흡입된 나노입자와 건강: 고찰

구본기[†]

미국 직업안전보건 연구원, 응용연구 기술과
(2010. 6. 27. 접수/2010. 7. 6. 수정/2010. 8. 11. 채택)

Inhaled Nanoparticles and Occupational Health: A Review

Bon Ki Ku[†]

*Division of Applied Research and Technology, National Institute for Occupational Safety and Health,
Cincinnati, Ohio, USA*

(Received June 27, 2010/Revised July 6, 2010/Accepted August 11, 2010)

ABSTRACT

In many fields, nanotechnology is leading to the development of purposely-engineered nanoparticles and devices demonstrating new, unique and non-scalable properties. However, concern has been expressed that these same properties may present unique challenges in terms of the potential health impact. Airborne particles associated with engineered nanoparticles are of particular concern, as they can readily enter the body through inhalation. Research into the potential occupational health risks associated with inhaling engineered nanoparticles is actively being conducted in the U.S. and globally. In this article, the potential occupational health effects of inhaled nanoparticles and methods for measuring exposure to nanoparticles are discussed. Critical research needs in this field are also briefly addressed.

Keywords: nanoparticles, nanotechnology, nanomaterials, occupational health, exposure measurement, real-time monitoring

I. 서론

나노기술의 급속한 성장에 기인하여 최근 작업장과 대기환경에서 발생하는 나노입자에 대한 연구가 상당한 관심을 얻고 있다. 나노기술(nanotechnology)이란 일반적으로 새로운 물질과 구조 및 장치를 만들기 위하여 원자크기 수준에서 물질을 조작하는 기술을 통칭한다. 나노기술을 이용하여 만들어진 나노입자(nanoparticle)가 기존의 거대물질(bulk material)에서는 볼 수 없었던 고유한 물리적, 화학적, 광학적 성질을 나타내는 잇점이 있는 반면, 최근 몇 년 전부터 이런 고유한 성질을 지닌 나노입자가 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있다는 가능성이 대두되었다.^{1,2)} 한 예로 최근 크게 각광을 받고 있는 단일벽면 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube)는 금속보다 훨씬 가벼우면서

기계적 강도가 강철보다 상당히 크기 때문에 우주 엘리베이터를 만드는데 사용하기 위한 재료로 제안되었다.³⁾ 이처럼 상상을 초월하는 곳에 탄소나노튜브가 응용될 수 있는 반면, 최근 밝혀진 독성연구결과에 의하면, 단일벽면 탄소나노튜브는 인체에 치명적인 영향을 줄 수 있고, 폐질환과 폐의 점진적인 손상을 일으킬 수 있는 것으로 밝혀졌다.^{4,5)} 나노기술을 이용한 나노입자 및 나노제품 제조 분야는 현재 미국 정부의 연구계획에 있어 최고로 각광받고 있는 분야 중 하나라 할 수 있다. 비록 매우 미세한 부분에 집중되어 있지만, 나노기술은 엄청난 잠재적인 유익을 가져다 줄 수 있을 것으로 예측되고 있다. 1997년부터 2003년에 걸쳐, 이 분야에 전 세계적으로 각 정부가 투자한 금액은 연간 432백만 달러에서 약 30억 달러로 상승하였다. 그리고 나노기술과 관련된 제품이 가져다 줄 전세계적인 경제적 효과는 2015년에는 3조 달러에 이를 것으로 예측되고 있다.⁶⁾ 하지만, 나노기술이 미칠 인체와 환경에 대한 새로운 위험성이 적절하게 그리고 우선적으로 밝혀지지 않는다면, 나노기술로부터 얻게 될 경제적, 사회적 유익은 상당히 반감될 것이다. 따라서 나노기술의

[†]Corresponding author : Division of Applied Research and Technology, National Institute for Occupational Safety and Health
Tel: 1-513-841-4147, Fax: 1-513-841-4545
E-mail : BKu@cdc.gov

유익을 극대화시키기 위해서 무엇보다도 책임있는 나노기술 개발이 필요하며 나노입자가 인체의 건강에 미치는 잠재적인 유해성을 사전에 최소화하는 것이 가장 중요하다 하겠다.

나노입자의 유해성에 대한 연구는 2004년 미국 직업 안전보건 연구원(National Institute for Occupational Safety and Health: 이하 NIOSH로 언급함) Nanotechnology Research Center 설립으로 미국에서 시작되어 현재 전세계적으로 이 분야에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 본 논문에서는 나노입자와 건강이라는 주제로 나노입자에 노출될 수 있는 여러 경로 중 흡입을 통한 노출에 중점을 두어 살펴 보고자 한다. 구체적으로 나노입자에 작업자가 노출되었을 때 발생할 수 있는 잠재적인 인체의 유해성에 대해 살펴 보고, 노출을 측정하기 위해 어떤 측정 방법들이 사용되며, 실제 작업장에서 발생하는 나노입자에 대한 노출 측정 및 평가방법에는 어떠한 것들이 있는지 소개하고자 한다. 아울러, 이 분야에 있어 향후 심도있는 연구가 필요한 부분에 대해 언급하고자 한다.

II. 고찰 및 토의

1. 나노입자와 잠재적인 인체의 유해성

나노입자란 3차원 중 적어도 1차원에 대한 크기가 100 나노미터(1 나노미터는 1 마이크로 미터의 천분의 일, 1밀리미터의 백만분의 일에 해당된다) 이하의 크기를 갖는 입자를 말한다.¹⁾ 예를 들면, 나노화이버(nanofiber)는 길이가 수 마이크로 미터에 해당되나 직

경이 100 나노미터보다 작기 때문에 나노입자로 분류된다. 나노입자에는 일반적으로 공학용 나노입자(engineered nanoparticle), 대기 초미세입자(ambient ultrafine particle), 그리고 생물학적 나노입자(biological nanoparticle)가 포함된다. 나노입자와 비슷한 개념으로 나노물질(nanomaterial)도 정의될 수 있다. 즉, 적어도 1차원의 크기가 분자크기보다는 크고 100 나노미터보다는 작은 크기에서 고유한 물리적 또는 화학적 성질을 나타내는 물질로 정의된다. 그렇다면, 나노입자가 기존의 거시입자(macro-particle)와 비교하였을 때, 입자의 어떠한 성질이 인체에 잠재적인 위험을 일으킬 수 있는가? 지금까지는 호흡기를 통한 거시입자가 인체에 미치는 영향은 흡입되는 입자의 질량(mass)과 조성(composition)만으로 결정될 수 있었다. 다시 말하면, 얼마나 많은 입자를 흡입하는가와 그 입자가 어떠한 성분으로 구성되어 있는가만 파악된다면 호흡기로 인한 인체에 미치는 영향은 파악될 수 있다. 그러나, 나노입자에 있어서는 단순히 기존의 통용되는 이 두가지 요소만으로 인체에 미치는 잠재적인 위험이 결정될 수 있는 것으로 보지 않고, 입자의 크기(size), 형상(shape), 응집상태(agglomeration state), 표면적(surface area), 표면화학특성(surface chemistry), 용해도(solubility), 나노결정구조(nano structure)가 각각 인체의 유해한 영향을 끼칠 것으로 예측되고 있다.⁷⁾ 예를 들면, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 나노입자가 Fig. 1(a)와 1(b)와 같은 응집상태를 갖을 경우, 각각의 응집상태가 입자의 생물학적 반응성에 다르게 영향을 줄 것으로 예상되고 있다. 또 다른 예로, 분무를 통해 발생된 단일벽면 탄소

Fig. 1. Different agglomeration states of nanoparticles. They may affect differently its biological activity in the lung. (a) Agglomerated silver nanoparticles generated by an evaporation/condensation method: Adapted from Ku and Maynard (2005)²¹⁾, (b) Agglomerated single walled carbon nanotubes aerosolized by a laboratory vortex shaker: Adapted from Ku *et al.* (2007)³⁹⁾.

From Ku, Evans, Ramsey and Maynard

Fig. 2. Transmission Electron Microscope image of purified single walled carbon nanotube (SWCNT) particles aerosolized by spraying. Two different shapes of SWCNTs exist.

나노튜브는 서로 상이한 2가지 형상을 가질 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 거미줄 형태의 형상을 지닌 상대적으로 성긴 나노튜브와 공처럼 밀한 형상을 가진 나노튜브가 존재한다. 예측컨대, 이 두가지 형상을 지닌 나노입자는 인체와 반응할 때 다르게 작용할 것이다. 만일, 나노입자의 노출을 적절하게 표현하는 척도(metric)로 지금까지 사용되어 온 질량을 사용한다면, 거시입자에 적용할 경우보다, 상대적으로 큰 위험성을 안고 있다. 왜냐하면, 같은 질량에 노출될 경우, 단위 밀도(1 g/cm^3)를 갖는 1 마이크로 미터 입자 하나의 질량과 10 나노미터 입자 백만개의 질량이 같지만, 직관적으로 하나의 입자가 폐속에 흡입되는 경우와 백만개의 입자가 흡입되는 경우는 폐에 미치는 영향이 다를 것으로 판단된다. 이처럼, 나노입자의 경우에는 질량이 노출기준의 적절한 척도가 되지 못할 것으로 예측되고 있다. 입자의 어떤 척도가 나노입자의 유해성을 나타내는데 가장 적합한 것인가는 아직까지 밝혀지지 않은 상태이고, 입자의 여러 특성들이 복합적으로 작용하여 인체의 유해한 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 지금까지 보고된 나노입자 독성에 관한 연구결과가 많지는 않지만, 나노입자가 인체에 미치는 유해성에 대해 제한적으로 알려진 연구결과들을 잠시 살펴보고자 하겠다. 호흡기를 통해 흡입된 나노입자는 혈관속으로 침투될 수 있고, 또한 다른 기관(말하자면, 뇌)으로 전이될 수 있다고 보고되었다.^{8,9)} 생쥐를 이용한 동물실험에서, 용해도가 낮은 나노입자는 거시입자에 비해 호흡기 질환, 세포조직 손상과 폐종양을 일으키는데 있어서 더 강하게 작용하는 것으로 나타났다.^{1,10-15)} 그리고, 단일벽면 탄소나노튜브는 생쥐 폐에 폐질환을 일으키는 것으로 밝혀졌다.^{4,5)} 또 다른 연구결과로서, 화학조성과 분자구조, 나노입자의 표면특성의 변화는 잠재적 독성

에 영향을 줄 수 있다.¹⁶⁾ 나노입자가 인체에 미치는 영향 중 최근 발표된 2개의 논문에서는,^{17,18)} 다중벽면 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotubes)가 석면과 같이 인체에 영향을 줄 수 있다는 사실을 보고하였다. 이 사실은 위에서 언급된 나노입자의 여러 특성 중 나노입자의 형상(구체적으로 탄소나노튜브의 길이)이 독성에 실제적으로 영향을 준다는 것을 입증한다. Poland 외 논문에서,¹⁷⁾ $20 \mu\text{m}$ 보다 긴 다중벽면 탄소나노튜브는 석면과 같은 반응을 보이지만, $20 \mu\text{m}$ 보다 짧거나 실타래처럼 엉킨 탄소나노튜브에 있어서는 어떠한 반응도 보이지 않았다고 보고하고 있다.

위 연구결과 중 호흡기를 통해 흡입된 나노입자가 뇌로 전이될 수 있다는 사실은 상당히 충격적인 결과이다. 이는 거시입자의 경우에는 상상할 수 없었던 연구결과이며 나노입자가 쉘을 통과하여 혈관속으로 침투될 정도로 매우 작기 때문에 일어나는 현상이다. 조금씩 나노입자의 독성에 관한 연구결과가 보고되고 있지만, 아직까지 나노입자 유해성에 관해 밝혀지지 않은 많은 질문들이 존재한다. 몇가지 중요한 질문들을 열거하면,

- 나노입자의 독성을 가장 잘 나타내는 척도는 무엇인가? - 입자의 수농도, 표면적, 질량, 또는 이것들의 조합, 아니면 완전히 다른 그 무엇인가?
- 나노입자의 어떤 성질이 독성을 일으키며 인체는 그것에 어떻게 반응을 하는가?
- 안전하게 호흡할 수 있는 나노입자의 노출량은 얼마인가?
- 흡입된 나노입자가 장기적으로 인체에 미치는 영향은 어떠한가?

아직까지 밝혀지지 않았지만, 만일 단일벽면 탄소나노튜브가 석면처럼 폐암을 일으킬 수 있다면, 20-30년 전에, 석면의 경우에 밟았던 전철을 밟지 않기 위해서, 사전에 이 물질에 대한 규제를 강화해야 할 것이다. 나노입자의 노출량과 관련하여, 현재까지 규정된 노출허용한계가 존재하지 않고 있기 때문에 현재로서 나노입자의 허용한계를 기존의 거시입자의 허용한계로 임시적으로 대체 사용하고 있는 실정이다. 현재 미국 연방노출허용한계(permissible exposure limit: PEL)가 흑연입자에 대해 5 mg/m^3 이지만, 몇몇 독성학자들은 이 노출허용한계에서 한달동안 탄소나노튜브에 노출된 사람은 폐질환을 얻게 될 것으로 예측하였다. 따라서 탄소나노튜브의 노출허용한계가 기존의 5 mg/m^3 보다는 훨씬 작아야 하고, 나노입자의 노출허용한계를 나타내는 척도가 질량농도가 아닌 입자의 수농도나 입자의 표면

적이 되어야 한다는 의견이 지배적이다. 그러나, 아직까지 질량이 아닌 다른 척도로 나노입자의 독성을 뒷받침해 줄 연구결과가 매우 부족한 형편이다. 다행스럽게도, 전 세계적으로 나노입자의 유해성에 대한 연구가 활발히 진행중이기 때문에 향후 10년 이내 위에 언급된 질문들 중 상당부분은 답변될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 나노입자 분석 및 측정 방법

Oberdörster 외의 최근 나노입자 및 나노물질의 독성 연구에 관한 분석보고서에 의하면,¹⁾ 나노입자가 인체에 미치는 영향을 구체적으로 파악하기 위해서는 나노입자의 화학적 성질뿐만 아니라 입자의 물리적 구조(structure)의 중요성도 강조되었고, 특히 나노입자의 물리·화학적 특성을 충분히 분석할 필요가 있다고 제안되었다. 이와 같이 포괄적인 나노입자의 분석을 강조한 주된 이유는 단일벽면 탄소나노튜브 물질의 독성과 관련하여, 다양하고 통일되지 않은 접근방식이 다른 독성 결과를 가져왔기 때문이며, 이러한 결과의 불일치로 말미암아, 잠재적인 나노물질의 독성연구를 수행하기 전에 나노입자의 충분한 물리·화학적 분석이 필요하다는 점에 동의가 이루어진 것이다. 이 보고서에서,¹⁾ 나노입자의 다양성과 복잡성 때문에 독성실험에 적절한 나노입자의 분석수준이 맞추어 져야 한다고 제안되었다. 앞에서 간략히 언급한 것처럼, 인체에 잠재적인 영향을 미칠 수 있는 나노입자의 성질로는 나노입자의 수농도, 크기, 형상, 응집상태, 표면적, 표면화학특성, 질량을 들 수 있다. 다양한 물리·화학적 특성을 갖는 나노입자를 측정 및 분석할 수 있는 방법들이 최근 NIOSH에서 발표된 보고서와 다른 기관에서 발행된 연구 논문들에서 보고되었다.^{19,20)}

1) 나노입자에 대한 노출측정방법

지금까지 알려진 독성자료에 의하면, 나노입자의 노출과 관련된 인체 유해성을 결정할 때, 입자의 표면적과 크기가 입자의 질량보다 더 중요한 물리적 성질이라는 가설을 뒷받침해 주지만, 아직까지 입자의 노출측정에 기준이 될 명확한 근거가 부족한 실정이다. 기존의 거시입자에 대한 노출 측정과 비교하여 나노입자의 노출측정은 다양한 입자의 노출척도의 모니터링을 요구한다. 몇가지 대표적인 측정방법에 대해 기술하면 다음과 같다.⁷⁾

- 기존의 거시입자에 적용해 왔던 입자의 질량측정을 나노입자 측정에 적용시키는 방법

- 연속성을 가지고 기존의 방법을 사용할 수 있는 장점이 있는 반면, 나노입자의 경우, 질량 측정의 민감도가 문제가 될 수 있다.

- 입자의 수농도를 측정하는 방법

- 상대적으로 쉬운 방법이지만, 작업장에서 프로세스와 관련된 입자와 백그라운드 입자를 구분하기가 어렵다는 단점이 있다.

- 입자의 크기분포를 측정하는 방법

- 많은 입자의 물리적 정보를 제공할 수 있지만, 작업장에서 휴대용으로 사용하기는 비실제적이다.

- 입자의 표면적을 측정하는 방법

- 몇몇 나노입자와 관련이 많으나 실시간으로 입자의 표면적을 측정하는 장비가 미흡하다.

2) 나노입자의 노출을 측정하는 장치

나노입자의 노출을 측정하는 장치는 공기중에 부유된 나노입자를 샘플링을 통해 실시간으로 입자를 모니터링하는 방식을 주로 이용한다. 즉, 온라인 측정방법을 이용하여 실시간으로 입자에 대한 노출을 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 입자의 성분과 결정구조를 파악하기 위해서는 필터를 이용한 입자샘플링이 필수적이다.

- 응축 입자 계수기(Condensation Particle Counter, CPC)

- 10 nm에서 약 $\sim 1 \mu\text{m}$ 크기를 갖는 입자의 수농도를 측정할 수 있다. 입자의 측정가능한 최대 수농도는 $100,000/\text{cm}^3$ (대표적인 장치로서, 3007 portable CPC, TSI Inc.).

- 전기이동도 분석기(Differential Mobility Analyzer, DMA)

- 10 nm에서 700 nm에 해당되는 입자들의 크기분포를 측정할 수 있다.

- 전기 저압 임팩터(Electrical Low Pressure Impactor, ELPI)

- 7 nm에서 $10 \mu\text{m}$ 에 해당되는 입자들의 크기분포를 측정할 수 있다.

- 측정시간은 1초보다 짧기 때문에 시간에 따라 변화하는 입자의 크기분포를 측정할 수 있다.

- 투과 전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)

- 1 nm 정도의 해상도를 가지고 미세한 입자의 형상을 분석할 수 있다.

- 에어로졸 포토미터(Aerosol Photometer)와 필터미디어(Filter)

- 입자의 질량을 측정할 수 있다.
- 필터를 이용한 측정방법이 더 정확하지만, 실시간 모니터링에 사용될 수 없는 단점이 있다.
- 투과 전자현미경을 이용한 전자회절분석기(Energy Dispersive X-ray Analysis, EDX)
 - 입자 표면의 성분을 분석할 수 있다.
- 확산대전(Diffusion Charging)을 이용한 입자의 표면적 모니터(Diffusion Charger, DC)와 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 방법
 - 입자의 표면적을 측정할 수 있다.
 - BET 방법이 보다 정확하지만, 실시간으로 입자의 표면적을 측정할 수 없다는 단점이 있다.
 - 확산대전을 이용하는 장치는 실시간으로 입자의 표면적을 모니터링할 수 있지만, 입자의 총표면적이 아닌, 입자의 겉표면적만을 측정할 수 있다.²¹⁻²³⁾
- 전기이동도 분석기와 질량분석기(Aerosol Particle Mass analyzer, APM)
 - 입자의 응집상태를 정량적으로 측정할 수 있다.
 - 두 장치를 이용하여 입자의 유효밀도(effective density)를 측정할 수 있다.^{24,25)}

위에서 설명한 입자 측정장치 중 실제로 작업장에서 나노입자의 노출을 측정하는데 주로 사용되고 있는 장치로는 응축입자 계수기, 전기 저압입력터, 에어로졸 포터미터와 필터, 그리고 확산대전을 이용한 입자의 표면적 모니터가 해당된다. 위에 언급한 입자 측정장치를 이용하여 작업장에서 나노입자의 노출을 측정한 연구들을 살펴 보면, Evans 등은 카본 나노화이버를 제조하는 작업장에서 모바일 에어로졸 샘플링 장치를 이용하여 나노화이버의 수농도, 표면적, 크기 분포, 질량을 동시에 측정하였다.²⁶⁾ Bello 등은 전기이동도 분석기를 이용하여 작업장에서 탄소나노튜브 입자의 크기 분포를 측정하였다.²⁷⁾ Heitbrink 등은 자동차 엔진 제조 작업장에서 응축입자 계수기, 확산대전 모니터와 에어로졸 포터미터를 이용하여 입자의 수농도, 표면적, 질량을 측정하여 이 세 척도들간의 상관관계를 조사하였다.²⁸⁾ 이 연구들 외에도 비슷한 장치들을 이용하여 나노입자의 노출을 측정하는 연구들이 발표되었다.^{29,30)} 아직까지 나노입자의 노출을 평가하는 최적의 척도가 결정되지 않았기 때문에 작업장에서 서로 다른 척도들(입자의 수농도, 크기, 표면적, 질량)을 동시에 측정하여 비교 분석하는 것이, 현재 나노입자에 대한 노출로부터 근로자를 보호하는 맥락에서 중요하다 할 수 있다.³¹⁾ 궁극적으로 나노입자의 노출을 동시 다발적으로 측정할 수 있는 소형이면서 경제적이고, 배터리에 의해 구동가능한 장치

개발이 NIOSH를 비롯한 미국의 다른 연구기관에서 진행 중에 있다.

3. 작업장에서 나노입자의 노출 측정

다양한 기술을 이용하여 제조되는 나노입자 및 나노물질이 작업장에서 근로자들에게 얼마나 많이 노출이 되는지 측정하기 위해서는 우선적으로 나노입자가 발생하는 구체적인 위치를 찾아내야 한다. 보편적으로 나노입자의 발생은 나노물질 제조과정에서 일어나는데, 다양한 제조과정 중에서 특별히 나노입자 발생이 급격하게 일어나는 프로세스가 존재한다. 예를 들면, 고온 고압을 이용하여 나노입자를 발생하는 공정이거나 나노입자를 포함한 용액을 분무시켜 반응로내에서 화학 반응을 이용하여 나노입자를 발생하는 공정을 들 수 있다. 일단 입자가 발생하는 위치가 파악이 되면, 이곳에서 다양한 노출척도를 가지고 나노입자의 노출을 포괄적으로 측정할 필요가 있다. 아직까지 나노입자의 노출을 평가하는 최적의 척도가 결정되지 않았기 때문에, 작업장에서 서로 다른 척도들(입자의 수농도, 크기, 표면적, 질량, 입자크기분포)과 입자의 조성 및 형상을 동시 측정하여 비교 분석하는 것이, 현재 근로자의 나노입자에 대한 노출로부터 보호하는 맥락에서, 중요하다 할 수 있다. 따라서, 발생하는 나노입자의 물리/화학적 특성을 포괄적으로 측정 및 분석하는 것이 절실히 요구된다. 이렇게 측정된 다양한 척도들과 입자의 물리/화학적 특성 데이터는 나노입자의 독성을 파악하는데 중요한 정보를 제공해 줄 수 있을 뿐만 아니라, 작업장에서 나노입자의 노출을 가져오는 물리적인 프로세스를 이해하는 데에도 큰 도움을 줄 수 있다.²⁰⁾

실제 작업장에서 발생하는 나노입자를 모니터링하는 방법과 나노입자의 노출척도와 형상 및 조성을 분석하는 방법들에 대해서 몇몇 연구보고서에서 가이드라인을 제시하였다.^{20,32,33)}

나노입자의 노출에 영향을 주는 인자들에는, 사용되고 있는 물질의 양과 이 물질이 공기중으로 쉽게 분말의 형태로 부유될 수 있는가의 여부, 그리고 물질을 취급하는 시간이 포함된다. 현재, 나노입자에 대한 노출을 가져올 수 있는 작업장 상황을 예측할 수 있는 정보가 상당히 부족하지만, 나노입자를 제조하는 작업장에서 나노입자에 대한 노출 가능성을 증가시킬 수 있는 작업환경들을 살펴 보면 다음과 같다.

- 나노입자 분말을 취급하는 작업
- 나노입자를 쏘거나 혼합하는 작업
 - 나노입자를 취급할 때 나노입자에 대한 노출과 밀

접하게 관련된 입자의 물리적 성질 중 더스티니스(dustiness)가 있다. 이 물리적 성질은 나노입자 분말에 일정한 에너지를 가했을 때 나노입자 분말이 공기중으로 부유되는 정도를 나타낸다.

- 기계가공, 연마공정 또는 나노입자를 포함하는 물질을 기계적으로 파손하는 작업
- 쏟아진 나노입자나 버려지는 나노입자를 청소하는 작업
- 입자를 포집하는 장치(예를 들면, 진공청소기)를 청소하는 작업

현재 작업장에서 나노입자의 노출 측정방법에 대한

DHHS (NIOSH) Publication No. 2009-125 <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/>

Fig. 3. Schematic diagram for evaluation of potential nanoparticle release.

세계적으로 동의된 기준은 없다. 그러나 나노입자의 노출에 대한 모니터링에 대한 가이드라인이 최근 국제 표준화 기구(ISO)에 의해 만들어졌고, NIOSH에서 'Approaches to Safe Nanotechnology'라는 제목으로 가이드라인 보고서를 발표하였다.²⁰⁾ 이 보고서에 의하면 다양한 척도들을 동시에 측정하는 것을 제안하였다. 기존의 산업위생 포집방법(고정된 위치에서 입자를 샘플링하는 방법과 작업자의 호흡영역에서 샘플링하는 방법)을 이용하여 나노입자의 질량을 측정하고, 실시간 측정 장비를 이용하여 입자의 수농도, 크기 또는 크기 분포와 표면적을 측정한다. 여기에 입자의 형상과 조성을 분석하기 위한 입자의 샘플링이 추가된다.

나노입자의 노출을 모니터링하는 방법들이 여러 가지가 있지만, 여기서는 NIOSH에서 제안된 샘플링 방법을 소개하고자 한다(Fig. 3 참조).²⁰⁾ 나노입자를 샘플링하기 전에 먼저 선행되어야 할 것은 나노입자가 발생하는 위치를 파악하는 것이다. 이것은 입자의 수농도를 측정하는 응축 입자계수기(condensation particle counter: CPC)를 사용하여 주로 이루어진다. 나노입자 제조공정이 진행되는 동안 발생하는 입자의 수농도를 측정하기 전에, 이미 작업장에 존재하는 주위입자(background particle)의 수농도를 측정하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면, 주위입자 수농도의 측정을 통해 나노입자가 실제로 발생되었는지 파악할 수 있기 때문이다. 일단 나노입자가 발생하는 위치가 확인되면, 실시

Fig. 4. Number and surface area concentrations of nanomaterial (Lithium Titanate) generated in the workplace. Notice that a sudden but small increase in the number and surface area concentration happens during the drum changing and cleaning. The number concentration was measured by a condensation particle counter (CPC) and the surface area concentration measured by a diffusion charger (DC).

간 측정 장비들을 이용하여 다양한 노출척도들을 포괄적으로 측정한다. 여기에는 입자의 표면적, 크기분포, 질량이 포함된다. 이때 측정장비들은 기능하면 작업자의 작업영역에 가깝게 위치시키는 것이 중요하다. 마지막으로 전자현미경을 이용한 입자의 형상 분석과 입자의 조성파악을 위하여 필터나 그리드(grid)를 이용하는 퍼스널 샘플링(personal sampling)이 수행되어야 한다. 이러한 접근방법은 나노입자의 존재 여부를 결정하고 나노입자의 노출척도를 측정 가능하게 한다. 이러한 방법을 이용하여 실제 작업장에 나노입자를 모니터링한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4는 나노물질인 티타늄 산화물(TiO_2)을 제조하는 작업장에서 발생하는 나노입자의 수농도와 표면적을 모니터링한 데이터를 보여 준다. 또한 그리드를 이용하여²¹⁾ 포집한 입자의 전자현미경 이미지도 보여 준다. Fig. 4의 그래프에서 나노입자의 수농도와 표면적이 주위입자보다 급격하게 상승하는 때가 존재함을 볼 수 있는데, 이것은 작업자가 입자가 포집되는 드럼을 바꿀 때 발생하였다. 나노입자의 수농도는 응축 입자계수기를 사용하여 측정하고 입자의 표면적은 확산대전기(diffusion charger: DC)를 이용하여 측정되었다. 이상적으로는 다양한 노출척도(입자의 수농도, 크기분포, 표면적, 질량)를 동시에 측정할 수 있는, 소형이면서 가격이 저렴한 측정장치를 개발하여 작업장에서 근로자의 몸에 부착하여 정확하고 용이하게 나노입자의 노출을 측정하는 것이 요구된다.^{31,34)} 이러한 기능을 만족하는 새로운 입자 샘플러를 개발하는 연구가 미국내에서 현재 활발히 진행 중이다.

한편, 나노입자 발생이 작업장에서뿐만 아니라, 우리가 사는 일반환경을 통해서도 일어날 가능성이 있다. 일반환경에서 나노입자의 노출은 작업장에서와는 달리 나노입자를 포함한 물질이나 제품이 생산에서부터, 사용, 폐기 그리고 재활용될 때 발생된다. 이러한 나노입자를 포함한 나노물질의 라이프사이클을 통하여 나노물질이 일반환경에 미치는 영향에 관한 연구의 필요성에 대해 최근 미국 환경 보호국(US Environmental Protection Agency)이 나노물질 연구전략 보고서에서 언급하였다.³⁵⁾

4. 작업장에서 나노입자 방출 및 노출을 제어하기 위한 제한

나노입자를 혼합하거나 완성된 나노입자를 포장할 때 발생하는 나노입자에 대한 노출은 작업공정에서 흔히 일어난다. 주의깊은 작업훈련이나 적절한 엔지니어링 제어를 통해 작업자가 나노입자에 노출되는 것을 상당히 줄일 수 있다. 엔지니어링 제어방법에는 나노입자가 외부로 노출되지 않도록 나노입자를 연속적인 풀다운

비닐백에 담는 방법³⁶⁾과 팬에 의한 환기(ventilation)를 이용하는 방법³⁷⁾ 있다. 팬을 이용하는 환기방법을 통해 작업자가 나노입자를 취급할 때 작업자 주위에 발생된 나노입자를 팬을 이용하여 강제적으로 외부로 방출시킬 수 있다. 이 방법은 산업공정에서 꾸준히 사용되어 오고 있으며 이 방법을 나노입자에 적절히 적용한다면, 나노입자에 대한 노출을 상당히 줄일 수 있을 것이다. 팬을 이용하는 방법에서 고려해야 할 점은 분말형태의 값비싼 최종 제품의 손실을 최소화하면서 발생된 나노입자를 충분히 포집할 수 있도록 환기유량을 적절히 조절해야 한다는 점이다. 최근 한 논문에서 국부 환기 시스템이 나노물질에 적용되었지만, 이러한 점을 고려하지 않았다.³⁸⁾ 일반적으로, 입자의 노출을 제어하기 위한 최선의 방법으로는, 분말형태의 입자를 다룰 때 공기중에 부유된 입자들은 작업자로부터 완전히 고립시키거나 안전하게 포집되도록 하는 것이다.

5. 향후 연구방향 및 제한

NIOSH는 나노기술과 나노입자와 관련된 직업안전과 보건에 관한 연구를 효과적으로 수행하기 위하여 전략적인 계획을 발표하였다.²⁰⁾ 공기중에 부유된 나노입자의 노출을 측정하고 평가하는데 있어 아직도 풀어야 할 많은 문제들이 있다. 이에 대해 간략히 정리해 보면 다음과 같다.

- 생물학적 반응에 기여하는 나노입자의 물리·화학적 성질들이 무엇인지 독성연구를 통하여 밝혀져야 한다.
- 나노입자의 세가지 척도(수농도, 표면적, 질량)를 동시에 측정할 수 있는 휴대용 에어로졸 장치(universal aerosol monitor)가 개발되어야 한다.³¹⁾
- 작업장에서 측정대상이 되는 나노입자를 주위입자와 선별해서 측정할 수 있는 측정방법이 개발되어야 한다.
- 작업장에서 나노입자의 발생, 이동, 축적, 재유입에 영향을 주는 주요 인자들을 결정해야 한다.
- 작업장에서 나노입자에 대한 노출이 작업활동에 따라 어떻게 달라지는지 조사해야 한다.

III. 결 론

본 논문에서는 거시입자와 비교하여 나노입자의 어떠한 성질이 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있을지 현재까지 알려진 제한된 연구결과를 바탕으로 살펴 보았다. 나노입자의 크기, 형상, 응집상태, 표면적, 표면화학

특성, 용해도, 나노결정구조가 각각 인체의 유해한 영향을 끼칠 것으로 예측되고 있다. 또한, 나노입자의 수 농도, 크기, 형상, 응집상태, 표면적, 표면화학특성, 질량을 측정하는 방법과 장치들에 대해서도 살펴 보았다. 그리고, 작업장에서 발생하는 나노입자의 노출을 측정하고 평가하는 방법에 대해서도 고찰하였다. 나노기술은 새롭게 나타난 신 기술이기 때문에 나노입자의 유해성에 대해 아직 많은 부분들이 밝혀지지 않았다. 따라서, 나노입자에 대한 독성연구결과가 충분히 밝혀질 때까지, 작업장에서 나노입자의 노출을 최소화하는 방향으로 작업장 환경을 개선하는 것이, 현재로서 근로자를 보호하는 차원에서 매우 중요하다 하겠다.

Disclaimer

본 논문의 내용은 미국 직업안전보건 연구원의 견해가 아닌 저자 본인의 개인적인 견해를 밝힌다.

참고문헌

- Oberdörster, 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. and Yang, H. : Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Particle and Fibre Toxicology*, **2**(8), doi: 10.1186/1743-8977-2-8, 2005.
- Maynard, A. D. : Responsible nanotech at work. *Nanotoday*. A Materials Today Supplement. Dec. 2004.
- The Space Elevator, http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/521Edwards.pdf
- Shvedova, A. A., Kisin, E. R., Mercer, R., Murray, A. R., Johnson, V. J., Potapovich, A. I., Tyurina, Y. Y., Gorelik, O., Arepalli, S., Schwegler-Berry, D., Hubbs, A. F., Antonini, J., Evans, D. E., Ku, B. K., Ramsey, D., Maynard, A., Kagan, V. E., Castranova, V., Baron, P.: Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single walled carbon nanotubes in mice. *American Journal of Physiology - Lung Cellular and Molecular Physiology*, **289**, L698-L708, 2005.
- Lam, C. W., James, J. T., McCluskey, R. and Hunter, R. L. : Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicological Sciences*, **77**, 126-134, 2004.
- Roco, M. C. : Environmentally responsible development of nanotechnology. *Environmental Science & Technology*, **39**(5), 106A-112A, 2005.
- Maynard, A. D. and Kuempel, E. D. : Airborne nanostructured particles and occupational health. *Journal of Nanoparticle Research*, **7**, 587-614, 2005.
- Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W. and Cox, C. : Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology*, **16**, 437-445, 2004.
- Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Lunts, A., Kreyling, W. and Cox, C. : Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health A*, **65**, 1531-1543, 2002.
- Tran, C. L., Buchanan, D., Cullen, R. T., Searl, A., Jones, A. D. and Donaldson, K. : Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhalation Toxicology*, **12**, 1113-1126, 2000.
- Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V. and Donaldson, K. : Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and Applied Pharmacology*, **175**(3), 191-199, 2001.
- Duffin, R., Tran, C. L., Clouter, A., Brown, D. M., MacNee, W., Stone, V. and Donaldson, K. : The importance of surface area and specific reactivity in the acute pulmonary inflammatory response to particles. *Annals of Occupational Hygiene*, **46**, 242-245, 2002.
- Renwick, L. C., Brown, D., Clouter, A. and Donaldson, K. : Increased inflammation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particles. *Occupational and Environmental Medicine*, **61**, 442-447, 2004.
- Barlow, P. G., Clouter-Baker, A. C., Donaldson, K., MacCallum, J. and Stone, V. : Carbon black nanoparticles induce type II epithelial cells to release chemotaxins for alveolar macrophages. *Particle and Fibre Toxicology*, **2**(11), 1-14, 2005.
- Oberdörster, G., Ferin, J. and Lehnert, B. E. : Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. *Environmental Health Perspectives*, **102**(Suppl 5), 173-179, 1994.
- Sayes, C., Fortner, J., Guo, W., Lyon, D., Boyd, A., Ausman, K., Tao, Y. J., Sitharaman, B., Wilson, L. J., Hughes, J. B., West, J. L. and Colvin, V. L. : The differential cytotoxicity of water-soluble fullerenes. *Nano Letters*, **4**, 1881-1887, 2004.
- Poland, C. A., Duffin, R., Kinloch, I., Maynard, A., Wallace, W. A. H., Seaton, A., Stone, V., Brown, S., MacNee, W. and Donaldson, K. : Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature Nanotechnology*, **3**(7), 423-428, 2008.
- Takagi, A., Hirose, A., Nishimura, T., Fukumori, N., Ogata, A., Ohashi, N., Kitajima, S. and Kanno, J. : Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-walled carbon nanotube. *The Journal of Toxicological Sciences*, **33**, 105-116, 2008.

19. NIOSH Document. Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH, 2006. <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/>
20. NIOSH Document. Approaches to Safe Nanotechnology: Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials [DHHS (NIOSH) Publication No. 2009-125], 2009. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf>
21. Ku, B. K. and Maynard, A. D. : Comparing aerosol surface-area measurement of monodisperse ultrafine silver agglomerates using mobility analysis, transmission electron microscopy and diffusion charging. *Journal of Aerosol Science*, **36**, 1108-1124, 2005.
22. Ku, B. K. : Determination of the ratio of diffusion charging based surface area to geometric surface area for spherical particles in the size range of 100-900 nm. *Journal of Aerosol Science*, **41**(9), 835-847, 2010.
23. Fissan, H., Neumann, S., Trampe, A., Pui, D. Y. H. and Shin, W. G. : Rationale and principle of an instrument measuring lung deposited nanoparticle surface area. *Journal of Nanoparticle Research*, **9**, 53-59, 2007.
24. Ku, B. K., Emery, M. S., Maynard, A. D., Stolzenburg, M. and McMurtry, P. H. : *In situ* structure characterization of airborne carbon nanofibers by a tandem mobility-mass analysis. *Nanotechnology*, **17**, 3613-3621, 2006.
25. Maynard, A. D., Ku, B. K., Emery, M. S., Stolzenburg, M. R. and McMurtry, P. H. : Measuring particle size-dependent physicochemical structure in airborne single walled carbon nanotube agglomerates. *Journal of Nanoparticle Research*, **9**, 85-92, 2007.
26. Evans, D. E., Ku, B. K., Birch, M. E. and Dunn, K. H. : Aerosol monitoring during carbon nanofiber production: Mobile direct-reading sampling. *The Annals of Occupational Hygiene*, **54**(4), 514-531, 2010.
27. Bello, D., Wardle, B. L., Yamamoto, N., deVilloria, R. G., Garcia, E. J., Hart, A. J., Ahn, K., Ellenbecker, M. J. and Hallock, M. : Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. *Journal of Nanoparticle Research*, **11**, 231-249, 2009.
28. Heitbrink, W. A., Evans, D. E., Ku, B. K., Maynard, A. D., Slavin, T. and Peters, T. : Relationship among particle number, surface area, and respirable mass concentration in an automotive engine manufacturing. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **6**, 19-31, 2009.
29. Evans, D. E., Heitbrink, W. A., Slavin, T. J. and Peters, T. M. : Ultrafine and respirable particles in an automotive grey iron foundry. *The Annals of Occupational Hygiene*, **52**, 9-21, 2008.
30. 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. : Monitoring multiwalled carbon nanotube exposure in carbon nanotube research facility. *Inhalation Toxicology*, **20**, 741-749, 2008.
31. Maynard, A. D. and Aitken, R. J. : Assessing exposure to airborne nanomaterials: Current abilities and future requirements. *Nanotoxicology*, **1**(1), 26-41, 2007.
32. Methner, M. M., Birch, M. E., Evans, D. E. and Hoover, M. D. : NIOSH Health Hazard Evaluation Report. HETA #2005-0291-3025. University of Dayton Research Institute (UDRI), Dayton Ohio, October, 2006. <http://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2005-0291-3025.pdf>
33. Mazzuckelli, L. F. (Ed.), Methner, M. M., Birch, M. E., Evans, D. E., Ku, B. K., Crouch, K. G. and Hoover, M. D. : Case study: Identification and characterization of potential sources of worker exposure to carbon nanofibers during polymer composite laboratory operations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **4**(12), D125-D130, 2007.
34. 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. : Safe handling of nanotechnology. *Nature*, **444**, 267-269, 2006.
35. U.S. Environmental Protection Agency. Nanomaterial research strategy. Washington, D.C: Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. EPA 620/K-09/011, 2009.
36. Hirst, N., Brocklebank, M. and Ryder, M. : Containment systems: a design guide. Warwickshire, UK: Institution of Chemical Engineers (IChemE), 2002.
37. ACGIH : Industrial ventilation: a manual of recommended practice. 26th edn. Cincinnati, OH. ACGIH Signature Publications, 2007.
38. Old, L. and Methner, M. M. : Engineering case report: effectiveness of local exhaust ventilation (LEV) in controlling engineered nanomaterial emissions during reactor cleanout operations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **5**, D63-D69, 2008.
39. Ku, B. K., Maynard, A. D., Baron, P. A. and Deye, G. J. : Observation and measurement of anomalous responses in a differential mobility analyzer caused by ultrafine fibrous carbon aerosols. *Journal of Electrostatics*, **65**(8), 542-548, 2007.