



3D 프린터에서 발생하는 ABS나노물질의 흡입독성연구(Ⅰ)

OSHRI

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



연구보고서

3D 프린터에서 발생하는 ABS나노물질의 흡입독성연구(I)

이성배·박승현·최윤정·이상석

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2022년 01월 ~ 2022년 11월
- 핵심단어 3D 프린터, ABS, 나노물질, 비부 흡입노출, 흡입독성
- 연구과제명 3D 프린터에서 발생하는 ABS나노물질의 흡입독성연구(I)

1. 연구배경

최근에 3D 프린터가 대중화됨에 따라 이와 관련한 안전보건 이슈가 지속적으로 부각되고 있으며, 3D 프린터를 개인, 학교, 사무실 등 비산업장에서 사용하는 빈도가 증가하고 있다. 이에 따라 3D 프린팅을 통하여 발생하는 나노물질의 생체독성 영향에 대한 과학적 근거 마련을 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 3D 프린팅에 의하여 발생하는 나노입자가 생체에 미치는 영향을 평가하기 위하여 1차 년도(2022년) 연구로 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동 시스템을 구축하고자 하였다.

2. 주요 연구내용

○ 3D 프린팅 산업 실태 및 관련 문헌조사

- 최근 3D 프린팅 산업 실태와 문헌을 통하여 산업 분야별 시장, 산업 활용, 기술 방식 등을 검토하여 수요가 많으면서 유해성이 우려되는 프린팅 방식과 프린팅 소재를 선택

○ 3D 프린터 다중발생 장치와 비부노출형 흡입챔버 연동시스템의 실험조건 확인 및 동물실험 노출조건 확립

① 3D 프린터 다중 발생장치 검증

- 기밀성 : 3D 프린터 발생장치의 기밀성 테스트 결과 97.13%~99.68%
- 균일성 : 비부노출 흡입챔버 타워에서 각 층별 노즐 포트의 공기유량 균일성 측정결과 1.01~1.03 LPM

② 조건별 나노물질 발생실험

- 노즐의 토출 속도 : 토출 속도가 증가함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도 증가
- 토출 온도 : 토출 온도가 상승함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도 증가
- 희석공기 유량 : 희석비율이 감소함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도 증가
- 입자수농도중위값(CMD) : 100.44 nm
- 질량농도중위값(MMAD) : 228.30 nm

③ 동물실험 환경 조성, 발생물질 농도의 안정성 및 재현성

- 비가습시 비부노출형 흡입챔버 환경 : 온도 24.58℃, 상대습도 5.72%, 산소농도 20.37%
- 가습시 비부노출형 흡입챔버 환경 : 온도 24.04℃, 상대습도 43.63%, 산소농도 20.31%
- 발생물질 농도의 일내 안정성 : 입자 수 농도 및 질량 농도는 발생시작 후 약 40분 뒤부터 안정적으로 유지
- 발생물질 농도의 일간 재현성 : 입자 수 농도 및 질량 농도의 평균값에서 오차범위는 각각 최대 10.63%, 12.35%로 OECD TG(Test Guideline)의 ± 20 이내를 충족

④ 나노입자 농도 및 TVOC 농도

- 필터 중량법의 기하평균 농도 : 2.34 mg/m^3 (SMPS의 측정값 1.65 mg/m^3)
- TVOCs 평균 농도 : 51.79 ppb (실내공기질 기준으로 환산 시 $118.84 \text{ } \mu\text{g/m}^3$)

⑤ 입자크기 및 형태

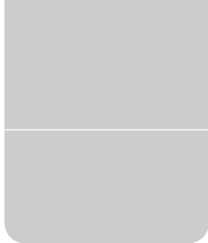
- 입자 크기 : 대부분의 입자들이 집단을 이루어 수 nm ~ 수 μm 까지 다양
- 입자 형태 : 다각형 판이 겹쳐진 형태 또는 타원형태, 깃털 형태, 구슬 집단 형태

3. 연구 활용방안

- 비부 노출형 3D 프린터 다중 발생 시스템을 활용한 실험동물의 생체영향 평가
- 3D 프린팅에 의하여 발생하는 입자상 물질의 특성연구를 위한 기초자료 제공

4. 연락처

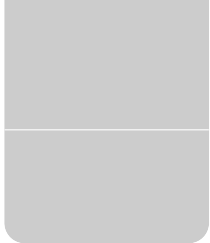
- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 흡입독성시험2부 연구위원 이성배
 - ☎ 042) 869. 8513
 - E-mail sblee@kosha.or.kr



목 차

I. 서론	1
II. 연구방법	5
1. 3D 프린팅 산업 실태	7
2. 3D 프린터 나노물질 발생장치 고도화	7
1) 3D 프린터 다중 발생장치	8
2) 측정 장비	8
3) 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동시스템 조건 확립	9
4) 입자상 물질 발생 실험	10
5) 입자상 물질의 형태 확인	12
III. 연구결과	13
1. 3D 프린팅 산업 실태	15
1) 3D 프린팅 시장	15
2) 국내 3D 프린팅 기업 및 종사자 현황	18

3) 국내 3D 프린팅 기술 방식	19
4) 국내 3D 프린팅 산업 활용	21
2. 3D 프린터 다중 발생장치 검증	22
1) 3D 프린터 다중 발생장치 기밀성	22
2) 공급유량에 따른 비부노출형 흡입챔버 포트별 유량	23
3) 비부노출형 흡입챔버의 공기 유량 균일성	26
2. 조건별 나노물질 발생실험	27
1) 토출 속도	27
2) 토출 온도	32
3) 희석공기 유량	37
4) 가습 및 비가습시 환경 비교	42
5) 가습 발생실험	43
6) 안정성 및 재현성	48
7) 중량농도 비교	53
8) TVOCs 측정	55
9) 입자 크기 및 형태	55



목 차

IV. 고찰	59
V. 결론	69
참고문헌	73
Abstract	77

표 목차

〈표 III-1〉 3D 프린터 다중 발생장치 기밀성 실험 결과	23
〈표 III-2〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(1)	23
〈표 III-3〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(2)	24
〈표 III-4〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(3)	24
〈표 III-5〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(4)	25
〈표 III-6〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(5)	25
〈표 III-7〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량의 균일성 결과	26
〈표 III-8〉 토출 속도에 따른 입자 수 농도	27
〈표 III-9〉 토출 속도에 따른 질량 농도	28
〈표 III-10〉 토출 온도에 따른 입자 수 농도	32
〈표 III-11〉 토출 온도에 따른 질량 농도	32
〈표 III-12〉 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도	37
〈표 III-13〉 희석 공기 유량에 따른 질량 농도	38
〈표 III-14〉 비가습시 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버 환경	42
〈표 III-15〉 가습시 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버 환경	43
〈표 III-16〉 가습여부에 따른 입자 수 농도	44
〈표 III-17〉 가습여부에 따른 질량 농도	45
〈표 III-18〉 장시간 발생시 입자 수 농도 일간 비교	50
〈표 III-19〉 장시간 발생시 질량 농도 일간 비교	51
〈표 III-20〉 필터 중량법과 SMPS의 농도 비교	53

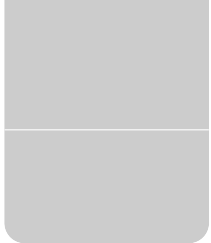
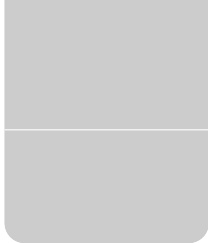


표 목차

〈표 Ⅲ-21〉 필터 중량법과 ELPI의 농도 비교	54
〈표 Ⅲ-22〉 TVOC 농도 비교	55

그림목차

[그림 II-1] 동물실험용 3D 프린터 다중발생 시스템	8
[그림 III-1] 3D 프린팅 시장 규모 현황	16
[그림 III-2] 3D 프린팅 소재 시장 현황	17
[그림 III-3] 3D 프린팅 서비스 시장	18
[그림 III-4] 국내 3D 프린팅 사업체 및 종사자 현황	19
[그림 III-5] 국내 3D 프린팅 기술방식	20
[그림 III-6] 국내 3D 프린터 주요 수요처	21
[그림 III-7] 토출 속도에 따른 입자 수 농도 변화	29
[그림 III-8] 토출 속도에 따른 질량 농도 변화	29
[그림 III-9] 토출 속도에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포	30
[그림 III-10] 토출 속도에 따른 질량 농도의 입자크기 분포	30
[그림 III-11] 토출 속도에 따른 입자 수 농도의 선형회귀 분석	31
[그림 III-12] 토출 속도에 따른 질량 농도의 선형회귀 분석	31
[그림 III-13] 토출 온도에 따른 입자 수 농도 변화	34
[그림 III-14] 토출 온도에 따른 질량 농도 변화	34
[그림 III-15] 토출 온도에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포	35
[그림 III-16] 토출 온도에 따른 질량 농도의 입자크기 분포	35
[그림 III-17] 토출 온도에 따른 입자 수 농도의 선형회귀 분석	36
[그림 III-18] 토출 온도에 따른 질량 농도의 선형회귀 분석	36
[그림 III-19] 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도 변화	39
[그림 III-20] 희석 공기 유량에 따른 질량 농도 변화	39



그림목차

[그림 Ⅲ-21] 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포	40
[그림 Ⅲ-22] 희석 공기 유량에 따른 질량 농도의 입자크기 분포	40
[그림 Ⅲ-23] 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도의 선형회귀 분석	41
[그림 Ⅲ-24] 희석 공기 유량에 따른 질량 농도의 선형회귀 분석	41
[그림 Ⅲ-25] 가습여부에 따른 입자 수 농도 변화	46
[그림 Ⅲ-26] 가습여부에 따른 질량 농도 변화	47
[그림 Ⅲ-27] 가습여부에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포	47
[그림 Ⅲ-28] 가습여부에 따른 질량 농도의 입자크기 분포	48
[그림 Ⅲ-29] 장시간 발생시 입자 수 농도 변화	49
[그림 Ⅲ-30] 장시간 발생시 질량 농도 변화	49
[그림 Ⅲ-31] 장시간 노출시 입자 수 농도의 분포도 일간 비교	52
[그림 Ⅲ-32] 장시간 노출시 질량 농도의 분포도 일간 비교	52
[그림 Ⅲ-33] 입자 크기 및 형태(1)	56
[그림 Ⅲ-34] 입자 크기 및 형태(2)	57
[그림 Ⅲ-35] 입자 크기 및 형태(3)	58

I. 서론



I. 서론

최근에 3D 프린터가 대중화됨에 따라 이와 관련한 안전보건 이슈가 지속적으로 부각되고 있다. 3D 프린터를 개인, 학교, 사무실 등 비산업장에서 사용하는 빈도가 증가하고 있는 가운데(Stehpenes 등, 2013; Zhou 등, 2015; Stefaniak 등, 2017; Gümperlein 등, 2018), 특히, 3D 프린터를 수업 등에 많이 활용해온 과학교사들의 잇 다른 희귀암 육종에 걸린 것이 확인되고 사망하였다는 기사는 우리에게 경각심을 한층 더 올렸다(오마이뉴스 20.8.3, 헬스조선 21.6.4, 서울신문 21.7.6, YTN 21.12.14).

ABS, resin, PLA 등의 고분자 재료를 3D 프린터로 제품을 만들 경우에 VOCs(휘발성유기물) 뿐만 아니라 나노크기의 물질이 발생하는 것은 일반화된 사실이다(과학기술정보통신부, 2022). 정은교 등(2019)의 3D 프린터 소재의 종류와 성분을 분석한 연구에서 3D 프린팅 소재 중 PLA 소재의 경우, 관리대상물질은 5~7종, 고분자물질은 20~25종이 검출되었고 ABS 소재의 경우에는 관리대상물질은 5~6종, 고분자물질은 15~23종이 검출되었으며 기타 소재에서는 관리대상물질로 2~8종, 고분자물질로는 15~30종이 검출되었다고 하였다. Dobrzyńska 등(2022)은 9개의 서로 다른 필라멘트를 사용하는 FDM 프린터에서 적층 제조하는 동안 자연 환기 가구만 갖추고 있는 공간에서 화학 물질과 입자 측정하였는데, 공기 샘플에서 스티렌 및 기타 분해 산물(포름알데히드, 톨루엔, 자일렌)과 같이 인쇄에 사용되는 개별 재료의 단량체를 포함하여 수많은 화학 물질이 확인되었으며, 3D 프린팅 공정은 22.1~106.7 nm 범위의 직경을 가진 입자를 방출하고 작업장 공기의 입자 수 농도를 증가시켰다고 하였다. Steinle(2016)은 FDM 방식의 데스크 탑 3D 프린터에서 표준물체를 프린팅 하였을 때 PLA가 ABS보다 초미세입자 방출이 더 높았다고 한 반면, Stabile 등(2017)은 다양한 실내 환경에서 실험한 결과에서 ABS 필라멘트가 가장 많은 수의 에어로졸을 생성하였다고 하였으며, Byrley 등(2019)은 FDM방식의 3D

프린터에서 대부분의 입자 크기는 100 nm미만이었고, ABS는 PLA보다 입자 수가 더 많았다고 하였다.

EPA(2017)의 3D 프린터 유해성평가 보고서에서는 FDM 방식으로 프린팅 작업을 할 경우 휘발성 유기화합물(VOCs) 중에서 포름알데히드 등이 주로 발생하지만, 건강에 미칠 수 있는 영향을 나타내지 않는 노출 수준이하라고 하였다. 또한, 초 미세입자의 주성분으로 스티렌을 80%이상 배출하고 있으나, 건강상의 부작용 위험과 관련하여 불확실성이 존재하기 때문에 건강영향을 평가하기는 이르다고 하였다. 다만, 미세입자 표면에 VOCs 물질이 흡수되고 그 입자가 호흡기 계통에 침착되어 노출되는 호흡기 조직에 자극효과가 커질 수 있을 것이라고 하였다.

3D 프린팅 프로세스로 생성된 나노입자가 생체에 영향을 미치는 잠재적 위험을 평가하기 위한 자료 축적이 필요하며, 3D 프린팅을 통하여 발생하는 나노물질의 생체독성 영향에 대한 평가가 필요하다. 3D 프린터 사용은 줄어들지 않고, 산업현장, 교육시설, 사무실, 그리고 가정 등에서 사용이 증가하고 있기 때문에, 3D 프린터를 안전하게 사용하기 위하여 안전한 환경을 조성하고 3D 프린터 안전이용 가이드라인에서 제시한 안전수칙(과학기술정보통신부, 2022)을 준수하여 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 먼저 최근 3D 프린팅 산업 실태(정보통신산업진흥원, 2022) 자료를 통하여 산업 분야별 시장, 산업 활용, 기술 방식 등을 검토하였으며, 관련 문헌들을 검토하여 가장 수요가 많은 프린팅 방식과 프린팅 소재를 선택하게 되었다. 또한, 3D 프린팅에 의하여 발생하는 나노입자가 생체에 미치는 영향을 평가하기 위하여 1차 년도에 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동 시스템을 구축하였으며, 노즐의 토출 속도, 토출 온도, 공기의 희석비율 등의 조건 실험을 수행하였다. 아울러, 동물실험을 위한 환경조건인 온도, 상대습도, 산소농도 등의 기준에 부합하도록 개선하였다. 본 연구는 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동 시스템으로 실험동물을 활용한 연구를 추진할 수 있도록 하는 것이 목적이다.

Ⅱ. 연구방법

.....

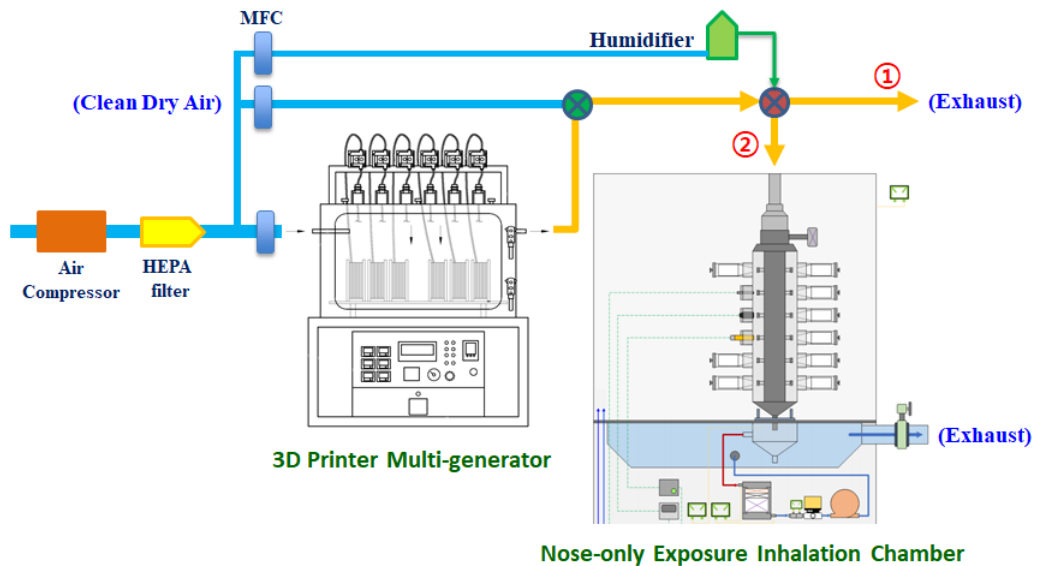
II. 연구방법

1. 3D 프린팅 산업 실태

2018년부터 매년 정보통신산업진흥원에서 3D 프린팅 산업 실태조사를 실시해 오고 있다. 3D 프린팅 공급사와 수요사 2개 파트로 구성하였으며, 공급사의 경우 3D 프린팅 사업을 하고 있는 전국 상시 종업원 수 1인 이상 사업체를 대상으로 전수조사를 실시하고, 수요사는 3D 프린팅 주요 활용산업 대상 장비도입/출력 서비스 이용업체로 구분하여 표본조사를 실시하여 조사한 것이다. 상기의 3D 프린팅 산업 실태에 대한 내용은 정보통신산업진흥원의 「2021년 3D 프린팅 산업 실태조사」(2022)를 참고하여 정리하였다.

2. 3D 프린터 나노물질 발생장치 고도화

3D 프린터 다중 발생장치로 동물실험을 수행하기 위하여 기존 FDM방식의 3D 프린터 다중 발생장치와 실험동물 비부(nose-only) 노출형 흡입챔버를 연동한 다음 기밀성, 조건에 따른 발생, 발생의 안정성, 환경조건 등이 적합한지 검증을 수행하였다.



[그림 II-1] 동물실험용 3D 프린터 다중발생 시스템

1) 3D 프린터 다중 발생장치

FDM방식의 3D 프린터 다중 발생장치를 준비하고, ABS재질의 필라멘트를 연결하였다. 필라멘트는 Four way 3D filament(White color, Φ 1.75 mm, China)를 사용하였다. 발생장치 내부에 CDA(Clean Dry Air)를 공급하고 20분이 지나면 발생장치 내부에 남아있던 입자가 대부분 제거된다. 발생장치 내부의 입자가 제거되어 깨끗한 상태가 되면 가열 코어를 작동시키고, 세팅된 온도에 도달하게 되면 압출기를 가동시켜서 발생을 시작하였다.

당일 발생실험을 마치면 압출기에 달라붙어 있는 필라멘트 잔유물을 제거하였다. 또한 발생챔버 내부에 잔류물도 깨끗하게 청소하였다.

2) 측정 장비

전기장을 통과하는 입자의 전기적 특성을 이용하는 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, Model : 5.416, Grimm Aerosol Technik, Germany)를

활용하여 5 nm~1 μ m의 크기로 분류하고 실시간 모니터링을 하였으며, 입자 수 농도, 질량농도, 그리고 표면적 농도를 측정하였으며, 농도 값을 비교하기 위하여 보조 장비로 코로나 충전기로 입자를 대전시켜 공기 중 6 nm~10 μ m 범위의 입자 수 농도를 구간별로 일정한 크기로 측정할 수 있는 ELPI+(Electronic Low Pressure Impactor, Dekati, Finland)도 활용하였다. 실질적인 농도 분석은 개인시료 채취용 펌프(Air Chek XR, SKC, USA)를 이용하여 필터 중량법으로 중량농도를 측정하였다.

또한, 투과전자현미경(TEM : Transmission Electron Microscope, Model : HF 5000, Hitachi-Instruments, 200kV Cs FE-S, Japan)을 사용하여 공기 중 입자의 형태와 크기를 확인하였다.

3) 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동시스템 조건 확립

▪ 3D 프린터 다중 발생장치 기밀성

3D 프린터 다중 발생장치의 중요한 것 중에 하나는 기밀성이다. 밀폐가 되지 않으면 발생하는 나노입자 및 휘발성 유기화합물이 원치 않는 곳으로 누출되어 측정값에 영향을 끼쳐서 발생시스템의 신뢰성이 떨어지기 때문이다. 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버를 연결한 후 3D 프린터 다중 발생장치의 inlet을 통하여 유입되는 공기유량과 비부노출형 흡입챔버에서 유출되는 공기유량 차이를 비교하였다. 디지털유량계(TSI 5300 series)를 활용하여 유입유량 10 LPM, 20 LPM, 30 LPM, 40 LPM, 50 LPM에 따른 유출유량 값을 3회씩 측정하여 기밀성 여부를 확인하였다.

▪ 공급유량에 따른 비부노출형 흡입챔버 포트별 유량

비부노출형 흡입챔버 각 포트의 공기유량을 1 LPM으로 유지시킬 수 있는 유량 조건을 확인하였다. 비부노출형 흡입챔버의 포트는 실험동물의 비부에 밀착시켜 흡입노출을 할 수 있도록 하는 부분이다. 일반적으로 실험동물 랫드의

호흡량은 0.17~0.20 LPM이며, 주령에 따라 0.5 LPM까지 증가한다. 아울러, 비부노출형 흡입챔버 타워의 6개 층 포트에서 측정되는 공기가 균일하게 유지되는 유량이 0.8 LPM이상이다. 이상의 조건을 충족하고 안전율을 감안하여 포트에 유출되는 공기유량은 1 LPM이상 유지하도록 하였다. 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버가 연결된 발생시스템에서 3D 프린터 다중 발생장치의 발생 유량과 비부노출형 흡입챔버를 통해서 공급되는 희석 유량을 변동해 가면서 확인하였다.

▪ 비부노출형 흡입챔버 유량의 균일성

36개의 포트에 구성되어 있는 비부노출형 흡입챔버 각 포트에서 공기유량이 균일하게 배분되어 유출되는지 확인하였다. 비부노출형 흡입챔버 타워에서 1층~6층까지 임의의 포트에 디지털유량계를 연결하여 유출되는 공기유량을 3회씩 측정하여 균일성을 확인하였다.

4) 입자상 물질 발생 실험

입자상 물질을 발생하기 전에 발생장치 내에 CDA(Clean Dry Air)를 공급하여 배경 농도를 측정하였다. 농도를 측정하기 위한 입자 분석기기는 노출 전 최소 30분부터 노출 후 30분까지 측정하여 농도변화를 확인하였다.

▪ 토출온도

토출온도에 따라 농도변화를 확인하였다. ABS필라멘트 제조사에서 권장하는 토출온도인 250℃를 포함하여, 220℃, 250℃, 280℃, 310℃ 조건에서 농도변화를 확인하였다.

▪ 토출속도

토출속도별 농도변화를 확인하였다. 압출기(Extruder) 레벨이 5 level, 10 level, 15 level, 그리고 20 level 일 때 압출기의 1 cycle을 3회씩 측정하여 시간을 기록하였으며, 각 조건별 농도변화를 확인하였다.

■ 공기유량

3D 프린터 발생장치에서 공급되는 발생유량과 비부노출형 흡입챔버에서 공급되는 희석유량 비율에 따라 농도변화를 확인하였다. 아울러, 비부노출형 흡입챔버의 각 포트에 유출되는 발생유량을 1 LPM으로 유지할 수 있는 전체 공기유량인 40 LPM으로 고정하였으며, 발생유량과 희석유량 LPM을 10:30, 20:20, 30:10, 그리고 40:0 조건으로 농도변화를 확인하였다.

■ 비가습 및 가습시 환경

발생기 공기 및 희석 공기는 모두 깨끗하고 건조한 공기인 CDA를 공급하기 때문에 비부노출형 흡입챔버 내부에서 상대습도는 동물 실험실보다 떨어지게 된다. 아울러, 발생기 내부에 가열 코어로 필라멘트를 녹이게 되므로 발생기 내부 열기가 비부노출형 흡입챔버까지 영향을 미칠 수 있다. 따라서 비부노출형 흡입챔버에 비가습 및 가습할 경우 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버 내부 온도, 상대습도 등의 환경을 비교하였다.

■ 안정성

6시간 동안 안정적으로 발생하고 농도를 유지하는지 확인하였다. 일반적으로 흡입 독성시험에서 급성 독성시험은 4시간/일 단회 실험동물에게 노출하고, 반복투여 독성시험은 6시간/5일/주 노출한다. 반복투여 독성시험 중 아급성 독성시험은 4주, 아만성 독성시험은 13주간 수행한다. 이에 따라 6시간동안 안정적으로 농도를 유지하는지 확인하였다.

■ 중량 농도

3 Piece cassettes를 활용하여, 필터 중량법에 의한 농도를 측정하였다. 개인시료 채취기로 약 2.0 LPM 유량으로 포집을 하였으며, 필터는 PVC 필터 (5.0 μ m, 37 mm, SKC, USA)를 사용하였다. 펌프의 유량 보정은 또한, 동일시간 내에 SMPS로 측정된 농도와 필터 중량법으로 측정한 값을 비교하였다.

- TVOCs

시간에 따른 TVOCs 농도를 측정하기 위하여 MultiPro(PGM-6248, S/N M01F001821, RAE System, USA)을 활용하였다. TVOCs를 측정하기 위해 기준으로 측정기기에서 분석 가스로 사용된 물질은 이소부틸렌(isobutylene)이었다. TVOCs 배경 농도를 측정하기 위하여 직독식 측정기기 MultiPro는 발생시작 전부터 발생 종료시까지 가동하였다.

5) 입자상 물질의 형태 확인

ABS필라멘트 재료가 발생장치를 통하여 발생될 때, 입자의 크기와 형태를 투과전자현미경(Hitachi HF5000, 200kV Cs FE-S, Japan)을 활용하여 확인하였다.

Ⅲ. 연구결과



III. 연구결과

1. 3D 프린팅 산업 실태

2018년부터 매년 정보통신산업진흥원에서 3D 프린팅 산업 실태조사를 실시해 오고 있다. 3D 프린팅 공급사와 수요사 2개 파트로 구성하였으며, 공급사의 경우 3D 프린팅 사업을 하고 있는 전국 상시 종업원 수 1인 이상 사업체를 대상으로 전수조사를 실시하고, 수요사는 3D 프린팅 주요 활용산업 대상 장비도입/출력 서비스 이용업체로 구분하여 표본조사를 실시하여 조사를 하였다. 이 내용은 정보통신산업진흥원의 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사를 참고하였다.

1) 3D 프린팅 시장

3D 프린팅 산업의 2020년 글로벌 시장규모는 코로나19 팬데믹이 3D 프린팅 산업 전반에 영향을 미치며 2019년 시장규모 대비 약 7.5%의 성장에 그친 128억 달러를 기록하였다. 향후 3D 프린팅 시장은 제조라인이 정상화되고 포스트코로나19 시대를 대비하기 위한 글로벌 전역에서의 디지털 제조 수요가 빠르게 확대됨에 따라 2026년 468억 달러의 시장규모를 형성할 것으로 예측된다(Wohlers Associates, 2021).

[그림 III-1]에서 보는바와 같이 국내 3D 프린팅 산업규모는 2016년 이후 지속적으로 성장해왔으나 2020년 코로나19의 영향으로 2019년 대비 12.6% 하락한 4,135억 4,100만원의 시장규모를 형성하였다. 시장 비중은 장비시장이 전체 45.1%, 서비스 24.6%, SW 21.8%, 소재 8.5% 순으로 나타났다.



※ 출처 : 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사, 정보통신산업진흥원, 2022

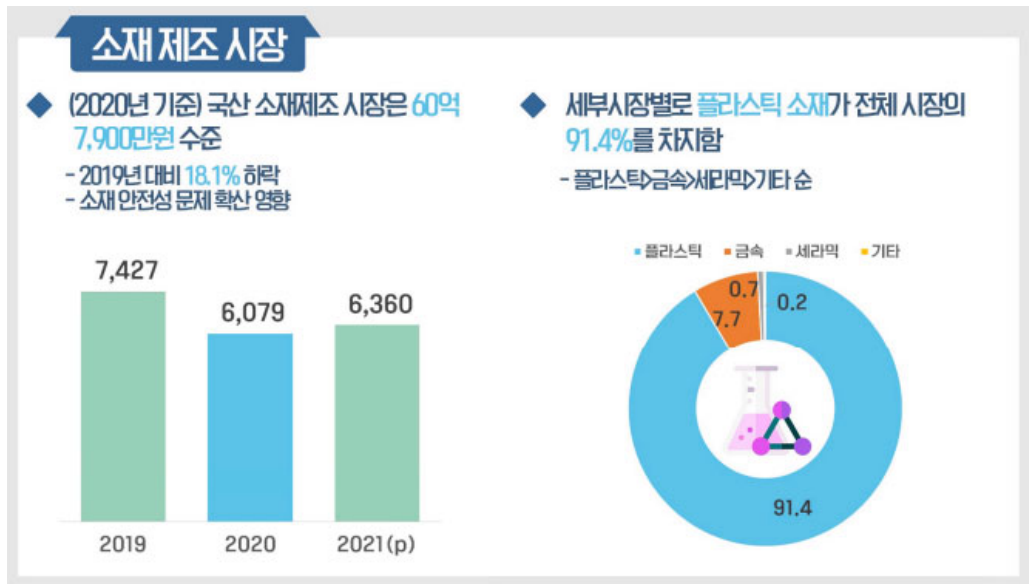
[그림 III-1] 3D 프린팅 시장 규모 현황

■ 장비제조 시장

2020년 국내 3D 프린팅 장비제조 시장은 1,013억 5,400만원의 시장 규모를 형성하였다. 특히, 3D 프린터 제조 시장은 전년대비 18.7% 감소한 433억 1200만원을 기록했으며, 바이오·금속 3D 프린팅 등 산업용 3D 프린터 수요가 대폭 감소한 것이 시장 감소의 주요 원인으로 풀이된다.

■ 소재제조 시장

[그림 III-2]에서 보는바와 같이 2020년 국내 3D 프린팅 소재 시장은 60억 7,900만원의 시장규모를 형성하였다. PLA/ABS/레진 등 플라스틱 계열 소재가 약 91.4%로 플라스틱 소재 중심으로 구성되어 있으며 금속, 세라믹 등의 타소재 제조 비중은 낮은 수준으로 나타났다.



※ 출처 : 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사, 정보통신산업진흥원, 2022

[그림 III-2] 3D 프린팅 소재 시장 현황

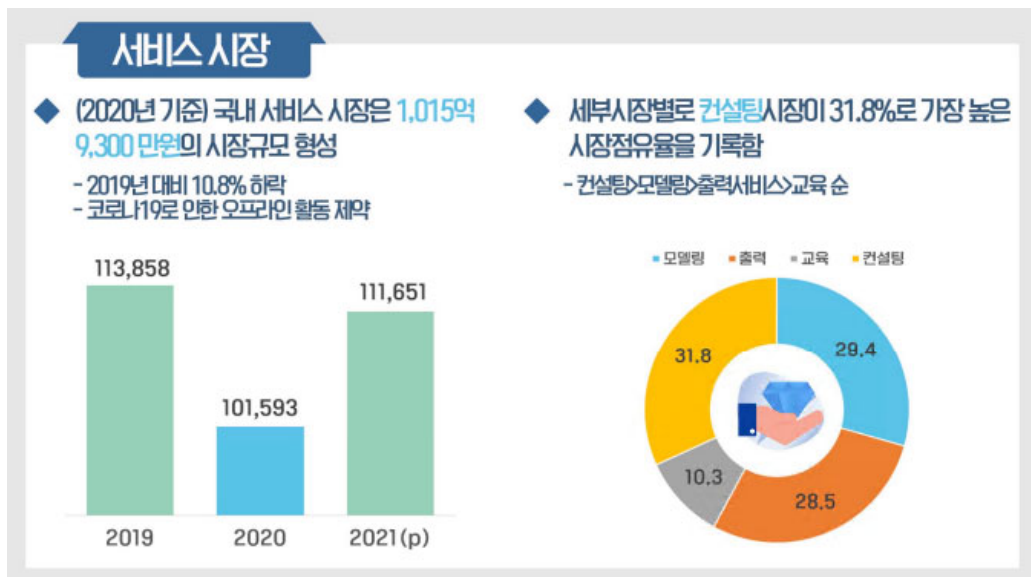
■ SW개발 시장

2020년 국내 3D 프린팅 SW개발 시장은 410억 1,100만 원의 시장규모를 형성하였다. 세부 분야별로 살펴보면 3D 제품 디자인을 위한 디자인SW가 80.2%로 가장 큰 시장비중을 기록하고 있는 가운데 스캐닝SW가 11.8%의 비중을 기록하며 그 뒤를 잇는 것으로 나타났다.

■ 서비스 시장

[그림 III-3]에서 보는바와 같이 2020년 국내 3D 프린팅 서비스 시장은 코로나19 위기에 따라 수요기업들의 출력 서비스 의뢰, 모델링, 컨설팅 등 주요 3D 프린팅 서비스에 대한 수요가 급감하며 2019년 대비 10.8% 하락한 1,015억 9,300만원의 시장규모를 형성하였다. 특히, 교육 시장은 학교를 중심으로 발생한 3D 프린팅 소재 유해성 논란과 코로나19로 인해 오프라인 3D 프린팅 교육이 감소하며 시장 감소폭(-16.6%)이 가장 큰 것으로 나타났다. 세부

산업별 비중을 살펴보면, 국내 3D 프린팅 서비스 시장은 컨설팅 시장(31.8%)을 중심으로 구성되어 있으며, 모델링(29.4%), 출력서비스(28.5%), 교육(10.3%) 순으로 나타났다.



※ 출처 : 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사, 정보통신산업진흥원, 2022

[그림 III-3] 3D 프린팅 서비스 시장

▪ 유통 시장

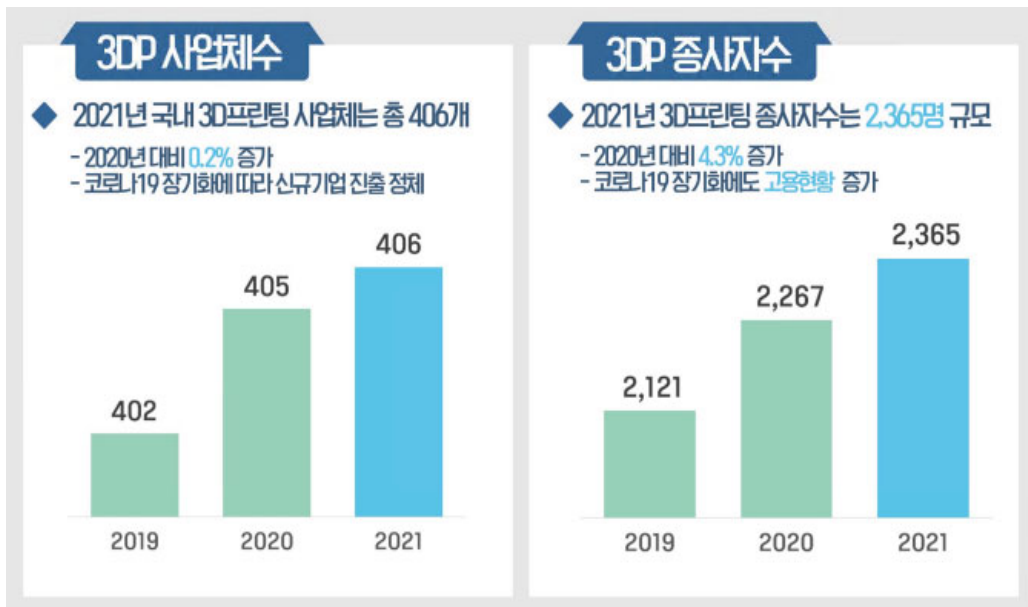
2020년 국내 3D 프린팅 유통시장은 1,635억 4백만원의 시장규모를 형성하였다.

2) 국내 3D 프린팅 기업 및 종사자 현황

[그림 III-4]에서 보는바와 같이 2021년도 국내 3D 프린팅 관련 사업체는 406개소, 종사자는 2,365명이며, 인력 유형별로는 사업관리/영업/교육 등의 업무를 담당하는 사업운영 인력(995명)이 가장 많은 분포를 나타내고 있는 가운데, 3D 프린팅 관련 제품 연구를 위한 R&D 인력(610명), 출력서비스 등의 기술

관련 업무를 담당하는 기술직 인력(401명), 3D도면 설계를 위한 모델링/디자인 (359명) 인력 순으로 나타났다.

장비를 도입한 기업들의 2021년 3D 프린팅 관련 인력은 총 1,641명으로 3D 프린터 운용, 출력물 검사 등의 기술 관련 업무를 담당하는 기술직이 가장 많은 것으로 나타났으며, 이를 이어 3D 프린팅 기술을 기반으로 제품 적용 관련 개발을 담당하는 R&D 인력 순으로 나타났다. 또한, 3D 프린팅 출력을 위해 3D디자인 등의 작업을 진행하는 모델링/디자인 인력이 가장 낮게 나타났지만 전반적으로 기술직, R&D, 모델링 인력 간의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.



※ 출처 : 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사, 정보통신산업진흥원, 2022

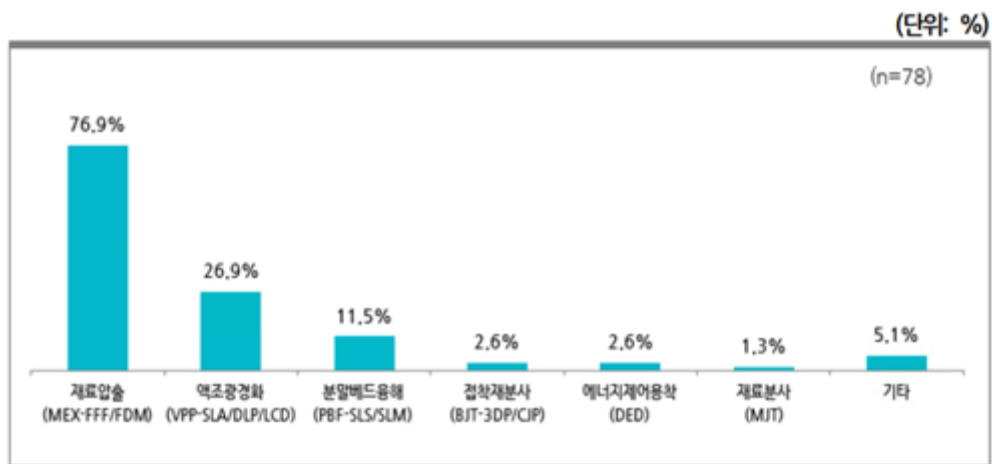
[그림 III-4] 국내 3D 프린팅 사업체 및 종사자 현황

3) 국내 3D 프린팅 기술 방식

국내 장비제조 기업들이 판매중인 3D 프린터 기술방식에 대해 살펴보면 [그림 III-5]에서 보는바와 같이 전체 76.9%에 해당하는 기업이 재료압출

(MEX) 방식의 3D 프린터를 판매하고 있는 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 액조광경화(VPP) 26.9%, 분말베드융해(PBF) 11.5%, 접착제 분사(BJT)/에너지 제어용착(DED) 2.6%, 재료분사(MJT) 1.3% 순으로 나타났다.

유통 전문기업들이 판매중인 3D 프린터 기술방식에 대해 살펴보면 재료압출(MEX, 71.1%) 3D 프린터가 가장 많이 유통되고 있는 것으로 나타났으며, 이를 이어 액조광경화(VPP) 38.3%, 분말베드융해(PBF) 21.1%, 재료분사(MJT) 18.8% 순으로 나타났다. 장비 유형별로 살펴보면, 보급형 3D 프린터는 재료압출(MEX) 방식이 가장 높은 비중을 기록했으며, 산업용 3D 프린터는 의료·치과 산업에서 많이 활용되는 액조광경화(VPP) 방식의 3D 프린터가 54.2%의 비중을 기록하며 가장 많이 유통되고 있는 것으로 나타났다.



※ 출처 : 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사, 정보통신산업진흥원, 2022

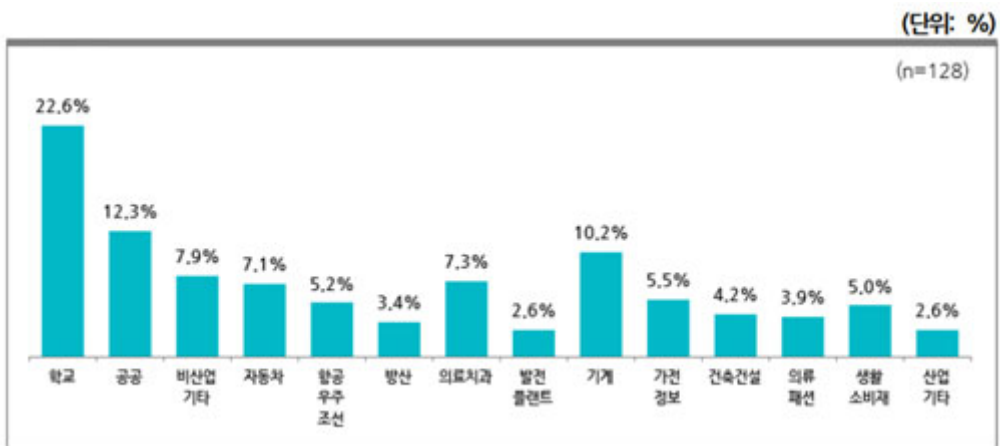
[그림 Ⅲ-5] 국내 3D 프린팅 기술방식

장비도입 기업들이 보유한 3D 프린터의 기술방식에 대해 살펴본 결과 교육 등의 목적으로 많이 활용되는 재료압출(MEX) 방식을 활용하는 기업이 81.9%로 나타난 가운데, 액조광경화(VPP) 24.1%, 재료분사(MJT) 6.5%, 분말베드융해(PBF) 6.1%, 접착제분사(BJT) 4.9% 순으로 나타났다. 특히, 재료압출(MEX)

방식은 국산 장비를 많이 활용하고 있는 반면, 산업용 목적으로 주로 활용되는 액조광경화(VPP), 분말베드 용해(PBF), 재료분사(MJT), 접착재분사(BJT) 기술 방식은 외산의 활용 비중이 더 높은 것으로 나타났다.

4) 국내 3D 프린팅 산업 활용

국내 3D 프린터 유통기업의 프린터 주요 수요처에 대해 살펴보면 [그림 III-6]에서 보는바와 같이 학교/공공 부문이 약 34.9%로 가장 높게 나타난 가운데, 기계 10.2%, 의료·치과 7.3%, 자동차 7.1%, 가전·정보통신 5.5%, 항공·우주·조선 5.2% 순으로 나타났다. 장비 유형별로 살펴보면 보급형 장비는 학교, 공공 등 비산업계에서 수요가 높은 것으로 나타났으며, 산업용 장비는 기계/자동차 산업이 타산업군 대비 높은 수요를 보이고 있는 것으로 나타났다.



※ 출처 : 2021년 3D 프린팅 산업 실태조사, 정보통신산업진흥원, 2022

[그림 III-6] 국내 3D 프린터 주요 수요처

3D 프린터를 도입한 기업들의 활용 목적은 시제품 제작(34.8%)이 가장 높게 나타난 가운데, 교육(28%), 연구(22.3%), 맞춤형 완제품(8.1%), 양산형 완제품(5.4%) 순으로 나타났다.

장비도입 기업이 주로 활용하는 소재를 살펴보면 열가소성 플라스틱인 PLA, ABS 소재 사용이 전체 75%로 나타난 가운데 열경화성 플라스틱인 레진(14.9%), 금속(1%), 세라믹(0.8%) 순으로 나타났다. 즉, 전반적인 제조 산업군에서 플라스틱을 중심으로 3D 프린팅 소재가 활용되고 있으며 금속, 세라믹 등의 소재 활용은 매우 미미한 수준으로 나타났다. PLA/ABS 등의 플라스틱 소재 사용이 높은 것은 플라스틱/금속 제품 제조 기업 모두 플라스틱 기반의 시제품 혹은 전시용 모델을 생산하기 위해 관련 소재 활용이 높기 때문인 것으로 풀이된다. 특히, 3D 프린팅 안전에 대한 인식 확대로 열가소성 플라스틱 소재 중 친환경 재료로 제작한 PLA 소재 활용이 높게 나타났다.

2. 3D 프린터 다중 발생장치 검증

1) 3D 프린터 다중 발생장치 기밀성

3D 프린터 다중 발생장치와 실험동물 비부노출형 흡입챔버의 연동시스템을 구축한 다음 3D 프린터 다중 발생장치의 inlet으로 유입하는 공기유량과 비부노출형 흡입챔버에서 유출되는 공기유량 3회씩 측정하여 비교하였다. <표 III-1>과 같이 발생장치에 유입한 유량을 10 LPM에서부터 50 LPM까지 올렸을 때 비부노출형 흡입챔버에서 유출되는 유량과의 차이는 없었다. 각 유량별 기밀성은 10 LPM일 경우 97.13%, 20 LPM일 경우 98.60%, 30 LPM일 경우 98.80%, 40 LPM일 경우 99.38%, 그리고 50 LPM일 경우 99.68%이었다.

〈표 III-1〉 3D 프린터 다중 발생장치 기밀성 실험 결과

Flow rate (LPM)	Inlet (LPM)	Outlet (LPM)	Chamber nose port (LPM)	Confidentiality rate (%)
10	9.78±0.01	9.69±0.14	9.50±0.13	97.13
20	19.97±0.01	19.99±0.11	19.69±0.16	98.60
30	30.10±0.02	30.00±0.12	29.74±0.07	98.80
40	40.30±0.02	40.25±0.06	40.05±0.18	99.38
50	50.19±0.02	50.25±0.21	50.03±0.19	99.68

2) 공급유량에 따른 비부노출형 흡입챔버 포트별 유량

3D 프린터 다중 발생장치와 실험동물 비부노출형 흡입챔버 연동시스템에서 3D 프린터 다중 발생장치의 발생 유량과 비부노출형 흡입챔버를 통하여 공급되는 희석 유량을 변동해 가면서 비부노출형 흡입챔버 포트별 유량을 확인하였다. 공기유량 총량은 50 LPM을 넘기지 않는 범위까지 측정하였다. 〈표 III-2〉에서는 발생 유량은 20 LPM으로 고정하고 희석 유량을 0~30 LPM까지 변경하였으며, 희석 유량이 20 LPM에서 포트의 유량이 1.02 LPM이었다.

〈표 III-2〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(1)

Generation air (LPM)	Dilution air (LPM)	Chamber nose port (Mean±SD)	Chamber Temp. (°C)
20	0	0.34±0.006	27.3
20	5	0.49±0.006	26.2
20	10	0.64±0.012	25.1
20	15	0.83±0.006	24.6
20	20	1.02±0.006	24.3
20	25	1.22±0.012	24.1
20	30	1.41±0.010	24.0

〈표 III-3〉에서는 발생 유량은 25 LPM으로 고정하고 희석 유량을 0~25 LPM까지 변경하였으며, 희석 유량이 15 LPM에서 포트의 유량이 1.01 LPM이었다.

〈표 III-3〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(2)

Generation air (LPM)	Dilution air (LPM)	Chamber nose port (Mean±SD)	Chamber Temp. (°C)
25	0	0.48±0.006	26.0
25	5	0.63±0.006	25.1
25	10	0.81±0.006	24.6
25	15	1.01±0.006	24.4
25	20	1.19±0.010	24.1
25	25	1.39±0.010	24.0

〈표 III-4〉에서는 발생 유량은 30 LPM으로 고정하고 희석 유량을 0~20까지 변경하였으며, 희석 유량이 10 LPM에서 포트의 유량이 1.02 LPM이었다.

〈표 III-4〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(3)

Generation air (LPM)	Dilution air (LPM)	Chamber nose port (Mean±SD)	Chamber Temp. (°C)
30	0	0.64±0.015	25.3
30	5	0.83±0.006	24.8
30	10	1.02±0.006	24.6
30	15	1.22±0.006	24.2
30	20	1.36±0.015	24.1

〈표 III-5〉에서는 발생 유량은 35 LPM으로 고정하고 희석 유량을 0~15 LPM까지 변경하였으며, 희석 유량이 5 LPM에서 포트의 유량이 0.96 LPM이었다.

〈표 III-5〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(4)

Generation air (LPM)	Dilution air (LPM)	Chamber nose port (Mean±SD)	Chamber Temp. (°C)
35	0	0.78±0.006	24.8
35	5	0.96±0.006	24.6
35	10	1.14±0.015	24.3
35	15	1.35±0.012	24.2

〈표 III-6〉에서는 발생 유량은 40 LPM으로 고정하고 희석 유량을 0~10 LPM까지 변경하였으며, 희석 유량이 0 LPM에서 포트의 유량이 0.96 LPM이었다.

〈표 III-6〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량 변화(5)

Generation air (LPM)	Dilution air (LPM)	Chamber nose port (Mean±SD)	Chamber Temp. (°C)
40	0	0.96±0.006	25.1
40	5	1.15±0.006	24.8
40	10	1.33±0.015	24.5

3) 비부노출형 흡입챔버의 공기 유량 균일성

비부노출형 흡입챔버 타워의 1층에서 6층까지 임의의 포트에 디지털유량계를 활용하여 유출되는 공기유량을 3회씩 측정하였다. <표 III-7>에서와 같이 비부노출형 흡입챔버의 노즐포트 1층에서 6층까지 공기유량은 1.01~1.03 LPM 범위이었다.

〈표 III-7〉 비부노출형 흡입챔버 포트의 노출 유량의 균일성 결과

Generation air (LPM)	Stage	Chamber nose port (Mean±SD)	Chamber Temp. (°C)
40	1	1.02±0.006	24.5
40	2	1.03±0.006	24.5
40	3	1.03±0.006	24.6
40	4	1.02±0.006	24.6
40	5	1.02±0.006	24.7
40	6	1.01±0.000	24.8

2. 조건별 나노물질 발생실험

1) 토출 속도

5 Level, 10 level, 15 level, 그리고 20 level로 토출 속도 조건을 변경하면서 실험을 수행하였다. 토출 속도는 각 조건에서 원형 압출기(Extruder)의 1 cycle 시간을 각각 3회씩 기록하였으며, 각 조건에서의 입자 수 농도와 질량 농도를 측정하였다.

〈표 III-8〉 토출 속도에 따른 입자 수 농도

Value (Level)	< 100 nm (#/ccm)	100 nm~1 μ m (#/ccm)	Total (#/ccm)	CMD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
5	433,606.19	284,955.10	799,811.58	83.71	76.42(1.96)	98.06
10	448,420.64	472,113.29	1,021,045.80	100.94	91.70(1.96)	50.28
15	446,223.47	595,528.29	1,153,503.71	111.56	100.97(1.96)	33.50
20	464,978.26	702,114.80	1,291,253.21	117.93	106.72(1.97)	25.89

Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 108 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air/Dilution Air : 30 LPM/10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 5~20 Level

CMD : Count Median Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

〈표 III-9〉 토출 속도에 따른 질량 농도

Value (Level)	< 100 nm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 nm~1 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MMAD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
5	64.62	686.75	823.93	184.55	180.17(1.56)	98.06
10	72.51	1,565.07	1,793.46	219.76	215.57(1.56)	50.28
15	74.06	2,373.74	2,679.74	239.68	236.08(1.56)	33.50
20	77.97	3,225.42	3,615.65	255.65	252.48(1.56)	25.89

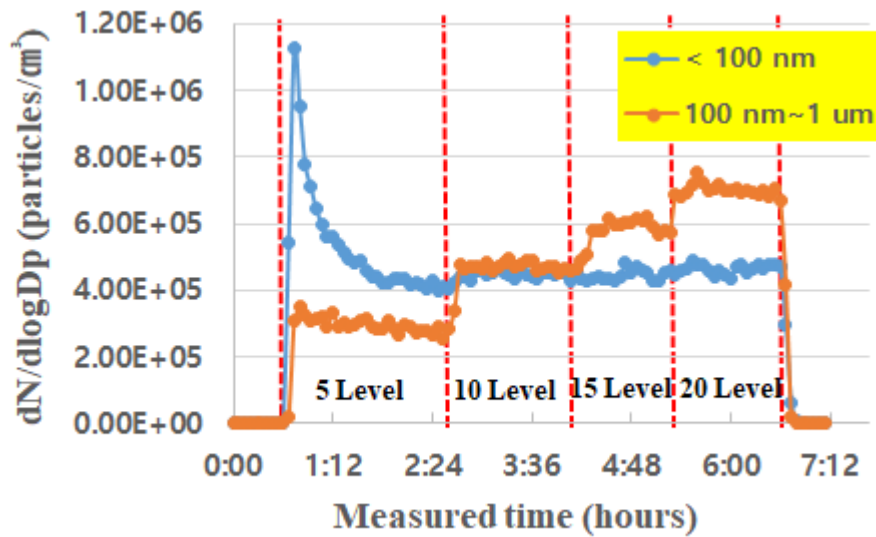
Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 108 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air/Dilution Air : 30 LPM/10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 5~20 Level

MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

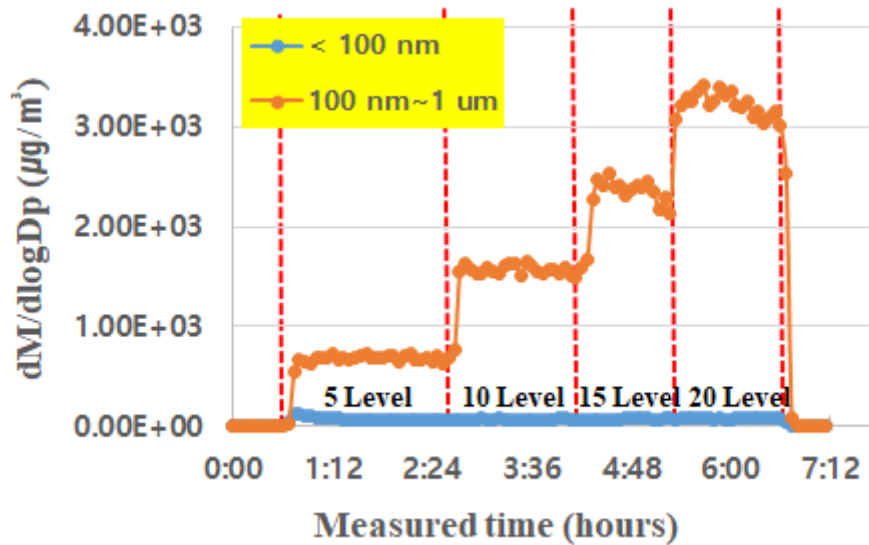
〈표 III-8〉과 [그림 III-7]에서 보는바와 같이 100 nm미만 및 100 nm이상의 입자 수 농도는 노즐의 토출 속도가 증가함에 따라 모두 증가하였다. 입자크기도 토출 속도가 증가함에 따라 커졌다. 원형 압출기의 1 cycle 시간은 토출 속도가 증가함에 따라 감소하였다. 〈표 III-9〉와 [그림 III-8]에서 보는바와 같이 토출 속도가 증가함에 따라 100 nm미만 및 100 nm이상의 질량 농도는 모두 증가하였다. 입자크기도 토출 속도가 증가함에 따라 커졌다.

[그림 III-9]에서 토출 속도가 증가함에 따라 발생하는 입자 수 농도가 증가하였으며, 입자크기도 증가하였다. [그림 III-10]에서 노즐의 토출 속도가 증가함에 따라 질량 농도 및 입자크기는 증가하였다.

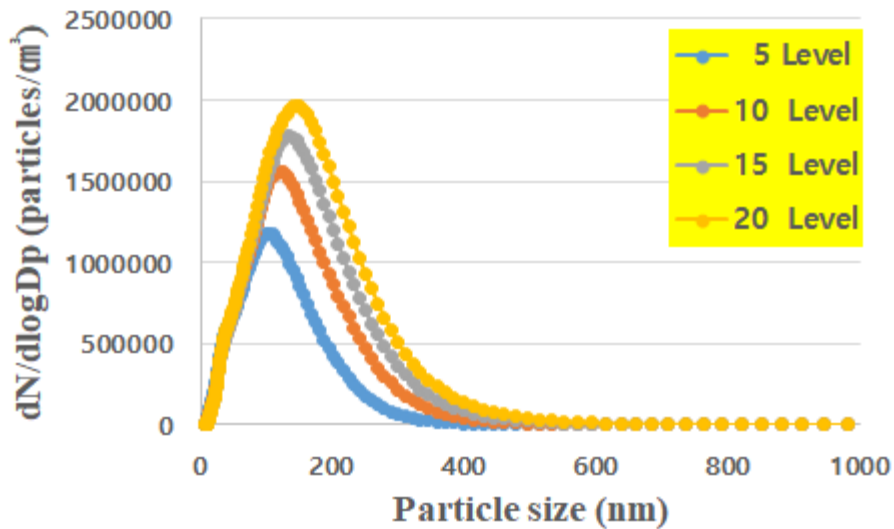
[그림 III-11]과 [그림 III-12]에서는 입자 수 농도, 질량 농도의 노즐 토출 속도에 따른 선형회귀분석을 나타내었다. 입자 수 농도에서 100 nm미만, 100 nm 이상 그리고, 입자크기 전체의 R^2 값은 각각 0.8476, 0.9820, 0.9834이었으며, 질량 농도에서 R^2 값은 각각 0.9179, 0.9998, 0.9997이었다. 또한, 기울기는 모두 양의 상관관계 선형성을 보였다.



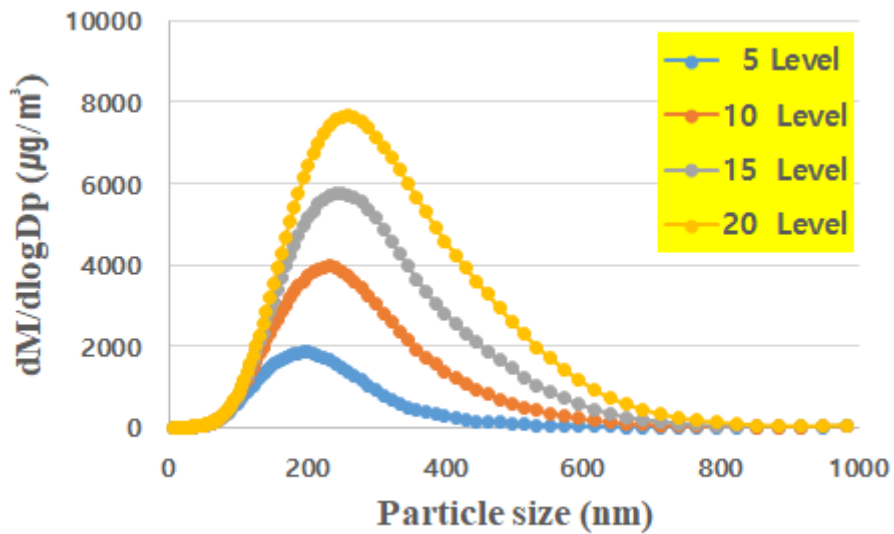
[그림 III-7] 토출 속도에 따른 입자 수 농도 변화



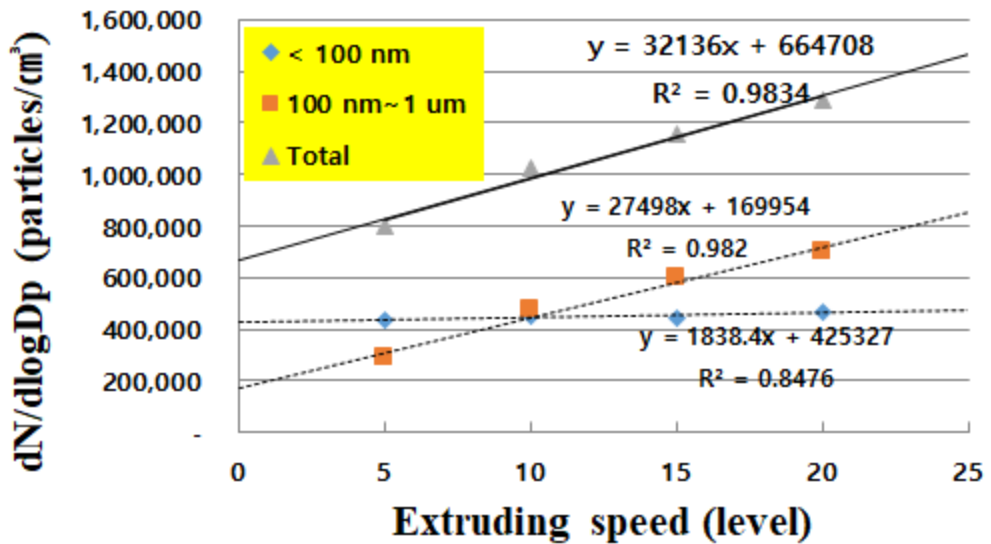
[그림 III-8] 토출 속도에 따른 질량 농도 변화



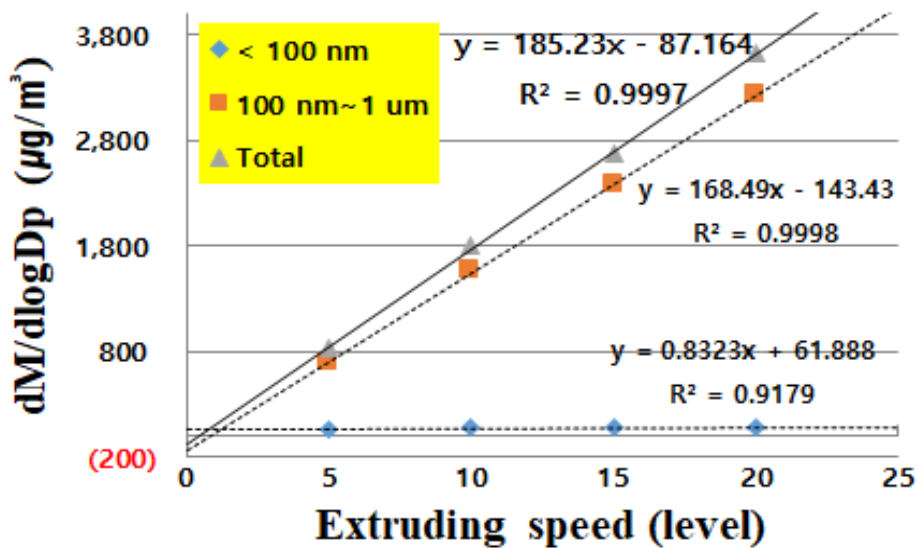
[그림 Ⅲ-9] 토출 속도에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포



[그림 Ⅲ-10] 토출 속도에 따른 질량 농도의 입자크기 분포



[그림 III-11] 토출 속도에 따른 입자 수 농도의 선형회귀 분석



[그림 III-12] 토출 속도에 따른 질량 농도의 선형회귀 분석

2) 토출 온도

220℃, 250℃, 280℃, 그리고 310℃로 토출 온도 조건을 변경하면서 실험을 수행하였다. 토출 온도는 각 조건에서 원형 압출기(Extruder)의 1 cycle 시간을 각각 3회씩 기록하였으며, 각 조건에서의 입자 수 농도와 질량농도를 측정하였다.

〈표 Ⅲ-10〉 토출 온도에 따른 입자 수 농도

Temp. (℃)	< 100 nm (#/ccm)	100 nm~1 μm (#/ccm)	Total (#/ccm)	CMD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
220	45,322.30	77,123.15	135,468.05	121.44	121.44(1.83)	54.89
250	595,784.61	462,711.69	1,177,623.22	88.96	88.96(1.98)	49.33
280	1,172,262.14	1,285,528.05	2,725,112.83	102.47	102.47(1.87)	47.00
310	1,863,712.97	2,594,708.04	4,935,616.05	110.26	111.22(1.77)	45.89

Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 117 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 220~310℃, Generation Air/Dilution Air : 30 LPM/10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level
CMD : Count Median Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

〈표 Ⅲ-11〉 토출 온도에 따른 질량 농도

Temp. (℃)	< 100 nm (μg/m³)	100 nm~1 μm (μg/m³)	Total (μg/m³)	MMAD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
220	8.61	305.27	343.65	236.39	230.71(1.50)	54.89
250	90.02	1,386.83	1,618.30	208.63	204.76(1.58)	49.33
280	203.26	3,796.05	4,380.88	206.00	202.95(1.53)	47.00
310	364.92	8,041.43	9,206.02	210.35	206.64(1.51)	45.89

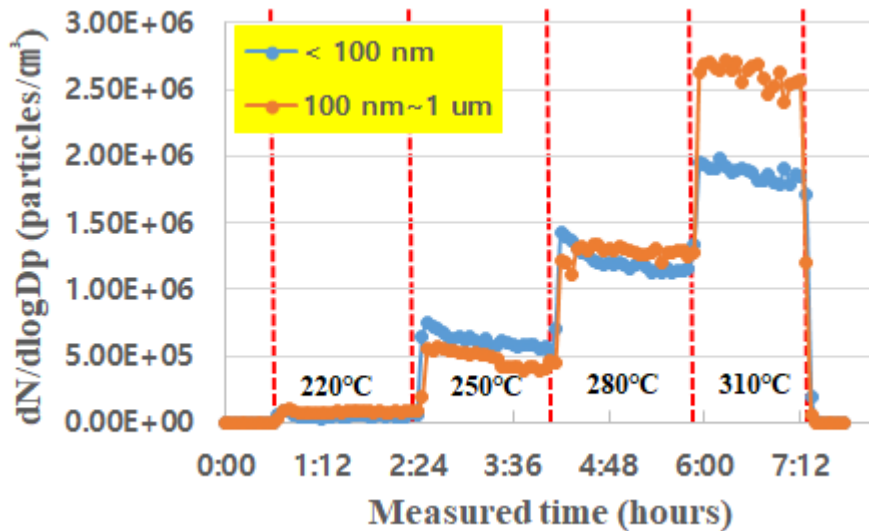
Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 117 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 220~310℃, Generation Air/Dilution Air : 30 LPM/10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level

MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

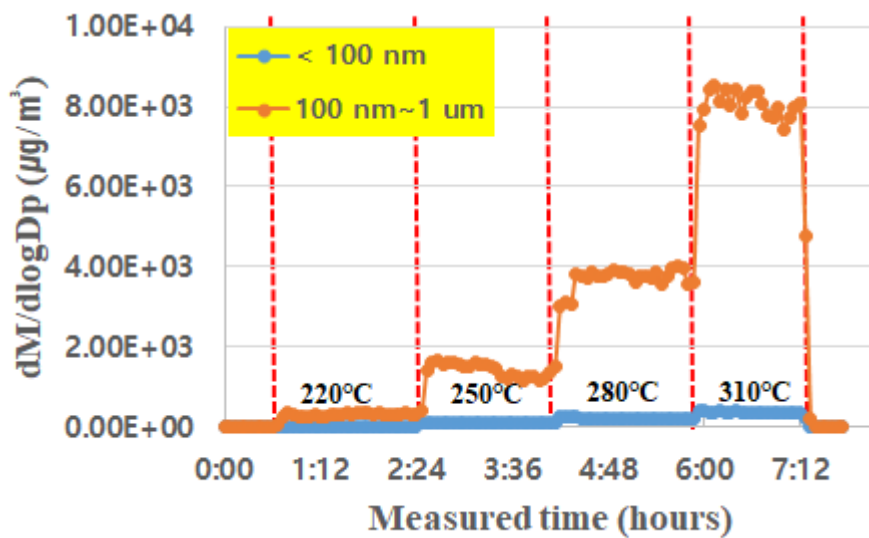
〈표 III-10〉과 [그림 III-13]에서 보는바와 같이 100 mm미만 및 100 mm이상의 입자 수 농도는 노즐의 토출 온도가 상승함에 따라 모두 증가하였다. 입자 수 농도의 입자크기는 토출 온도가 220℃일 때 가장 컸으며, 250℃에서는 입자크기가 작아졌다가 토출 온도가 상승함에 따라 커졌다. 원형 압출기의 1 cycle 시간은 토출 온도가 상승함에 따라 줄어들었다. 〈표 III-11〉과 [그림 III-14]에서 보는 바와 같이 토출 온도가 상승함에 따라 100 mm미만 및 100 mm이상의 질량 농도는 모두 증가하였다. 질량 농도의 입자크기는 토출 온도가 220℃일 때 가장 컸으며, 250℃~310℃에서는 큰 변화가 없었다.

[그림 III-15]에서 노즐의 토출 온도가 상승함에 따라 발생하는 입자 수 농도는 증가하였다. [그림 III-16]에서 노즐의 토출 온도가 상승함에 따라 질량 농도의 경우도 증가하였다.

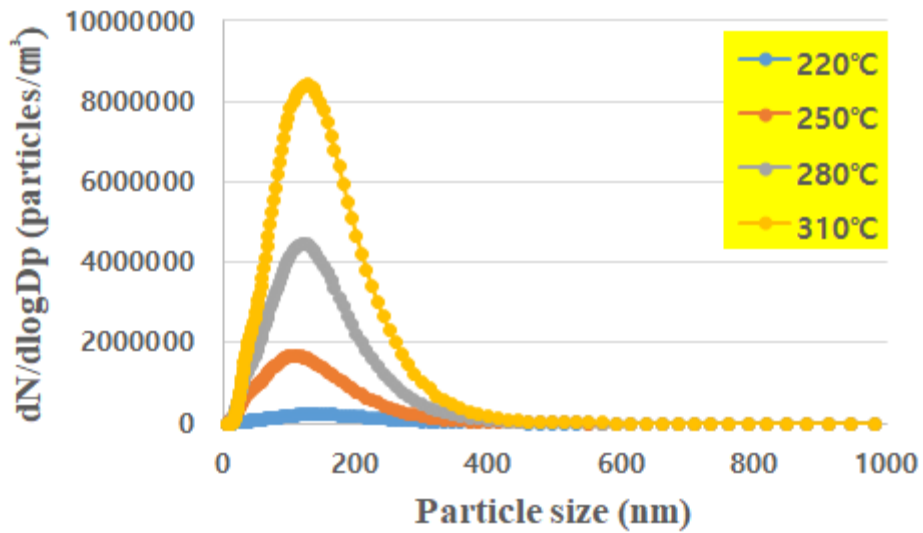
[그림 III-17]과 [그림 III-18]에서는 입자 수 농도, 질량 농도의 노즐 토출 온도에 따른 선형회귀분석을 나타내었다. 입자 수 농도에서 100 mm미만, 100 mm 이상 그리고, 입자크기 전체의 R^2 값은 각각 0.9971, 0.9424, 0.9738이었으며, 질량 농도에서 R^2 값은 각각 0.9773, 0.9288, 0.9315이었다. 또한, 기울기는 모두 양의 상관관계 선형성을 보였다.



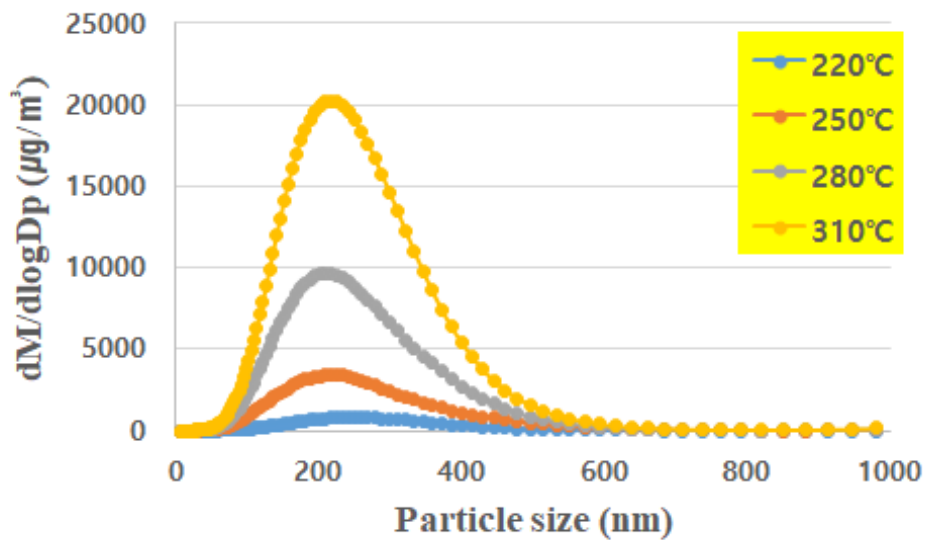
[그림 Ⅲ-13] 토출 온도에 따른 입자 수 농도 변화



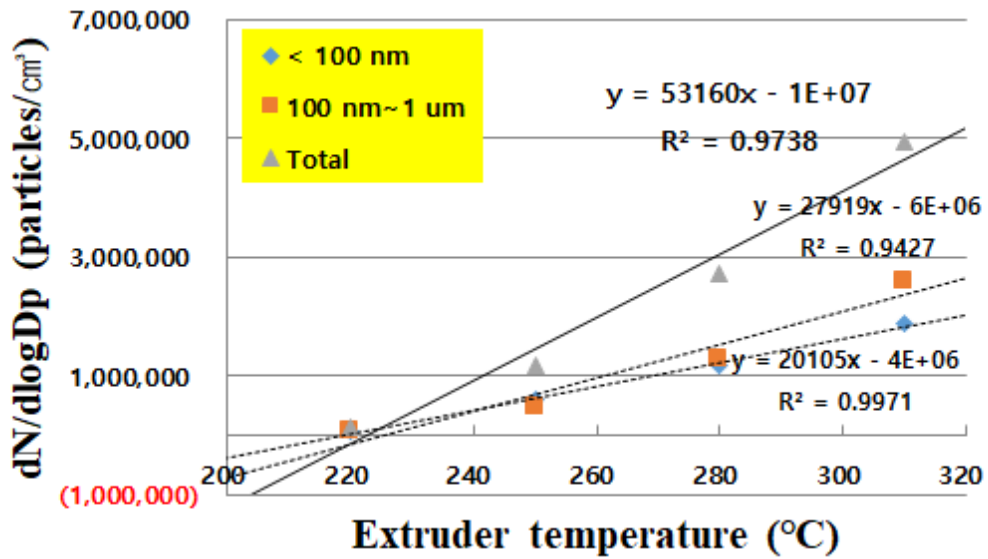
[그림 Ⅲ-14] 토출 온도에 따른 질량 농도 변화



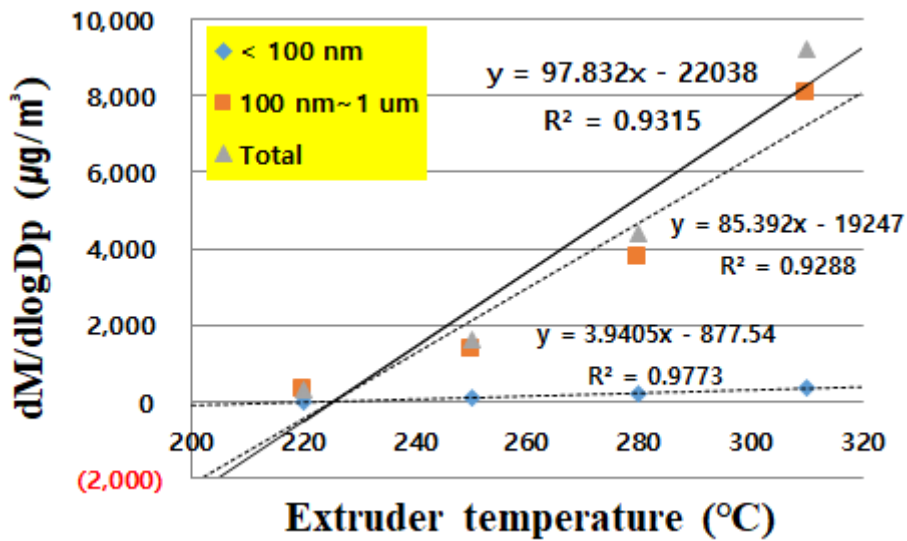
[그림 III-15] 토출 온도에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포



[그림 III-16] 토출 온도에 따른 질량 농도의 입자크기 분포



[그림 Ⅲ-17] 토출 온도에 따른 입자 수 농도의 선형회귀 분석



[그림 Ⅲ-18] 토출 온도에 따른 질량 농도의 선형회귀 분석

3) 희석공기 유량

발생장치의 발생기 공기와 희석 공기 유량을 변경해가며 실험을 수행하였다. 비부노출형 흡입챔버의 각 포트에 약 1 LPM씩 할당하기 위해서는 전체 공기 유량은 40 LPM으로 하는 것이 최적의 조건이었다. 따라서, 전체 공기 유량은 40 LPM으로 고정하고, 발생장치의 발생기 공기와 희석 공기 비율을 10:30, 20:20, 30:10, 그리고 40:0 조건으로 희석 공기 유량을 변경하면서 농도를 측정하였다. 토출속도는 각 조건에서 원형 압출기의 1 cycle 시간을 각각 3회씩 기록하였으며, 각 조건에서의 입자 수 농도와 질량농도를 측정하였다.

〈표 III-12〉 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도

Flow (LPM)	< 100 nm (#/ccm)	100 nm~1 μ m (#/ccm)	Total (#/ccm)	CMD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
10/30	89,382.40	213,983.19	334,779.39	138.74	123.13(1.80)	49.89
20/20	235,693.98	337,993.81	635,248.42	114.37	103.28(1.90)	50.22
30/10	477,199.18	433,122.44	1,011,022.14	95.12	87.49(1.96)	48.28
40/0	657,320.70	486,964.18	1,272,542.11	87.26	81.32(1.96)	47.28

Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 104 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250℃, Generation Air/Dilution Air : 10/30, 20/20, 30/10, 40/0 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level

CMD : Count Median Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

〈표 Ⅲ-13〉 희석 공기 유량에 따른 질량 농도

Flow (LPM)	< 100 nm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 nm ~ 1 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MMAD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
10/30	16.58	836.18	933.28	225.84	226.50(1.49)	49.89
20/20	40.82	1,212.26	1,372.05	224.36	226.02(1.59)	50.22
30/10	75.12	1,399.45	1,615.31	220.59	223.17(1.67)	48.28
40/0	100.66	1,554.38	1,813.68	215.02	220.24(1.73)	47.28

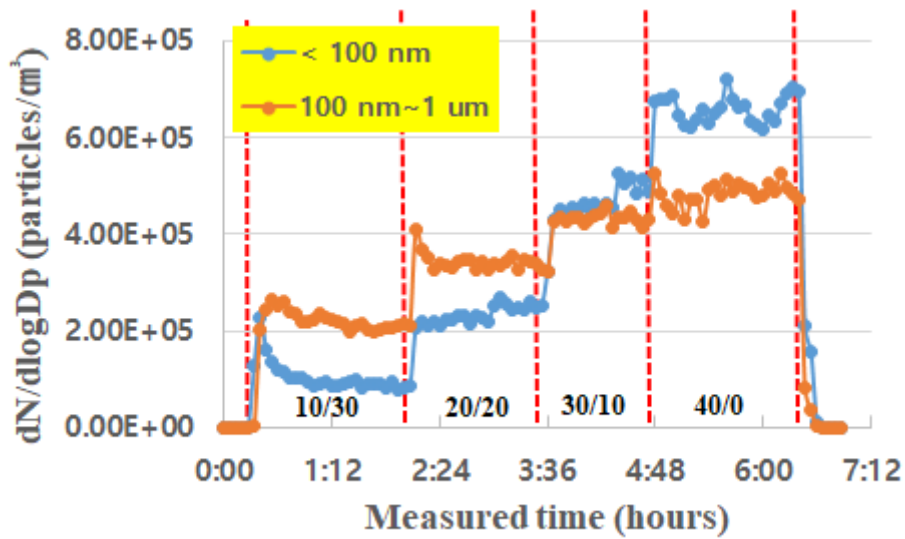
Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements : 104 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air/Dilution Air : 10/30, 20/20, 30/10, 40/0 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level

MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

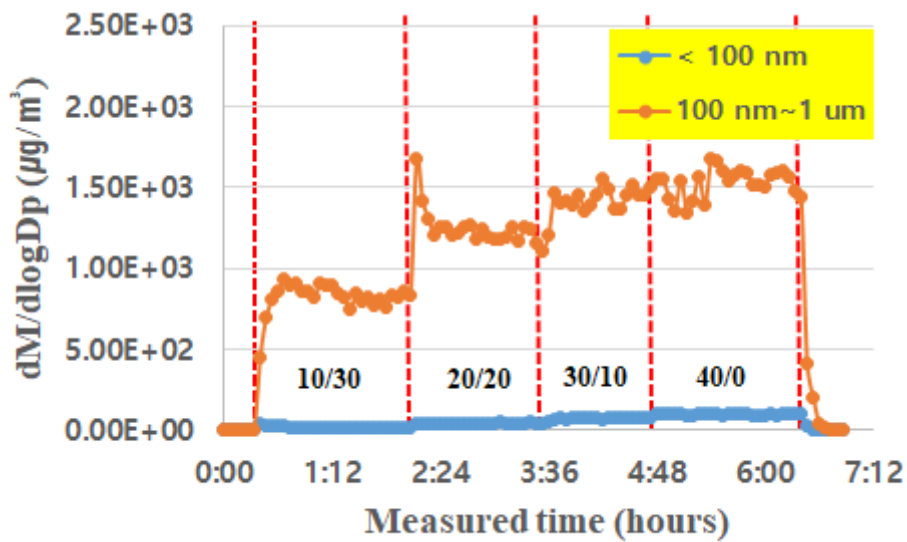
〈표 Ⅲ-12〉와 [그림 Ⅲ-19]에서 보는바와 같이 발생기 공기가 증가하고 희석 공기가 감소함에 따라 100 nm미만 및 100 nm이상의 입자 수 농도는 모두 증가하였다. 입자 수 농도의 입자크기는 발생기 공기와 희석 공기 비율이 10:30일 때 가장 컸으며, 희석 공기가 감소함에 따라 입자크기는 작아졌다. 원형 압출기의 1 cycle 시간은 조건별로 큰 차이는 없었다. 〈표 Ⅲ-13〉과 [그림 Ⅲ-20]에서 보는바와 같이 발생기 공기가 증가하고 희석 공기가 감소함에 따라 100 nm미만 및 100 nm이상의 질량 농도는 모두 증가하였다. 입자크기는 발생기 공기와 희석 공기 비율이 10:30일 때 질량 농도가 가장 컸으며, 희석 공기가 감소함에 따라 입자크기는 작아졌다.

[그림 Ⅲ-21]에서 희석 공기가 감소함에 따라 발생하는 입자 수 농도는 증가하였다. [그림 Ⅲ-22]에서 질량 농도의 경우도 희석 공기가 감소함에 따라 농도는 증가하였다.

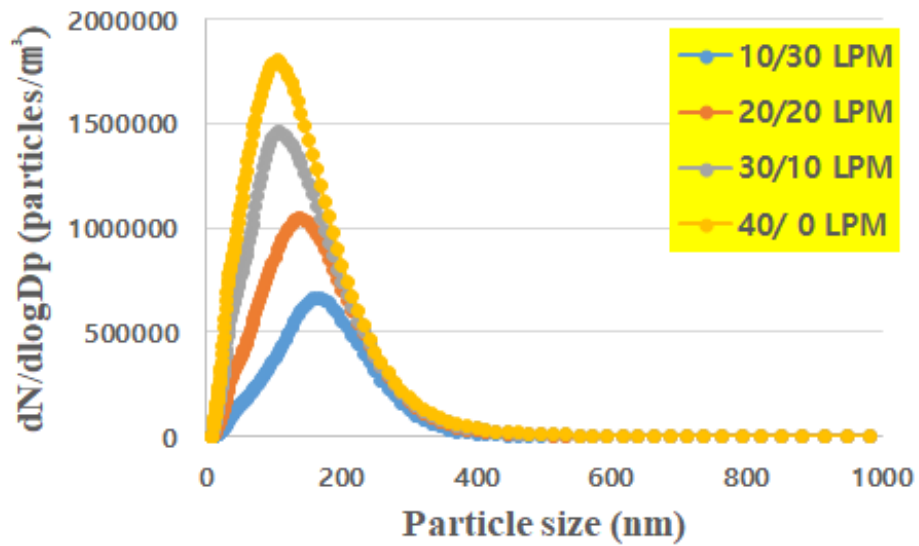
[그림 Ⅲ-23]과 [그림 Ⅲ-24]에서는 입자 수 농도, 질량 농도의 노즐 토출 온도에 따른 선형회귀분석을 나타내었다. 입자 수 농도에서 100 nm미만, 100 nm 이상 그리고, 입자크기 전체의 R^2 값은 각각 0.9912, 0.9921, 0.9957이었으며, 질량 농도에서 R^2 값은 각각 0.9956, 0.9532, 0.9639이었다. 또한, 기울기는 모두 양의 상관관계 선형성을 보였다.



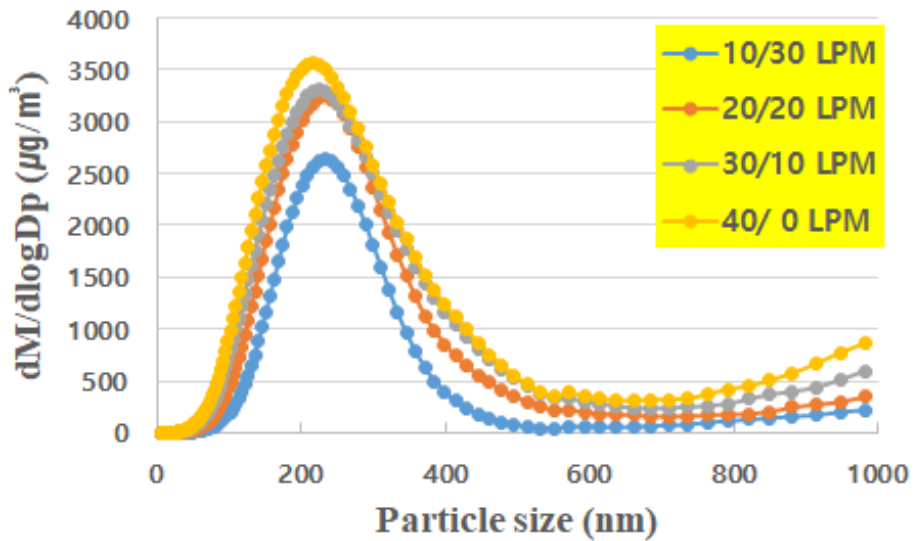
[그림 III-19] 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도 변화



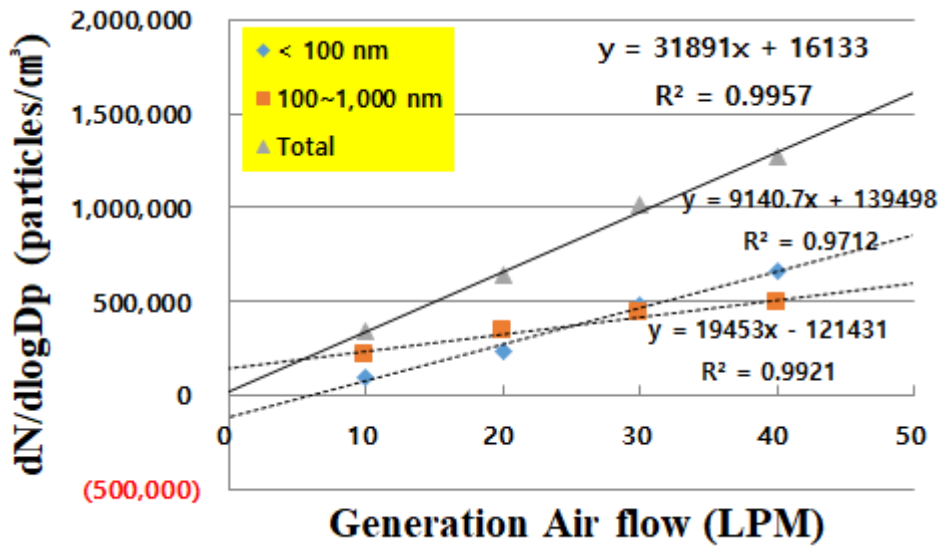
[그림 III-20] 희석 공기 유량에 따른 질량 농도 변화



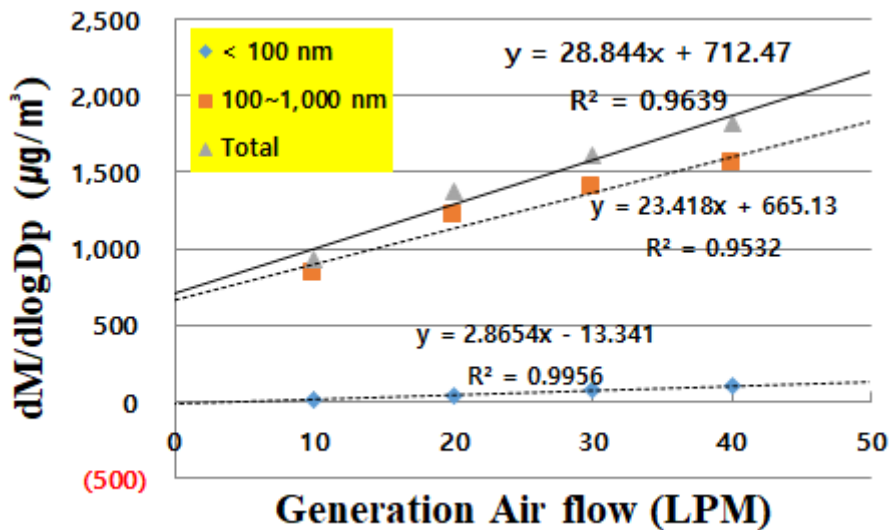
[그림 Ⅲ-21] 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포



[그림 Ⅲ-22] 희석 공기 유량에 따른 질량 농도의 입자크기 분포



[그림 III-23] 희석 공기 유량에 따른 입자 수 농도의 선형회귀 분석



[그림 III-24] 희석 공기 유량에 따른 질량 농도의 선형회귀 분석

4) 가습 및 비가습시 환경 비교

실험에 필요한 공기의 공급은 깨끗하고 건조한 공기인 CDA를 사용하였다. 가습 및 비가습시 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버 내부의 온도, 상대 습도, 산소농도를 측정하였다.

〈표 III-14〉에서와 같이 실험물질 발생을 시작함에 따라 비가습시 발생기 내부 환경의 경우, 온도는 25.0℃에서 최고 27.5℃이상까지 상승하였으며, 상대습도는 42%에서 10%까지 떨어졌다. 비부노출형 흡입챔버 내부의 경우, 온도는 24.3℃에서 24.6℃로 상승하였으며, 상대 습도는 28%에서 5.6%까지 떨어졌다.

〈표 III-14〉 비가습시 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버 환경

Time (hour)	Inside Generator		Inside Nose-only chamber		
	Temp. (℃)	RH (%)	Temp. (℃)	RH (%)	O ₂ (%)
0	25.0	42	24.3	28	20.1
1	26.5	10	24.6	5.9	20.1
2	27.4	10	24.6	5.6	20.1
3	27.5	10	24.5	5.6	20.3
4	27.4	10	24.6	5.9	20.1
5	27.2	10	24.6	5.7	20.8
6	27.1	10	24.6	5.6	20.8
Mean	27.18	10.00	24.58	5.72	20.37

Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250℃, Generation Air : 30 LPM, Humidified Air : 10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level
RH : Relative Humidity, Animal laboratory : 25℃, 42%(RH)

〈표 III-15〉에서와 같이 실험물질 발생을 시작함에 따라 가슴시 발생기 내부 환경의 경우, 온도는 23.9℃에서 최고 26.8℃이상까지 상승하였으며, 상대 습도는 37%에서 10%까지 떨어졌다. 비부노출형 흡입챔버 내부의 경우, 온도는 24.0℃에서 24.1℃로 유지하였다가 23.8℃로 떨어졌으며, 상대 습도는 실험 물질 발생 전에 17.2%이었으나, 가슴장치를 가동하였을 때는 41.9%이상 유지되었다.

〈표 III-15〉 가슴시 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버 환경

Time (hour)	Inside Generator		Inside Nose-only chamber		
	Temp. (℃)	RH (%)	Temp. (℃)	RH (%)	O ₂ (%)
0	23.9	37	24.0	17.2	20.3
1	26.8	10	24.1	45.4	20.6
2	26.8	10	24.1	43.3	20.6
3	26.7	10	24.1	43.1	20.4
4	26.7	10	24.1	41.9	20.4
5	26.7	10	24.1	42.5	20.5
6	26.4	10	23.8	43.4	19.5
Mean	26.21	10.00	24.04	43.63	20.31

Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250℃, Generation Air : 30 LPM, Humidified Air : 10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level
RH : Relative Humidity, Animal laboratory : 24℃, 37%(RH)

5) 가슴 발생실험

가슴을 하지 않을 경우 CDA로 인하여 상대습도가 낮아진다. 가슴 발생실험을 수행하기 위하여 비부노출형 흡입챔버 타워 상단에 가슴장치를 설치하였으며, 가슴을 할 경우와 가슴을 하지 않을 경우에 입자 크기와 농도 비교 및 확인을

하였다. 희석공기 10 LPM을 가습장치에 연결한 후 발생실험을 수행하였으며, 가습을 하지 않고 발생실험을 할 경우에는 희석공기를 비부노출형 흡입챔버에 곧바로(direct) 공급시켜 발생실험을 하였다. 토출속도는 각 조건에서 원형 압출기의 1 cycle 시간을 각각 3회씩 기록하였으며, 각 조건에서의 입자 수 농도와 질량농도를 측정하였다.

〈표 III-16〉 가습여부에 따른 입자 수 농도

Flow (LPM)	< 100 nm (#/ccm)	100 nm~1 μm (#/ccm)	Total (#/ccm)	CMD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
Before	N.D.	0.96	3.58	61.87	82.40(3.57)	-
Hu	299,673.49	181.85	337,333.12	27.08	26.12(1.45)	-
Hu+Ex	582,630.32	347,699.77	1,035,851.06	68.90	67.05(2.22)	47.89
Ex	386,417.59	441,214.23	917,544.00	104.61	94.98(1.97)	48.19

Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 112 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air : 30 LPM, Humidified Air : 10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level, Humidification 44.6%, non-Humidification 10.8%

Hu : Humidification, Hu+Ex : Humidification and Exposure, Ex : Exposure, N.D. : No data
CMD : Count Median Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

〈표 III-17〉 가슴여부에 따른 질량 농도

Flow (LPM)	< 100 nm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 nm ~ 1 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MMAD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
Before	N.D.	0.03	N.D.	525.32	512.92(0.00)	-
Hu	4.79	7.69	13.98	541.94	237.53(4.70)	-
Hu+Ex	57.22	1,225.78	1,405.10	229.21	225.20(1.55)	47.89
Ex	61.60	1,609.05	1,829.32	225.08	221.96(1.61)	48.19

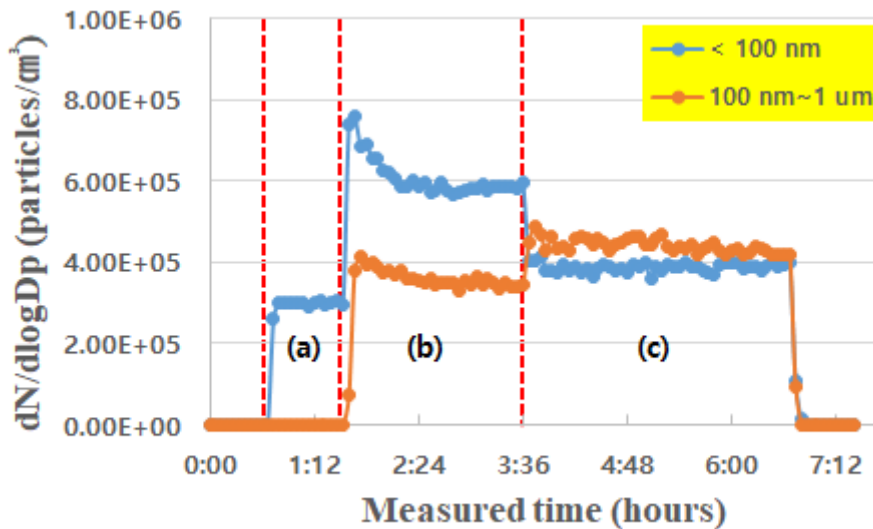
Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements ; 112 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air : 30 LPM, Humidified Air : 10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level, Humidification 44.6%, non-Humidification 10.8%

Hu : Humidification, Hu+Ex : Humidification and Exposure, Ex : Exposure, N.D. : No data
MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

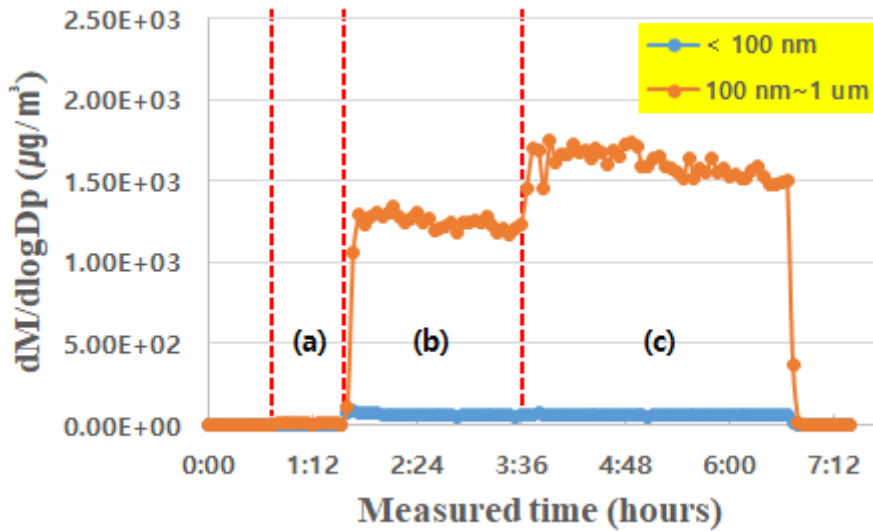
〈표 III-16〉과 [그림 III-25]에서 보는바와 같이 입자 수 농도는 가슴만 하는 (a) 구간에서는 100 nm미만, 특히 기하평균 크기가 26 nm의 입자가 주로 측정 되었으며, 100 nm이상의 입자는 거의 측정되지 않았다. 또한, 가슴을 하면서 발생장치를 가동하는 (b) 구간에서는 100 nm미만 및 100 nm이상의 입자 수 농도가 크게 증가하였으며, 가슴을 하지 않고 발생장치만 가동하는 (c) 구간에서는 100 nm미만의 입자 수 농도는 감소하고 100 nm이상의 입자 수 농도는 증가하였다. 아울러, [그림 III-27]에서 보는 바와 같이 가슴만 하는 경우에는 100 nm 미만의 입자 수 농도의 분포도가 높은 것을 확인할 수 있었고, 가슴을 하면서 발생장치를 가동하는 경우에는 2개의 입자 수 농도의 분포도 곡선을 확인할 수 있었다.

〈표 III-17〉과 [그림 III-26]에서 보는바와 같이 100 nm미만 및 100 nm이상 질량 농도의 경우 가슴만 하는 (a) 구간에서는 거의 측정되지 않았으며, 기하 평균 크기가 237 nm의 입자가 주로 측정되었다. 또한, 가슴을 하면서 발생장치를 가동하는 (b) 구간에서 100 nm미만 및 100 nm이상의 질량 농도는 증가하였으며,

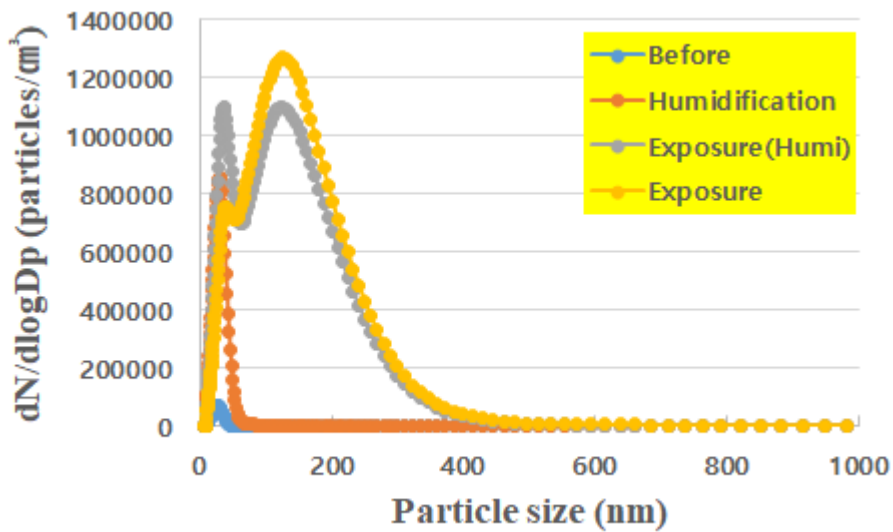
가습을 하지 않고 발생장치만 가동하는 (c) 구간에서도 100 nm미만 및 100 nm 이상의 질량 농도는 증가하였다. [그림 III-28]에서 보는 바와 같이 가습만 하는 경우에는 질량 농도의 분포도는 보이지 않았으며, 가습을 하면서 발생장치를 가동하는 경우나 가습을 하지 않고 발생장치만 가동하는 경우에 질량 농도의 분포도는 비슷한 양상을 보였다.



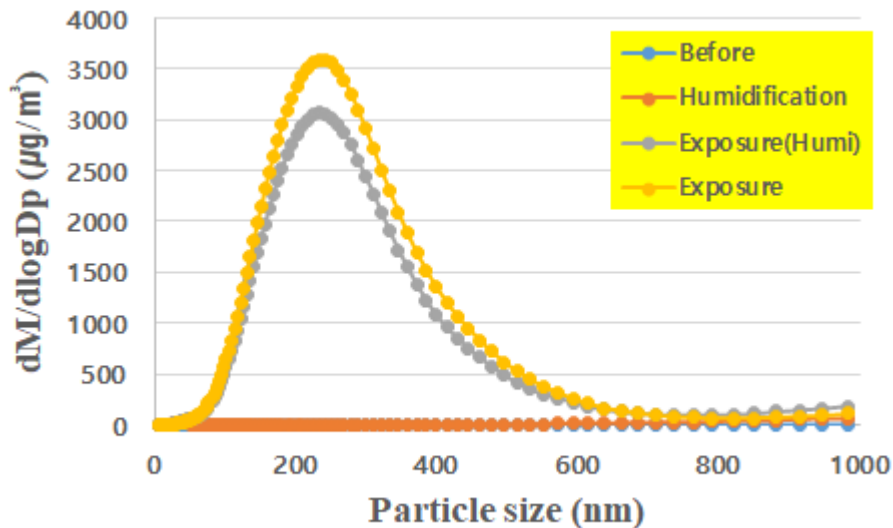
[그림 III-25] 가습여부에 따른 입자 수 농도 변화



[그림 III-26] 가습여부에 따른 질량 농도 변화



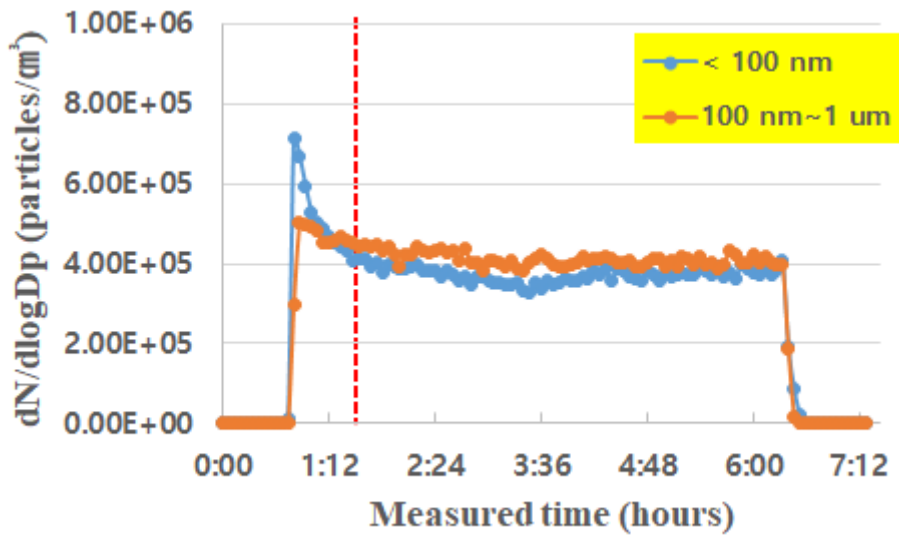
[그림 III-27] 가습여부에 따른 입자 수 농도의 입자크기 분포



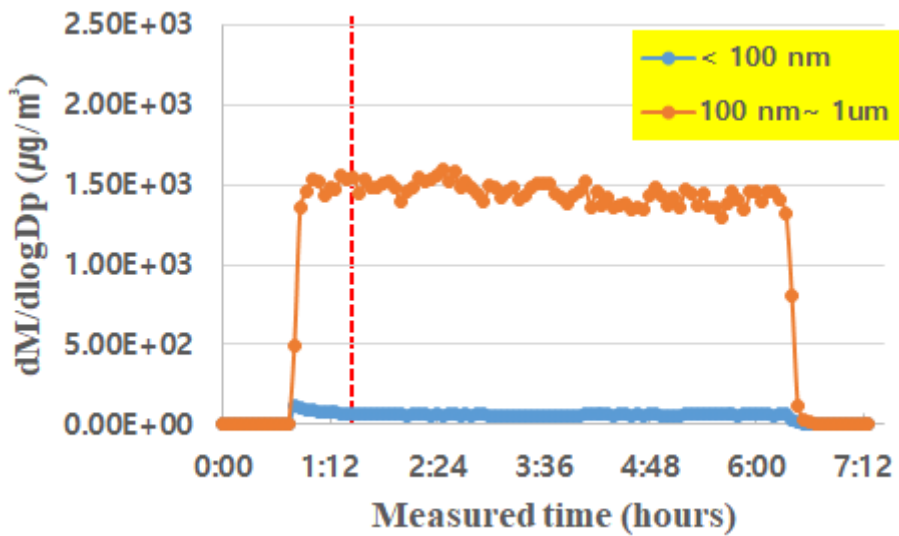
[그림 Ⅲ-28] 가슴여부에 따른 질량 농도의 입자크기 분포

6) 안정성 및 재현성

6시간 이상의 장시간 안정적으로 발생되는지 확인하기 위하여 4일간 발생실험을 수행하였다. 급성 흡입독성 시험은 하루 4시간 동안만 발생을 하면 되지만, 아급성 또는 아만성 반복 흡입독성 시험의 경우 하루 6시간 동안 주 5일, 4주 또는 13주간 수행하기 때문에 동물실험 수행 가능여부를 판단하기 위하여 6시간 이상 발생하였다.



[그림 III-29] 장시간 발생시 입자 수 농도 변화



[그림 III-30] 장시간 발생시 질량 농도 변화

[그림 III-29]에서 보는바와 같이 100 nm미만의 입자 수 농도는 발생을 시작하면 발생량이 급격하게 증가하였으며, 발생시작 후 약 40분 뒤부터는 안정적으로 유지되었다. 발생을 시작하면 100 nm이상의 입자 수 농도는 급속도로 증가하다가 발생시작 후 약 40분 뒤부터는 안정적으로 유지되었다.

[그림 III-30]에서 보는바와 같이 100 nm미만의 질량 농도는 발생을 시작하면 급속도로 발생량이 증가하였으며, 발생시작 후 약 40분 뒤부터는 안정적으로 유지되었다. 100 nm이상의 질량 농도는 발생을 시작하면 급속도로 증가하다가 발생시작 후 10분 이내부터 안정적으로 유지되었다.

〈표 III-18〉 장시간 발생시 입자 수 농도 일간 비교

Period (Day)	< 100 nm (#/ccm)	100 nm~1 μ m (#/ccm)	Total (#/ccm)	CMD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
1	421,853.60	426,029.55	940,552.38	100.04	91.10(1.94)	49.31
2	400,287.22	424,193.63	921,044.72	101.02	91.94(1.95)	49.36
3	391,612.36	417,126.00	896,798.04	102.01	92.48(1.96)	49.58
4	373,405.18	406,283.12	864,454.11	98.70	90.18(2.01)	50.97
Mean	396,789.59	418,408.08	905,712.31	100.44	91.43(1.97)	49.81

Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements : 112 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air : 30 LPM, Humidified Air : 10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level

CMD : Count Median Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

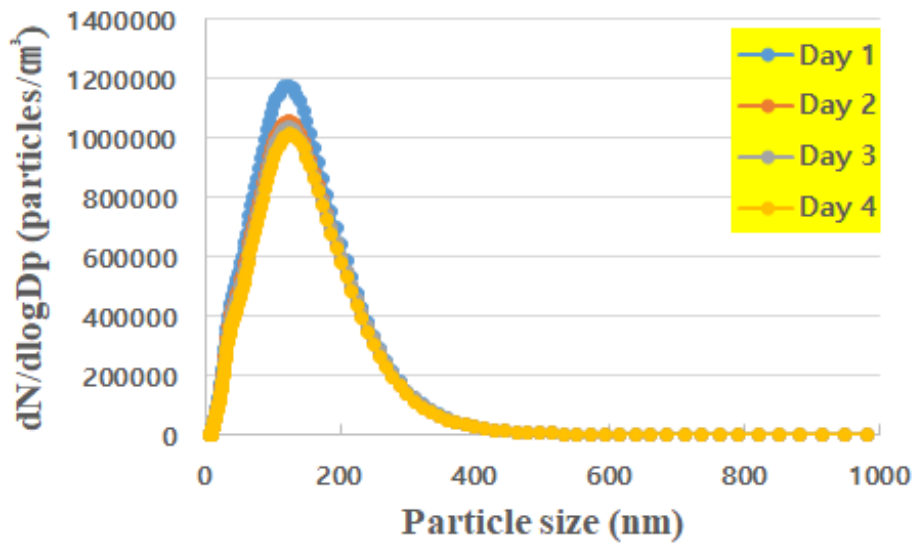
〈표 III-19〉 장시간 발생시 질량 농도 일간 비교

Period (Day)	< 100 nm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 nm~1 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MMAD (nm)	GM(GSD) (nm)	Extruding time (sec/cycle)
1	68.15	1,404.63	1,612.97	217.69	219.49(1.63)	49.31
2	64.10	1,423.16	1,630.27	220.12	221.44(1.62)	49.36
3	62.89	1,437.51	1,643.02	222.68	224.25(1.63)	49.58
4	60.66	1,415.25	1,616.17	252.71	252.84(1.63)	50.97
Mean	63.95	1,420.14	1,625.61	228.30	229.50(1.63)	49.81

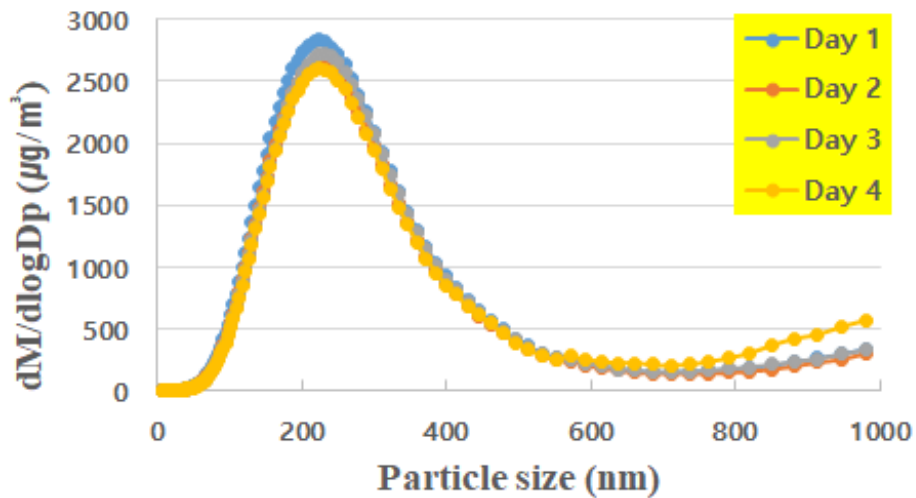
Analysis equipment : SMPS(Scanning mode, measurement interval : 4 min ; number of measurements : 112 times), Material : ABS filament(white color), Nozzle Diameter : 0.4 mm, Nozzle Temp. : 250°C, Generation Air : 30 LPM, Humidified Air : 10 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Extruder Speed : 10 Level

MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter, GM : Geometric Mean, GSD : Geometric Standard Deviation

〈표 III-18〉과 [그림 III-31]에서 보는바와 같이 발생하는 날이 지속될수록 원형 압출기의 1 cycle 시간은 늘어났으며 100 nm미만 및 100 nm이상의 입자 수 농도는 감소하는 경향을 보였다. 기하학 평균 크기는 91.10~92.48 nm를 유지하였다. 〈표 III-19〉과 [그림 III-32]에서 보는바와 같이 발생하는 날이 지속됨에 따라 원형 압출기의 1 cycle 시간은 늘어났으며 100 nm미만 및 100 nm이상의 질량 농도는 감소하는 경향을 보였다. 기하학 평균 크기는 발생하는 날이 지속됨에 따라 219.49 nm에서 252.84 nm로 증가하였다.



[그림 Ⅲ-31] 장시간 노출시 입자 수 농도의 분포도 일간 비교



[그림 Ⅲ-32] 장시간 노출시 질량 농도의 분포도 일간 비교

7) 중량농도 비교

〈표 III-20〉은 필터 중량법으로 측정한 농도와 동일한 시간대의 SMPS로 측정된 농도를 비교한 것이다. 필터 중량법으로 측정한 기하평균 농도는 2.34 mg/m^3 이었으며, 동일 시간대의 SMPS로 측정된 기하평균 농도는 1.65 mg/m^3 이었다. 필터 중량법의 농도에 대한 SMPS로 측정된 농도는 70.62% 수준이었다.

〈표 III-20〉 필터 중량법과 SMPS의 농도 비교

No.	Filter Weight - ㉠	SMPS - ㉡	㉡/㉠
	Mean (mg/m^3)	Mean (mg/m^3)	(%)
1	2.15	1.63	75.68
2	2.11	1.63	77.15
3	2.51	1.65	65.80
4	2.37	1.65	69.65
5	2.54	1.67	65.76
6	2.37	1.67	70.50
GM(GSD)*	2.34(1.08)	1.65(1.01)	70.62

GM(GSD)* : Geometric Mean(Geometric Standard Deviation)
Collected at the same time in the nose only chamber port

〈표 III-21〉은 필터 중량법으로 측정한 농도와 이 시간대를 포함한 시간동안 ELPI로 측정한 중량 농도를 비교한 것이다. 필터 중량법으로 측정한 기하평균 농도는 3.82 mg/m^3 이었다. 이 시간대의 ELPI로 측정한 기하평균 농도는 1.88 mg/m^3 이었으며, MMAD는 0.24, GSD는 1.7이었다. 필터 중량법의 농도에 대한 ELPI로 측정된 농도는 47.91% 수준이었다.

〈표 Ⅲ-21〉 필터 중량법과 ELPI의 농도 비교

No.	Filter Weight - ㉠	ELPI - ㉡	㉡/㉠
	Mean (mg/m ³)	Mean (mg/m ³)	(%)
1	3.86	1.883	-
2	4.35		
3	3.41		
4	3.71		
GM(GSD)*	3.82(1.11)	1.88(1.70)	47.91

GM(GSD)* : Geometric Mean(Geometric Standard Deviation)

Collected at the same time in the nose only chamber port

〈Measurement result of ELPI〉

1. General information								
Sampling Date	2022.10.20		Equipment No.	KOS-203-4		Target Conc. (mg/L)	-	
Smapping flow (LPM)	10		Sampling time (min)	213		mg/m³	1.883	
2. Table								
Stage	Size range (µm)	Cut-off size (µm)	Initial Mass (mg)	Final Mass (mg)	Mass (mg)	Mass %	Cumulative Mass %	Mass Probit
1	0.010 ~ 0.022	0.009919677	15.24	15.24	0.000	0.000	0.000	
2	0.022 ~ 0.042	0.022218011	15.41	15.41	0.000	0.000	0.000	
3	0.042 ~ 0.080	0.040539610	15.48	15.56	0.080	1.995	0.000	
4	0.080 ~ 0.140	0.072020830	15.75	15.96	0.210	5.237	1.995	2.945
5	0.140 ~ 0.210	0.121346611	15.31	16.22	0.910	22.693	7.232	3.541
6	0.210 ~ 0.320	0.199587074	15.13	16.62	1.490	37.157	29.925	4.473
7	0.320 ~ 0.510	0.313737151	15.17	16.37	1.200	29.925	67.082	5.442
8	0.510 ~ 0.800	0.481367843	15.34	15.42	0.080	1.995	97.007	6.882
9	0.800 ~ 1.300	0.758122681	15.56	15.59	0.030	0.748	99.002	7.327
10	1.300 ~ 2.000	1.248198702	14.99	15.00	0.010	0.249	99.750	7.807
11	2.000 ~ 3.300	2.016730027	15.33	15.33	0.000	0.000		
12	3.300 ~ 5.500	3.012772809	15.27	15.27	0.000	0.000		
13	5.500 ~ 8.200	4.437431690	15.10	15.10	0.000	0.000		
14	8.200 ~ 10.00	7.301766909	14.96	14.96	0.000	0.000		
10			4.010			100.00		
y = slope x + intercept (cumulative mass vs. mass probit)				MMAD=10 ^[(5-Intercept)/Slope]				
				GSD= 10 ^{[(5.9944579-Intercept)/Slope)]/MMAD}				
Intercept		7.70		MMAD		0.236		
Slope		4.30		GSD		1.7		
Correl		0.99						

8) TVOCs 측정

〈표 III-22〉는 발생 장치 및 비부노출형 흡입챔버 내부에서 TVOCs 농도를 측정한 결과이다. 발생시작 전의 TVOCs 배경농도에 대한 평균은 42.07 ppb, 최대농도는 60 ppb이었다. 3D 프린터 다중 발생장치 가동시의 발생기에서의 TVOCs 농도는 35.39 ppb, 최대농도는 90 ppb, 3D 프린터 다중 발생장치 가동시의 비부노출형 흡입챔버에서의 TVOCs 농도는 51.79, 최대농도는 100 ppb 이었다.

〈표 III-22〉 TVOC 농도 비교

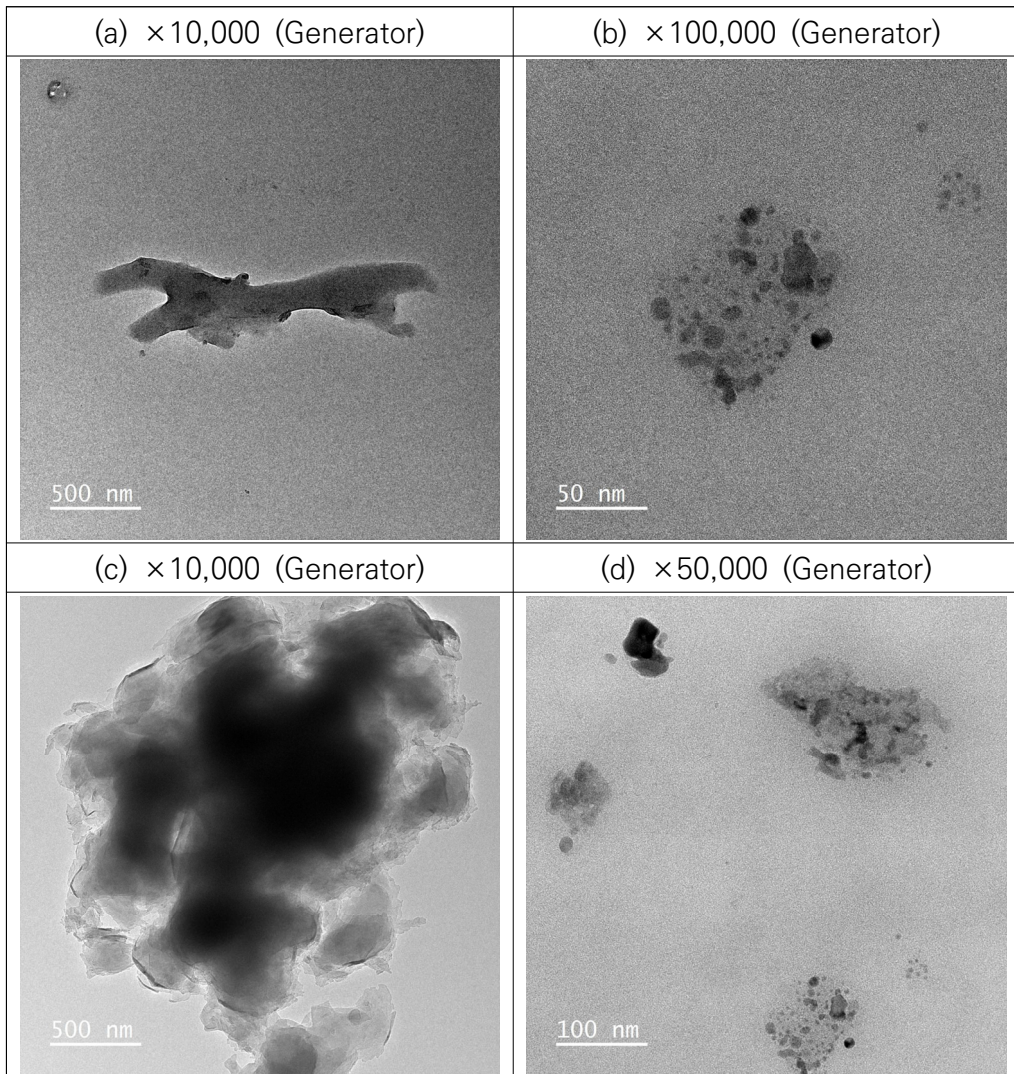
No.	TVOC(ppb)	
	Mean(SD)	Max
Back ground	42.07(4.12)	60
In the generator	35.39(5.29)	90
In the Nose-only chamber	51.79(12.66)	100

Analysis equipment: MultiRae Pro, Measurement reference gas : Isobutylene, Measuring interval : 1 min

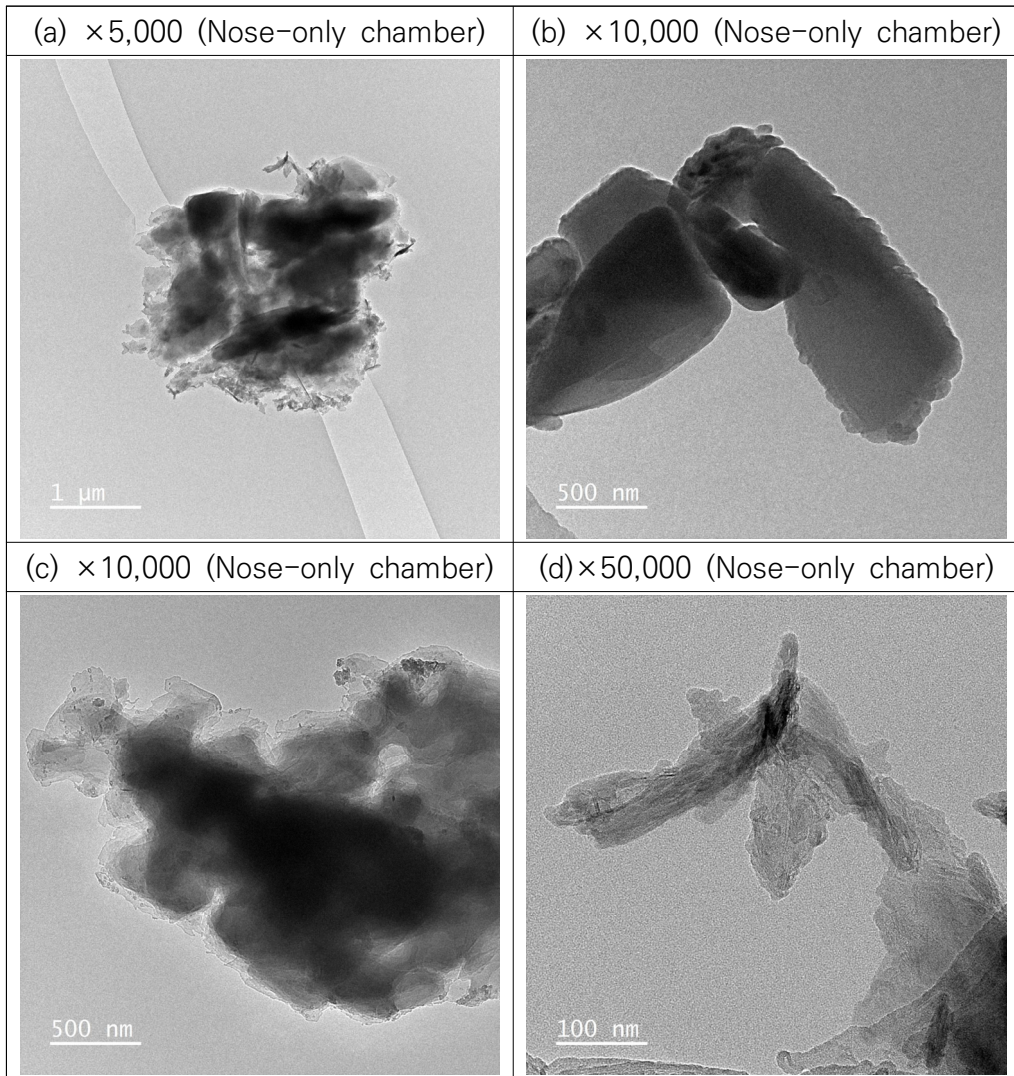
9) 입자 크기 및 형태

[그림 III-33]은 3D 프린터 다중 발생장치에서 발생한 물질을 곧바로 포집하여 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 입자 크기와 입자 형태 결과이다. 입자 크기는 수십 nm ~ 수 μ m로 다양하였으며, 입자 형태는 겹쳐진 다각형 판 또는 타원형이 관찰되었다. [그림 III-34]는 3D 프린터 다중 발생장치에서 발생한 물질을 비부노출형 흡입챔버의 노출포트에서 포집한 입자 크기 및 형태이다. 입자 크기는 수 nm ~ 수 μ m로 다양하였으며, 입자 형태는 다각형 판 또는 깃털 형태가 관찰되었다. [그림 III-35]는 가슴장치를 가동하였을 때 비부노출형 흡입챔버의

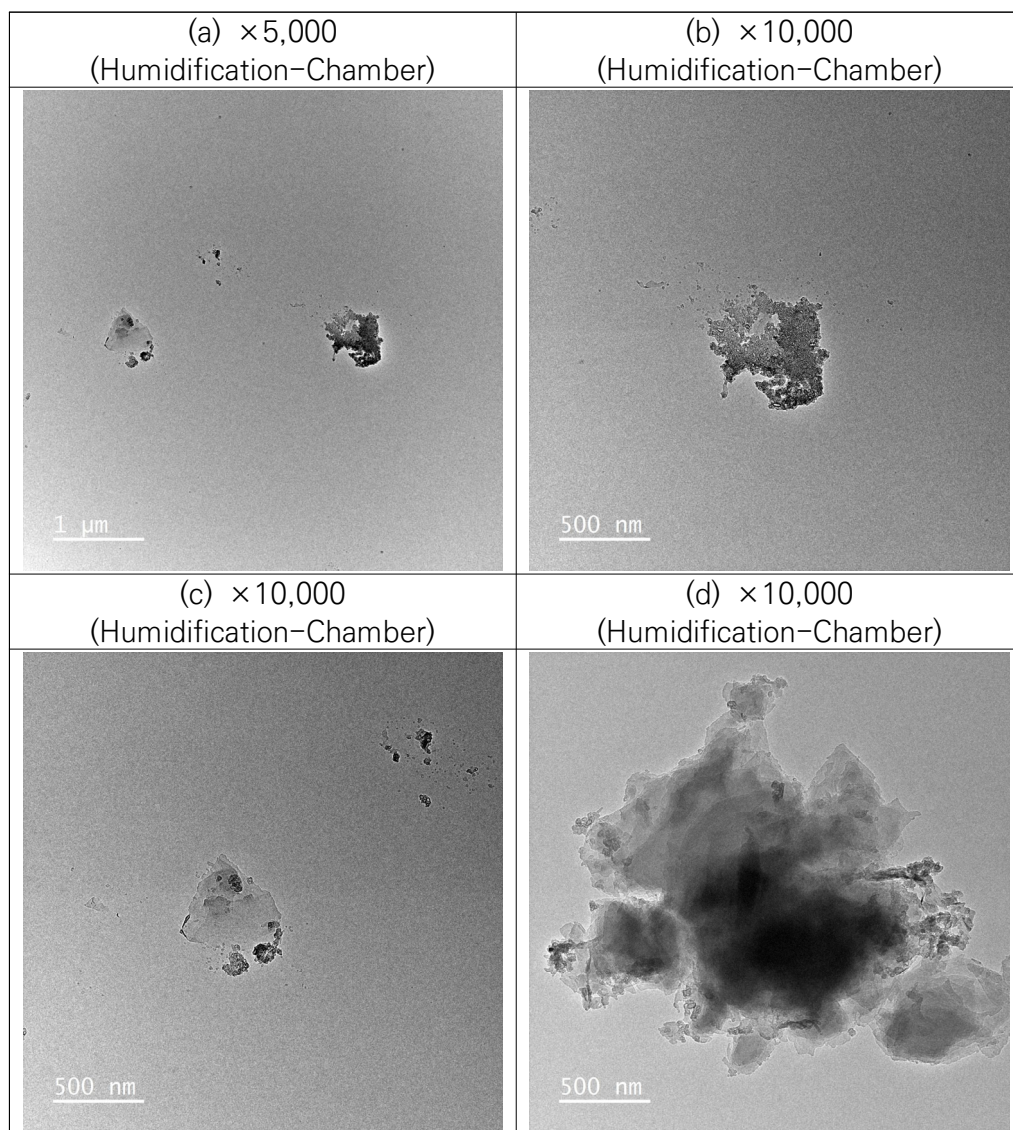
노출포트에서 포집한 입자 크기 및 형태이다. 입자 크기는 수 μm ~ 수 μm 로 다양하였으며, 입자 형태는 수 μm 구슬이 1 μm 이상 크기의 집단을 이룬 형태와 다각형 판이 겹쳐져 있는 모습이 관찰되었다.



[그림 III-33] 입자 크기 및 형태(1)



[그림 III-34] 입자 크기 및 형태(2)



[그림 Ⅲ-35] 입자 크기 및 형태(3)

IV. 고찰

.....

IV. 고찰

3D 프린터 다중 발생장치를 검증하기 위하여 1차적으로 다중 발생장치 기밀성 실험을 하였다. 발생장치에 공급시키는 공기 유량을 10 LPM에서 50 LPM까지 변경해 가며 수행하였으며, 발생장치 유출구와 비부노출형 흡입챔버의 노출포트에서 공기 유량을 비교한 결과, 97.13~99.68%의 우수한 기밀성을 보였으며 공급 유량이 증가할수록 기밀성이 향상되었다. 2019년도 연구(이성배 등, 2019)에서 개발한 3D 프린터 다중 발생장치 개폐문은 10 mm 두께의 폴리카보네이트 재질로 제작되었는데, 시간이 지남에 따라 바깥쪽으로 휘어져서 밀폐 성능이 떨어지고, 발생장치 상단의 냉각장치와 보우덴 연결부분의 틈새 등에서 공기가 유출되었다. 본 연구의 3D 프린터 다중 발생장치에서는 우측에 2개, 개폐문 상·하단에 밀폐장치 각 3개씩 총 8개를 추가하였으며, 냉각장치와 보우덴 연결부분에 테프론 재질의 밀폐 판과 실리콘 링, 그리고 SUS재질의 일체형 덮개를 제작하여 기밀성을 향상시켰다. 개선의 결과로 실험자 안전을 도모하고 공기 공급유량을 안정적으로 유지할 수 있게 되었다.

흡입독성시험에서 사용할 실험동물인 랫드의 호흡량은 0.17~0.20 LPM이며, 주령에 따라 0.5 LPM까지 증가한다. 또한, 비부노출형 흡입챔버 타워 6개 층에서 공기 유량이 모두 균일하게 유지되는 공기유량이 0.8 LPM이상이다. 따라서, 비부노출형 흡입챔버 노즐의 공기 유량은 안전율 20%까지 감안하여 약 1.0 LPM 수준으로 유지하도록 하였다. 아울러, 발생농도를 측정하는 측정기에서 필요한 공기유량도 충족시키기 위해서 최소 20 LPM에서 최대 50 LPM까지 가능하도록 하였으며, 동물실험시 농도 조절 및 챔버 환경 조건을 맞추기 위하여 발생장치의 발생유량과 희석유량을 변경해가며 실험하였다. <표 III-2>~<표 III-6>에서 보는 바와 같이 공급되는 공기의 총 유량이 40 LPM일 때 약 1.0 LPM에 부합함에 따라, 이후 모든 공급되는 공기 유량은 40 LPM을 기준으로 수행하였다.

〈표 III-7〉에서 보는 바와 같이 발생기를 통하여 비부노출형 흡입챔버의 1층에서 6층까지 임의의 포트에서 유출되는 공기유량을 디지털유량계로 측정하였을 때 10.1~ 1.03 LPM 범위로 일정하였다. 따라서 실험동물 랫드를 몇 번째 층, 어떠한 위치의 포트에 연결하여 흡입실험을 수행하여도 실험물질을 동일하게 노출시킬 수 있음이 확인되었다.

박지훈 (2018b)등의 연구에서 시간 당 발생량을 제시하는 것이 입자 발생 수준을 비교하는데 타당하다고 제안했으며, 본 연구에서는 발생량과 관련이 높은 노즐의 토출 속도, 토출 온도, 공급되는 공기의 희석률 조건이 중요한 요건이라고 판단하였다. 단, 본 연구에서의 3D 프린터 다중 발생장치는 프로그램에 의하여 성형품을 제작하는 것이 아니기 때문에, 노즐의 토출 속도는 원형 압출기의 회전속도로 가름하였다.

노즐의 토출 속도, 토출 온도, 공급되는 공기의 희석률 등의 조건에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 일정한 패턴을 보였다. 노즐의 토출 속도를 5 Level에서 20 Level로 증가시킴에 따라 원형 압출기의 1 cycle 시간이 점점 단축되어 필라멘트의 공급 속도는 증가하였다. 특이한 점은 100 μm 미만의 입자보다는 100 μm 이상의 입자의 경우에서 노즐의 토출 속도가 빨라짐에 따라 입자 수 농도 및 질량 농도가 더 많이 증가하였다는 것이다. 따라서, 입자 수 농도의 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 83.71 μm 에서 117.93 μm 로 커졌으며, 질량 농도의 공기역학적질량중양직경(MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter)은 184.55 μm 에서 255.65 μm 로 커진 결과를 보였다.

Lee 등(2021)의 연구에서 노즐의 토출속도가 증가함에 따라 100 μm 미만의 크기는 줄어드는 양상을 보였는데, 본 연구에서는 이와 반대로 100 μm 미만의 입자 수 농도 및 질량 농도가 증가한 결과를 보였다. 본 연구의 3D 발생시스템은 발생장치에서 비부노출형 흡입챔버까지 거리가 멀고 물질이 이동하는 튜브가 직선이 아니라 각이 여러 번 꺾인 상태로 되어있다. 여기에 희석공기가 T자관을 통하여 직각 방향으로 공급됨으로써 수 μm 크기의 입자들은 입자간 충돌이 증가하게 되는데, 나노 입자들 간의 정전반발 작용보다 강한 결합으로 입자들의 응집률이

증가되었고 이에 따라 입자크기도 증가하였다고 판단되었다. 노즐의 토출속도에 따른 선형 회귀분석 결과에서 입자 수 농도와 질량 농도 모두 양의 기울기를 보였으며, 이에 따라 노즐의 토출 속도가 증가함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 증가하였다.

노즐의 토출 온도를 220℃에서 310℃로 상승시킴에 따라 원형 압출기의 1 cycle 시간은 점점 단축되었으며, 이에 따라 필라멘트의 공급 속도는 증가하였다. 토출 온도가 상승함에 따라 100 mm미만의 입자와 100 mm이상의 입자 수 농도 및 질량 농도는 확연하게 높아졌음을 확인할 수 있었다. 따라서, 입자 수 농도와 질량 농도는 온도에 크게 영향을 받으며, 토출 온도가 높아질수록 농도가 증가한다는 여러 문헌과 동일한 결과를 도출하였다(Deng et al., 2016; Stavile et al., 2017, 박지훈 등, 2018a; Lee et al., 2021).

입자 수 농도의 CMD는 220℃에서 121.44 nm로 가장 컸으며, 250℃에서 88.96 nm로 작아졌다가 온도가 상승함에 따라 다시 증가하여 310℃에서 110.26 nm이었다. 질량 농도의 MMAD는 220℃에서 236.39 nm로 가장 컸으며 250℃에서 208.63 nm로 작아졌다가 온도가 상승함에 따라 다시 증가하여 310℃에서 210.35 nm이었다. MMAD가 200 nm 크기 이상의 결과는 앞에서 언급한바와 같이 3D 프린터 다중 발생장치에서 비부노출형 흡입챔버까지 거리와 동선의 꺾임뿐만 아니라 희석공기가 T자 관을 통하여 직각으로 공급되어 입자간 충돌이 증가하게 됨으로써 입자들의 응집률이 높아지고 이에 따라 입자 크기도 커진 것으로 판단되었다. 토출온도에 따른 선형 회귀분석 결과에서 입자 수 농도와 질량 농도 모두 양의 기울기를 보였으며, 이에 따라 노즐의 토출 온도가 상승함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 증가하였다.

발생장치의 발생기 공기와 희석 공기 유량의 희석비율을 변경하였을 경우, 원형 압출기의 시간에는 영향이 없었다. 그럼에도 불구하고 발생기 공기와 희석 공기 유량의 희석비율을 변경함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도에는 변화를 보였다. 즉, 발생기 공기 유량이 증가하고 반대로 희석 공기 유량이 적어짐에 따라 100 mm미만의 입자와 100 mm이상의 입자 수 농도 및 질량 농도는 높아졌다.

입자 수 농도의 CMD는 희석 공기 유량의 희석비율이 증가함에 따라 작아졌으며, 질량 농도의 MMAD는 희석 공기 유량의 희석비율이 증가함에 따라 미미하기는 하지만 작아지는 양상을 보였다. 전체 공기는 40 LPM으로 공급되는 양은 동일하지만, 발생기의 공기 공급 라인 중간의 역류 방지 T자 관으로 희석 공기가 희석비율에 따라 유입되는데, 발생기에서 공급되는 입자들이 희석공기와 혼합되면서 와류가 발생하여 입자들의 충돌이 증가하게 된다. 이 때 나노 입자들 간의 정전반발 작용보다 강한 결합으로 인하여 입자들의 응집률이 높아진 것으로 추측된다. 희석 공기 유량의 희석비율에 따른 선형 회귀분석 결과에서 입자 수 농도와 질량 농도는 양의 기울기를 보였으며, 이에 따라 희석 공기 유량의 희석비율이 감소함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 증가하였다.

실험시 공급하는 공기는 HEPA필터와 carbon 필터 등으로 처리한 깨끗하고 건조한 CDA이다. 이 CDA로 발생장치에 공급하는 공급유량과 비부노출형 흡입챔버에 희석유량, 그리고 가슴장치 공급유량에 활용하였다. CDA를 곧바로 사용하면 상대습도는 낮아지게 된다. 또한, 3D 프린터 다중 발생장치 내부에는 가열장치인 가열 코어가 공급되는 필라멘트를 녹이는 역할을 하고 있다. 이 때 가열장치로 인하여 데워진 발생기 공기가 비부노출형 흡입챔버로 공급되어 온도를 상승시키게 된다. 이러한 상태의 비가습시 발생기 내부와 비부노출형 흡입챔버의 환경을 측정하였다. OECD TG(Test Guideline)에서는 급성 또는 반복 흡입독성시험을 수행할시 동물실험을 위한 환경조건으로 온도는 $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 상대습도는 $50 \pm 20\%$, 산소농도는 19%이상을 요구하고 있다(OECD, 2018(a, b)). <표 III-14>에서 보는 바와 같이 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하게 되면 발생기 내부의 온도는 27.5°C 까지 상승하였으며, 비부노출형 흡입챔버 내부는 24.6°C 이하를 유지하였다. 가열 코어를 310°C 까지 올렸음에도 불구하고 발생장치 내부의 온도가 28°C 이상 상승하지 않았던 이유는 가열 코어와 연결된 냉각판과 팬을 발생장치 내부가 아닌 발생장치 외부에 장착하여 발생한 열 에너지를 3D 프린터 다중 발생장치 외부로 내보냈기 때문이다. 발생장치 외부로 열에너지를 내보냄으로써 발생장치 내부의 온도 상승을 최소화할 수 있었다. 아울러,

비부노출형 흡입챔버까지 도달한 공기는 상온까지 냉각되어 동물실험을 위한 온도조건을 충족하였다. 습도의 경우는 가습을 하지 않았을 때에 발생장치 내부와 비부노출형 흡입챔버 내부 상대습도의 경우는 각각 10% 및 6%미만으로 OECD TG에 부합하지 않았다. 이에 따라 비부노출형 흡입챔버 타워 상단에 가습장치를 장착한 다음 발생실험을 수행하였으며, <표 III-15>에서 보는 바와 같이 3D 프린터 다중 발생장치 내부의 상대습도는 10% 수준을 유지하였지만, 비부노출형 흡입챔버 내부의 상대습도는 41.9~45.4%로 OECD TG 조건을 충족하였다. 아울러, 산소 농도도 19%이상 유지되어 OECD TG 조건에 부합하였다.

가습장치를 장착한 후 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 경우에 100 mm미만의 입자 수 농도는 크게 증가하였으며, 물입자의 CMD는 27.08 mm의 작은 액체 에어로졸로 확인되었다.

<표 III-16>에서 보는 바와 같이 가습만 할 경우에 100 mm미만의 입자 수 농도는 약 30만이었고 가습 상태로 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 경우에 100 mm미만의 입자 수 농도는 약 58만이었으며, 가습을 하지 않고 3D 프린터 다중 발생장치만 가동할 경우에 100 mm이상 입자 수 농도는 증가하였으나, 100 mm미만의 입자 수 농도는 가습 상태로 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 경우와 비교하여 약 10만개 정도 적게 발생하였다. CMD가 80.23 mm에서 104.61 mm로 크기가 증가한 것을 볼 때, 가습 상태로 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 경우에 물 분자가 나노입자를 둘러싸서 코팅함으로써 입자들 간의 응집을 방해하게 되어 나노입자의 응집률이 떨어진 것으로 판단되었다. <표 III-17>에서 보는 바와 같이 가습여부에 따른 질량 농도를 살펴보면, 가습만 할 경우에 농도는 높지 않았으나 MMAD는 541.94 mm로 입자크기가 컸으며, 가습상태로 3D 프린터 다중 발생장치를 가동할 경우에 MMAD는 229.21 mm, 가습을 하지 않고 3D 프린터 다중 발생장치를 가동할 경우에 MMAD는 221.96 mm이었다. 100 mm미만의 질량 농도는 가습을 하지 않고 3D 프린터 다중 발생장치만 가동할 경우에 가습을 함께 하였을 때와 비교하여 질량 농도가 소폭 증가하여 입자 수 농도와 다른 양상을 보였고 100 mm이상에서 질량 농도는 증가하였다.

가습상태에서는 100 nm미만의 물 입자는 증발되어 사라지고, 100 nm이상의 발생 물질 입자만 남기 때문에 MMAD는 증가한 것으로 판단되었다. 가습을 하지 않고 3D 프린터 다중 발생장치만 가동할 경우에 100 nm미만의 입자들이 증가하였기 때문에 MMAD는 작아진 것으로 보인다.

발생물질의 일내 안정성과 일간 재현성을 확인하기 위하여 원형 압출기의 1 cycle 시간은 10 Level로 약 50초, 토출온도는 250℃, 공급되는 총 공기 유량은 40 LPM으로 발생조건을 고정하였다. 3D 프린터 다중 발생장치의 가동은 일일 6시간 이상, 4일 동안 수행하였는데, 배경농도부터 측정하기 위하여 3D 프린터 다중 발생장치 가동 30분전부터 CDA만 공급하였다. 가열 코어의 온도가 상승하면 선행연구(Zang 등, 2017; 박지훈 등, 2018a; 김성호 등, 2018; 이성배 등, 2019)에서와 같이 입자 수 농도는 급격하게 증가하였으며, 3D 프린터 다중 발생장치 가동 후 약 40분 후부터 입자 수 농도와 질량 농도는 소폭 감소하였으나 큰 변화 없이 유지되었다. [그림 II-1]에서 보는 바와 같이 실험동물에게 3D 프린터 다중 발생장치에서 발생하는 물질을 일정하게 노출 시키기 위해서 비부노출형 흡입챔버로 들어가는 라인에 추가하여 배기처리 장치로 곧바로 내보낼 수 있도록 by pass를 설치하였다. 즉, 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하고 40분 동안은 ①번 방향인 배기처리장치로 내보내다가 농도가 안정적으로 유지될 때 밸브를 조정하여 ②번 방향인 비부노출형 흡입챔버로 공급될 수 있도록 하였다. 실험조건에 따라 선택적으로 수행할 수 있도록 한 것이다.

실험동물을 활용한 급성 및 반복흡입독성시험에서 흡입챔버 내의 에어로졸은 평균 농도에서 $\pm 20\%$ 이내를 유지해야 한다(OECD, 2018(a, b)). 흡입챔버의 환기를 위해 공기가 공급되는데, 액체 또는 고체상태의 에어로졸이 입자가 가스 상태보다 기류의 영향에 덜 민감하여 기체보다 일정하게 유지되기가 더 어렵기 때문이다. 하루 6시간 이상 4일 동안 3D 프린터 발생장치를 가동시켰을 경우, 입자 수 농도의 평균값에 대하여 100 nm미만 크기의 범위는 5.89~10.63%, 100 nm이상 크기의 범위는 1.82~2.90%이었으며, 질량 농도의 평균값에 대하여 100 nm미만 크기의 범위는 5.14~12.35%, 100 nm이상 크기의 범위는 1.09~1.22%

이었다. 3D 프린터 발생장치에서 발생하는 물질은 고체입자 상태의 에어로졸이며 $\pm 20\%$ 이내였다. 이러한 오차가 발생한 주요요인 중 하나는 원형 압출기의 속도로 판단된다. 원형 압출기의 1cycle 시간이 늘어남에 따라 입자 수 농도 및 질량 농도는 줄어들었기 때문으로 사료된다. 그럼에도 불구하고, 일내 안정성과 일간 반복에 의한 재현성은 화학물질 시험을 위한 OECD TG-Health effect section, No. 412, No. 433을 충족하였다(OECD, 2018(a, b)).

필터 중량법으로 측정한 농도는 2.34 mg/m^3 이었으며, 동일 시간대에 SMPS로 측정된 농도는 1.65 mg/m^3 로 필터 중량법으로 측정한 농도의 70.62%로 과소평가되었다. SMPS는 실시간으로 농도변화를 모니터링 할 수 있는 장점이 있는 반면에 실제 농도를 과소평가할 수 있다(이성배 등, 2019). ELPI에 14단계로 구성된 필터로 입자 크기 분포도를 확인한 결과 140~510 nm의 입경크기가 전체 입자의 89.8%에 해당하였으며, MMAD는 236 nm로 SMPS에서의 MMAD 230 nm와 유사한 결과를 얻었다. 측정방법이 다른 두 기기로부터 MMAD의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 다만, 2019년도 연구(이성배 등, 2019)에서 MMAD 값이 111 nm이었으며, 본 연구에서는 2배 이상 컸기 때문에 입자의 응집을 최소화하여 더 작은 입자 크기로 발생될 수 있는 방안이 필요하였다. 현재의 발생 시스템에서 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버 간의 거리 축소, 공급라인의 꺾임 최소화, 그리고 희석공기 혼합부분 개선 등이 필요하다고 판단되었다.

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 물질마다 유해성 기준치가 다르고 3D 프린터 다중 발생장치를 가동함에 따라 수십 가지의 화합물이 발생할 수 있다. 이러한 VOCs를 개별적으로 모두 측정하는 것은 비실용적이기 때문에 TVOCs로 통합하여 측정하였다. <표 III-22>에서 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 때 발생장치 내부가 실험실 배경농도보다 낮았으며, 비부노출형 흡입챔버 내부의 TVOCs 농도는 51.79 ppb(최대 100 ppb)이었다. 측정된 농도는 환경부의 실내공기질 권고기준에 훨씬 못 미치는 수치였다. 우리나라 실내공기질 관리법 시행규칙 제4조(환경부, 2021)와 관련하여

실내공기질 권고기준(별표 3)을 살펴보면, 지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실 등은 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 의료기관, 어린이집, 산후조리원 등은 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. TVOCs를 측정된 값을 실내공기질 기준 값과 비교하기 위하여 25°C , 1기압을 기준으로 환산하면, 51.79 ppb 는 $118.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이는 기준 값의 약 30% 수준에 불과하였다. 다만, 환기가 잘 되지 않는 실내에서 3D 프린터를 사용할 경우는 VOC 농도가 크게 증가하지 않고 나노입자는 계속 증가할 수 있다(Steinle, 2016). 그렇기 때문에 사용자의 안전과 건강을 지키기 위하여 3D 프린터 사용 전·후 환기, 3D 프린터 사용 공간에 머무르지 않기, 개인보호 장비 착용, 노즐의 온도를 제조사 권장온도보다 높게 설정하지 않기, 그리고, 3D 프린터 및 사용 공간 청소 등의 안전 수칙을 준수하며 사용하는 것이 바람직할 것이다(과학기술정보통신부, 2022).

3D 프린터 다중 발생장치를 사용하여 발생한 ABS재료의 입자를 TEM으로 관찰하였다. 입자 크기의 경우 대부분의 입자들이 집단을 이루어서 수 μm ~ 수 μm 까지 다양한 크기들이 관찰되었다. 입자 형태는 다각형 판이 겹쳐진 형태 또는 타원형태, 깃털 형태, 구슬이 집단을 이룬 형태 등이 관찰되었다. 일정한 패턴이 있기 보다는 필라멘트가 가열코어에 의하여 용융되고 냉각된 입자들이 다양한 형태를 이룬 것으로 보인다.

본 연구에서는 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동 시스템을 구축하였으며, 기밀성 실험, 노즐의 토출 속도, 토출 온도, 그리고 발생기 공급 공기와 희석 공기 비율에 따른 조건 등의 실험을 통하여 의미 있는 결과를 얻었다. 또한, 동물실험을 위한 환경조건인 온도, 상대습도, 산소농도 등의 기준에 부합한 결과를 도출할 수 있었다. 앞으로 본 시스템을 활용하여 실험동물을 이용한 연구를 본격적으로 추진할 수 있을 것이다.

V. 결론



V. 결론

본 연구에서는 실험동물을 활용하여 생체 연구가 가능한 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동시스템을 구축하였으며, 다양한 조건 실험을 통하여 완성도를 높였다.

먼저, 3D 프린터 다중 발생장치의 개폐문과 가열코어부분을 개선하여 공기 유량에 따라 97.13%~99.68%의 우수한 기밀성을 보였다. 비부노출형 흡입 챔버에서 실험동물 호흡기를 통해 안정적으로 공기를 공급할 수 있는 공기 총 유량은 40 LPM이었다. 이 유량 조건에서 6개 단계로 구성된 비부노출형 흡입 챔버 각 단계별 노즐포트의 공기유량은 1.01~1.03 LPM 범위로 일정하였다.

3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동 시스템을 구축한 다음 노즐의 토출 속도, 토출 온도, 그리고 발생기 공기 공급유량과 희석공기 공급유량 비율 조건에 따라 실험을 하였다. 노즐의 토출 속도가 증가함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 증가하였으며, 토출 온도가 상승함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 증가하였다. 발생장치의 발생기 공기와 희석 공기 공급 유량 비율이 10:30, 20:20, 30:10, 그리고 40:0으로 변경함에 따라 입자 수 농도와 질량 농도는 증가하였다. 또한, 수농도중위값(CMD)은 평균 100.44 μm 수준이었으며, 질량농도중위값(MMAD)은 평균 228.30 μm 수준이었다.

가습을 하지 않고 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 경우에 비부노출형 흡입챔버 내부 온도 평균은 24.58 $^{\circ}\text{C}$, 상대 습도 평균은 5.72%이었으며, 가습을 하면서 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하였을 경우에 비부노출형 흡입챔버 내부 온도 평균은 24.04 $^{\circ}\text{C}$, 상대 습도 평균은 43.63%이었다. 3D 프린터 다중 발생장치를 가동하지 않고, 가습만 하였을 경우 물 입자는 100 μm 미만의 크기가 대부분이었으며, 질량 농도 보다는 입자 수 농도에 더 큰 영향을 주었다.

발생시작 후 약 40분 뒤부터 입자 수 농도 및 질량 농도는 안정적으로 유지 되었다. 100 μm 미만 입자크기의 평균값에서 오차범위는 각각 5.89~10.63%,

5.14~12.35%이었고, 100 μm 이상 입자크기의 평균값에서 오차범위는 각각 1.82~2.90%, 1.09~1.22%이었으며, 일내 안정성과 일간 재현성은 OECD TG Test No. 412, 433을 충족하였다.

필터 중량법으로 측정한 기하평균 농도는 $2.34 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이었으며, 동일 시간대의 SMPS로 측정된 기하평균 농도는 $1.65 \text{ mg}/\text{m}^3$ 으로 필터 중량법의 농도에 대한 SMPS로 측정된 농도는 70.62% 수준이었다. 또한, 필터 중량법의 농도에 대한 ELPI로 측정된 농도는 47.91% 수준이었다.

비부노출형 흡입챔버 내부에서 측정한 3D 프린터 다중 발생장치에서 발생된 TVOCs 평균 수치는 51.79 ppb이었고, 이 수치를 실내공기질 기준으로 환산하면 $118.84 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 이는 허용기준치의 약 30% 수준이었다.

TEM으로 관찰한 입자 크기의 경우는 대부분의 입자들이 집단을 이루어 수 μm ~ 수 μm 까지 다양하였으며, 입자 형태의 경우는 다각형 판이 겹쳐진 형태 또는 타원 형태, 깃털 형태, 그리고 구슬이 집단을 이룬 형태 등이 관찰되었다.

본 연구에서 3D 프린터 다중 발생장치와 비부노출형 흡입챔버의 연동시스템을 구축하고 다양한 조건의 실험을 통하여 의미 있는 결과를 도출하였다. 또한, 동물실험을 위한 환경조건인 온도, 상대습도, 산소농도 등의 기준에 부합한 결과를 얻었다. 향후 동 시스템을 활용하여 3D 프린터에서 발생하는 ABS 입자상물질 등에 대한 흡입독성연구를 안정적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 과학기술정보통신부. 3D 프린터 안전 이용 가이드. 2022.
- 김성호, 정은교, 김세동. 3D 프린터 사용자에게 대한 초미세입자 노출평가. 산업 안전보건연구원 연구보고서, 2018.
- 박지훈, 전해준, 박경호, 윤충식. 3D 프린팅 가동 조건 별 발생 입자크기 분포와 흡입 노출량 추정. 한국환경보건학회지 2018;44(6):524-538(a)
- 박지훈, 전해준, 오영석, 박경호, 윤충식. 3D 프린팅 기술의 이해, 유해 인자 노출 평가와 제어. 한국산업보건학회지, 2018;28(3):241-256(b)
- 이성배, 임철홍, 한정희, 이미주, 김태현, 정은교. 실험동물을 이용한 3D 프린터 발생 독성물질에 대한 생체영향 연구(I). 산업안전보건연구원 연구보고서, 2019.
- 정보통신산업진흥원. 2021 3D 프린팅 산업 실태조사. 2022.
- 정은교, 김성호. 3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서, 2019.
- 환경부. 실내공기질 관리법 시행규칙 제4조 (별표3), 환경부령 제918호, 2021.6.11
- Byrley, P., George, B. J., Boyes, W. K., & Rogers, K. Particle emissions from fused deposition modeling 3D printers: Evaluation and meta-analysis. Science of The Total Environment, 2019;655:395-407
- Deng Y, Gca S-J, Chen A et al., The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions form a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. Building and Environment 2016;104:311-319

- Dobrzyńska, E., Kondej, D., Kowalska, J., & Szewczyńska, M. Exposure to chemical substances and particles emitted during additive manufacturing. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(26):40273-40278
- Fujiwara, D. Indoor air quality assessment. Safetech Environmental LTD. 2014.
- Gümperlein I, Fischer E, Dietrich-Gümperlein G et al. Acute health effects of desktop 3D 프린팅 (fused deposition modeling) using acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid materials: An experimental exposure study in human volunteers. *Indoor Air* 2018;28(4):611-623
- OECD, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals : Test No. 412 Subacute Inhalation Toxicity: 28-Day Study(27 June 2018)(a)
- OECD, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals : Test No. 433 Acute Inhalation Toxicity: Fixed Concentration Procedure(27 June 2018)(b)
- Stabile L, Scungio M, Buonanno G et al. Airborne particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature. *Indoor Air* 2017;27:398-408
- Stephens B, Azimi P, Orch ZE et al. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment* 2013;79:334-339
- Stefaniak AB, LeBouf RF, Duling MG et al. Inhalation exposure to three-dimensional printer emissions stimulates acute hypertension and microvascular dysfunction. *Toxicol Appl Pharmacol* 2017;335:1-5

- Steinle, P. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2016;13(2);121-132.
- S-B Lee, J-H Han, T-H Kim, H-G Cha and C-H Lim, Development of a nanoparticle multi-generator for assessment of inhalation hazard. Analytical Science & Technology;2021;34(2):87-98
- The Danish Environmental Protection Agency(EPA). Risk assessment of 3D printers and 3D printed products. Environmental Protection Agency;2017.p.8,10,70
- Zhang Q, Wong JPS, Davis AY et al. Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers. Aerosol Science and Technology 2017;51(11):1275-1286
- Zhou Y, Kong X, Chen A et al. Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D printers in the Clean Room. Procedia Engineering 2015;121:506-512
- 서울신문 21.7.6 “3D 프린트 작업하다 육종암... 당신의 암은 산재입니다”
- 오마이뉴스 20.8.3“A과학교 교사들 잇단 희귀암육종...‘3D 프린터 공포’확산
http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002663757
- 헬스조선 21.6.4 “3D 프린터 육종암 유발? 재료·시약이 독성 위험”
https://m.health.chosun.com/svc/news_view.html?contid=2021060301693
- YTN 21.12.14 “3D 프린팅 소재 전수 조사 착수...5개 부처 공동 대응”

https://www.ytn.co.kr/_comm/pop_print.php?key=202112141252523618

YTN 21.12.18 “3D 프린터 사용 114명 건강이상...교육부 전수 조사 나서라”
https://www.ytn.co.kr/_comm/pop_print.php?key=202112180453420503

Abstract

In this study, the interlocking system between the 3D printer multi-generating device and the nose-only exposed type inhalation chamber was established.

By improving the 3D printer generating device, excellent airtightness results 97.13% to 99.68% were obtained. In the nose-only exposed inhalation chamber, the total air flow rate that can study supply air through the laboratory animal respirator was 40 LPMs. Under this flow condition, the air flow rate of the nozzle port at each stage of the nose-only exposed type inhalation chamber consisting of six stages was constant in the range of 10.1 to 1.03 LPMs.

An interlocking system between the 3D printer generator and the nose-only exposed inhalation chamber was established, and experiment were conducted according to the extruding speed of the nozzle, extruding temperature, and ratio of the generator air flow rate to the dilution air flow rate.

As the extruding speed of the nozzle increased, the particle number and mass concentration increased, and as the extruding temperature increased, the particle number and mass concentration increased. As the flow rate ratio of 3D printer generator air and dilution air was changed to 10:30, 20:20, 30:10, and 40:0, the particle number and mass concentrations increased. Additionally, the mean CMD was 100.44 nm

and mean MMAD was 228.30 nm.

In the 3D printer generation experiment, when humidification was not performed, the average temperature inside the nose-only exposed type inhalation chamber was 24.58°C, and the average relative humidity was 5.72%. In the case of humidification, the average temperature inside the nose-only exposed type inhalation chamber was 24.04°C, and the average relative humidity was 43.63%. In the case of humidification, most of the water particles had a size of less than 100 nm, and had a greater effect on the particle number concentration than the mass concentration.

From about 40 min after the start of generation (3D printer multi-generator), the particle number concentration and mass concentration were maintained stably. The error ranges in the daily average value of the particle size less than 100 nm were 5.89 to 10.63% and 5.14 to 12.35%, respectively, and the error ranges in the daily average value of the particle size of 100 nm or more were 1.82 to 2.90% and 10.9 to 1.22%, respectively. Intraday stability and daily reproducibility satisfied the OECD TG Test No. 412, 433, etc.

The geometric mean concentration measured by the filter weight method was 2.34 mg/m³, and the geometric mean concentration measured by SMPS at the same time was 1.65 mg/m³. The concentration measured by SMPS against the concentration of the filter weight method was 70.62%. Additionally, the concentration measured by ELPI relative to the concentration of the filter weight method was 47.91%.

The average value of TVOCs generated from multiple (six) 3D printer generator measured inside the nose-only exposed type inhalation chamber was 51.79 ppb, and when this value was converted to indoor air quality standard, it was 118.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which is corresponded to about the 30% level of the allowable standard.

Because of observing the particle size and shape with TEM, the particle size was various from several nm to several μm in aggregation. As for the shape of the particles, overlapping plate-shaped polygonal plates, elliptical shapes, feather shapes, and groups of beads were observed.

As a result of the above research, and interlocking system between the 3D printer multi-generating device and the nose-only exposed type inhalation chamber was established, and meaningful results were derived through experiments under various conditions. In addition, results were obtained that satisfied the standards of temperature, relative humidity, oxygen concentration, etc., which are environmental conditions of animal experiments.

In the future, research using laboratory animals as 3D printer generators will be promoted in earnest, and scientific basis data on 3D printing generating materials will be accumulated and used for legal regulation.

연구진

연구기관 : **산업안전보건연구원**

연구책임자 : 이성배 (연구위원, 흡입독성시험2부)

연구원 : 박승현 (센터장, 흡입독성연구센터)

연구원 : 최윤정 (차장, 흡입독성시험2부)

연구원 : 이상석 (대리, 흡입독성시험2부)

연구기간

2022. 01. 02. ~ 2022. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

3D 프린터에서 발생하는 ABS 나노물질의 흡입독성연구(I)
(2022-산업안전보건연구원-863)

발 행 일 : 2022년 11월 30일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 산업화학연구실 연구위원 이성배

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (34122) 대전시 유성구 엑스포로 339번길30

전 화 : 042-869-8513

팩 스 : 042-869-8693

Homepage : <http://www.kosha.or.kr/oshri>

I S B N : 979-11-92782-60-7