

나노물질 생산시설의 환경노출 평가와 안전관리

엄하늬* · 노진규* · 박준수** · 객병규** · 이병천*** · 최경희*** · 이종협** · 김영훈*†

*광운대학교 화학공학과
139-701 서울시 노원구 월계동 447-1
**서울대학교 화학생물공학부
151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1
***국립환경과학원 환경건강연구부
404-708 인천시 서구 경서동 환경복합연구단지
(2011년 4월 20일 접수, 2011년 5월 18일 채택)

Nano-safety Management and Exposure Assessment of Nanomaterials Producing Facilities

Ha Nee Um*, Jinkyu Roh*, Junsu Park**, Byoung Kyu Kwak**, Byung Cheon Lee***, Kyunghee Choi***,
Jongheop Yi** and Younghun Kim*†

*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

**Department of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

***Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research

Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-708, Korea

(Received 20 April 2011; accepted 18 May 2011)

요 약

나노기술의 발전과 함께 나노물질을 포함한 소비재가 대중화되고 있다. 그러나 지난 10여년간 조심스럽게 제기되고 있는 나노물질의 잠재적 위해성으로 인해, 나노제품 사용을 불안해하고 있다. 특히 나노제품을 직접 취급하는 생산시설(연구소 및 업체의 작업자)은 직접적인 인체 노출을 초래하게 된다. 따라서 이들에 대한 인체 및 환경 노출 안전관리를 위하여, 직접적인 노출평가가 필요하다. 본 연구에서는 기상 및 액상 반응을 통해 나노물질을 생산하는 두 곳의 업체를 현장 방문하여 나노물질의 주요 노출대상 공정과 노출원을 파악하고 SMPS를 이용한 실시간 현장 모니터링을 실시하였다. 분석 결과, 액상 공정도 기상으로의 나노입자 노출이 심각하게 발생하고 있음을 확인하였다. 가장 문제가 되는 점은 나노물질의 잠재적인 위해성에 관한 인식의 부족으로 제대로 된 방호활동을 못하고 있다는 점이다. 따라서 보다 다양한 나노물질 취급 시설에 대한 환경노출 평가가 필요하고 이를 바탕으로 한 나노물질 취급 안전관리 방법이 제시되어야 한다.

Abstract – With the development of nanotechnology, nano-consumer products have been popularized. For the past 10 years, potential risk of nanomaterials to human and environment have been raised carefully. Especially, workers, who directly handle nanomaterials in laboratories and manufacturers, will lead to direct exposure of nanomaterials. Therefore, direct exposure assessment and field monitoring of nanomaterials are required to assess and manage the nanomaterial exposure to human and environment. In this work, two nano-manufacturing companies, which had plasma and sol-gel processes, were selected to analyze the main exposure source and process with in-situ SMPS (scanning mobility particle sizer) and ex-situ TEM (transmission electron microscopy). The results showed that the colloidal nanoparticle in liquid phase was easily evaporated and monitored by SMPS. Most serious thing is that the workers does not know about the potential risk of nanomaterials, and thus they are not taking proper protection activities, such as PPE (personal protective equipment). Therefore, exposure assessment for nanomaterial handling facilities should be additionally carried out, and nano-safety management protocols are also provided.

Key words: Nanomaterials, Nanotoxicity, Exposure, Nano-Safety

1. 서 론

나노기술은 21세기 현대기술 중 첨단 분야의 대표성을 지니면서도 모든 기술의 근간을 이루고 있는 요소기술이다. 보다 작고 보다

성능이 좋은 미시의 나노기술과 융합하지 않는 기술은 거의 없다고 봐도 과언이 아니다. 이러한 나노기술의 발전 여부는 생활속에 얼마나 많은 나노기술이 침투하였는지를 확인해 보면 쉽게 알 수 있다[1]. 때가 타지 않고 유기물에도 쉽게 오염되지 않는 연잎 효과를 이용한 로터산(Lotusan) 페인트, 탄소나노튜브로 제조한 초경량 고강도 재료를 활용한 야구배트, 골프채, 테니스라켓 등은 성공적인

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: koreal@kw.ac.kr

생활용품이라 할 수 있다. 또한 살균성과 향균성이 뛰어난 은나노입자(AgNP)는 세탁기, 공기청정기, 냉장고, 에어컨 등 각종 가전제품 제조에 활용되고 있으며, 피부 노화 방지 효과가 있다는 나노화장품 등은 주름 개선용이나 미백용으로 사용되고 있다.

그러나 10여년 전부터 불고 있는 나노물질의 인체 및 환경 위해성에 관한 보고는 나노물질 사용에 있어 잠재적 위해 여부를 고려해야 함을 일깨워주고 있다[2]. 이에 미국의 Woodrow Wilson, 캐나다의 ETC 그룹과 같은 민간단체를 중심으로 본격적인 나노위해성에 관한 문제제기가 있었으며, 현재는 OECD를 중심으로 한 나노물질의 위해성 평가에 관한 국제적인 틀을 만들어 가고 있다.

따라서 나노기술과 같이 첨단(尖端) 기술은 양날의 칼로 비유할 수 있다. 날카로운 칼을 제대로 된 칼집에 넣지 않은 상태로 몸에 지니고 다닌다면, 사용자는 반드시 칼(기술)로 인한 상해를 입게 된다. 칼집이라 함은 나노물질의 안전관리를 말하며 이를 위해서는 나노물질의 환경노출원 파악과 함께 평가법이 마련되어야 한다. 이와 같이 나노물질을 생산하고 사용함에 있어서 위해성 여부를 제대로 파악하지 못한다면 2007년에 있었던 삼성 은나노세탁기와 같이 미국 내 수출금지 제재(embargo)를 받을 수 있다[3]. 이는 나노물질이 포함된 모든 제품의 인체 및 생체 위해성 여부(무해함)를 증명하지 않는다면 제품의 수출에 문제가 생길 수 있는 환경무역규제로 작용할 수 있음을 시사한다.

또한 나노물질은 다양한 노출 경로를 가지게 되며, 인체 및 환경에서의 거동 또한 기존의 화학물질과 다르게 나타난다[4]. 따라서 우선적으로 나노물질에 대한 여러 경로 중 의도적/비의도적으로 인체 및 환경에 가장 큰 위험을 미치는 노출 경로에 대한 정보를 파악해야 한다. 제품에 함유된 나노물질은 피부로 투과하여 피부 및 다른 기관들에 세포독성을 보인다. 또한, 장기간의 노출을 통해 피부나 기관에 축적이 발생된다. 이처럼 나노물질들은 체내에 다양한 경로를 통해 노출되어 지속적으로 잔류한다. 따라서 나노물질의 노출에 따른 나노물질의 관리에 있어서 우선순위를 선정하고 각 나노물질들의 노출량을 파악해야 한다.

지난 20여년 동안 연구되어 온 에어로졸 입자 측정기술은 마이크론 크기의 입자에는 효율적으로 디자인되어 있지만 나노 크기의 입자에 대한 측정에는 적합하지 않다. 그러나 다핵스텝게도 일부 장비들은 나노입자의 노출과 관련된 분리 및 분석자료를 제공할 수 있다. 실제 2~800 nm 크기의 나노물질의 측정이 가능한 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) 장비를 적용하여 측정을 시행하고, 발생하는 문제점에 대해 새로운 기술 도입 및 수정/보완이 필요하다. 실제적으로 생산되는 나노물질의 모니터링을 통해 현장에서 노출도를 파악할 수 있다[5].

본 연구에서는 기상 및 액상 장비를 이용하여 나노물질을 생산하는 작업장을 직접 방문하여 나노물질의 노출이 예상되는 지점과 개별 공정을 대상으로 현장 모니터링을 실시하였다. 이를 통해 나노물질이 수분과 함께 증발되는 현상을 관측하고, 각 공정 작업자의 안전관리를 위한 정보수집 우선순위를 평가하고자 하였다. 최종적으로는 각 공정에 대한 나노물질 노출에 따른 안전관리 방법론을 제안하고자 한다.

2. 환경노출 평가 방법

2-1. 환경노출 파악 절차

나노물질을 취급하는 연구소나 생산 시설에 대한 환경노출 평가를

하기 위해서는 나노물질의 취급량을 우선 파악해야 한다. 여기서 취급이라 함은 환경부의 유해화학물질배출량보고제도(TRI, toxic release inventory)상에서 제시하고 있는 12가지를 포함하고 있다[6]. 노출평가 대상 기관이 선정되면, 나노물질을 취급하는 주요 공정을 파악하고, 노출평가보다 선행되는 정보수집 우선순위를 결정한다. 이는 노출등급, 건강영향 등급, 불확실성 등급 등을 고려하여 평가하게 된다. 우선순위가 결정되면, 대상 공정을 대상으로 노출 모니터링을 실시하게 된다. 최종적으로 주요 노출원을 파악하고 관리대책을 강구하는 절차를 따르게 된다[7]. 노출평가에 있어서 중요한 점은 단순히 정보수집에 있지 않고, '현재의 노출정도가 작업자의 건강에 영향을 주는가', '노출기준은 어느 정도 양호한가', '노출에 의한 2차 위험요인은 무엇인가?' 등에 대한 평가가 수반된다.

유사 노출을 가진 근로자를 한 군으로 묶고, 유사하게 노출되는 근로자의 각 군에 대한 노출양상을 정립한 다음, 각 노출양상의 수용성에 대한 판단을 내린다. 즉 대상 공정에서 나노물질이 노출되고는 있으나 인체나 환경에 무해한 수준이라면 수용노출이 되므로 더 이상 조치는 필요치 않게 된다. 불수용노출로 판단되면 작업장에 대한 안전관리가 수반되어야 한다. 만약 수용과 불수용 노출 여부를 판단하기 어렵다면 추가 정보를 수집하거나 노출원을 파악하는 제반 작업들이 따르게 된다.

2-2. 노출기준 및 건강위해도 등급

나노물질의 인체 및 환경노출에 따른 작업자의 건강위해도 등급은 노출등급과 건강영향등급의 곱으로 산출된다. 노출등급은 화학물질 노출에 따른 기준에 준용할 수도 있으나, 화학물질과는 다르게 크기에 따른 물리화학적 특성변화가 심하므로 나노물질에 대한 노출등급 재설정이 필요하다.

나노물질에 관한 환경노출 기준은 명확하지 않지만, 일반적인 독성노출 및 적절한 직업성 노출기준을 마련할 수는 있다. 이는 문헌에 보고된 in-vivo, in-vitro 실험자료를 활용하여 그 적절한 기준을 마련해야 한다[8]. 현재는 일부 나노물질에 관한 MSDS상에 노출기준을 표기하기도 하고 있으나, 제조사별로 물질 노출기준이 달리 표기되어 있다. 이에 나노물질을 취급하는 현장내 종사자(연구자, 작업자, 관리자)에 대한 나노물질의 노출시간을 적절한 직업성 노출기준으로 선정하는 것이 바람직할 수 있다. 은나노입자의 경우 US NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 0.01 mg/m³을 LTA-OCL(long term average-occupational exposure limit, 장기간평균-직업적 노출기준)로 지정하고 있다. 일부 자료는 TWA(time-weighted average, 시간가중평균)를 환경노출기준으로 설정하고도 있다.

현재 화학물질의 노출에 따른 기준은 있으나 나노물질의 환경노출에 따른 기준은 거의 전무한 상태이다. 따라서 특정 대상 생물체의 반수치사량(LD50, lethal dose 50) 독성자료를 기반한 환경노출 안전성평가 기준이 마련되어야 한다(Table 1). 일례로 은나노입자의

Table 1. Environmental exposure level for nanomaterials

Level	Environmental exposure level (suggested by NIER)		
	Time weighted average (TWA)	LD50	Cytotoxicity
4	Above TWA	Above LD50 0.5%	> 4
3	TWA 50~100%	LD50 0.3~0.5%	3
2	TWA 10~50%	LD50 0.1~0.3%	2
1	Under TWA 10%	Under LD50 0.1%	< 1

Table 2. Health effect by exposure of nanomaterials

Level	Health effect (suggested by NIER)		
	Skin exposure	Eye exposure	Respiration
4	Irreversible and permanent effect(destruction of skin tissue, blindness, continuous dyspnea, and death)		
3	Adsorption at skin tissue	Inflammation	Respiratory distress
2	Skin rash	Bloodshot	Inflammation (mouth and nose)
1	Skin trouble	Ocular irritation	Slight pain
0	Recoverable and temporary effect (or no effect)		

급성독성은 쥐의 경우 100 mg/kg으로 조사되기도 하였다. 따라서 현재로서는 해당 나노물질의 주간 누적 노출시간이나, LD50의 0.1% 또는 0.5% 이상/미만 노출을 기준으로 삼을 필요는 있다. 이에 관해서는 다양한 독성 문헌자료를 검토하여 그 기준을 설정할 필요는 있다. 또한 주요 나노물질에 대한 시간가중평균 직업적 노출 기준(TWA, time-weighted average)과 동물 독성(반수치사량, LD50, lethal dose 50) 자료를 이용하여 노출등급을 마련할 수도 있다.

건강영향 등급은 현재 US AIHA(American Industrial Hygiene Association)의 기준으로 하고 있으나, 대상 나노물질에 관한 건강영향 자료가 새롭게 지정되어야 할 필요가 있다(Table 2). 따라서 피부노출, 안구노출, 호흡, 기타 노출로 구분하여 그 증상의 경미 또는 회복불능까지 구분하여 건강영향에 관한 판단기준을 마련해야 한다고 제시하고자 한다. 다행히도 국립환경과학원에서는 해당 노출등급과 건강영향등급에 대한 안을 마련하고 있다.

건강위해도 등급이 결정되면 최종적으로 정보에 대한 불확실성 등급을 평가하여 정보수집 우선순위를 결정한다. 여기서 불확실성 등급은 해당 나노물질 노출시에 노출원 파악이 명확하고 이에 관한 종사자의 인지도가 확실할 경우와 현장내 교육과 안전관리 소홀로 불확실한 경우까지 3단계로 구분하여 평가하게 된다. 매우 불확실의 경우는 자료가 충분히 파악되지 않은 경우로서 자료를 명확히 파악할 때까지는 가장 높은 노출수준으로 간주해야 하는 원칙에 입각하고 있다. 막연하게 정성적인 위해성 평가가 아닌 우선순위를 결정할 수 있는 정량적인 수치 파악을 통해, 가장 시급하게 안전관리 조치가 필요한 부분과 주요 환경노출원, 주요 노출피해지점(피해자)을 파악할 수 있게 된다.

3. 현장 노출 평가

3-1. 대상 업체

환경부에서 수행한 나노물질 유통현황 조사 결과에 의하면, 국내 나노물질 취급(수입, 제조, 사용) 업체는 총 366개 사업장으로 보고되었다[9]. 나노물질 중에서 가장 독성이 심한 것으로 보고되고 있는 AgNP 생산업체를 대상으로 기상 반응과 액상 반응 설비에 대한 환경 노출 평가를 실시하고자 하였다.

대상업체인 N사는 기상반응, 즉 플라즈마 기법으로 AgNP를 제조하는 업체로서 배치형의 반응기를 사용하고 있다. 은 와이어를 플라즈마 기계장비에 넣고 폭발반응을 시키면 250 nm 미만의 AgNP가 생성되며 이를 필터와 포장과정을 거쳐 최종 150 nm의 나노입자를 생산하고 있다. 모니터링 및 주요 정보수집 구간으로 반응실, 조작실을 지정하였다. 반응실의 작업자는 플라즈마 장비와 절연을 위한 절연장갑 및 의복을 착용하고 있었으나, 조작실내 함께 비치된 포장실에서는 개인보호장비의 착용이 미비하였다.

A사는 AgNP를 주로 생산하는 업체로 OECD 표준물질로 선정된 citrate-AgNP를 제조하고 있으며, 액상 내 고분산된 나노입자를 연속공정으로 생산하는 설비를 보유하고 있다. AgCl₂와 같은 염계열의 은 전구체를 환원제와 안정제(sodium citrate)와 연속반응시킨 다음, 원심분리기를 이용한 완제품 분리 작업을 수행하고 있다. 잔류 폐기물은 드럼을 이용하여 수집하여 폐기하고 있다. 연속 반응기는 밀폐식이나, 폐수 처리시 드럼부분에서 나노물질 노출이 발생하고 있으며 전체적으로는 벤트시설이 없는 상태에서 작업이 이루어지고 있었다. 또한 제조한 AgNP는 탈수된 상태로 점성이 있는 끈적끈적한 액체로 제조된다. 이를 용액내 재분산을 위해 교반기를 이용한 교반작업이 추가적으로 수행되는 공정을 지니고 있다.

3-2. 정보수집 우선 작업장 판단

두 곳의 대상업체를 대상으로 현장 방문을 통해 기본적인 정보를 수집하고 주요 공정을 파악하였다. 이러한 정보는 예상되는 주요 환경노출원 파악에 반드시 필요한 사항이 된다. N사의 나노물질의 주요 환경노출원으로는 플라즈마 공정 중 sealing 부분, 시료 포장시 대기상 노출, 공정내 잔류 은코일 회수시 흡입/피부 노출, 플라즈마 시설 청소시 폐수 방류 등으로 예상되었다. 이들 공정에서 작업하는 5명의 작업자에 대하여 작업/업무별 노출등급, 건강영향등급, 불확실등급을 고려하여 잠재적 건강 위해성등급과 정보수집 우선순위 등급을 결정하였다. 분석결과 Table 3과 같이, 시료 포장자(C)가 다른 어떤 작업자보다 가장 높은 나노입자 노출이 일어나고 있음을 알 수 있었다. C 작업자는 대기상 노출에 따른 흡입 노출과 안구접촉 노출이 의심되고 있다. 따라서 C 작업자에 대한 작업시간 조절 및 작업공간의 격리, 개인보호장비 및 벤트시설이 시급함을 알 수 있

Table 3. Sheet for safety management of nanomaterials manufacturer (plasma process)

ID	Title	Process	Hazard	Exposure	Health effect	Uncertainty	Potential risk of human health	Priority for information collection
A	Operator	Production	Powder	1	3	2	3	6
B	Operator	Regeneration	Aggregate	3	1	1	3	3
C	Worker	Packaging	Powder	3	3	2	9	18
D	Worker	Cleaning	Aggregate/powder	2	2	1	4	4
E	Director	Management	Final product	1	1	1	1	1

Table 4. Sheet for safety management of nanomaterials manufacturer (sol-gel process)

ID	Title	Process	Hazard	Exposure	Health effect	Uncertainty	Potential risk of human health	Priority for information collection
A	Operator	Production	Nanoparticle	2	2	2	4	8
B	Operator	Dehydration	Nanoparticle	2	2	2	4	8
C	Operator	Recovery	Nanoparticle	1	2	1	2	2
D	Worker	Mixing	Aggregate	2	2	2	4	8
E	Worker	Destruction	Aggregate	3	2	2	6	12
F	Worker	Cleaning	Aggregate	2	2	2	4	8
G	Director	Management	Nanoparticle	1	2	1	2	2

었다. 실질적인 노출평가 결과는 현장에서의 대기상으로 노출되는 입자 분석용인 SMPS와 추후 입자 형태 파악을 위한 TEM 분석을 통해 검증하였다.

A사의 나노물질의 주요 환경노출원으로는, 제조 공정중 원심분리기의 폐수 라인의 대기상 노출, 교반기 시설중 대기 노출, 드럼 운반 및 교반기 세척시 폐수 방류, 공개된 공간에서 작업으로 인한 배경 나노입자 생산 등이 예상되었다. 이들 공정에서 주로 작업하는 7명의 작업자에 N사와 동일하게 잠재적 건강 위해성등급과 정보수집 우선순위 등급을 결정하였다. 분석결과, 원심분리기의 폐수가 모아지는 드럼을 처리하는 보조작업자(E)가 다른 어떤 작업자보다 가장 큰 나노입자 노출이 일어나고 있음을 알 수 있다. 해당 작업자는 벤트시설 없이 작업 수행을 통해 대기상으로 노출되는 나노입자를 직접 흡입하게 되며, 실내 온도 상승시 대기상 에어로졸 증가로 안구점막 노출이 발생할 수 있다. 또한 반응기 작업자와 교반기 작업자에 대해서는 중간 이상의 건강위해도를 보이고 있어서, 전반적으로 전체 설비에 대한 벤트시설 설치가 절실함을 알 수 있다.

이와 같이 실질적인 노출평가에 앞서 수행한 정보수집에 관한 우선순위 결정 결과, 특정작업자에게 나노물질의 노출이 심각하게 발생하고 있음을 파악하였고 그들에 대한 안전관리 교육 및 시설격리 등이 시급함을 알 수 있었다.

3-3. 노출평가 결과

N사에 대한 조작성과 공정실에 대한 SMPS를 이용한 실시간 노출 모니터링을 실시하였다. 조작성은 반응실과 파티션으로 분리되어 있으며, 반응실의 환기는 에어컨을 통한 외부 공기 흡입만 이루어지고 있었다. 즉 외부 공기는 유입되지만 내부에 산재해 있는 나노입자의 외부노출은 일어나지 않고 있다. 따라서 작업실 및 조작성내에 존재하는 미세입자는 시간이 지나면서 지속적으로 쌓여가고 있다고 보았다. 출입이 없을 시 공정실 내부의 입자수는 평균 약 10,000개 이하지만, 조작성이 반응실과 분리되어 있지 않아 분산되는 입자가 매우 많이 측정되었다. 공정실 개방시(Fig. 1의 전반부), 조작성의 입자들이 공정실 내부로 유입되고 있으며, 시간이 지남에 따라 입자들이 바닥에 잔류하게 되고 작업자 이동에 따른 침전입자의 재부상이 발생하였다. 즉 공정실의 개폐에 따라 내부공기의 입자수가 급격히 변화였다. 환기를 위한 에어컨 가동시 조작성로부터 입자의 유입 및 바닥에 잔류하는 입자들의 분산이 활발하게 이루어졌다. 공정실 폐쇄 후(Fig. 1의 중간부분 이후), 공정 가동 시 일정 크기를 갖는 입자만이 다수 분산됨을 확인하였고, 플라즈마 장치 개방시 80~120 nm 영역의 입자수가 증가하였다. 이는 Fig. 1에 포함된 TEM 결과로도 확인할 수 있다. 따라서 플라즈마 장치 주변으로 밀봉이 잘 되지 않은 지점은 노출이 이루어지고 있음을 확인할 수

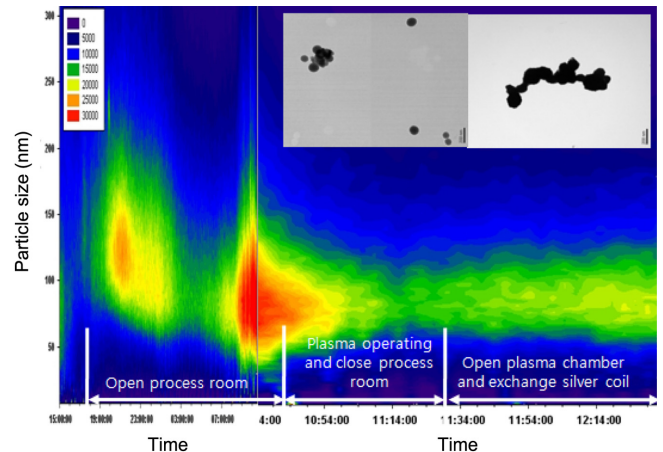


Fig. 1. SMPS sampling data with plasma process operation (Inset: TEM image of nanoparticle collected from SMPS sampler, scale bar=200 nm).

있다. 조작성내에서는 생산된 AgNP를 포장하는 작업이 이루어지는데, 이때 해당 나노입자의 크기만큼의 영역에서 나노입자의 노출이 증가하였다.

A사에 대해서도 SMPS와 TEM 분석이 실시되었다. 연속식 공정으로 구성된 나노입자 제조시설은 그 규모가 크지 않아서 벤트시설이 갖춰지지 않은 공간에서 작업이 이루어지고 있다. 또한 밀폐식이라서 나노입자의 노출은 원심분리기 가동후 발생하는 폐수 드럼 부분에서만 발생하는 것으로 파악되었다(Fig. 2). 노출되는 나노입자는 제조되는 나노입자보다 큰 크기인 40~120 nm 크기의 일정한 분포를 보였다. 추가적인 노출원으로 파악된 교반기설에 관한 배경 입자 분석을 수행하였다. 벤트시설이 없는 상황에서 나노입자가 제조되고 있고 폐수 드럼도 공개된 장소에 비치되어 있어서, 작업 공간내 나노입자의 노출이 곧 배경입자화되고 있는 양상을 보였다. 주로 발생하는 입자는 80 nm 근처로 3.5만개 이상의 노출이 발생하고 있었다. 3 lpm의 SMPS 흡입속도를 고려하면, 80 nm 크기의 입자가 분당 약 10만개씩 노출되는 것으로 파악된다.

3-4. 기상과 액상 노출의 차이점

이상의 두가지 공정, 플라즈마 기상 공정과 졸-겔 액상 공정으로 제조되는 AgNP의 노출평가 결과를 정리해 보면 다음과 같다. 기상 공정에서는 쉽게 대류 확산으로 인해 후드 시설이 없으면 인체 노출이 발생하였다. 액상 공정에서는 액상 표면에서 휘발되는 에어로졸 형태의 액적과 함께 나노입자가 비산된다는 것을 확인하였다[10,11]. 검증을 위해 10 nm 크기의 citrate-AgNP를 이용하여 글로브 박스

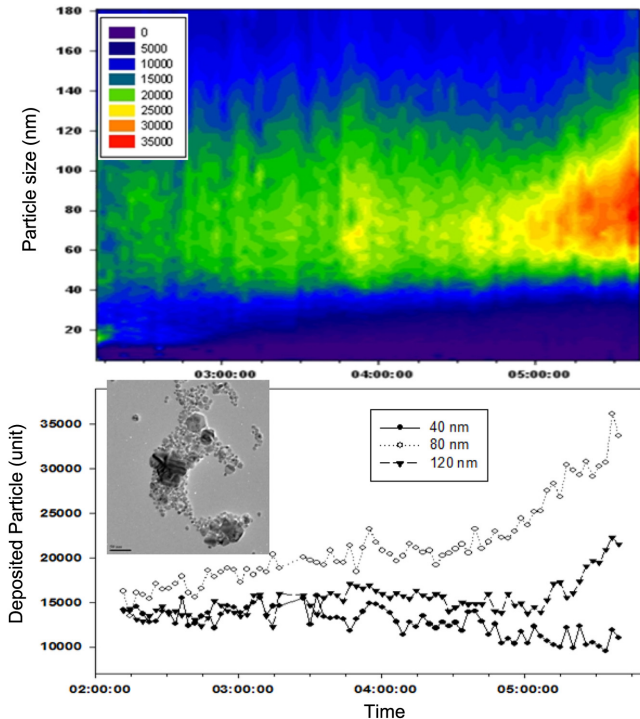


Fig. 2. SMPS sampling data with sol-gel process operation (Inset: TEM image of nanoparticle collected from SMPS sampler, scale bar=50 nm).

내에서 SMPS 모니터링을 실시하였다. 해당 결과는 Fig. 3과 같다.

액상 내 입도분포는 10 nm 기준으로 정규분포를 보이는 반면, 기상으로 노출된 입도분포는 2일 누적평균 20 nm 이상의 입도분포를 보인다. 이는 입자 노출시 발생하는 응집 현상으로 파악된다. SMPS

의 포집장치 내 설치된 TEM-grid를 이용하여, 대상 나노입자를 전자현미경 분석을 실시하였다. 그 결과 Fig. 3과 같이 액상에서는 분산된 10 nm AgNP를 나타내는 반면, 기상에서 측정된 TEM에서는 입자의 응집이 심하게 발생됨을 확인하였다. 즉, 액상 내 나노입자는 주변조건(상대습도와 온도)에 따라서 기액평형에 의한 대기상노출 (에어로졸 형태)이 발생되며, 이때 액적 내 포함된 나노입자는 액적의 증발과 함께 입자성장이 발생한다. 이는 입자의 응집을 초래하고 액상내 나노입자보다 큰 입도 분포를 보이게 한다.

4. 결 론

액상 및 기상 반응을 통해 나노물질을 생산하는 두 곳을 대상으로 나노물질에 대한 현장 모니터링을 실시하였다. 기상뿐만 아니라 액상 반응에서도 기상으로의 입자 노출이 심각하게 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 분석시에는 나노미터 수준의 입도 파악이 가능한 SMPS를 사용하였고, 추가적으로 나노입자의 크기를 전자현미경으로 분석하였다. 국립환경과학원에서 제시한 나노물질의 노출기준, 건강영향 등급을 바탕으로 건강위해도 등급을 평가하였고, 최종적으로는 잠재적 건강 위해도가 가장 높은 공정 내 작업자를 선정할 수 있었다. 해당 방법론을 통해 정보수집의 우선순위를 결정하고, 해당 공정을 집중적으로 환경 노출평가를 실시하였다. 안타깝게도 현장 작업자의 나노물질 위해성에 관한 인식이 부족하여 제도적인 안전관리와 홍보가 미흡하다는 점을 확인할 수 있다.

본 연구를 통해 제시할 수 있는 나노물질의 환경 및 인체 노출에 따른 안전관리 방안들은 Fig. 4와 같이 정리할 수 있다. 환경노출평가가 완료되면, 유해요인을 제거하거나 저유해한 것으로 대체할 수 있는 기법을 마련하거나 긴급한 경우는 개인보호장비(PPE, personal protective equipment) 착용을 의무화시켜 개인노출을 최소화시켜야

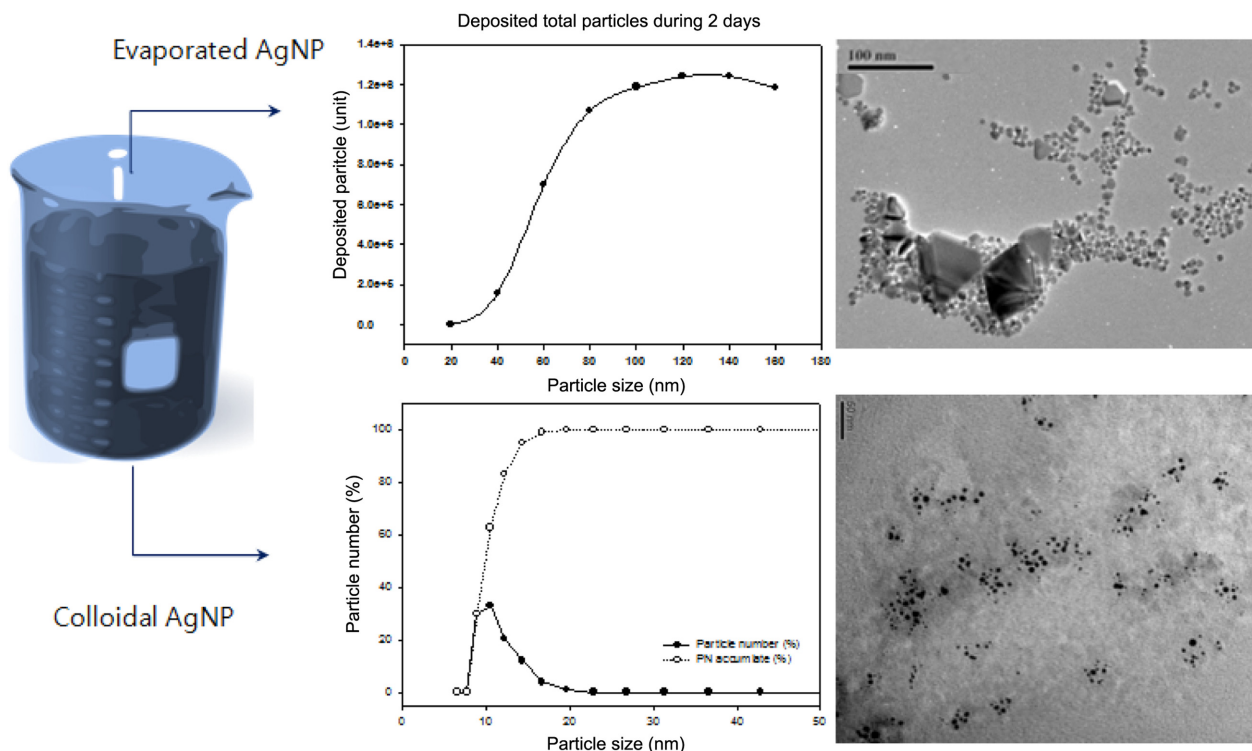


Fig. 3. Particle size distributions and TEM images of evaporated and colloidal AgNP.

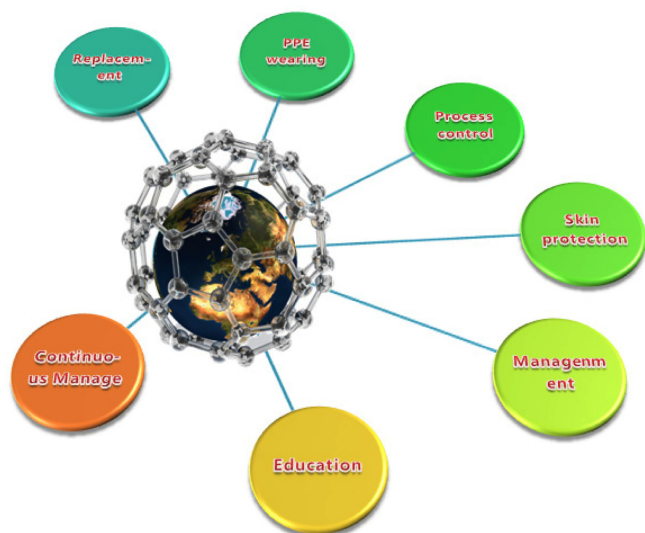


Fig. 4. Nano-safety management based on the environmental exposure.

한다. 또한 공정관리, 경영관리, 작업관리를 통해 개인 노출자들의 의식전환을 야기시켜야 한다. 피부노출후 세면 등을 통해 2차적인 오염을 막아야 하겠다.

감 사

본 연구는 2009년 국립환경과학원의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Woodrow Wilson Center, "An Inventory of Nanotechnology-based Consumer Products Currently on the Market," The Project on Emerging Nanotechnologies(2011).

2. Bae, E., Lee, J., Kim, Y., Choi, K. and Yi, J., "Sample Preparation and Analysis of Physico-Chemical Properties for Safety Assessment of Manufactured Nanomaterials," *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **12**, 59-73(2009).
3. Barnaby, J. F., "Samung's Nanotech Washer Must Follow Bug-spray Rules," *New York Times*, Sep. 26 (2007).
4. Park, E. J., Yi, J., Kim, Y., Choi, K. and Park, P., "Silver Nanoparticles May Induce Cytotoxicity by a Trojan-horse Type Mechanism," *Toxicol. In Vitro*, **24**, 872-878(2010).
5. Bae, E., Pak, H.-J., Park, J., Yoon, J., Kim, Y., Choi, K. and Yi, J., "Effect of Chemical Stabilizers in Silver Nanoparticle Suspensions on Nanotoxicity," *Bull. Korean Chem. Soc.*, **32**, 613-619(2011).
6. Ministry of Environment, "Toxic Chemical Control Act," Chemicals in Environmental Laws(2009).
7. Mulhausen, J. R. and Damiano, J., "A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures," AIHA Press, 2nd Ed., 1998.
8. Liu, J. Sonshine, D. A., Shervani, S. and Hurt, R. H., "Controlled Release of Biologically Active Silver from Nanosilver Surfaces," *ACS Nano*, **4**, 6903-6913(2010).
9. Ministry of Environment, "Technical Report for Assessment and Measurement of Nanomaterials' Distribution," National Institute of Environmental Researches(2008).
10. Park, J., Kwak, B. K., Bae, E., Lee, J., Choi, K., Yi, J. and Kim, Y., "Exposure Assessment of Engineered Nanomaterials in the Workplace," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**, 1630-1636(2009).
11. Park, J., Kwak, B. K., Bae, E., Lee, J., Kim, Y. and Yi, J., "Characterization of Exposure to Silver Nanoparticles in the Manufacturing Facility," *J. Nanopart. Res.*, **11**, 1705-1712(2009).