

실험실에서 사무실로의 나노입자의 잠재적 노출

신혁진, 김영훈*

광운대학교 화학공학과
서울시 노원구 광운로 20

(2022년 3월 29일 접수; 2022년 4월 30일 수정본 접수; 2022년 5월 6일 채택)

Potential Exposure of Nanoparticles from Laboratory to Office

Hyeokjin Shin and Younghun Kim*

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897, Republic of Korea

(Received for review March 29, 2022; Revision received April 30, 2022; Accepted May 6, 2022)

요 약

나노입자는 화학, 의학, 환경, 정보통신 등 다양한 생활 분야에 활용되고 있다. 나노물질 사용량의 증가는 작업장 및 환경중 나노물질 노출을 증가시킨다. 그러나 관련 연구는 이제 초기연구에 그치고 있다. 나노제품내 함유된 100 nm 이하의 나노입자가 비의도적으로 배출되게 되면, 호흡이나 피부노출을 통해 인체에 잠재적인 위험을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 실험실로부터 사무실로의 나노입자의 잠재적 노출 가능성을 확인하였고, 나노입자 안전 가이드라인을 제언하고자 한다. 실험 진행 중 대기로의 나노입자 발생을 확인하기 위해 나노입자 포집기를 사용하였으며, 실시간 입자측정기를 통해 실험실과 사무실에서 나노입자 농도가 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한 실험복에 부착된 나노입자가 실험실 외부로 이동한다고 가정하고, 나노 카본블랙을 부착시킨 실험복을 일정시간 털어준 뒤 실험복내 잔류된 입자의 농도를 확인하였다. 실험 결과, 실험복에 부착된 나노입자는 실험자의 동선을 따라 실험실에서 사무실로 충분히 이동할 수 있음을 확인하였고, 나노입자를 취급하는 실험실의 의복에 관한 안전 가이드라인이 필요함을 확인하였다.

주제어 : 나노입자, SMPS, 나노안전관리, 잠재노출

Abstract : Nanoparticles are used in various fields such as chemistry, medicine, the environment, and information and communication. With the increasing use of engineered nanomaterials, exposure to nanoparticles is expected to increase in the workplace and the environmental media. However, while nanotechnology industries are expanding, research on the exposure assessment of nanomaterials to humans and the environment is only at a beginning stage. Especially, if nanoparticles with a size of 100 nm or less that are contained in nano-products are released unintentionally, they may pose potential risks to the human body through breathing or skin exposure. Therefore, in this work, the possibility of potential exposure of nanoparticles moving from the laboratory to the office was confirmed, and nanoparticle safety guidelines are proposed. A nano-collector was used to detect nanoparticles in the atmosphere, and through use of a scanning mobility particle sizer it was found that nanoparticle concentrations in the laboratory and the office tended to be similar. On the assumption that nanoparticles attached to a lab-coat move out of the laboratory, a lab-coat to which nanocarbon black was attached was shaken and the concentration of the remaining particles on the lab-coat determined. The results confirmed that sufficient amounts of nanoparticles attached to the lab-coat could move from the laboratory to the office along the path of a researcher; thus, safety guidelines for the handling of lab-coat nanoparticles are required.

Keywords : Nanoparticles, SMPS, nanosafety, potential release

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: koreal@kw.ac.kr; Tel: +82-2-940-5768

doi: 10.7464/ksct.2022.28.2.123 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서론

화학, 의학, 정보통신, 환경 등과 같이 삶을 영위하는 영역에 다양하게 활용되는 나노기술은 경제적 잠재력을 가지고 있어 많은 국가에서 나노기술 연구개발 많은 투자를 하고 있다. 실제 2001년 기준 약 995억 원에 달했던 연구개발 비용은 최근 6배 이상 증가한 6,500억 원에 달하였으며, 20년간 나노기술 관련 국가별 논문 발간 수도 기하급수적으로 증가하는 추세를 보였다. 그러나 썬크림 등과 같은 화장품의 사용으로 인해 피부로 흡수된 나노입자는 혈액 순환계에 영향을 주어 건강 문제를 일으키며, 호흡에 노출된 나노입자는 폐 조직에서 즉각적인 염증 반응을 유도해 악영향을 미친다는 결과가 제시되고 있다[1]. 따라서 나노입자의 잠재적 위해성에 관한 연구는 주로 나노입자를 다루고 있는 작업장에서의 노출을 최소화하는데 집중되어 진행되어 왔다[2]. 2020년 과학기술정보통신부에서는 안전한 연구 환경을 조성하기 위해 ‘나노물질 취급 연구실 안전관리 가이드라인’을 발행하여 연구실 내 나노입자의 노출 문제를 다루고 있다. 이처럼 작업자 및 실험자의 안전을 위한 연구는 활발히 이루어지고 있는 반면 사무실, 강의실과 같은 비나노물질 취급 공간에서의 나노입자 노출에 대한 연구는 부족한 실정이다[3].

나노제품에 사용되는 나노입자 중에서 연구에 주로 사용되는 입자(Au, Ag, TiO₂ 등)는 주로 고상 및 액상 형태로 제조된다. 대기 중으로 방출되는 주요 원인인 분말 형태의 나노입자는 사용 과정에서 공기의 흐름에 의해 대기 중으로 비산된다. 실제 일반 연구실과 비교하였을 때, 나노입자를 취급하는 실험실의 공기 중에서 나노입자의 농도가 높게 검출된 보고가 있다[4]. 반면 액상에 분산되어 있는 입자는 건조 과정을 통해 대기 중으로 노출이 발생한다[2]. 특히 콜로이드 용액 상태이며 친수성을 띠는 나노입자는 주변 물 분자와 약한 반데르발스 결합을 형성하여 시간이 지남에 따라 물 분자와 함께 대기 중으로 액적형태로 확산된다. 즉, 100 nm 이하의 나노입자는 물 분자와 함께 대기로 확산하며, 입자간의 충돌로 인해 더 큰 입자로 응집된다. 응집된 나노입자는 증기와 같은 거동을 하지 않고 대기 중에 머무르며 미세먼지처럼 부유한다[5]. 대기에 부유하는 나노입자는 정전기적 특성을 가지고 있으며 바람과 같은 강제적 공기 흐름에 의해 바다, 장비, 의류 등에 부착되어 외부로 이동할 가능성을 가진다[6].

이와 같이 실험실 대기 중에 부유하는 나노입자는 다양한 매개체(의복, 머리카락, 피부 등)를 통해 실험실 밖으로 이동할 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 착용하는 실험복이 나노입자를 외부로 노출하는 주요 매개체라 판단하여 실험복을 통해 실험실에서 생활공간(사무실)으로 나노입자가 이동함을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 액상 콜로이드 입자로 금나노입자를 제조하였고, 고상 입자로는 나노 카본블랙을 사용하였다. 이를 통해 나노입자 관련 실험실 종사자에게 나노입자의 잠재 노출과 사무실로의 이동 가능성을 파악하고자 하였다[7].

2. 실험방법

2.1. 시약 및 기기

본 연구에서 금 나노입자 용액을 제조하기 위해 Hydrogen tetrachloroaurate(III) hydrate (H[AuCl₄] \cdot 4H₂O, 99.33%, KOJIMA)와 Sodium citrate tribasic dihydrate (TSC, DUKSAN)를 사용하였다. 나노 카본블랙(CB, GRAPHENE SUPERMARKET) 분산액 제조에는 Deionized water (DI water)를 사용하였다. 대기 중 나노입자의 크기에 따른 농도를 측정하기 위해 응축 핵 계수기(condensation particle counter, HCT), 미분형 전기 이동도 분석기(differential mobility analyzer, HCT)로 구성된 입도분석기(scanning mobility particle sizer, SMPS, HCT)를 사용하였다[8]. 대기에 부유하는 이물질질을 제외한 나노입자를 포집하기 위해 HEPA 필터를 장착한 나노입자 포집기(nanoparticle collector, HCT)를 사용하였다. 나노입자 포집기에는 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)용 그리드가 장착되어 있다.

2.2. AuNPs와 CB 용액 제조

20 nm AuNPs 용액을 제조하기 위해 DI water 200 mL를 교반하면서 가열하였다. 25 mM HAuCl₄ 6 mL와 250 mM TSC 6 mL를 첨가한 후 30분 동안 교반을 진행하였다. 제조된 AuNPs 용액을 충분히 식힌 후 4배 희석하여 사용하였다. DI water 500 mL에 CB 0.025 g을 분산하기 위해 냉각기(chiller, JS)를 이용하여 용액 온도를 4 °C로 유지해준 후, 3시간(45초 run, 15초 stop) 동안 초음파 처리를 진행하였다.

2.3. 대기 중 나노입자의 발생 및 이동 확인

증발을 통해 나노입자가 대기 중으로 확산하는 것을 확인하기 위해 금 나노입자 용액과 카본블랙 나노입자 용액을 교반하면서 가열하였다. 교반기 주변에서 나노입자 포집기를 이용하여 TEM 그리드에 부착된 입자의 존재 여부를 확인하였다. 인위적으로 발생한 나노입자가 다른 공간으로 이동하는 것을 확인하기 위해 나노입자가 발생하는 실험실과 해당 실험실 종사자가 근무하는 사무실에서 크기에 따른 나노입자의 농도를 SMPS로 16 cycle(1분 run, 1분 stop) 동안 측정하였다. 30분 동안 7000 V의 전압 조건이 설정된 나노입자포집기로 검출한 나노입자의 크기와 형태를 관찰하였다.

2.4. 실험복을 통한 나노입자의 이동 확인

10 × 10 cm 크기로 절편한 실험복에 금 나노입자 용액과 카본블랙 나노입자 용액을 각각 10 mL씩 가해준 후 5시간 건조를 진행하였다. 그 후 실험복 표면에 달라붙은 금 나노입자와 카본블랙 나노입자를 관찰하였다. 추가 실험으로 실험복에서 이탈되는 정도를 확인하고자, 10 × 10 cm 크기의 실험복에 카본블랙 나노입자 용액 10 mL를 가해준 후 5시간 건조를 진행하였다. 서큘레이터(SIF-B 10TS, 신일)의 풍속을 4로 고정하고 실험복을 각각 0, 10, 30, 60분 동안 털어준 후 증류수 50 mL에 잠기도록 넣어 주었고 이를 15분간 초음파 처리를 하여 이탈된 카본블랙의 농도를 측정하였다. 참고로 에어블로어를 이용하여 실험복 털기 작업은 강제적인 이탈을 유발하여 실험복내 잔류하는 입자가 거의 없어지는 상황을 유발하였다. 이에 시나리

오상 바람에 의한 입자의 이탈락을 모사하고자 서큘레이터를 사용하였다.

2.5. 물성 분석

대기 중에 부유하는 나노입자와 용액으로 검출된 나노입자의 크기와 형태를 알아보기 위해 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM, JEOL)을 사용하였다. 실험복 표면에 붙은 나노입자를 확인하기 위해서 전계 방사형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM, JEOL)을 사용하였다. UV-vis 분광광도계 (UV-vis spectrometer, SHIMADZU)를 사용하여 실험복으로부터 이탈된 카본블랙 용액의 농도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대기 중 나노입자의 발생 및 이동 증명

연구 기간 실험실에서 가장 많이 사용하는 나노입자인 Au 나노입자와 카본블랙 나노입자를 선정하였다. 특히 Au 나노입자는 다양한 형태로 제조가 가능하며 일반적으로 콜로이드 용액 상태로 제조하여 사용하고 있다. 카본블랙은 고체상 입자이며 흡착력이 좋고 입자크기가 작다는 특징을 가지고 있다. 이 입자를 샘플에 직접 가해줄 경우 100% 흡착되지 않고 공기 중으로 손실되는 부분이 발생할 것을 고려하여 초음파 분산을 통해 분산액을 제조하였다. 해당 분산액을 가열 시 증발로 인한 대기 중으로 나노입자가 노출될 것이라 예상되어, 대기중 증발 또는 확산에 의해 노출되는 액적(나노입자 함유)을 정전기적 인력으로 나노입자를 포집하는 나노포집기를 30 cm 위 지점에 호스를 연결하여 설치한 뒤 시료 채취하였다. 전체적인 측정 높이는 바닥에서부터 인체 호흡 높이인 150~170 cm를 기준으로 하였다.

포집한 액적을 TEM 분석을 진행하였다. Figure 1과 같이 구형 입자상 물질들이 가열한 용액 주변에서 검출되었으며, Figure 1(a)는 전형적인 카본블랙의 형태인 구형입자의 응집체를 보여 주었다. 또한 Figure 1(b)의 20 nm 정도의 구형입자는 금 나노입자로 확인되었다. 즉, 카본블랙 나노입자와 금 나노입자가 용액의 증발을 통해 대기로 노출된다 것을 확인하였다. 친수성과 습윤성이 우수한 나노입자의 경우 물 분자들 간의 에너지보다 물 분자와 나노입자 간의 에너지가 크므로, 기체-액체 계면 부근에

더 많은 나노입자를 배치하려 한다[5]. 시간이 지남에 따라 계면에 있는 나노입자는 물 분자와 함께 대기 중으로 증발하게 되고 에어로졸 입자는 다른 입자와 충돌하여 더 큰 입자로 성장하게 된다[2]. 대기 중에서 포집한 TEM 분석 결과는 실제 제조한 용액을 채취하여 관찰한 결과와 일치하고 있어 액상에 존재하던 나노입자가 실험과정 중 증발을 통해 대기 중으로 노출된 것을 확인하였다.

연구자들은 실험실에서 장갑, 고글 등 상황에 알맞은 개인보호장비를 착용하고 있으며 항상 실험복을 입고 실험에 임하게 되어 있다. 간혹 실험복을 착용한 상태로 생활공간으로 이동을 하거나 실험실과 사무실이 인접해 있다면 대기 중으로 노출된 나노입자는 의복에 부착되어 다른 공간으로 이동할 가능성이 존재한다. 특히 실험실 겸 사무실로 사용하는 연구실의 경우는 나노입자 제조과정에서 대기중으로 노출된 나노입자는 연구자에게 직접적인 호흡노출을 야기할 수 있다.

이에 실험실과 2개 층으로 50 m 정도의 거리를 두고 있는 사무실의 대기에서도 나노입자가 검출되는지 평가하였다. 사무실은 5층에 위치해 있으며 실험자들이 사무 업무만을 처리하기 때문에 생활 나노입자 외에는 실험실에서 인위적으로 제조한 특정 형태의 나노입자가 존재할 수 없는 환경이다. 대기에 부유하고 있는 나노입자를 포집하기 위해 동일하게 나노포집기를 이용하였으며, 실험실이 아니기에 먼지의 형태를 지닌 비구형 입자가 검출될 것으로 예상하였다. 그러나 Figure 2와 같이 사무실에서 측정된 일부 시료에서는 촉매점이 고정된 구형 입자와 같이 자연적으로 존재할 수 없는 입자가 관찰되었다. Figure 2(a)는 카본블랙 응집체 형태를 지니고 있으며, 해당 측정 기간 내 카본블랙 연구를 진행하고 있어서 사무실에서도 실험복 이동에 따른 카본블랙 노출이 발생된 것으로 판단된다. 또한 Figure 2(b)는 구형입자에 촉매점이 고정된 형태를 보이고 있으며, Figure 2(c)는 전형적인 구형 실리카 모양을 보이고 있다. 이는 기존에 본 연구실에서 촉매제조에 활용하고자 철 나노입자에 실리카를 코팅한 입자와 유사한 형태를 보였다[8]. Figure 2(b)와 2(c)는 완벽한 구형 입자의 형태를 지니며 균일한 크기를 나타내고 있어 인위적으로 제조된 입자임을 알 수 있다. 이는 사무실에서 자연적으로 발생된 것이 아닌 연구자의 의복(일상복, 실험복 등)에 부착된 나노입자가 연구자의 동선 이동과 함께 사무실로 이동했다고 볼 수 있다. 즉, 실험복을 벗고 일상복

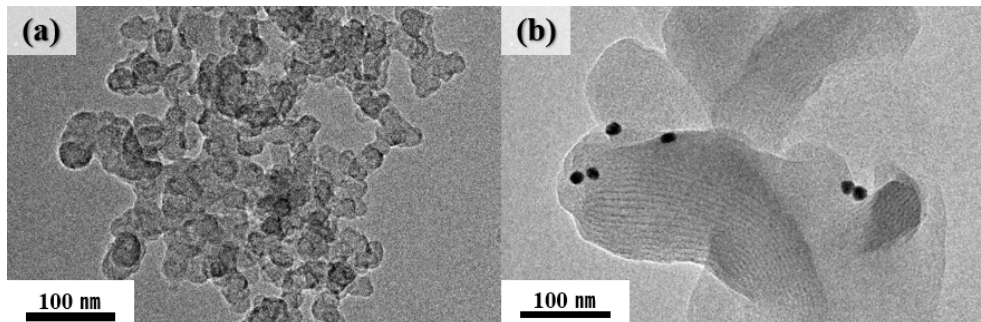


Figure 1. TEM images of (a) CB nanoparticles and (b) Au nanoparticles exposed in the atmosphere, which was sampled by nanoparticle collector.

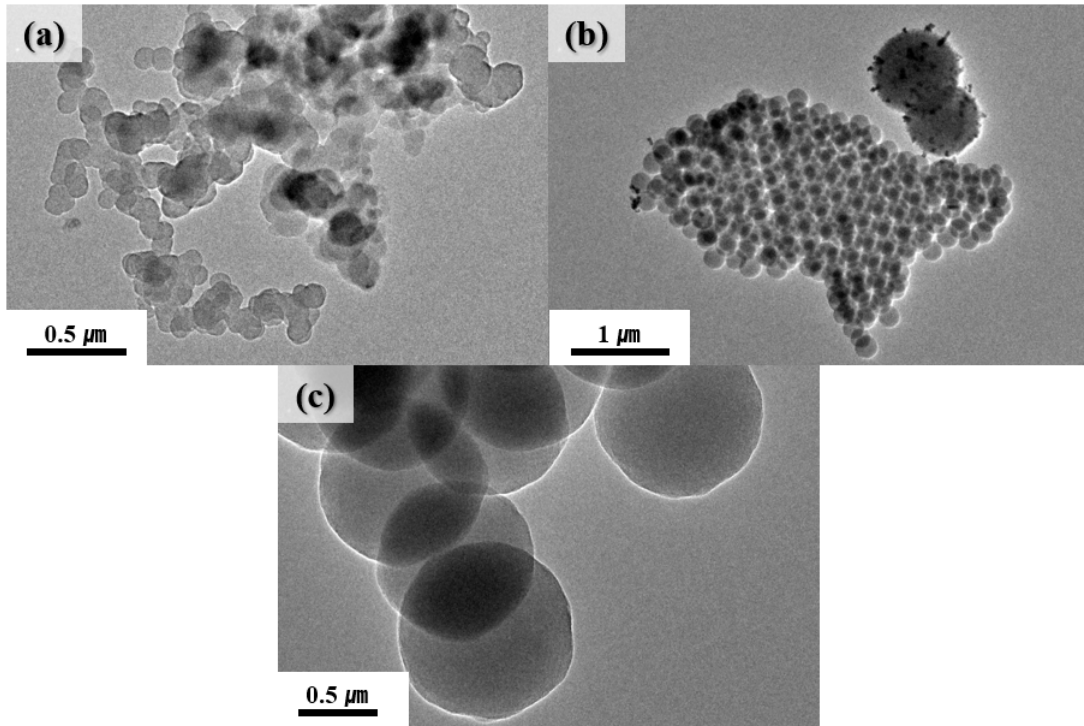


Figure 2. TEM images of nanoparticles found in the office; (a) CB nanoparticles, (b) Fe₂O₃ loaded silica particle, and (c) silica sphere.

으로 사무실에 접근했다더라도 의복에 부착된 일부 입자들이 사무실로 함께 이동하게 되고, 사무실내 활동(연구자의 움직임)으로 대기중 노출이 발생하는 것으로 보인다.

앞선 결과를 통해 분말형태의 나노입자 외에도 콜로이드 용

액 상태를 다루는 실험 과정에서도 나노입자가 대기로 노출될 가능성이 있다는 것을 확인하였다. 실험을 진행하며 발생하는 나노입자가 대기에 얼마나 노출되는지를 평가하기 위해 나노입자를 주로 사용하는 A실험실과 일반 실험실인 B실험실의 대기

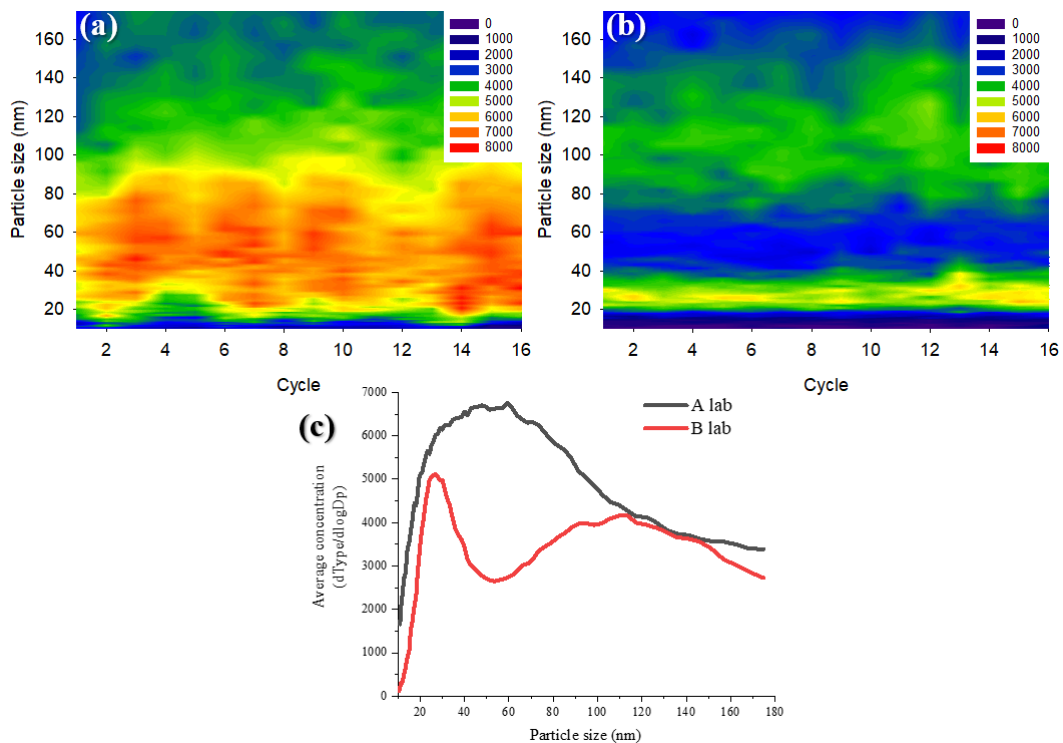


Figure 3. The concentration of nanoparticles measured by SMPS at (a) A lab, and (b) B lab. (c) The particle size distribution of nanoparticles in A and B labs.

중 나노입자 크기별 농도를 측정하기 위해 SMPS를 사용하였다. SMPS는 10~487 nm 크기의 미세 에어로졸 입경 분포를 측정하는 장비로 입자가 가지고 있는 전기적 특성을 이용하여 입자를 크기별로 분류하여 응결성이 큰 부탄올을 이용하여 분류된 입자를 성장시켜서 입자의 크기를 광학적으로 계수하는 방식을 이용하는 원리이며 대기입자의 크기 분포를 측정하는데 가장 널리 사용되는 장비 중 하나이며 전압에 따른 나노입자 크기를 분류하며 빠른 시간 내 분석이 가능하다[9]. A 실험실은 나노입자를 Au, Ag, TiO₂ 등 다양한 크기의 나노입자를 사용하여 광열, 광촉매 등과 같은 친환경 분야를 연구하고 있는 실험실이며, 측정결과 80 nm 이하의 나노입자 농도가 높게 측정되었다. B 실험실은 CNT를 이용하여 연료전지 분야를 연구하고 있으며 사용하는 대부분의 입자가 마이크로 단위를 가지고 있다. B 실험실의 경우 40 nm 이하의 나노입자만 농도가 크게 측정되었다. 나노입자를 취급하지 않는 공간에서도 대기중 초미세먼지(PM1.0 미만)가 존재할 수 있으며, 바닥면지의 재비산으로 인한 대기중 입자 분포를 나타낼 수 있다. Figure 3(a)와 Figure 3(b)의 그래프를 통해 비교해보면, A 실험실은 20~80 nm 크기의 입자가 지배적으로 관찰되지만, B 실험실은 A 실험실에서 관찰되는 인위적으로 제조한 입자 크기 영역이 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 Figure 3(c)를 통해 A 실험실의 대기중 나노입자 농도가 B 실험실에 비해 전체적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 실험 중 발생한 많은 양의 나노입자가 대기로 방출되어 부유하고 있다는 것을 의미한다.

실험실에서 발생한 나노입자가 매개체를 통해 이동하여 생활 공간에 영향을 미치는지 확인하기 위해 학생들이 수업을 듣는 강의실과 연구자들이 근무하는 사무실의 대기를 측정했다. Figure 4(a)의 그래프를 보면 나노입자 관련 실험실 연구자가 근무하는 사무실에서 실험실과 동일하게 높은 농도의 나노입자가 측정되었으며, 주로 20~60 nm의 입자가 관찰되었다. 그러나 Figure 4(b)와 같이 강의실에서는 나노입자가 상대적으로 적게 측정되었다. Figure 4(c)의 입도분포도 결과를 통해 사무실에서 나노입자가 빈 강의실과 비교하였을 때 확연히 높은 농도를 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 실험실에서 발생한 나노입자가 실험실 종사자가 근무하는 사무실로 이동하였다는 결론을 도출하였다.

3.2. 실험복을 통한 나노입자의 이동성 확인 및 농도 변화 확인

실험복은 실험실 종사자들이 필수로 착용하여야 하며 넓은 표면적을 가지고 있어 정전기적 인력에 의해 나노입자가 쉽게 흡착될 수 있다. 이에 실험복을 입고 실험실 외부로 이동하는 것은 나노입자의 실험실 외부로의 노출을 유발하는 가장 큰 요인이라고 판단하였다. 이에 실험복에 의도적으로 고정된 나노입자가 물리적인 힘(의복 털기, 바람 등)으로 제거가 되는지를 확인하고자 하였다. 인위적으로 나노입자를 부착시키기 위해 일정한 크기로 자른 실험복에 나노입자 용액을 가하고 충분한 건조를 진행하여 나노입자를 실험복에 부착시켰으며 SEM을 통해 실험복 표면을 관찰하였다. 여기서는 검정색을 띠는 카본

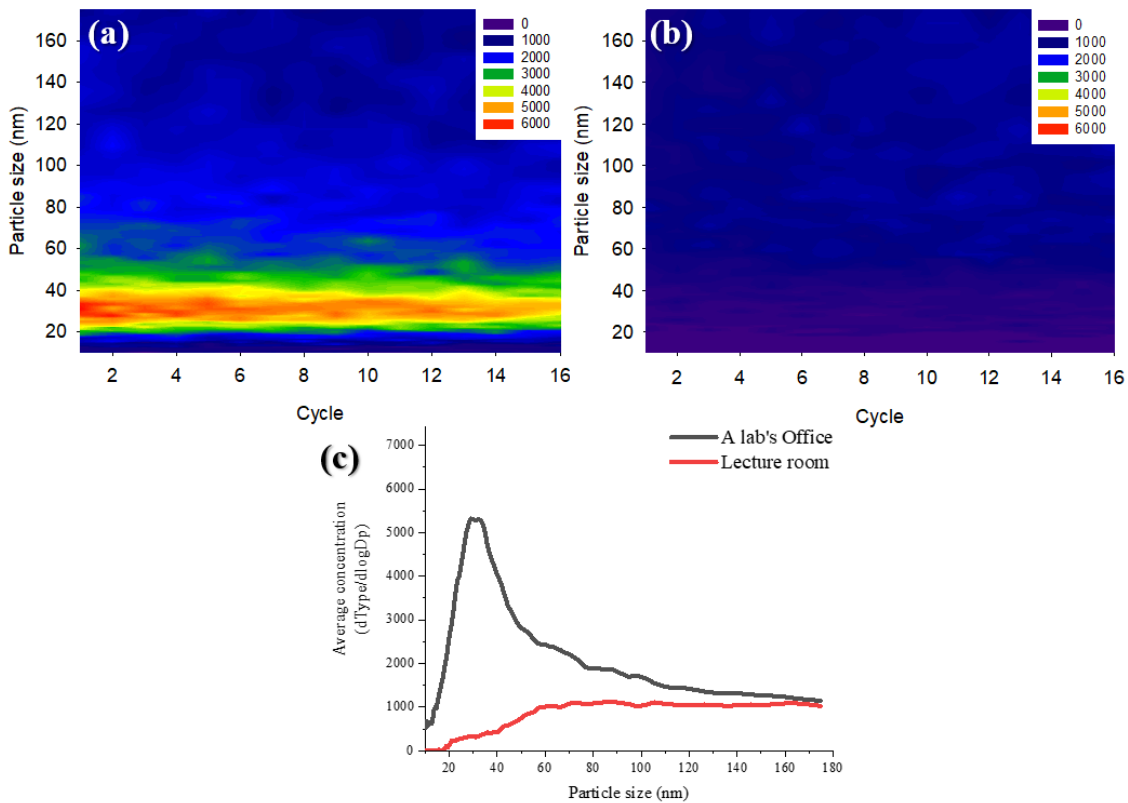


Figure 4. The concentration of nanoparticles measured by SMPS at (a) A lab's office, and (b) lecture room. (c) The particle size distribution of nanoparticles in office and lecture room.

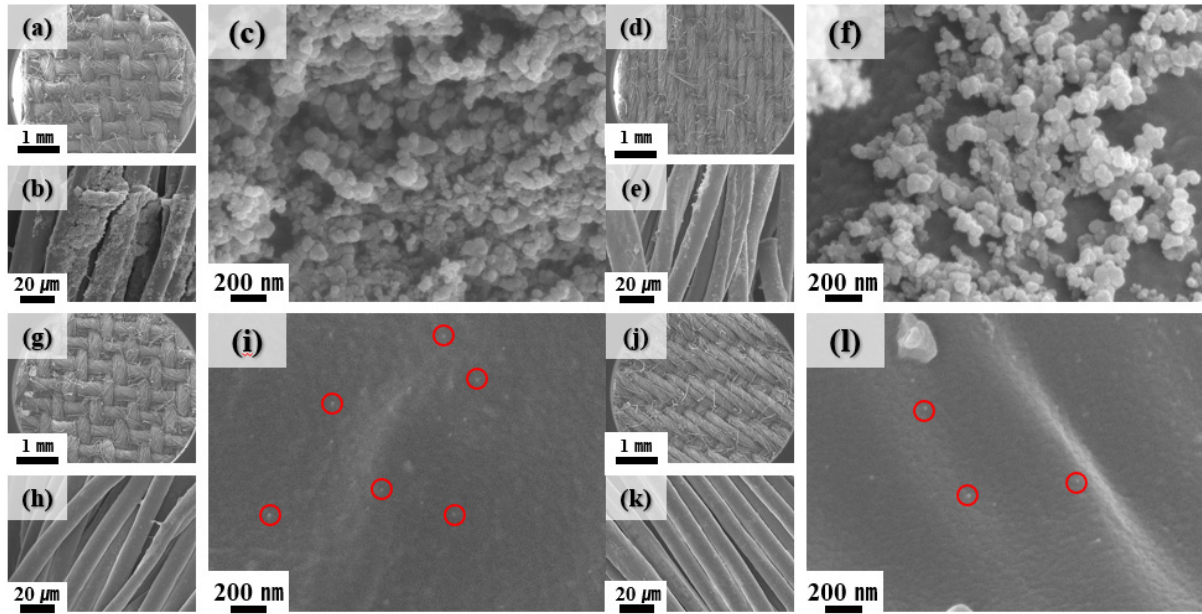


Figure 5. SEM images of CB nanoparticles attached to lab coats (a-c) before and (d-f) after shaking out for 60 min, and Au nanoparticles attached to lab coats (g-i) before and (j-l) after shaking out for 60 min.

블랙을 이용하여 흰색 실험복에 입자의 부착여부를 SEM을 통해 육안으로 쉽게 확인할 수 있도록 하였다. 사용한 카본블랙 입자의 경우 크기가 60~80 nm이며 구형 입자의 형태를 지니고 있다.

Figure 5를 통해 실험복 표면에 붙어있는 것이 카본블랙 나노입자임을 확인하였다[10]. 용액을 가한 뒤 건조만 진행한 실험복의 경우 Figure 5(c)와 같이 카본블랙 나노입자가 비어있는 공간 없이 뭉뚱하게 존재하는 것이 관찰되었다. 그러나 60분간 인위적인 바람을 가해주어 물리적인 힘으로 실험복을 털어냈을 때 약 40% 가량의 나노입자가 떨어졌으며 Figure 5(f)를 통해 비어있는 공간이 발생하였음을 확인하였다. 실험복 시편에 대하여 여러영역의 SEM 분석을 통해 빈공간의 비율로 이탈된 정도를 확인할 수 있으나, 이는 정량화가 어렵기에 보조적인 수단으로 사용하였다. 정량화를 위해 털기 작업 전과 후의 무게차로 실험복 시편내 잔류중인 함량을 측정하였고, 초음파 처리 후 이탈된 양을 평가할 수 있었다. 또한 실험복내 고정된 초기 무게와 털기작업과 초음파 처리후의 시편의 건조의 무게 차이를 통해 여전히 잔류 중인 입자상 물질의 무게함량을 평가하였다.

금 나노입자 용액에 노출시킨 실험복 또한 동일한 노출 작업을 진행하였다. 카본블랙 나노입자보다 더 작은 크기를 가지고 있는 금 나노입자를 관찰하기 위해서 고배율을 사용하였으나 금 나노입자 샘플과 실험복이 손상되는 현상이 발생하여 관찰이 가능한 최대 배율을 사용하였다. Figure 5(i)와 Figure 5(l)을 보면 매우 작은 흰 점의 형태로 구형 나노입자가 관찰되었다[11]. 금 나노입자 또한 실험복 털기 작업을 통해 약 36% 가량 나노입자가 감소하였음을 확인하였다. 이는 단순한 물리적인 힘에 의해 실험복 표면에 붙어있는 나노입자가 떨어져 나갈 수 있음을 확인한 사례이며 실험복을 입고 생활공간을 돌아다니게 되면, 의복끼리의 마찰 등과 같은 물리적 힘에 의해 실험복에 부착된 나노입자가 대기 중으로 떨어져 나갈 수 있음을 의미한다.

실험복은 외부 물질로부터 실험실 내 오염을 방지하며 실험실의 화학물질이 외부로 유출하는 것을 방지하는 용도이므로 실험실에서의 실험복 착용은 필수적인 사항이다. 그러나 실험복을 입지 않고 일상복을 입은 채 실험을 진행하는 경우도 다수 존재한다. 시간에 따라 이탈되는 양을 정량화하기 위하여 카본블랙을 실험복에 처리한 천 조각을 준비하였다. 실험복에 앞

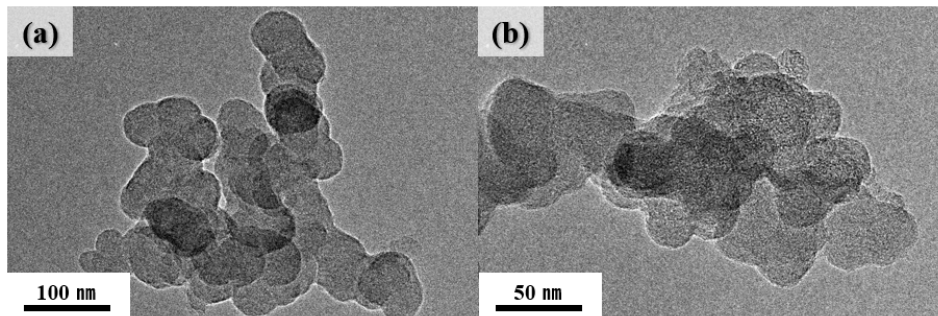


Figure 6. TEM images of CB aggregates dispersed in DI water detached from lab coat.

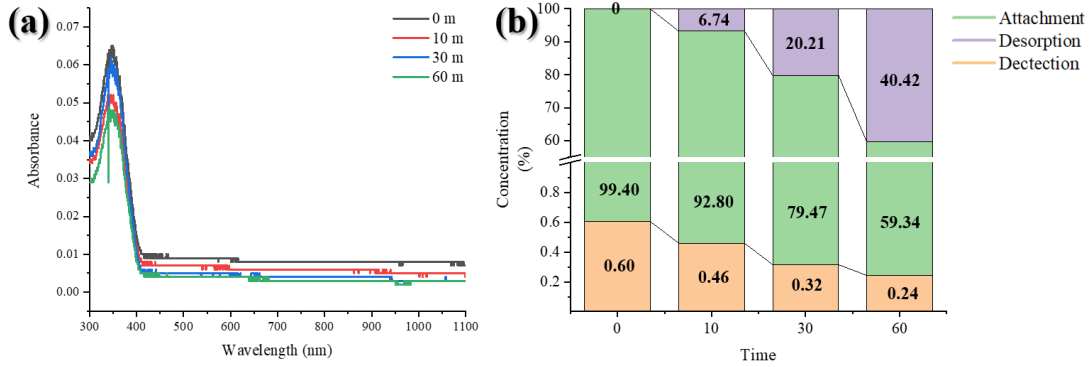


Figure 7. (a) UV-vis spectra of DI water in which CB nanoparticles are detached from lab coat, and (b) the concentration changes of CB nanoparticles on the lab coat.

선 실험 방법과 동일한 방법으로 카본블랙 나노입자 처리를 하였으며, 인위적인 바람을 가해주어 의복을 털어주는 시간이 증가함에 따라 나노입자의 농도 변화의 경향을 관찰하였다. 카본블랙 나노입자가 묻어 있는 실험복을 증류수에 재분산시켜 TEM을 관찰하였다. Figure 6의 결과와 같이 구형입자의 응집체가 관찰되었으며, 이탈된 입자가 UV-vis 흡광도 변화 요인이 되기에 해당 입자를 카본블랙 나노입자로 추정할 수 있었다.

물리적인 힘에 의해 나노입자가 떨어져 나간 실험복을 증류수에 담겨 초음파 처리를 해 증류수로부터 측정된 카본블랙 나노입자의 흡광도 그래프는 Figure 7(a)와 같다. 물리적인 힘을 가해 털어주는 시간이 증가함에 따라 카본블랙 나노입자의 농도가 감소하여 흡광도가 감소하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. Figure 7(b)와 같이 털어주는 시간(0~60 min)이 증가함에 따라 실험복에 부착된 카본블랙 나노입자의 양은 감소하였고, 초음파 처리 후 증류수로 이탈된 나노입자의 양은 감소하였다. 카본블랙을 부착시킨 실험복을 털지 않고 초음파 처리시켰을 때, 증류수에서는 0.6%가 검출되었고 의복에 그대로 잔류(99.4%)하였다. 60분간 실험복을 물리적으로 털어 줬을 때, 약 40%가 실험복에서 떨어져 나갔으며 이는 SEM 분석을 통해 실험복 표면이 노출되는 정도로 확인하였다. 털어 준 실험복을 초음파 처리한 뒤 증류수에서 검출되는 카본블랙은 초기 농도의 0.24%로 더 적었다. 즉, 대기중에서 털어주는 작업을 통해서 상당부분 대기중 이탈된 나노입자, 초음파 처리

로는 실험복에 부착된 카본블랙이 쉽게 떨어지지 않음을 나타낸다. 이를 통해 60분동안 40% 가량의 나노입자가 대기 중으로 떨어져 나간 것을 확인할 수 있으며, 60% 가량 나노입자가 의복에 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 실험복의 경우 실험을 마친 후 벗어 놓으면 되지만 일상복을 입고 실험을 했다면 털어준 후에도 많은 양의 나노입자가 평상복에 부착하여 실험자의 동선을 따라서 이동할 수 있음을 나타낸다. 따라서 실험실에서는 반드시 실험복을 반드시 착용하여야 한다는 것을 의미한다.

4. 결론

이번 연구는 다양한 분야에 사용되는 나노입자가 인체에 노출되었을 시 잠재적인 위험성을 초래할 수 있기에 실험실에서 생활공간으로의 전파를 파악하기 위해 진행하였다. 대기 중의 나노입자를 포집하는 나노입자포집기를 이용하여 대기중으로 증발하는 콜로이드 용액 상태의 나노입자 발생 여부를 확인하였으며, 생활공간(사무실)에서 자연적으로 발생할 수 없는 나노입자가 관찰되었다는 것을 근거로 실험실의 나노입자가 실험자의 동선을 따라 이동할 수 있음을 확인하였다(Figure 8). 또한 SMPS를 사용해 나노입자를 사용하는 실험실에서 100 nm 이하의 나노입자가 타 실험실에 비해 월등히 높게 나타났다. 그 중 20~40 nm 크기의 나노입자가 실험실 종사자가 근무하는 사무실로 전파되어 대기 중 나노입자 농도에 영향을 미쳤다. 콜로이

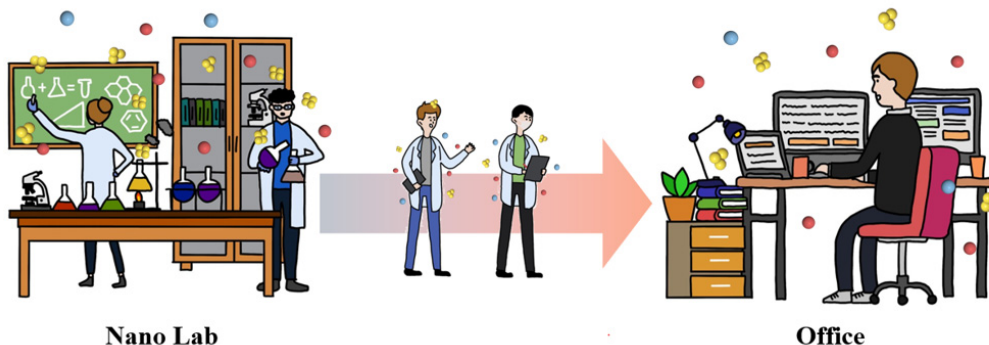


Figure 8. Scheme of lab-generated nanoparticles exposed from lab to office.

드 용액 상태의 카본블랙과 금 나노입자를 실험복 표면에 부착시킨 뒤 물리적인 힘을 가해주었을 때 나노입자가 떨어져 나가는 것을 관찰하였으며, 물리적인 힘을 가해주는 시간이 증가함에 따라 실험복에 달라 붙어있는 나노입자의 농도가 감소하였다. 이상의 결과를 통해 실험실에서 나노입자의 발생과 실험복을 통한 외부로의 전파를 입증하였고, 다음과 같은 안전 가이드라인의 필요성을 제언하고자 한다. 첫째, 물리적인 힘으로 나노입자를 털어내에도 불구하고 많은 양의 나노입자가 실험복에 잔류하기에 일상복이 아닌 실험복을 반드시 입고 실험에 임해야 한다. 둘째, 실험복을 입고 사무실과 같은 다른 공간으로 이동할 경우 나노입자가 부착되어 외부로 나노입자를 노출할 가능성이 높음으로 실험실 외부 공간에서는 실험복을 착용하지 말아야 한다. 셋째, 실험을 마친 실험복을 털어주는 것으로도 실험복에 붙은 나노입자를 충분히 제거할 수 있으므로 실험이 끝난 후 열린 공간에서 에어샤워 과정을 통해 실험복에 붙어있는 나노입자를 충분히 털어주어야 한다. 본 연구를 기반으로 나노입자를 다루는 연구종사자는 실험실로부터의 나노입자 잠재 노출에 대한 위험성을 인식하고, 나아가 다양한 후속 연구를 통해 구체적인 가이드라인을 제시함으로써 나노입자 관련 실험실 안전 관리체계를 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. Sufian, M. M., Khattak, J. Z. K., Yousaf, S., and Rana, M. S., "Safety issues associated with the use of nanoparticles in human body", *Photodiagnosis Photodyn. Ther.*, **19**, 67-72 (2017).
2. Park, J., Kwak, B. K., Bae, E., Lee, J., Kim, Y., Choi, K., and Yi, J., "Characterization of exposure to silver nanoparticles in a manufacturing facility", *J. Nanopart. Res.*, **11**(7), 1705-1712 (2009).
3. Srivastava, V., Gusain, D., and Sharma, Y. C., "Critical review on the toxicity of some widely used engineered nanoparticles", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **54**(24), 6209-6233 (2015).
4. Gomez, V., Irusta, S., Balas, F., Navascues, N., and Santamaria, J., "Unintended emission of nanoparticle aerosols during common laboratory handling operations", *J. Hazard. Mater.*, **279**, 75-84 (2014).
5. Wang, R., Pan, G., Qian, S., Li, L., and Zhu, Z., "Influence of nanoparticles on the evaporation behavior of nanofluid droplets: A Dh law and underlying mechanism", *Langmuir*, **36**(4), 919-930 (2019).
6. Umh, H. N., Roh, J., Lee, B. C., Park, S., Yi, J., and Kim, Y., "Case studies for nanomaterials' exposure to environmental media", *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(6), 1056-1063 (2012).
7. Tsai, C. S. J., "Contamination and release of nanomaterials associated with the use of personal protective clothing", *Ann. Occup. Hyg.*, **59**(4), 491-503 (2015).
8. Kang, M., and Kim, Y., "Au-coated Fe₃O₄@ SiO₂ core-shell particles with photothermal activity", *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, **600**, 124957 (2020).
9. Lee, H., Yook, S. J., and Ahn, K. H., "Effects of exponentially decaying and growing concentrations on particle size distribution from a scanning mobility particle sizer", *Aerosol. Sci. Technol.*, **54**(10), 1135-1143 (2020).
10. Hong, J., Moon, H., Kim, J., Lee, B. C., Kim, G. B., Lee, H., and Kim, Y., "Differentiation of carbon black from black carbon using a ternary plot based on elemental analysis", *Chemosphere*, **264**, 128511 (2021).
11. Balasubramanian, S. K., Yang, L., Yung, L. Y. L., Ong, C. N., Ong, W. Y., and Liya, E. Y., "Characterization, purification, and stability of gold nanoparticles", *Biomaterials*, **31**(34), 9023-9030 (2020).