

공기 중 탄소나노튜브 시료채취 시 사용하는 카세트 종류가 벽면 손실에 미치는 영향

함승헌¹ · 김송하¹ · 이진호¹ · 이나루² · 윤충식^{1*}

¹서울대학교 보건환경연구소, 보건대학원 환경보건학과, ²한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Effect of Sampling Cassettes Type used in Sampling of Airborne Carbon Nanotube(CNT) to Electrostatic Loss

Seunghon Ham¹ · Songha Kim¹ · Jinho Lee¹ · Naroo Lee² · Chungsik Yoon^{1*}

¹*Institute of Health and Environment and Department of Environmental Health and Science,
Graduate School of Public Health, Seoul National University*

²*Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency*

ABSTRACT

Objectives: The purposes of this study were to compare the surface resistance of cassettes according to the material, and to evaluate the wall deposition of carbon nanotubes(CNTs) by electrostatic loss in the inner wall of the cassette.

Methods: Surface resistance was measured for three types of cassettes(25 mm polypropylene conductive cowl, 25 mm and 37 mm clear styrene cassettes) with a surface resistance meter. Also, electrostatic wall loss was measured at different weights of CNTs depending on the cassette. CNTs were laid on a weight dish with the cassette for five minutes to provide sufficient time to attach on the wall. Wipe sampling was performed to collect CNTs deposited on the wall and elemental carbon, known as a surrogate for CNTs, was analyzed.

Results: The cassette with conductive materials(18% of black carbon) showed the lowest surface resistance($<1.21 \times 10^3 \Omega$). Cassettes made from clear polystyrene showed the relatively highest surface resistance(25 mm: $10.02 \times 10^9 \Omega$, 37 mm: $10.59 \times 10^9 \Omega$). This means that particles are more likely to stick to the internal wall of styrene cassettes due to electrostatic electricity. This may lead to an underestimation of the airborne concentration of CNTs. The experiment showed that EC was not detected when using a 25 mm conductive cowl cassette, while EC was detected at the internal wall of 25 mm and 37 mm polystyrene cassettes.

Conclusions: This study confirms that cassettes with a conductive cowl have low surface resistance and are more appropriate for CNT sampling. In addition, this finding could be applied for other types of particulate, especially regarding electrostatic charge and sampling.

Key words: carbon nanotube, cassette, electrostatic, industrial hygiene, sampling

I. 서 론

일반적으로 사업장에서 발생하는 입자들은 정전기를 포함하고 있다고 알려져 있고, 이를 무시하고 측정할 경우 과소평가 등의 예상하지 못한 결과를 얻게 된

다(Johnston et al., 1985). 일반적으로 대전(Charging)의 메커니즘은 입자 간에 연결이 끊어지는 경우 발생하는데, 입자가 작아지면 더 높은 수준의 대전이 발생하게 된다(Liu et al., 1985). 또한, 산업위생에서 사용하는 채취기구(카세트, 여과지) 측면에서 보면, 카세트와

*Corresponding author: Prof. Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2734, E-mail: csyoon@snu.ac.kr

Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul
Received: September 2, 2017, Revised: September 18, 2017, Accepted: September 25, 2017

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.

여과지는 플라스틱 재질로 만들어져 있어서, 금속재질의 카세트에 비하여 외부 마찰에 의해 대전이 쉽게 될 수 있다(Baron, 2003). 입자상 물질의 측정과 분석을 할 때 대전으로 인한 문제가 발생한다. 입자상 물질이 여과지에 포집되기 전에 벽면에 붙게 될 가능성이 높아져서 카세트 벽면에 입자상 물질이 붙는 현상(internal wall loss)이 발생하게 된다(Liu et al., 1985; Baron, 2003). 이러한 카세트의 특징은 입자상 물질의 측정 시 입자가 카세트 내부에 부착되어 시료의 손실을 일으키며 오차의 원인이 되고, 포집효율에 영향을 미치게 된다(Baron, 1990).

이를 제어하는 방법을 측정과 분석으로 나누어 살펴볼 수 있다. 측정 시 제어하는 방법으로 공기중 석면을 측정할 때 NIOSH 7400 방법에서 25 mm 전도성 카울(conductive cowl)을 장착한 카세트를 이용하고 있다(NIOSH, 1994a). 석면도 매우 작은 입자로 이루어져 있기 때문에 비 전도성(non-conductive) 카세트를 사용할 경우 과소평가를 하게 되어 결과에 있어서 큰 편이를 초래하여 전도성(conductive) 카세트로 이를 극복하는 것이다(Baron et al., 1994; Blackford et al., 1985). 따라서 측정 단계에서부터 대전에 의한 정전기 관리가 되지 않는다면, 포집되는 양에 있어서 오류를 야기시킬 수 있다. 또 다른 방법으로는 방사성 동위원소(Krypton 85, Americium 241 and Polonium 210)등을 이용하여 입자를 중성화시키는 방법이 사용되지만(NIOSH, 1994b), 방사성 동위원소이기 때문에 취급의 전문성이나 비용의 문제가 있다(Liu & Pui, 1974). 분석 시 제어하는 방법으로는 여과지에 포집된 입자상물질의 무게를 칭량할 때 대전된 여과지는 무게에 영향을 주기 때문에 정확성을 높이기 위하여, 여과지의 무게를 칭량하기 전에 정전기를 제거하기 위하여 코로나방전을 이용하거나(Heal et al., 2000), 이온화된 공기를 방출하는 이온나이저 블로워(ionizer blower)를 이용하여 정전기를 제거 한다(Harrison et al., 2003; Taiwo, 2016). 그밖에 일반적으로 정전기를 제거하는 방법으로는 뜨거운 수증기를 쐬어 주거나 전도성 액체를 뿌려주는 것으로 대전문제를 제어 할 수 있다고 알려져 있다(Mardiguian, 2011).

나노입자 중 탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT)는 1991년 최초로 발견되었으며, 강철에 비해 100배

높은 인장강도, 뛰어난 유연성, 구조에 따른 금속, 반도체성 등의 전기적 특징을 가지고 있어서, 고기능성 복합체, 에너지 저장 소재/첨가제, LCD용 백라이트, 조명, 단전자소자, 트랜지스터 등 다양한 분야에서 활용되고 있고, 앞으로도 더욱 많은 응용이 가능하다고(De Volder et al., 2013). 그러나 2017년 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 다중벽 탄소나노튜브 1종에 대하여 Group 2B로 지정하였고 그밖에 탄소나노튜브에 대해서는 Group 3으로 지정한바 있다(IARC 2017). 2011년 환경부 발표자료에 따르면, 우리나라에는 8개 사업장에서 연간 4,878 kg의 CNT를 제조 및 수입하고 있고, 18개 업체에서 1,273 kg을 사용하고 있다(MoE, 2011). 국내에서는 2016년 한국산업안전보건공단 지침(KOSHA Guide)으로 분석방법이 제정되었다(KOSHA, 2016).

탄소나노튜브는 대전이 매우 잘되는 입자로서 입자들 간에도 응집현상이 발생하는 입자상 물질이다(Park et al., 2010). 일반적으로 탄소나노튜브를 측정할 때 폴리스티렌 재질로 만들어진 카세트를 이용하여 석영여과지에 포집을 해왔다(Dahm et al., 2012; Lee et al., 2015). 과거 제약산업에서의 연구에서 보면, 폴리스티렌 카세트로 제약공정에서 발생하는 입자상 물질(Pharmaceutical dust)을 측정 시 평균적으로 62%의 입자가 카세트 뚜껑에서 발견되고, 22%의 입자만 여과지에서 발견되었다(Puskar et al., 1991). 대부분 플라스틱의 경우 높은 표면저항을 가지고 있어 대전이 되어도 전하를 가지고 있게 되어 정전기가 발생하기 쉽다. 폴리카보네이트(PC: polycarbonate), 테프론(PTFE: polytetrafluoroethylene), 폴리비닐클로라이드(PVC: polyvinyl chloride), 폴리스티렌(PS: polystyrene) 재질은 높은 수준으로 대전되어 있어 입자가 쉽게 달라붙는다(Baron, 2003). 공기 중에 있는 입자상 물질을 채취할 때 포집된 입자가 벽면에 붙을 수 있어 측정결과에 영향을 줄 수 있고, 벽면에 붙는 현상을 제거 하면 결과에 정밀성을 얻을 수 있다(Baron, 1998). 벽면에 붙는 것을 보완하고자, 영국의 Mark와 Vincent는 Institute of Occupational Medicine (IOM)에서 개발한 IOM 시료채취기를 개발하였고, IOM 시료채취기의 개발 배경을 보면, 기존에 사용하던 시료채취기들이 벽면에 붙어 있는 입자상 물질들

은 반영하지 못한 채 여과지무게만 분석이 되기 때문에 이를 통한 과소평가가 우려되어, IOM 시료채취기에는 내부의 카세트 자체의 무게를 측정하기 때문에 채취기 입구로 들어온 모든 입자상 물질에 중량을 측정할 수 있게 된 것이다(Mark & Vincent, 1986). 실제로 실험실과 현장에서 측정하였을 때 입자상 물질 측정결과 총 분진 농도에 있어서 IOM 시료채취기가 폴리스티렌 카세트에 비하여 높게 측정된 결과를 볼 수 있어 높은 채취 효율을 보였다고 할 수 있다(Reynolds et al., 2009).

그러나 현재까지 연구는 나노입자에 대하여 실시간 측정기 이용 시 튜브에서 손실되는 양에 대한 연구가 대부분이고, 탄소나노튜브를 폴리스티렌 재질로 만들어진 카세트에 측정하였을 때 탄소나노튜브가 카세트 벽면에 붙어서 손실될 수 있는지에 대한 연구는 없었다(Kumar et al., 2008, Tsai, 2015, Yin & Dai, 2015).

따라서 본 연구의 목적은 현재 공기중 입자상 물질 측정에서 주로 사용하는 투명한 폴리스티렌과 폴리프로필렌에 18% 카본이 들어있는 전도성카세트의 표면저항을 측정하여 표면저항값을 비교하고, 카세트 종류에 따라 벽면에 붙는 탄소나노튜브의 양을 비교하여 탄소나노튜브에 대한 측정 시 카세트 선정에 대한 기술적 정보를 제공하는 것이다.

II. 연구방법

1. 사용된 카세트 및 재료

실험을 위하여 새 제품으로 총 3종의 카세트를 사용하였다. 25 mm 전도성 카세트(Cat No. 225-3-23, SKC Inc., USA), 25 mm 카세트(Cat No. 225-3-25LF, SKC Inc., USA)와 37 mm 카세트(Cat No. 225-3050LF, SKC Inc., USA)를 이용하였다. 25 mm 전도성 세트는 공기중 석면채취 시 사용되는 전도성이 있는 5 cm 길이의 카세트이다. 주재료는 폴리프로필렌에 18% 카본블랙을 함유하여, 전도성을 가지게 제조된 카세트이다. 25 mm, 37 mm 카세트는 모두 투명 폴리스티렌을 사용하여 제조한 카세트이다. 카세트는 모두 새제품을 사용하였다. 추가적으로 카세트와의 표면저항의 비교를 위하여 두 가지 종류의 아크릴 판(Acrylic sheet)을 참고적으로 사용하였다. 하나는 일반적으로 사용하는 아크릴

판이고, 다른 하나는 무정전 아크릴(Anti-static Acrylic sheet, Shin Gwang Acrylic Inc., Korea)이다.

2. 카세트의 표면저항 측정

카세트의 표면저항을 측정하기 위하여 표면저항측정기(Surface resistance meter, 19788, Desco, USA)를 이용하였다. 표면저항 측정기는 두 개의 프로브(probe)로 이루어져 있고, 측정하고자 하는 물체를 가운데 두고 양 옆쪽에서 프로브를 이용하여 물체의 표면저항을 측정을 하였다. 측정위치는 카세트 경우 카세트 본체를 가운데 두고 카세트 외벽에 프로브를 붙여 측정을 하였고, 아크릴 판의 경우 판을 가운데 두고 양 옆으로 프로브를 붙여 측정을 하였다.

본 측정기기의 측정범위는 $1.0 \times 10^3 \Omega - 1.0 \times 10^{12} \Omega$ 이다. 국제전기기술표준(International Electrotechnical Commission, IEC) 61340-5-1:2006의 정의를 따르면 “정전기 전도성: electrostatic conductive” 표면저항이 10^2 ohms 에서 10^5 ohms 인 경우를 이야기하고, 이는 “정전기 분산성: electrostatic dissipative”는 10^5 ohms 에서 10^{11} ohms 인 경우를 이야기 한다(IEC, 2016). 정전기 전도성은 표면저항이 작아서 정전기의 발생이 적기 때문에 입자가 표면에 부착될 가능성이 적으며, 정전기 분산은 표면저항이 정전기 전도성 상태 보다는 높은 상태로 표면의 전하가 불균형 하여 외부 마찰이나 환경에 의하여 쉽게 변하는 상태이며, 정전기 분산성 상태를 넘어서면, 표면저항이 매우 크므로 정전기가 항상 존재하는 상태로 유지가 된다(Mardiguian, 2011).

3. 사용된 탄소나노튜브

본 실험에 사용된 탄소나노튜브는 다중벽탄소나노튜브(Multi Wall Carbon Nanotube, Model CNT Regular, Carbon Nano Material Technology, Korea)를 사용하였다. 지름 5-20 nm, 길이 10 μm 이하, 순도 90%의 물성을 가지고 있는 다중벽탄소나노튜브이다.

4. 탄소나노튜브의 정전기적 영향 평가

카세트 내부 벽면(internal wall)에 탄소나노튜브가 붙을 수 있는 가능성을 평가하기 위하여 카세트 별로 양에 따라 벽면에 달라붙는 양을 파악하였다. 정전기가 없는 칭량접시(weighing dish)에 일정량(25 mm 카세트: 1 mg, 2 mg; 37 mm 카세트, 2 mg, 3 mg)을 5분간

올려놓고 카세트를 덮어서 정전기에 의하여 벽에 붙는 상황을 모사하였다. 이후 카세트 내부 벽면을 1.5 cm² 크기로 석영여과지(Cat. No. 225-1825, SKC Inc., USA)를 잘라서 두 번 카세트 내부 벽면을 닦아내는 표면채취(wipe sampling)를 하여 원소탄소(Elemental Carbon, EC)분석을 실시하였다. 분석값은 카세트 내부 표면적이 다르기 때문에 내부 표면적을 계산하여 카세트 내부 표면적당 탄소나노튜브의 무게로 환산하였다. EC를 분석하는 이유는 탄소나노튜브가 90%이상 EC로 이루어져 있어 탄소나노튜브의 측정지표로 정량분석에 사용되고 있기 때문이다(NIOSH, 2013; KOSHA, 2016). 실험 시 온도는 20°C ± 5°C, 습도는 50% ± 10%인 항온항습실에서 진행하였다.

5. 원소탄소(EC) 분석

본 연구에서는 KOSHA Guide A-162-2016을 이용하여 분석을 하였다. 열광학적 분석기기-불꽃이온화검출기(Thermal-optical analyzer-Flame ionization detector (FID), Sunset Laboratory, USA)를 이용하였다. 탄소나노튜브 혹은 탄소나노섬유를 취급하는 작업환경에서 대상 입자상물질을 전처리한 석영여과지에 포집하여 첫 단계에서는 헬륨가스를 이용하여 증기 화시킨 후 유기탄소를 분석하고, 두 번째 단계에서는 헬륨/산소 복합 가스를 이용하여 원소탄소를 태워 메탄가스로 전환시킨 후, 불꽃이온화검출기(FID)로 메탄을 정량한다(KOSHA, 2016).

III. 연구결과

1. 카세트 재료의 표면저항 측정 결과(surface resistance)

카세트 재료에 따른 표면저항 측정결과는 Table 1과 같다. 폴리프로필렌에 18% 카본블랙이 첨가되어

있는 25 mm 카세트의 경우 표면저항이 $1.21 \times 10^3 \Omega$ 이하로 측정되었다. 투명한 폴리스티렌 재질의 25 mm와 37 mm 카세트의 경우에는 각각 $10.02 \times 10^9 \Omega$ 과 $10.59 \times 10^9 \Omega$ 로 정전기가 존재하는 범위로 측정되었다. 추가적으로 일반적으로 사용하는 아크릴은 측정범위를 벗어나서 정전기가 매우 높음을 알 수 있었고, 무정전 아크릴의 경우 $1.39 \times 10^7 \Omega$ 으로 측정되었다.

Figure 1은 IEC 61340-5-1(2016)에서 규정한 전도성(conductive), 분산성(dissipative), 절연성(insulative)의 범위에 따른 본 연구에서 측정한 3개의 카세트의 표면저항을 나타낸 것이다. 일반 아크릴판(general acrylic sheet)과 무정전 아크릴판(anti-static acrylic sheet)의 표면저항도 함께 측정하여 카세트의 표면저항을 이해하는데 도움이 되도록 하였다.

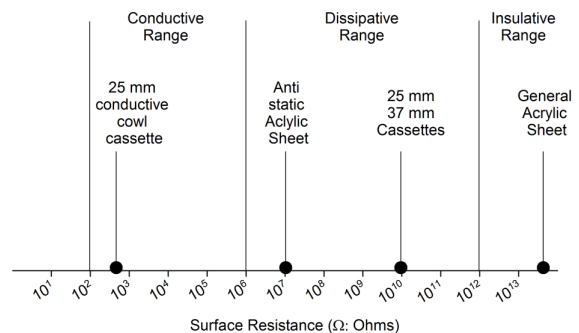


Fig. 1. Surface resistance ranges between conductive, dissipative, and insulative according to IEC 61340-5-1(2016)

2. 탄소나노튜브 측정 시 정전기의 영향 평가

탄소나노튜브가 벽면에 붙는 양을 EC 농도로 측정하였고 Table 2에 나타내었다. 탄소나노튜브의 양에 따라 분석한 결과 폴리프로필렌에 18% 카본블랙이 포함된 25 mm 전도성 카세트에서는 모두 검출한

Table 1. Results of surface resistance by cassettes

Cassette	Materials	Surface resistance
25 mm conductive cowl cassette	Polypropylene with 18% carbon black	$<1.21 \times 10^3 \Omega^*$
25 mm cassette	Polystyrene	$10.02 \times 10^9 \Omega$
37 mm cassette	Polystyrene	$10.59 \times 10^9 \Omega$
General Acrylic Sheet	Acrylate polymer	∞^\dagger
Anti static Acrylic Sheet	Acrylate polymer with non-electrostatic coating	$1.39 \times 10^7 \Omega$

*less than $10^3 \Omega$, material has lower surface resistance than limit of detection

† greater than $10^{12} \Omega$, material exceeded the highest detection limit of surface resistance

Table 2. Concentration of Elemental Carbon on the Surface of cassette wall by cassette type

Item	Amount of CNT (mg)	EC Concentration ($\mu\text{g}/\text{Internal surface area of cassette (cm}^2\text{))$ AM [*] ±SD [†]
25 mm conductive cowl cassette	1 mg (N=3)	<LOD [‡]
	2 mg (N=3)	<LOD [‡]
25 mm cassette	1 mg (N=3)	0.08±0.05
	2 mg (N=3)	0.25±0.25
37 mm cassette	2 mg (N=3)	0.04±0.03
	3 mg (N=3)	0.07±0.03

*AM: Arithmetic Mean, †SD: Standard Deviation Internal surface area of cassette(Unit: cm^2): 34.5(25 mm conductive cowl cassette), 12.4(25 mm cassette), 19.2(37 mm cassette)

‡LOD: 0.006 $\mu\text{g}/\text{Internal surface area of cassette}(\text{cm}^2)$

계(Limit of Detection, LOD) 미만의 값이 측정되었다. 투명한 폴리스티렌재질로 만들어진 25 mm 및 37 mm 카세트의 경우 각각의 농도별로 실험한 결과 1 mg으로 실험한 25 mm 카세트의 경우 카세트 내부 표면적 당 0.08±0.05 μg 이 측정되었고, 2 mg의 경우 카세트 내부 표면적 당 0.25±0.25 μg 이 측정되었다. 37 mm 카세트의 경우 2 mg의 경우 카세트 내부 표면적 당 0.04±0.03 μg , 3 mg의 경우 카세트 내부 표면적 당 0.07±0.03 μg 의 값을 보였다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 입자상 물질 측정 시 사용하는 카세트의 표면저항을 측정하고, 탄소나노튜브 측정 시 사용하는 카세트 벽면에 붙어서 손실되는 정도를 검증하였다.

본 연구에서도 표면저항 측정 결과에서 정전기가 없는 폴리프로필렌에 18% 카본블랙이 함유되어 있는 25 mm 전도성 카세트를 사용하였을 때 카세트 안쪽 벽면에서 탄소나노튜브가 검출되지 않았음을 벽면에 붙은 탄소나노튜브가 LOD 미만인 것으로 확인하였다. 반면에 투명한 폴리스티렌 재질의 25 mm 카세트의 경우 카세트의 직경이 같다고 하더라도 카세트 내부 표면적 당 0.08±0.05 μg (1 mg), 카세트 내부 표면적 당 0.25±0.25 μg (2 mg)의 EC가 검출되어 카세트의 정전기에 의하여 탄소나노튜브가 카세트 벽면에 붙어 있었음을 알 수 있었다. 마찬가지로 투명한 폴리스티렌재질의 37 mm 카세트의 경우에도 2 mg의 경우 카세트 내부 표면적 당 0.04±0.03 μg , 3

mg의 경우 카세트 내부 표면적 당 0.07±0.03 μg 의 탄소나노튜브가 정전기에 의해 카세트 벽면에 붙어 있음을 알 수 있었다. 이는 투명한 폴리스티렌 재질의 카세트를 사용하여 탄소나노튜브를 채취할 경우 카세트 내부 벽면에 탄소나노튜브가 달라붙어 과소평가를 하게 되는 상황이 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 공기 중 탄소나노튜브 측정 시에는 전도성카세트를 사용하여 측정할 것을 제안한다.

정전기를 제거하는 방법은 다양하다. 가장 간편하게 정전기 제거를 할 수 있는 방법은 폴리에틸렌에 카본블랙을 첨가할 경우에 전도성이 증가한 물질을 만들 수 있으며 약 12%이상 첨가 시에 전도성이 높은 상태를 유지할 수 있다(Lux, 1993). 본 실험에서 사용한 카세트인 25 mm 전도성카세트에는 폴리프로필렌에 카본블랙이 18%가 함유되어서 정전기 제거 효과를 얻을 수 있었다. 또는 정전기를 방지하기 위하여 버튼채취기(button sampler)와 같은 금속으로 제작된 샘플러를 사용하는 것이 대안이다(Baron, 1998). 그밖에도 이온화된 공기를 쏘여 주거나, 뜨거운 수증기, 전도성액체가 정전기를 제거할 수 있는 방법이다(Mardiguian, 2011).

벽면에서 채취된 자료를 함께 포함하여 분석할 경우 분석의 정밀도가 높아짐을 확인하였다(Demange et al., 2002). 일반적인 중량농도 평가 시에 여과지만 취해서 분석하게 되어, 카세트 벽면에 붙은 물질은 제외되기 때문에 중량농도 평가 시에는 IOM 샘플러의 사용을 제안하고, 벽면에 붙은 것도 분석 결과에 포함해야 한다고 보고되고 있다(Woehkenberg & Bartley, 1998, Lidén & Gudmundsson, 2000). 입자상 물질이 벽면에

붙는 것을 미연에 방지하기 위하여 AccuCap(중량분석용), Solu-Cap(화학분석용)과 같이 벽면에 포집되는 것을 원천적으로 방지하기 위해 카세트 내에 추가의 카트리지를 사용하는 것도 정밀도를 높이는 방법이다 (Baron et al., 2003).

사람의 코나 입에서도 입자상 물질이 호흡기로 모두 들어가는 것이 아니라 코 내부의 벽면 등에 붙는 양도 있기 때문에 이에 대한 연구도 앞으로 연구를 해야 하나 결과가 나오기 전까지는 보수적으로 모두 호흡기로 들어간다고 가정을 하여 측정하는 것이 옳다고 생각한다. 뿌리는 정전기 방지제(anti-static spray)를 사용하는 방법이 있으나(Baron et al., 2003), 주로 카본성분으로 이루어져 있어서 탄소나노튜브의 측정 시에는 OC/EC 분석을 수행해야 하기 때문에 결과에 직접적으로 영향이 있기 때문에 적합하지 않다.

상대습도가 20%이하인 경우 카세트가 대전되거나 입자가 대전되는 일이 더욱 빈번해 진다. 정전기에 있어서 상대습도는 매우 중요한 요소이다. 상대습도와 표면저항은 반비례 관계로 습한 환경에서는 표면저항이 줄어 들고, 습도가 낮은 경우에는 표면저항이 늘어나는 현상이 있다(Mardiguian, 2011). 그러나 현장에서 탄소나노튜브를 측정 시 습도를 제어하기 어렵기 때문에 카세트 선정에 신중한 결정이 필요하다. 이에 따라 NIOSH 7400에서는 공기 중 석면 측정 시 낮은 습도에서는 카세트 카울을 전선을 이용하여 접지해야 한다고 기술하고 있다. 호스클램프를 이용하여 카울과 전선의 한쪽 끝을 함께 잡아주고, 다른 한쪽 전선은 접지를 하는 것이다(NIOSH, 1994a).

본 연구에서는 모두 새 제품의 카세트를 사용하였다. 미국 OSHA의 29 CFR Part 1910.1001 App B에서는 공기중 석면 측정의 경우 카세트의 재사용을 금지하고 있다(OSHA, 2017). 카세트를 재사용했을 때의 표면저항의 변화는 본 연구에서 다루지 못하였지만, 향후 재사용 시 표면저항의 변화에 대한 연구도 이루어져야 한다.

나노물질 중 현재까지 가장 독성이 크다고 알려져 있는 탄소나노튜브에 대한 측정 시 카세트 선정에 대한 기술적 정보를 담고 있다. 우리나라에서 탄소나노튜브를 포함한 나노물질 측정에 대한 방법론적 연구가 부족하기 때문에 측정방법에 대한 연구가 필요하다.

V. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 입자상 물질 측정 시 사용하는 카세트의 표면저항을 측정하고, 탄소나노튜브 측정 시 사용하는 카세트 벽면에 붙어서 손실되는 정도를 검증하였다.

폴리프로필렌에 카본블랙 18%를 첨가한 전도성카세트가 표면저항이 가장 낮았고, 투명한 폴리스티렌 카세트의 경우 표면저항이 높아서 입자상 물질들이 벽면에 붙을 가능성을 확인하였다. 실제 탄소나노튜브를 이용하여 실험한 결과 전도성카세트 벽면에서는 탄소나노튜브가 검출되지 않았지만, 전도성이 없는 카세트의 경우에는 카세트 벽면에서 탄소나노튜브가 검출되었다. 따라서 사업장에서 공기 중 탄소나노튜브를 측정 시에는 전도성카세트를 이용하여 측정을 하는 것을 제안한다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2017R1C1B1002717), 한국산업안전보건공단의 “탄소나노튜브 취급 사업장의 탄소나노튜브 노출 특성 및 측정 분석 방법 연구”의 지원으로 수행 되었습니다.

References

- Baron PA, Gregory JD. Electrostatic effects in asbestos sampling I: Experimental measurements. *Am Ind Hyg Assoc J* 1990;51(2):51-62
- Baron PA, Chen CC, Hemenway DR, O'Shaughnessy P. Non uniform air flow in inlets: the effect on filter deposits in the fiber sampling cassette. *Am Ind Hyg Assoc J* 1994;55(8):722-732
- Baron PA. Personal aerosol sampler design: a review. *Appl Occup Environ Hyg* 1998;13(5):313-320
- Baron PA. Factors affecting aerosol sampling. NIOSH. *Manual of Analytical Methods*, 4th ed., third supplement 2003;184:207
- Blackford DB, Harris GW, Revell G. The reduction of dust losses within the cassette of the SIMPEDS personal dust sampler. *Ann Occup Hyg* 1985;29(2):169-180
- Dahm MM, Evans DE, Schubauer-Berigan MK, Birch ME, Fernback JE. Occupational exposure assessment in

- carbon nanotube and nanofiber primary and secondary manufacturers. *Ann Occup Hyg* 2012;56(5):542-556
- Demange M, Görner P, Elcabache JM, Wrobel R. Field comparison of 37-mm closed-face cassettes and IOM samplers. *Appl Occup Environ Hyg* 2002;17(3):200-208
- De Volder MF, Tawfick SH, Baughman RH, Hart AJ. Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *science* 2013;339(6119):535-539
- Harrison RM, Tilling R, Romero MSC, Harrad S, Jarvis K. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmos Environ* 2003;37(17):2391-2402
- Heal MR, Beverland IJ, McCabe M, Hepburn W, Agius RM. Intercomparison of five PM10 monitoring devices and the implications for exposure measurement in epidemiological research. *J Environ Monit* 2000;2(5):455-461
- International Agency for Research on Cancer(IARC), Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans(Volume 111).;2017
- International Electrotechnical Commission(IEC), Electrostatics - Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena - General requirements(IEC 61340-5-1).;2016
- Johnston AM, Vincent JH, Jones AD. Measurements of electric charge for workplace aerosols. *Ann Occup Hyg* 1985;29(2):271-284
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), Carbon nanotubes or carbon nanofibers as Elemental Carbon(KOSHA Guide A-162-2016).;2016
- Kumar, P., Fennell, P., Symonds, J., Britter, R. Treatment of losses of ultrafine aerosol particles in long sampling tubes during ambient measurements. *Atmos. Environ* 2008;42(38):8819-8826.
- Lee JH, Ahn KH, Kim SM, Kim E, Lee GH, Han JH, Yu IJ. Three-day continuous exposure monitoring of CNT manufacturing workplaces. *Biomed Res Int* 2015
- Lidén, G., Jüringe, L., & Gudmundsson, A. Workplace validation of a laboratory evaluation test of samplers for inhalable and "total" dust. *J Aerosol Sci* 2000;31(2):199-219
- Liu BY, Pui DY. Equilibrium bipolar charge distribution of aerosols. *J Colloid Interface Sci* 1974;49(2):305-312
- Liu BY, Pui DY. "Electrical neutralization of aerosols." *J Aerosol Sci* 1974;5(5):465-472
- Liu BY, Pui DY, Rubow KL, Szymanski WW. Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration. *Ann Occup Hyg* 1985;29(2):251-269
- Lux F. Models proposed to explain the electrical conductivity of mixtures made of conductive and insulating materials. *J Mater Sci* 1993;28(2):285-301
- Mardiguian M. Electro Static Discharge: Understand, Simulate, and Fix ESD Problems. 3rd ed. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.; 2011
- Mark D, Vincent JH. A new personal sampler for airborne total dust in workplaces. *Ann Occup Hyg* 1986;30(1):89-102
- Ministry of Environment(MoE), Development of nanomaterials distribution measurement method and investigation of distribution of nanomaterials in Korea ;2011
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH), ASBESTOS and OTHER FIBERS by PCM. 7400. NMAM (NIOSH Manual of Analytical Methods); 1994a
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH), Particulates not Otherwise Regulated, Total. 0500. NMAM (NIOSH Manual of Analytical Methods); 1994b
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH), Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers, 2013
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA), Appendix B to 1910.1001 Detailed Procedures for Asbestos Sampling and Analysis Non-Mandatory, 2017 Available from:URL:https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9997
- Park KR, Jeong YJ, Baik DH, Lee GW. Development of Multi-Functional Continuous CNT Fibers. *Polym Sci and Tech* 2010;21(2):167-174
- Puskar MA, Harkins JM, Moomey JD, Hecker LH. Internal wall losses of pharmaceutical ducts during closed-face, 37-mm polystyrene cassette sampling. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991;52(7):280-286
- Reynolds SJ, Nakatsu J, Tillery M, Keefe T, Mehaffy J et al. Field and wind tunnel comparison of four aerosol samplers using agricultural dusts. *Ann Occup Hyg* 2009;53(6):585-594
- Taiwo AM. Source apportionment of urban background particulate matter in birmingham, united kingdom using a mass closure model. *Aerosol Air Qual Res* 2016;16(5):1244-1252
- Tsai SC Characterization of airborne nanoparticle loss in sampling tubing. *J Occup Environ Hyg* 2015;12(8):D161-D167.
- Woehkenberg ML, Bartley DL. Inhalable aerosol samplers. *Appl Occup Environ Hyg* 1998;13(5):274-278
- Yin, Z., and Dai, Z. Investigating the nanoparticles penetration efficiency through horizontal tubes using an experimental approach. *Adv Math Phys*, 2015.