

# 나노입자와 잠재적인 인체의 유해성

## (Nanoparticles and the Potential Occupational Health)

미국 NIOSH 선임 연구원 / 구 본 기

### 1. 서론

나노기술(nanotechnology)을 이용하여 만들어진 나노입자(nanoparticle)가 기존의 거대물질(bulk material)에서는 볼 수 없었던 고유한 물리적, 화학적, 광학적 성질을 나타내는 특징이 있는 반면, 최근 몇 년 전부터 이런 고유한 성질을 지닌 나노입자가 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있다는 가능성이 대두되었다.

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 (<http://www.primidi.com/2003/09/13.html>). 이처럼 상상을 초월하는 곳에 탄소나노튜브가 응용될 수 있는 반면, 최근 밝혀진 독성연구결과에 의하면, 단일벽면 탄소나노튜브는 인체에 치명적인

영향을 줄 수 있고, 폐질환과 점진적인 손상을 일으킬 수 있는 것으로 밝혀졌다. 나노기술을 이용한 나노입자 및 나노제품 제조 분야는 현재 미국 정부의 연구계획에 있어 최고로 각광받고 있는 분야라 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 432 백만 달러에서 약 30억 달러로 상승하였다. 그리고 나노기술과 관련된 제품이 가져다 줄 전세계적인 경제적 효과는 2015년에는 3조 달러에 이를 것으로 예측되고 있다 (Roco, 2005). 하지만 나노기술이 미칠 인체와 환경에 대한 새로운 위험성이 적절하게 그리고 우선적으로 밝혀지지 않는다면, 나노기술로부터 얻게 될 경제적, 사회적 유익은 상당히 반감될 것이다. 따라서 나노기술의

유익을 극대화시키기 위해서 무엇보다도 책임있는 나노기술 개발이 필요하며 나노입자가 인체의 건강에 미칠 잠재적인 유해성을 최소화하는 것이 가장 중요하다고 하겠다.

이런 맥락에서 앞으로 3회에 걸쳐 나노입자와 산업보건(occupational health)이라는 주제를 다루려고 한다. 1회에는 나노입자와 잠재적인 인체의 유해성에 관해서 다루고, 2회에는 나노입자 분석 및 측정 방법을 소개할 것이며, 3회에서는 실제 작업장에서 발생하는 나노입자에 대한 노출 측정 및 평가방법에 대해 다루고자 한다.

## 2. 본론

나노입자란 3차원 중 적어도 1차원에 대한 크기가 100 나노미터 (1나노미터는 1 마이크로미터의 천분의 일, 1밀리미터의 백만분의 일에 해당된다) 이하의 크기를 갖는 입자를 말한다 (Oberdörster 외, 2005).

예를 들어, 사람의 머리카락과 같이 생긴 나노화이버(nanofiber)는 길이가 수 마이크로미터에 해당되나 직경이 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 1 차원의 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?

지금까지 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 두 가지 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.

예를 들면 그림 1에서 보는 바와 같이, 나노입자가 그림 1(a), 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 탄소나노튜브는 서로 상이한

2가지 형상을 가질 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 거미줄 형태의 형상을 지닌, 상대적으로 성긴 나노튜브와 공처럼 치밀한 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( $1g/cm^3$ )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 것이다. 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 살펴보도록 하겠다.

- 부유된 나노입자는 호흡기에 흡입되어 침

착될 수 있다.

- 호흡기를 통해 흡입된 나노입자는 혈관속으로 침투될 수 있고 그리고 다른 기관(뇌)으로 전이될 수 있다 (Oberdörster 외, 2002; Oberdörster 외, 2004).
- 용해도가 낮은 나노입자는 거시입자에 비해 실험실 동물들에 있어 호흡기질환과 폐종양을 일으키는데 있어서 더 강하게 작용한다 (Tran 외, 2000; Oberdörster 외, 1994; Oberdörster 외, 2005).
- 단일벽면 탄소나노튜브는 생쥐 폐에 폐질환을 일으킨다 (Shvedova 외, 2005).
- 화학조성과 분자구조와 나노입자의 표면 특성의 변화는 잠재적 독성에 영향을 줄 수 있다 (Sayes 외, 2004).

위 연구결과 중 호흡기를 통해 흡입된 나노입자가 뇌로 전이될 수 있다는 사실은 상당히 충격적인 결과이다. 이는 거시입자의 경우에는 상상할 수 없었던 연구결과이며 나노입자가 셀을 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, 질

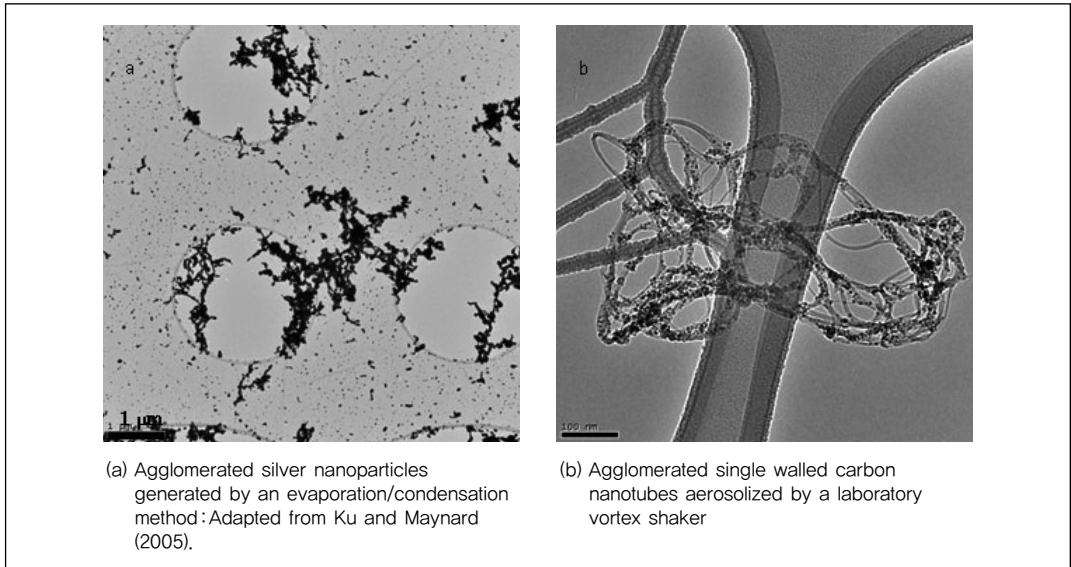


그림1. Different agglomeration states of nanoparticles. They may affect differently its biological activity in the lung.

량, 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 전, 석면의 경우, 밝았던 전철을 밝지 않기 위해서, 사전에 이 물질에 대한 규제를 강화해야 할 것이다.

나노입자의 노출량과 관련하여, 현재까지

규정된 노출허용한계가 존재하지 않고 있기 때문에 현재로서는 나노입자의 허용한계를 기존의 거시입자의 허용한계로 임시적으로 대체 사용하고 있는 실정이다.

현재 미국 연방 노출허용한계(permissible exposure limit: PEL)가 흑연입자에 대해  $5\text{mg}/\text{m}^3$ 이지만, 몇몇 독성학자들은 이 노출허용한계에 한달동안 탄소나노튜브에 노출된 사람은 폐질환을 얻게 될 것으로 예측하였다. 따라서 탄소나노튜브의 노출허용한계가 기존의  $5\text{mg}/\text{m}^3$  보다는 훨씬 작아야 하고, 나노입자의 노출허용한계를 나타내는 척도가 질량농도가 아닌 입자의 수농도나 입자의 표면적이 되어야 한다는 의견이 지배적이다. 그러나, 아직까지 질량이 아닌 다른 척도

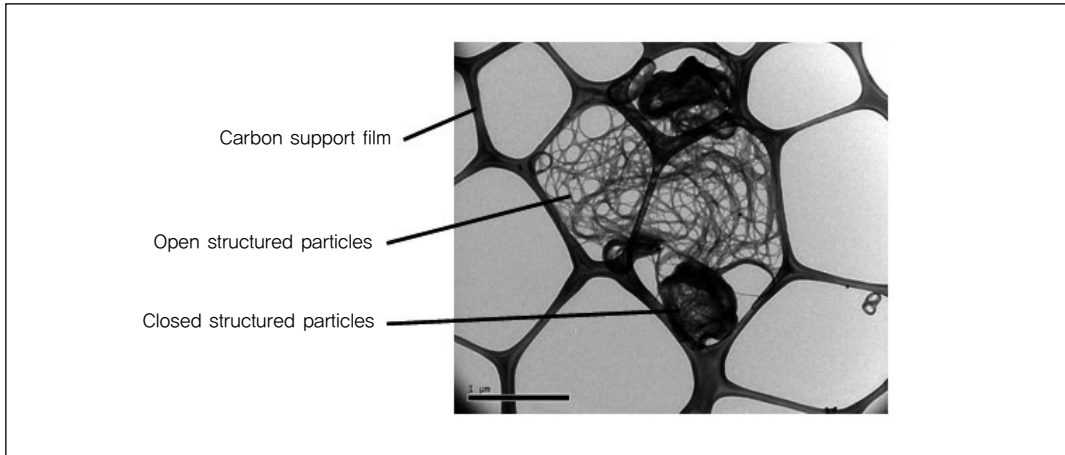


그림2. Transmission Electron Microscope image of purified single walled carbon nanotube (SWCNT) particles aerosolized by spraying. Two different shapes of SWCNTs exist.

로 나노입자의 독성을 뒷바침해 줄 연구결과가 매우 부족한 형편이다. 다행스럽게도, 전세계적으로 나노입자의 유해성에 대한 연구가 활발히 진행중이기 때문에 향후 10년 이내 위에 언급된 질문들 중 상당부분은 답변될 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 결론

지금까지 거시입자와 비교하여 나노입자의 어떠한 성질이 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있을지 현재까지 알려진 제한된 연구결과를 바탕으로 살펴 보았다.

나노입자의 크기, 형상, 응집상태, 표면적, 표면화학특성, 용해도, 나노결정구조가 각각 인체의 유해한 영향을 끼칠 것으로 예측되고 있다. 다음호에서는 이러한 다양한 나노입자의 물성치를 측정하는 방법에 대해 다루고자

한다.

### 감사의 글

본 원고는 National Institute for Occupational Safety and Health grant (Project CAN 9280082) 의 지원을 받아 수행되었다.

### Disclaimer

The mention of any company or product does not constitute an endorsement by the Centers for Disease Control and Prevention. The findings and conclusions in this paper are those of the authors and do not necessarily represent the views of the National Institute for Occupational Safety and Health. 🙏

## 참 고 문 헌

- Ku BK, Maynard AD: Comparing aerosol surface-area measurement of monodisperse ultrafine silver agglomerates using mobility analysis, transmission electron microscopy and diffusion charging. *J. Aerosol Sci.* 2005, 36 1108–24.
- Oberdörster G et al Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy Part. *Fibre Toxicol.* 2005, 2 1–110 (doi:10.1186/1743-8977-2-8)
- Oberdörster G, Ferin J, Lehnert BE: Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. *Environ Health Perspect* 1994, 102(Suppl 5):173–179.
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, et al.: Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 2004, 16: 437–445.
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Lunts A, et al.: Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *J Toxicol Environ Health A* 2002, 65: 1531–1543.
- Roco MC: Environmentally responsible development of nanotechnology. *Environ Sci Technol.* 2005, 39(5):106A–112A
- Sayes C, Fortner J, Guo W, Lyon D, Boyd A, Ausman K, et al.: The Differential Cytotoxicity of Water-Soluble Fullerenes. *American Chemical Society* 2004, 4: 1881–1887.
- Shvedova AA, Kisin ER, Mercer R, Murray AR, Johnson VJ, Potapovich AI, et al.: Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single walled carbon nanotubes in mice. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 2005, 289: L698–L708.
- Tran CL, Buchanan D, Cullen RT, Searl A, Jones AD, Donaldson K: Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence Of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal Toxicol* 2000, 12: 1113–1126