한국환경보건학회지, 제45권 제5호(2019)
J Environ Health Sci. 2019; 45(5): 405-425

pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2019.45.5.405

초청논문 | Invited article

분사형 소비자 제품 중 나노 물질의 흡입 노출 평가 방법

박지훈* · 박미진** · 윤충식**,***,†

*한국과학기술연구원 유럽연구소 환경안전성연구단,
**서울대학교 보건대학원 환경보건학과, ***서울대학교 보건환경연구소

Methodologies for Inhalation Exposure Assessment of Engineered Nanomaterial-containing Consumer Spray Products

Jihoon Park*, Mijin Park, and Chungsik Yoon**,***,†**

**Environmental Safety Group, Korea Institute of Science and Technology Europe Forschungsgesellschaft mbH*
***Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University*
****Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University*

ABSTRACT

Objective: This study aimed to review the methodologies for evaluation of consumer spray products containing engineered nanomaterials (ENM), particularly focusing on inhalation exposure.

Method: Literature on the evaluation methods for aerosolized ENM exposure from consumer spray products were collected through academic web searching. Common methodologies used in the literature, including research reports and academic articles, were also introduced.

Results: The number of ENM-containing products have shown a considerable increase over recent years, from 54 in 2005 to 1,827 in 2018. Currently there is still discussion over the existing regulations with regard to product safety. Analysis of both ENM suspensions in the products and their aerosols is important for risk assessment. Comparison between the phases suggests how the size and concentration of particles change during the spray process. To analyze the ENM suspensions, dynamic light scattering, electron microscopy techniques, and inductively coupled plasma with mass spectrometry were used. In the aerosol monitoring, direct-reading instruments have been used to monitor the aerosols and conventional active sampling is used together to supplement the lack of real-time monitoring. There are also some models for estimating inhalation exposure. These models may be used to estimate mass exposure to nanomaterials contained in consumer products.

Conclusion: Although there is no standardized method to evaluate ENM exposure from consumer products, many concerns about ENM have emerged. Every potential measure to reduce exposure to ENM from spray product use should be implemented through a precautionary recognition.

Key words: Aerosol, nanomaterial, consumer product, exposure, modeling, spray

I. 서 론

시중에는 다양한 종류의 생활화학제품이 판매되고 있으나, 일반 소비자들은 시중에서 판매되는 제품에 대해서는 합법적인 규제 기준에 적합한 것이기 때문에 안전하다고 여기는 경향이 있다.[1] 생활화학제품을 사용함으로써 얻을 수 있는 편리성과 많은 이점에도 불구하고 다른 한편으로는 알 수 없는 유해 함

†**Corresponding author:** Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea, Tel: +82-2-880-2729, Fax: +82-2-745-9104, E-mail: csyoon@snu.ac.kr
Received: 23 July 2019, Revised: 28 August 2019, Accepted: 29 August 2019

유 성분으로 인한 건강상 위험도 존재한다.[2] 인류가 개발한 수 많은 화학물질 중 독성이 알려진 일부 물질을 제외한 상당 수가 여전히 안전성에 관한 정보가 부족하여 사용자 건강에 미치는 영향을 가늠하기 어렵다. 또한 시장으로 새로 도입되는 화학물질의 수도 빠른 속도로 증가하고 있어 건강 위해성 평가를 위한 과학적 자료를 확보하는 것도 한계가 있다. 국내에 유통되는 화학물질 중 약 15% 정도가 안전성 시험을 통해 유해성이 확인되고 있는 점을 감안하면 다수의 화학물질이 유해성 검증이 제대로 이루어지지 않은 상태로 소비되고 있다.[3]

「화학물질관리법」 개정과 「화학물질 등록 및 평가에 관한 법률」의 시행으로 유해화학물질을 포함하는 생활화학제품에 대한 관리가 가능해졌다.[4] 제조업종을 중심으로 화학물질에 대한 직업 노출 자료는 꾸준히 축적되어 왔으나, 가습기 살균제 사고 이후 화학물질에 대한 대중의 불신과 우려가 사회 문제화 되면서 최근 들어 생활화학제품 관련 연구도 활발히 진행되고 있다. 2019년 1월부터 시행되는 「생활화학제품 및 살생물제의 안전관리에 관한 법률」(이하 화학제품안전법: 약칭)에서는 나노물질에 대한 정의를 내리고 있는데, 특히 분사형 제품에 나노물질이 함유될 경우 흡입 노출로 인한 우려와 위험이 더욱 커질 수 있기 때문에 이에 대한 연구도 필요한 시점이다.

나노 기술의 발달은 생활화학제품의 영역에 이르기까지 나노 물질(Engineered nanomaterials, ENMs)의 적용 범위를 확대시켰다. 나노 물질에 대한 노출은 나노 제품 제조단계에서의 직업적 노출부터 최종 제품 사용단계에서의 소비자 노출과 폐기 후 환경 노출까지 광범위하게 이루어진다.[5] 이 중 사용 단계에서 소비자의 건강 영향에 관한 연구는 다른 단계에 비해 미흡하였다. 특히 소비자 개인의 제품에 대한 사용 패턴이 크게 다르고 복잡한 특성이 있기 때문에 유해 물질 노출로 인한 건강 위해성을 규명하는 것은 매우 어렵다.[6-7] 나노 제품 사용으로 인한 나노 물질 노출 및 잠재적인 건강상 위험은 물질의 물리화학적 성질과 존재 형태(제품 내 함유된 상태 또는 공기 중으로 분사된 상태)에 영향을 받는다.[8-10] 분사형 제품에 함유된 나노 물질은 용매와 혼합되어 콜로이드 형태로 존재하는데, 공기 중으로 분사될 때 분산되는 나노 물질은 호흡기로 직접 침투가 가능하므로 인체 영향 측면에서 특히 위험하다.[11-12]

현재 소비자용 생활화학제품에 함유된 나노 물질에 대한 체계화된 단일 평가 방법은 아직 부재한 상황이며, 기존 연구에서는 과학적 경험을 통해 정립된 나노 물질의 분석 및 측정 방법에 관한 방법들 중 일부를 목적에 맞게 혼용하여 평가하고 있다. 특히 공기 중으로 분사된 나노 물질의 거동 특성과 노출과 관련된 연구는 최근에서야 일부 진행되었으며, 각 연구에서 사용된 방법론적 내용들도 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 나노 물질이 함유된 분사형 생활화학제품을 대상으로 기존 연구에서 적용한 흡입 노출 평가 방법론들을 검토함으로써 향후 관련 연구 수행과정에서 적합한 방법론을 준용할 수 있도록 제시하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 2018년까지 일반 소비자용 생활화학제품에 함유된 나노 물질에 대한 위해성 평가와 관련된 국내외 보고서와 노출 평가 관련 연구 중 특히 흡입 노출 평가와 관련된 연구 논문을 선정하여 각 연구에서 적용한 방법론들을 정리하였다. 국내 보고서는 우리나라 관련 부처인 환경부와 국립환경과학원, 식품의약품안전처에서 공개하고 있는 생활화학제품 관련 보고서를 수집하였으며, 국외 보고서의 경우 나노 제품과 관련된 연구를 수행한 네덜란드의 국립보건환경연구원(National Institute for Public Health and the Environment, 이하 RIVM)과 유럽연합(European Union, 이하 EU), 덴마크 환경부(Danish Ministry of the Environment, Environmental Project)에서 발간한 보고서의 연구 방법 및 결과들을 수집하였다. 관련 연구 논문은 *Sciencedirect* (http://www.sciencedirect.com/science/search)와 *Scopus* (https://www.scopus.com/)홈페이지에서 "consumer product","exposure", "spray","nano","inhalation" 검색어를 조합하여 얻은 114개의 논문 중 개별 논문의 초록을 검토하여 흡입 노출 평가 방법론과 관련된 논문 57편을 선정하였다. 선정된 모든 국내외 보고서와 연구 논문을 통해 나노 제품에 대한 주요국가의 규제 현황, 제품 내 나노 물질의 정성 및 정량을 위한 분석방법, 공기 중으로 분사된 나노 물질에 대한 측정 및 평가 방법과 흡입 노출 추정을 위한 모델링 방법들을 검토하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 각국의 나노 물질 함유 제품 및 주요 규제 현황

나노 물질을 함유하고 있는 생활화학제품 수는 전 세계적으로 지난 10여 년 간 지속적인 증가 추세를 보이고 있다.[10,13-14] 미국 Wilson Center의 "The Project on Emerging Nanotechnologies"에서 파악한 나노 제품의 수는 2005년 54개 제품에 불과하였으나, 2018년 기준 1,827개로 증가하였다(https://www.wilsoncenter.org/). 개별 나노 제품들을 대상으로 제품에 표시(labelling)된 나노 물질을 기준으로 분석한 결과, 나노 제품이지만 함유 물질 표시를 하지 않았거나 함유 성분에 대한 상세한 설명이 미흡한 제품이 전체 제품 중 약 49%로 다수를 차지하였다. 나머지 중 47%가 최소 한 개 이상의 물질 표시를 하고 있는데, 금속과 금속 산화물이 전체 제품 중 약 37%의 제품에 함유된 것으로 표시되었으며, 카본나노튜브(carbon nanotube), 풀러렌(fullerene), 그래핀(graphene) 등 탄소를 기반으로 하는 나노 물질과 실리콘도 제품에 이용되고 있다(Fig. 1(a)). 특히, 금속 나노 물질 중 이산화 티타늄, 이산화 규소, 산화 아연이 가장 많이 생산되지만 생활화학제품에는 은 나노가 가장 많이 적용이 되고 있다.[14-16] 제품에 함유된 나노 물질은 제품의 기능 향상을 목적으로 많이

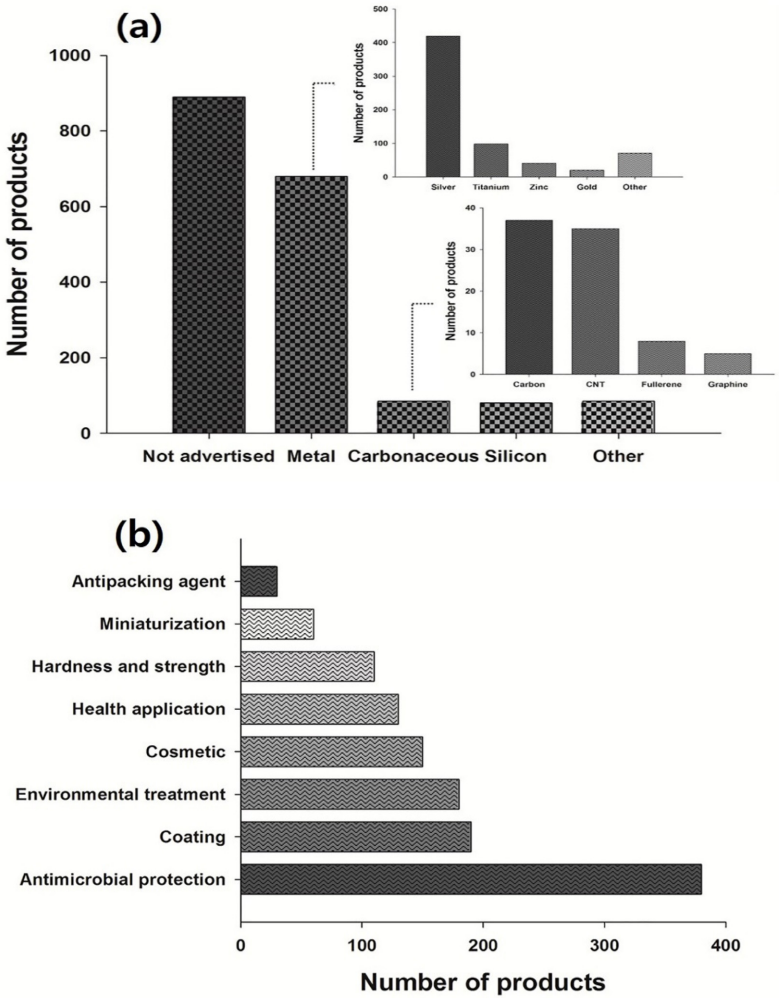

Fig. 1. Compositions of claimed ENMs(a) and expected benefits of ENM additives into consumer products(b)

이용되는데(Fig. 1(b)), 항균 기능 강화를 위한 용도의 비율이 가장 크며 이 외에도 코팅, 환경 처리, 화장품 등 용도로도 사용되고 있다.[14]

나노 물질 함유 표시가 되지 않은 제품이 많은 것은 현재 나노 제품에 대한 규제 현황의 문제와 직결되는 부분이다. 함유 물질 표시는 소비자들로 하여금 제품 성분에 대한 정보를 획득할 수 있는 정보원일 뿐 아니라 구매 여부까지 영향을 미칠 수 있다. 나노 제품의 증가에도 불구하고 유럽 연합에서 화장품과 식품(첨가물 포함), 식품 포장용기를 대상으로 하는 규제 외에는 전 세계적으로 생활화학제품군의 나노 물질에 대한 규제는 미흡한 상황이다(Table 1). 또한 현행 규제법안들이 나노 물질의 제조부터 판매에 이르기까지 제품 안전성이나 환경 영향 측면에서 충분히 커버할 수 있는지에 대한 논쟁도 계속 이어지고 있다.[17] 예를 들어, ENMs를 한 물질 군으로 통칭하여 전체적으로 관리를 할 것인지, 아니면 개별 ENMs 종류에 따라 각각 다르게 관리할 것인지도 지속적 논란이 되고 있다. 전자는 모든 개별 ENMs을 각각 관리하는 것이 현실적으로 어려움에 근거하며, 후자는 어떤 종류의 개별 ENM이 각각 다른 물리화학적 특성을 가지므로 통합 관리가 어렵다는 주장이다. 이처럼 현존하는 규제들은 나노 물질에 대한 독성학적 자료의 부족, 평가 방법의 부재 등 여러 복합적인 요인에 의해 미완의 상태에서 부분적으로 작동하고 있다.[18-19]

나노 물질 평가에 대한 불확실성에도 불구하고 미국에서는 나노 물질에 대해 독립적인 법률은 제정하고 있지 않으나, 유해물질규제법(Toxic Substances Control Act, TSCA) 하에서 약 160개의 나노 물질을 승인하였으며, 이 중 식품 첨가물과 의약품, 화장품에 사용되는 일부 나노 물질에 대해서는 미연방 식품 및 의약품, 화장품에 관한 법률(Federal Food, Drug, and Cosmetic Act, FFDCA)로 규제하고 있다.[20]

유럽에서도 최근 REACH 기준에 상응하는 21개 나노 물질과 이를 함유한 화학 물질이 등록되었다.[21] 유럽연합의 화장품 법률(The Regulation on Cosmetic Products)에서는 나노 물질을 함유하는 제품에 대해 제조자가 시장으로 도입되기 최소 6개월 전 사전 고지를 하도록 규정하고 있는데(European Commission, 1223/2009/EC), 함유된 나노 물질에 대한 명확한 확인 또는 규명을 포함하여 물리화학적 특성, 매년 시장으로 도입될 것으로 예상되는 나노 물질의 양(제품 내 함유), 독성 및 안전성에 관한 정보, 예측 가능한 노출 상황 등이 포함되어야 한다.[18,22] 그러나 나노 물질에 의한 영향은 물질의 전 주기적 거동과정에서 나노 물질의 형태에 따라 달라질 수 있다.[19] 나노 물질의 형태는 전 주기적 거동 과정에서 단일 형태에 의해 존재하지 않고 물리적 반응으로 인해 그 형태가 변화할 수 있는데, 이 때 변화된 형태의 나노 물질이 기존 나노 물질의 정의(여러 정의가 제시되어 있으나 통상 1-100 nm 기준)에도 부합하는지에 대한 논란이 발생할 수 있다. 따라서 유럽화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)은 최근 나노 물질의 정의 요건을 충족시킬 수 있도록 나노 형태의 구별 방법이 포함된 가이드라인 초안을 제시하였다. 여기에는 REACH 하에서 나노 물질 등록을 위한 최소 요건으로 특정 형태 또는 모양, 표면의 화학적 특성, 입자의 크기(분포)에 대한 정보를 제시하고 있다.[19]

우리나라는 생활화학제품에 사용되는 나노 물질에 대한 별도 규정이 마련되어 있지 않으나, 2012년부터 정부 주도로 나노 안전관리 종합계획을 수립하여 현재까지 진행되고 있다. 제1차 계획(2012-2016)에서는 정부 관련 부처간 협력 방안과 나노 물질의 안전 관리를 위한 장기 종합계획 수립을 목표로 하였다. 2019년 현재 나노 안전관리를 위한 규제 시스템의 정립 및 고도화, 지속 가능한 나노기술 개발을 목표로 제2차 종합계획(2017-2021)이 진행되고 있다.[23] 또한 서론에서 언급한 화학제품안전법이 올해 시행되어 아직은 그 영향이 미미하지만 향후 본격적인 관리가 시작되면 그 영향이 직간접적으로 해당 제품의 등록, 승인 및 사용 등에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

세계적인 규제 추세를 종합했을 때, 결국 생활화학제품에 함유되는 나노 물질의 규제가 어려운 이유는 일차적으로 나노 물질과 나노 기술에 대한 국제적 합의 부재를 원인으로 꼽을 수 있다. 이는 제품에 대한 나노 물질 표시(labelling) 문제와도 관련이 있는데, 결국 제품을 최종적으로 선택하는 소비자의 알 권리와 안전과도 직결된다. Throne-Holst & Rip (2011)은 생활화학제품에서 나노 라벨링의 어려움을 다음과 같은 원인으로 제시하였다.[24] 첫째, 나노 기술과 나노 물질의 정의에 대한 국제적 조화 또는 합

Table 1. Status of International regulations and guidelines on ENMs in consumer products

Nation	Regulations /guidelines	Type		Subject ENM(s)	Contents
		Registration	Declaration		
USA	TSCA	○		Titanium dioxide Aluminum Silica	- Submission of material information at least prior to 90 days when the target ENMs are manufactured or used
	FIFRA	○		Silver	- Silver nanoparticle which has an antibacterial function is classified as biocide, submission of information on the target ENMs in mandatory
	FFDCA	○	○		- Submission of information on the ENMs in products, mandatory labeling
EU	REACH (1907/2006/EC) & CLP (1272/2008/EC)	○	○	ENMs	- Submission of information on the ENMs in products
	Cosmetics Regulation (1223/2009/EC)	○		ENMs	- Notification of containing ENMs in cosmetic products by the responsible person six months prior to being placed on the market, submission of information on the ENMs.
	BPR (528/2012/EC)	○	○	ENMs	- Information including procedures of registration/declaration, hazard on health and environment should be submitted
	FCM (1935/2004/EC; 10/2011/EC; 450/2009/EC) FAR (1333/2008/EC) NFR (2015/2283/EC)		○	ENMs	- Submission of information on the ENMs in products and labeling
	SCCS - SCCSNFP/0005/98 - SCCS/1489/12 - SCCP/0932/05 - SCCP/1147/07	Recommendation		- Titanium oxide as pigment - Zinc oxide - Zinc oxide in sun cream - Safety of ENMs in cosmetic products	- Guidance for the safety evaluation of ENMs as cosmetic ingredients
Germany	Action Plan Nanotechnology	○	○	ENMs	- Mandatory labeling of risk information on products
Australia	ICA	○		ENMs	- Mandatory ENM labeling and submission of physicochemical information
France	Le Grenelle	○		ENMs	- Mandatory declaration of product distribution in the market when ENM-containing products are imported, manufactured and sold
Canada	CEPA	○		MWCNTs	- Recommendation of submission relevant to safety information on nano-enabled products
Taiwan	Nano-mark program		○	ENMs	- Voluntary labeling on ENM-containing consumer products
Korea	-	No specific regulations		ENMs	- 1st Korean Governmental-wide Plans for Nano Safety and Control (2012-2016; completed) - 2nd Korean Governmental-wide National Plans for Nano Safety and Control (2017-2021; in progress)

***Abbreviations*:** ENMs, Engineered nanomaterials; TSCA, Toxic Substances Control Act; FIFRA, Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act; FFDCA, Federal Food, Drug, and Cosmetic Act; REACH, Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals; CLP, Classification, Labelling and Packaging; FCM, Food Contact Materials; SCCS, Scientific Committee on Consumer Safety; BPR, Biocidal Products Regulation; ICA, Industrial Chemical Acts (notification and assessment); CEPA, Canadian Environmental Protection Act; MWCNTs, Multi-Walled Carbon Nanotubes'-; NFR. Novel Food Regulation; FAR, Food Additives Regulation.

의가 이루어지지 않고 있다. 둘째, 책임소재의 불분명, 셋째, 일반 시민들의 나노 기술에 대한 부족한 지식을 꼽고 있다. 결국 이로 인해 나노 물질 정보 제공에 대한 제조자의 의무사항이 모호해질 수 있으며, 최종적인 피해는 소비자의 몫이 될 수 밖에 없다. 실제로 "나노"용어 자체가 물질의 함유와 관계없이 순수 영업용 수단으로 사용되는 경우가 많은데, 소형화를 강조하기 위해 단순히 "나노" 용어를 사용하기도 하며, 반대로 제품 제조에 나노 물질을 사용하거나 나노 기술이 적용되었음에도 관련 정보를 표기하지 않는 경우도 많다. 즉, 나노 라벨링에 대한 규제가 확립되지 않았거나 모호하기 때문이다. 결국 나노 라벨링에 대한 규제 방법은 자발적 라벨 표기 의무(voluntarily labelling)와 강제적 라벨 표기 의무(mandatory labelling)의 방법으로 요약할 수 있다.[17] 전자의 경우 나노 라벨링을 제조자의 자율에 맡길 경우 소비자의 피해로 이어질 가능성이 생기며, 후자의 경우에는 제품 구입 시 해당 제품에 대한 의도적 기피현상을 유발할 수 있어 기업에 불리하게 작용할 수 있다.[25-26]

2. 분사형 제품 내 함유 나노 물질 분석 방법

현재까지 제품에 함유된 나노 물질에 대한 독성 및 노출 평가에 관한 공인된 표준시험법이나 가이드라인은 마련되어 있지 않다. 따라서 기존에 제시되어 있는 관련 표준시험방법 또는 가이드라인을 준용할 수 있다(Table 2). 이들 표준과 가이드라인을 내용에 따라 구분하면 크게 용매(제품) 내 존재하는 나노 물질의 분석방법과 공기 중 나노 물질의 평가, 독성시험 방법으로 할 수 있는데, 주로 분석 기기와 절차 전반에 관한 내용에 대한 권고(recommendation)적 내용을 다루고 있다.[11]

공기 중으로 분사된 나노 물질의 노출 정도를 평가하기에 앞서 해당 나노 물질의 기본적인 물리화학적 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 즉, 제품에 함유된 나노 물질의 특성은 공기 중으로 분사되었을 때 여러 환경 변수(배경 농도, 온도 및 습도, 분사 장소 등)의 영향으로 거동 자체가 변화할 수 있기 때문에 노출 평가에 있어 분사 전, 후의 나노 물질의 특성을 파악하는 것이 중요하다.[11]

현재까지 생활화학제품과 같이 용매 내에 함유된 순수 나노 물질을 확인할 수 있는 분석 기술은 제한적이다. 특히, 나노 물질이 제품화 되는 과정에서 여러 용매와 혼합되어 제조되기 때문에, 분석에 앞서 복잡한 전처리 과정이 오류없이 선행되어야 한다. 현재까지 나노 물질의 정성, 정량 분석에 적용 가능한 방법에는 여러가지가 있으나 그 중 생활화학제품에 함유된 나노 물질의 물리화학적 특성을 파악하기 위해 활용할 수 있는 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

먼저, 나노 물질의 물리적 특성을 파악하기 위해서는 광 산란(light scattering)식 분석 방법과 전자현미경 분석 방법이 널리 사용되고 있다(Table 3). 광 산란 방식의 분석 방법으로는 동적 광 산란(dynamic light scattering)방법이 널리 사용되는데, 제품 내 개별 또는 응집(aggregation) 입자의 크기와 분포를 쉽고 빠르게 확인할 수 있다.[27-29] 그러나 입자의 형태에 대한 정보 파악이 제한적이고, 응집으로 인해 입자의 크기가 증가할수록 빛의 산란 세기가 증가하여 작은 입자로부터 산란되는 빛의 세기가 무시될 수 있어 과소평가될 수 있는 단점이 있다.[30-33] 따라서 이를 보완하기 위해 전자현미경 분석법을 이용한다. 전자현미경 방법은 제품 내 함유 나노 물질의 크기와 분포, 형태 판별이 가능하며, 에너지분광분산스펙트럼(energy dispersive (x-ray) spectrometer, EDS 또는 EDX, 이하 EDS로 표기)을 갖출 경우 물질의 화학적 조성도 동시에 분석이 가능하다. 나노 물질 분석에는 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 투과전자현미경(transmission electron micro-scope, TEM)이 사용되는데, 전자 빔(beam)의 파장에 따라 높은 해상도를 구현할 수 있다.[32] SEM은 분석대상 물질에 대해 복잡한 전 처리 과정 없이 제품의 액상 시료를 필터나 웨이퍼 재질의 표면 위에 떨어뜨린 후 건조과정을 거쳐 분석한다. 상대적으로 시료의 준비과정이 단순하여 넓은 부위나 많은 수의 나노 물질의 확인이 가능하나, 시료의 표면만 관찰이 가능하고, 입자 간 응집으로 인해 여러 겹으로 겹쳐 있을 경우 단일 입자에 대한 정보를 파악하기 어려운 단점이 있다. 또한 액상 시료를 표면에 떨어뜨리는 과정에서 응집 현상이 발생할 수 있어 기존 입자의 특성을 정확히 파악하기 어려울 수 있기 때문에 전처리 과정에서 응집 현상을 최소화 할 수 있도록 주의가 필요하다. TEM은 시료의 두께를 최소화해야 하므로 전처리 과정에 있

Table 2. International norms related to techniques of ENMs and ENMs-contained aerosols evaluation for consumer spray products[11)]

Subject	Guideline	Nation	Title	Purpose	Regulation coverage
ENMs in solution	NIST PCC-7	US	Measuring the size of nanoparticles using transmission electron microscopy (TEM)	Sample preparation and determination of mean size using TEM	Recommended
	NIST PCC-15	US	Measuring the size of colloidal gold nanoparticles using high-resolution scanning electron microscopy (HR-SEM)	Sample preparation and determination of mean size of citrate stabilized gold nanomaterials using HR-SEM	Recommended
	ISO/TR 18196	International	Nanotechnologies-Measurement technique matrix for the characterization of nano-objects	To provide a matrix intended to guide users to commercially available techniques relevant to the measurements of common physicochemical parameters for nano-objects	Recommended
Inhalable ENMs (Aerosol)	ISO/TR 27628	International	Workplace atmospheres: - Ultrafine, nanoparticle and nanostructured aerosols - Inhalation exposure characterization and assessment	Background information and sampling guideline to monitor nano aerosol exposure	Mandatory (in the US)
	DIN EN ISO 10808:2010	Germany	Nanotechnologies: Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing	Assessment of inhalation toxicity for particle mass, size distribution, number concentration and chemical composition	Mandatory
	DIN 33899-1	Germany	Strategies for determination of inhalable ENMs at workplaces	Evaluation of available direct-reading instruments for aerosol monitoring	Mandatory
	DIN 33899-2	Germany	Strategies for determination of inhalable ENMs at workplaces using an optical particle counters	Evaluation of an optical particle counters for aerosol monitoring	Mandatory
Toxicity test (Inhalation)	OECD Guideline 403	International	Acute inhalation toxicity	Obtaining sufficient information on the acute toxicity of aerosols	Mandatory (internationally)
	OECD Guideline 412	International	Sub-acute inhalation toxicity: 28-day study	Obtaining sufficient information on the sub-acute toxicity of aerosols	Mandatory (internationally)
	OECD Guideline 413	International	Sub-chronic inhalation toxicity: 90-day study	Obtaining sufficient information on the sub-chronic toxicity of aerosols	Mandatory (internationally)
	OECD ENV/ JM/MONO Series	International	Dossier on nanomaterials; Series on the safety of manufactured nanomaterials	To provide methodologies for specific tests relevant to human health and environmental safety endpoints	Mandatory (internationally)

Abbreviations: NIST, National Institute of Standards and Technology; PCC, precision custom component; ISO, International Organization for Standardization; OECD, Organization for Economic Cooperation and Development; ENMs, Engineered nanomaterials.

어서 신중을 기해야 한다. 또한 SEM과는 달리 시료의 내부 관찰이 가능한 장점이 있으나 분석과정에서 파악할 수 있는 시야 범위가 제한적이므로 충분한 수의 입자가 관찰될 수 있도록 시료를 준비하는 것이 중요하다. 따라서 제품 내 나노 물질의 함유 농도가 매우 낮을 경우 시료의 대표성을 높이기 위한 농축 과정이 별도로 필요하다. 전 처리가 완료된 시료는 표면(TEM grid)위에 얇게 도포하여 건조시킨 후 분석한다.[30,34]

한편, 나노 물질의 화학적 특성을 파악하기 위해서는 별도의 기기 분석이 필요한데, 보통 금속 성분의 나노 물질을 정성, 정량 분석에는 기존에 제시된 공인 방법과 동일하게 유도결합플라즈마질량분석기(inductively coupled plasma with a mass spectrometer, ICP-MS)가 많이 이용된다.[30,35-45] 최근에는 SP (single particle)-ICP-MS를 이용함으로써 입자의 성분 분석과 개별 입자의 크기를 동시에 분석할 수 있다.[31,46-50] 최근에는 기존 분석 장비들의 단점을 보완하여 혼합물 내 나노 물질의 분리와 입자 크기 별 분석이 가능한 장 흐름 분리 분석기(field flow fractionation, FFF)가 사용되고 있다. FFF 기술은 나노 미터에서 마이크로미터 크기 범위까지 크기 별 분리가 가능하여 높은 정확도와 정밀도 확보가 가능한 기술로 평가된다.[47-48] 특히, FFF 분석 기술의 일종인 A4F-MDA (asymmetric FFF in a multidetector approach) 방법은 자외선 흡수법과 광 산란법, ICP-MS 기능이 모두 갖추어진 분석 방법으로, 해당 물질의 물리적 특성과 화학적 조성 성분을 한 번의 분석으로 동시에 파악할 수 있다.[11,47-48,51-52]

3. 공기 중 분사 나노 물질의 측정 및 평가

제품으로부터 분사된 공기 중 나노 물질의 거동 형태는 크게 네 가지로 분류가 가능하다(Fig. 2). 즉, 개별 나노 입자로서 공기 중으로 분산되는 형태(a), 개별 입자들이 응집(aggregated or agglomerated)된 형태(b), 제품 내 액상 용매에 포함되어 분사되는 형태, 기능적으로 개별 물질을 둘러 쌓여 코팅된 형태로 분사되는 형태로 구분할 수 있다.[53] 공기 중으로 분사된 나노 입자의 거동에 영향을 미치는 요인으로는 제품에 사용된 용매(물 또는 유기용매)와 분사 노즐의 형태(분사 방식), 기타 환경 변수가 복합적으로 작용되나 그 중 가장 결정적 변수는 제품의 분사 방식이다.[11] 분사 방식은 크게 압축 분사형(propellant type)과 분무형(trigger type)으로 구분할 수가 있는데, 압축 분사형은 제품 내 용매를 비롯한 유효 물질들이 압축 가스와 혼합된 형태로, 분사될 때 압축 가스의 힘에 의해 분사되며, 분무형의 경우 제품 내 물질이 단순히 사용자의 물리적인 힘에 의해 분사된다. 기존에 수행된 연구 결과에서는 압축 분사형 제품으로부터 분사되는 작은 입자가 공기 중에 오랜 시간 동안 체류하는 특성으로 인해 사용자의 흡입 노출 위험이 크며, 분무형 제품의 경우 대부분 큰 입자 형태로 분사되어(중력에 의한 작용이 우세) 흡입 노출의 위험은 상대적으로 적은 것으로 보고되었다.[11,45,54] 흡입 노출로 인한 건강상 영향 또는 위험은 사용자 개인의 사용 특성(사용 시간, 주기, 호흡률 등), 분사된 입자의 크기와 물리화학적 특성(응집 형태, 입자의 화학적 조성, 표면 기능성 등)에 의해 달라질 수 있다.[51,55]

공기 중으로 분사된 후 복잡하게 거동하는 나노 물질을 정확히 구분하여 측정하는 것은 매우 어렵다. 특히, 공기 중 입자 측정 과정에서 해당 장소에 존재하는 배경 농도(background particle concentration)가 분사된 나노 입자의 거동에 영향을 미칠 수 있다. 측정 장소에서 높은 배경 농도가 존재할 때, 분사된 나노 입자간 응집(coagulation) 현상을 심화시킴으로써 정확한 노출 정도를 파악하기 어렵다. 따라서 공기 중 나노 입자의 정확한 평가를 위해서는 배경 농도의 조절이 가능한 장소에서 실험 평가가 이루어져야 하나, 일상 생활에서의 소비자 노출 상황을 좀 더 정확히 반영하기 위해서는 실제 생활하는 공간(방, 거실, 사무실)에서 평가되어야 한다. 그러나 실험상의 용이함과 입자의 거동을 정확히 파악하기 위해 대부분의 관련 연구에서는 소형 글로브 박스나 노출 챔버, 클린룸(cleanroom) 등 환경 제어가 용이한 장소에서 실험 연구로 진행하였다(Table 3 & 4).[35,38,40,45,54,56] 소형 글로브 박스나 챔버를 이용한 분사 실험은 상대적으로 제한된 소형 공간에서 분사 실험이 가능하기 때문에 비교적 단시간 내에 공간 내로 빠른 확산이 가능하다. 작은 공간 내에서의 균일한(homogeneous) 입자 분포는 실제 사용자의 활동 반경 내(near-field)에서의 노출을 추정하는데 용이하다. 반면, 클린룸 또는 실제 생활 공간에서의 분사 실험은 사용자의 실제 노출 정도를 정확

Table 3. Summary of methodologies for sampling and analytical techniques

Product type	Analytical methods for suspensions	Aerosol measurement				Exposure model
		Measurement set up	Experimental instruments			
			Real-time monitoring (Target)	Active sampling and analysis*		
				Sample collection	Sample analysis	
- Propellant type - Trigger type	- DLS - (SP-)ICP-MS - Electron microscopy (SEM, TEM) with EDS - FFF	- Small-sized glove box (less than 1 m^3) - Exposure chamber - Clean room - Real room	- SMPS (particle number and size distribution) - CPC (Particle number and size distribution) - OPC (Particle number and size distribution) - APS (Particle number and size distribution) - ELPI (Particle number and size distribution) - Diffusion charger (particle surface area concentration) - Light scattering (particle mass, limited to be applicable to nanoparticles)	- TEM grids - Polycarbonate filter - Mixed cellulose ether filter (limited to collect inorganic substances)	- (SP-)ICP-MS - Electron microscopy (SEM, TEM) with EDS - FFF	- CEM Model - ECETOC TRA model - SprayExpo - ConsExpo - ConExpo Nano

Abbreviations: DLS, diffusive light scattering; SEM, scanning electron microscopy; TEM, transmission electron microscopy; EDS, energy dispersive (X-ray) spectrometer; FFF, field flow fractionation; SMPS, scanning mobility particle sizer; CPC, condensation particle counter; OPS, optical particle sizer; APS, aerodynamic particle sizer; ELPI, electrical low pressure impactor; (SP-)ICP-MS, (single particle-)inductively coupled plasma mass spectrometer; CEM, consumer exposure model; ECETOC TRA, European Centre for Ecotoxicology of Chemicals Targeted Risk Assessment.

*These methods are only limited to inorganic substances. Organic solvents included in consumer products should use other sampling and analytical techniques.

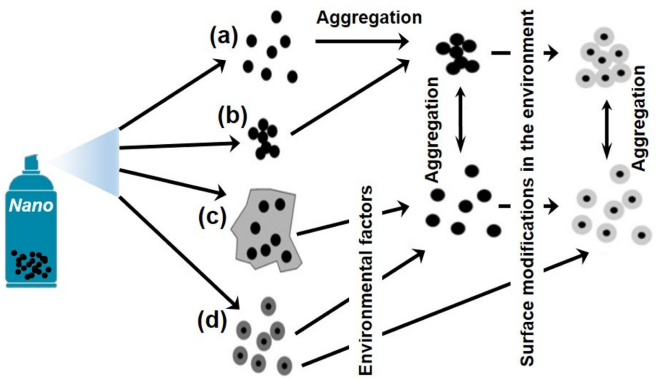

Fig. 2. Release of nanoparticles from commercial products and intended or unintended applications[53]

히 반영할 수 있다.[35,38-39,41-43] 그러나 제품의 사용 특성(분사 방향, 분사 시간, 용도 등)에 따른 차이와 분사된 입자가 전 공간에 걸쳐 고르게 분포되기까지 오랜 시간이 소요되며, 실제 사용자의 활동 반경도 넓기 때문에 노출 추정 값의 변화가 큰 것이 단점이다.

공기 중 입자 상 물질은 전통적으로 단위 공기 당 중량으로 평가를 해왔으나, 입자 상 나노 물질의 경우 물리적 크기가 매우 작아 중량에 미치는 영향이 거의 미미한 수준이다. 따라서 입자의 수 농도(number concentration)와 크기 분포(size distribution) 측정이 가능한 실시간 측정기기를 이용하는데, 측정되는 입자의 물리화학적 특성을 파악하기는 어려운 단점이 있다. 따라서 실시간 측정 방법과 동시에 능동식 시료채취방법(active sampling)을 적용함으로써 입자의 크기 별 수 농도 분포와 기타 물리화학적 특성을 동시에 평가할 수 있다. 능동식 시료채취를 한 다음 공기중 질량 농도 파악, 제품 중 나노 물질 특성을 파악하는 것처럼 전자 현미경이나 ICP-MS를 이용하여 공기중 입자 특성을 파악한다. 실시간 기기를 이용할 때는 기기 별 측정 원리와 측정 가능 범위 및 한계가 다양하므로 기기의 특성을 우선 파악하여 목적에 적합한 기기를 선택하는 것이 중요하다.[57]

공기 중 나노 입자의 측정에 사용되는 실시간 기기는 입자의 수 농도와 크기 분포를 측정할 수 있는 기기가 주로 사용되고 있다. 대표적인 입자 수 농도 측정이 가능한 측정기기로는 SMPS (scanning mobility particle sizer)와 응축식 입자 계수기 (condensation particle counter, CPC)가 대표적이며, 나노 입자 크기부터 마이크로미터 크기 범위의 입자 수를 크기 별로 구분하여 측정하는데 사용된다(Table 3). 또한 입자 수 농도 외에도 필요에 따라 입자의 표면적 농도 측정이 가능한 diffusion charger와 입자의 중량을 평가할 때 사용되는 광 산란(light scattering)방식의 측정 기기도 사용이 가능하나 나노 입자와 같이 중량에 영향이 적은 입자의 측정에는 적합하지 않다.[35,38-43,45,54]

분사형 제품의 경우 공기 중으로 분사된 입자를 측정할 때 용매와 혼합된 입자를 구분할 수 있는 지를 고려해야 한다. 제품으로부터 분사되는 에어로졸은 해당 나노 물질과 용매의 미스트가 무분별하게 혼합된 형태이다(Fig. 2).[11,53] 이는 실시간 기기로 측정할 때 휘발 되지 않은 상태로 부유하는 미스트 용매가 입자로 계수될 수 있어 실제 입자 수 농도보다 과대평가 될 우려가 있다. 따라서 이를 최소화하기 위한 방안으로 일부 연구에서는 측정 기기에 열 탈착기(thermodesorber)를 사용하여 휘발 성분의 용매를 제거한 후 남은 순수 입자만을 측정하는 방법을 적용하였다.[44,54] 열 탈착기의 이용 여부에 따라 공기 중 측정 입자 수 농도는 약 80% 이상 차이가 나는 것으로 보고하였으며, 따라서 별도의 장치 없이 실시간 공기 측정이 이루어질 때에는 상당한 오차가 발생할 수 있다. 반면에 이 때 공기 중 입자가 열 탈착기를 통과하는 과정에서 손실 오차가 발생할 수 있으나, 손실 여부 확인을 위한 추가 실험 결과, 탈착기 내부에서는 나노 입자가 확인되지 않아 손실로 인한 오차는 미비한 것으로 보고되었다.[44,58]

Table 4. Summary of previous studies on the ENMs-contained consumer spray products

Reference	Subjects	Objective(s)	Methods	Key findings
Nørgaard et al. (2009)[56]	Coating sprays: 3 hand pump spray & 1 pressurized can	- To characterize the emitted VOCs - To provide specific source strength data for VOCs and particles released to the air during use of the products	***Spraying and aerosol sampling*** - A closed aerosol chamber (stainless steel) - VOCs: Real-time MIMs monitoring (portable), Tenax TA sampling - Particles: FMPS (6-523 nm), APS (0.5-18.4 μm); available for less than 835 nm due to an instrumental problem - Temp. and RH monitoring - Sampling: direct spraying to a plate (35 cm in front of nozzle), sampling position (20 cm behind the nozzle) ***Analytical method*** - VOCs: GC/MS (qualifying) and GC/FID (quantification) analysis	***VOC emissions*** - Cyclic siloxanes, limonene, chloriated acetones, perfluorinated silane and small alcohols, ketones, ethers - Some detected VOCs: toxic and absent in MSDS ***Particle emissions*** - Pressurized can > pump sprays (100 times higher) - 2.8×10^8 - 3.5×10^8 (Pump sprays), 2.1×10^{10} (Pressurized can) in the range of 6-523 nm (per gram) - Coarse particle: constant during sampling - Decrease of particle conc. in 5 min
Chen et al. (2010)[38]	1 ENM containing spray- (TiO_2 containing spray for cleaner/sanitizer)	- To characterize the aerosol released under a scenario of a realistic spray application - To provide the design, fabrication, and evaluation of an automated aerosol spray generation system for future inhalation studies	***Laboratory environment*** - Well-controlled room with a ventilation system (<0.2 m/s) ***Preliminary countertop studies*** - Gravimetric analysis: dry weight vs. wet weight (spraying for 1-4 sec) - Droplet size distribution: real-time light scattering analysis (2-2,000 μm) ***Human exposure scenario setup Spraying and instrumentations*** Grimm PAS, APS+SMPS, PC filter for SEM analysis, PTFE filter for gravimetric analysis, aluminum foil for surface sampling	***Particle exposure*** - The most droplets size after spraying: 22 μm (CMD) - Final aerosol size after evaporation of solvent: 75 nm - Total TiO_2 aerosol in the breathing zone: 3.4 mg/m^3, 1.6×10^5 $particles/cm^3$ - Nanoparticle fractions of TiO_2 aerosol: 170 $\mu g/m^3$, 1.2×10^5 $particles/cm^3$ ***Exposure estimates*** - Worst case lung burden for human adult: 0.075 $\mu g/m^2$ alveolar epithelium per min

Table 4. Continued

Reference	Subjects	Objective(s)	Methods	Key findings
Hagendorfer et al. (2010)[54]	4 ENM containing sprays Nanoparticle free blank solution	- To identify the size-fractionated characterization and quantification of release from consumer sprays (propellant vs. pump) - To model exposure scenarios and evaluate possible risks due to nanoparticle-containing spray products	***Laboratory environment*** - Glove box setup (~500 particles/cc in 10-500 nm) ***Spraying and aerosol sampling*** - Use of thermodesorber - T Junction: SMPS and electrostatic sampler - Propellant and pump spray using 26 nm AgNP - Number concentration, size distribution, chemical composition and morphology - Spray time: 1 sec ***Analysis of solution*** - Microwave digestion and ICP/MS analysis - Dispersions onto copper grids and TEM analysis	***Bulk analysis*** - Specification: 1,000 mg Ag/L vs. ICP/MS 1,040±40 mg Ag/L - Single particle (6 nm & 15-60 nm; bimodal) vs. aggregated cluster (20-100 nm) ***Aerosol analysis*** - Thermodesorber: low number conc. (similar with background) - Spray amount: 0.68±0.02 g/sec - Substantial decrease of number conc. (after spraying; 3 min) - 10 times higher than background for 30 min - Variation of size distribution and particle loss in several seconds - Release process: first 10s; primary small particles form aggregation/agglomerate, 10-30s; agglomeration process, after 100s; stable size distribution (<100 nm) - Propellant (<100 nm): 3,300-14,000 particles/cc Pump (<100 nm): not detected - Particle size: dispersion < aerosol type
Lorenz et al. (2011)[40]	- 2 ENM labelling sprays - "Nano" labelling sprays (Propellant and pump type)	- To characterize the nanosized aerosol produced by commercial sprays - To compare the characteristics of the nanosized aerosol to the nanosized components found in the dispersions before spraying - To model consumer exposure to nanosized aerosols released from the investigated sprays	***Laboratory environment*** - Use of a glove box equipped with a HEPA filter (300 L volume) ***Solution analysis and aerosol sampling*** - Dispersion analysis (solution): ICP-MS, SEM/TEM with EDS - Aerosol monitoring: SMPS - Spying: 1-5 sec - Weighing before and after spraying using a balance - Modeling exposure to nano-sized aerosols (ICRP model): Male and female	***Particle size and analytical results in dispersions*** - Size: 8-22 nm - Elements: Al, Cl, Mg, Si, Cu, F, Ag, C, O ***Particle size of aerosols*** - Size: 17-305 nm - Elements: Al, C, Ca, Cl, Mg, Si, Cu, F, O, Zn - SMPS data: 11-35.2 nm (propellant), not collected (pump type, similar to background level) ***Exposure estimates*** - Deposited in alveolar: $2.4\text{-}3.6\times10^{10}$ particles/cm^3 (Female), $4.5\text{-}4.8\times10^{10}$ particles/cm^3 (Male) in propellant sprays - Pump type: similar to background level

Table 4. Continued

Reference	Subjects	Objective(s)	Methods	Key findings
Nazarenko et al. (2011)[41]	- 5 ENMs sprays - 5 Non-ENM sprays (regular products)	- To characterize nanoparticles in several nanotechnology-based consumer spray products currently in the market - To characterize potential exposure to airborne nanoparticles due to the use of spray products in a realistic exposure scenario	***Laboratory environment*** - Level 2 biosafety cabinet ***ENM solution analysis*** - TEM & Photon correlation spectrometer ***Aerosol sampling*** - Spraying: 1sec frequency for 3 min - Breathing zone sampling: Mannequin head - Real time monitoring: SMPS+APS (10-20,000 nm), realistic scenario - Nebulizer experiments: particle concentration and size distribution	- Electron microscopy: the presence of nanoparticles & agglomerates (3 nm to 2,500 nm for single and agglomerated particle size) - Nano-sized particles were identified in both nanoproducts and regular products - Use of spray: Wide range of size distributions (ultrafine-coarse particles, 13 nm to 20 μm) - Particle release: alcohol containing products > Water based products
RIVM (2009)[68]	25 non-food consumer products (various phases; liquid, solid, cream, aerosol)	- To investigate ENMs in consumer products - To put the applicability of analytical techniques and the acquired results in a risk assessment	***Product selection*** - On the basis of a nano claim - On the basis of the expectation on the presence of ENMs ***Analytical techniques of ENMs*** - HR-SEM - TEM-EDS - X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)	- Products without a nano claim can contain ENMs - Products with a nano claim are not always contain ENMs - It is of importance to improve the analytical techniques - Validation of analytical methods for ENMs should be recommended
Bekker et al. (2014)[35]	- 2 ENMs sprays - 1 Non-ENM sprays	To identify the influences of temporal and spatial variations on the ENM concentrations	***Laboratory environment*** - Room with well-controlled and ventilation conditions (19.5 m^3) ***ENM solution analysis*** - SEM/EDS and ICP/MS ***Spraying and aerosol sampling*** - Real-time monitoring: SMPS and APS (11.3-20,000 nm), ELPI (43-8,000 nm), NanoTracer (10-300 nm), Surface area monitor (0.004-300 nm) - Off-line sampling: TEM grids, nickel coated nuclepore filter for SEM analysis - Spaying: Near-field (<1 m) and far-field (>1 m), 3 sec spraying with 3 sec interval	***Characterization of ENMs in spray products (solution)*** - Size: 50-200 nm for silica particles, 100-200 nm for titanium particles - Elements: C, F, N, O, Na, Cl, Si, Al, Mg ***Characterization of ENMs in aerosols*** - Size: < 100 nm for the majority of particles - Elements: C, F, O, Cl, Al, Si, Mg - Number concentration: near-field (8.3×10^3-3.9×10^4 particles/cm^3) > far field area (6.9×10^3-4.4×10^4 particles/cm^3) - Surface area: Far-field (57-113 $\mu m^2/cm^3$) > Near-field (57-99 $\mu m^2/cm^3$) - Steady-state concentration after spraying

Table 4. Continued

Reference	Subjects	Objective(s)	Methods	Key findings
Nazarenko et al. (2014)[42]	- 5 ENMs sprays (regular products) - 5 Non-ENM sprays	To quantify the inhalation exposure including inhaled dose and deposited dose for real consumer spray products	***Laboratory environment*** - Level 2 biosafety cabinet ***ENM solution analysis*** - Size, shape, state of agglomeration: copper grids and TEM analysis ***Spraying and aerosol sampling*** - Mannequin's breathing zone sampling - Real time monitoring: SMPS and APS (14 to 20,000 nm) - Quantitative exposure assessment: estimates of inhaled doses (by particle size) and deposited doses (in each part of respiratory tract)	***TEM characterization (ENM solution)*** - Single particle: 3 to 150 nm for each product - Agglomeration: 200 nm-2.5 μm ***Quantitative exposure assessment*** - Exposure to a wide range of particles: 0.002-0.05 ng/kgbw in the range from 14 to 100 nm - Total deposited dose: 10-10,000 ng/kgbw per application - Deposited proportion: ~85-88% in head airway, <10% in alveolar region and <8% in tracheobronchial region - Labeled (non-labeled) ENMs ≠ Analyzed ingredients - No correlation between the presence of ENMs and the determined inhalation exposure data
Kim et al. (2015)[39]	2 antibacterial sprays containing silver nanoparticles (AgNP)	To evaluate the risk of AgNP exposure from antibacterial sprays	***Laboratory environment*** - Exposure chamber (1 m^3) ***Spraying and aerosol sampling*** - Spraying: 15 sec and repeat for 15 sec after 10 min to an air conditioner - Real time monitoring: SMPS and APS (7 to 32,000 nm) - Off line sampling: MCE filter to obtain total suspended particulate and metallic elements (for 25 min), copper grids for TEM analysis ***Sample analysis*** - Atomic absorption spectrometer (AAS) - TEM-EDS ***Dermal exposure estimation*** Risk analysis (MOE risk level 1,000)	***Inhalation exposure to AgNPs from spraying*** - AgNP concentration: 0.049-2.266 μg/m^3 for mass and 1,703 to 1,908,000 particles/cm^3 for particle number - Size distribution: 10 to 200 nm (in most) - Elements: C, Cu, Zn, O, Si, Ag ***Dermal exposure to AgNPs*** - 0.005 to 0.194 μg/cm^2/min ***Risk analysis*** - All products: excessive risk of inhalation exposure than no risk concern level of MOE (1,000) - No risk concern level for dermal exposure

Table 4. Summary of previous studies on the ENMs-contained consumer spray products

Reference	Subjects	Objective(s)	Methods	Key findings
Quadros & Marr (2011)[45]	3 silver nanoparticles (AgNP) containing spray products used for anti-odor, surface disinfectant and throat spray	- To characterize the emissions from consumer products that claim to contain silver nanoparticles or ions - To determine the relationship between aerosol emissions and the liquid characteristics and assess the potential for inhalation exposure during product use	***Laboratory environment*** - A polyethylene chamber with a HEPA filter (0.52 m^3) ***Liquid characterization*** - 3-KDa centrifuging and ICP-MS analysis - Dynamic light scattering analysis - TEM/SEM-EDS analysis ***Spraying and aerosol sampling*** - Spraying: 5 sec and repeat (total 30 min) - Breathing zone sampling - Spraying: 30 min (total spraying time) - Real time monitoring: SMPS (< 0.7 μm to 13 μm), diffusion charger (surface area) - Sample analysis: TEM-EDS and ICP-MS	***Characterization of liquid products*** - AgNP concentration in liquid: 12.5 to 27.5 ppm (lower than advertised concentration; 30 ppm) ***Aerosol emissions*** - AgNP emission: 0.24-56 ng per spraying - Nano-sized aerosol: 70% of total aerosol - AgNP was associated with chlorine in most samples - Size distribution and total aerosol were influenced by liquid characteristics and bottle spray mechanisms ***Inhalation exposure to silver*** - 0.38 ng of AgNP deposition: nasopharyngeal region (77%), tracheobronchial region (6%) and alveolar region (17%) - Exposure modeling: up to 70 ng of silver may deposit in the respiratory tract during use
Calderón et al. (2017)[37]	- 13 silver-based products - 5 zinc-based products	To determine size distributions and aerosol particle concentrations during use of sprays	***Laboratory environment*** - Glove box (124 L) operating with Class 2 biosafety cabinet ***Analysis of metal content in solutions*** - ICP-MS analysis for silver and zinc ***Spraying and aerosol sampling*** - Breathing zone sampling - Spraying: for 5 sec - Real time monitoring: SMPS and APS - Conversion from particle number to mass concentration - Aerosol analysis using a TEM-EDS	***Particle concentration*** - All products: nano-sized particles to coarse particles and substantial variation depending on the product - Total mass concentration: 30 to 30,000 μg/m^3 - TEM analysis: single (nanoparticle) and agglomerates in solutions and in aerosols - Identification of a variety of other metals including the advertised nanomaterials

Abbreviations: ENM, engineered nanomaterial; TD, thermal desorption; GC-MS, gas chromatography-mass spectrometer; GC-FID, gas chromatography-flame ionization detector; FMPS, fast mobility particle sizer; SMPS, scanning mobility particle sizer; ICP-MS, inductively coupled plasma mass spectrometer; VOC, volatile organic compound; MOE, Ministry of Environment (Korea); TEM, transmission electron microscopy; SEM, scanning electron microscopy; EDS, Energy dispersive (X-ray) spectrometer; HEPA, high-efficiency particulate air.

4. 흡입 노출 모델을 이용한 노출 추정

생활화학제품의 포장표면에는 사용시 주의사항 또는 사용방법에 대한 정보가 제공되고 있으나, 해당 정보들을 고려하여 제품을 사용하는 경우는 많지 않다. 따라서 노출 평가에서 노출 시나리오를 작성할 때에는 심각한 노출이 예상되는 사용환경 조건(worst-case)을 가정하여 수행하는 것이 일반적이다. 실제 노출 시나리오 상의 실험을 통한 추정 평가 방법은 정확한 노출 수준을 최대한 실제에 가깝게 추정할 수 있으나, 시간과 비용이 많이 소요되는 단점이 있다.[11] 이 때 노출 시나리오를 이용한 모델 추정법이 사용될 수 있는데, 노출 실험 평가에 비해 쉽고 빠르게 노출 정도를 추정할 수 있는 강점을 가진다.

노출량 추정을 위해 사용되는 모델 기법은 여러 가지가 있으나, 일반 소비자의 흡입 노출량 추정에 적용 가능한 모델은 Table 5와 같다. 기존 모델에서 최종적으로 제시되는 결과 값은 모두 중량 단위로 표현되기 때문에 공기 중 나노 입자에 대한 노출 평가를 목적으로 할 경우에는 활용이 제한적일 수 있다. 최근에는 나노 입자에 대한 노출량 추정이 가능한 ConsExpo Nano 모델이 개발되어 입자 수와 중량, 표면적 단위의 노출량을 정량적으로 얻을 수 있다.

CEM (Consumer Exposure Model)은 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)에 의해 생활화학제품 사용에 의한 흡입, 경피, 경구 노출량 추정을 위해 개발되었다. 본 모델은 프로그램에 내장된 9개의 제품군별 시나리오와 일부 사용자 입력 변수(물질정보, 제품정보, 사용환경 조건, 노출 변수 및 활동 패턴)를 입력하여 단위 체중에 대한 일일 노출량(mg/kgbw/day)을 추정할 수 있다.[59-60] ECETOC TRA (European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals) 모델은 유럽의 REACH (Registration, Evaluation, Authorisation & Restriction of Chemicals) 제도 하에 관리되는 생활화학제품에 대한 위해성 평가(risk assessment)를 위한 목적으로 개발되었다. 과거 노출 자료를 방대하게 반영하여 총 46개의 제품군에 대한 시나리오를 제공하고 있으며, 사용자 변수(제품정보, 물질 정보, 분사 형태, 노출 변수 및 활동 패턴)를 입력하여 공기 중 농도(mg/m^3)와 흡입 노출량(mg/kgbw)을 추정할 수 있다.[61-63] SprayExpo 모델은 원래 살충제에 함유된 비 휘발성 물질에 대한 흡입 노출량 추정을 목적으로 개발되었다. 이 모델은 사용 환경(방 크기와 환기 조건, 분사 형태)과 제품 특성(노즐의 형태), 에어로졸 크기 분포를 종합적으로 반영하여 예상되는 공기 중 농도(mg/m^3)와 흡입성, 흉곽성, 호흡성 크기로 구분하여 흡입 노출량(mg/kgbw)을 추정할 수 있다.[59,64-65] ConsExpo 모델은 분사형 제품에 대해 노출 변수와 분사 형태, 사용환경과 노출 시나리오를 이용하여 좀 더 상세한 노출량 추정(higher tier)이 가능하도록 개발되었으나, 제품에 함유된 비휘발성 입자를 평가하기에는 부적합하다. 따라서 이에 대한 보완 모델로써 나노 입자까지 노출량 추정이 가능한 ConsExpo Nano 모델이 개발되었다. 이 모델은 ConsExpo 모델 알고리즘을 기반으로 하고 있으나, 나노 물질에 대한 입력 변수를 적용시킴으로써 나노 입자 노출 평가에 적합한 노출량 추정이 가능하다.[66]

모델링 기법에서는 노출 시나리오와 각 모델의 알고리즘 구성이 결과 값에 결정적인 영향을 미친다. 노출 시나리오 작성 시 실제 노출 환경 조건을 최대한 반영할 수 있는지 여부와 각 모델의 입력 변수를 상세하게 파악하여 정확히 반영할 수 있는지에 따라 모델의 활용 효과가 달라진다. Park et al. (2018)은 실제 분사 실험을 통한 노출 추정 값과 동일한 노출 시나리오 상의 모델 추정 값(중량)을 비교하였는데, 사용자의 노출 시간을 단 시간(30분 이내)으로 가정했을 때, 실험 값에 대한 모델 값의 상대 편차가 3-39%를 보인 반면, 시나리오 상 노출 시간을 장 시간(2시간)으로 설정했을 때에는 모델 별 실험 값과 노출 값 간의 상대 편차가 63-960%로 큰 차이를 보였다.[67] 따라서 모델링 기법을 활용하기 위해서는 시나리오 상 조건과 모델의 입력 변수(알고리즘)를 면밀히 고려하여 목적에 맞게 선정하는 것이 중요하다.

IV. 결 론

분사형 생활화학제품은 호흡기 노출로 인한 사용자의 건강상 위험이 상대적으로 큰 제품 군으로, 최근 나노 물질의 적용범위가 확대됨에 따라 일반 소비자의 노출 위험도 높아졌다. 그러나, 일상 생활에서 사용되는 생활화학제품은 개별 소비자의 사용환경과 특성에 따라 노출 형태와 정도가 크게 달라질

Table 5. Summary of basic information on some consumer exposure models[67]

Model		Developer	Subject	Tier level	Exposure route	Input parameters	Output parameters	Note
Exposure model	CEM	US EPA	Consumer	Screening	Inhalation Dermal Oral	- Chemical properties - Product properties - Environmental conditions - Receptor exposure factors - Activity patterns	Airborne concentration (mg/m^3) Acute dose (mg/kgbw/day) Chronic average daily dose (mg/kgbw/day)	-
	ECETOC TRA	ECETOC	Consumer Worker	Screening	Inhalation Dermal	- Product information - Chemical properties - Spraying patterns - Exposure factors - Activity patterns	Airborne concentration (mg/m^3) Inhaled dose (mg/kgbw)	-
	SprayExpo	BAuA	Worker	Higher tier	Inhalation Dermal	- Exposure scenario - Room size and ventilation - Spraying patterns - Product characterization - Spray nozzle characterization - Droplet spectrum	Airborne concentration (mg/m^3) Inhaled dose (mg/kgbw)	For spray products
	ConsExpo	RIVM	Consumer Worker	Higher tier	Inhalation Dermal Oral	- Exposure factors - Spraying patterns - Room size and ventilation - Nanomaterial characterization - Exposure scenario	Inhaled dose (mg/kgbw)	-
	ConsExpo Nano	RIVM	Consumer Worker	Higher tier	Inhalation Dermal Oral	- Exposure factors - Spraying patterns - Room size and ventilation - Nanomaterial characterization - Exposure scenario	Inhaled dose by metrics (number, mass, surface area)	Nano-specific model

Abbreviations: EPA, Environmental Protection Agency (USA); ECETOC TRA, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals Targeted Risk Assessment (EU); BAuA, Federal Institute for Occupational Safety and Health (Germany); RIVM, National Institute for Public Health and the Environment (Netherlands); CEM, Consumer Exposure Model.

수 있고, 현재까지 나노 제품에 대한 규제나 표준화된 평가 방법이 정립되지 않은 상황이므로 노출 평가 시에는 세밀한 전략이 필요하다. 분사형 제품으로부터 배출된 나노 물질의 흡입 노출 평가를 위해서는 제품에 함유된 나노 물질의 물리화학적 특성 파악을 위한 분석 단계가 필요하나, 개별 분석방법들의 한계점과 나노 물질의 특성 상 분석과정에서 발생할 수 있는 오차 등을 고려하여 이를 최소화 할 수 있는 분석 기법의 선정이 필요하다. 공기 중으로 분사된 나노 물질의 측정은 노출 평가에서 가장 핵심적인 부분이다. 주로 실시간 측정기기를 이용한 측정을 중심으로 실제 노출 정도를 평가하고 있으나, 개별 사용환경에 따라 결과 값의 변화도 클 수 있다. 따라서 실제 제품의 사용 장소, 사용 방법, 사용 빈도와 시간 등 제품의 용도별 사용 환경을 반영한 노출 시나리오에 따라 평가가 이루어져야 한다. 모델링 기법을 이용한 노출 평가에서는 노출 시나리오와 모델 별 사용되는 입력 변수가 최종 노출 추정값의 정확성에 영향을 미치는 핵심 요소이다. 최종적으로 모델링 활용 효과를 극대화하기 위해서는 목적에 맞는 모델의 선정과 각 모델을 구성하는 알고리즘 변수의 정확한 이해를 바탕으로 노출 시나리오를 작성하는 것이 중요하다. 따라서, 본 고찰에서 기술한 바와 같이 2019년부터 새로 시행되고 있는 화학제품안전법에 규정된 위해성 평가를 일반 생활화학제품의 나노 물질에 적용하기 위해서는 이에 대한 추가 연구와 대책 마련이 필요하다. 특히, 나노 물질에 대해 현재 준용되고 있는 다양한 측정, 분석 방법들에 대한 검증과 더불어 향후에는 표준화된 방법론을 정립함으로써 생활화학제품으로부터 소비자의 안전을 확보할 수 있도록 해야한다. 나아가 측정과 분석을 바탕으로 한 평가 방법론과 더불어 국내 소비자의 사용 및 노출 특성에 더 적합하고 정확성이 검증된 노출 모델 개발 연구 또한 추가적으로 검토될 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2019R1A6A3A03033990).

References

1. Scruggs CE. Reducing hazardous chemicals in consumer products: proactive company strategies. *J Clean Prod*. 2013; 44: 105-114.
2. Dimitroulopoulou C, Lucica E, Johnson A, Ashmore M, Sakellaris I, Stranger M, et al. EPHECT I: European household survey on domestic use of consumer products and development of worst-case scenarios for daily use. *Sci Total Environ*. 2015; 536: 880-889.
3. Park J. A study on enactment of Act on the registration and Evaluation, etc. of Chemical Substances. *Environ Forum*. 2011; 169(8): 1-8.
4. Park JY, Lee K, Shin HS, Yang W. Review of exposure assessment to obtain exposure factors of consumer products. *Korean J Environ Health Sci*. 2013; 39(6): 532-540.
5. Mitrano DM, Motellier S, Clavaguera S, Nowack B. Review of nanomaterial aging and transformations through the life cycle of nano-enhanced products. *Environ Int*. 2015; 77: 132-147.
6. Kim HA, Lee BT, Na SY, Kim KW, Ranville JF, Kim SO, et al. Characterization of silver nanoparticle aggregates using single particle-inductively coupled plasma-mass spectrometry (spICP-MS). *Chemosphere*. 2017; 171: 468-475.
7. Seaton A, Tran L, Aitken R, Donaldson K. Nanoparticles, human health hazard and regulation. *J R Soc Interface*. 2009; Suppl 1: S119-S129.
8. Bauer C, Buchgeister J, Hischier R, Poganietz W, Schebek L, Warsen J. Towards a framework for life cycle thinking in the assessment of nanotechnology. *J Clean Prod*. 2008; 16(8): 910-926.
9. Caballero-Guzman A, Nowack B. A critical review of engineered nanomaterial release data: Are current data useful for material flow modeling? *Environ Pollut*. 2016; 213: 502-517.
10. Hansen S, Larsen BH, Olsen SI, Baun A. Categorization framework to aid hazard identification of nanomaterials. *Nanotoxicology*. 2007; 1(3): 243-250.
11. Losert S, von Goetz N, Bekker C, Fransman W, Wijnhoven SW, Delmaar C, et al. Human exposure to conventional and nanoparticle-containing sprays-A critical review. *Environ Sci Technol*. 2014; 48(10): 5366-5378.
12. Nørgaard AW, Larsen ST, Hammer M, Poulsen SS, Jensen KA, Nielsen GD, et al. Lung damage in mice after inhalation of nanofilm spray products: the role of perfluorination and free hydroxyl groups.

Toxicol Sci. 2010; 116(1): 216-224.
13. Hansen SF, Michelson ES, Kamper A, Borling P, Stuer-Lauridsen F, Baun A. Categorization framework to aid exposure assessment of nanomaterials in consumer products. *Ecotoxicology.* 2008; 17(5): 438-447.
14. Vance ME, Kuiken T, Vejerano EP, McGinnis SP, Hochella Jr MF, Rejeski D, et al. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein J Nanotech.* 2015; 6(1): 1769-1780.
15. Keller AA, McFerran S, Lazareva A, Suh S. Global life cycle releases of engineered nanomaterials. *J Nanopart Res.* 2013; 15(6): 1692.
16. Piccinno F, Gottschalk F, Seeger S, Nowack B. Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world. *J Nanopart Res.* 2012; 14(9): 1109.
17. Gazsó A, Simkó M. Voluntary approaches by industry in the field of nanomaterials. *Nano Trust Dossiers.* 2010; Article No. 016en: 1-6.
18. Rauscher H, Rasmussen K, Sokull-Klüttgen B. Regulatory aspects of nanomaterials in the EU. *Chem Ing Tech.* 2017; 89(3): 224-231.
19. Sayre PG, Steinhäuser KG, van Teunenbroek T. Methods and data for regulatory risk assessment of nanomaterials: questions for an expert consultation. *NanoImpact.* 2017; 8: 20-27.
20. Vance ME, Marr LC. Exposure to airborne engineered nanoparticles in the indoor environment. *Atmos Environ.* 2015; 106: 503-509.
21. European Commision (EC). Nanomaterials in REACH and CLP. Available: http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/reach-clp/index_en.htm [accessed on 24 June 2019]
22. European Commision (EC). Regulation (EC) No. 1223/2009 of the European parliament and of the Council of 30 November 2009 on Cosmetic Products, Off. J. EU 2009. L342, 59. 2009.
23. Korea Ministry of Environment (KMOE). The 2nd Korean Governmental-wide National Plans for Nano Safety and Control (2017-2021). Available: http://library.me.go.kr/search/DetailView.ax?sid=1&cid=5635670 [accessed on 24 June 2019]
24. Throne-Holst H, Rip A. Complexities of labelling of nanoproducts on the consumer markets. *Eur J Law Technol*. 2011; 2(3).
25. Fiorino DJ. Voluntary initiatives, regulation, and nanotechnology oversight: Charting a path. Project on Emerging Nanotechnologies. Washington DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars; 2010. p. 1-56.
26. Gruère GP. Labeling nano-enabled consumer products. *Nano Today.* 2011; 6(2): 117-121.
27. Bootz A, Vogel V, Schubert D, Kreuter J. Comparison of scanning electron microscopy, dynamic light scattering and analytical ultracentrifugation for the sizing of poly (butyl cyanoacrylate) nanoparticles. *Eur J Pharm Biopharm.* 2004; 57(2): 369-375.
28. Kato H, Nakamura A, Ouchi N, Kinugasa S. Determination of bimodal size distribution using dynamic light scattering methods in the submicrometer size range. *Mater Express.* 2016; 6(2): 175-182.
29. Brar SK, Verma M. Measurement of nanoparticles by light-scattering techniques. *TrAC Trend Anal Chem.* 2011; 30(1): 4-17.
30. Hassellöv M, Readman JW, Ranville JF, Tiede K. Nanoparticle analysis and characterization methodologies in environmental risk assessment of engineered nanoparticles. *Ecotoxicology.* 2008; 17(5): 344-361.
31. Krystek P, Ulrich A, Garcia CC, Manohar S, Ritsema R. Application of plasma spectrometry for the analysis of engineered nanoparticles in suspensions and products. *J Anal Atom Spectrom.* 2011; 26(9): 1701-1721.
32. National Institute of Environmental Research (NIER). Establishment of foundation on exposure asesment for products containing manufactured nanomaterials. NIER Research Report (No. NIER-SP2014-230). 2014: p. 1-553.
33. Tiede K, Boxall AB, Tear S, Lewis J, David H, Hassellov M. Food additives and contaminants part a-chemistry analysis control exposure and risk. *Assessment.* 2008; 25(7): 795-821.
34. Hand JL, Kreidenweis SM. A new method for retrieving particle refractive index and effective density from aerosol size distribution data. *Aerosol Sci Technol.* 2002; 36(10): 1012-1026.
35. Bekker C, Brouwer DH, van Duuren-Stuurman B, Tuinman IL, Tromp P, Fransman W. Airborne manufactured nano-objects released from commercially available spray products: temporal and spatial influences. *J Expo Sci Env Epid.* 2014; 24(1): 74-81.
36. Boverhof DR, David RM. Nanomaterial characterization: considerations and needs for hazard assessment and safety evaluation. *Anal Bioanal Chem*. 2010; 396(3): 953-961.
37. Calderón L, Han TT, McGilvery CM, Yang L, Subramaniam P, Lee K-B, et al. Release of airborne particles and Ag and Zn compounds from nanotechnology-enabled consumer sprays: Implications for

inhalation exposure. *Atmos Environ.* 2017; 155: 85-96.
38. Chen BT, Afshari A, Stone S, Jackson M, Schwegler-Berry D, Frazer DG, et al. Nanoparticles-containing spray can aerosol: characterization, exposure assessment, and generator design. *Inhal Toxicol.* 2010; 22(13): 1072-1082.
39. Kim E, Lee JH, Kim JK, Lee GH, Ahn K, Park JD, et al. Case study on risk evaluation of silver nanoparticle exposure from antibacterial sprays containing silver nanoparticles. *J Nanomater.* 2015; 1-8.
40. Lorenz C, Hagendorfer H, von Goetz N, Kaegi R, Gehrig R, Ulrich A, et al. Nanosized aerosols from consumer sprays: experimental analysis and exposure modeling for four commercial products. *J Nanopart Res.* 2011; 13(8): 3377-3391.
41. Nazarenko Y, Han TW, Lioy PJ, Mainelis G. Potential for exposure to engineered nanoparticles from nanotechnology-based consumer spray products. *J Expo Sci Env Epid.* 2011; 21(5): 515-528.
42. Nazarenko Y, Lioy PJ, Mainelis G. Quantitative assessment of inhalation exposure and deposited dose of aerosol from nanotechnology-based consumer sprays. *Environ Sci Nano.* 2014; 1(2): 161-171.
43. Nazarenko Y, Zhen H, Han T, Lioy PJ, Mainelis G. Nanomaterial inhalation exposure from nanotechnology-based cosmetic powders: a quantitative assessment. *J Nanopart Res.* 2012; 14(11): 1-14.
44. Park J, Ham S, Jang M, Lee J, Kim S, Kim S, et al. Spatial-temporal dispersion of aerosolized nanoparticles during the use of consumer spray products and estimates of inhalation exposure. *Environ Sci Technol.* 2017.
45. Quadros ME, Marr LC. Silver nanoparticles and total aerosols emitted by nanotechnology-related consumer spray products. *Environ Sci Technol.* 2011; 45(24): 10713-10719.
46. Fabricius A-L, Duester L, Meermann B, Ternes TA. ICP-MS-based characterization of inorganic nanoparticles-sample preparation and off-line fractionation strategies. *Anal Bioanal Chem.* 2014; 406(2): 467-479.
47. Hagendorfer H, Kaegi R, Parlinska M, Sinnet B, Ludwig C, Ulrich A. Characterization of silver nanoparticle products using asymmetric flow field flow fractionation with a multidetector approach-a comparison to transmission electron microscopy and batch dynamic light scattering. *Anal Chem.* 2012; 84(6): 2678-2685.
48. Hagendorfer H, Kaegi R, Traber J, Mertens SF, Scherrers R, Ludwig C, et al. Application of an asymmetric flow field flow fractionation multi-detector approach for metallic engineered nanoparticle characterization-prospects and limitations demonstrated on Au nanoparticles. *Anal Chim Acta.* 2011; 706(2): 367-378.
49. Majedi SM, Lee HK. Recent advances in the separation and quantification of metallic nanoparticles and ions in the environment. *TrAC Trend Anal Chem.* 2016; 75: 183-196.
50. Tulve NS, Stefaniak AB, Vance ME, Rogers K, Mwilu S, LeBouf RF, et al. Characterization of silver nanoparticles in selected consumer products and its relevance for predicting children's potential exposures. *Int J Hyg Env Health.* 2015; 218(3): 345-357.
51. Ulrich A, Losert S, Bendixen N, Al-Kattan A, Hagendorfer H, Nowack B, et al. Critical aspects of sample handling for direct nanoparticle analysis and analytical challenges using asymmetric field flow fractionation in a multi-detector approach. *J Anal Atom Spectrom.* 2012; 27(7): 1120-1130.
52. De la Calle I, Menta M, Séby F. Current trends and challenges in sample preparation for metallic nanoparticles analysis in daily products and environmental samples: A review. Spectrochim Acta B. 2016; 66-96.
53. Nowack B, Bucheli TD. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environ Pollut.* 2007; 150(1): 5-22.
54. Hagendorfer H, Lorenz C, Kaegi R, Sinnet B, Gehrig R, Goetz NV, et al. Size-fractionated characterization and quantification of nanoparticle release rates from a consumer spray product containing engineered nanoparticles. *J Nanopart Res.* 2010; 12(7): 2481-2494.
55. Steiling W, Bascompta M, Carthew P, Catalano G, Corea N, D'Haese A, et al. Principle considerations for the risk assessment of sprayed consumer products. *Toxicol Lett.* 2014; 227(1): 41-49.
56. Nørgaard AW, Jensen KA, Janfelt C, Lauritsen FR, Clausen PA, Wolkoff P. Release of VOCs and particles during use of nanofilm spray products. *Environ Sci Technol.* 2009; 43(20): 7824-7830.
57. Yoon CS. Consideration of nano-measurement strategy. *Korean J Environ Health Sci.* 2011; 37(1): 73-79.
58. Burtscher H, Baltensperger U, Bukowiecki N, Cohn P, Hüglin C, Mohr M, et al. Separation of volatile and non-volatile aerosol fractions by thermodesorption: instrumental development and applications. *J*

Aerosol Sci. 2001; 32(4): 427-442.
59. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). Comparison of consumer exposure modelling tools. Available: https://core.ac.uk/download/pdf/58773368.pdf [accessed on 14 July 2019]
60. Unitied States Environmental Protection Agency (USEPA). Predictive models and tools for screening chemicals under TSCA: Consumer Exposure Models 1.5. Available: https://www.epa.gov/tsca-screening-tools/predictive-models-and-tools-screening-chemicals-under-tsca-consumer-exposure [accessed on 14 July 2019]
61. Delmaar J, Bremmer H. The ConsExpo spray model-Modelling and experimental validation of the inhalation exposure of consumers to aerosols from spray cans and trigger sprays. RIVM Report No. 320104005. Bilthoven, the Netherlands: RIVM; 2010. p. 1-70.
62. European Chemicals Agency (ECHA). Chapter R.15: Consumer exposure estimation., Ver.3.0. In Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Helsinki, Finland: ECHA; 2016. p. 1-61.
63. Riedmann R, Gasic B, Vernez D. Sensitivity analysis, dominant factors, and robustness of the ECETOC TRA v3, Stoffenmanager 4.5, and ART 1.5 occupational exposure models. *Risk Anal.* 2015; 35(2): 211-225.
64. Federal Institute for Occupational Safety and Health in Germany (BAuA). SprayExpo 2.0 Program description. 2016.
65. European Chemicals Agency (ECHA). Chapter R.14: Occupational exposure assessment. Ver.3.0. In Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Helsinki, Finland: ECHA; 2016. p. 1-49.
66. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). About ConsExpo nano, a short introduction to the tool for consumer exposure to nanomaterials in consumer spray products. Available: https://www.rivm.nl/en/consexpo/related-tools/nano-tool/about [accessed on 14 July 2019]
67. Park J, Yoon C, Lee K. Comparison of modeled estimates of inhalation exposure to aerosols during use of consumer spray products. Int J Hyg Env Health. 2018; 221(6): 941-950.
68. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) The ConsExpo spray model-Modelling and experimental validation of the inhalation exposure of consumers to aerosols from spray cans and trigger sprays. RIVM Report No. 320104005. Bilthoven, the Netherlands: RIVM; 2009. p. 1-70.

<저자정보>

박지훈(박사후연구원), 박미진(연구교수),
윤충식(교수)