

나노물질 안전관리 필요성과 국내외 동향

산업안전보건연구원 연구위원 / 이 나 루



1990년에 '100 nm 보다 작은 입자들이 통상적인 폐 반응보다 더 큰 반응을 일으킬 수 있다'는 논문(Ferin et al., 1990; Oberdöster et al., 1990) 2개가 발표되었다. 큰 입자와 동일한 질량을 가진 나노 크기의 이산화티타늄과 산화알루미늄은 크기가 큰 입자들보다 폐에서 더 큰 염증 반응을 보였다는 것이 논문의 결과였다. 이 논문들은 '화학적 구성 성분이 같을지라도, 나노미터 크기의 물질은 큰 크기의 물질과 다른 생물학적 반응을 가질 수 있다'는 가설을 제안했고, 이 가설을 증명하기 위한 연구들이 현재까지도 진행 중이다.

1990년대, 다른 분야에서 초미세 에어로졸(Ultrafine aerosol)에 대한 노출 연구가 진행되어, 약 2.5 μm 보다 작은 입자(PM_{2.5})들이 인체에 더 큰 영향을 준다는 결과들이 보고되었다. 흡입을 통해 작은 입자에 노출되면 폐와 심혈관에 영향이 나타난다는 것이다. 아직 초미세입자 노출과 건강 영향은 불명확한 채 남아 있지만 화학성분 뿐 아니라 입자 크기에 의해 건강 영향이 달라지는 것은 가능성이 높은 주장이다(Maynard et al., 2011).

1990년대 나노크기 물질의 독성과 초미세 에어로졸의 건강에 대한 영향 연구가 동시에 진행되기 시작하였지만, 나노크기 물질의 물리화학적 특성이 건강에 미치는 영향을 본격적으로 연구하게 된 계기는 나노기술의 발전이다. 1990년대 원자 수준에서 물질 구조가 구조적으로 어떻게 영향을 받는지 이해하게 되고, 나노 수준에서 물질을 조작하는 것이 가능해짐에 따라 나노기술이 급격히 발전하였다.

나노기술은 국가의 지원으로 더욱 발전 속도가 빨라졌다. 여러 국가에서 나노기술 발전을 위해 연구기금을 조성하고 지원하는 전략을 수립하였다.

미국에서는 1998년에 국가과학기술위원회 산하에 관계부처 합동으로 나노기술 작업반을 구성하여 ‘나노기술연구방향: 다음 수십 년의 비전(Nanotechnology Research Directions: Visions for the next decades)’이란 보고서를 발간하고, 2000년에 국가 나노 계획을 수립하였다. 우리나라에서도 2001년 관계부처 합동으로 제1기 나노기술종합발전계획(2001~2010년)을 수립하고, 5년 뒤 다시 제2기 나노기술종합발전계획(2006~2015년)과 제3기 나노기술종합발전계획 (2010~2020년)을 수립하였다. 국가에서는 나노기술종합발전계획에 따라 연구기금을 조성하고 나노기술을 발전시키기 위해 재정적 지원을 하였다.

나노기술이 성과를 보이기 시작할 때, 나노기술에 대한 잠재적 보건 및 환경 영향에 대해 우려의 목소리가 나오기 시작했다. Donaldson 등(2004)은 ‘나노입자는 다른 물질이나 큰 입자보다 생물체를 통과하여 이동할 가능성이 더 크다. 목표 조직으로 이동할 때 유체, 세포, 조직과 나노입자의 여러 상호작용이 고려될 필요가 있다. 목표 조직에서 나노 입자는 염증이나 면역반응을 활성화시켜 매개체를 촉발할 수 있다. 중요한 것은 나노입자는 혈액이나 중추신경계에 들어가 심장과 뇌 기능에 직접 영향을 줄 수도 있다는 것이다. 나노 입자에 의해 일어날 수 있는 특별한 문제점을 강조하고, 현재의 지식 차이를 강조하기 위해 나노독성학이라는 새로운 분야를 제안한다고 나노물질에 의한 독성 연구의 필요성을 제안하였다. 학계의 우려에 미국, 우리나라를 비롯한 여러 나라들이 나노기술 발전계획에 나노 안전성에 관한 연구를 포함하였고, 국제기구들도 나노 안전성에 대한 연구를 시작하였다. 또한, 나노 안전성에 대한 연구가 효율적으로 이루어지기 위해 국가들이 서로 협력하여야 한다는 의견이 지배적이었다.

경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)에서는 제조나노물질의 위험, 노출 및 위험성 평가를 과학적인 근거를 두고 국제적으로 조화롭게 하기 위한 목적으로 2006년에 제조나노물질 작업반을 구성하였다(OECD, 2011). OECD 제조나노물질 작업반 구성은 나노 물질 안전성을 밝히기 위해 각 국의 정부가 주도적으로 활동한 형태이다. 제조물질 작업반은 OECD 각 회원국의 대표들로 구성되어 워크숍, 전문가 회의 등의 형태로 운영되었다. OECD 제조나노물질 작업반에서 우선순위를 둔 프로그램은 적절한 시험 방법으로 나노물질의 건강과 안전을 위해 제조나노물질을 시험하는 것이다. 이 프로그램에서 시험한 물질은 풀러렌, 단일벽카본나노튜브, 다중벽카본나노튜브, 은나노, 철나노, 이산화티타늄, 알루미늄 산화물, 산화세륨, 산화아연, 이산화구소, 덴드리머, 나노클레이, 금나노이다. 현재(2014년)는 이러한 물질들에 대한 독성 시험은 완료되고 데이터를

검증하고 있다. 이 프로그램 외에도 OECD 제조나노물질 작업반에서는 제조나노물질 위험성 평가를 위해 필요한 정보들을 모으고 분석하고 있다.

2000년대 이후로 나노물질의 독성을 밝히기 위해 많은 연구들이 이루어졌으며, 나노크기의 물질이 화학성분뿐 아니라 물리적 형태에 따라 생물학적 행동이 일어난다는 것은 어느 정도 알려졌다. 그러나 아직 명확하지 않은 사실이 많다. 나노물질들은 새롭고 다양한 형태로 생산된다. 새롭고 다양한 형태로 생산되는 제조나노물질이 생체 내에서 어떻게 움직이고 영향을 주는지 밝히기가 쉽지 않다.

현재 제조나노물질 중 안전성에 대해 가장 걱정하는 물질은 카본나노튜브이다. 미국 국립산업 안전보건연구원에서는 카본나노튜브와 카본나노섬유에 대한 직업적 노출과 관련된 잠재적 건강위험을 최소화하기 위해 노출기준을 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8시간 시간가중 평균치, 45년)로 제안하였다.(NIOSH, 2013). 아직까지 카본나노튜브에 의한 인체 건강 영향은 보고된 바가 없다. 그러나 카본나노튜브에 노출된 동물 연구 결과들은 염증, 육아종(granulomas), 폐 섬유화 같은 폐와 관련된 영향이 있다고 보고된다. 카본나노튜브의 동물실험 결과를 섬유화를 일으키는 다른 물질(실리카, 석면, 초미세 카본블랙)들의 결과와 비교해 보았을 때, 카본나노튜브가 유사하거나 더 큰 건강영향이 있는 것으로 나타났다. 또한, 동물 실험 결과를 이용하여 작업년 동안에 해당하는 무독성량(No Observed Adverse Effect Level)을 계산하면 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8시간)에 가깝다. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 미국 국립산업안전보건연구원에서 제시하는 방법(NIOSH 5040)에 의해 측정된 호흡성 탄소 원소양이며, 이 값은 측정 방법의 검출한계에 가깝다.

국제암연구소에서는 2014년 9월에 카본나노튜브에 대해 발암성 여부를 검토하기로 하였다(IARC, 2014). 국제암연구소에서 발암성 여부를 검토하는 물질 중 카본나노튜브는 우선순위가 높은 물질이다. 국제암연구소 뿐 아니라 여러 곳에서 제조나노물질의 발암성 여부도 관심을 가지고 산화세슘 등에 대해 발암성 연구를 진행하고 있다.

현재 제조나노물질 일부에 대해서는 독성이 보고되고 있으나 아직까지 나노물질의 독성에 대해 우려하는 것은 불확실성이다. 다양하고 복잡한 나노물질 생산으로 나노물질에 대한 독성 실험과 기전을 밝히기도 쉽지가 않다. 나노물질 안전성에 대해 불확실성이 높지만 나노물질의 유용한 독특한 특성들로 인해 계속 개발되고 사용될 가능성이 높다. 앞으로 나노물질에 대한 노출 인구는 증가할 것이고 이미 나노기술 연구자, 개발자들이 나노물질에 노출되고 있다.

제조나노물질의 독성과 기전에 대해 불확실성이 있으나 제조나노물질의 노출 인구가 증가하기 때문에

제조나노물질에 대한 위험성 평가와 관리가 요구되고 있다. 특히 학자들은 석면을 사용한 경험으로 제조나노물질을 사용할 때는 예방적(Precautionary) 원칙을 적용해야 한다고 주장한다. 제조나노물질의 독성이 밝혀질 때까지 조심해서 사용하며 가능한 노출을 낮추는 것이다.

위험성 관리에서 위험(독성) 확인 후, 다음 단계는 노출 평가이다. 사실 나노 입자에 대한 정확한 노출 평가는 나노물질이 독성을 일으키는 기전이 밝혀져야 가능하다. 현재는 나노물질의 독성과 관련된 노출 지표(Metrics)가 무엇인지 밝혀지지 않았다. 다만 나노입자에 대한 노출지표는 기존에 산업보건에서 주로 사용하던 질량 외에 입자 크기, 모양, 표면적, 표면 화학이 될 수도 있다는 정도만 알려져 있다. 나노입자의 입자 크기, 모양, 표면적 농도를 측정하기 위해서는 산업보건에서 주로 사용하던 장비 이외의 장비들이 필요하다. 나노입자에 대한 공기 중 노출 평가가 어려운 이유 중 하나는 대기 중에 제조나노물질에서 발생한 것이 아닌 디젤 배출 물질에서 기인한 부수적인(Incidental) 초미세입자가 존재하고, 나노입자의 측정 장비로 입자를 측정할 때 제조나노물질에 의한 것인지 부수적인 초미세입자에 의한 것인지 구별할 수 없기 때문이다.

나노물질 노출에 대한 자료가 많지는 않지만 무게를 재거나 혼합하는 동안 카본나노튜브를 이동할 때 공기 중 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 제조나노물질 노출에 영향을 주는 요인들은 사용하는 물질의 양과 물질이 공기 중으로 분산되는 정도일 것이다. 또한 물질의 밀폐 정도와 사용시간도 노출에 영향을 줄 것이다. 제조나노물질 제조 동안에 제조 설비에 대해 부가적으로 밀폐를 하지 않는다면 공기 중으로 썰 수도 있고, 재료를 투입하거나 제품을 꺼낼 때 공기 중으로 비산할 수도 있다. 특히 제조나노물질 제품을 포장하는 동안에 관리 대책을 실시하지 않으면 공기 중으로 나노 입자가 비산할 가능성이 커진다.

제조나노물질 위험성 관리를 위해 현재 많은 제조나노물질에 대해 정량적인 노출평가가 가능하지 않다. 현재 제조나노물질에 대해 측정방법과 노출기준이 권고된 물질은 카본나노튜브를 비롯한 소수의 물질이다. 제조나노물질 위험성 관리를 위해 나노물질 컨트롤 밴딩이 제안되고 있다. 나노물질 컨트롤 밴딩 도구는 현재까지 다양하게 개발되고 있으며, 상황에 맞는 도구를 선택해서 사용해야 한다(산업안전보건연구원, 2013)

제조나노물질을 개발하고 사용한다는 것은 인간과 환경이 역사상 접해 보지 못했던 새로운 물질에 노출된다는 것을 의미한다. 새로운 물질이 안전하다고 밝혀질 때까지는 독성에 대한 불확실성이 존재한다. 불확실성을 감소시키기 위해 제조나노물질에 대한 독성연구, 노출평가 방법과 위험성 관리에 대해서 현재도 세계 각 국에서 연구가 진행되고 있다.

위험에 대해 불확실성이 높은 제조나노물질들을 정부가 어떻게 규제할 것인지 아직까지는 정해진 바가 없다. 그러나 제조나노물질 제조 및 사용 현황 등에 대해 정부가 정보를 수집하여 노출 인구 및 노출 상황을 주시할 필요성은 있다. 이러한 정보 수집이 사업장의 자발적인 참여로 이루어지지 않을 경우 정부가 법적 근거를 마련하여 정보 수집을 하는 사례가 늘어나고 있다.

제조나노물질을 제조 및 사용하는 사업주는 근로자가 가능한 제조나노물질에 노출이 되는 것을 방지하기 위해 공정을 개발하고, 환기와 같은 공학적 대책을 수립하는 것이 필요할 것이다. 🍷

참고문헌

1. Donalson K, Stone V, Tran CL, Kreyling W, Borm PJA. Nanotoxicology. *Occup Environ Med.* 2004. 61:727-728
2. Ferin J, Oberdöster G, Penney DP, Soderholm SC, Gelein R, Piper HC. Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles. 1. Particle clearance, translocation, morphology. *J Aerosol Sci.* 1990. 21:381-384
3. Maynard AD, Warheit DB, Philbert MA. The new toxicology of sophisticated materials: Nanotoxicology and beyond. *Toxicological sciences.* 2011. 120(S1): S109-S129
4. Oberdöster G, Ferin J, Finkelstein G, Wade P, Corson N. Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles. 2. Lung lavage studies. *J Aerosol Sci.* 1990. 21:384-387
5. Department of health and human services, Center for Disease Control and prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers (Current Intelligence Bulletin 65). 2013
6. IARC. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Meetings/index.php>. Volume 111: Some nanomaterials and some fibers
7. OECD. Nanosafety at the OECD: The first five years 2006-2010. 2011
8. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 나노물질 개발에서 생산까지 단계별 나노입자 노출 평가. 2013