

나노입자 등 흡입 시 유해성 규명을 위한 나노입자다중발생장치 개발

[집필자]

이성배 연구위원/ 산업안전보건연구원 산업화학연구실

실용화 요약

**3D 프린팅 방법으로 발생하는 입자상 물질에 대한 생체독성의 영향을
직접적으로 평가하기 위해 나노입자다중발생장치 개발**

연구원에서 개발한 나노입자다중발생장치는 3D 프린터로 성형품을 제조하는 용융압출 방식과 동일하게 필라멘트를 가열, 용융, 압출하여 나노입자를 발생시킬 수 있는 장치로, 좁은 공간에서도 사용 가능하며 비용도 적게 소요된다는 특징을 갖고 있다. 또한 다수의 압출기를 사용하여 단일 재료뿐만 아니라 여러 종류의 혼합 재료를 동시에 사용하여 발생·포집·이송시킬 수 있기 때문에 활용 범위가 넓다. 즉 단순히 나노입자를 발생시키는 것이 아니라, 노즐의 토출온도, 토출속도 및 공기유량 등을 간단하게 조절하여 나노입자를 균일한 농도로 지속적으로 발생시킬 수 있는 장치이다.

나노입자다중발생장치 활용으로 나노입자 발생 작업환경에서 작업하는 노동자, 일반인들의 흡입노출로 인한 유해성 확인 및 평가를 할 수 있으며, 나노입자 발생 작업환경 노출기준 설정 및 법적 규제의 과학적 근거자료를 제공함으로써 관련 정책을 수립할 수 있다. 궁극적으로 노동자 건강장해 예방에 기여할 수 있을 것이다.

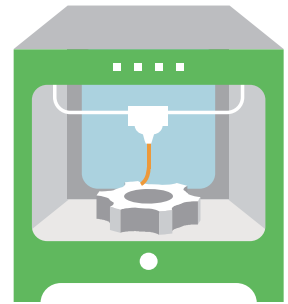
* 연락처: TEL. 042-869-8513 / sblee@kosha.or.kr

개요 및 배경

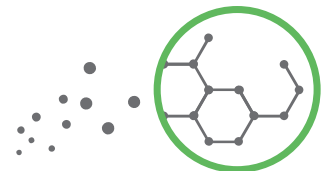
1. 배경

우리 일상생활에서 고분자 재료는 사업장의 압출 성형기, 사출 성형기에서 많이 사용되고 있다. 최근에는 사업장뿐만 아니라 일반 사무실, 가정에서 3D 프린터를 이용하여 산업용 시제품, 피규어나 각종 조형물을 제작하는 등 사용 사례가 증가하고 있다. 3D 프린터는 액체나 파우더 형태의 폴리머, 금속 등의 재료를 적층 방식으로 쌓아올려 입체 형상의 성형품을 제조한다. 3D 프린터를 이용하게 되면 제작비용과 제조시간을 대폭 단축할 수 있고, 개인 맞춤형 제조가 가능하며, 복잡한 입체 형상도 간편하게 제조할 수 있다는 장점이 있다. 위와 같은 장점을 갖는 3D 프린터는 자동차, 항공, 건축, 의료, 가전, 완구 등 다양한 산업 분야에 널리 이용되고 있다.

현재까지 유통·사용되고 있는 3D 프린터용 고분자 재료는 필라멘트, 레진, 비드, 파우더 형태이며, 제품 성형 가공 전 단계인 고분자 재료는 밀리미터 크기 이상으로 대부분 호흡성 분진크기($10\mu\text{m}$)보다 크다. 이 때문에 고분자 재료가 인체의 호흡기로 유입될 가능성은 매우 희박하며, 만약 작은 입자가 호흡기를 통하여 유입된다고 할지라도 코 점막의 점액에 포착되거나 기도와 기관지에 침착되어 가래로 배출되며 소화기로 들어가 대부분 제거된다. 결국 고분자 재료 자체는 폐포까지 도달하지 못하여 흡입 시험의 호흡기를 통한 유해성 평가가 불가하다.



실제로 고분자 재료가 생체에 호흡기로 유입되는 것은 이 재료를 가지고 3D 프린터 등으로 가공하는 단계이다. 이때 발생하는 나노입자 크기의 고체상 증기인 흠(fume)이 인체에 유입되어 유해성을 일으킬 수 있다. 그러나 3D 프린터 작업 시 발생하는 나노입자나 HAPs (Hazardous Air Pollutants : 유해대기오염물질)와 같은 물질들이 작업자의 호흡기를 통해 얼마나 유입되어 어떠한 영향을 미치는지에 대한 규명이 되지 못하고 있다. 최근에는 3D 프린터를 수업 등에 많이 활용해온 어느 과학고 교사들의 잇단 희귀암 육종에 걸린 것이 확인되어 공포에 휩싸였다는 보도가 있었다. 노출기준이나 규제 등이 없는 가운데, 안전 논란이 커지자 3D프린터 사용자제, 사람 상주장소에서 사용불가, 출입 제한 등의 형식적인 지침만 나오고 있고 안전관리 대책은 미흡한 실정이다. 이렇기 때문에 고분자 재료 가공에 따른 인체 유해성을 판단하는 기준 및 규제의 과학적 근거가 필요하다. 이에 연구를 통해 3D 프린터 작업 시 발생하는 나노입자 등이 유해성을 규명할 수 있도록 나노입자다중발생장치를 개발하여 특허로 출원하였다.



2. 주요 관련 정보

3D 프린터에 의한 성형품 제조방식으로는 필라멘트 재료를 가열하여 압출하는 FDM(Fused Deposition Modeling)방식, 광경화 수지에 레이저를 주사하여 주사된 부분이 경화되도록 하는 SLA(Stereo Lithography Apparatus)방식, 기능성 고분자 또는 금속분말을 사용하여 소결시키는 SLS(Selective Laser Sintering)방식, 고출력 레이저 빔으로 금속을 직접 성형하는 DMT(Laser-aid Direct Metal Tooling)방식, 기계접합 조형 방식인 LOM(Laminated Object Manufacturing)방식, 그리고 광경화성 수지가 저장된 저장조의 하부로 광을 조사하여 경화시키는 DLP(Digital Light Processing)방식 등이 있다.

국내 3D 프린팅 소재제조 제품별 시장규모를 살펴보면 [표 1]과 같이 시장 규모면에서 열가소성 필라멘트와 광경화성 레진이 가장 두드러지게 성장하고 있다. 연구진들은 3D 프린팅 소재 중에서도 저렴하고 사용하기 간단하여 사업장 및 일반 가정에까지 널리 보급되어 있는 필라멘트를 사용하는 FDM 방식의 나노입자발생장치를 개발하였다.

[표 1] 국내 3D 프린팅 소재제조 제품별 시장규모(2018)

(단위: 백만원)

구분	열가소성		광경화성	금속	기타	합계	비율(%)	
	필라멘트	파우더	레진					
제조	국내	2,084	14	1,212	96	206	3,613	76.5%
	수출	782	0	311	16	0	1,108	23.5%
	합계	2,866	14	1,523	113	206	4,721	100.0%
유통		12,658	4,941	16,791	4,591	39	39,020	- 89.2%
합계		15,524	4,955	18,313	4,704	245	43,741	- 100.0%

※ 열가소성 플라스틱 : 용융 압출 조형 방식에서 쉽게 녹여 압출할 수 있도록 가느다란 실가닥처럼 만든 플라스틱류 3D프린팅 원료를 지칭

※ 광경화성플라스틱 : 광경화 조형 방식에서 사용되는 자외선(UV)에 굳는 성질을 가진 액체 상태의 플라스틱류로 3D 프린팅 원료를 지칭하며 ‘수지’라고도 지칭

[출처] 정보통신산업진흥원(2019) 2018 3D 프린팅 산업실태 및 동향분석 보고서

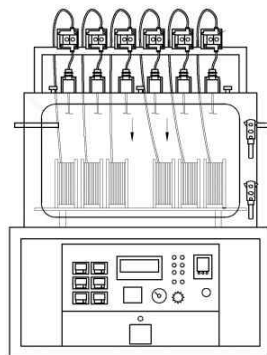


개발 내용

1. 차별성

3D 프린터는 프린터 내부에서 발생하는 입자 수 농도(Number Concentration)와 중량 농도(Mass Concentration)의 상하좌우 위치에 따라 농도편차가 크며 일정한 농도를 유지도 불가능하다. 발생하는 물질 또한 미량이기 때문에 유해성 평가에 활용하기에는 부적합하다. 또한 3D 프린터는 성형품 제작 자체가 목적이기 때문에 프린팅 작업 시 발생된 물질을 포집, 이송하기는 불가능하다.

이번에 개발한 나노입자다중발생장치는 3D 프린터에서 직접 나노물질을 측정할 때 발생하는 단점들을 보완하였으며, 성형품을 제조하는 방식과 동일하게 필라멘트를 가열·용융·압출하여 나노입자를 발생시킬 수 있다. 단순히 나노입자를 발생시키는 것이 아니라, 노즐의 토출온도, 토출속도 및 공기유량을 간단하게 조정하여 균일한 농도의 나노입자를 지속적으로 발생시킬 수 있다. 아울러 좁은 공간에서도 사용 가능하며 비용도 적게 소요된다. 다수의 압출기를 사용하여 나노입자다중발생장치 하나로 단일 재료뿐만 아니라 여러 종류의 혼합 재료를 동시에 사용하여 발생·포집·이송시킬 수 있기 때문에 활용 범위가 넓다. [그림 1]은 나노입자다중발생장치 도면과 발명품의 조건실험 전경이다.

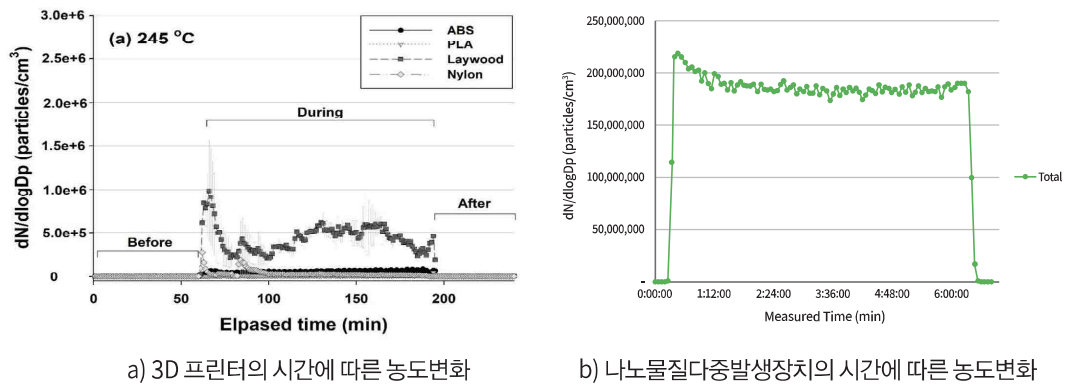


[그림 1] 나노입자다중발생장치

2. 개발 장비의 안정성 및 지속성 평가

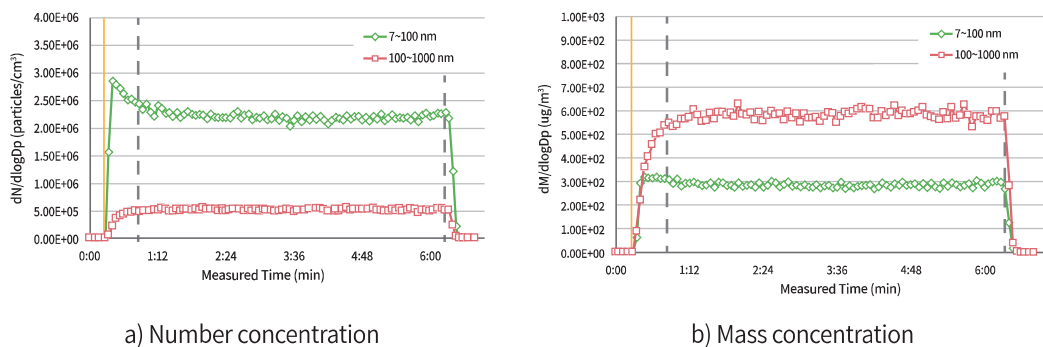
연구진들은 개발한 나노입자다중발생장치와 3D 프린터에서 직접 나노물질을 측정하는 방식을 비교해보았다. 나노물질의 측정, 분석을 위해서는 일정한 농도유지가 꼭 필요하다. [그림 2]는 3D 프린터와 나노입자다중발생장치의 시간에 따른 농도변화를 나타낸 것이다. [그림 2]의 a)는 3D 프린터를 사용하여 ABS, PLA, Laywood, Nylon 재료로 실험한 것으로, 가동초기에 가열코일의 온도 상승으로 급격하게 입자가 발생되었다가 시간이 지남에 따라 줄어들면서 상하 편차가 큰 경향을 보였다. 이는 대부분의 3D프린팅 작업 시에도 같은 경향을 나타내며, 일정한 농도 유지에는 한계가 있음을 보여준다.

[그림 2]의 b)는 연구진이 개발한 나노물질다중발생장치로 ABS물질을 사용하여 실험한 것으로, 가동초기에 역시 가열코일의 온도 상승으로 입자 발생량이 급격하게 증가하였으나 시간이 지남에 따라 안정되었고, 발생을 종료할 때까지 유지되는 양상을 보였다.



[그림 2] 시간에 따른 나노물질 발생의 안정성 비교

[그림 3]은 3D 프린터 및 필라멘트 제조사에서 권장하는 조건에서 나노입자다중발생장치로 실험한 입자 수 농도와 중량농도의 변화를 나타낸 것이다. 발생시작 20분전부터 측정 장비를 가동하여 발생 챔버 내 배경농도를 모니터링 하였다. 발생을 시작하면 농도가 전반적으로 증가하다가 약 30분 후부터 종료시점까지 6시간동안 큰 편차 없이 농도가 일정하게 유지되었다.



[그림 3] 제조사 권장 조건에서의 장시간 발생시 안정성

[표 2]는 나노입자다중발생장치의 발생시작 후 30분부터 종료시점 구간에서 기하학평균 입자 수 농도, 중량 농도, 그리고 표면적 농도 및 이들의 입자크기이다. 나노입자가 발생하는 동안 안정된 농도를 유지하였으며, 입자 크기도 큰 편차 없이 발생되었다. 입자 수 농도, 중량 농도와 표면적 농도에서의 결과적으로 나노물질다중발생장치는 나노입자를 균일한 농도로 지속적으로 발생시킬 수 있는 장치이며, 동물실험 등의 유해성 평가에 활용할 수 있음이 실험을 통하여 증명되었다.

[표 2] 제조사 권장 조건에서의 장시간 발생시 기하학 평균농도와 입자크기

Items	Concentration GM*(GSD †) (unit)	Particles conc. range (nm)	Median (nm)	Particle size GM*(GSD †) (nm)
Number Concentration	2,929,026(1.04) (1/m ³)	2,717,558~ 3,425,397	58.39	56.69(1.68)
Mass Concentration	775.15(1.06) (μg/m ³)	504.73~829.27	108.02	105.53(1.48)
Surface Concentration	47,829.86(1.04) (μm ² /cm ²)	38,110.37~ 50,188.79	92.67	89.21(1.54)

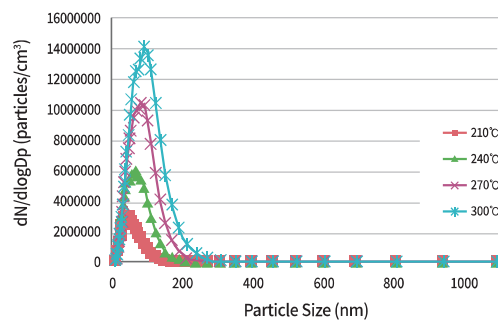
Analysis equipment : SMPS, Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 240℃,
Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level, Generator operating time : 6 hours

*GM : Geometric Mean † GSD : Geometric Standard Deviation

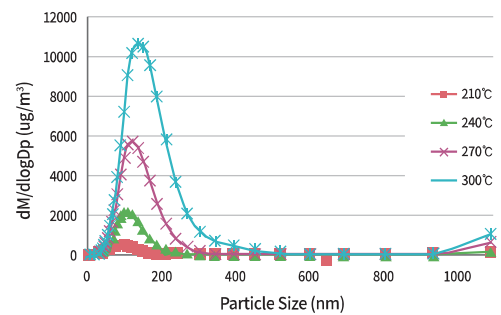
1) 발생 조건에 따른 입자크기 분포

나노입자다중발생장치에서 압출기 노즐의 토출온도가 올라감에 따라, 노즐의 토출속도가 증가함에 따라, 그리고 공기유량이 감소함에 따라 나노 입자의 크기 및 농도가 증가하며, 세 가지 조건을 상황에 맞게 조정하여 나노 입자의 크기 및 농도 조절이 가능하다.

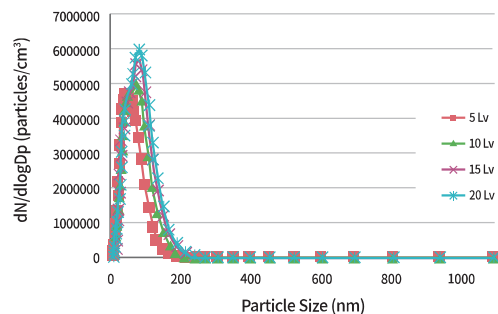
[그림 4]는 노즐의 토출온도, 토출속도, 공기유량 조건에 따른 평균 입자 수 농도와 평균 중량 농도의 입자크기 분포를 나타낸 그래프이다. 노즐의 토출온도가 올라감에 따라 평균 입자 수 농도와 평균 중량 농도는 증가하였으며 각각의 입자크기(a, b)도 증가하였다. 노즐의 토출속도가 증가함에 따라 평균 입자 수 농도와 평균 중량 농도는 증가하였으며 각각의 입자크기(c, d)도 증가하였다. 다만, 공기유량이 증가함에 따라 평균 입자 수 농도는 증가하였으나 평균 중량 농도는 감소하였으며, 각각의 입자크기(e, f)는 감소하는 경향을 나타내었다.



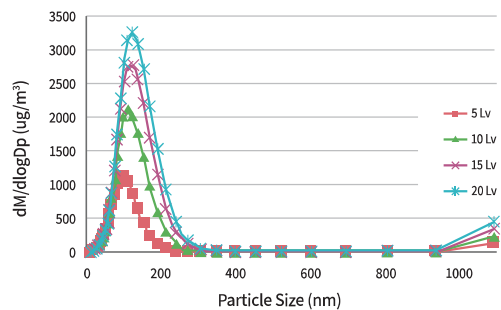
a) Excluder temp
(total number concentration)



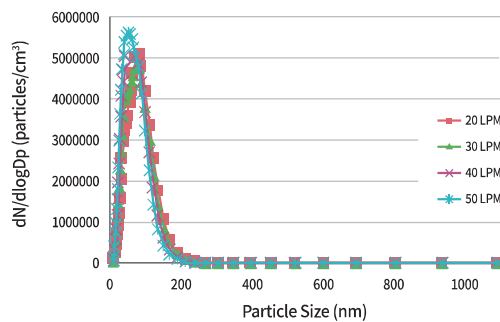
b) Excluder temp (total mass concentration)



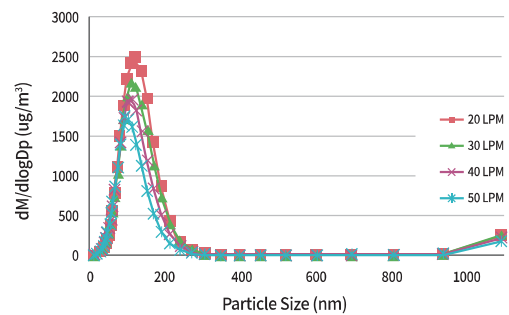
c) Nozzle speed (total number concentration)



d) Nozzle speed (total mass concentration)



e) Air flow (total number concentration)



f) Air flow (total mass concentration)

[그림 4] 노즐의 토출온도, 토출속도, 공기유량에 따른 입자 크기 분포

3. 발명의 실용성

1) 실용가치

나노입자다중발생장치는 산업현장에서 사용하는 다양한 종류의 플라스틱 등 고분자 재료를 가열·용융·압출의 방법으로 성형품 제작시 발생하는 나노 입자 및 HAPs에 대한 유해성 평가에 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 건강장해 예측, 작업환경 노출기준 설정을 위한 자료제공을 할 수 있다.

나노입자다중발생장치의 가장 큰 특징은 발생하는 입자를 균일한 농도로 장시간 지속적으로 발생시켜서 실험동물 등에 노출하여 생체독성 영향 연구에 활용할 수 있다는 것이다. 또한 작은 공간에서도 사용 가능하며 비용이 적게 들고, 다수의 압출기를 사용할 수 있으며, 단일 재료뿐만 아니라 여러 종류의 재료를 동시에 발생시킬 수 있는 장점이 있다.

2) 활용 가능성

나노입자다중발생장치는 고분자재료 사용으로 발생하는 입자상 물질을 실험동물에게 노출하여 인체 유해성 규명 등에 활용이 가능하다. 또한, 나노안전성 예측을 위한 독성발현연구(AOP: Adverse Outcome Pathway), 장기유사체(Organoid) 관련 연구에도 활용할 수 있다.

3) 근로자 건강장해 예방

나노입자다중발생장치를 활용한 연구를 통하여 작업장에서 발생하는 나노입자, HAPs 등이 인체에 미치는 영향을 예측·평가할 수 있으며, 더 나아가 작업환경 노출기준 설정 및 법적 규제의 과학적 근거자료를 제공함으로써 노동자의 건강장해 예방과 관련 정책을 수립하는데 기여할 것으로 기대된다.

활용 계획

이번에 개발한 나노입자다중발생장치를 활용하여 작업장에서 발생하는 나노입자, HAPs 등이 인체에 미치는 영향을 예측·평가하고, 더 나아가 작업환경 노출기준 설정 및 법적 규제와 과학적 근거자료를 제공함으로써 노동자의 건강장해 예방과 관련 정책을 수립하는데 활용할 수 있을 것이다.

궁극적으로 생체 독성 영향 파악 및 관련 업무에 종사하고 있는 노동자는 물론 3D 프린터를 사용하는 일반인의 건강장해 예방에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



참고문헌

1. Stephens B, Azimi P, Orch ZE et al. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. Atmospheric Environment 2013;79:334-339
2. Yu Zhou, Xiangri Kong, Ailu Chen, Shijie Cao. Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room. Procedia Engineering, 2015;121:506-512
3. 박지훈, 전해준, 박경호, 윤충식. 3D 프린팅 가동 조건 별 발생 입자크기 분포와 흡입 노출량 추정. J. Environ Health Sci. 2018;44(6):524-538
4. 이성배. 3D 프린터 산업보건 관점에서 고민. 대한산업보건협회 산업보건 2018;365:21-29
5. 이용, 함완식, 2017 3D 프린팅 산업실태 및 동향분석 보고서. 정보통신산업진흥원 2018;p.36
6. A과학교 교사들 잇단 희귀암 육종...‘3D프린터 공포’ 확산 (2020.08.03.)
http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002663757 &CMPT_CD=P0010&utm_source=naver&utm_medium=newsearch&utm_campaign=naver_news
7. ‘3D프린터’ 안전 논란에 교육청은 ‘사용자제’, 정부는 합동회의 (2020.08.25.)
http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002670018 &CMPT_CD=P0010&utm_source=naver&utm_medium=newsearch&utm_campaign=naver_news
8. 이성배 등, 특허출원 제10-2020-0097259호, “나노입자다중발생장치”, 2020.