



Characterization and Control of Airborne Particles Emitted During Production of Epoxy/Carbon Nanotube Nanocomposites

(에폭시/카본나노튜브 나노복합물 생산 중 방출되는 입자의 특성 및 관리)

출 처 *J. Occup Environ Hyg.* 8: 86-92, 2011

저 자 Lorenzo G. Cena and Thomas M. Peters

이 논문은 나노물질을 다룰 때 발생하는 나노입자에 대한 특성과 관리방안 중 하나인 환기시설의 효과에 대하여 연구한 논문이다.

나노관련 연구는 아직 명확한 건강상 영향이 체계적으로 기술되어 있지는 않지만 산업보건에서는 새로운 분야이고 많은 연구가 이루어지지 않았기에 향후 우리나라도 연구가 필요할 것으로 판단되어 소개하고자 한다.

연구 배경

카본나노튜브(CNT)는 중합체에 섞어 나노복합물을 생산하는데 사용되며 인장 강도가 증대되고 전기적 특성과 열적 특성이 변하고 틈이 생기는 것을 방지하는 역할을 한

다. 이런 성질을 이용하여 스포츠 물품, 자동차, 전자, 각종 상업적 생산품 등에 사용된다.

CNT에 직업적으로 노출되면 각종 폐질환(암, 폐섬유증, 저항력 저하), 심장 및 피부질환 등이 발생한다. CNT 복합물질의 생산은 에폭시 레진에 CNT를 가하여 만드는데, CNT 무게를 재거나 쏟아 붓는 작업 중 노출은 실험실과 현장에서 측정된 결과 매우 소량($<53 \text{ g/m}^3$)으로 관찰되었다.

관리적 측면에서는 흡 후드를 이용해 발생하는 나노입자의 포집 효율을 연구한 경우가 있는데, 후드의 설계 및 후드 조건(새시의 높이와 면속도) 등이 관련 있음을 발표하였다. 그러나 아직 CNT를 함유한 나노복합물질을 관리하는 장치의 효율을 검증한 연구는 없다.

이 연구의 목적은 CNT 원료와 CNT 함유 나노복합물을 가공하거나 CNT 함유 복합물을 사포하는 동안 발생하는 입자상물질을 국소배기장치로 관리할 때의 효과를 검증하기 위하여 시도되었다.

연구 방법

테스트용 시료는 직경 10~50 nm, 길이 1~20 μ m의 다중벽 CNT로 에폭시와 섞어 만든 직사각형의 막대기로, 수 시간 동안 오븐에서 경화시킨 후 수작업으로 사포질하여 원하는 규격을 생산하였다.

공기 중 입자상물질의 수와 호흡성 분진의 농도는 응축입자계수기(condensation particle counter, CPC), 광학입자계수기(Optical Particle Counter, OPC)를 이용하였으며 호흡성분진의 중량농도는 계산식을 이용하여 OPC 자료에서 추정하였다.

대표적인 입자 모양은 투과전자현미경(TEM)에 사용되는 구리 그리드를 25 nm 분진 포집용 필터의 중앙에 부착하고 개인 시료 포집용 펌프로 11 pm 유속으로 분진을 포집한 후 TEM으로 관찰하였다.

공기 중 농도는 CNT의 중량을 재는 칭량 공정과 연삭 공정에서 측정하였다.

칭량 공정은 2개의 50 mL 비이커를 이용해 한 비이커에서 다른 쪽으로 초당 1 스푼

의 속도로 떠내어 5분 간격으로 3번 작업에 총 600 mg을 옮기는 것으로 설정하였으며 이 실험은 글러브 상자 안에서 수행하였다.

CPC와 OPC는 이 상자 내부에, 해당 작업에서 7.5 cm 떨어진 곳에 포집기의 유입구가 위치하도록 하고 포집하였으며, 1개의 TEM 시료를 전 작업 시간에 걸쳐 포집하였다. 다른 1개의 TEM 시료는 TEM 그리드에 인공적으로 CNT를 떨어뜨려 준비하였다.

연삭 공정은 중량으로 2% CNT가 함유된 에폭시 막대를 220 규격의 샌드페이퍼를 이용하여 수작업으로 사포질하였다. 입자상물질은 13~30분 동안 사포작업과 근로자의 호흡기 위치에서 포집하였다.

국소배기장치는 장치 없음, 흡 후드, 생물학적 안전 캐비닛 사용 등 3가지 조건을 대상으로 실험하였으며, 환기 장치의 성능은 ANSI/ASHRAE 110-1995에 따라 면 속도를 측정하였다.

입자상물질의 계수와 호흡성 분진의 중량농도는 대수변환 하기 전에 정규 분포성을 검정하고 GM, GSD로 나타냈으며, 각 측정치는 공정-배경농도 비(process-to-background ratio, P/B비)를 계산하였다. 호흡기 위치 농도와 공정 농도를 배경농도와 짝을 맞추어 분석하였으며, 사포 공정에서 장치 유무에 따라 호흡기 위치에서의 호흡성 분진 농도를 ANOVA 분석하였으며,

모든 시료에서 정규 분포성을 보이지 않아 비모수검정도 실시하였다.

결과

관찰된 입자상물질의 계수 농도와 호흡성 중량농도(GM과 GSD)를 측정하였다.

또한 다양한 환기 조건하에서 계수 농도 및 중량농도를 수록하였다. P/B비는 해당 농도에서 공정이나 환기의 상대적인 영향을 나타낸다. 이 수치가 1에 가까울수록 발생하는 입자가 없다는 것이고, 1보다 커질수록 공정에서 발생하는 입자가 많아지는 것을 의미한다.

칭량 공정은 계수 농도에 거의 영향을 미치지 않았고, 호흡성 중량농도의 경우, 매우 낮았지만 중량농도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 또 이 공정에서는 TEM으로 분석했을 때 CNT 입자가 발견되지 않았다. 인위적으로 TEM 그리드에 올려 관찰했을 때 CNT는 많은 섬유가 서로 엉켜 있는 거대한 번들로 나타났다.

연삭 공정에서 나노입자 계수농도는 배경 농도와 비교해 큰 차이가 없었지만, 호흡성 중량농도가 호흡영역에서 증가한 것으로 나타났다. 연삭 과정에서 포집된 입자는 대부분 큰 입경(>300nm)이었고 입자에서 섬유

가 빠져나온 형태의 비정형이었다.

연삭과정 중 호흡영역에서 포집한 입자의 계수 농도는 3가지 환기 조건에서 배경농도와 비교해 차이가 없었다. 호흡성 중량농도는 환기 종류에 따라 매우 큰 차이를 나타내었다. 환기장치 내부에서 호흡성 분진의 중량 농도는 배경농도와 비교해 매우 높았는데, 흡 후드에서 P/B비는 28.6이고 생물학적 안전 캐비닛에서는 3.47이었다.

환기장치의 평균 면속도는 0.39 m/sec인데, 중앙의 상부에서 최대유속 0.60 m/sec이 관찰되었다.

결론

이 연구에서 CNT를 칭량하거나 CNT 함유 에폭시 물질을 연삭하는 과정에서는 나노입자 크기의 분진이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

연삭 과정에서는 CNT가 빠져나온 마이크로미터 크기의 입자가 발생하였다. 이 입자가 근로자 노출에 기여하는 것으로 보인다. CNT가 함유된 입자의 독성은 알려진 바 없으며 추후 연구가 필요할 것이다. 연삭 과정에서 발생하는 입자를 관리하기에는 생물학적 안전 캐비닛이 흡 후드보다 더 효과적이었다.

이 연구에서 알 수 있듯이 나노 입자에 대

한 특성을 규명하는 연구는 초기 단계이고, 더욱이 관리 방안에 대한 연구도 갈 길이 멀다고 볼 수 있다.

우리나라는 나노입자에 대한 생산과 사용

이 세계적인 수준이지만 보건학적인 연구는 상대적으로 매우 미흡하기 때문에 이에 대한 활발한 연구가 이루어지기를 기대해 본다. 🍀

제공 | 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실 김현욱

☉ 참고 문헌

1. Tejral G, NR Panyala, J Havel. Carbon nanotubes: Toxicological impact on human health and environment. J Appl. Biomed.7:1-13 (2009)
2. Lam CW, JT James, R McCluskey, et al. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. Toxicol. Sci. 77:126-134 (2004)
3. Warheit DB, BR Laurence, KL Reed, et al. Comparative toxicology assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. Toxicol, Sci. 77:117-125 (2003)
4. Muller J, F Huaux, N Moreau, et al. Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes. Toxicol. Appl. Pharmacol. 207(3): 221-231 (2005)
5. National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). Evaluation of Aerosol Release during the Handling of Unrefined Single Walled Carbon Nanotube Material by PA Baron, AD Maynard, and M Foley. NIOSH DART-02-191. Cincinnati, OH: NIOSH 2003
6. Tsai SJ, E Ada, JA Issacs, et al. Airborne nanoparticle exposures associated with the manual handling of nanoalumina and nanosilver in fume hoods. J. Nanopart. Res. 11:147-161 (2009)