

Stoffenmanager nano 컨트롤 밴딩 도구 이해와 나노물질 합성 및 포장 공정 적용 연구

이나루* · 안정호

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Understanding and Application of Stoffenmanager Nano Tool into Synthesis and Packing Process of Nanomaterials

Naroo Lee* · Jungho Ahn

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted in order to better understand the conceptual model and Stoffenmanager nano module and apply it to the synthesis and packing processes of nanomaterials.

Methods: Site visits were conducted to five nanomaterial production processes. Product and exposure variables were investigated in these workplaces. Hazard banding and exposure classification of the synthesis and packing processes of nanomaterials were conducted using documents and the website of Stoffenmanager Nano.

Results: The five sites featured different products, packing tasks, ventilation and local exhaust, and others. The hazards for nano-nickel and copper were classified as E. The hazards for both fumed silica and indium tin oxide were classified as D. The hazard for spherical silica was classified as C. The exposure classes in the synthesis process of nanomaterials ranged from 2 through 4. The exposure classes in the packing process of nanomaterials ranged from 1 through 4.

Conclusions: Application of Stoffenmanager nano to the synthesis and packing processes of nanomaterials helped to better understand the control level of the work environment and to suggest appropriate actions. The comparison of each process showed the effect of the production process and handling of solids and ventilation on exposure class.

Key words: control banding, nanomaterials, stoffenmanager nano

I. 서 론

나노크기의 물질을 조작하여 새로운 물질, 제품 및 장치를 개발하는 나노기술은 인류에게 장점이 되기도 하지만 인류의 건강을 위협하는 새로운 위험이 될 수 있다(Maynard, 2007). 나노물질이 위험할 수 있고, 안전성이 증명되지 않아 우려가 되지만 나노기

술은 계속 발전하고 있다. 또 작업장에서 나노 물질을 취급하는 작업자들이 늘어나기 때문에 기존에 알고 있는 지식을 동원하여 작업장을 관리할 필요가 있다(Maynard, 2007).

나노물질 노출을 예방하기 위해 컨트롤 밴딩을 이용할 수 있다. 제약회사에서 독성 데이터와 노출 데이터가 완전하지 않은 상태의 잠재적 위험 노출에서

*Corresponding author: Naroo Lee, Tel:042-869-0343, E mail: naroolee@kosha.or.kr
Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency, 339-30 Exporo Yuseong-Gu, Daejeon, 305-380, Republic of Korea

Received: December 5, 2014, Revised: March 20, 2015, Accepted: March 25, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

생길 수 있는 위험을 관리하기 위한 실용적인 도구로 컨트롤 밴딩을 개발하였다. 직업적인 나노 노출에 대한 컨트롤 밴딩 개념을 Maynard(2007) 연구에서 제안하였으며, Paik et al(2008)이 연구실 작업 환경에서 위험 우선순위 선정과 관리를 위해 나노물을 제안하였다. 제조나노물질을 위한 예방적인 매트릭스(Precautionary matrix for synthetic nanomaterials)는 스위스에서 개발되었으며(Hock et al., 2008), 기업에서 '나노에 특징적인 조치'가 필요한지 결정하기 위해 사용된다. 프랑스에서도 ANSES 나노물질 컨트롤 밴딩 도구를 개발하였다(Riediker et al., 2012). 네덜란드에서는 Stoffenmanager nano를, 덴마크에서는 NanoSafer라는 컨트롤 밴딩 도구를 개발하였다. ANSES와 Stoffenmanager nano는 모두 Schneider et al.(2011)의 개념적 모형을 사용하고 있으나 ANSES는 사용자를 화학물질 위험 관리에서 충분히 훈련된 사람으로, Stoffenmanager nano는 사용자를 비전문가를 대상으로 한다는 점이 다르다. NanoSafer는 반정량적인 방법으로 위험을 평가하기 위해 개발되었으므로 많은 데이터와 작업환경 상태에 대한 정보를 요구한다.

Brouwer (2012)는 여러 나노 컨트롤 밴딩의 적용 범위, 대상, 위험성 및 노출 등급 분류에 대해 비교한 결과, 위험성을 분류하는 기준과 나노물질에 대한 정의, 사용 변수들이 조금씩 다르다고 보고하였다. 노출 등급을 평가하기 위한 변수들 중에는 공통적으로 사용되는 것도 있었고, 각 컨트롤 밴딩 도구에서만 사용되는 것도 있었다. 이런 여러 가지 나노물질 컨트롤 밴딩 도구들이 개발된 것은 나노물질의 위험성에 대한 독성학적 정보가 완전하지 않고, 노출에 영향을 주는 요인들이 명확히 규명되지 않은 점 때문일 수 있다.

그럼에도 불구하고 나노 컨트롤 밴딩 도구는 현재의 과학적 수준에서 나노물질을 취급하는 작업장 관리에 실용적으로 사용될 수 있을 것이다. 국내에서 개발된 나노 컨트롤 밴딩 도구는 없다. 현재까지 개발된 나노 컨트롤 밴딩 도구를 이용하여 국내 사업장에 적용하여 유용성을 확인하고자 본 연구를 실시하였다. 여러 가지 나노물질 컨트롤 밴딩 도구 중 사용의 편이성과 응용할 수 있는 대상을 고려하여 Stoffenmanager nano를 선정하여 국내 사업장에 적용

하였다. Stoffenmanager nano는 웹사이트에서 위험성 평가를 사용할 수 있다는 사용의 편이성과 노출 평가에서 물질의 본질적인 위험성, 공기 중으로 전달되는 과정, 수용체까지 모든 과정을 평가하기 때문에 현재의 작업환경관리 상황을 노출 평가에 반영할 수 있고, 개선 후 변화에 따른 상황을 유추해 볼 수 있는 장점이 있다.

II. 연구대상

흡드실리카 제조 공정, 구상실리카 제조 공정, 나노 구리 및 제조 공정, 인듐주석산화물 제조 공정 2개소에 대해 2012년~2013년 동안 현장 조사가 이루어졌다.

1. 흡드 실리카 제조 공정

나노 실리카는 화장품, 약, 프린터 토너, 바니쉬 등에 사용되며 흡드 실리카(Fumed or pyrogenic silica), 콜로이드 실리카 등 다양한 물질로 제조된다. 그 중 흡드 실리카는 사염화실리온 증기에 1000 °C의 수소 불꽃을 주입하면 실리카 입자가 형성되어 여과판에 포집되는 방식으로 만들어지며, 무정형(Amorphous) 실리카이다. 흡드 실리카는 대개 낮은 겉보기밀도와 높은 표면적(200 ~ 300 m²/g)을 가진다. 한 사업장에서 여러 종류의 제품이 생산된다. 흡드 실리카의 기본 입자 크기가 대개 7 ~ 20 nm이며 생산 즉시 응집(Aggregated)되고 집합(Agglomerated)된다고 알려져 있다.

흡드 실리카는 합성 공정과 제품 포장 공정이 분리되어 있으며 흡드 실리카가 합성된 후 배관을 통해 포장 공정으로 이송된다. 포장공정은 24시간 동안 이루어지며, 3교대 작업을 한다. 작업공간에는 총 8대의 포장기계가 있었으나 조사 당시에는 5대의 포장기계만 가동되고 있었다. 작업자 4명이 2대의 포장기계를 운영하고 있었고, 1대의 대용량 포장기계에서는 계속해서 흡드 실리카가 포장지 안으로 들어가고 있었다. 포장기계를 운영하는 작업자는 포장기계에 포대를 갖다 놓고, 제품이 차면 포대의 윗부분을 묶어 콘베이어 벨트에 놓는 작업을 하였다. 지게차 운전자는 제품이 담긴 팔레트를 이동시키는 작업을 하였다.

2. 구상 실리카 제조 공정

구상 실리카는 Sol-gel 방식으로 만들어진다. 압모니아, 증류수 및 유기용매 등으로 이루어진 용액을 반응기 내에 투입하여 콜로이드 실리카 슬러리를 제조한 후 콜로이드 실리카 슬러리를 감압 증류시킨다.

실리카 슬러리 감압 증류는 자동으로 밀폐된 공간에서 이루어지며 제품을 포장하는 공정은 원료가 포대에 자동으로 이송되게 한 후, 작업자가 포대를 밀봉하는 작업을 한다. 구상 실리카 제조 및 포장 공정은 조사 당시 간헐적으로 가동되고 있었다.

3. 나노 구리 및 니켈 제조 공정

전기와이어 폭발법을 사용하여 나노 금속을 제조한다. 전기와이어 폭발법은 공기 중에서 고전압, 대전류 펄스를 사용하여 얇은 금속와이어를 가열하는 것이다. 오믹(Ohmic) 가열에 의해 충분한 에너지가 축적되면 와이어의 증기화와 이온화가 일어난다. 이 방법으로 100 nm 이하 직경을 가진 여러 종류의 금속 파우더를 만든다. 한 가지 종류의 금속와이어를 이용해 제품을 만들기도 하고, 두 가지를 혼합하여 제품을 만들기도 한다. 제품을 생산하는 장비는 모두 밀폐되어 있고, 금속 와이어 장착 및 나노파우더가 모아진 후 병을 꺼내는 작업 등 일부 작업 동안에만 문을 연다. 모아진 나노파우더를 포장용 용기에 담은 작업은 흡후드 내부에서 이루어졌다.

4. 인듐주석산화물 세라믹 제조 공정

인듐주석산화물 세라믹은 인듐산화물에 주석산화물 약간을 첨가하여 만드는데 주석산화물을 첨가하면 인듐산화물의 결정격자가 변화하여 전기 전도가 증가한다. 인듐주석산화물 세라믹 제조 공정에 사용되는 인듐 및 주석 산화물 입자의 크기는 20 ~ 30 nm이다. 인듐산화물과 주석산화물을 혼합하여 세라믹 볼을 이용한 기계적 연마로 나노 파우더를 만들고 건조기에서 수분을 완전히 제거한 후 전동 체로 입자를 걸러낸다. 전동 체에서 걸러진 인듐주석산화물 파우더를 포장용 용기에 담는다. 인듐주석 산화물 파우더가 같은 사업장 내 다른 공간으로 이동되어 성형, 소결 및 연마된다.

두 개의 사업장을 대상으로 인듐주석산화물 세라믹 제조 공정을 조사하였다. 2 곳의 사업장의 최종

생산 제품은 동일하였으나 설비 규모 및 중간 생산 방식이 달랐다. 가장 큰 차이점은 한 곳은 자연환기를 이용한 전체 환기를 한 반면, 다른 한 곳은 클린룸을 유지하여 기류가 천정에서 바닥으로 수직으로 이동하였다.

III. 연구방법

1. Stoffenmanager nano 도구의 개념적 모형과 내용

Schneider et al.(2011)은 제조나노물질의 흡입 노출을 평가하기 위한 개념적 모형을 제안했다. 이 개념적 모형은 Tielemans et al.(2008)의 일반적인 물질의 흡입 노출을 평가하기 위한 개념적 모형을 제조나노물질의 노출에 적용할 수 있는지 과학적 근거들을 검토하고, 제조나노물질의 노출에 적용할 수 있도록 공정 등을 고려하여 일부를 변형하였고, 자세한 내용은 아래와 같다.

1) Schneider et al.의 개념적 모형

제조나노물질의 흡입 노출을 평가하기 위한 개념적 모형은 오염물질이 발생원에서 발생하여 수용체(작업자 호흡기)에 전달되기까지 전 과정을 단계별로 설명한다. Schneider et al.(2011)은 특히 일반적인 물질과 나노물질의 차이와 유사한 점을 개념적 모형으로 설명하였다. 개념적 모형에서는 발생원, 수용체, 전달 공간을 주요 변수로 산정한다. 전달 공간은 네 개로 이루어지며, 첫 번째는 발생원 주위의 '국소 환기가 영향을 미치는 지역'이다. 두 번째는 근거리(Near field) 공간과 원거리(Far field) 공간인데 근거리 공간은 작업자의 머리에서 사방 1 m 이내를 말하며, 원거리 공간은 나머지 공간을 말한다. 세 번째는 발생원과 개인 밀폐이다. 네 번째는 표면 부분인데 오염물질이 퇴적하거나 흡착되는 작업대, 벽, 옷 등의 표면이다.

개념적 모형에서 각 공간을 수리적 개념으로 설명하기 위해 9개의 변경 요인(Modifying Factor, MF)을 사용한다.

첫 번째 변경요인은 물질 방출 가능성이다. 액체의 분산에서는 용질의 농도, 분산된 입자의 직경, 점도가 중요하고, 파우더 분산에서는 물질의 분진날림(Dustiness)이 결정적이다. 대부분의 나노파우더는 가

장 높은 분진날림 두 등급 중 하나에 속할 것이다.

두 번째 변경요인은 활동 방출 가능성이며, 에너지 수준, 스케일(생산품 양), 생산품이 공기와 접하는 점 접(차단 수준)에 따라 활동 방출 가능성이 달라진다. 에너지 수준과 형태는 원동력, 중력 혹은 충격력, 마찰력, 압력 강하, 분산 정도, 열 등이 결정한다. 나노물질 생산과 관련된 활동 영역은 생산 과정의 순간적인 방출이 일어나는 경우, 많은 양의 나노물질을 취급하거나 이동시키는 경우, 나노 스프레이 용액을 분산시키는 경우, 나노 최종 제품에 기계로 가공하는 경우로 나눌 수 있으며, 활동 영역에 따라 활동방출 가능성을 결정하는 요인은 다르다.

생산 과정의 순간적인 방출이 일어나는 경우와 많은 양의 나노물질을 취급하거나 이동시키는 경우는 원동력, 중력, 충격력이 관련이 있는데 이러한 힘들이 나노물질에 대해서 다르게 작용한다. 표면적이 매우 높은 흠드 실리카는 솜털 같아서 약한 힘에도 분진이 발생하며 카본나노튜브 역시 마찬가지로 약한 힘에도 분진이 발생한다. 이러한 특성은 분진날림에서 어느 정도까지 반영된다.

나노 최종 제품을 기계로 가공하는 경우에는 마찰력이 중요한데 마찰력에 의해 나노제품에서 기본입자 혹은 응집체들이 유리되는지 아닌지는 아직까지 일반화시킬 수 없다. 압력차/스프레이를 사용하여 고의적으로 에어로졸을 만드는 손 스프레이 병이나 압력 캔을 사용하는 나노필름 생산시 100 nm이하의 입자가 생성된다. 열은 노출에 영향을 주는데 화학증착법으로 카본나노튜브를 만들 때 온도를 올리면 입자수가 증가하고, 입자는 작아지면서, 입자 크기 분포는 좁아진다.

세 번째 변경요인은 국소 환기이다. 국소 환기는 일반적인 물질만큼 나노물질 노출을 감소시키는 데 효과적이라고 가정한다. 국소 환기 시스템의 효율은 밀폐의 정도, 후드 디자인, 기류, 오염 물질 특성, 작업자 활동에 따라 달라진다. 직경 200 - 300 nm 입자들은 가장 낮은 확산과 관성 특성 때문에 쉽게 공기와 함께 쉽게 움직여 환기 시스템에 잘 포집된다.

네 번째와 다섯 번째 변경요인은 발생원의 격리와 작업자의 분리이다. 작업자 환경에서 발생원을 격리시킬 때 부분적인 격리는 효율이 낮다, 밀폐된 방을 만들어 작업자를 발생원과 분리시키는 것은 효과적

이다. 격리의 효과는 일반적인 입자와 나노 입자가 유사하다고 가정한다.

여섯 번째 변경요인은 분산이다. 개념적 모형에서는 근거리 공간과 원거리 공간이 완전히 혼합된다고 가정한다.

일곱 번째 변경요인은 개인 행동이다. 개인의 호흡기가 발생원에 노출 될 행동을 하는지 여부이다.

여덟 번째 변경요인은 표면 오염이다. 표면 오염은 침착과 재 비산이 관련이 된다. 표면침착이 공기 중 농도를 감소시키는 과정에서 전하를 띠지 않는 100 nm 이하와 1000 nm 이상의 입자는 표면에 침착될 수 있다. 전하를 띠는 나노 입자는 전기장에서 더 큰 이동 속도를 가지기 때문에 전기장을 형성하는 표면에 잘 침착된다. 재분산에 대한 증거는 부족하지만 사람이 실내에서 걸어나거나 활동하면 약 1 μm의 입자는 재 분산한다.

아홉 번째 변경요인은 개인보호구이다. 개인보호구는 Tielemans et al.(2008)이 언급하지 않은 변경요인이다. HEPA나 ULPA 타입의 여과지는 나노입자에 대해 전기적으로 활성화된 여과지보다 효과가 있었다. 아직 나노입자가 개인보호구에 대해 일반적인 입자와 다른 보호 계수를 갖는지 명확하지 않지만, 나노입자가 응집 등으로 인해 200 ~ 400 nm의 입자를 형성하기 때문에 추가적인 연구의 필요성은 있다.

2) Stoffenmanager nano version 1.0 내용

(1) 위험군 분류

Stoffenmanager는 위험군 분류에서 원래 R 혹은 H구를 사용하였으나 제조나노물질은 일반적으로 독성학 자료가 부족하여 다른 방법을 사용하였다. Stoffenmanager nano 도구에서는 제조나노물질의 위험군을 분류하기 위해 단계적 접근 방법을 사용한다(Duuren-Stuurman et al., 2012)

첫 번째 위험군 분류 기준은 물 용해도이다. 일반적으로 생체지속성(Biopersistence)은 물 용해도가 낮은 물질에서 일어나기 때문에 이 도구 적용은 나노물질이 물에 용해되지 않는 경우를 대상으로 한다.

두 번째 위험군 분류 기준은 생체 지속적인 섬유를 구별하는 것이다. 길이가 5 μm 이상이면서 물질의 다른 두 면 중 한 쪽이 나노 크기일 때 나노 섬유로 정의하고, 이 경우 가장 높은 등급(E) 위험군에 할당

한다.

세 번째 위험군 분류 기준은 제조나노물질의 특정한 위험에 근거하여 분류하는 것이다. 정보가 있다면 위험군 A에서 E까지 분류하는 것이 가능하다. 그러나 현재는 이 기준에 근거하여 대부분의 제조나노물질에 대한 분류를 하는 것은 가능하지 않다.

네 번째 위험군 분류 기준은 불충분한 독성 자료에 근거하되 기존의 연구 결과를 참고하여 분류하는 것이다. 모재 물질의 독성, 결정성, 크기 등을 근거로 하여 나노물질에 대한 위험군을 논문에서 제시하고 하고 있다. 나노 크기의 납, 결정형 실리카, 안티몬 산화물, 코발트 산화물은 위험 등급 E에 속하고, 폴러렌은 위험 등급 D, 나머지는 50 nm를 기준으로 작은 것은 위험 등급 D, 큰 것은 위험 등급 C에 속한다.

(2) 노출군 분류

노출 모형은 Schnieder et al.(2011)의 발생원-수용체 접근을 따르고, 노출 군을 계산하기 위한 상대적 노출 점수는 Stoffenmanager에서 사용하던 노출 알고리즘을 사용하였다. 점수에 따라 노출 밴드를 1, 2, 3, 4 군으로 나뉜다. 노출 알고리즘을 이용해 개인 노출에 대해 두 가지 관점으로 우선 순위를 매길 수 있다. 첫째 사건에 근거한 노출의 위험 우선 순위를 매길 수 있고, 둘째, 노출 강도, 시간, 빈도에 가중치를 주어 주 40시간 일하는 작업을 기준으로 위험 우선 순위를 매길 수 있다.

노출 알고리즘에서 들어가는 변수들을 본질적인 물질 노출 가능성(발생원), 전달부분, 수용체 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 본질적인 물질 노출 가능성에서는 제품의 중량비가 변수로 들어가는데 중량비는 방출 가능성과 직선적인 관계가 있다고 본다. 파우더 형태의 물질을 다룰 때 본질적인 방출 가능성의 주요한 변수는 분진날림이다. 제품의 수분함량도 고체의 중요한 본질적인 변수이다. 액체에 분산된 제조나노물질은 물의 희석배수, 액체의 점도가 중요한 변수가 된다.

노출의 특징에 따라 크게 4 가지 발생원 영역으로 나누는데 취급(활동 방출가능성)이 가장 크게 영향을 준다. 취급은 주로 물질과 활동 방출가능성의 혼합으로 결정된다. 발생원 영역 '합성 과정에서 기본 입자 방출'은 주로(밀폐) 공정을 관리하는 작업과 관련이

있다. 생산 공정에서 틈새를 통해 의도치 않게 입자들이 방출될 수 있다. 노출 자료는 없지만 예방적인 원칙을 적용하여 보수적으로 상대적 계수가 제안되었다. 발생원 영역 '많은 양의 제조나노물질 취급과 이동'과 '제조나노물질을 가진 중간물질 혹은 제품의 분산'은 나노입자가 응집/집합되어 있기 때문에 본래의 Stoffenmanager에서 사용한 고체와 액체의 취급과 매우 유사하다. 발생원 영역 '제조나노물질이 포함된 최종 제품의 마찰과 관련된 활동'은 원래의 SStoffenmanager를 사용해야 한다.

전달부분에서는 국소환기, 격리, 희석(분산), 개인 행동, 분리(사람 밀폐), 표면 오염과 같은 변수들이 있다. '설치된 국소 환기는 나노입자 등 노출을 감소시키는데 효과적이다'라는 가정을 포함하고 있다. 국소 환기 중 나노 Stoffenmanager에 새롭게 들어온 변수는 글러브 박스와 글러브 백이다. 발생원 격리는 물질 장벽을 쳐서 개인 흡입 노출을 감소시키는 것이다. 희석(분산)은 공간 전체에 대한 자연적 혹은 기계적 환기를 말한다. 환기효율은 공간 부피와 환기 종류에 따라 달라진다. 개인행동은 발생원 위치와 작업자와의 관계 등을 말한다.

수용체 부분에서는 분리(사람 밀폐)와 개인보호장비가 변수로써 작업자를 발생원으로부터 분리시키고 개인보호장비를 착용함으로써 줄일 수 있다. 분리(사람 밀폐)는 독립적인 청정공기 공급 시스템을 가진 분리된 컨트롤 룸이나 환기시스템이 없는 별도의 공간 같은 것을 말하며, 개인보호장비는 마스크 종류와 여과지 종류에 따라서 달라진다.

그리고, 본질적인 물질 노출 이외에 배경 방출을 고려할 수 있는데 표면에 퇴적된 오염물질이 자연적 혹은 인위적 활동에 의해 다시 공간 중으로 발산 되는 것을 말하며 청소와 장비에 대한 정기적 점검에 의해 제거된다.

IV. 연구결과

1. 제조나노물질의 위험성(Hazard) 평가

흙드 실리카 및 구형 실리카의 위험성은 Duuren-Stuurman et al.(2012)에서 제시하고 있다. 무정형실리카의 경우 기본입자 크기가 50 nm 보다 작으면 위험성 D등급, 기본입자 크기가 50 nm 보다 크면 위험성

C등급이다. 니켈과 구리는 기타물질에 속하는데 기타 물질은 모재의 위험성에 따라 분류된다. 니켈 금속은 동물발암성물질이지만 호흡성 감각물질이기 때문에 위험성 등급 E로 분류된다. 인듐산화물은 Duuren-Stuurman et al.(2012)에서 제시하는 목록에 없지만 주석산화물은 제시되고 있다. 제조하고 있는 주석산화물의 기본입자크기가 50 nm이하이기 때문에 위험성 등급 D에 속한다. 각 공정에서 사용한 제조나노물질의 위험성 평가 결과는 Table 1에 제시되었다.

2. 제조나노물질 합성 공정 노출 등급 평가

제조나노물질 합성 공정의 노출 등급 평가에는 기본입자 크기, 생산 공정 종류, 작업시간, 작업빈도, 호흡기영역 작업 유무, 청소 및 유지 관리 빈도, 작업장 체적, 전체환기, 국소 환기의 변수가 사용되었다(Table 2). 나노물질 합성 공정 노출 등급 평가에서는 흄드 실리카 공정이 노출 등급 4로 가장 높았고,

인듐주석산화물 공정 2개는 노출 등급 3, 구형 실리카 공정 및 니켈 및 구리 공정은 노출 등급 2로 나타났다. 생산공정 종류 중 열분해는 Stoffenmanager nano에서 가장 높은 노출 점수를 가진다. 상대적 값이지만 열분해는 노출 점수는 10이고, 기계연마는 3, 화학증기응축법은 1이다. 대체적으로 합성 설비에는 국소 환기 시설이 없는 경우가 많았다. 인듐주석산화물 A와 B 공정은 전체환기 유무가 크게 달랐지만 노출 등급은 3으로 동일하게 나타났다.

3. 제조나노물질 포장 공정 노출 등급 평가

파우더 나노 제품을 포장하는 공정의 노출 등급 평가에는 기본입자 크기, 분진날림, 수분함량, 나노물질 함량, 고체 취급 방법, 작업시간, 작업빈도, 호흡기영역 작업 유무, 청소 및 유지 관리 빈도, 작업장 체적, 전체환기, 국소 환기의 변수가 사용되었다(Table 3). 개인호흡보호구 착용 등이 포함 될 수 있

Table 1. Hazard banding of nanomaterials using Stoffenmanager nano

Type of nanomaterials	Size of primary particle	Hazard class
Fumed silica	≤ 50 nm, amorphorous	D
Spherical silica	≥ 50 nm, amorphorous	C
Nickel and copper	≤ 50 nm	E
Indium tin oxide	≤ 50 nm	D

Table 2. Exposure banding using Stoffenmanager nano in synthesis process of nanomaterials

Product	Fumed silica	Spherical silica	Nickel/Copper	Indium tin oxide_A	Indium tin oxide_B
Primary particle size	Below 50 nm	Over 50 nm	Below 50 nm	Below 50 nm	Below 50 nm
Production process	Flame pyrolysis	Wet chemistry (Synthesis within solution)	Electrical explosion (Chemical vapor condensation)	Mechanical reduction(machining)	Mechanical reduction(machining)
Work duration	Over 4 hours/day	2 ~ 4 hours/day	Over 4 hours/day	Over 4 hours/day	Over 4 hours/day
Work frequency	Over 4 days/week	2 ~ 3 days/week	Over 4 days/week	Over 4 days/week	Over 4 days/week
Worker	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure
Cleaning and maintenance	Every day/month	Every day/month	Every day/month	Every day/month	Every day/month
Workplace volume	100 ~ 1000 m ³	100 ~ 1000 m ³	100 ~ 1000 m ³	100 ~ 1000 m ³	100 ~ 1000 m ³
General ventilation	No	No	No	No	Spray booth (Clean room)
Local exhaust ventilation	No	No	Containment of the source with local exhaust system	No	No
Exposure class	4	2	2	3	3

Table 3. Exposure banding using Stoffenmanager nano in packing process of nanomaterials

Product	Fumed silica	Spherical silica	Nickel/Copper	Indium tin oxide_A	Indium tin oxide_B
Primary particle size	Below 50 nm	Over 50 nm	Below 50 nm	Below 50 nm	Below 50 nm
Dustiness	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
Content of moisture (%)	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%
Nanomaterial weight fraction	55 ~ 99 %	55 ~ 99 %	55 ~ 99 %	55 ~ 99 %	55 ~ 99 %
Handling of solids	Handling of products where due to high pressure, speed, or force large quantities of dust are generated and dispersed	Handling of products where due to medium speed, or force which leads to some dispersion of dust	Handling of products where due to low speed or little force or in medium quantities (several kilograms)	Handling of products where due to high pressure, speed, or force large quantities of dust are generated and dispersed	Handling of products where due to high pressure, speed, or force large quantities of dust are generated and dispersed
Work duration	Over 4 hours/day	2 ~ 4 hours/day	Over 4 hours/day	Over 4 hours/day	Over 4 hours/day
Work frequency	Over 4 days/week	2 ~ 3 days/week	Over 4 days/week	Over 4 days/week	Over 4 days/week
Worker	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure	Breathing zone exposure
Cleaning and maintenance	Every day/month	Every day/month	Every day/month	Every day/month	Every day/month
Workplace volume	> 1000 m ³	< 100 m ³	100 ~ 1000 m ³	100 ~ 1000 m ³	100 ~ 1000 m ³
General ventilation	No	No	No	No	Spray booth (Clean room)
Local exhaust ventilation	Yes	No	Yes (Fume hood)	No*	No
Exposure class	4	4	1	4	3

*Only one local between two exhaust was installed)

Table 4. Priority bands¹⁾ using Stoffenmanager nano in workplaces handling nanomaterials

Exposure band ³⁾	Hazard band ²⁾				
	A	B	C	D	E
1	III	III	III	II	I
					Packing of nickel and copper
2	III	III	II	II	I
			Synthesis of spherical silica		Synthesis of nickel and copper
3	III	II	II	I	I
				Packing of Indium tin oxide_A Synthesis of Indium tin oxide_A Synthesis of Indium tin oxide_A	
4 (Highest exposure)	II	I	I	I	I
			Packing of spherical silica	Synthesis of fumed silica Packing of fumed silica Packing of Indium tin oxide_A	

¹⁾ Priority band : I means the highest priority and III means the lowest priority

²⁾ Hazard : A means the lowest band, and E means the highest hazard

³⁾ Exposure : 1 means the lowest exposure, and 4 means the highest exposure

으나 조사 대상 작업자들이 개인호흡보호구를 작업 시간동안 제대로 착용하고 있지 않았기 때문에 개인 호흡보호구는 착용하지 않은 것으로 하였다. 파우더 나노 제품을 포장하는 공정의 노출 등급 평가에서 흙드 실리카 포장 공정, 구형 실리카 포장 공정, 인듐주석산화물 포장 공정 A가 노출 등급 4, 인듐주석산화물 포장 공정 B가 노출 등급 3, 니켈 및 구리 포장 공정이 노출 등급 1로 나타났다. 고체취급 방법은 방법에 따라 노출 점수가 크게 달라진다. 고압, 고속력, 큰 힘이 사용되는 가장 높은 등급의 고체 취급은 노출 점수 100을 가지고, 수 킬로그램을 낮은 속도로 취급하는 고체 취급은 노출 점수 1을 가진다. 인듐주석산화물 포장 공정 A와 B는 다른 조건이 동일함에도 불구하고 전체환기 유무에 따라 노출 등급이 달라졌다. 전체환기가 없는 경우에는 노출 등급이 4였으나 전체 환기가 있는 경우에는 노출등급이 3으로 한 단계 낮아졌다.

4. 제조나노물질 위해도 평가

제조나노물질의 위험성 평가 결과와 노출 등급에 따라 각 작업의 위해도가 결정되었다(Table 4). 구형 실리카 합성공정은 위험성 평가 C와 노출 등급 2를 받아 위해도 평가 II를 받았고, 나머지 작업들은 위험성평가가 C, D 혹은 E이고, 노출 등급은 1, 2, 3, 4로 다양했으나 위해도 평가 I로 개선의 필요성이 있었다. 특히 니켈/구리 합성 공정과 포장 공정은 노출 등급은 1 혹은 2로 매우 낮았으나 제조나노물질의 위험성 평가가 E로 나타나 위해도 평가가 I로 나왔다.

V. 고 찰

Stoffenmanager nano 컨트롤 밴딩의 각 변수들은 나노물질 취급 작업장에서 관리해야할 요인들을 제시해 주는 역할을 한다. 나노물질의 노출기준이 제시되어 있지 않고, 노출 방법이 명확하지 않은 상황에서 작업장에서 노출에 영향을 주는 요인들을 관리하는 것은 매우 의미 있고 중요한 일이다. 이 도구를 작업장에 적용하면 각 작업장의 환경 관리 수준을 파악할 수 있다. 특히 작업장을 개선할 때 작업방법 및 작업장의 환경 요인을 변화시켜 개선 후 효과를

예측해 볼 수도 있다.

다만 나노물질의 위험성이 명확하게 밝혀지지 않은 상황에서 나노물질의 위험성이 과대 평가될 수 있다. 작업환경개선 효과를 Stoffenmanager nano에서 평가해 보기 위해 인듐주석산화물 A와 인듐주석산화물 B 포장 공정 노출 등급 평가를 비교해 볼 필요가 있다. 인듐주석산화물 B 공정은 클린 룸 내부에 설치되어 있고 그 효과가 매우 높았음에도 노출 등급 3이다. 이는 전체환기 등이 설치되어 있더라도 작업방법이 적정하지 않다면 노출 등급이 높게 나타난다는 것을 의미한다.

VI. 결 론

본 연구는 나노 컨트롤 밴딩 도구인 Stoffenmanager nano의 이론적 근거를 이해하고 작업장에 적용하여 나노물질의 작업환경 관리에서 컨트롤 밴딩 도구의 효용성을 알아보기 위해 수행되었다. 제조나노물질의 개별적인 독성학적 자료가 부족하여 위험성에 대한 판단은 크기, 결정성 및 모재의 독성 등 제한적인 근거에 바탕을 두고 이루어졌다. 나노물질 합성 공정의 노출 등급은 작업 공정에 영향을 많이 받았다. 실제 작업현장에서는 클린룸 등의 전체 환기 및 밀폐된 국소 환기 등이 노출을 감소시키는데 중요한 역할을 하지만, Stoffenmanager nano의 노출 등급 평가에서는 이러한 요인들에 의해 노출 등급이 낮아지는 않았다. 노출 점수에서 작업 공정이 미치는 영향을 상쇄할 만큼 전체 환기 및 국소 환기의 점수가 크지 않은 것 같다. 나노물질 포장 공정의 노출 등급 역시 파우더를 취급하는 방법, 즉 취급하는 양과 투입되는 에너지의 영향을 많이 받았다. 그러나 파우더를 취급하는 방법이 같은 경우에는 전체 환기 유무에 따라 노출 등급이 달라졌다. 똑같은 조건에서 전체 환기가 있는 경우 노출 등급이 낮아졌다.

Stoffenmanager nano는 노출에 영향을 미치는 요인들이 매우 구조화되어 정리되어 있다. 현재의 과학수준에서 나노입자가 비산되는데 영향을 주는 요인들이 컨트롤 밴딩 도구에서 잘 정리되어 있어 이를 작업환경관리에 유용하게 이용할 수 있다. 앞으로 실증적인 데이터를 바탕으로 더 개발되어야 하겠지만 현재의 작업환경 수준 평가, 개선 방향, 개선 효과를

검증하는데 나노 컨트롤 밴딩 도구가 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

References

- Brouwer DH. Control banding approaches for nanomaterials *Ann. Occup. Hyg.* 2012;56(5):506-514
- Duuren-Stuurman B, Vink SR, Verbist KJM, Heussen HGA, Brouwer DH, Kroese DED, Niftrik MFJ, Tielemans E, Fransman W. Stoffenmanager nano version 1.0 : A web-based tool for risk prioritization of airborne manufactured nano objects *Ann. Occup. Hyg.* 2012;56(5):525-541
- Höck J, Hofmann H, Krug H et al. : Precautionary matrix for synthetic nanomaterials. Bern, Switzerland: Federal office for public health and federal office for the environment. 2008
- Maynard AD. Nanotechnology: The next big thing or much do about nothing? *Ann. Occup. Hyg.* 2007;51(1):1-12
- Paik SY, Zalk DM, Swuste P. Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposure *Ann. Occup. Hyg.* 2008;52:419-428
- Riediker M, Ostiguy C, Triolet J, Troisfontaine P, Vernez D, Bourdel G, Thieriet N, Cadene A. : Development of a control banding tool for nanomaterials *J Nano Mat* 2012; Article ID 879671
- Schneider T, Brouwer DH, Koponen IK, Jensen KA, Fransman W, Duuren-Stuurman B, Tongeren M, Tielemans Conceptual model for assessment of inhalation exposure to manufactured nanoparticles *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2011;21:450-463
- Tielemans E, Schneider T, Goesde H, Tischer M, Warren N, Kromhout H : Conceptual model for assessment of inhalation exposure: Defining modifying factors. *Ann. Occup. Hyg* 2008;52:576-586