. Jacobi, H. Richter, J. Lademann, H. Schaefer, and U. Blume-Peytavi, Penetration profile of microspheres in follicular targeting of terminal hair follicles. *J. Invest. Dermatol.*, **123**, 168 (2004).
 45. W. G. Kreyling, M. Semmler, F. Erbe, P. Mayer, S. Takenaka, H. Schulz, G. Oberdorster, and A. Ziesenis, Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. *J. Toxicol. Environ. Health*, **65**, 1513 (2002).
 46. G. Oberdorster, Z. Sharp, V. Atudorei, A. Elder, R. Gelein, W. Kreyling, and C. Cox, Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal. Toxicol.*, **16**, 437 (2004b).
 47. U. Heinrich, R. Fuhst, S. Rittinghausen, O. Creutzenberg, B. Bellmann, W. Koch, and K. Levsen, Chronic inhalation exposure of wistar rats and two different strains of mice to diesel engine exhaust, carbon black and titanium dioxide. *Inhal. Tox.*, **7**, 533 (1995).
 48. E. Bermudez, J. B. Mangum, B. A. Wong, B. Asgharian, P. M. Hext, D. B. Warheit, J. I. Everitt, and O. R. Moss, Pulmonary responses of mice, rats, and hamsters to subchronic inhalation of ultrafine titanium dioxide particles. *Toxicol. Sci.*, **77**, 347 (2004).
 49. P. J. Borm and W. Kreyling, Toxicological hazards of inhaled nanoparticles, potential implications for drugdelivery. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **4**, 521 (2004).
 50. C. S. Kim and P. A. Jaques, Phil Trans Roy Soc London A, **358**, 2693 (2000).
 51. P. A. Jaques and C. S. Kim, Measurement of total lung deposition of inhaled ultrafine particles in healthy men and women. *Inhal. Tox.*, **12**, 715 (2000).
 52. G. Oberdorster, E. Oberdorster, and J. Oberdorster, Nanotechnology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environ. Health Perspec.*, **113**, 823 (2005b).
 53. G. Oberdorster, Inhaled Nano-sized Particles: Potential effects and Mechanisms. *Compte-rendu du First International Symposium on Occupational Health Implications of Nanomaterials*, 12 to 14 october 2004, Buxton, Great-Britain, Edited by the Health and Safety Executive, Great-Britain and the National Institute for Occupational Safety and Health, USA, July 2005, p 65-71. http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymrep_final.pdf (2005a).
 54. R. J. Aitken, K. S. Creely, and C. L. Tran, Nanoparticles: an occupational hygiene review. Sudbury, Suffolk, Grande-Bretagne. HSE, 100p. <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr274.pdf>. (2004).
 55. 유일재, 나노입자의 독성 및 위해성 연구 동향. *Air Cleaning Technology*, **19**, 44 (2006).
 56. 맹승희, 조해원, 유일재, 박은혜, 나노입자

의 독성과 산업보건에서의 대응방안연구, 산업안전공단 산업보건연구원 연구보고서 (2005).

toxicology and Risk Assessment of the Nanoparticles, *J. Toxicol Pub Health*, **21**, 87 (2005).

57. 맹승희, 유일재, The concepts of Nano-

※ 저자 소개



최 봉 기

1997 한국항공대학교
기계설계학과 학사
1999 한국항공대학교
기계설계학과 석사
2001~현재 한국과학기술정보연구원
나노정보분석팀 선임연구원



소 대 섭

1986 한양대학교 화학공학과 학사
1989 한양대학교 대학원
공업화학 석사
2005 한양대학교 나노공학과
박사수로
1989~현재 한국과학기술정보연구원
나노정보분석팀 책임연구원
기술가치평가사



김 경 호

1979 서울대학교 공과대학 화공과
학사
1981 한국과학기술원(KAIST)
화공과 석사
1981~1984 한국화학연구소 근무
1987 서울시립대학교 환경공학과
박사수로
1984~현재 한국과학기술정보연구원
나노정보분석팀
실장/책임연구원
2005~현재 나노기술연구협의회
운영위원 겸 국제협력위원회
부위원장



유 일 재

1981 건국대학교 농학과 학사
1983 뉴욕폴리엔드 대학원
생물학 석사
1989 뉴욕주립대학 브루클린
보건과학센터 대학원 박사
1992~2006 한국산업안전공단
산업안전보건연구원
화학물질물질안전보건센터
소장
2006~현재 한국생활환경시험연구원
안전성평가본부 본부장
성균관대 약학대학 겸임교수,
중앙대 의대 외래 부교수,
IARC (국제암연구소)
Monograph 93 전문위원