

연구보고서

# 3D 프린터 사용자에 대한 초미세입자 노출평가

김성호 · 정은교 · 김세동

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원





## 요 약 문

### 연구기간

2018년 1월 ~ 2018년 11월

### 핵심 단어

3D 프린터, 초미세입자, 노출평가

### 연구과제명

3D 프린터 사용자에게 대한 초미세입자 노출평가

### 1. 연구배경

- 3D 프린팅 산업은 기기산업, 항공우주 산업, 자동차 산업 등 여러 분야에 활용되고 있으며, 사용자 또한 증가하고 있음
- 3D 프린터 작동 시 초미세입자, 유기화합물 등이 발생하며, 초미세입자는 호흡기계에 침착되어 천식 등의 질환이 발병할 수 있으며, 초미세입자는 비산되어 폐 뿐만 아니라 피부, 신경 및 뇌까지 침착 되어 건강상의 문제를 일으킬 가능성이 있다고 보고됨
- 3D 프린터 작동 시 발생하는 인자에 대한 연구는 챔버 및 실험실 세팅 연구로만 수행되었고, 사용자에게 대한 노출평가는 국내에는 없었음
- 본 연구에서는 최초로 3D 프린터 취급 사용자에게 대한 초미세입자 노출농도 수준을 파악하고, 작업환경을 개선하기 위한 기초자료로 활용하고자 함

### 2. 주요 연구내용

- 3D 프린팅 작업 시 발생하는 주입자의 크기는 대체적으로 100 nm보다 작은 비의도적 나노입자이고, 저가형 FDM-3D 프린팅 작업 시 발생하는 주입자의 크기가 가장 작았음
- 저가형 FDM-3D 프린팅 예열 작업 시 입자수농도와 표면적농도가 급격

하게 증가하였고, 프린팅 노즐을 수리할 때에도 높은 입자수농도와 표면적농도를 보였음

- 산업용 FDM-3D 프린터의 경우, 예열 작업 및 작업 중 입자수농도와 표면적농도는 낮은 수준이었으며, 작업 중의 특이한 농도 변화는 없었으나, 미세하게 13.3~17.8 nm의 입자수농도가 증가하는 경향을 보였음
- 입자수농도와 표면적농도간의 높은 상관관계를 보였고, 저가형 FDM-3D 프린팅 작업장의 입자수농도와 표면적농도가 다른 3D 프린팅 작업장에 비해 높았음
- 작업 중 농도와 배경농도를 비교했을 때는 대체적으로 작업 중 농도가 배경농도에 비해 높았으나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않음
- TEM 시편 분석 결과 대부분의 3D 프린팅 작업장에서 입자가 서로 뭉쳐 있는 이미지를 관찰하였고, 프린터 내부, 실내 및 복도에서 측정된 시편의 이미지가 서로 유사함
- EDS 성분 분석 결과 대부분의 입자는 탄소를 중심으로 다양한 원소(산소, 실리카 등)가 서로 다른 비율로 구성됨
- 유기화합물(이소프로필알콜, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 등) 및 금속(나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철 등)이 미량으로 검출되었음
- 저가형 FDM-3D 프린터의 경우, 예열 작업과 노즐의 문제가 발생하는 상황에서 높은 입자수농도와 표면적농도를 보이므로 국소배기장치(공학적)를 설치하거나, 덮개가 달린 3D 프린터를 구입(대체)하거나, 작업 부스를 설치(격리)하는 등 근로자의 노출을 최소화 할 필요성이 있다고 판단되며, 위의 모든 관리방안이 어려울 경우에는 최소한 호흡보호구를 제공하여 위와 같은 작업 시에는 착용할 것을 권장함
- 3D 프린팅 사업장에서 유기화합물 및 금속 성분이 검출되었으나, 제조사에서 제공하는 MSDS 문서에는 구체적인 성분이 표기되어 있지 않음. 향후 3D 프린팅 소재에 대한 분석연구가 필요할 것을 사료됨

### 3. 연구 활용방안

- 3D 프린팅 사업장의 작업환경을 관리하기 위한 기초자료로 사용함
- 3D 프린터 취급 근로자의 건강보호를 위한 기초자료로 사용함

### 4. 연락처

- 산업안전보건연구원 직업환경연구실 김성호
- ☎ 052) 703. 0914
- E-mail [sungho.kim@kosha.or.kr](mailto:sungho.kim@kosha.or.kr)





# 차례

I. 서론 .....	1
1. 연구배경 .....	1
2. 연구목적 .....	2
II. 연구방법 .....	3
1. 문헌고찰 .....	3
2. 3D 프린터 사업장 측정평가 .....	3
3. 통계 분석 .....	15
III. 문헌고찰 .....	16
1. 3D 프린터 개요 .....	16
2. 3D 프린터 관련 국내·외 연구 문헌고찰 .....	34
IV. 연구결과 .....	44
1. 3D 프린팅 사업장 A 노출평가 .....	44
2. 3D 프린팅 사업장 B 노출평가 .....	59
3. 3D 프린팅 사업장 C 노출평가 .....	81
4. 3D 프린팅 사업장 D 노출평가 .....	104
V. 고찰 .....	128
VI. 결론 .....	140
VII. 참고문헌 .....	142
Abstract .....	146

## 표 차 례

<표 II-1> 평가대상 3D 프린팅 사업장 .....	4
<표 II-2> 연구에 사용 된 초미세입자 측정기기 .....	9
<표 II-3> 연구에 사용 된 초미세입자 분석장비의 특성 .....	12
<표 III-1> 제조공법별 3D 프린팅 기술 분류 .....	23
<표 III-2> 3D 프린팅을 활용한 산업 분류 .....	28
<표 III-3> 국가별 3D 프린터 활용률 .....	30
<표 III-4> 국내 3D 프린팅 주요 업체 현황 .....	31
<표 III-5> 기술방식별 3D 프린팅 장비 비교(단위: %) .....	33
<표 III-6> 국내 문헌 고찰 .....	34
<표 III-7> 국외 문헌 고찰 .....	36
<표 IV-1> 사업장 A의 FDM 운영조건 .....	46
<표 IV-2> 사업장 A의 FDM 프린터 사양 .....	47
<표 IV-3> 사업장 A의 작업시간 기록 .....	48
<표 IV-4> 사업장 A의 입자수농도와 표면적농도 .....	51
<표 IV-5> 사업장 A의 측정기기간의 상관관계 분석 .....	52
<표 IV-6> 사업장 A의 TEM 이미지 .....	54
<표 IV-7> 사업장 A의 EDS 분석 결과(중량비, %) .....	55
<표 IV-8> 사업장 A의 유기화합물 분석결과 .....	56
<표 IV-9> 사업장 A의 금속 분석결과 .....	57
<표 IV-10> 사업장 A의 기타인자 농도 .....	58
<표 IV-11> 사업장 B의 FDM 운영조건 .....	60

<표 IV-12> 사업장 B의 FDM 프린터 사양 .....	61
<표 IV-13> 사업장 B의 Metal-3D 프린터 사양 .....	62
<표 IV-14> 사업장 B의 작업시간 기록 .....	63
<표 IV-15> 사업장 B, FDM의 입자수농도와 표면적농도 .....	66
<표 IV-16> 사업장 B의 측정기기간의 상관관계 분석 .....	67
<표 IV-17> 사업장 B, Metal-3D 프린터의 입자수농도와 표면적농도 .....	69
<표 IV-18> 사업장 B, FDM의 TEM 이미지 .....	71
<표 IV-19> 사업장 B, FDM의 EDS 분석 결과(중량비, %) .....	72
<표 IV-20> 사업장 B, Metal-3D 프린터의 EDS 분석 결과(중량비, %) ..	72
<표 IV-21> 사업장 B, Metal-3D 프린터의 TEM 이미지 .....	74
<표 IV-22> 사업장 B, FDM의 유기화합물 분석결과 .....	76
<표 IV-23> 사업장 B, Metal-3D 프린터의 유기화합물 분석결과 .....	77
<표 IV-24> 사업장 B, FDM의 금속 분석결과 .....	78
<표 IV-25> 사업장 B, Metal-3D 프린터의 금속 분석결과 .....	79
<표 IV-26> 사업장 B의 기타인자 농도 .....	80
<표 IV-27> 사업장 C, 연구소의 FDM 운영조건 .....	82
<표 IV-28> 사업장 C의 작업시간 기록 .....	82
<표 IV-29> 사업장 C, 연구소의 FDM 프린터 사양 .....	83
<표 IV-30> 사업장 C, 연구소의 FDM 운영조건 .....	86
<표 IV-31> 사업장 C, LAb의 FDM 프린터 사양 .....	87
<표 IV-32> 사업장 C의 작업시간 기록 .....	88
<표 IV-33> 사업장 C, 연구소의 입자수농도와 표면적농도 .....	90
<표 IV-34> 사업장 C, 연구소의 측정기기간의 상관관계 분석 .....	91
<표 IV-35> 사업장 C, LAb의 입자수농도와 표면적농도 .....	93
<표 IV-36> 사업장 C, Lab의 측정기기간의 상관관계 분석 .....	94
<표 IV-37> 사업장 C, 연구소의 TEM 이미지 .....	96

<표 IV-38> 사업장 C, 연구소의 EDS 분석 결과(중량비, %)	97
<표 IV-39> 사업장 C, Lab의 EDS 분석 결과(중량비, %)	97
<표 IV-40> 사업장 C, Lab의 TEM 이미지	98
<표 IV-41> 사업장 C, 연구소의 유기화합물 분석결과	100
<표 IV-42> 사업장 C, Lab의 유기화합물 분석결과	101
<표 IV-43> 사업장 C의 금속 분석결과	102
<표 IV-44> 사업장 C의 기타 인자 농도	103
<표 IV-45> 사업장 D의 DLP, (3D)잉크젯 프린터 특징	105
<표 IV-46> 사업장 D의 FDM 프린터 특징	106
<표 IV-47> 사업장 D의 SLA 프린터 특징	106
<표 IV-48> 사업장 D의 Polyjet 프린터 특징	107
<표 IV-49> 사업장 D의 작업시간 기록	108
<표 IV-50> 사업장 D, 작업장 1의 입자수농도와 표면적농도	111
<표 IV-51> 사업장 D, 작업장 1의 후처리 작업시의 입자수농도와 표면적농도	112
<표 IV-52> 사업장 D, 작업장 1의 측정기기간의 상관관계 분석	113
<표 IV-53> 사업장 D, 작업장 2의 입자수농도와 표면적농도	114
<표 IV-54> 사업장 D, 작업장 2의 측정기기간의 상관관계 분석	115
<표 IV-55> 사업장 D, 작업장 3의 입자수농도와 표면적농도	116
<표 IV-56> 사업장 D, 작업장 3의 측정기기간의 상관관계 분석	117
<표 IV-57> 사업장 D, 작업장 4의 입자수농도와 표면적농도	119
<표 IV-58> 사업장 D, 작업장 4의 측정기기간의 상관관계 분석	120
<표 IV-59> 사업장 D의 TEM 이미지	122
<표 IV-60> 사업장 D의 EDS 분석 결과(중량비, %)	123
<표 IV-61> 사업장 D의 유기화합물 분석결과	125
<표 IV-62> 사업장 D의 금속 분석결과	126

<표 IV-63> 사업장 D의 기타 인자 농도 .....	127
<표 V-1> 사업장별 작동 중 입자수 및 표면적농도 비교 .....	133
<표 V-2> FDM-3D 프린터 소재별 유기화합물 구성성분 .....	139

## 그림 차례

[그림 II-1] 입자수농도 측정기기(나노스켄) 측정원리 .....	5
[그림 II-2] 입자수농도 측정기기(APS) 측정원리 .....	6
[그림 II-3] 입자수농도 측정기기(OPC) 측정원리 .....	7
[그림 II-4] 표면적농도 측정기기(NSAM) 측정원리 .....	8
[그림 III-1] 전 세계 3D 프린팅 산업의 국가별 비중 .....	27
[그림 III-2] 3D 프린팅을 활용한 산업 분포 .....	29
[그림 IV-1] 사업장 A의 사진 .....	44
[그림 IV-2] 사업장 A의 작업환경측정 사진 .....	48
[그림 IV-3] 사업장 A의 모식도 .....	49
[그림 IV-4] 사업장 A의 입자크기분포 .....	50
[그림 IV-5] 사업장 A의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	52
[그림 IV-6] 사업장 B의 작업환경측정 사진 .....	59
[그림 IV-7] 사업장 B의 모식도 .....	64
[그림 IV-8] 사업장 B, FDM 작업장의 입자크기분포 .....	66
[그림 IV-9] 사업장 B, FDM 작업장의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	66
[그림 IV-10] 사업장 B, Metal-3D 프린팅 작업장의 입자크기분포 .....	68
[그림 IV-11] 사업장 B, Metal-3D 프린팅 작업장의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	69
[그림 IV-12] 사업장 C의 사진 .....	81
[그림 IV-13] 사업장 C의 작업환경측정 사진 .....	84
[그림 IV-14] 사업장 C, 연구소 모식도 .....	85

---

[그림 IV-15] 사업장 C, 3D Printing Lab 모식도 .....	88
[그림 IV-16] 사업장 C, 연구소의 입자크기분포 .....	89
[그림 IV-17] 사업장 C, 연구소의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	91
[그림 IV-18] 사업장 C, Lab의 입자크기분포 .....	92
[그림 IV-19] 사업장 C, Lab의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	94
[그림 IV-20] 사업장 D의 모식도 .....	109
[그림 IV-21] 사업장 D, 작업장 1의 입자크기분포 .....	110
[그림 IV-22] 사업장 D, 작업장 1의 후처리 시의 입자크기분포 .....	111
[그림 IV-23] 사업장 D, 작업장 1의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	113
[그림 IV-24] 사업장 D, 작업장 2의 입자크기분포 .....	114
[그림 IV-25] 사업장 D, 작업장 2의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	115
[그림 IV-26] 사업장 D, 작업장 3의 입자크기분포 .....	116
[그림 IV-27] 사업장 D, 작업장 3의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	117
[그림 IV-28] 사업장 D, 작업장 4의 입자크기분포 .....	118
[그림 IV-29] 사업장 D, 작업장 4의 시간별 입자수농도와 표면적농도 .....	120



# I. 서론

## 1. 연구배경

3D 프린팅의 기본 기술은 적층(AM: Additive Manufacturing)하는 방식이다. 1980년대 적층기술을 이용하여 최초의 3D 프린팅 기기를 만들었고, 2009년도에는 미국재료학회(ASTM: American Society for Testing and Materials) F42 위원회에서 적층생산기술의 표준을 정립하였다. 최근에 3D 프린팅 기술이 4차 산업과 맞물리면서 크게 부상하게 되었고, 다양한 분야에서 이 기술을 활용하여 성과를 내고 있다. 2011년도에는 적층생산기술 중 재료압출(material extrusion)방식의 하나인 FDM(Fused deposition modeling) 기술의 특허권이 만료되면서 오픈소스(open-source)를 활용한 저가형 3D 프린터가 시장에 많이 보급되었고, 학교나 교육시설 등에서 누구나 쉽게 3D 프린터를 접할 수 있게 되었다. FDM-3D 프린터는 열가소성 수지를 열로 녹여서 적층판에 출력물을 한층 씩 쌓는 방식이다. 이 작업 중에 수지가 열에 녹으면서 초미세입자가 발생하며, 유기화합물 등 다양한 유해물질이 발생하여 사용자에게 대한 건강상의 문제를 일으킬 가능성이 있다고 한다. 최근 3D 프린팅 작업 시 발생하는 인자 및 특성을 파악하기 위한 챔버실험 연구가 진행되었고, 다양한 변수(노즐 온도, 소재 등)를 적용하여 3D 프린팅 작업 시에 발생하는 인자의 농도수준을 파악하였다. 그 중 가장 우려 되는 물질은 나노입자(100nm이하)가 비의도적으로 발생한다는 것이고, 유기화합물 등 다양한 유해물질도 발생한다. 챔버실험 연구에서 나온 농도수준은 실제 사업장과 비교하기에는 무리가 있으므로 실제 사업장을 대상으로 하는 연구가 필요한 실정이다. 그리고 실제 사업장의 측정 농도를 바탕으로 관리방안을 모색하여 3D 프린팅 취급 근로자의 건강을 보호하고자 한다.

## 2. 연구목적

본 연구는 실제 3D 프린팅 사업장을 대상으로 초미세입자, 유기화합물, 금속, 기타물질의 농도수준을 파악하는데 그 목적이 있다. 다음과 같은 물질을 주대상으로 연구를 수행하였다.

- 1) 초미세입자 농도
  - 입자수농도(개/cm<sup>3</sup>)
  - 표면적농도( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )
- 2) 입자의 형태, 구성성분
  - Cu 코팅 TEM 시편(grid) 시료채취기
  - 투과전자현미경-분광기(TEM-EDS) 분석
    - ※ TEM은 입자 형태, EDS는 구성성분
- 3) 유기화합물질
  - Tenax TA + 펌프 시료채취
  - TD/GC-MS로 분석
  - TVOC 직독식 측정기기
- 4) 금속
  - MCE 필터 + 펌프 시료채취
  - ICP-MS로 분석
- 5) 기타물질
  - H<sub>2</sub>S, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>,
  - 온도, 상대습도

## II. 연구방법

### 1. 문헌고찰

국내에 3D 프린터 관련 보고서 및 Wohlers Roprt 2018 보고서를 참고로 하여 3D 프린터의 전반적인 내용을 고찰하였다. 먼저 1960년대부터 현재까지의 3D 프린터의 변화 과정을 서술하고, 3D 프린터 기술에 대해서 세부적으로 기술하였다. 소재의 종류, 3D 프린터 산업, 국내 3D 프린팅 산업현황 및 시장동향 순으로 기술하였다.

### 2. 3D 프린터 사업장 측정평가

#### 1) 대상 사업장

대상은 FDM-3D 프린팅 사업을 중심으로 하였으며, 그 농도 수준을 비교하기 위해서 다양한 3D 프린터를 보유한 사업장을 선정하였다. 대상 사업장 선정은 3D프린팅연구조합의 회원사의 협조를 통해서 자발적으로 참여한 4개소의 사업장을 대상으로 2018년 5월부터 9월 사이에 해당 3D 프린팅 사업장을 방문하여 측정하였으며 사업장의 특성상 제조공법에 따라 작업장이 분류되어 있었다<표 II-1>. 재료압출 방식은 5개소, 광중합 방식은 1개소, 재료분사 방식은 1개소, 분말소결 방식은 2개소, 광중합+접착제분사 방식은 1개소로 총 10개 작업장이었다. 이중 사업장 D의 분말소결 방식의 작업장은 작업이 없는 관계로 측정이 이루어지지 않아 총 4개 사업장에서 총 9개 작업장에 대해 평가를 실시하였다.

**<표 II-1> 평가대상 3D 프린팅 사업장**

사업장	소재지	제조공법	세부	소재*
사업장 A	창원시	재료압출	FDM	PLA
사업장 B	창원시	재료압출	FDM	ABS
	창원시	분말소결	Metal	알루미늄 분말
사업장 C	부산시	재료압출	FDM	PLA
	부산시	재료압출	FDM	PLA
사업장 D	관교시	광중합	DLP	ABS Like
		접착제분사	잉크젯	석고 분말
		재료압출	산업용 FDM	ABS
		광중합	SLA	PP Like
		재료분사	폴리젯	아크릴성 ABS
		분말소결	SLS	-

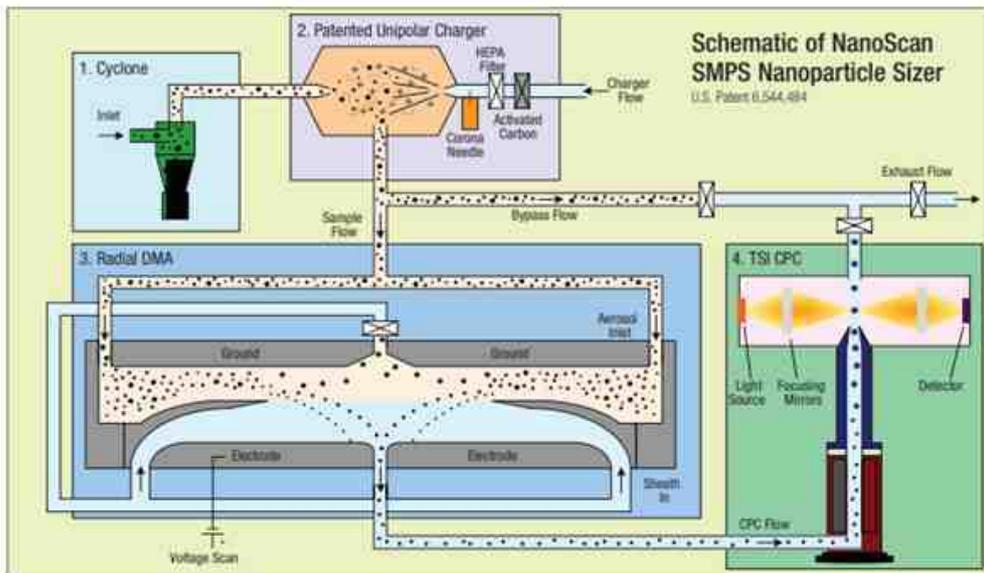
\* PLA: Polylactic acid, ABS: Acrylonitrile butadiene styrene, PP: Polypropylene

## 2) 시료채취 및 분석방법

### (1) 입자수농도, 표면적농도

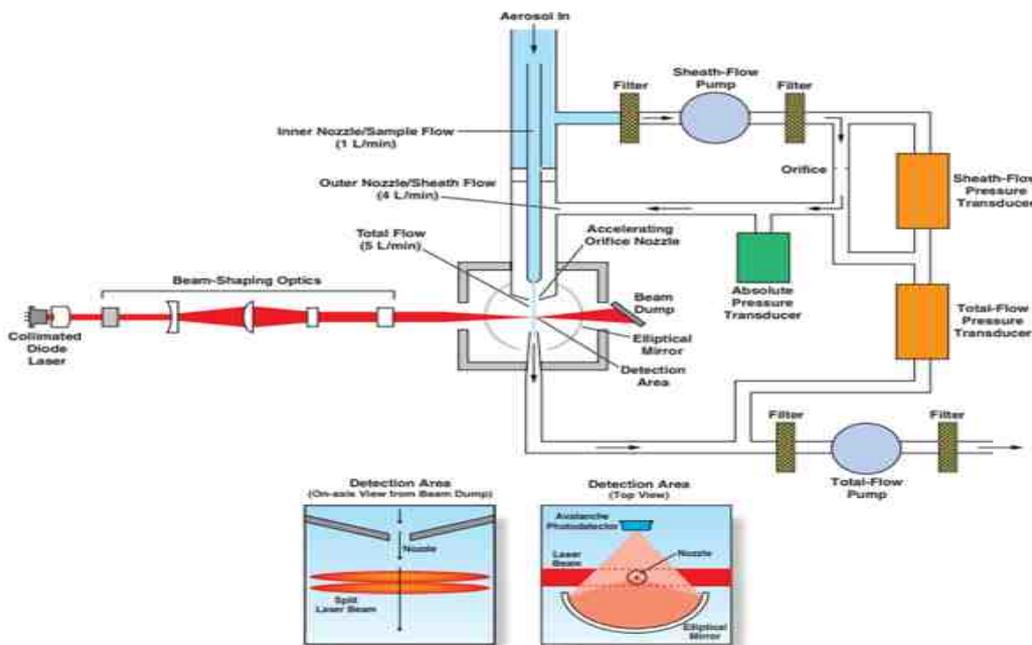
전통적으로 분진(Dust)의 측정 방법은 펌프에 필터를 부착하여 측정하는 방식이지만 초미세입자의 경우에는 직독식 측정기기를 주로 사용한다. 나노입자를 측정하기 위해서 Nanoscan nanoparticle sizer(TSI, Model 3910) (이하 나노

스캔) 측정기기를 사용하였다. 나노스캔의 측정가능한 입자의 범위는 10~420 nm이며, 입자의 전하량을 전기적 이동도로 분석하여 나노 크기 입자의 분포를 측정하는 기기이다. 장비는 사이클론, 입자 하전 장치(Patented Unipolar Charger), 전기적 이동도 분석 장치(RDMA; Radial Differential Mobility Analyzer), 응축형 입자 계수 장치(CPC; Condensation Particle Counter)로 구성된다. 입자가 장비의 Inlet을 통해 유입되면 1차적으로 사이클론을 통해 550 nm 이상의 입자가 걸러지게 된다. HEPA Filter를 거친 깨끗한 공기가 코로나 장치(Corona Needle)를 거치며 양성의 단극 이온으로 변화하고, 싸이클론을 통과한 입자들이 일정한 전하 상태를 유지하게 된다. RDMA 하단의 Electrode에서는 음전하를 띄며 자기장을 형성하게 되는데, 양성 단극을 띄고 있는 입자들은 Electrode의 자기장을 따라 이동하며 스토크스 법칙(Stoke's law)에 의해 전기적 이동도를 계산하게 된다. 이후 입자들은 CPC로 이동하여 검출기에서 계수 된다[그림 II-1].

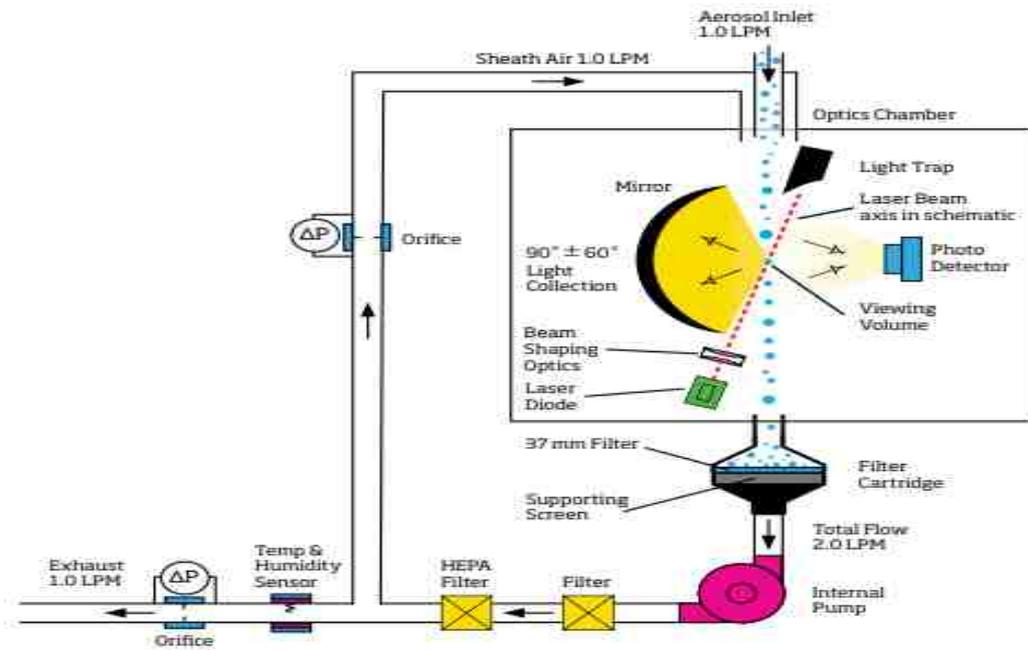


[그림 II-1] 입자수농도 측정기기(나노스캔) 측정원리

나노입자는 공기 중에서 반 데르 발스 힘(van der Waals force)에 의해서 서로 응집(agglomerate), 집합체(aggregate), 융합(coalescence)하게 되어 실제로 발생한 입자보다 더 큰 입자가 될 수 있다. 나노스캔이 측정할 수 없는 범위의 입자를 측정하기 위하여 Aerodynamic Particle sizer spectrometer (TSI, Model 3321) (이하 APS) 또는 Optical particle sizer spectrometer (TSI, Model 3330) (이하 OPC)를 사용하였다. APS의 측정가능한 입자의 범위는 370~20,000nm이며, 입자의 운동학적 특성을 이용하여 Time of Flight 방식으로 공기동역학적 직경에 대한 입자의 입경분포를 측정하는 원리이다[그림 II-2]. OPS의 측정 가능한 입자 범위는 300~10,000 nm이며, APS와 유사한 입자 크기 분포를 측정한다. 광산란 방식으로, 입자가 검출기를 통과할 때 빛이 반사되는 각도에 따라 입자 크기를 구분하여 계수하는 방식이다[그림 II-3].

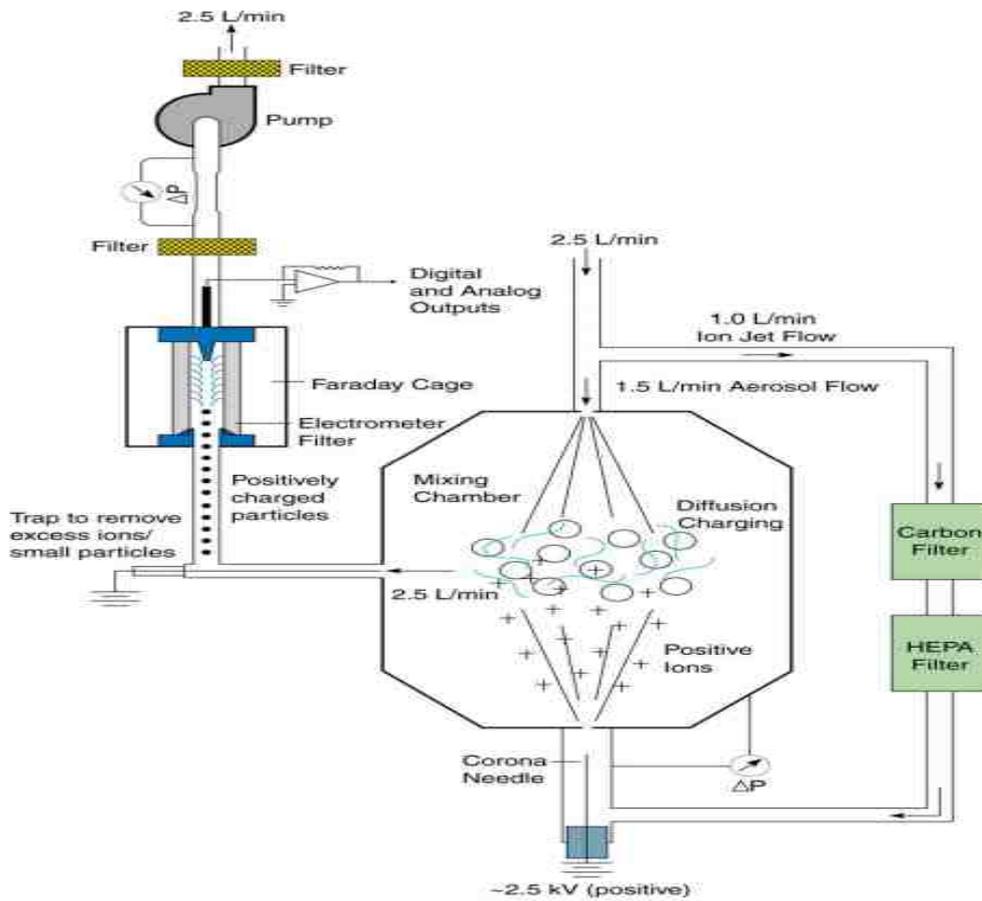


[그림 II-2] 입자수농도 측정기기(APS) 측정원리



[그림 II-3] 입자수농도 측정기기(OPC) 측정원리

나노입자는 그 입자의 크기가 작아서 폐포까지 침착될 수 있기 때문에 폐포에 침착된 나노입자의 표면적을 측정하기 위하여 Nanoparticle surface area monitor (TSI, Model 3550) (이하 NSAM)를 사용하였다. NSAM의 측정 가능한 입자 범위는 10~10,000 nm이며, 폐의 기관지(TB) 및 폐포(A)에 증착하는 입자의 표면적을 측정한다. 입자의 확산을 기반으로 전위계를 사용하여 대전된 입자의 크기를 측정하는 원리이다[그림 II-4].



**[그림 II-4 ] 표면적농도 측정기기(NSAM) 측정원리**

배경농도는 별도의 사무실에서 측정하는 것을 원칙으로 하였지만, 상황에 따라 작업시작 전 또는 후에 측정하되 작업의 영향이 최대한 없는 시간 때에 측정하여, 작업 중 초미세입자 농도와 비교하였다.

<표 II-2> 연구에 사용 된 초미세입자 측정기기

측정기기 (제조사,모델)	기기특성
 <p>Nanoscan Nanoparticle Sizer (TSI, Model 3910)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 입자범위: 10~420 nm (13 채널)</li> <li>■ 측정시간: 60초 (평균)</li> <li>■ 농도범위: <math>10^2 \sim 10^6</math> particle/cm<sup>3</sup></li> <li>■ 유량: 내부 - 0.75 L/min 외부 - 0.25 L/min</li> <li>■ 응축 용액: 이소프로필 알코올</li> <li>■ 원리: 입자의 전하량을 이용하여 전기이동도 분석을 통한 나노입자의 분포 측정</li> </ul>
 <p>Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer (TSI, Model 3321)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 입자범위: 0.37~20 <math>\mu</math>m (52 채널)</li> <li>■ 유량: 내부 - 1.00 L/min 외부 - 4.00 L/min</li> <li>■ 원리: 입자의 운동학적 특성을 이용하여 Time of flight 방식으로 공기동역학적 직경에 대한 입자의 분포 측정</li> </ul>
 <p>Optical particle sizer spectrometer (TSI, Model 3330)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 센서타입: 광산란법</li> <li>■ 입자범위: 0.3~10 <math>\mu</math>m</li> <li>■ 농도범위: 3,000 개/cm<sup>3</sup></li> <li>■ 최저분해능: 0.001 mg/m<sup>3</sup></li> <li>■ 유량: 0~1.8 L/min</li> <li>■ 원리: 광 산란 방식으로 입자가 빛에 반사되는 각도에 따라 입자의 크기를 구분하여 계수하는 방식</li> </ul>



Nanoparticle Surface  
Area Monitor  
(TSI, Model 3550)

- 입자범위: 10~1,000 nm
- 농도범위: 0~10,000  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$
- 모드: 기관지(TB)/폐포(A) 선택
- 원리: 입자의 전하량을 이용하여 입자의 크기를 분리하여 측정

## (2) 초미세입자 형태 및 구성성분

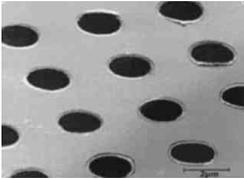
매체는 구리코팅 된 시편(TED PELLA. INC, 657-200-Cu)를 사용하였고, 200mesh에 균일한 홀(직경 2 $\mu\text{m}$ )이 있는 Quantifoil형의 시편을 사용하였다. 시료채취기는 Mini particle sampler (MSP, INERIS, France) (이하 MPS)이며, 시편을 장착한 후 0.3~1.5 L/min의 포집 유량으로 작업 상황에 따라 5~10분간, 거리에 따라 측정하였다. 분석은 투과전자현미경 (TEM: Transmission Electron Microscope, JEOL 2100) (이하 TEM)에 부착 기기인 분광기(EDS: Energy Dispersive Spectrometer) (이하 EDS)가 부착된 장비로 하였다.

TEM-EDS 분석은 시편에 고전압으로 가속된 전자빔을 집속 샘플에 투과시켜 영상 또는 회절패턴을 얻어 시료의 형태, 구조적인 정보를 얻고, EDS로 화학적인 구성을 얻는 것이다. TEM 분석 절차로는 분석 가능한 기준 진공까지 유지 후 고압(high voltage)을 인가한다. 그 후 광축에 나란한 빔정렬을 위한 조사계 alignment의 조건은 배율 40만배, spot1, alpha 3을 맞춘 다음 standard focus button을 눌러 빔정렬 작업을 진행한다. 이후 이미지 alignment의 lens deflector pivot point 조정을 위한 balance (tile&shift, HT Wobbler) 조정 후 적정한 이미지 contrast를 향상시키기 위해 OL Apertrue 넣은 후 이미지를 촬영을 하게 된다. 이 때 적절한 배율로 최소 4 field를 분석하여 뭉쳐진 입자의 이미지를 관찰하였고, 최대 10 field를 분석하여도 뭉쳐진 이미지가 없을 경우에는 검출되지 않은 것으로 판단하였다.

EDS 분석은 먼저 TEM에서 보고자 하는 이미지를 형관관 중심으로 이동한

다. 그 후 CL & OL aperture를 개방하여 camera length 20cm, 또는 40cm와 BF Detector를 개방한다. 관찰배율은 1~2만배 이상으로 하고 배율이 너무 낮으면 이미지를 관찰 할 수 없다. 그 다음 CL & OL aperture를 조절 후 Detector를 넣은 후, 이미지를 스캐닝한다. 이 때 적당한 시료 위치, 배율 선택 후 포커싱한다. 스캔 된 이미지를 EDS 분석으로 넘어오는데, 사용하는 소프트웨어는 INCA(Ver 1.1, OXFORD Instrument)이다. 먼저 EDS 검출기를 넣은 후 quant optimization으로 input rate와 output rate가 나오는데 2-3kcps 정도가 되게 probe current나 spot size를 조정한다. acquire spectra에서 process time 5, spectrum range 20 keV, number of channels 2k으로 설정하고 분석시간은 Live time으로 100초로 설정한다. 그 다음 site of interest에서 스캔된 이미지를 가지고 오고, 분석할 부분을 범위 또는 점으로 설정하여 그 부분의 성분을 분석한다. 분석은 시료당 3곳의 성분을 분석하였고, 3 곳의 지점에서 모두 검출된 원소만으로 성분을 구성하여 평균 성분비를 구성하였다. 이 때 1.0% 미만인 원소는 <1.0%로 표기하였다.

**<표 II-3> 연구에 사용된 초미세입자 분석장비의 특성**

측정기기 (제조사,모델)	기기특성
 <p>MPS (INERIS, France)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 측정 가능 입자범위: 1 nm ~ 1 <math>\mu</math>m</li> <li>■ 크기: 11 cm</li> <li>■ 적정유량: 0.3 ~ 1.5 L/min</li> <li>■ 측정 시편: Cu 코팅-TEM 시편 (전체 직경 3 mm)</li> </ul>
 <p>Cu-TEM 시편 (PELLA, USA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 홀 직경: 2 <math>\mu</math>m</li> <li>■ 200 mesh</li> <li>■ 균일한 홀</li> <li>■ 구리 코팅</li> </ul>
 <p>TEM-EDS (JEOL 2100, Japan)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 전자매질: 진공</li> <li>■ 렌즈: 전자기 렌즈</li> <li>■ 분해능: 점분해능 3.5 Å 격자분해능: 1.4 Å</li> <li>■ 사용배율: 100배 ~ 450,000배 (연속적으로 변화)</li> <li>■ 초점조절: 전기적</li> <li>■ 콘트라스트기구: 산란, 흡수, 회절, 위상차</li> </ul>

(3) 유기화합물 측정 및 분석

유기화합물 측정매체로는 Tanax TA 튜브를 사용하였다. Tanax TA 튜브는 영구적으로 사용하는 튜브이며, TAG Tube Conditioner(Markers, USA)로 사용 전 300°C에서 질소 가스를 3시간 정도 흘려서 세척한 후 사용한다. 세척이 끝나면 임의로 1~2개 튜브를 TD-GC/MS로 분석하여 잔여물질 여부 확인 후

사용하였다. 튜브를 펌프(GSA 350, Germany)에 부착하여 0.025 L/min의 포집 유량으로 시료를 포집하였다. 펌프는 측정 전, 후에 유량보정기(Dry cal, Defender 520-L, MesaLabs, USA)로 각각 보정한 다음 평균유량을 사용하였다. 시료채취는 근로자의 호흡기위치, 작업장 실내, 사무실(분리되어 있을 경우)에서 각각 하였다. 시료채취 후 튜브의 앞, 뒤를 마개를 막고, 현장 공시료도 1~2개 동일한 방법으로 마개를 막은 후, 분석 전까지 냉장고(5°C)에서 보관하였다.

활성탄과 달리 Tanax TA 튜브는 별도의 전처리 과정이 없다. 튜브를 TD 오토샘플러에 연결한 넣은 후, 튜브에 포집된 유기화합물을 1차, 2차에 걸쳐서 탈착시킨다. 1차 탈착 시 유량은 30 ml/min, 온도는 150°C이며, 50:1로 설정하였다. 2차 탈착 시 유량은 50 ml/min, 온도는 280°C, split ratio는 50:1로 설정하였다. TD에서 튜브탈착이 끝나면 자동으로 GC-MS(Agilent, 5977B, USA)의 컬럼으로 포집된 유기화합물이 이동하여 분석하게 된다. 이번 분석에 DB 컬럼(Agilent, DB-624, 60 m x 250  $\mu$ m x 1.4  $\mu$ m, USA)을 사용하였고, 오븐의 온도는 40°C, 승온하는 방식으로 분석시간은 44분으로 설정하였다. 농도계산은 유기화합물의 농도를 공시료를 뺀 후, 채취 공기량으로 나누고, 분자량과 24.45 L(25°C, 1기압)로 ppb로 단위 환산하였다.

그리고 유기화합물의 시간에 따른 TVOC 농도수준을 파악하기 위해서 직독식 측정기기인 MultiPro(RAE System, USA)를 사용하여 측정하였다.

#### (4) 금속 측정 및 분석

금속 시료채취기는 막여과지(직경: 37 mm, 공극: 0.8  $\mu$ m, cellulose ester membrane)와 패드(backup pad)가 장착된 3단 카세트를 사용하였다. 시료채취용 펌프(GSA 520, Germany)의 포집유량은 2.0 L/min로 하였다. 펌프는 측정 전, 후에 유량보정기(Dry cal, Defender 520-L, MesaLabs, USA)로 각각 보정한 다음 평균유량을 사용하였다. 시료채취는 근로자의 호흡기위치, 작업장 실내

에서 각각 하였다. 시료채취 후 카세트의 앞, 뒤를 마개를 막고, 현장 공시료도 1~2개 동일한 방법으로 마개를 막은 후, 분석 전까지 냉장고(5℃)에서 보관하였다.

전처리는 마이크로웨이브(Microwave) 회화기를 사용하였다. 회화용액으로는 진한질산을 사용하였고 희석용액은 회화용액을 5% 농도로 희석하여 사용하였다. 먼저 시료채취기로부터 막여과지를 핀셋 등을 이용하여 들어낸 후, 베셀(vessel)에 옮겨 담은 후, 회화용액 1 ml을 넣은 후 베셀의 뚜껑을 닫고 운전조건을 설정하여 회화하였다. 마이크로웨이브의 작동이 멈추면 베셀이 식을 때까지 기다린 후, 베셀의 뚜껑을 조심스럽게 연 후 20ml 용량 플라스크에 담음 후 초순수를 가해 최종 용량이 20 ml이 되도록 하였다.

분석은 유도결합플라즈마 질량분석기, ICP-MS (DE/iCAP Qc, Thermo fisher scientific, USA)를 사용하였다. 알콘 가스의 압력은 6 bar이고, 헬륨과 수소 가스의 압력은 1 bar, 칠러의 온도는 20℃ 설정한 후 플라즈마를 켜다. 플라즈마는 켜 후 15분 정도 예열한 후 분석하였다. 시료 분석 전 Tune B solution으로 자동 튜닝을 하여 분석이 가능한지 여부를 확인하였다. 이번 연구에 분석한 물질은 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 티타늄, 크롬, 망간, 철, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 지르코늄, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 주석, 철이다.

#### (5) 기타 인자

기타 인자로는 황화수소( $H_2S$ ), 일산화탄소( $NO$ ), 이산화질소( $NO_2$ ), 이황화황( $SO_2$ ), 일산화탄소( $CO$ ), 이산화탄소( $CO_2$ ), 온도, 상대습도를 측정하였다. 일산화탄소( $CO$ ), 이산화탄소( $CO_2$ ), 온도, 상대습도는 직독식 측정기기인 측정은 IAQ-Calculator(TSI, Model 7575, USA)를 사용하였고, 황화수소( $H_2S$ ), 일산화탄소( $NO$ ), 이산화질소( $NO_2$ ), 이황화황( $SO_2$ )은 직독식 측정기기인 MultiRae Pro(RAE Systems, USA)를 사용하였다.

### 3. 통계 분석

통계 분석 프로그램은 SPSS(18.0) 프로그램을 사용하였다. 3D 프린팅 작업 시 발생하는 입자수농도와 표면적농도의 평균과 배경농도의 입자수농도와 표면적농도의 평균을 비교하기 위해서 대응표본 t검정(Paired samples t-test)를 실시하였다. 작업장에 따른 평균 입자수농도와 표면적농도간의 차이를 비교하기 위해서도 대응표본 t검정을 실시하였다. 직독식 측정기기의 농도간의 관계를 확인하기 위해서 단순상관관계(simple correlation)분석을 실시하였고, Pearson 상관관계 계수를 구하였다. 그 밖에 기술통계분석은 엑셀(Excel 2013) 프로그램을 사용하였다.

### Ⅲ. 문헌고찰

#### 1. 3D 프린터 개요

##### 1) 3D 프린터의 역사

적층기술은 1960대부터 시작되었고, 적층기술을 사용하여 최초의 3D 프린터를 만들어 상용화한 때는 1980년대이며, 2000년대 오면서 4차 산업혁명과 FDM 방식의 적층기술의 특허권의 만료가 맞물리면서 3D 프린팅 기술에 대한 관심도가 높아졌다.

1892년 J.E. Blather는 종이를 하나씩 올려서 지도를 제작하는 기술을 고안하였고, 그 후 1972년 Matsubara는 미스비시 자동차에 근무하고 있을 당시에 감광성수지(Photopolymer)를 사용하여 제품을 한 층씩 쌓는 기술을 제안하였다. 1981년 Hideo Kodama (나고야시 공업연구소)는 최초로 3D 프린터를 시제품으로 출시하였다. 그 후 1984년 찰스 홀(Charles Hull)이 광고분자(photopolymer)의 적층기술을 개발하고, 3D Systems사를 설립 하였다. 그는 세계 최초의 SLA(stereo lithography apparatus) 방식의 3D프린터를 1987년에 판매하였다. SLA방식은 감광성 수지에 UV레이저를 비춰 광경화시키는 방법이다. 1988년에는 3D Systems와 Ciba-Geigy사는 합작으로 SLA-3D 프린터에 들어가는 소재를 개발하였다.

1990년대는 최초로 적층생산 관련 심포지엄(Solid Freeform Fabrication Symposium)이 미국에서 개최되었다. 1991년에는 경쟁사인 Stratasys사에서 FDM 방식을 세계 최초로 개발하였고, FDM 방식의 프린터를 생산하기 시작하였다. FDM 방식은 소재를 열로 녹여서 한층씩 적층하는 방식이다. 1992년 3D Systems사에서 SLA방식의 3D 프린터를 세계 최초로 생산하게 되었다. 같은해 1992년 DTM사에서는 SLS(Selective laser sintering) 방식의 3D 프린터를 생

산하기 시작했다. SLS방식의 기술은 1987년대에 연구되었고 1992년도에 최초로 상용화되었다. SLS 방식은 SLA 방식과 비슷하지만 액체를 소재를 사용하는 것이 아니라 분말을 사용한다는 데에서 차이점이 있다. 1994년에는 Arcam사에서 EBM(e-beam melting) 기술 방식으로 특허를 출원하였고, 고가의 금속품을 제작하는데 사용된다. 1998년에는 최초로 LENS(Laser engineered net shaping) 방식의 3D 프린터가 판매되었다. 이 LENS 기술은 고출력 레이저를 이용하여 분말을 녹인 후 접착제를 사용하여 제품을 제작하는 방식이다. 1999년에는 3D 프린터를 활용한 손상된 신체 기관을 복원하는 연구가 진행되었고, 웨이크 포레스트 재생의학 연구소에서는 세계 최초로 방광 확대술을 받은 환자에게 세포 합성을 한 최초의 사례도 있다. 최초의 적층방식의 3D 프린터가 개발된 이후에 1990년대까지 현재 사용하고 있는 3D 프린터 기술방식이 대부분 개발되었다.

2000년대 이후에는 3D 프린터를 이용하여 여러 제품을 제작하였고, 무엇보다 SLA, FDM등의 특허권이 만료되기 시작하면서 오픈소스를 활용하여 3D 프린터의 대중화를 이룩하였다. 2002년도에는 Siemens사와 Phonak사가 보청기를 제조하는 초기 사례이며, 같은 해인 2002년도에는 크기가 작은 콩팥까지 구현할 수 있게 되었다. 2005년에는 Andrian Bowyer 박사는 3D 프린터 관련 비영리 단체를 창설하여, 적은 비용으로 모든 사람이 3D 프린터를 사용할 수 있게 할 수 있는 프로젝트(RepRap)를 기획하였다. 그 후 2008년에는 의족, 무릎, 발, 기타 부위를 3D 프린터를 이용하여 생산 조립할 수 있게 되었다. 2009년도에는 적층생산 관련하여 미국재료시험협회에서 F42 위원회를 설립하여 적층생산 분야에 표준을 마련하게 되었다. 그리고 미국국립과학재단과 해군연구소에서 적층생산의 로드맵을 발표하였고, 2010년도에는 미국 해군에서 적층생산 관련 워크숍을 개최하였다. 2009년에는 Makerbot에서 오픈소스로 3D프린터를 출시하고, 이 제품의 가격은 759달러 정도로 저렴한 가격이었다. 2011년 코넬 대학에서는 음식을 만들 수 있는 3D프린터를 개발하였고, 사우스햄턴 대학에서는 3D

프린터를 사용하여 5천유로의 예산으로 7일 동안 무인 비행기를 만들었다. 그리고 Kor Ecologic사에서 3D 프린터로 차체를 제작한 자동차 Urbee를 만들었다. 만약 상업적으로 이 자동차를 출시하게 된다면 10,000~20,000달러 정도로 추정하며, 휘발유 리터당 42~84 Km를 주행할 수 있는 연비효율을 가질 수 있다. 2011년도에는 I.Materialise사에서 3D프린터를 사용하여 14K 금,은 귀금속을 제조할 수 있는 방식을 개발하였다. 영국 Southampton대학에서는 최초의 무인 드론을 3D 프린터 기술로 제작하였다. 2012년도에는 미국에서 3D 프린터의 제조기술을 연구하기 위해서 국립적층가공연구소(The National Additive Manufacturing Innovation Institute)를 설립하였고, 미국표준기술연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서는 금속 3D 프린터 기술 도전과제로 하는 워크숍을 개최하였다. 2014년도에는 중국 상해영창장식설계공정회사에서 3D프린터를 이용하여 만든 건축구조물을 가지고 200 m<sup>2</sup>크기의 집 10 채를 지었다. 그리고 노르웨이에서는 3D 프린터로 제작한 인공 뼈를 이식받는데 성공하기도 하였다.

## 2) 3D 프린터 기술

3D 프린터의 기술 및 재료에 대해서 전 세계적으로 그 용어를 달리하면서 같은 기술임에도 불구하고 다른 용어를 쓰는 경우가 있어서, 혼란이 가중되었다. 이에 2012년 1월 미국재료시험협회에서는 ASTM F42로 적층 생산기술의 표준화로 카테고리, 용어 등을 통일하고자 하였다. 그리고 국제표준기구(ISO: International Organization for Standardization)와 미국재료시험협회와 협업하여 ISO/ASTM 52900 표준을 개정하였다. 표준에 따라 7가지 분류로 나뉘며, 방식에 따라 재료압출(material extrusion), 재료분사(material jetting), 접착제 분사(binder jetting), 판재적층(sheet lamination), 광중합(Vat photopolymerization), 분말소결(powder bed fusion), 직접용착(directed energy deposition)으로 나뉜다<표 III-1>.

### (1) 재료압출(Material extrusion)

압출 노즐을 통해서 소재를 출력하여 CAD 프로그램에서 그린 형상을 따라 한층씩 적층하는 방식이다. 압출 노즐의 온도는 180~230℃ 등 소재에 따라 다양한 온도를 선택할 수 있고, 가열된 소재는 반액체 형태로 아래의 판에 적층한다. 압출 노즐은 x-, y-, z-축, 판은 z-축으로 움직이며, 소재 적층을 돕기 위해서 판을 40~100℃ 정도로 가열해 주는 장비도 있고 그 기능이 없는 장비도 있다. 소재는 열가소성 플라스틱 뿐만 아니라 점성이 있거나 슬러리(slurry) 형태로 존재하는 소재도 사용하며 세라믹, 복합재료, 음식 등 다양한 소재를 사용할 수 있다. 이 재료압출 방식에서 돌출부를 표현하기 위해서는 보조 구조(support structures)가 필요한데 이 보조 구조물은 제작이 완료된 후 손이나 기구로 제거할 수 있다. 다른 적층방식의 3D 프린터와 비교하며 재료압출 방식의 3D 프린터는 대체적으로 가격이 저렴하고, 사용자가 쉽게 설계하고, 생산하고, 운영할 수 있다. 전세계적으로 재료압출방식을 많이 사용하고 있고, 이 기술의 시초는 Stratasys사이며 1991년도에 소개되었다.

### (2) 재료분사(Material jetting)

재료분사 방식은 잉크젯 프린팅 방식과 유사하며, 3D 프린팅 헤드를 움직이면서 액상을 선택적으로 분사하는 방식이며 헤드를 각각 배치하여 한 번에 여러 개의 제품을 동시에 생산할 수 있다. 소재 (광경화성 수지, 왁스류 등)를 분사한 후 자외선(UV)으로 경화시키나, 모든 재료분사 방식의 3D 프린터가 자외선을 사용하는 것은 아니다. 재료분사 방식 역시 돌출부를 표현하기 위해서 보조 구조가 필요한데 재료압출 방식과 다르게 보조 구조를 만들기 위해서 별도의 소재를 사용한다. 제품이 완성된 후 손이나 물로 쉽게 제거할 수 있다. 그리고 제품의 표면적이 매끄럽고, 구체적인 부분까지 구현할 수 있는 높은 정밀도를 가지고 있다.

### (3) 접착제 분사(Binder jetting)

잉크젯 헤드에서 액상의 접착제를 선택적으로 분사하여 분말 소재와 결합하는 방식이다. 소재로는 석고 분말, 아크릴 계열 분말, 스테인레스 금속 분말 등을 사용한다. 접착제 분사 방식은 재료분사 방식과 유사하게 잉크젯 헤드를 사용해서 소재를 적층한다. 차이점은 헤드에서 나오는 액상의 접착제는 적층하는 소재가 아니라 분말 소재를 결합하는 역할을 한다는 것이다. 접착제 분사 방식의 시초는 매사추세츠공과대학교(MIT)에서 개발하여 3DP라는 이름으로 불려졌다. 이 접착제 분사 기술은 ExOne사와 3D Systems사에서 라이선스(lincesees)를 보유하고 있다.

### (4) 판재적층(Sheet lamination)

판재적층 방식은 종이, 금속판을 레이저 등으로 자르고 적층하고, 접착하기를 반복 한 후 깎아낸다. 처음으로 상용화된 기술은 정육점에서 사용하는 고기를 싸는 크라프트지(kraft paper)를 롤에 말고, 종이의 한쪽 면은 폴리머로 코팅해서 붙였다. 그런 다음 가열된 롤러를 사용하여 연속적인 층을 만든 후 레이저를 이용하여 자른다. 아일랜드 회사인 Mcor 테크놀로지는 판재와 종이 롤러를 사용하여 3D 프린터를 만들었다. 제작할 때 버려지는 부분이 있음에도 불구하고 재료의 비용이 아주 저렴하기 때문에 큰 문제가 되지 않는다. 이 회사의 Iris, ARKe 모델은 컬러 프린터를 통합하여 풀 컬러 3D 프린터를 만들었다. 다른 판재적층 기술은 미국의 Fabrisonic의 초음파 접착제이다. 이 초음파 접착제로 가는 금속 테이프를 붙여서 쌓은 뒤 CNC 기구를 이용하여 자르는 기술이다.

### (5) 광중합(Vat photopolymerization)

광중합 방식은 액체소재에 강한 UV레이저를 이용하여 소재를 선택적으로 경화시키는 방식이다. SLA(Stereolithography)는 적층방식으로 광중합을 이용

한 첫 번째 특허기술이며, 3D Systems는 1988년에 상업적으로 사용하였다. SLA 시스템을 개발한 회사가 초기에는 일본에 많이 있었으나 2000년 중반에 이 기술에 의한 제품의 생산을 중지하면서 그 판매 수량이 줄었다. 새로운 광중합 기술 중에 하나는 LED 램프를 이용한 DLP(Digital light porcessing) 방식이다. 이 기술은 한 번에 전체 부분을 스캔하는 방식으로 단일 지점을 스캔하는 방식보다 더 빠르게 출력할 수 있다. DLP 방식의 이점은 고해상도와 미세한 부분까지 표현할 수 있다. 하지만 이 방식은 큰 제품을 생산할 수 없다는 단점이 있다.

#### (6) 분말소결(Powder bed fusion)

분말소결 방식은 열에너지를 선택적으로 파우더 베드(Powder bed)에 보내고, 이 열에너지는 파우더 소재를 녹인 후 고체 형태로 하는 것이다. 소재로는 폴리머 형태의 파우더를 사용하며, 시스템은 레이저 소결 및 선택적 레이저 소결 방식이다. 많은 폴리머와 금속은 이 방식에서 소재로 사용이 가능하다. 폴리머의 경우, 출력물 주위에 파우더 소재는 융합하지 않기 때문에 추가적인 소재가 일반적으로 필요하지 않다. 출력물 주변의 파우더는 챔버 속에서 열을 올려 쉽게 제거할 수 있다. 금속의 경우, 지지 구조물은 출력물을 고정하는데 필요한데 이유는 금속 파우더의 높은 녹는점 때문이다. 만약에 지지 구조물을 사용하지 않는다면 열에 의해서 출력물의 휘는 등 손상이 올수도 있다. 금속 분말소결방식의 에너지원은 레이저 또는 전기빔이다. 레이저를 에너지원으로 이용할 때는 일반적으로 표면처리가 용이하고 전기빔 보다는 미세한 부분까지 표현할 수 있다. 전기빔을 에너지원으로 하면 가격은 비싸지만 빠르게 출력물을 만들 수 있다. 그리고 제품의 무리를 덜 주기 때문에 왜곡이 없이 출력물을 만들지만 높은 온도 때문에 사용되지 않은 분말의 청소가 쉽지 않다.

(7) 직접용사(DED: Directed energy deposition)

직접용사 방식은 증착된 열에너지를 사용하여 재료를 녹여 쌓는다. 이때 에너지 소스를 레이저 또는 전기빔을 사용하며 금속 분말이나 와이어를 소재로 한다. 직접용사 방식은 다양한 재료를 한 번에 적층할 수 있으며, 직접용사 시스템은 4, 5개 축 모션 시스템 또는 로봇 팔을 사용하여 연속적으로 적층할 수 있다.

**<표 III-1> 제조공법별 3D 프린팅 기술 분류**

제조공법	원리 및 관련 기술
재료압출 (material extrusion)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 평면에서 좌.우로 움직이는 헤드에 소재를 가열하여 적층하는 방식</li> <li>■ 소재는 열가소성 수지가 대부분이며, 점성 액체, 슬러리 상태의 소재도 사용</li> <li>■ 세라믹, 복합재료, 음식 등 다양함</li> <li>■ 사용이 간편하고 저렴하지만 정밀성이 떨어지는 단점이 있음</li> <li>■ 기술 : FDM</li> </ul>
재료분사 (material jetting)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 잉크젯 프린팅 헤드를 움직이면서 액상을 선택적으로 분사하여 UV를 사용하는 방식</li> <li>■ 소재는 광경화성 수지, 왁스류를 사용</li> <li>■ 기술 : PolyJet</li> </ul>
접착제분사 (binder jetting)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 잉크젯 헤드를 선택적으로 분사하여 액상의 접착제를 분말 소재와 결합하는 방식</li> <li>■ 소재는 석고 분말, 아크릴 계열 분말, 스테인레스 금속 분말 등을 사용</li> <li>■ 기술 : CJP(color jetting printing, Inkjet)</li> </ul>
판재적층 (sheet lamination)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 종이, 금속판에 접착제를 바른 후 적층하는 방식</li> <li>■ 소재는 종이, 금속 등을 사용</li> <li>■ 기술 : LOM(laminated object manufacturing)</li> </ul>

제조공법	원리 및 관련 기술
광중합 (Vat photopolymerization)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 액체재료에 강한 UV 레이저로 광경화하는 방식</li> <li>■ 소재는 포토폴리머 사용</li> <li>■ 기술 : SLA, DLP</li> </ul>
분말소결 (Powder bed fusion)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 파우더 재료에 고압, 고온으로 제이저 소결하는 방식</li> <li>■ 소재는 폴리머, 금속 등 사용</li> <li>■ 기술 : SLS, LS(laser sintering), SLM(selective laser melting), DMLS(direct metal laser sintering), EBM(electron beam melting)</li> </ul>
직접용사 (Direct energy deposition)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 재료를 투입하고 레이저의 열에너지로 용융 접착시키는 방식</li> <li>■ 소재는 금속 분말을 사용</li> <li>■ 기술 : EBAM(electron beam additive manufacturing), RPD(rapid plasma deposition)</li> </ul>

### 3) 소재

적층기술에 사용되는 소재는 크게 폴리머와 금속으로 나뉜다. 그리고 다양한 복합재료로 사용되고 있고, 세라믹, 서멧(세라믹과 금속의 조합으로 구성된 소

결 재료)도 있다.

### (1) 폴리머

상업적으로 폴리머 산업에서 사용되는 다양한 형태의 재료들이 사용되며, 이 다양성 덕분에 적층기술에서 많이 사용되고 있다. 적층에 사용되는 폴리머는 투명도, 색상, 인장 강도, 강도, 생체 적합성, 유리전이온도(glass transition temperature: 비정질 공체가 유리와 같은 무른 상태에서 점성이 있는 상태로 변화하는 온도 영역의 중심, 혹은 비체적대 온도 공선의 구배가 급격히 변화하는 온도)에 근거하여 선택적으로 사용할 수 있다. 뿐만 아니라 내습성, 살균(sterilization), 내화성, 연기 및 독성 물질 배출 등도 소재를 선택하는데 기준으로 작용한다. 폴리머는 높은 열에 대한 특성에 따라 두 가지 그룹으로 구분된다. 열가소성 수지(thermoplastics)은 반복적으로 용융, 냉각 및 경화된다. 열경화성 수지(thermoset)는 한번 형성되고 나면 다시 녹지 않는 성질을 가지고 있으며, 포토폴리머는 열경화성 수지이다. 열가소성 수지의 종류에는 ABS(acrylonitrile butadiene styrene), PC(polycarbonate), PC/ABS 혼합, 나일론(nylon), PLA(polylactic acid)가 있다. 미국의 Stratasys와 한국의 Rokit는 사우디아라비아의 SABIC에서 제공하는 Polyetherimide(PEI)인 ULTEM 9085(난연성의 고성능 열가소성 수지, 높은 강도, 내화성, ASTM 인증)를 가공하여 3D 프린팅 소재를 제공하고 있다. 2012년까지 ABS, PLA 소재에 국한되어 있다가 Taulman3D는 나일론(직경 1.75~3mm) 소재를 개발하였다. 계속해서 저가의 소재가 개발되고 있고, 사용자는 고강도 폴리에틸렌, PC, PET(polyethylene terephthalate), PVA(polyvinyl alcohol), 나일론, 부드러운 고무 재질, soft PLA, TPU(thermoplastic polyurethane) 및 NinjaFlex(고강도 탄성중합체) 등을 선택적으로 할 수 있다.

## (2) 금속

최근에 다양한 금속소재가 적층시스템에서 사용되고 있다. 사용되는 금속 소재로는 공구강(tool steels), 스테인리스스틸, 순수 티타늄, 티타늄 합금, 알루미늄 합금, 니켈 기반의 초합금, 코발트-크롬 합금, 구리 기반의 합금, 금, 은, 백금, 보장(palladium), 탄탈(tantalum) 등이 있다. 이 뿐만 아니라 매년 금속 관련 소재들이 개발되고 있다.

## (3) 복합재료

복합재료는 주재료에 다른 소재를 더할 때 사용된다. 일반적으로 사용되는 복합재료는 폴리아미드(polyamide)를 분말소결방식으로 사용할 때 사용되는데, 유리, 알루미늄, 탄소섬유를 함께 채운다. 이 물질을 더하면서 제품의 탄성, 강도 및 강도가 좋아진다. Markfored는 복합재료를 출력하는 재료압출방식의 3D 프린터를 개발하였다. 이 3D프린터는 2개의 헤드가 있는데 하나의 헤드에서는 폴리머를 압출하고, 다른 하나의 헤드에서는 탄소섬유, 유리섬유 및 케블라(kevlar: 강도, 탄성, 진동흡수력 등 뛰어나 진동흡수장치나 보강재, 방탄재 등에 사용)를 압출한다. Solvay는 탄소섬유강화 PEEK(polyetheretherketone) 소재를 개발하였다.

## (4) 세라믹 및 기타 재료

여러 회사(Lithoz, 3DCeram 등)에서 광중합체에 세라믹을 혼합하여 제공하고 있다. 세라믹의 특성상 소결시에 다른 물질에 비해서 15~30% 정도 수축된다. Xjet는 지르코니아(zirconia)와 세라믹과의 혼합이 가능해졌고, 소결 후 16% 정도 수축하여 99.9%의 출력물의 밀도를 유지한다. 생체 적합성 소재(biocompatible materials)는 적층 분야에서 뜨는 분야이다. 티타늄 합금인 Ti-6Al-4V를 사용하여 인플란트가 가능해졌다. 그리고 PEEK 소재와 PEKK(polyetherketoneketone) 소재로도 인플란트가 가능하다고 한다. Mcor의

SL 기술로 목재 느낌을 주는 출력물을 생산이 가능하며, 종이에 접착제를 붙인 후 샌딩과 페이팅으로 마무리 한다.

#### 4) 3D 프린터 산업

1988년부터 2017년까지 전세계적으로 3D 프린터 생산방식인 적층 시스템을 도입한 나라 중 북미가 37.7%, 유럽이 28.2%, 아시아/태평양이 29.7%, 그 밖에 4.4%의 비율로 차지한다. 나라별로 보면 미국이 35.9%로 가장 많고, 중국 10.6%, 일본 9.3%, 독일 8.4%이며, 한국은 3.7% 수준이다[그림Ⅲ-1].



※ Wohlers Report 2018 참고

**[그림 Ⅲ-1] 전세계 3D 프린팅 산업의 국가별 비중**

3D 프린터를 활용한 사업들 중 산업용 기기산업에 활용되는 비율이 20.0%로 가장 많았고, 항공우주 산업이 18.9%, 자동차 산업이 16.0%, 소비자 제품

및 전자공학 산업이 11.7%, 의료 및 치과 산업이 11.3%로 조사되었다. 그 밖에도 학술 및 교육산업(7.9%), 정부 및 군산업(5.1%), 건축(1.9%), 기타(7%)로 조사되었다<표Ⅲ-2>. 산업용 기기산업, 항공우주 산업, 자동차 산업 및 소비자 제품 및 전자공학 산업은 10년 이상 3D 프린터 산업을 이끌고 있는 산업이다.

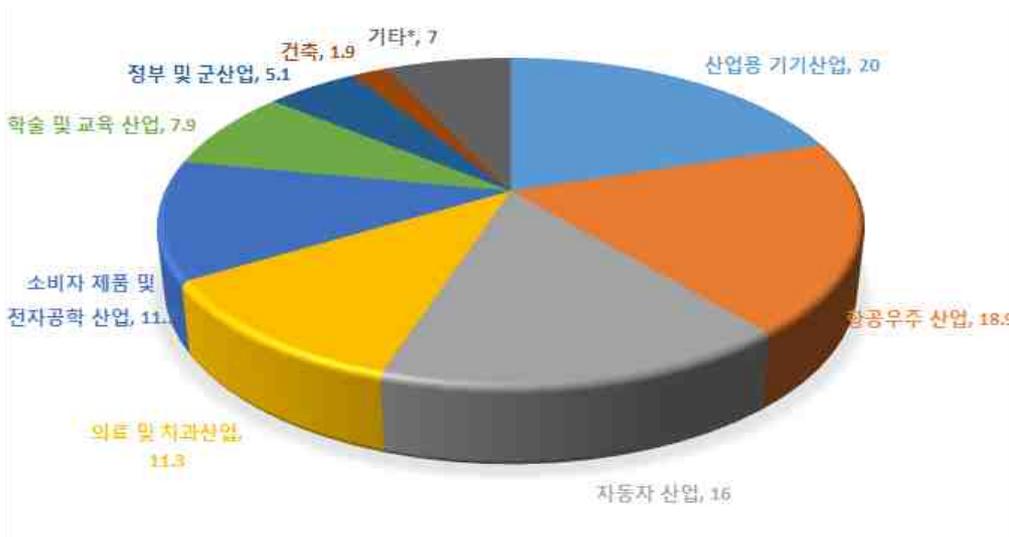
**<표 Ⅲ-2> 3D 프린팅을 활용한 산업 분류**

산업	비율(%)	성장률(%)
산업용 기기산업	20.0	1.2% 성장
항공우주 산업	18.9	0.7% 성장
자동차 산업	16.0	1.2% 성장
의료 및 치과산업	11.3	
소비자 제품 및 전자공학 산업*	11.7	
학술 및 교육 산업	7.9	
정부 및 군산업	5.1	
건축	1.9	
기타*	7.0	

※ Wohlers Report 2018 참고

\* 휴대용 전화기, 가전제품, 주방용품, 기구 및 인형

\* 정유, 가스, 운동 제품, 산업용 수산제품, 다양한 산업을 포함



※ Wohlers Report 2018 참고

**[그림 Ⅲ-2] 3D 프린팅을 활용한 산업 분포**

1988년부터 2017년까지 3D 프린터 산업이 구축되어진 지역을 근거로 분포도를 나타내었다. 북미가 37.7%로 가장 많은 비율을 차지하고 다음이 유럽(28.2%), 아시아 태평양(29.7%) 순으로 나타났다. 나라를 기준으로 봤을 때는 미국이 35.9%로 가장 많은 비중을 차지하였고, (10.6%), 일본(9.3%), 독일(8.4%) 순이다. 중국은 2016년도에는 10.3% 였지만 2017년도에는 10.3%로 0.3%로 성장하였지만. 미국은 2016년도에는 36.8%였지만 2017년도에는 35.9%로 0.9%로 하락하였다<표 Ⅲ-3>.

**<표 III-3> 국가별 3D 프린터 활용률**

국가	비율(%)	변화률(%)
미국	35.9	0.9% 하락
터키	1.3	
캐나다	1.8	
독일	8.4	
프랑스	3.1	
스웨덴	1.1	
영국	4.1	
이탈리아	3.3	
스페인	1.2	
일본	9.3	
한국	3.7	
중국	10.6	0.3% 상승
타이완	1.5	
러시아	1.4	
기타	13.3	

※ Wohlers Report 2018 참고

#### 4) 국내 3D 프린팅 산업현황 및 시장동향

국내 표준산업분류 속에 3D 프린터의 분류는 대분류는 C 제조업, 중분류는 29 기타 기계 및 장비 제조업, 소분류는 292 특수 목적용 기계 제조업, 세분류는 2922 가공공작기계 제조업, 세세분류는 29222 디지털 적층 성형기계 제조업

으로 분류되어 있다. 국내 3D 프린팅 관련회사는 2015년도에는 208개소, 2016년도에는 252개소, 2017년에는 302개소로 꾸준히 증가하고 있으며, 이는 저가형 3D 프린팅 기기의 보급으로 소재와 소프트웨어 및 관련 유통산업이 함께 증가하고 있는 경향이다. 국내 3D 프린팅 산업의 근로자 수는 2015년도에는 980명, 2016년도에는 1,648명, 2017년도에는 1,893명이며, 소재, 장비, 및 서비스 분야의 근무하는 근로자의 수가 크게 증가하였다. 2017년 기준 3D 프린팅 산업의 시장 규모는 3,500억 원 수준이며, 매년 증가하고 있는 추세이다.

국내 3D 프린팅 장비제조 업체는 2015년도는 45개소, 2016년도는 53개소, 2017년도는 61개소의 사업장으로 조사되었다. 지역별은 서울 19개소, 인천 12개소로 가장 많았고, 경남/경북, 인천, 대전 순이었다<표 III-4>.

**<표 III-4> 국내 3D 프린팅 주요 업체 현황**

구분	장비 제조	소재 제조	S/W 개발	서비스	유통	합계
서울	19	0	2	56	59	136
경기	12	3	0	18	24	57
경남/경북	7	2	0	7	3	19
인천	4	2	0	6	5	17
대전	5	0	0	7	3	15
부산	3	0	0	7	3	13
전남/전북	2	0	0	9	0	11
충남/충북	1	1	0	3	3	8
울산	2	1	0	2	1	6
대구	3	0	0	4	0	7
강원	1	0	0	2	3	6
광주	2	0	0	2	0	4
제주	0	0	0	2	1	3
합계	61	9	2	125	105	302

※ 3D프린팅 산업 실태 및 동향 조사 2017 참고

2017년 3D 프린팅 기기의 시장규모는 400억 원(국내: 300억 원, 수출: 100억 원) 수준이며, 국내 3D 프린팅 기기를 판매한 국가의 비율은 국내 53.3%, 유럽 10.7%, 중국 9.8%, 미국 9.0%, 일본 9.0%, 동남아 4.1%, 중남미 2.4%, 기타 1.6%의 비율이었다. 국내 3D 프린팅 기기의 유통 현황을 보면 2016년도의 국내, 외산 장비 대수는 각각 4702대, 5,573대이며, 2017년도에는 6,831대, 7,764대로 국산보다는 외산 장비의 유통이 더 많으며, 시장규모 면에서도 외산이 국산보다 높은 편이었다.

3D 프린팅 기술방식에 따른 국내 3D 프린팅 기기 현황은 재료압출 방식이 높은 비율로 제조, 유통되고 있었다. 그 이유는 재료압출 방식은 저가형 3D 프린팅 기기로 많이 보급되었고, 구입가격과 유지보수 비용 적게 든다는 장점이 있다. 그 밖에 재료분사 방식, 광중합 방식, 분말소결 방식이며, 직접 용사 방식, 접착제 분사 방식, 판재적층 방식은 낮은 비율로 조사되었다<표 III-5>.

2017년 3D 프린팅 소재제조 시장현황을 보면 열가소성 수지(필라멘트)가 62.4%로 가장 많았고, 광경화성 플라스틱(레진) 35.4%, 열가소성 수지(분말) 0.4%이며, 금속 0.5%, 기타 1.3%의 비율로 조사되었고, 판매한 국가로는 국내 36.1%, 유럽 19.5%, 미국 13.9%, 중국 8.3%, 일본 8.3%, 동남아 8.3%, 중남미 2.8%, 기타 2.8%였다.

**<표 III-5> 기술방식별 3D 프린팅 장비 비교(단위: %)**

	형태	재료 압출	광중합	분말 소결	직접 용사	접착제 분사	재료 분사	판재 적층
2016	제조	53.6	12.3	21.1	12.7	0.2	0.2	0.04
	유통	37.7	18.2	12.1	0.2	2.5	29.1	0.3
	전체	43.1	16.2	15.2	4.4	1.7	19.3	0.2
2017	제조	60.5	13.3	11.2	9.6	4.9	0.4	0.03
	유통	34.9	17.9	17.0	0.2	5.0	27.9	0.1
	전체	45.2	16.0	14.7	4.0	3.2	16.8	0.1

※ 3D프린팅 산업 실태 및 동향 조사 2017 참고

3D 프린팅 출력물의 주요 용도의 분포를 보면 시제품 38.6%로 가장 높았고, 전시용 모델/디자인 검증 23.8 %, 교육연구 19.1%, 완제품 9.2%, 공구/부속품 6.0%, 기타 3.3%로 나타났다. 출력물에 대한 수요처는 교육용이 19.4%로 가장 높았으며, 기계 17.9%, 전기 13.3%, 건축 7.9 %, 자동차 7.6%, 의료/치과 5.9%, 연구 5.9%, 공공 4.2%, 의류/패션 3.9%, 정부/지자체 2.7%, 항공/조선 2.5%, 기타 8.9%로 조사되었다.

## 2. 3D 프린터 관련 국내·외 연구 문헌고찰

### 1) 국내 문헌

RISS(www.riss.kr) 사이트(2018.10.17. 기준)에서 「3D 프린터」, 「노출」 또는 「3D 프린터」, 「emission」을 검색 키워드로 검색하여 연구문헌을 정리하였다. 국내에서 3D 프린팅에 대한 근로자 노출에 대한 연구는 아직 미비하며, 챔버 실험연구가 대부분이었다. 국내 문헌은 연구방법, 결과 및 기타(고찰) 순으로 정리하였다.

**<표 III-6> 국내 문헌 고찰**

제목/저자	주요내용
3D 프린터 작동 시 배출되는 가스상 물질과 입자상 물질 노출 특성 평가 / 이승한	FDM-3D 프린터 중 ABS 소재와 PLA 소재에 따른 입자 및 유기화합물 농도를 평가한 연구이다. 입자수농도는 ABS 소재를 사용했을 때가 PLA 소재를 사용했을 때보다 4배 이상 높게 나타났다. 그리고 FDM-3D 프린팅 출력판의 온도를 조절함에 따라서 입자수농도의 차이를 보였다. 입자수농도는 크게 높지 않았으나, 관리적인 측면에서는 국소배기장치 등 공학적인 대책이 필요해 보인다.
3D Printer 작업 환경에서의 작업자 노출평가에 대한 연구 / 이미영	챔버 연구로 다양한 방식의 3D 프린터를 평가한 연구이다. 본 연구에 사용된 3D 프린터는 FDM-, SLA-, SLS-3D 프린터를 평가하였고, 입자 및 유기화합물을 평가하였다. SLA-3D 프린팅 작업시 입자수농도는 5,738 개/cm <sup>3</sup> 이며, TVOC 1,130 ppb 수준이었다. 그리고 후처리 작업시 사용하는 이소프로필알

	<p>콜(IPA)의 농도가 266 ppm으로 노출기준인 200 ppm의 33 %를 초과하는 수준이었다. FDM-3D 프린팅 작업시 입자농도는 500,000 개/cm<sup>3</sup>이며, TVOC 1,511 ppb 수준이었다. SLS-3D 프린팅 작업시 입자농도와 TVOC 농도를 측정하지 않았고, 주입자의 크기는 0.6~2 μm 수준이었다. 각 3D 프린터의 형태마다 SEM으로 입자를 분석한 결과, 구형의 입자형태를 관찰하였다.</p>
<p>Control of particulate Material Emission during 3D Printing / 권오훈</p>	<p>챔버 연구로 FDM-3D 프린터에 사용하는 다양한 소재(ABS, PLA, PVC, laywppd, High impact polystyrene(HIPS), nylon)에 대한 입자 및 유기화합물 농도수준을 평가한 연구이다. ABS1 소재의 작동 중 발생하는 입자농도는 119,545 개/cm<sup>3</sup>, ABS2 소재는 101,064 개/cm<sup>3</sup>, PLA 소재는 40,387 개/cm<sup>3</sup>, PVA 소재는 52,366 개/cm<sup>3</sup>, Laywood 소재는 434,517 개/cm<sup>3</sup> 수준이었다. 전자현미경으로 입자를 분석한 결과 나노입자의 뭉쳐있는 형태를 관찰하였고, 그 성분은 탄소와 산소로 구성되어 있었다.</p>
<p>3D printer에서 발생하는 입자상물질과 가스상물질 발생특성평가 / 김유나</p>	<p>챔버 연구로 FDM-3D 프린터에 일반적으로 사용하는 소재(PLA, ABS)에 대한 입자 및 유기화합물 농도수준 평가연구이다. ABS 소재의 작동 중 발생하는 입자농도는 500,000 개/cm<sup>3</sup>, PLA 소재의 경우 주입자의 크기가 100 nm 이상이였다. 그리고 ABS 소재와 PLA 소재로 출력물을 만들 때, 입자 뿐만 아니라 유기화합물, 알데하이드류의 물질이 발생한다.</p>

2) 국외 문헌

PubMed(www.ncbi.nlm.nih.gov) 사이트(2018.10.17. 기준)에서 「3D print」로 검색했을 경우 관련 문헌은 총 4779이었다. 이 중 제목을 「3D print」, 「charact」 또는 「3D print」, 「exposure」을 검색 키워드로 검색되었다.

<표 III-7> 국외 문헌 고찰

제목/저자	주요내용
Aerosol Emissions from Fuse-Deposition Modeling 3D Printers in a Chamber and in Real Indoor Environments / Marina	챔버 및 실험실 세팅 연구이며, FDM-3D 프린터를 대상으로 하였고, 사용한 소재는 ABS, PLA 소재이다. 이 연구에서는 각 소재의 주입자 분포를 알고, 분당 발생하는 에어로졸의 양을 계산하였다. 연구결과 PLA의 주입경분포는 51 nm, ABS는 13-22 nm, 470 nm이었다. ABS 소재의 TVOC 농도는 0.83±0.01 ppm, 일산화탄소농도는 0.69±0.01 ppm으로 나타났다.
Airborne particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature / L.Stabile	챔버 연구이며, FDM-3D 프린터를 대상으로 하였고, 사용한 소재는 PLA, WOOD, COFFER, BAMBOO, FLEX PLA, CP, CP-CARBON, NYLON, NINJAFLEX이다. 이 연구에서는 노즐의 온도조건에 따른 발생하는 입자수농도를 평가한 연구이다. 노즐의 온도범위는 180~240℃ 수준이며 10~20℃의 온도 조건을 바꿔가면서 측정하였다. 그 결과 노즐의 온도가 높을수록 입자수농도는 증가하였고, 입자수농도와 표면적농도는 경향성을 보이나, 질량 농도는 경향성을 보

	<p>이지 않았다. 그리고 주입자의 분포는 10~30 nm 였다.</p>
<p>Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D Printing / 권오훈</p>	<p>챔버 연구이며, FDM-3D 프린터의 사용하는 소재(ABS, PLA, PVA, Laywood, HIPS, Nylon)를 대상으로 실험하였고, 온도조건에 따른 입자수농도변화를 확인하였다. 그리고 나노입자 발생율을 이용하여 제거효율을 계산식으로 구하였다. 제조사에서 권장하는 온도조건과 그 이상의 온도조건에서 프린팅 작업을 하였을 경우, 더 높은 입자수농도를 보였다. 그리고 HEPA 필터를 사용할 경우, 나노입자를 99.95% 수준의 제거율을 보였다.</p>
<p>Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer / Aleksandr B. Stefaniak</p>	<p>챔버 연구이며, FDM-3D 프린터의 사용하는 소재(ABS, PLA)를 사용하였으며, 유기화합물 중심으로 연구하였다. 검출된 유기화합물은 아세트알데하이드, 에탄올, 아세트니트릴, 아세톤, 이소프로필알콜, n-헥산, 클로로폼, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 스틸렌, 디-리모넨이 검출되었다. 오존이 발생하여 탄소-탄소 이중결합으로 인한 carbonyl compounds가 생성 되는 것으로 보고 있다.</p>
<p>Characterization of Emissions from a Desktop 3D Printer / Luis Mendes</p>	<p>챔버 및 실험실 세팅 연구이며, FDM-3D 프린터의 사용하는 소재(ABS, PLA)를 사용하였으며, 노즐과 적층판의 온도변화에 다른 챔버와 실험실에서 각 소재별 입자수농도와 표면적농도를 비교하였다. PLA 소재보다 ABS 소재의 입자수농도와 표면적농도는 대체적으로 높았다. ABS,</p>

	<p>PLA 소재의 주 입경 분포는 7.8~10.5 nm 사이에 분포한다. 각 소재에서는 대부분의 유기화합물이 검출한계 미만이거나 낮은 수준이며, ABS 소재에서 스티렌이 낮은 수준으로 검출되었다. 스티렌은 ABS 소재의 주성분이다.</p>
<p>Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings / Patrick Steinle</p>	<p>챔버 및 실험실 세팅 연구이며, 적층기술은 재료 압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재(ABS, PLA)를 사용할 때 발생하는 다양한 인자(입자, 유기화합물, PAHs, 금속, O<sub>3</sub>, CO, O<sub>2</sub> 등)를 측정 평가하였다. 입자농도는 PLA(89,000 개/cm<sup>3</sup>) 소재가 ABS(10,600 개/cm<sup>3</sup>) 소재보다 높았다. TEM 분석결과 나노입자의 뭉쳐진 이미지를 관찰하였고, EDS 분석결과 탄소가 주성분이며, 칼륨, 황, 철의 성분으로 구성되어 있었다. ABS 소재의 유기화합물은 스티렌 49%, 에틸벤젠 9%, 사이클로로헥사논 8%, methylmethacrylate (MMA) 3%, n-부탄올 2%, 기타 29%이며, PLA 소재의 유기화합물은 MMA 37%, n-부탄올 13%, 시클로헥사논 9%, 기타 41%였다. 실험실 세팅 연구에서 입자농도와 유기화합물인 MMA의 농도 패턴이 상관관계(R<sup>2</sup>=0.71)가 있었다.</p>
<p>Characterization of particle emissions from consumer fused deposition</p>	<p>챔버 및 실험실 세팅 연구이며, 적층기술은 재료 압출(FDM) 방식 3D 프린터를 평가했으며, 사용한 소재는 ABS이다. 주입자의 범위는 20~40</p>

<p>modeling 3D printers / Qian Zhang</p>	<p>nm이며, 시작 단계(노즐, 적층판 예열)에서 입자 수농도가 급격하게 증가하였다. 교육용으로 3D 프린터를 많이 사용하면서 비의도적 나노입자의 독성에 어린이들이 쉽게 노출될 가능성이 있다고 본다.</p>
<p>Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer / Nima Afshar- Mohajer</p>	<p>챔버 연구로 적층기술은 접착제분사(BJ: Binder jetting) 방식 3D 프린터를 평가했으며, 사용한 소재는 분말(레진과 에폭시 수지)을 사용하였다. SEM-EDS 분석 결과, 서로 뭉쳐있는 입자의 이미지를 관찰하였고, EDS 성분 분석 결과, 탄소, 산소, 황, 칼륨이었다. 주입자의 크기 분포는 205~407 nm, 분사할 때는 352~407 nm이고, 높은 발생율(0.5 ng/min)을 보였다. 그리고 PM10, PM2.5 농도 수준은 미국 실내공기질 권고치를 초과하는 수준이었다. 따라서 작업시 적절한 국소배기장치를 사용할 것을 권장하고 있다.</p>
<p>Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer / Jinghai Yi</p>	<p>챔버 및 실험실 세팅 연구이며, 적층기술은 재료 압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재는 PLA, ABS 소재를 사용하였다. 이번 연구의 목적은 관리방법을 제시하고, 소재의 색에 따른 입자수농도, 입경 분포, 질량농도, 표면적농도를 측정하기 위함이다. 연구 결과 색에 따라서 입자수농도가 다양함을 알 수 있었다. ABS 소재의 입경분포는 40~70 nm이며, PLA는 27.5~37.7 nm로 PLA 소재가 대체적으로 입경분포가 작았다. 그리고 3D 프린팅 작업시 커버를 장착했을 경우, 입자수</p>

농도가 줄어드는 것을 확인하였고, 노출에 문제가 있을 경우에 입자수농도가 일반 작업시보다 높게 올라가는 것을 확인했다. 관리방안을 제시하고 있는데; 1) 제조사에서 제공한 사용조건 등을 준수한다(커버가 장착되어 있는 3D 프린터 기기를 사용하면 발생인자의 노출을 감소시킬 수 있다). 2) 환기가 잘 되는 곳에서 사용하거나, 국소배기장치를 설치하여 사용할 것을 권장 한다. 3) 가능하면 작업 중 호흡기 위치에서 멀리 떨어진 위치에서 작업을 하고, 입자 발생이 작은 소재를 사용하는 것이 좋다. 4) 만약 노즐이 막혔을 때는 즉시 프린터를 정지하고, 커버를 제거하기 전에 환기가 잘되는지 확인하거나 국소배기장치를 설치한 후 작업해야 한다. 5) 산업위생학적 관리대책을 준수한다(공학적 > 행정적 > 보호구 착용).

Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation / 김유나

of 식 3D 프린터이며, 소재는 PLA, ABS 소재를 사용하였다. 작업 중 입자수농도는 ABS(1,731,578 개/cm<sup>3</sup>) 소재가 ABS(52,252 개/cm<sup>3</sup>) 소재보다 높았다. 유기화합물의 농도는 낮은 수준으로 나왔고, 특히 포름알데하이드 등 알데하이드류의 물질이 검출되었다.

Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic

of 챔버 연구이며, 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 색이 다른 다양한 소재(PLA, ABS, HIPS, nylon, laywood)를 사용하여 평가

<p>Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments / Parham Azimi</p>	<p>하였다. 대체적으로 입자수농도는 ABS 소재가 가장 높았고, PLA 소재가 낮았다. 노즐에 온도에 따른 입자 발생율을 실험한 결과, 노즐의 온도가 입자수농도에 영향이 있는 것을 보았다. 하지만 노즐의 온도와 TVOC와의 상관관계는 낮은 것을 판단된다.</p>
<p>Fine Particulate and Chemical Emissions from Consumer 3D printers / Aika Davis</p>	<p>챔버 연구이며, 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 색이 다른 다양한 소재(PLA, ABS, nylon)를 사용하여 평가하였다. 연구 결과 모든 실험에서 초미세입자가 발생하였고, 70% 정도는 50 nm보다 적은 입자로 구성되어 있었다. ABS 소재에서는 스티렌, 에틸벤젠이 주로 검출되었고, nylon 소재는 caprolactam, PLA 소재는 MMA가 검출되었다. 노즐의 온도에 따라 입자 및 VOC 발생율이 따라 증가 하였다. 전형적으로 입자수농도는 <math>10^3 \sim 10^6</math> 개/cm<sup>3</sup>까지 급격하게 증가했다가 시간이 지남에 따라 감소했다.</p>
<p>Fume emissions from a low-cost 3-D printer with various filaments</p>	<p>챔버 연구이며, 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 다른 다양한 소재(PLA, ABS, PVA, HIPS, PCABS, Nylon, Bronze-PLA, PET)를 사용하여 평가하였다. 전형적으로 입자수농도는 노즐과 적층판을 예열하는 작업(약 2분)에서 급격하게 증가했다. TEM 이미지에서 서로 다른 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰했다. 결론적으로 저가형 FDM-3D</p>

	<p>프린터의 경우 높은 수준의 나노입자가 발생한다. 초미세입자 뿐만 아니라 에어로졸에 포함된 독성물질에 대한 건강상의 문제를 우려하고 있다. 따라서 실제 현장을 평가하는 연구가 필요하며, 그 연구를 통한 관리방안을 모색할 필요가 있다. 덧붙여 3D 프린터에서 발생하는 흡에 대한 독성평가도 함께 진행된다면 도움이 될 것으로 본다</p>
<p>Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room / Yu Zhou</p>	<p>크린룸 세팅 연구이며, 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재(PLA)를 사용하여 평가하였다. 측정에 사용한 장비는 그린 OPC 장비(Grimm 1109)로 250 nm~32 μm의 입자를 측정하는 장비이다. 연구의 결론에 PM10(10 μm 작은 입자) 보다 작은 입자가 나오는 것으로 추정만 할 뿐 측정하지 않았다.</p>
<p>Predicting Concentrations of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds Resulting from Desktop 3D Printer Operation and the Impact of Potential Control Strategies / Parham Azimi</p>	<p>실험실 세팅 연구로, 이 연구를 통해서 관리 방법을 모색하기 위한 연구이다. 적층기술은 재료 압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재(Nylon, PCTPE, Laybrick, Laywood, TGlase, Polycarbonate, ABS, HIPS, PLA)를 사용하여 평가하였다. 대체적으로 입자수농도는 ABS 소재가 가장 높았고, PLA 소재가 낮았다. 이 연구에서는 ABS, nylon, PLA 소재를 사용할 때 발생하는 주 유기화합물은 각각 스티렌, caprolactam, lactide 였다. 이 연구에서 관리 방법을 제시하고 있는데, 국소배기장치를 설치</p>

	<p>또는 입자 및 가스 제거 필터를 부착한 부스에서 작업 또는 공기청정기 사용을 제안하고 있다. 이를 통해서 입자와 유기화합물의 농도 수준을 관리 할 수 있다고 본다.</p>
<p>The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction / Yelin Deng</p>	<p>챔버 연구이며, 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재(PLA, ABS)를 사용하여 평가하였다. 예상되로 노즐의 온도가 증가할 수록 입자수농도도 함께 증가하였다. 하지만 분사 속도를 증가함에 따라 입자수농도는 증가하지 않았고, 60 mm/sec의 속도로 분사할 때가 가장 높은 입자수농도를 보였다.</p>
<p>Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers / Brent Stephens</p>	<p>챔버 연구이며, 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재(PLA, ABS)를 사용하여 평가하였다. FDM-3D 프린터(2 PLA 소재)와 FDM-3D(2 PLA+3 ABS)의 작업 중 입자수농도를 비교하였다. ABS 소재를 사용한 후, 입자수농도가 크게 증가하였다. 따라서 입자수농도에 영향을 주는 소재는 ABS 소재가 PLA 소재 보다 높은 것을 알 수 있었다.</p>
<p>VOC and particle emissions from home and hobby 3D printers / Samuel Hartikainen</p>	<p>실험 연구이며, 일반 가정 집에서 측정하였다. 적층기술은 재료압출(FDM) 방식 3D 프린터이며, 소재(PLA, ABS)를 사용하여 평가하였다. 입자수농도는 <math>4.3 \times 10^4</math> 개/cm<sup>3</sup>이며, ABS 소재의 주 유기화합물은 스티렌이며, 농도 수준은 20~70 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> 수준이었다.</p>

## IV. 연구결과

### 1. 3D 프린팅 사업장 A 노출평가

#### 1) 사업장 개요 및 공정

사업장 A는 학교 등에서 제품 생산을 의뢰 받아서 3D 프린터를 이용하여 출력물을 생산하고 있다. 이 사업장에서는 재료압출 방식의 3D 프린터인 FDM-3D 프린터를 사용하고 있다. 현재 보유하고 있는 3D 프린터는 24대이며, 측정 당시 작동한 3D 프린터는 총 12대이고, 사용한 소재는 흰색 PLA 필라멘트를 사용하였다. 사무실과 사업장이 별도로 분리되어 있고, 사업장 크기는 650 m<sup>3</sup> 이다. 운영 조건은 <표 IV-1>와 같고, 3D 프린터 사양은 <표 IV-2>와 같다.



[그림 IV-1] 사업장 A의 사진

3D 프린팅 작업은 먼저 컴퓨터의 CAD 프로그램을 이용하여 출력물의 도면을 그린 후 3D 프린터로 제품을 생산하는 것이다. 각 출력물의 형태 및 용도에 따라서 3D 프린터의 운영조건을 설정한다. 운영조건으로는 적층 높이, 두께 프린팅 속도, 판 가열 온도 등이 있다. 먼저 출력물을 생산하기 전에 적층판과 노즐을 5~10분 정도 예열한다. 적층판을 예열을 하는 목적은 소재가 노즐에서 나올 때 갑자기 차가운 면과 만나면 출력물의 손상이 있을 수 있기 때문이다. 출력물의 크기에 따라 적게는 40분에서 많게는 2시간 이상의 시간이 소요된다. 후처리 작업으로 출력물의 표면을 다듬는데 이소프로필 알코올을 사용하지만, 측정 당일 별도의 후처리 작업을 하지 않았다. 특이점은 적층판의 출력물을 안정적으로 쌓기 위하여 시중에서 판매하는 딱풀을 사용하였고, 국소배기장치나 보호구 사용은 없었고, 물질안전보건자료(MSDS)도 비치하지 않았다. 청소는 일주일에 1회 밀대로 청소하며, 청소기는 사용하지 않았다. 측정 당시 환기는 창문을 사용하지 않았고, 건물의 전체공조 시스템을 사용하였다.

**<표 IV-1> 사업장 A의 FDM 운영조건**

	운영조건	수치 및 정보	기타
기본 조건	적층 높이	0.2 mm	
	두께	0.8 mm	
	바닥/위 두께	0.2 mm	
	밀도	20%	
속도 및 온도조건	프린팅 속도	20 mm/sec	
	노즐 온도	210℃	
	배드 온도	70℃	
필라멘트	종류	PLA	
	지름	1.75 mm	원산지 : 중국
	색상	흰색	

**<표 IV-2> 사업장 A의 FDM 프린터 사양**

모델	MKT-3D1H	Farmers Farm
모델 사진		
유형	FDM	FDM
프린터 사이즈(mm)	225x145x150	340x340x400
적층두께 (mm)	0.1 ~ 0.4	-
토출속도 (mm/sec)	150	300
최대 적층온도 (°C)	240	300
판 온도 (°C)	20 ~ 100	20 ~ 100
프린터물 제작 크기 (mm)	140x140x140	210x215x200
전력 (V)	220 ~ 240	100 ~ 240

2) 작업시간 기록

배경농도측정은 측정 전날 저녁부터 실시하였으나, 새벽까지 작업이 있었던 관계로 입자수농도가 가장 낮은 구간인 8시 30분부터 출근 전까지를 배경농도로 선택하였다. 측정 당시에 작동한 FDM-3D 프린터는 12대이며, 적층판과 노즐을 예열하는데 걸린 시간은 대략 30분 정도였다. 1개의 출력물이 완성되는데 걸리는 시간은 1~2시간 정도였고, 작업이 끝나는 17시까지 계속해서 작업이 있었다.

**<표 IV-3> 사업장 A의 작업시간 기록**

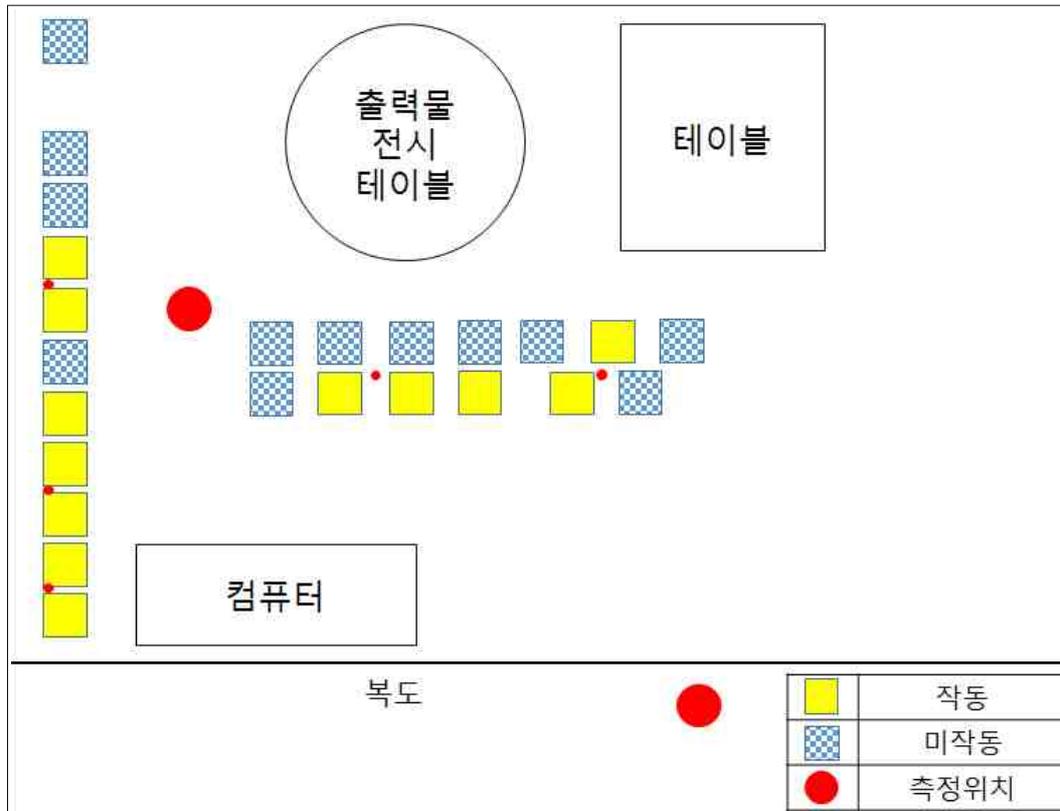
일	시간	공정	비고
4/13	08:30~09:10	배경농도	
	09:10~09:40	적층판 예열	
	09:40~17:00	3D 프린팅 작업	



**[그림 IV-2] 사업장 A의 작업환경측정 사진**

## 3) 사업장 도면

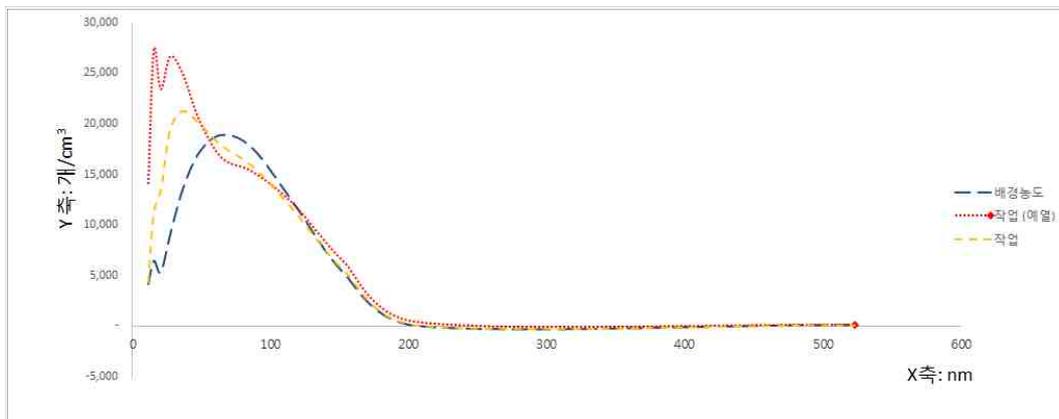
초미세입자 측정은 작업이 주로 이루어지는 지점에서 측정하였고, 유기화합물과 금속은 작업자의 호흡기 위치와 3D 프린터 실내에서 측정하였다. 작업 중 발생하는 입자의 형태를 확인하기 위해서 TEM 시편 시료채취를 실시하였으며, 예열 작업, 작업장 실내, 복도에서 측정하였다.



[그림 IV-3] 사업장 A 모식도

4) 초미세입자 실시간 측정기기 분석결과

사업장 A에 분포하는 입자 크기를 평균 입자수농도로 표현한 그래프이다. 작업(예열) 단계, 주입자의 분포는 13.3~17.8 nm(27,226 개/cm<sup>3</sup>)로 가장 작은 입자 분포를 보였다. 작업 중 주입자의 분포는 31.6~42.2 nm(21,234 개/cm<sup>3</sup>)이며, 배경농도의 주입자 분포(56.2~75 nm) 보다 작은 입자 분포를 보였다. 그리고 200 nm 이상의 입자수농도는 100 개/cm<sup>3</sup> 미만으로 낮았다[그림 IV-4].



[그림 IV-4] FDM-3D 프린팅 입자크기분포

**<표 IV-4> 사업장 A의 입자수농도와 표면적농도**

구분		공정별 농도 수준	
		작업(예열)	배경농도
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	143,510±46,806 (187,127±84,685)	109,727±3,939
	GM(GSD)	138,908(1.29) (169,955(1.56))	109,657(1.04)
표면적농도 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	AM±SD	51±8 (59±10)	52±2
	GM(GSD)	51(1.14) (58(1.18))	52(1.03)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

작업 중 입자수농도와 표면적농도를 배경농도와 비교한 표이다<표 IV-4>. 측정된 입자크기분포는 10 nm~20  $\mu\text{m}$ 이며, 작업 중 산술평균 입자수농도는 143,510 개/cm<sup>3</sup>이며, 이 중 예열 중 입자수농도는 187,127 개/cm<sup>3</sup>이었다. 작업 중 농도는 배경농도(109,727 개/cm<sup>3</sup>)보다 높은 수준이었다. 그리고 작업 중 산술평균 표면적농도는 51  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이며, 이 중 예열 중 표면적농도는 59  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 작업 중 농도는 배경농도(52  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )와 비슷한 수준이었다.



**[그림 IV-5] 사업장 A의 시간별 입자농도와 표면적농도**

시간에 따른 입자농도와 표면적농도 변화를 나타낸 그래프이다[그림 IV-5]. 시간 순은 배경농도, 예열, 작업으로 나뉘며, 예열 작업이 있는 시점에서 급격히 입자농도와 표면적농도가 높아지는 경향을 보였으며, 작업 중에는 그 농도수준이 천천히 낮아지다가 배경농도 수준까지 낮아지는 경향을 보였다.

측정기간의 상관관계를 나타낸 표이다<표 IV-5>. 나노스캔 장비와 NSAM 장비와의 높은 양의 상관관계(0.895)를 보였고, 통계적으로 유의한 관계를 보였다. 그리고 APS 장비와 나노스캔 장비, APS 장비와 NSAM 장비와의 통계적으로 유의한 관계를 보이지만 상관계수는 낮았다.

**<표 IV-5> 사업장 A의 측정기간의 상관관계 분석**

측정기기	APS	나노스캔	NSAM
APS	1		
나노스캔	0.10*	1	
NSAM	0.323*	0.895**	1

Aerodynamic Particle Sizer: APS, NanoScan SMPS: 나노스캔,  
Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

## 5) 투과전자현미경 분석결과

시편(Grid) 시료채취는 구리로 코팅된 시편을 사용하였고, MPS 샘플러에 연결한 후 포집하였다. 측정 후 시료는 TEM으로 입자의 형태를 확인한 후, EDS로 성분 및 질량비율을 분석하였다. 첫 번째 시료는 예열 작업 시에 3D 프린터 내부에서 측정된 것이다. 시료에서 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰할 수 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 79%, 산소 9%, 실리카 10%이며, 마그네슘, 황, 칼륨, 칼슘, 철, 지르코늄 1% 미만 이었다. 두 번째 시료는 실내의 초미세입자 측정지점에서 측정하였고, 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 예열 작업 때와 비슷한 모양의 이미지였다. EDS분석결과 탄소 80%, 산소 8%, 실리카 9%이며, 황, 칼륨, 칼슘, 철, 지르코늄, 나트륨, Al 1%미만 이었다. 세 번째 시료는 작업실 밖 복도에서 측정하였고, 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 3D 프린터 작동시 실내에서 측정된 시료의 이미지와 유사하였다. EDS 분석결과 탄소 60%, 산소 18%, 실리카 17%이며, 황 1%, 알루미늄 1%, 칼슘, 철, 지르코늄, 나트륨 1%미만 이었다<표 IV-6>, <표 IV-7>.

<표 IV-6> TEM 이미지

측정위치	사진 1	사진 2	사진 3
프린터 내부			
작업실 내 (초미세입자 측정위치)			
복도 (3D 프린터와 4m 거리)			

**<표 IV-7> 사업장 A의 EDS 분석 결과 (중량비, %)**

측정 위치	C	O	Si	Mg	S	K	Ca	Cr	Fe	Zr	Na	Al	Total
내부*	79	9	10	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	100
실내	80	8	9	-	<1	<1	<1	-	<1	<1	<1	<1	100
복도	60	18	17	-	1	-	<1	-	<1	<1	<1	1	100

\* 내부: 예열 작업 시 3D 프린터 내부

Cu 코팅 시편이므로 Cu의 성분은 제외, 1% 미만은 <1%로 함

## 6) 유기화합물 분석결과

유기화합물은 개인시료와 지역시료(3D 프린터실 5개소, 사무실 1개소)로 나눠서 채취하였다. 개인시료에서는 이소프로필 알코올의 농도가 26.2 ppb로 가장 높게 나타났다. 톨루엔 3.5 ppb, 에틸 벤젠 0.7 ppb로 노출기준을 초과하지 않았다. 지역시료에서도 이소프로필 알코올의 농도가 84.3 ppb로 가장 높게 나타났다. 그리고 아세톤 7.1 ppb, 톨루엔 31.0 ppb, 에틸 벤젠 0.9 ppb, p-, m-크실렌 1.2 ppb, o-크실렌 1.8 ppb로 노출기준을 초과하지 않았다. 사무실에서도 이소프로필 알코올이 검출되었는데 농도는 39 ppb 수준이었다. 그리고 톨루엔 3.0 ppb, 에틸 벤젠 0.4 ppb, p-,m-크실렌 0.6 ppb, o-크실렌 0.6 ppb로 노출기준을 초과하지 않았다<표 IV-8>.

&lt;표 IV-8&gt; 사업장 A의 유기화합물 분석결과

물질\측정(시료수) 단위: ppb	개인(1)	지역(5)	사무실(1)	노출기준(TWA) 단위: ppm
아세톤	N.D.	7.1	N.D.	500
이소프로필 알코올	26.2	84.3±24.8	39.0	200
톨루엔	3.5	31.0±47.2	3.0	50
에틸 벤젠	0.7	0.9±1.0	0.4	100
p-, m-크실렌	-	1.2±1.1	0.6	100
o-크실렌	-	1.8±1.7	0.6	100
시클로헥사논	N.D.	N.D.	N.D.	25

N.D. (not detected) : 검출한계 미만

검출한계 : 에탄올 0.16, 아세톤 0.50, 이소프로필 알코올 0.37, n-헥산 0.67, 에틸아세테이트 0.58, 벤젠 0.83, 헵탄 0.43, 트리클로로에틸렌 0.31, 메틸이소부틸케톤 0.62, 톨루엔 0.98, 에틸 벤젠 1.07, p-, m-크실렌 0.75, o-크실렌 0.75, 스틸렌 0.79, 시클로헥사논 0.71  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 7) 중금속 분석결과

중금속은 개인과 지역으로 시료를 채취하였다. 중금속 시료를 분석한 결과 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철이 미량으로 검출되었고, 티타늄, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 지르콘, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 주석, 금은 검출한계 미만이었다<표 IV-9>.

**<표 IV-9> 사업장 A의 금속 분석결과**

물질\측정(시료수) 단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	개인(1)	지역(6)	노출기준(TWA) 단위: $\text{mg}/\text{m}^3$
나트륨	1.72	1.8±0.5	-
마그네슘 (산화마그네슘)	0.47	0.5±0.1	10
알루미늄 (산화 알루미늄)	1.24	0.6±0.4	10
칼륨	1.09	1.1±0.4	-
칼슘	-	0.3	-
크롬 (금속)	0.13	0.1±0.02	0.5
철 (산화철)	3.63	1.4±1.2	5

검출한계 : 나트륨 0.2, 마그네슘 0.2, 알루미늄 0.3, 칼륨 0.3, 칼슘 0.3, 티타늄 0.3, 크롬 0.04, 망간 0.2, 철 0.2, 코발트 0.04, 니켈 0.1, 구리 0.1, 아연 0.2, 지르콘 0.06, 몰리브덴 0.1, 은 0.1, 카드뮴 0.1, 주석 0.2, 납 0.1  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 8) 기타인자

직독식측정기기(Multi Pro)를 사용하여 기타 유해인자인 황화수소( $H_2S$ ), 일산화탄소(CO), 일산화질소(NO), 이산화질소( $NO_2$ ), 이산화황( $SO_2$ ), 총휘발성유기화합물질(TVOC)를 측정하였다<표 IV-10>. TVOC의 평균농도가 5.57 ppb로 낮은 수준이었다.

**<표 IV-10> 사업장 A의 기타인자**

기타 유해인자	평균농도 (최대값)*
$H_2S$ (ppm)	—
CO (ppm)	—
NO (ppm)	—
$NO_2$ (ppm)	0.13 (0.2)
$SO_2$ (ppm)	—
TVOC (ppb)	5.57 (130)

\* — : 불검출

## 2. 3D 프린팅 사업장 B 노출평가

### 1) 사업장 개요 및 공정

사업장 B는 전자부품 및 컴퓨터 케이블 제조 등 전자부품 제조업체이며, 최근 3D 프린터 개발 사업을 시작한 중소기업이다. FDM-3D 프린터와 Metal-3D 프린터를 주력으로 개발하고 있다. 측정 당일 FDM-3D 프린터에 사용한 소재는 ABS 필라멘트이며, 1대가 주로 작동되었고, 1대는 간헐적으로 사용하였다. 이 회사의 FDM-3D 프린터는 밀폐형으로 덮개가 있었고, 프린터 운영 조건은 <표 IV-11>와 같다. 특이사항은 FDM-3D 프린터 작업 중 옆에서 간헐적으로 무연납땜 작업 및 스티커 제거를 목적으로 이소프로필 알코올을 사용하였다.



**[그림 IV-6] 사업장 B의 작업환경측정 사진**

Metal-3D 프린터의 공정은 가동 전 판의 높이를 정확한 위치에 맞추는 작업과 소재(알루미늄 분말)와의 결합력을 높이기 위해서 질소가스를 주입하여 산소농도를 0.1% 이하로 낮추고, 레이저 위치를 맞춘다. 그런 다음에 제품을 생산하고, 제품이 완성되면 HEPA 필터가 장착된 청소기를 사용하여 제품에 남

아있는 알루미늄 분말을 제거한다. Metal-3D 프린터 사업장은 세미 크린룸 형태로 공기가 위에서 나와서 아래로 순환하는 공조시스템이고, 작업장에는 Metal-3D 프린터의 운영 조건을 맞추기 위해서 향온향습기를 운영하였다. 그리고 퇴근 후에는 공조시스템 및 향온향습기는 작동시키지 않았다.

**<표 IV-11> 사업장 B의 FDM 운영조건**

	운영조건	수치 및 정보	기타
기본 조건	적층 높이	0.2 mm	
	두께	0.8 mm	
	바닥/위 두께	0.2 mm	
	밀도	100%	
속도 및 온도조건	프린팅 속도	30 mm/sec	
	노즐 온도	240℃	
	적층판 온도	100℃	
필라멘트	종류	ABS	원산지: 한국
	지름	1.75 mm	
	색상	갈색	

**<표 IV-12> 사업장 B의 FDM 프린터 사양**

모델명	MyD S160	MyD S140
모델 사진		
유형	FDM	FDM
프린터 사이즈(mm)	400x320x495, 23kg	400x300x445, 19kg
적층두께 (mm)	0.12-0.24	0.12-0.24
토출속도 (mm/sec)	30-150	30-150
노즐지름 (mm)	0.4	0.4
최대 적층온도 (°C)	240	240
판 온도 (°C)	0-120	- (금속적층판)
인쇄 정밀도 (mm)	±0.2	±0.2
프린터물 제작 크기 (mm)	160x160x180	140x140x160
전원사양	AC 100-240V, 50-60Hz, 1.5A	AC 100-240V, 50-60Hz, 1.5A

**<표 IV-13> 사업장 B의 Metal-3D 프린터 사양**

제품명	M200	M135
모델 사진		
유형	SLM	SLM
프린터 사이즈(mm)	1100x1180x1880, 850kg	860x1180x1880, 700kg
적층두께 (mm)	0.02-0.06	0.02-0.06
레이저 타입	yb-fiber laser 200w	yb-fiber laser 200w
스캔속도 (m/sec)	7	7
Focus 직경( $\mu$ m)	50	45
가스	질소, 아르곤	질소, 아르곤
금속 파우더	스테인리스 스틸 (기타: Co-Cr, Al, Ti)	스테인리스 스틸 (기타: Co-Cr, Al, Ti)
프린터물 제작 크기 (mm)	200x200x135	135x135x100
전원사양	AC 220V, 35A	AC 220V, 25A

## 2) 작업시간 기록

당일 측정은 사업장의 요청으로 오후부터 측정이 시작되었고, 배경농도 측정은 Metal-3D 프린터 작업장에서 하였고, 공조시스템이 작동하지 않는 시간에 하였다. 특이사항은 FDM-3D 프린터 작업장의 경우, 적층판 및 노즐을 예열하는 작업을 측정하지 못하였다. Metal-3D 프린터 작업장은 세미 크린룸 형태이며, 3D 프린팅 작업은 연구 계획에 맞춰 간헐적으로 이루어졌다.

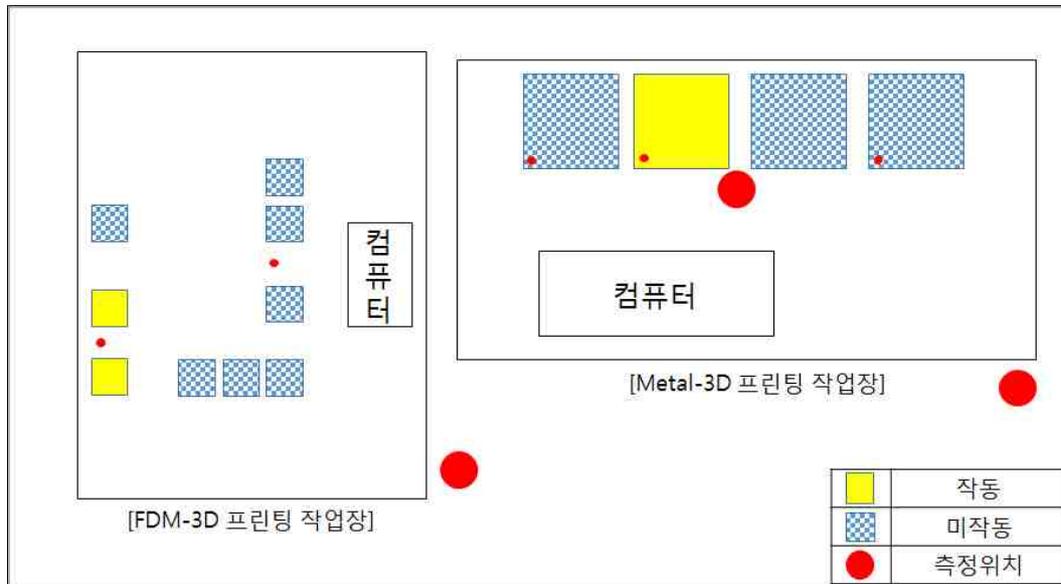
**<표 IV-14> 사업장 B의 작업시간 기록**

일	시간	공정	비고
5/24	14:20~17:50	3D 프린팅 작업	FDM-3D 프린터실
	18:15~20:00	배경농도	Metal-3D 프린터실
5/25	10:00~16:40	3D 프린팅 작업	Metal-3D 프린터실

\* 적층판/노즐 예열 작업은 측정하지 못함

3) 측정위치

사업장 B의 작업장은 FDM-3D 프린팅 작업장과 Metal-3D 프린팅 작업장으로 분류 된다. [그림 IV-7]과 같이 작업장 내에서 측정하였고, 근로자에게 유기 화합물과 금속의 노출을 측정하기 위하여 개인시료 채취기를 장착하여 작업시간 동안 측정하였다.

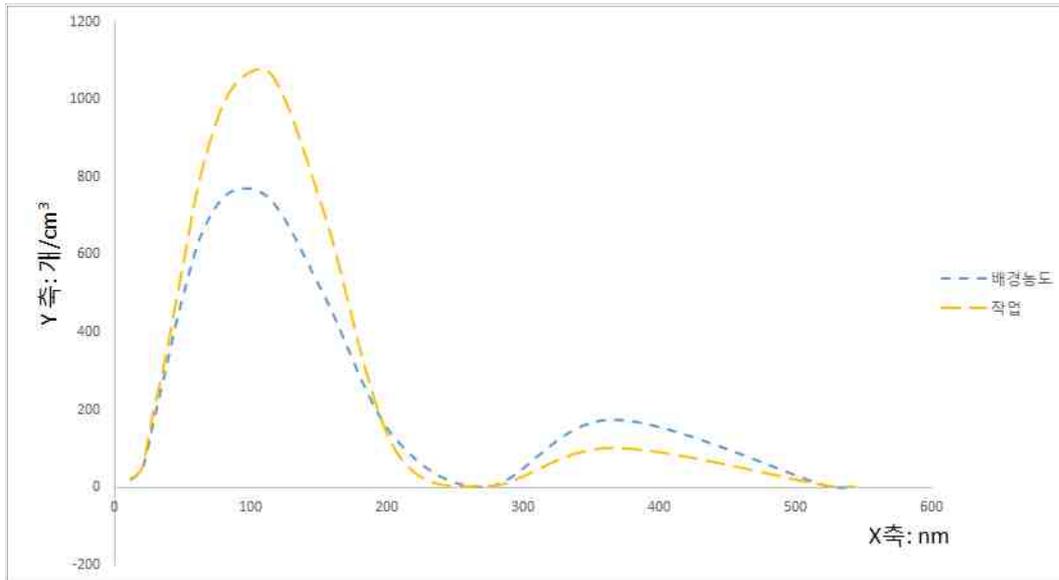


[그림 IV-7] 측정위치 모식도

## 4) 초미세입자 실시간 측정기기 분석결과

## (1) FDM-3D 프린터 사업장

사업장 B의 FDM-3D 프린터 작업장의 분포하는 입자 크기를 평균 입자수농도로 표현한 그래프이다[그림 IV-8]. 주입자의 분포는 모두 100~133.4 nm이었고, 전체, 배경, 작업 중의 입자수농도는 각각 1013 개/cm<sup>3</sup>, 735 개/cm<sup>3</sup>, 1061 개/cm<sup>3</sup>이었다. 200 nm 이상의 입자수농도는 100 개/cm<sup>3</sup>미만 이었다[그림 IV-8].



[그림 IV-8] FDM-3D 프린터의 입자 크기 분포

작업구분에 따른 입자수농도와 표면적농도를 나타낸 표이다<표 IV-15>. 측정된 입자크기분포는 10 nm~20 μm이며, 작업 중 산술평균 입자수농도는 5,029 개/cm<sup>3</sup>이고, 배경농도는 3,988 개/cm<sup>3</sup>이었다. 작업 중 산술평균 표면적농도는 121 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이고, 배경농도는 85 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다<표 IV-15>. 배경농도에 비해 작업 중 농도는 높았으나, 큰 차이를 보이지 않았다.

<표 IV-15> 사업장 B, FDM의 입자수농도와 표면적농도

측정인자	구분	공정별 농도 수준	
		작업	배경농도
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	5,029±1,374	3,988±576
	GM(GSD)	4,832(1.3)	3,961(1.2)
표면적농도 (μm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	AM±SD	121±28.4	85±10.2
	GM(GSD)	90(1.1)	85(1.1)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

시간에 따른 입자수농도와 표면적농도 변화 그래프이다[그림 IV-9]. 입자수농도와 표면적농도는 시간에 따른 특이한 변화를 보이지 않았다. 다소 시간이 지날수록 그 농도 수준은 감소하는 경향을 보이고 있다.



[그림 IV-9] 사업장 B, FDM 작업장의 시간별 입자수농도와 표면적농도

나노스캔 장비는 NSAM, APS 장비의 농도값과 높은 양의 상관관계(0.708, 0.634)를 보였다<IV-16>. 그리고 APS 장비와 NSAM 장비와도 높은 양의 상관관계(0.811)를 보였다.

**<표 IV-16> 사업장 B의 측정기기간의 상관관계**

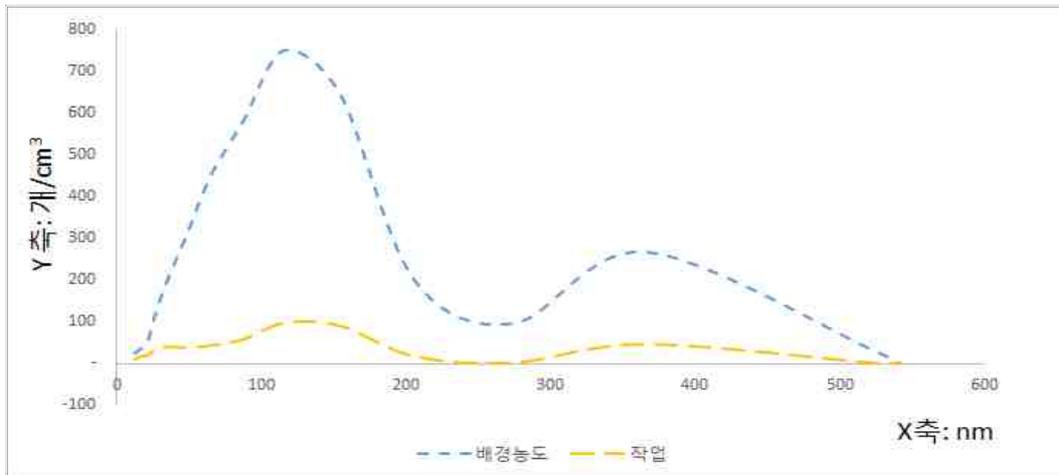
측정기기	나노스캔	APS	NSAM
나노스캔	1		
APS	0.634**	1	
NSAM	0.708**	0.811**	1

Aerodynamic Particle Sizer: APS, NanoScan SMPS: 나노스캔,  
Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

## (2) Metal-3D 프린터

사업장 B의 Metal-3D 프린터 작업장의 분포하는 입자 크기를 입자수농도로 표현한 그래프이다[그림 IV-8]. 주입자의 분포는 모두 100~133.4 nm이었고, 전체, 작업 전, 작업 중의 입자수농도는 각각 236 개/cm<sup>3</sup>, 749 개/cm<sup>3</sup>, 98 개/cm<sup>3</sup>이었다. Metal-3D 프린터 작업장은 세미 크린룸의 형태로 향온흡습기가 설치되어 있었다. 작업 중에는 공조설비가 가동되며 모든 입자의 크기에서 평균수농도가 100 개/cm<sup>3</sup>를 넘지 않았다[그림 IV-10].



**[그림 IV-10] Metal-3D 프린터의 입자 크기 분포**

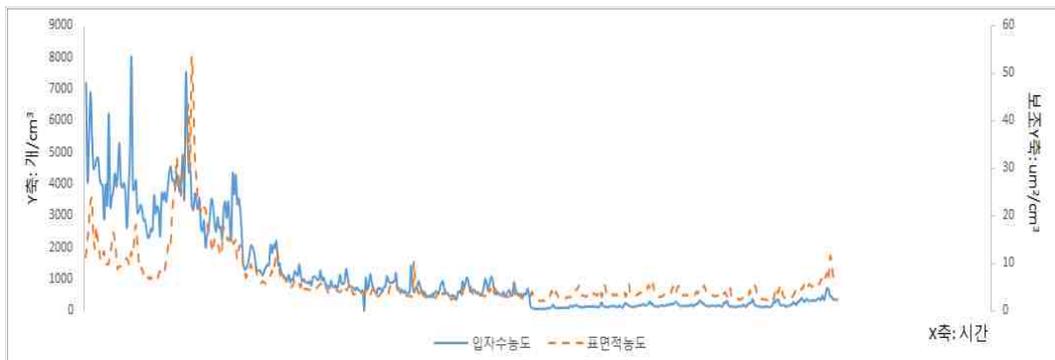
작업구분에 따른 입자수농도와 표면적농도를 나타낸 표이다<표 IV-17>. 배경의 평균 입자수농도는 3,734 개/cm<sup>3</sup>이며, 작업 중 전체 입자수농도는 523 개/cm<sup>3</sup>로 작업 중 평균 입자수농도가 배경농도보다 낮았다. 작업전의 평균 표면적농도는 16 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이며, 작업중 전체 표면적농도는 4 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>로 배경농도보다 낮은 수준이었다. 작업 중에는 크린룸 공조시스템이 입자수농도와 표면적농도에 영향을 준 것으로 보인다.

**<표 IV-17> 사업장 B, Metal 프린터의 입자수농도와 표면적농도**

측정인자	구분	공정별 농도 수준	
		배경농도	작업
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	3,734±1,107	523±432
	GM(GSD)	3,595(4.69)	365(2.43)
표면적농도 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	AM±SD	16±8.94	4±1.66
	GM(GSD)	14(1.60)	4(1.38)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

시간에 따른 입자수농도와 표면적농도를 나타낸 그래프이다[그림 IV-11]. 배경농도에 비해 작업 중 농도가 떨어지는 경향을 보였다.



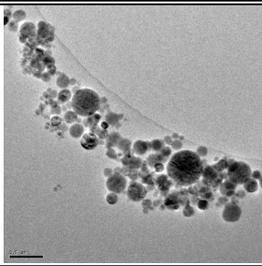
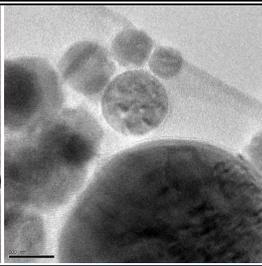
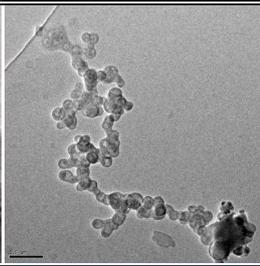
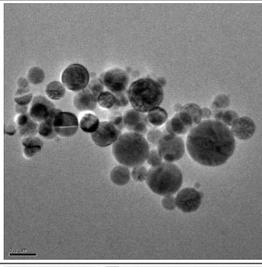
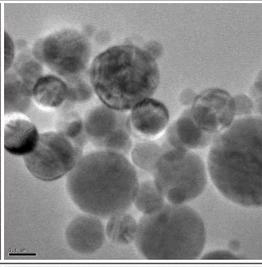
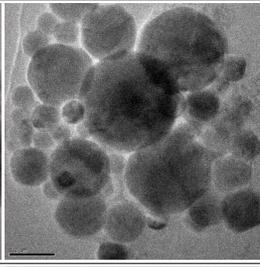
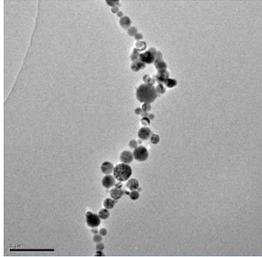
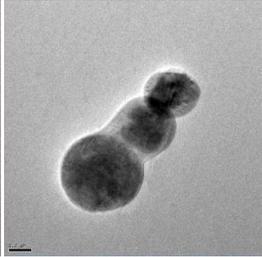
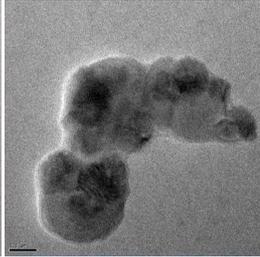
**[그림 IV-11] 사업장 B, Metal 프린팅 작업장의 시간별 입자수농도 및 표면적농도**

## 5) 투과전자현미경 분석결과

## (1) FDM-3D 프린터 사업장

첫 번째 시료는 작동 중에 초미세입자 측정지점에서 측정하였고, 이 시료에 서는 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였다. EDS분석결과 탄소 62%, 산소 6%, 실리카 7%, 철 15%이며, 은 4%, 망간 1%, 지르코늄 2%, 알루미늄, 황, 티타늄, 크롬 1%미만 이었다. 두 번째 시료는 수 리 및 점검 중 덮개를 개방하고 작업할 때 작업자 위치에서 측정하였고 이 시 료 또한 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였 다. EDS 분석결과 탄소 54%, 산소 15%, 실리카 2%, 철 21%이며, 황 1%, 망 간 2%, 나트륨 4%, 칼륨 1%미만 이었다. 세 번째 시료는 작업실 밖 복도에서 측정하였고, 3D 프린터 기기와의 거리는 4m정도였다. 이 시료에서도 서로 다 른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 3D 프린터 작 동할 때 측정된 이미지와 유사하였다. EDS 분석결과는 탄소 40%, 산소 16%, 실리카 3%, 철 22%이며, 은 6%, 망간 7%, 지르코늄 6%이었다<표 IV-18, 19>.

<표 IV-18> 사업장 B, FDM의 TEM 이미지

작업형태	사진 1	사진 2	사진 3
내부 (작동 중)			
내부 (점검 중)			
복도 (3D 프린터와 4m 거리)			

**<표 IV-19> 사업장 B, FDM의 EDS 분석 결과 (중량비, %)**

측정	C	O	Si	Fe	Au	Al	S	Ti	Cr	Mn	Zr	Na	K	Total
내부*	63	6	7	15	4	<1	<1	<1	<1	1	2	-	-	100
점검	54	15	2	21	-	-	1	-	-	2	-	4	<1	100
복도	40	16	3	22	6	-	-	-	-	7	6	-	-	100

\* 내부: 예열 작업 시 3D 프린터 내부

Cu 코팅 시편이므로 Cu의 성분은 제외, 1% 미만은 <1%로 함

**<표 IV-20> 사업장 B, Metal의 EDS 분석 결과 (중량비, %)**

측정	C	O	Si	Fe	Ca	Cr	Al	Zr	Total
내부*	60	18	5	16	<1	<1	-	-	100
점검	53	11	1	-	<1	-	33	2	100
복도	-	-	-	-	-	-	-	-	

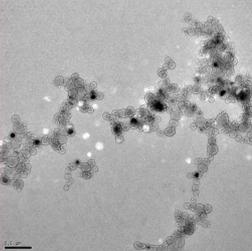
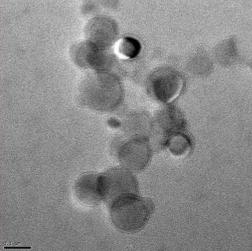
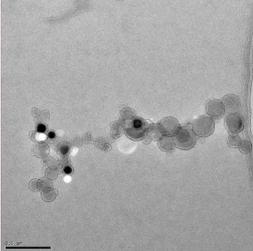
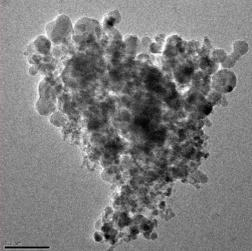
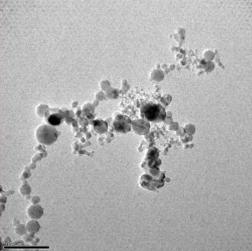
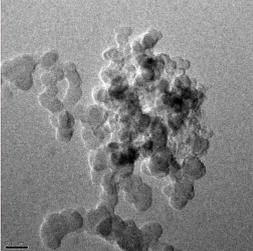
\* 내부: 예열 작업 시 3D 프린터 내부

Cu 코팅 시편이므로 Cu의 성분은 제외, 1% 미만은 <1%로 함

## (2) Metal-3D 프린터

첫 번째 시료는 작동 중에 초미세입자 측정지점에서 측정하였고, 이 시료에서는 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였다. EDS분석결과 탄소 60%, 산소 18%, 실리카 5%이며, 철 16% 칼슘, 크롬 1%미만 이었다. 두 번째 시료는 수리 및 점검 중 덮개를 개방하고 작업할 때 초미세입자 측정지점에서 측정하였고 이 시료 또한 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였다. EDS 분석결과 탄소 54%, 산소 11%, 실리카 1%이며, 알루미늄 33%, 지르코늄 2%, 칼슘 1%미만 이었다. 세 번째 시료는 작업실 밖 복도에서 측정하였고, 3D 프린터 기기와의 거리는 4m정도였다. 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하지 못하였다<표 IV-20, 21>.

<표 IV-21> 사업장 B, Metal 프린터의 TEM 이미지

작업형태	사진 1	사진 2	사진 3
<p>내부 (작업 중)</p>			
<p>내부 (점검 중)</p>			

## 6) 유기화합물 분석결과

### (1) FDM-3D 프린터 사업장

유기화합물은 개인시료와 지역시료로 채취하였다. 개인시료의 유기화합물 농도는 에탄올 12.0 ppb, 톨루엔 17.8 ppb이며, 아세톤, n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 헵탄, 메틸이소부틸케톤, 에틸벤젠, 시클로헥사논은 검출한계 미만이었고, 이소프로필 알코올, 트리클로로에틸렌, 크실렌, 스티렌은 불검출이었다. 지역시료는 에탄올 9.9 ppb, 이소프로필 알코올 154 ppb, 톨루엔 27.3 ppb, 에틸 벤젠 2.1 ppb, o-크실렌 6.3 ppb이며, 아세톤, n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 헵탄, 트리클로로에틸렌, 메틸이소부틸케톤, 시클로헥사논은 검출한계 미만이었고, p-, m-크실렌, 스티렌은 불검출이었다. ABS 필라멘트의 구성성분으로 스티렌이 있으나 공기 중 시료에서는 검출되지 않았다.

**<표 IV-22> 사업장 B, FDM의 유기화합물 분석결과**

물질\측정(시료수) 단위: ppb	개인(1)	지역(3)	노출기준(TWA) 단위: ppm
에탄올	12.0	9.9	1,000
이소프로필 알코올	-	154.9±130.1	200
톨루엔	17.8	27.3±24.6	50
에틸 벤젠	N.D.	2.1	100
o-크실렌	-	6.3±5.3	100
시클로헥사논	N.D.	N.D.	25

N.D. (not detected) : 검출한계 미만

검출한계 : 에탄올 0.16, 아세톤 0.50, 이소프로필 알코올 0.37, n-헥산 0.67, 에틸아세테이트 0.58, 벤젠 0.83, 헵탄 0.43, 트리클로로에틸렌 0.31, 메틸이소부틸케톤 0.62, 톨루엔 0.98, 에틸 벤젠 1.07, p-, m-크실렌 0.75, o-크실렌 0.75, 스틸렌 0.79, 시클로헥사논 0.71  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## (2) Metal-3D 프린터

개인시료의 유기화합물 농도는 에탄올 626.7 ppb, 아세톤 4.3 ppb, 이소프로필 알코올 398 ppb, 헵탄 7.0 ppb, 톨루엔 33.0 ppb, 에틸벤젠 16.0 ppb이며, n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 트리클로로에틸렌은 검출한계 미만이었으며, 메틸이소부틸케톤, 크실렌, 스틸렌은 불검출이었다. 지역시료의 유기화합물 농도는 에탄올 538 ppb, 아세톤 3.2 ppb, 이소프로필 알코올 372 ppb, 헵탄 2.9 ppb, 톨루엔 18.1 ppb, 에틸벤젠 8.4 ppb이며, n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 트리클로로에틸렌은 검출한계 미만이었으며, 메틸이소부틸케톤, 크실렌, 스틸렌, 시클로헥사논은 불검출이었다.

**<표 IV-23> 사업장B, Metal 프린터의 유기화합물 분석결과**

물질\측정(시료수) 단위: ppb	개인(1)	지역(3)	노출기준(TWA) 단위: ppm
에탄올	626.7±1.1	583.2±3.2	1,000
아세톤	4.3±1.6	3.2±1.0	500
이소프로필 알코올	398.3±28.3	372.6±30.9	200
헵탄	7.0±4.8	2.9±2.0	400
트리클로로에틸렌	N.D.	N.D.	10
톨루엔	33.0±17.8	18.1±4.2	50
에틸 벤젠	16.0±9.9	8.4±1.9	100

N.D. (not detected) : 검출한계 미만

검출한계 : 에탄올 0.16, 아세톤 0.50, 이소프로필 알코올 0.37, n-헥산 0.67, 에틸아세테이트 0.58, 벤젠 0.83, 헵탄 0.43, 트리클로로에틸렌 0.31, 메틸이소부틸케톤 0.62, 톨루엔 0.98, 에틸 벤젠 1.07, p-, m-크실렌 0.75, o-크실렌 0.75, 스틸렌 0.79, 시클로헥산은 0.71  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 7) 금속 분석결과

### (1) FDM-3D 프린터 사업장

중금속은 개인과 지역으로 시료를 채취하였다. 중금속 시료를 분석한 결과 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철이 미량으로 검출되었고, 티타늄, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 지르콘, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 주석, 금은 검출한계 미만이었다.

**<표 IV-24> 금속 분석결과(FDM)**

물질\측정(시료수) 단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	개인(1)	지역(3)	노출기준(TWA) 단위: $\text{mg}/\text{m}^3$
나트륨	3.3	1.9±0.2	-
마그네슘 (산화마그네슘)	0.5	0.5±0.1	10
알루미늄 (산화알루미늄)		0.3	10
칼륨	2.7	1.2±0.3	-
칼슘	0.3	0.4	-
크롬	0.2	0.2±0.01	-
철 (산화철)		0.3±0.04	5

검출한계 : 나트륨 0.2, 마그네슘 0.2, 알루미늄 0.3, 칼륨 0.3, 칼슘 0.3, 티타늄 0.3, 크롬 0.04, 망간 0.2, 철 0.2, 코발트 0.04, 니켈 0.1, 구리 0.1, 아연 0.2, 지르콘 0.06, 몰리브덴 0.1, 은 0.1, 카드뮴 0.1, 주석 0.2, 납 0.1  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## (2) Metal-3D 프린터

중금속은 개인과 지역으로 시료를 채취하였다. 중금속 시료를 분석한 결과 나트륨, 마그네슘, 칼륨, 칼슘, 크롬, 망간, 구리가 미량으로 검출되었고, 철, 티타늄, 코발트, 니켈, 아연, 지르콘, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 주석, 금은 검출한계 미만이었다. 알루미늄 분말을 소재로 사용하기 때문에 개인시료 중 알루미늄의 농도가 299.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났다.

**<표 IV-25> 금속 분석결과(Metal)**

물질\측정(시료수) 단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	개인(1)	지역(4)	노출기준(TWA) 단위: $\text{mg}/\text{m}^3$
나트륨	3.1	1.8±0.9	-
마그네슘 (산화마그네슘)	1.0	0.4±0.2	10
알루미늄 (산화알루미늄)	299.2	6.1±7.2	10
칼륨	1.9	1.3±0.8	-
칼슘	0.4	0.3	-
크롬	0.4	0.2±0.01	-
망간 (망간 및 무기화합물)	1.1	-	1
구리 (구리(흡))	0.2	-	1

검출한계 : 나트륨 0.2, 마그네슘 0.2, 알루미늄 0.3, 칼륨 0.3, 칼슘 0.3, 티타늄 0.3, 크롬 0.04, 망간 0.2, 철 0.2, 코발트 0.04, 니켈 0.1, 구리 0.1, 아연 0.2, 지르콘 0.06, 몰리브덴 0.1, 은 0.1, 카드뮴 0.1, 주석 0.2, 납 0.1  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 8) 기타인자

## (1) FDM-3D 프린터 사업장

직독식측정기기(Multi Pro)를 사용하여 기타 유해인자인 황화수소(H<sub>2</sub>S), 일산화탄소(CO), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 총휘발성유기화합물질(TVOC)를 측정하였다<표 IV-26>. TVOC농도는 FDM, Metal 사업장이 각각 138.1 ppb, 137.1ppb 수준이며, 이산화질소도 희박하게 검출 되었다.

**<표 IV-26> 사업장 B의 기타인자**

기타 유해인자	평균농도 (최대값)		
	FDM-3D	Metal-3D	배경농도
H <sub>2</sub> S (ppm)	—	—	—
CO (ppm)	—	—	—
NO (ppm)	—	—	—
NO <sub>2</sub> (ppm)	0.1(0.4)	0.1(0.2)	0.4(0.8)
SO <sub>2</sub> (ppm)	—	—	—
TVOC (ppb)	138.1(3740)	137.1(3180)	571.9(3940)

\* — : 불검출

### 3. 사업장 C

#### 1) 사업장 개요 및 공정

사업장 C는 Metal-3D 프린터와 FDM-3D 프린터를 개발하는 업무를 하고 있으며, 3D 프린터 소재도 함께 개발하고 있었다. 그리고 부산에 소재한 대학교의 3D Printing Lab을 운영하고 있었다[그림 IV-12]. 작업환경측정은 3D 프린터를 연구하는 연구소와 3D Printing Lab을 각각 실시하였다. 연구소에는 Metal-3D 프린터 1대와 FDM-3D 프린터 2대가 있었고, 측정당일에는 FDM-3D 프린터(붉은색-PLA 필라멘트, 대림화학) 1대만 가동하였고, 3D Printing Lab에는 FDM-3D 프린터(파랑색-PLA 필라멘트, Rokit) 8대 중 2대만 가동되고 있었다. 연구실과 사무실은 분리되어 있었지만, 측정 당일 출입문은 상시 열려있었다.



연구실



3D Printing Lab

[그림 IV-12] 사업장 C 사진

연구소의 3D 프린팅 운영조건은 적층 높이는 0.1 mm, 두께 1.0 mm이며, 밀도는 10%로 설정하였다. 프린팅 속도는 50 mm/sec, 노즐 온도는 230℃, 적층판의 온도는 65℃로 설정하였다<표 IV-27>.

**<표 IV-27> 사업장 C, 연구소의 FDM 운영조건**

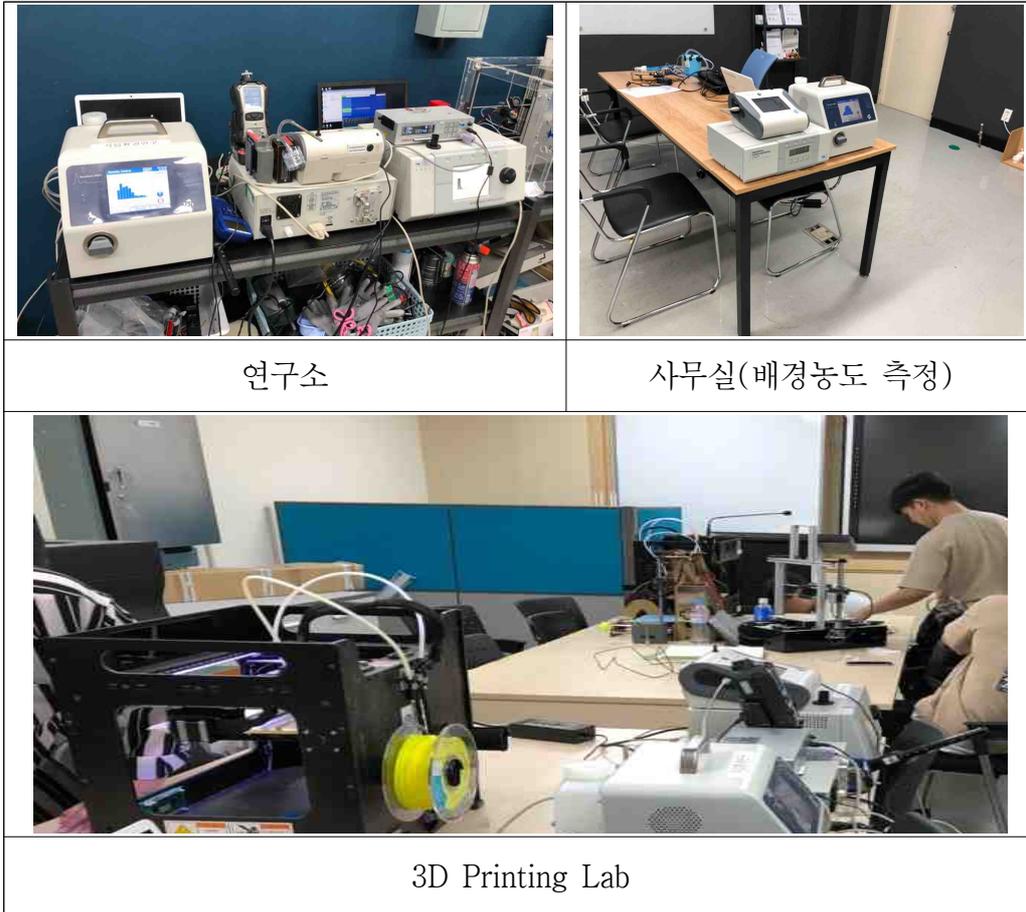
	운영조건	수치 및 정보	기타
기본 조건	적층 높이	0.1 mm	
	두께	1.0 mm	
	바닥/위 두께	0.6 mm	
	밀도	10%	
속도 및 온도조건	프린팅 속도	50 mm/sec	
	노즐 온도	230℃	
	배드 온도	65℃	
필라멘트	종류	PLA	대림화학 (2015년)
	지름	1.75 mm	
	색상	붉은색	

**<표 IV-28> 사업장 C의 작업시간 기록**

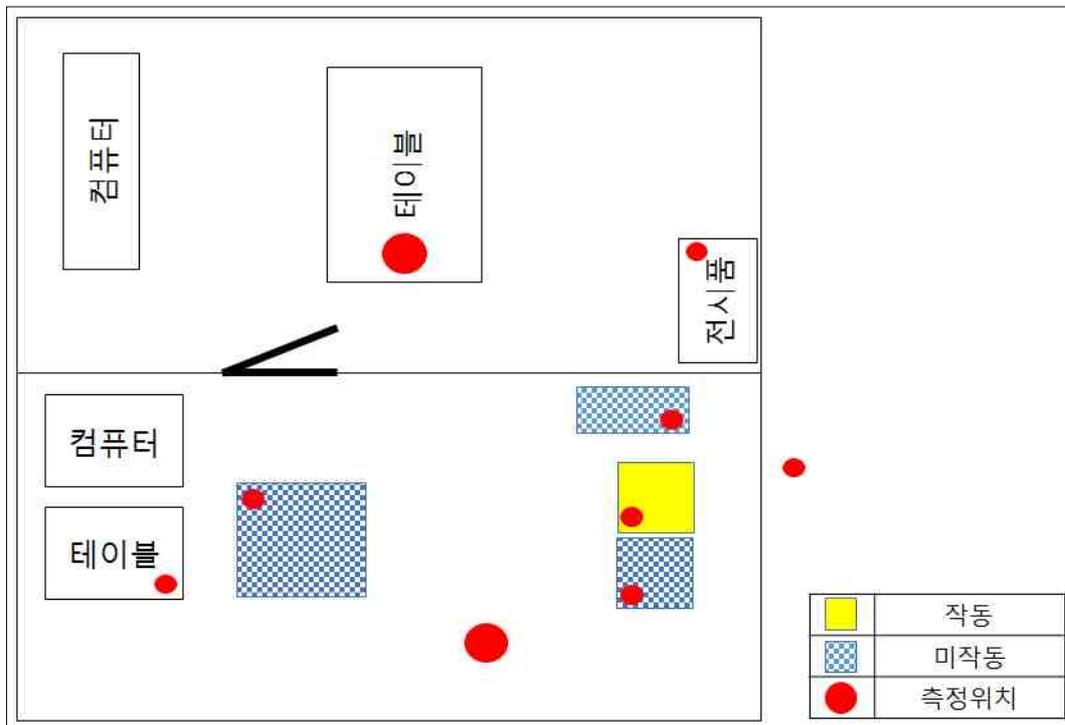
일	시간	공정	비고
8/7	09:40~09:57	작업 전 준비	
	09:57~10:07	적층판/노즐 예열	10분정도
	10:07~17:50	프린팅 작업	
8/8	08:00~09:20	배경농도	사무실에서 측정

**<표 IV-29> FDM-3D 프린터 사양(연구소)**

모델명	MOMENT
모델 사진	
유형	FDM
프린터 사이즈(mm)	300x360x348
적층두께 (mm)	0.02~0.3
토출속도 (mm/sec)	30~150
노즐지름 (mm)	0.4
최대 적층온도 (°C)	230
판 온도 (°C)	110
판 크기	-
프린터물 제작 크기 (mm)	145x145x160
전력 (V)	100-240V50/60Hz



[그림 IV-13] 사업장 C의 작업환경측정 사진



[그림 IV-14] 사업장 C의 연구소 모식도

(2) 3D Printing Lab

3D Printing Lab의 3D 프린팅 운영조건은 적층 높이는 0.2 mm, 두께 1.2 mm이며, 밀도는 100 %로 설정하였다. 프린팅 속도는 50 mm/sec, 노즐 온도는 230℃, 적층판의 온도는 90℃로 설정하였다<표 IV-30>.

**<표 IV-30> FDM-3D 프린팅 운영조건**

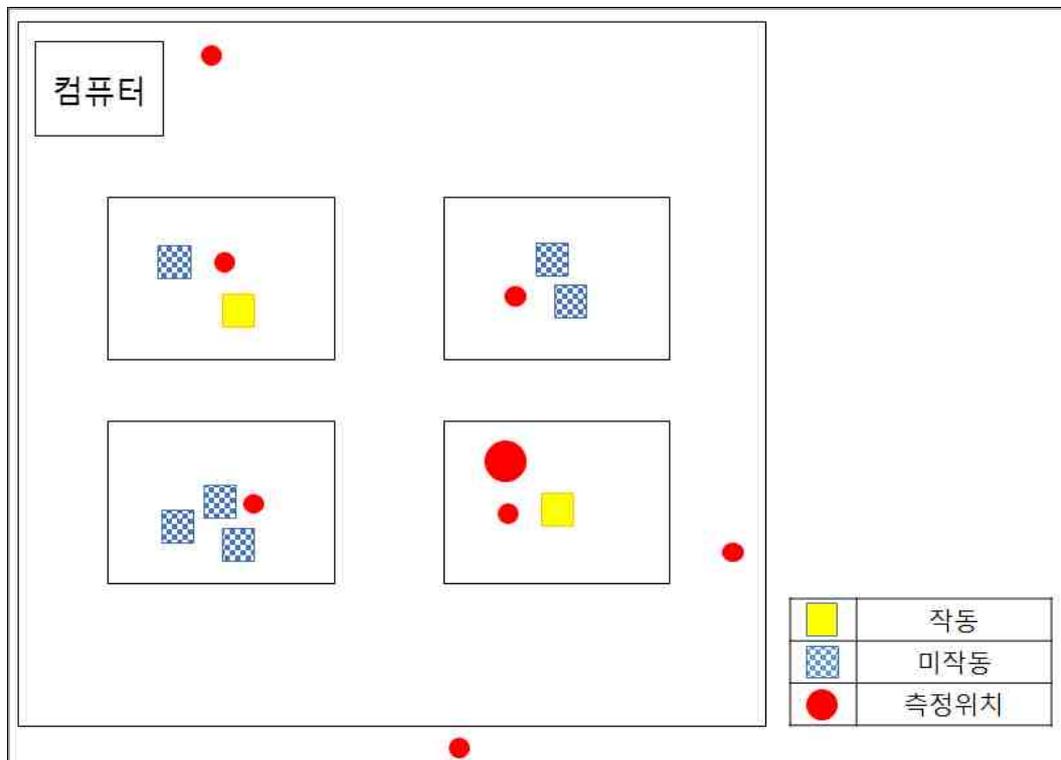
	운영조건	수치 및 정보	기타
기본 조건	적층 높이	0.2 mm	
	외벽 두께	1.2 mm	
	첫 번째 레이어 높이	0.2 mm	
	밀도	100%	
속도 및 온도조건	프린팅 속도	40~150 mm/sec	
	노즐 온도	230℃	
	배드 온도	90℃	
필라멘트	종류	PLA	ROKIT
	지름	1.75 mm	
	색상	파란색	

**<표 IV-31> FDM-3D 프린터 사양(3D Printing Lab)**

모델명	3D EDISON
모델 사진	
유형	FDM
프린터 사이즈(mm)	467x324x380
적층두께 (mm)	0.05~0.3
토출속도 (mm/sec)	40~200
노즐지름 (mm)	0.4
최대 적층온도 (°C)	200~350
판 온도 (°C)	90
판 크기	-
프린터물 제작 크기 (mm)	225x145x150
전력 (V)	190~220V, 50/60Hz, 3.0A

<표 IV-32> 작업시간 기록

일	시간	공정	비고
8/8	08:00~09:20	배경농도	사무실에서 측정
	09:30~10:00	작업 전	
	10:00~10:30	적층판 예열	* 노즐 수리 포함
	10:10~16:00	3D 프린팅 작업	

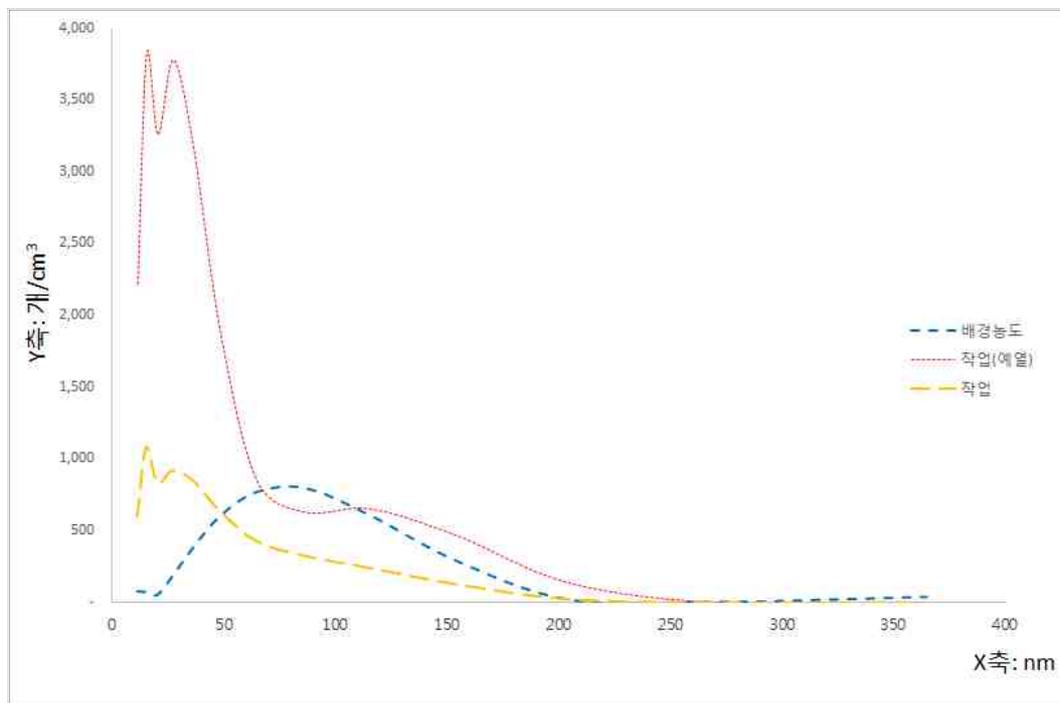


[그림 IV-15] 사업장 C의 3D Printing Lab 모식도

## 4) 초미세입자 실시간 측정기기 분석결과

## (1) 연구소

사업장 C의 연구소에 주로 분포하는 입자 크기를 나타낸 그래프이다[그림 IV-16]. 전체 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포는 13.3~17.8 nm이고, 967 개/cm<sup>3</sup>이었다. 배경농도의 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포도 75~100 nm 이고, 797 개/cm<sup>3</sup>이었다. 예열작업의 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포는 13.3~17.8 nm이고, 3,816 개/cm<sup>3</sup>이었다. 작업 중 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포는 13.3~17.8 nm이고, 1,084 개/cm<sup>3</sup>이었다. 200 nm 이상의 입자 크기에서는 100 개/cm<sup>3</sup> 미만의 입자수농도 분포를 보였다.



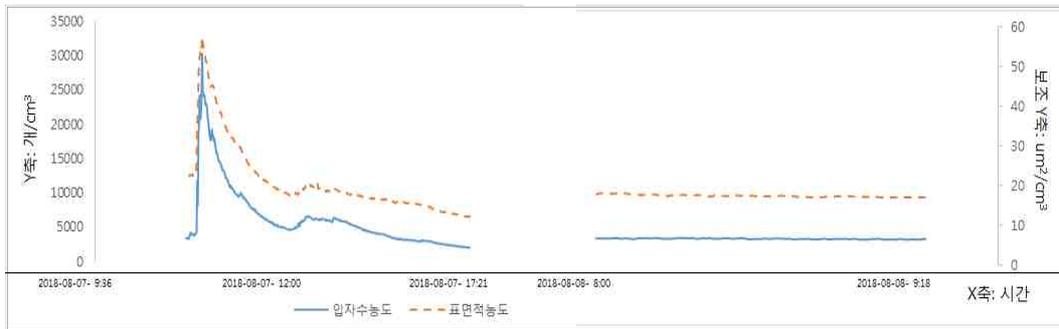
[그림 IV-16] 사업장 C, 연구소의 입자크기분포

**<표 IV-33> 사업장 C, 연구소의 입자수농도와 표면적농도**

측정인자	구분	공정별 농도 수준		배경농도
		작업 전	작업(예열)	
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	3815±306	6,447±4126 (20,844±6,228)	3,892±73
	GM(GSD)	3803(1.08)	5,316(1.80) (19,744(1.45))	3,892(1.02)
표면적농도 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	AM±SD	22±1.14	20±8.31 (49±7.35)	17±0.36
	GM(GSD)	22(1.05)	19(1.45) (49(1.18))	17(1.02)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

작업 전의 산술평균 입자수농도는 3815 개/cm<sup>3</sup>이며, 작업 중 입자수농도는 6,447 개/cm<sup>3</sup>이고, 이 중 예열작업의 입자수농도는 20,844 개/cm<sup>3</sup>이었다. 작업 전의 산술평균 표면적농도는 22  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이며, 작업 중 표면적농도는 20  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었지만, 예열작업 중 표면적농도는 49  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로 배경농도보다 높았다.



**[그림 IV-17] 시간에 따른 입자수농도와 표면적농도 변화**

예열작업이 시작되는 시점에서 급격히 입자수농도와 표면적 농도가 높아졌다. 배경농도는 옆 사무실에서 측정하였고, 최대한 3D 프린팅실에 향하는 문은 닫혀있었다. Pearson 단순상관관계를 통해서 장비간의 상관관계를 확인하였다. SMPS 장비는 NSAM 장비의 농도값과 높은 양의 상관관계(0.894)를 보였다<표 IV-34>.

**<표 IV-34> 사업장 C, 연구소의 측정기기간의 상관관계 분석**

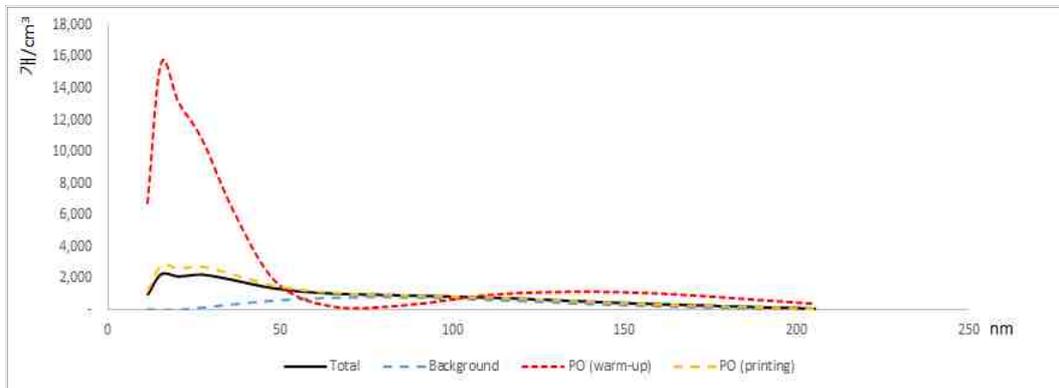
측정기기	SMPS	NSAM	OPC
SMPS	1		
NSAM	0.894**	1	
OPC	-0.123**	0.216**	1

NanoScan SMPS: SMPS, Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

(2) 3D Printing Lab

사업장 C의 3D Printing Lab에서 분포하는 입자 크기를 평균 입자수농도로 표현한 그래프이다[그림 IV-18]. 배경농도는 연구소와 동일하며, 작업 중에는 13.3~17.8 nm의 입자 분포가 가장 높았고 평균 입자수농도는 2,805 개/cm<sup>3</sup>이었다. 특히 예열 작업 중 평균 입자수농도는 배경농도의 같은 입자 크기를 비교했을 때, 큰 차이를 보였다(69 vs 15,535 개/cm<sup>3</sup>). 200 nm 이상의 입자 크기에서는 100 개/cm<sup>3</sup>미만의 평균 입자수농도를 보였다.



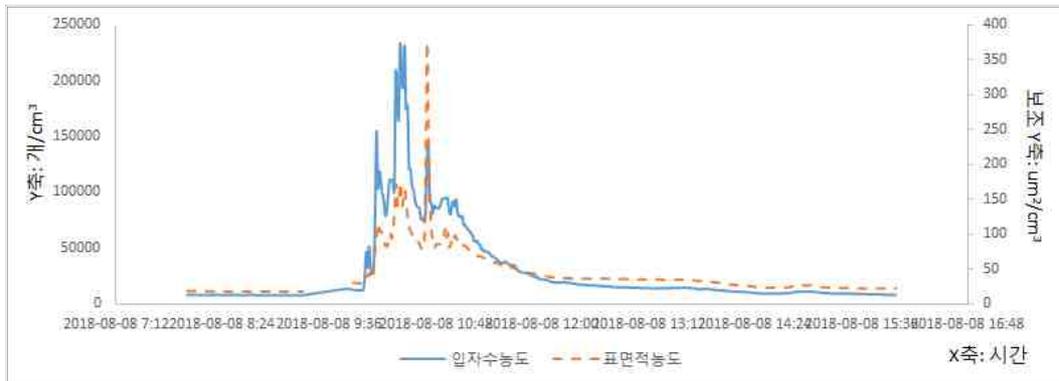
[그림 IV-18] 사업장 C, Lab의 입자크기분포

**<표 IV-35> 사업장 C, Lab의 입자수농도와 표면적농도**

측정인자	구분	공정별 농도 수준		배경농도
		작업 전	작업(예열)	
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	6,271±271	16,623±19,853 (57,502±31,180)	3,892±73
	GM(GSD)	6,266(1.01)	10,463(2.40) (47,850(1.96))	3,892(1.02)
표면적농도 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	AM±SD	29±1	47±36 (101±42)	17±0.4
	GM(GSD)	29(1.02)	40(1.72) (91(1.64))	17(1.02)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

작업 전의 산술평균 입자수농도는 6,271 개/cm<sup>3</sup>이며, 작업 중 입자수농도는 16,623 개/cm<sup>3</sup>이고, 이 중 예열작업의 입자수농도는 57,502 개/cm<sup>3</sup>이었다. 작업 전의 산술평균 표면적농도는 29  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이며, 작업 중 표면적농도는 47  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이며, 예열작업 중 표면적농도는 101  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로 나타났다.



[그림 IV-19] 사업장 C, Lab의 시간별 입자수농도와 표면적농도

예열 작업 도중에 3D 프린터 작동의 문제가 있어서 예열 작업을 몇 번 반복하였다. 그에 따라 입자수농도의 차이를 보였다. Pearson 단순상관관계를 통해서 장비간의 상관관계를 확인하였다. SMPS 장비는 NSAM 장비의 농도값과 높은 양의 상관관계(0.894)를 보였다<표 IV-36>.

<표 IV-36> 기기간의 상관관계 분석

측정기기	나노스캔	OPC	NSAM
나노스캔	1		
OPC	0.384**	1	
NSAM	0.881**	0.356**	1

NanoScan SMPS: 나노스캔, Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM, Optical particle sizer: OPC

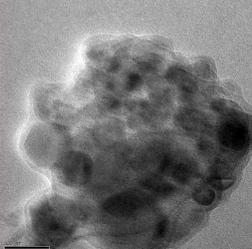
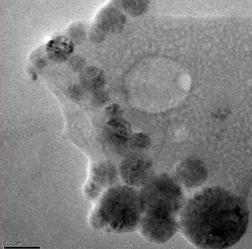
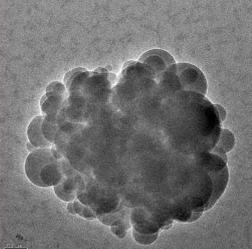
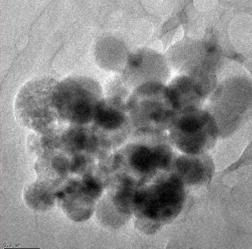
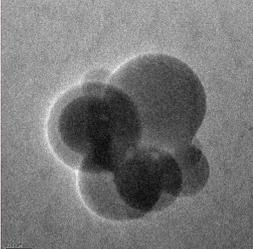
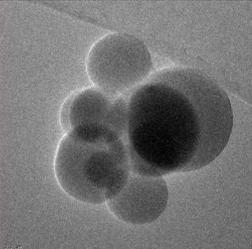
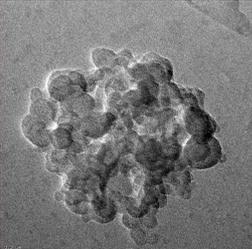
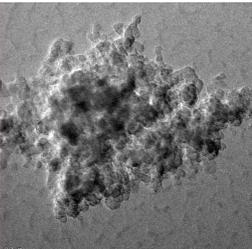
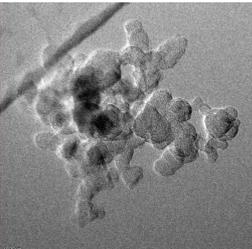
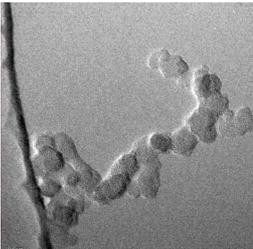
\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

## 5) 투과전자현미경 분석결과

## (1) 연구소

첫 번째 시료는 예열 작업 시에 3D 프린터 내부에서 측정된 것이다. 시료에서 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰할 수 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 87%, 산소 4%, 실리카 2%이며, 철 3%, 나트륨 3%, 마그네슘, 염소, 칼슘, 아연, 지르코늄 1%미만 이었다. 두 번째 시료는 작동 중에 초미세입자 측정지점에서 측정하였고, 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 예열 작업 때와 비슷한 모양의 이미지였다. EDS분석결과 탄소 83%, 산소 8%, 실리카 7%이며, 지르코늄 2%이었다. 세 번째 시료는 옆 사무실에서 작동 중에 측정하였고, 시료에서 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰할 수 있었다. 3D 프린터 사용할 때 사무실 문은 항상 열려 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 86%, 산소 5%, 실리카 2%이며, 나트륨 1%, 지르코늄 5%, 칼슘, 황 1%미만이었다. 네 번째 시료는 작업실 밖 복도에서 측정하였고, 3D 프린터 기기와의 거리는 4m정도였다. 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 3D 프린터 작동할 때 측정된 이미지와 유사하였다. EDS 분석결과는 탄소 89%, 산소 5%, 실리카 2%이며, 지르코늄 4%, 크롬 1% 미만 이었다<표 IV-37, 38>.

<표 IV-37> TEM 이미지

측정위치	사진 1	사진 2	사진 3
프린터 내부			
작업실 내 (초미세입자 측정위치)			
사무실			
복도 (3D 프린터와 4m 거리)			

**<표 IV-38> 사업장 C, 연구소의 EDS 분석 결과(중량비, %)**

측정	C	O	Si	Fe	Na	Mg	Cl	Ca	Zn	Zr	Cr	S	Total
내부*	87	4	2	3	3	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	100
실내	83	8	7	-	-	-	-	-	-	2	-	-	100
배경 (사무실)	86	5	1	-	1	-	-	<1	-	5	-	<1	100
복도	89	5	2	-	-	-	-	-	-	4	<1	-	100

\* 내부: 예열 작업 시 3D 프린팅 내부

Cu 코팅 시편이므로 Cu의 성분은 제외, 1% 미만은 <1%로 함

**<표 IV-39> 사업장 C, 3D Printing Lab의 EDS 분석 결과(중량비, %)**

측정	C	O	Si	Zr	Na	S	Cl	Ca	Cr	Fe	Co	Total
내부*	79	3	1	17	-	-	-	-	-	-	-	100
실내	93	3	2	2	<1	-	-	-	-	-	-	100
복도	95	2	1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	100

\* 내부: 예열 작업 시 3D 프린팅 내부

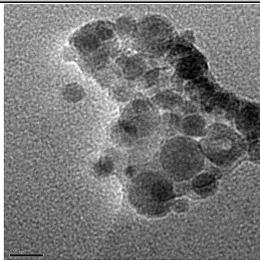
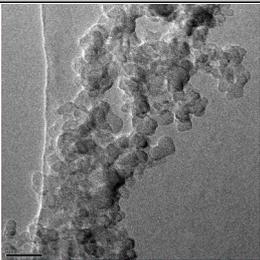
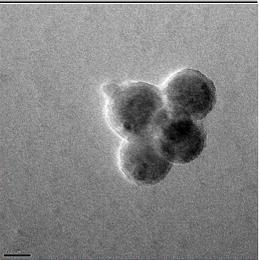
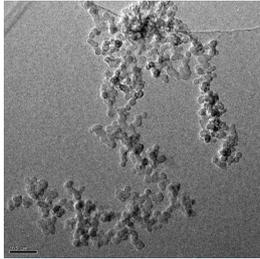
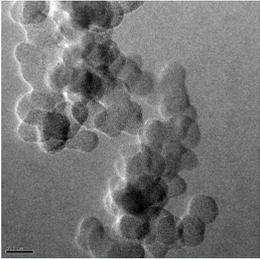
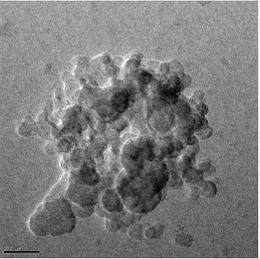
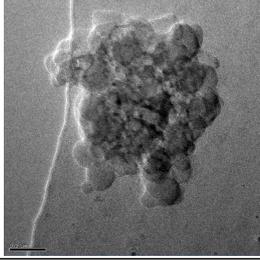
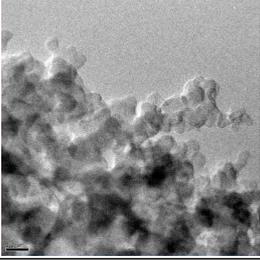
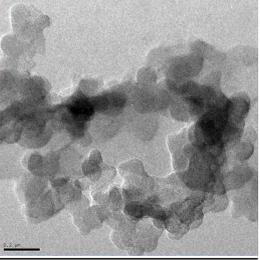
Cu 코팅 시편이므로 Cu의 성분은 제외, 1% 미만은 <1%로 함

## (2) 3D Printing Lab

첫 번째 시료는 예열 작업 시에 3D 프린터 내부에서 측정된 것이다. 시료에서 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰할 수 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 79%, 산소 3%, 실리카 1%, 지르코늄 17%이었다. 두 번째 시료는 작동 중에 초미세입자 측정지점에서 측정하였고, 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 예열 작업 때와 비슷한 모양의 이미지였다. EDS분석결과

탄소 93%, 산소 3%, 실리카 2%, 지르코늄 2%이며, 나트륨 1%미만 이었다. 세 번째 시료는 작업실 밖 복도에서 측정하였고, 3D 프린터 기기와의 거리는 4m정도였다. 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 3D 프린터 작동할 때 측정된 이미지와 유사하였다. EDS 분석결과는 탄소 95%, 산소 2%, 실리카, 지르코늄, 나트륨, 황, 염소, 칼슘, 크롬, 철, 코발트 1%미만 이었다<표 IV-39, 40>.

<표 IV-40> TEM 이미지

작업형태	사진 1	사진 2	사진 3
프린터 내부			
작업실 내 (초미세입자 측정위치)			
복도 (3D 프린터와 4m 거리)			

## 6) 유기화합물 분석결과

## (1) 연구소

개인시료의 유기화합물 농도는 에탄올 7.5 ppb, 이소프로필 알코올 138.6 ppb, 메틸이소부틸케톤 6.7 ppb, 톨루엔 36.0 ppb, 에틸 벤젠 7.4 ppb, o-크실렌 28.1 ppb이며, 아세톤은 검출한계 미만이었고, 트리클로로에틸렌, p-, m-자엘렌, 스틸렌, 사이클로헥사논은 검출되지 않았다. n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 헵탄은 모두 검출한계 미만이었다. 지역시료는 에탄올 9.6 ppb, 이소프로필 알코올 99.7 ppb, 메틸이소부틸케톤 6.9 ppb, 톨루엔 35.0 ppb, 에틸 벤젠 7.5 ppb, p-, m-크실렌 3.4 ppb, o-크실렌 29.0 ppb이며, 트리클로로에틸렌, 스틸렌, 시클로헥사논은 불검출이었다. 사무실에서 측정한 지역시료의 유기화합물 농도는 에탄올 259 ppb, 이소프로필 알코올 845 ppb, 톨루엔 26.0 ppb, 에틸벤젠 5.0 ppb, p-, m-크실렌 9.1 ppb이며, 아세톤, 메틸 이소부틸 케톤, o-크실렌은 검출한계 미만이었고, 트리클로로에틸렌, 스틸렌은 검출되지 않았다.

**<표 IV-41> 사업장 C, 연구소의 유기화합물 분석결과**

물질\측정(시료수) 단위: ppb	개인(1)	지역(4)	사무실(2)	노출기준(TWA) 단위: ppm
에탄올	7.5	9.6±5	259.4±358	1,000
아세톤	N.D.	0.7	N.D.	500
이소프로필 알코올	138.6	99.7±67	845.7±1063	200
메틸이소부틸케톤	6.7	6.9±0.1	N.D.	50
톨루엔	36.0	35.0±4	26.0	50
에틸 벤젠	7.4	7.5±0.3	5.0	100
p-, m-크실렌	-	3.4	9.1	100
o-크실렌	28.1	29.0	N.D.	100
시클로헥사논	-	-	N.D.	25

N.D. (not detected) : 검출한계 미만

검출한계 : 에탄올 0.16, 아세톤 0.50, 이소프로필 알코올 0.37, n-헥산 0.67, 에틸아세테이트 0.58, 벤젠 0.83, 헵탄 0.43, 트리클로로에틸렌 0.31, 메틸이소부틸케톤 0.62, 톨루엔 0.98, 에틸 벤젠 1.07, p-, m-크실렌 0.75, o-크실렌 0.75, 스틸렌 0.79, 시클로헥사논 0.71  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## (2) 3D Printing Lab

개인시료의 유기화합물 농도는 이소프로필 알코올 30.3 ppb,이며, 지역시료는 에탄올 6.6 ppb, 이소프로필 알코올 113.9 ppb, 메틸이소부틸케톤 2.7 ppb, 톨루엔 4.8 ppb,이었다.

**<표 IV-42> 사업장 C, Lab의 유기화합물 분석결과**

물질\측정(시료수) 단위: ppb	개인(1)	지역(6)	노출기준(TWA) 단위: ppm
에탄올	-	6.6±4.2	1,000
이소프로필 알코올	30.3	113.9±185.0	200
메틸이소부틸케톤	N.D.	2.7±0.2	50
톨루엔	N.D.	4.8±0.2	50

N.D. (not detected) : 검출한계 미만

검출한계 : 에탄올 0.16, 아세톤 0.50, 이소프로필 알코올 0.37, n-헥산 0.67, 에틸아세테이트 0.58, 벤젠 0.83, 헵탄 0.43, 트리클로로에틸렌 0.31, 메틸이소부틸케톤 0.62, 톨루엔 0.98, 에틸 벤젠 1.07, p-, m-크실렌 0.75, o-크실렌 0.75, 스틸렌 0.79, 시클로헥사논 0.71  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 7) 금속 분석결과

중금속은 개인과 지역으로 시료를 채취하였다. 중금속 시료를 분석한 결과 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철이 미량으로 검출되었고, 티타늄, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 지르콘, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 주석, 금은 검출한계 미만이었다.

**<표 IV-43> 금속 분석결과**

물질\측정(시료수) 단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	개인(1)	연구소(6)	Lab(5)	노출기준(TWA) 단위: $\text{mg}/\text{m}^3$
나트륨	1.31	2.5±1.4	2.1±0.9	-
마그네슘 (산화마그네슘)	0.31	0.5±0.2	0.6±0.1	10
알루미늄 (산화알루미늄)	-	0.3	0.3	10
칼륨	0.32	1.6±1.5	1.3±0.3	-
칼슘	-	0.3±0.1	0.4±0.2	-
크롬	0.11	0.1±0.01	0.1±0.02	-
구리 (구리(흙))	0.75	-	-	1
철 (산화철)	-	-	0.3±0.03	5

검출한계 : 나트륨 0.2, 마그네슘 0.2, 알루미늄 0.3, 칼륨 0.3, 칼슘 0.3, 티타늄 0.3, 크롬 0.04, 망간 0.2, 철 0.2, 코발트 0.04, 니켈 0.1, 구리 0.1, 아연 0.2, 지르콘 0.06, 몰리브덴 0.1, 은 0.1, 카드뮴 0.1, 주석 0.2, 납 0.1  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 8) 기타인자

직독식 측정기기(Multi Pro)를 사용하여 기타 유해인자인 황화수소(H<sub>2</sub>S), 일산화탄소(CO), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 총휘발성유기화합물질(TVOC)를 측정하였다.

**<표 IV-44> 사업장 C의 기타 인자 농도**

기타 유해인자	연구소	3D Printing Lab
H <sub>2</sub> S (ppm)	—	—
NO (ppm)	—	—
NO <sub>2</sub> (ppm)	0.1	—
SO <sub>2</sub> (ppm)	—	—
TVOC (ppb)	30(660)	50(550)
CO <sub>2</sub> (ppm)	961	—
CO (ppm)	—	—
RH(%)	54.6	—
온도 (°C)	22.4	—

\* — : 불검출

#### 4. 사업장 D

##### 1) 사업장 개요 및 공정

사업장 D는 여러 종류의 3D 프린팅 기기를 한 대씩 분리하여 운영하고 있었다. 이 사업장에서는 주문 된 시제품을 생산하는 서비스를 제공하며, 교육 등 다양한 사업을 하고 있었다. 보유하고 있는 3D 프린터로는 DLP, Inkjet, SLA, Polyjet, 산업용 FDM, SLS 방식의 3D 프린터를 보유하고 있었다.

##### (1) 작업장 1 (DLP, 잉크젯-3D 프린터)

DLP는 Digital light processing로 광중합(Vat photopolymerization)의 한 방법이다. 이 기술은 액체재료에 강한 UV레이저로 광경화하는 방식이다. 잉크젯 3D 프린터는 접착제 분사 방법으로 잉크젯 헤드에서 액상의 접착제를 분사하여 분말 소재와 결합하는 방식이다. DLP-3D 프린팅 작업은 3단계로 진행되며, 소재를 투입하는 소재 투입공정, 출력 공정, 후처리 공정으로 나눈다. 후처리 방법은 출력물에 붙어있는 플랫폼을 먼저 제거하고, 알코올(에탄올 또는 이소프로필알콜)에 담궈서 불필요한 부분을 제거한다. 이때 잘 떨어지지 않는 부분은 칫솔 등의 부드러운 솔을 이용하여 제거한다. 필요시에는 경화기에 넣어서 경화하는 방법도 있다. 소재를 투입하는 작업을 할 때, 실내에는 국소배기장치가 없어서 작업자의 노출이 우려된다. 잉크젯-3D 프린터는 4단계로 진행되며, 배드에 파우더를 도포하고 재료량을 확인하는 도포 공정, 출력공정, 파우더 속 출력물을 클리닝 룸으로 옮겨 처리하는 후처리 공정, 본드 도포 후 건조하는 건조 공정이다. 후처리 공정은 플랫폼에서 파우더를 제거하여 출력물을 클리닝 룸으로 옮긴 후, 콤프레샤를 이용하여 파우더를 제거한다. 파우더가 제거된 출력물에 본드를 도포한 후 건조한다. 이 때 후처리 공정은 밀폐된 공간에서 진행되지만, 준비 단계에서 파우더를 적층판에 깔 때와 파우더 속에서 출력물을

클리닝 룸으로 옮길 때, 다량의 파우더가 공기 중으로 발생하는 것을 육안으로 관찰하였다.

**<표 IV-45> 사업장 D의 DLP,잉크젯-3D 프린터**

3D 프린터	3D 프린터 사양	소재
	<p>제조사 : 캐리마</p> <p>모델명 : MasterEV</p> <p>빌드크기 : 200x112x200 mm</p> <p>해상도 : 1920x1080 (16.9)</p>	<p>ABS Like (3DK-A83B)</p>
	<p>제조사 : 3DSYSTEMS</p> <p>모델명 : Projet660pro</p> <p>빌드크기 : 254x381x203 mm</p> <p>적층 : 0.1 mm</p>	<p>석고파우더</p>

## (2) 작업장 2 (FDM-3D 프린터)

이 사업장은 교육용 등의 목적으로 사용하는 FDM-3D 프린터와 달리 상업용 3D 프린터를 사용하고 있었다. 작업은 4단계로 진행되며, 장비를 예열하고 배드에 얇은 판을 부착하는 준비 공정, 출력공정, 얇은 판에서 출력물을 제거하는 공정, 후처리 공정으로 나뉜다. 후처리 작업은 칫솔 등을 이용하여 출력물의 서포트를 제거한 후 에코웍스를 물에 적정 비율로 녹인 후 출력물을 담궈 나머지 서포트를 제거한다.

**<표 IV-46> 사업장 D의 산업용 FDM-3D 프린터**

3D 프린터	3D 프린터 사양	소재
	제조사 : Stratasys	
	모델명 : Fortus 900mc	ABS-m <sup>3</sup> O
	빌드크기 : 914x609x914 mm	(서포트 재료 SR-30)
	적층 두께 : 0.254 mm	

## (3) 작업장 3 (SLA-3D 프린터)

SLA는 Stereolithography apparatus의 줄임말로 DLP-3D 프린터와 같은 방식인 광중합 방식으로 작업공정은 동일하다. 후처리 방식은 먼저 카트를 이용하여 장비에서 출력물을 제거한 후 세척기에 넣는다. 세척용액(TPM용액)을 물과 적절한 비율로 희석하여 사용한다. 그 후, 세척기에서 꺼내서 세척용액을 알콜로 제거한다. 필요시 경화기에 넣어 경화시켜준다.

**<표 IV-47> 사업장 D의 SLA-3D 프린터**

3D 프린터	3D 프린터 사양	소재
	제조사 : 3DSYSTEMS	
	모델명 : ProX800	PP Like 광경화성수지
	빌드크기 : 650x750x550 mm	(Accura 25)
	적층 두께 : 0.00127 mm	

## (4) 작업장 4 (Polyjet-3D 프린터)

Polyjet-3D 프린터 방식은 재료분사 방식의 3D 프린터이다. 방식은 잉크젯 헤드를 움직여서 액상을 선택적으로 분사하는 방식이다. 작업공정은 4단계로 이루어지며, 플랫폼 청소 및 재료량 확인하는 준비공정, 출력공정, 헤라를 이용하여 플랫폼에서 출력물을 제거하는 공정, 후처리공정으로 이루어진다. 후처리 공정은 도구(핀셋, 헤라)를 이용하여 최대한 서포트를 제거한 후 Waterjet을 이용하여 서포트를 제거한다. 이때 제거되지 않은 부분은 핀셋으로 한 번 더 제거한다.

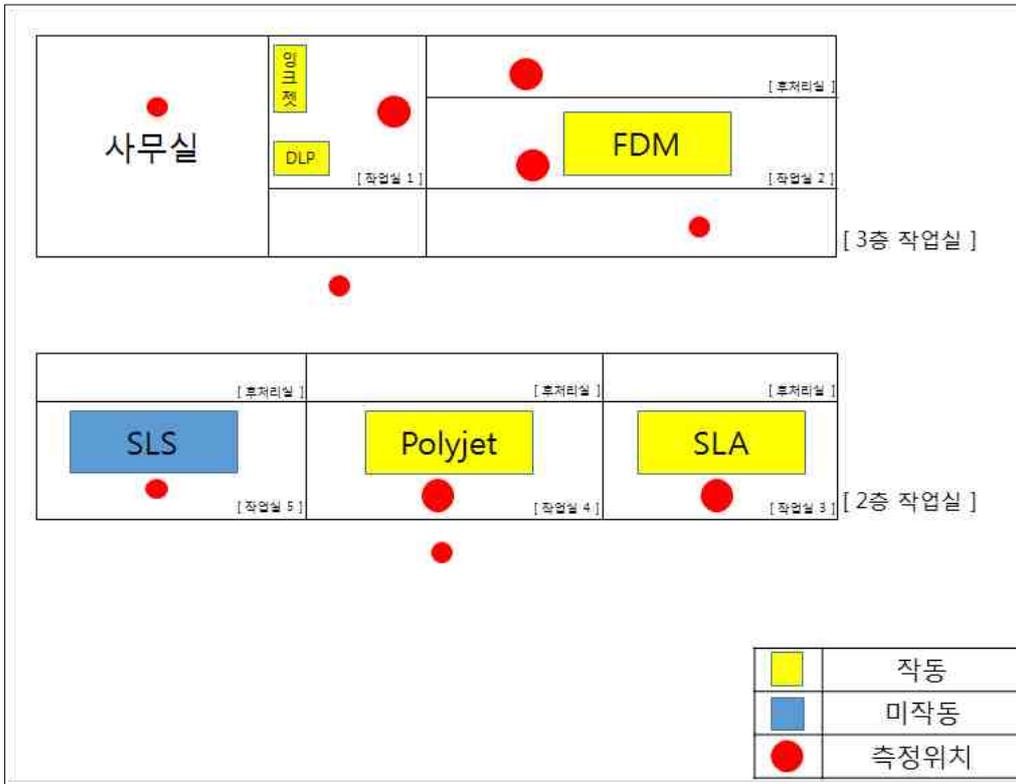
**<표 IV-48> 사업장 D의 Polyjet-3D 프린터**

3D 프린터	3D 프린터 사양	소재
	제조사 : Stratasys	
	모델명 : Objet500 Connex3	아크릴성 ABS
	빌드크기 : 490x390x200 mm	(서포트 재료 sup705)
	적층 두께 : 0.03 mm	

**<표 IV-49> 사업장 D의 작업시간 기록**

일	시간	공정	비고
8/21	10:19~10:40	DLP 레진 투입 잉크젯 파우더 도포	작업실 1
	10:40~13:10	출력 실시	
	16:02~14:15	후처리 (DLP 출력물)	후처리실
	14:15~17:02	후처리 후 농도확인	
"	13:18~14:00	작업전 농도	작업실 2
	14:00~14:20	장비 예열	
	14:20~15:40	출력	
	15:40~16:00	완료 후 장비 open	
"	17:10~18:01	출력	작업실 3 (작동 중 측정 함)
8/21	18:21~19:10	작동전	작업실 4
	19:10~20:40	서포트 재료 적층	
8/22	20:40~07:00	출력	

\* 작업실 5는 작업이 없는 관계로 직독식기기 측정은 하지 않음



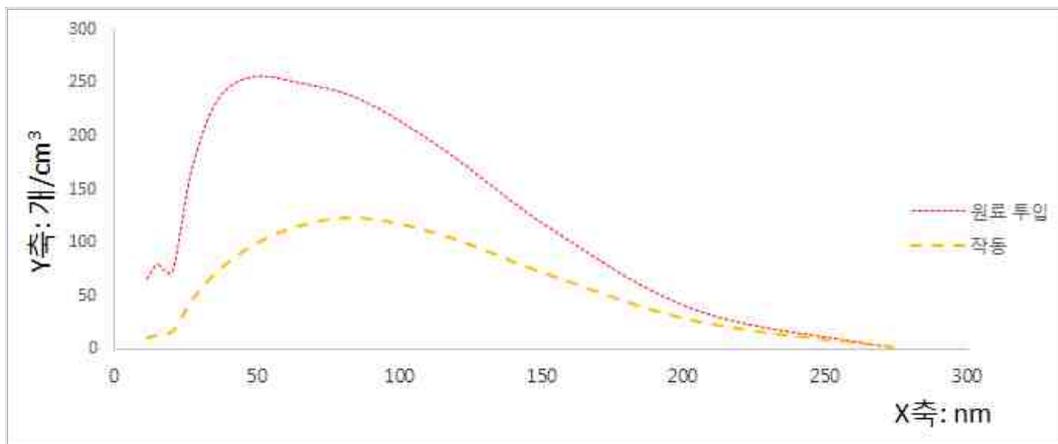
[그림 IV-20] 사업장 D의 연구소 모식도

## 4) 초미세입자 실시간 측정기기 분석결과

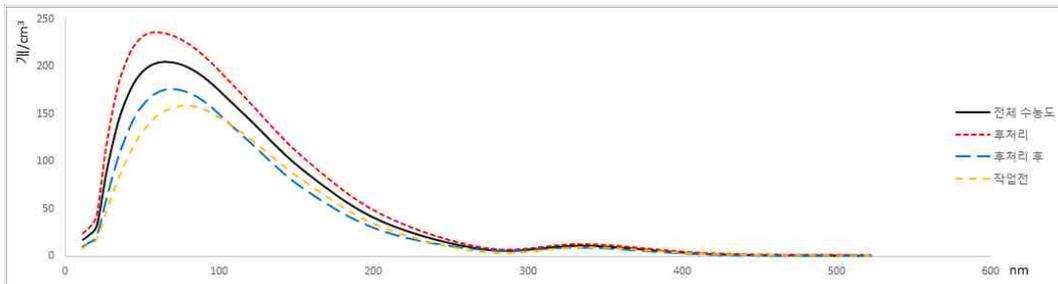
## (1) 작업장 1

작업장 1의 주로 분포하는 입자 크기를 나타낸 그래프이다. 전체 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포는 56.2~75 nm이고, 134 개/cm<sup>3</sup>이었다. 원료 투입시의 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포도 56.2~75 nm이고, 256 개/cm<sup>3</sup>이었고 작업 중 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포는 75~100 nm이고, 124 개/cm<sup>3</sup>이었다. 133 nm 이상의 입자 크기에서는 100 개/cm<sup>3</sup>미만의 수농도 분포를 보였고 대체적으로 낮은 입자수 농도를 보였다[그림 IV-21].

후처리실의 주로 분포하는 입자 크기를 나타낸 그래프이다[그림 IV-22]. 평균수농도가 가장 높은 입자크기분포는 56.2~75 nm이었다. 대부분의 입자크기별 입자수농도는 200 개/cm<sup>3</sup> 미만의 분포를 나타낸다.



[그림 IV-21] 사업장 D, 작업장 1의 입자크기분포



[그림 IV-22] 후처리 작업의 입자크기분포도

<표 IV-50> 사업장 D, 작업장 1의 입자수농도와 표면적농도

측정인자	구분	공정별 농도 수준		전체농도
		원료투입	작업 전체	
수농도 (개/cm³)	AM±SD	1,730±340	720±186	850±399
	GM±GSD	1,700±1.21	701±1.26	785±1.45
표면적농도 (µm²/cm³)	AM±SD	12±1.42	7±1.21	7±2.25
	GM±GSD	12±1.13	6±1.21	6±1.34

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

전체 산술평균 입자수농도는 850 개/cm³이며, 원료 투입 시 입자수농도는 1,730 개/cm³이고, 작업 시의 입자수농도는 720 개/cm³이었다. 전체 산술평균 표면적농도는 7 µm²/cm³이며, 원료 투입 시 표면적농도는 12 µm²/cm³이고 작업시의 표면적농도는 6 µm²/cm³으로 나타났다.

**<표 IV-51> 사업장 D, 작업장 1의 후처리 시의 입자수농도와  
표면적농도**

측정인자	구분	공정별 농도 수준			전체농도
		작업 전	후처리	후처리 후	
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	873±34	1,430±328	968±118	1,208±353
	GM(GSD)	872(1.04)	1,396(1.24)	962(1.12)	1,163(1.31)
표면적 농도 (μm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	AM±SD	32±0.5	35±1.6	33±0.7	34±1.8
	GM(GSD)	32(1.01)	35(1.05)	33(1.02)	34(1.05)

후처리 평균 입자수농도는 1,430 개/cm<sup>3</sup>이며, 후처리 전·후 입자수농도는 각각 873, 968 개/cm<sup>3</sup>이고, 전체 입자수농도는 1,208 개/cm<sup>3</sup>이었다. 후처리 평균 표면적농도는 35 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이며, 후처리 전·후 표면적농도는 각각 32, 33 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이고 전체 표면적농도는 34 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다.



**[그림 IV-23] 사업장 D, 작업장 1의 시간별 입자수농도와 표면적농도**

원료 투입 시 입자수농도가 높게 형성되다가 작업 시에는 낮은 입자수농도를 보였다. 후처리 작업실이 별도로 있고, 3개의 알콜(에탄올, 이소프로필알콜)통에 순차적으로 옮겨가며 작업을 하므로 이 때 입자수농도와 표면적농도의 변화가 있었다. Pearson 단순상관관계를 통해서 장비간의 상관관계를 확인하였다. SMPS, OPC, NSAM 장비간에 높은 양의 상관관계를 보였다<표 IV-52>.

**<표 IV-52> 사업장 D, 작업장 1의 측정기기간의 상관관계 분석**

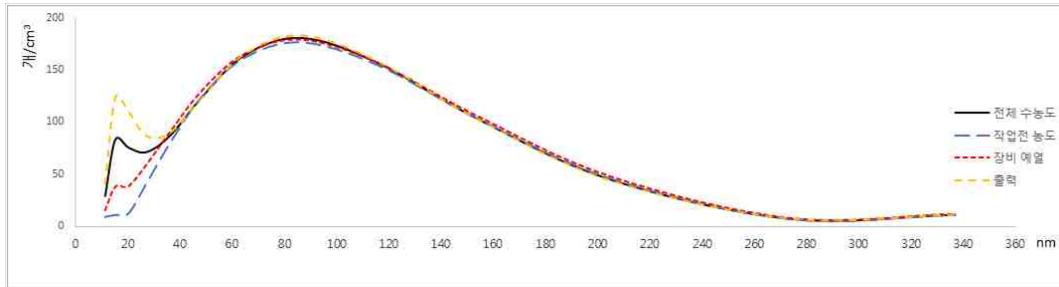
측정기기	나노스캔	NSAM	OPC
나노스캔	1		
NSAM	0.969**	1	
OPC	0.988**	0.984**	1

NanoScan SMPS: 나노스캔, Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM, Optical particle sizer: OPC

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

(2) 작업장 2

작업장 2에서 주로 분포하는 입자 크기는 75~100 nm이다. 예열 작업 중 입자농도가 급격하게 증가하지 않으며, 작동할 때 13.3~17.8 nm 크기의 입자가 낮지만 올라가는 특성을 보인다. 전체적으로 200 개/cm<sup>3</sup>미만의 입자수농도 분포를 보였다[그림 IV-24].



[그림 IV-24] 사업장 D, 작업장 2의 입자크기분포

<표 IV-53> 사업장 D, 작업장 2의 입자수농도와 표면적농도

측정인자	구분	공정별 농도 수준		전체농도
		작업전	작업(예열)	
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	943±28	1,214±67 (1,056±53)	1,144±146
	GM(GSD)	942(1.03)	1,210(1.04) (1,055(1.05))	1,134(1.14)
표면적농도 (μm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	AM±SD	7±0.11	8±0.29 (7±0.13)	8±0.40
	GM(GSD)	7(1.02)	8(1.04) (7(1.02))	8(1.05)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

작업 전의 평균 입자수농도는 943 개/cm<sup>3</sup>이며, 작업 중 입자수농도는 1,214 개/cm<sup>3</sup>이고, 이 중 예열작업의 입자수농도는 1,056 개/cm<sup>3</sup>이었다. 작업 전의 평균 표면적농도는 7 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이며, 작업 중 표면적농도는 8 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이며, 예열작업 중 표면적농도는 7 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>으로 나타났다.



[그림 IV-25] 사업장 D, 작업장 2의 시간별 입자수농도와 표면적농도

공정에 따른 입자수농도의 변화는 크게 보이지 않았다. Pearson 단순상관관계를 통해서 장비간의 상관관계를 확인하였다. SMPS 장비는 NSAM 장비의 농도값과 높은 양의 상관관계(0.917)를 보였다<IV-54>.

<표 IV-54> 사업장 D, 작업장 2의 측정기기간의 상관관계 분석

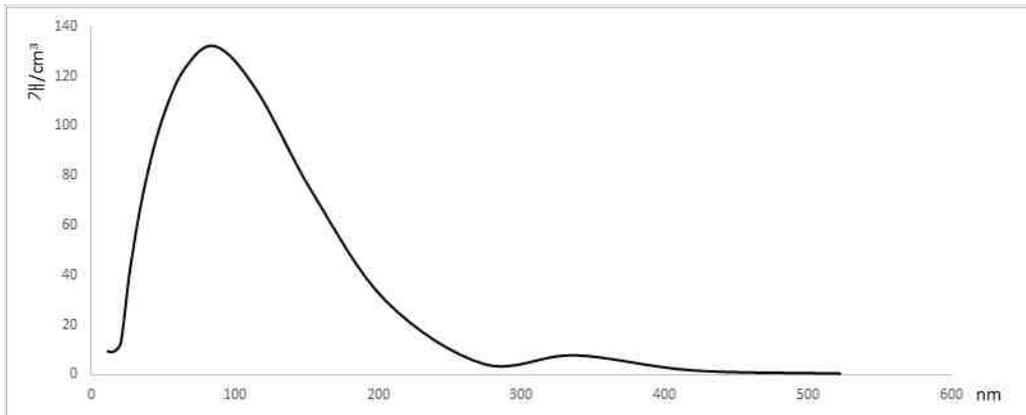
측정기기	나노스캔	OPC	NSAM
나노스캔	1		
OPC	0.026	1	
NSAM	0.917**	-0.008	1

NanoScan SMPS: 나노스캔, Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM, Optical particle sizer: OPC

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

(3) 작업장 3

작업장 3에서 주로 분포하는 입자 크기는 75~100 nm이다. 대부분 입자크기 별로 구분했을 때 100 개/cm<sup>3</sup>미만의 수농도 분포를 보였다[그림 IV-26].



[그림 IV-26] 사업장 D, 작업장 3의 입자크기분포

<표 IV-55> 사업장 D, 작업장 3의 입자수농도와 표면적농도

측정인자	구분	작업
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	728±62
	GM(GSD)	735(1.09)
표면적농도 (μm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	AM±SD	9±0.21
	GM(GSD)	9(1.02)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차

작업 중의 평균 입자수농도는 728 개/cm<sup>3</sup>이며, 표면적농도는 9 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다.



[그림 IV-27] 사업장 D, 작업장 3의 시간별 입자농도와 표면적농도

공정에 따른 입자농도의 변화는 크게 보이지 않았다. Pearson 단순상관관계를 통해서 장비간의 상관관계를 확인하였다. SMPS 장비는 OPC 장비의 농도값과 높은 양의 상관관계(0.829)를 보였다<IV-56>.

<표 IV-56> 사업장 D, 작업장 3의 측정기간의 상관관계 분석

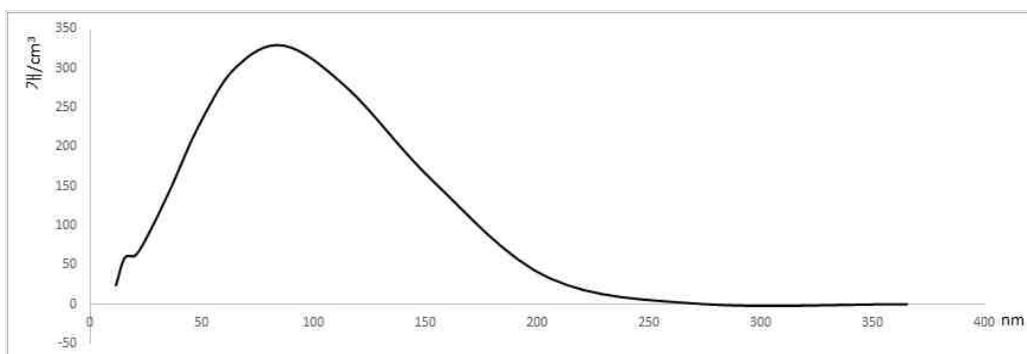
측정기기	나노스캔	OPC	NSAM
나노스캔	1		
OPC	0.829**	1	
NSAM	0.020	-0.134	1

NanoScan SMPS: 나노스캔, Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM, Optical particle sizer: OPC

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

## (3) 작업장 4

작업장 4에서 주로 분포하는 입자 크기는 75~100 nm이다. 대부분 입자크기 별로 구분했을 때 200 개/cm<sup>3</sup>미만의 수농도 분포를 보였다[그림 IV-28]. 작업장 5는 작업이 없어서 입자 측정은 하지 않았다.



[그림 IV-28] 사업장 D, 작업장 4의 입자크기분포

**<표 IV-57> 사업장 D, 작업장 4의 입자수농도와 표면적농도**

측정인자	구분	공정별 농도 수준			전체농도
		작업전	서포트 출력	본재료 출력	
수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	AM±SD	702±35	1,902±681	1,774±378	1,712±489
	GM(GSD)	702(1.05)	1,758(1.53)	1,735(1.23)	1,633(1.38)
표면적 농도* (μm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	AM±SD	15±0.2	16±1.0	-	-
	GM(GSD)	15(1.01)	16(1.06)	-	-

\* 표면적농도측정 : 18:05~19:40 (데이터저장 오류로 값 없음)

AM: 산술평균, SD: 산술표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차



\* 표면적농도측정 : 18:05~19:40 (기기 오류로 19:40까지만 저장됨)

**[그림 IV-29] 시간에 따른 입자수농도와 표면적농도 변화**

공정에 따른 수농도의 변화는 크게 보이지 않았다. Pearson 단순상관관계 를 통해서 장비간의 상관관계를 확인하였다. SMPS 장비는 NSAM 장비의 농도값과 높은 양의 상관관계(0.981)를 보였고, SMPS-OPC 장비와 OPC-NSAM 장비의 농도값은 높은 음의 상관관계(-0.782, -0.632)를 보였다 <IV-58>.

**<표 IV-58> 기기간의 상관관계 분석**

측정기기	나노스캔	OPC	NSAM
나노스캔	1		
OPC	-0.728**	1	
NSAM	0.981**	-0.632**	1

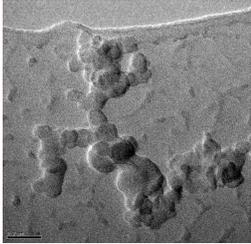
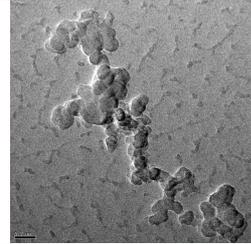
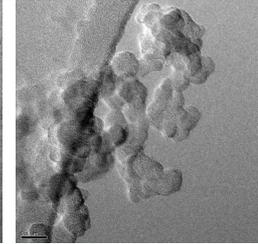
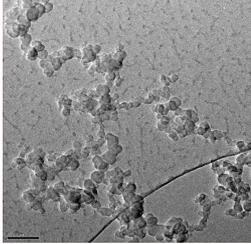
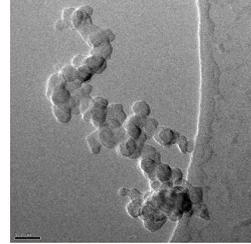
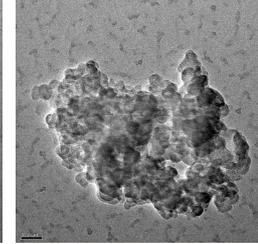
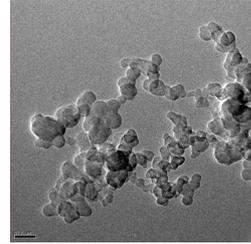
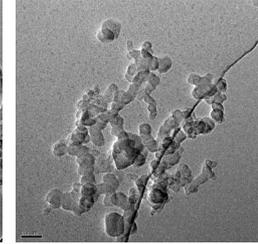
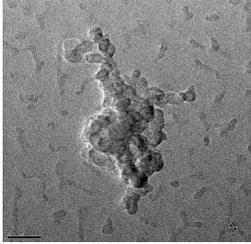
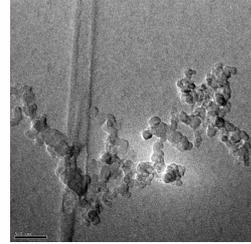
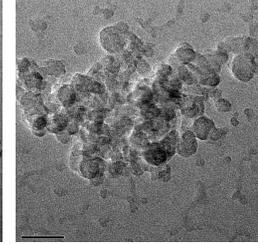
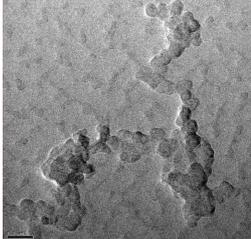
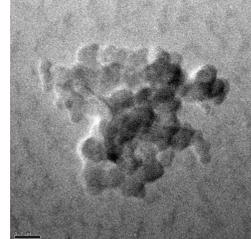
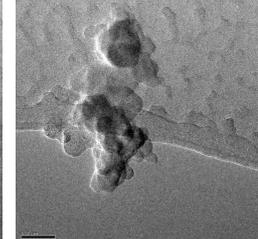
NanoScan SMPS: 나노스캔, Nanoparticle Surface Area Monitor: NSAM, Optical particle sizer: OPC

\* P-value < 0.05, \*\* P-value < 0.01

## 5) 투과전자현미경 분석결과

작업장 1, 실내의 초미세입자 측정기기가 있는 위치에서 포집하였다. 이 시료에서 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰할 수 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 89%, 산소 4%, 실리카 6%, 지르코늄 1%이었다. 작업장 2, 실내의 초미세입자 측정기기가 있는 위치에서 포집하였다. 이 시료에서 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰할 수 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 90%, 산소 4%, 실리카 3%, 지르코늄 3%이며, 칼슘 1%미만 이었다. 작업장 1-2 사이 복도에서 포집하였고, 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄산 87%, 산소 5%, 실리카 2%, 지르코늄 5%이었다. 작업장 1-2 사이 외부에서 포집하였고, 이 시료에서도 서로 다른 크기의 초미세입자들이 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 85%, 산소 6%, 실리카 3%, 지르코늄 3%이며, 나트륨 1%, 칼슘, 환 1%미만이었다. 작업장 3, 4에서 3D 프린팅 작업 중에 채취한 시료에서는 입자의 뭉친 이미지를 관찰할 수 없었고, 작업장 5는 작업이 없어서 시료를 채취하지 않았다. 하지만 작업장 3-5 사이 복도에서 측정된 시료에서는 입자의 뭉쳐진 이미지를 관찰할 수 있었다. EDS로 성분의 질량비를 분석한 결과 탄소 86%, 산소 7%, 실리카 4%, 지르코늄 3%이었다<표 IV-59, 60>.

<표 IV-59> TEM 이미지

측정위치	사진 1	사진 2	사진 3
작업실 1 실내			
작업실 2 실내			
복도 (3D 프린터와 2m 거리)			
외부 (3D 프린터와 4m 거리)			
작업장 3~5 복도			

**<표 IV-60> 사업장 D의 EDS 분석 결과(중량비, %)**

측정	C	O	Si	Zr	Ca	Na	S	Total
#1실내	89	4	6	1	-			100
#2실내	90	4	3	3	<1			100
#1-2 복도	87	5	2	5	-			100
#1-2 외부	85	6	3	3	<1	1	<1	100
#3실내	-	-	-	-	-	-	-	-
#4실내	-	-	-	-	-	-	-	-
#3-5 복도	86	7	4	3	-	-	-	100

\* Cu 코팅 시편이므로 Cu의 성분은 제외, 1% 미만은 <1%로 함

## 6) 유기화합물 분석결과

개인시료의 유기화합물 농도는 에탄올 674 ppb, 아세톤 1.5 ppb, 이소프로필 알코올 216.7 ppb, 톨루엔 66.8 ppb, 에틸 벤젠 40.1 ppb, p-, m-크실렌 33.6 ppb였다. 작업장 1의 유기화합물 농도는 에탄올 222.3ppb, 아세톤 0.4ppb, 이소프로필 알코올 123.9 ppb, 톨루엔 33.0 ppb, 에틸 벤젠 20.1 ppb, o-크실렌 16.6 ppb였다. 작업장 2의 유기화합물 농도는 에탄올 119.2 ppb, 이소프로필 알코올 132.1 ppb, 톨루엔 32.5 ppb, 에틸 벤젠 20.1 ppb, p-, m-크실렌 16.6 ppb였다. 작업장 3의 유기화합물 농도는 에탄올 1483 ppb, 아세톤 11.4 ppb, 이소프로필 알콜 1119.8 ppb, 톨루엔 31.7 ppb, 에틸 벤젠 16.2 ppb, p-, m-크실렌 13.0 ppb, o-크실렌 13.3 ppb였다. 작업장 4의 유기화합물 농도는 에탄올 829.7 ppb, 아세톤 5.4 ppb, 이소프로필 알코올 325.4 ppb, 톨루엔 26.1 ppb, 에틸 벤젠 18.2 ppb, p-, m-크실렌 10.8 ppb였다. 작업장 5의 유기화합물 농도는 에탄올 134.4 ppb, 아세톤 1.7 ppb, 톨루엔 27.6 ppb, 에틸벤젠 15.9 ppb였다. 사무실의 유기화합물 농도는 에탄올 200.2 ppb, 아세톤 1.0 ppb, 이소프로필 알코올 27.7 ppb, 톨루엔 31.5 ppb, 에틸 벤젠 18.9 ppb이었다. n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 헵탄, 트리클로로에틸렌은 모두 검출한계 미만이었다. 후처리실에도 근로자를 대상으로 단시간노출평가를 실시하였으나 시료 손실로 그 값을 알 수 없었다.

**<표 IV-61> 사업장 D의 유기화합물 분석결과**

물질\ 측정위치(시료수) 단위: ppb	개인 (2)	# 1 (2)	# 2 (2)	# 3 (1)	# 4 (2)	# 5 (1)	사무 실 (1)	노출기준 (TWA)
에탄올	674± 590	222± 0.6	119± 0.7	1483	829± 928	134.4	200.2	1,000
아세톤	1.5± 1.4	0.4± 0.1		11.4	5.4± 3.3	1.7	1.0	500
이소프로필 알코올	216± 102	124± 4.7	132± 56.6	1119	325± 105	-	27.7	200
메틸이소부틸 케톤	0.1	1.0± 0.1	N.D.	-	-	-	N.D.	50
톨루엔	66.8± 47	33.0± 1.1	32.5± 1.0	31.7	26.1± 15.3	27.6	31.5	50
에틸 벤젠	40.1± 29	20.1± 0.01	20.1± 0.3	16.2	18.2± 6.9	15.9	18.9	100
p-, m-크실렌	33.6± 24	-	16.9	13.0	10.8± 14.9	-	-	100
o-크실렌	16.6	16.6	-	13.3	-	-	-	100
시클로헥사논	N.D.	N.D.	-	N.D.	4.3	-	N.D.	25

\* 노출기준(TWA)의 단위: ppm

N.D. (not detected) : 검출한계 미만

검출한계 : 에탄올 0.16, 아세톤 0.50, 이소프로필 알코올 0.37, n-헥산 0.67, 에틸아세테이트 0.58, 벤젠 0.83, 헵탄 0.43, 트리클로로에틸렌 0.31, 메틸이소부틸케톤 0.62, 톨루엔 0.98, 에틸 벤젠 1.07, p-, m-크실렌 0.75, o-크실렌 0.75, 스틸렌 0.79, 시클로헥사논 0.71  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 7) 금속 분석결과

중금속은 개인과 지역으로 시료를 채취하였다. 중금속 시료를 분석한 결과 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철이 미량으로 검출되었고, 티타늄, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 지르콘, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 주석, 금은 검출한계 미만이었다.

&lt;표 IV-62&gt; 사업장 D의 금속 분석결과

물질 \위치 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	개인1	개인2	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	노출* 기준 (TWA) $\text{mg}/\text{m}^3$
Na	1.68	1.98	0.47	1.86	1.74	2.03	1.88	-
Mg	0.45	0.62	-	0.51	0.49	0.50	0.52	10
Al	-	0.32	-	-	-	-	-	10
K	0.68	0.69	0.29	0.98	0.95	1.25	1.05	-
Ca	0.29	-	-	0.30	0.26	0.26	0.28	-
Cr	0.12	0.12	0.13	0.14	0.17	0.12	0.13	-
Fe	0.19	0.40	0.24	0.21	0.26	-	-	5

# 1~5: 작업장 1~5

\* 노출기준: 산화마그네슘, 산화알루미늄, 산화철

검출한계 : 나트륨 0.2, 마그네슘 0.2, 알루미늄 0.3, 칼륨 0.3, 칼슘 0.3, 티타늄 0.3, 크롬 0.04, 망간 0.2, 철 0.2, 코발트 0.04, 니켈 0.1, 구리 0.1, 아연 0.2, 지르콘 0.06, 몰리브덴 0.1, 은 0.1, 카드뮴 0.1, 주석 0.2, 납 0.1  $\mu\text{g}/\text{sample}$

## 8) 기타인자

기타 유해인자인 황화수소(H<sub>2</sub>S), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 일산화질소(NO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 총휘발성유기화합물질(TVOC), 온도 및 상대습도를 측정하였다. 작업장1의 TVOC의 평균농도는 210 ppb, 작업장2는 238 ppb, 후처리실은 566 ppb, 작업장3은 550 ppb, 작업장4는 300 ppb였다. 황화수소, 일산화질소, 이산화황은 모두 불검출이었다<표 IV-63>.

**<표 IV-63> 사업장 D의 기타 인자 농도**

기타 유해인자	평균농도 (최대값)				
	작업장1	작업장2	후처리실	작업장3	작업장4
NO <sub>2</sub> (ppm)	0.4(1.4)	-	-	-	-
TVOC (ppb)	210(2020)	238(920)	566(4870)	550(1250)	300(630)
CO <sub>2</sub> (ppm)	-	949(1020)	982(1314)	1057(1161)	766(1061)
CO (ppm)	5(20)	-	16(44)	12(16)	0.4(6)
RH (%)	-	52.4(54.2)	58.6(74.8)	54.5(57.9)	49.4(59.2)
온도 (℃)	-	26.2(27.3)	26.8(28.1)	24.3(25.3)	23.7(24.1)

\* — : 불검출

## V. 고찰

본 연구에서는 3D 프린팅 작업시 발생하는 주입자의 분포, 입자수농도, 표면적농도, 입자의 형태 및 구성성분을 알 수 있었다. 사업장 A의 작업 중 주입자의 분포는 31.6~42.2 nm이며, 입자수농도는 143,510 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 51 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분은 탄소, 산소, 규소가 주성분이며, 철, 지르코늄, 나트륨 등의 성분도 있었다. 사업장 B, FDM-3D 프린팅 작업장의 작업 중 주입자의 분포는 100~133.4 nm이며, 입자수농도는 4,881 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 115 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분은 탄소, 산소, 철, 지르코늄이 주성분이며, 크롬, 코발트 등의 성분도 있었다. Metal-3D 프린팅 작업장의 작업 중 주입자의 분포는 100~133.4 nm이며, 입자수농도는 523 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 4 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분은 탄소, 산소, 규소, 알루미늄이 주성분이며, 망간, 철 등의 성분도 있었다. 사업장 C, 연구소의 작업 중 주입자의 분포는 31.6~42.2 nm이며, 입자수농도는 143,510 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 51 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분은 탄소, 산소, 규소가 주성분이며, 철, 지르코늄, 나트륨 등의 성분도 있었다. 3D Printing Lab의 작업 중 주입자의 분포는 31.6~42.2 nm이며, 입자수농도는 16,623 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 47 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분 중 탄소가 가장 많았고, 나트륨, 지르코늄, 규소 등으로

구성되었었다. 사업장 D, 작업장 1의 작업 중 주입자의 분포는 75~100 nm이며, 입자수농도는 720 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 7  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분 중 탄소가 가장 많았고, 산소, 규소, 지르코늄 등으로 구성되었었다. 작업장 2의 작업 중 주입자의 분포는 75~100 nm이며, 입자수농도는 1,214 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 8  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 입자의 형태는 주로 구형의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분 중 탄소가 가장 많았고, 산소, 규소, 지르코늄 등으로 구성되었었다. 작업장 3의 작업 중 주입자의 분포는 75~100 nm이며, 입자수농도는 728 개/cm<sup>3</sup>, 표면적농도는 9  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 이 시료에서는 입자의 뭉쳐진 이미지를 관찰할 수 없었다. 작업장 4의 작업 중 주입자의 분포는 75~100 nm이며, 입자수농도는 1,774 개/cm<sup>3</sup>, 본재료 출력시에는 데이터저장 오류로 그 값을 알 수 없으나 서포트 재료 출력시의 표면적농도는 16  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 이 시료에서는 입자의 뭉쳐진 이미지를 관찰할 수 없었다. 하지만 작업장 3~5의 복도에서는 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 구성성분 중 탄소가 가장 많았고, 산소, 규소, 지르코늄 등으로 구성되었었다.

FDM-3D 프린팅 작업의 특성상 적층판과 노즐을 예열하는 작업을 한다. 적층판을 예열하는 이유는 소재가 적층에 적층될 때, 온도차로 인한 출력물의 변형을 막기 위해서이며, 노즐을 예열하는 이유는 먼저 노즐에 남아있는 잔여물을 제거하고, 소재의 압출을 준비하는 역할을 한다. 이번 연구에서는 사업장 A~C는 저가형 FDM-3D 프린터를 사용하고 있었고, 사업장 D는 산업용 3D 프린터를 사용하고 있었다. FDM-3D 프린팅 작업 중 입자수농도가 가장 높은 작업이 예열 작업이며, 예열 작업 측정을 하지 못한 사업장 B를 제외하고 저가형 FDM-3D 프린팅 예열 작업시 입자수농도가 높게 올라가는 것을 확인하였다. 하지만 산업용 FDM-3D 프린터의 경우, 노즐의 온도를 300 °C까지 올리며, 적층판의 온도를 올리는 것이 아니라 적층하는 공간의 온도를 올린다.

그리고 출력공간이 밀폐되어있고, 내부에는 입자를 걸러주는 필터까지 장착되어있어서 예열 중에 입자농도가 크게 올라가지 않았다. 사업장 B의 Metal-3D 프린팅 작업의 경우, 작업 중 입자농도와 표면적농도가 배경농도보다 낮았는데, 그 이유는 작업 중에 가동하는 공조 때문으로 추정된다. 이 작업장은 세미 크린룸 형태로 위에서 아래로 흐르는 공조시스템이 운영되고 있었다. 공조를 켜 시점에서 작업장의 농도가 급속도로 낮아지는 현상이 있어서 이런 외부의 영향으로 Metal-3D 프린터의 작업시 발생하는 입자농도와 표면적농도를 정확하게 판단하기는 쉽지 않았다. 사업장 D의 경우, 다양한 형태의 3D 프린터를 운영하고 있었다. DLP-3D 프린터의 경우, 원료를 투입시와 후처리시에 배경농도에 비해 높은 입자농도와 표면적농도를 보였다. 그리고 Polyjet-3D 프린터의 경우, 본제품을 출력하기 전에 서포트 소재를 출력하는 이 때 입자농도가 증가하는 경향을 보였다. 저가형 FDM-3D 프린터의 입자농도에 비해 높은 수준은 아니지만 배경농도 수준보다는 높아서 이 3D 프린터의 경우에는 국소배기장치를 설치할 것을 권장한다.

이번 연구는 실험실 연구가 아니고, 사업장에서 사용하는 3D 프린터 종류 등 조건이 다르므로 소재에 따른 입자농도와 표면적농도를 비교할 수 없지만, 각 소재마다의 주 입자 분포는 알 수 있다. FDM-3D 프린터에 사용되는 PLA 소재의 경우, 주입자의 크기는 13~75 nm로 나노입자(100 nm이하)보다 작았다. 반면 FDM-3D 프린터에 사용되는 ABS 소재의 경우, 주입자의 크기가 100~133.4 nm로 PLA 소재보다 발생하는 입자의 크기가 나노입자보다 컸다. Metal-3D 프린터에 사용되는 소재는 알루미늄 분말이었고, 주입자의 크기는 100~133 nm로 나노입자 크기보다 큰 입자가 발생하였다. 그리고 DLP-, SLA-3D 프린터에 사용되는 소재는 액체의 ABS 소재이며, 주입자의 크기는 75~100 nm, 잉크젯-3D 프린터에 사용되는 소재는 석고파우더이며, 주입자의 크기는 75~100 nm, Polyjet-3D 프린터에 사용되는 소재는 아크릴성 ABS이며, 주입자의 크기는 75~100 nm이었다. Marina E. Vance, 2017

연구에 따르면 PLA 소재의 주입자의 크기는  $22\pm 2$  nm, 13~15 nm,  $28\pm 3$  nm이며, ABS 소재는  $51\pm 6$  nm,  $51\pm 4$  nm, 45~79 nm로 PLA 소재가 ABS 소재보다 더 작은 입자를 발생하는 것을 알 수 있다.

이번 연구에서 측정한 사업장의 프린터 종류를 보면, FDM-3D 프린터가 5개소, Metal-3D 프린터가 1개소, 나머지는 DLP, 잉크젯, SLA, Polyjet 각각 1개소였다. 사용하는 소재로는 PLA 소재가 3개소, ABS 소재가 4개소, PP 소재가 1개소, 알루미늄 분말과 석고분말 소재를 사용하는 곳이 각각 1개소였다. 사업장 중 입자수농도가 가장 높은 곳은 사업장 A이었고, 이 사업장은 압출방식의 FDM-3D 프린터를 사용하고 있었고, 사용하는 소재는 PLA이며, 측정 중 가동 프린터 대수는 12대로 가장 많았다. 그리고 사용한 소재는 PLA 소재로 PLA 소재를 사용한 다른 2개소도 다른 사업장에 비해 높은 입자수농도를 보였다. 사용하는 3D 프린터의 형태, 동시에 사용하는 프린터 대수와 소재에 따른 입자수농도의 변화가 있다고 판단된다. 그리고 대부분의 작업장에서 입자수농도가 배경농도보다 높았고, 이는 작업 중 초미세입자가 발생함을 알 수 있다. Metal-3D 프린팅실의 경우, 오히려 배경농도가 더 높는데, 이는 세미 크린룸의 공조시스템의 영향으로 판단된다. 대체적으로 FDM-3D 프린팅 작업장의 작업 중 입자수농도가 높았으며, 그 중 산업용 FDM-3D 프린터보다는 저가형 FDM-3D 프린터의 입자수농도가 높게 나오는 것을 알 수 있었다.

김유나, 2015 연구, 권오훈, 2017 연구, Luis Mendes, 2017 연구, Qian Zhang, 2017 연구, Parham Azimi 2015 연구, Evan L. Floyd, 2017 연구 모두 ABS 소재를 사용한 FDM-3D 프린터의 입자수농도가 PLA 소재보다 높게 나타났다. 하지만 Patrick Steinle, 2016 연구에서는 PLA 소재를 사용한 FDM-3D 프린터의 입자수농도가 ABS 소재보다 높게 나타났다. 이번 연구에서는 PLA 소재를 사용한 FDM-3D 프린팅 작업에서 입자수농도가 가장 높았다.

본 연구에서는 입자수농도와 표면적농도간에는 높은 양의 상관관계를 보였다. 하지만 사업장별로 비교했을 때, 입자수농도가 높은 사업장이 다른 사업장에 비해 표면적농도도 같이 높진 않았다. 사업장 A(PLA 소재), B(ABS 소재)의 FDM-3D 프린팅 작업장의 경우, 사업장 A의 입자수농도가 B보다 높았으나, 표면적농도는 사업장 B가 A보다 높았다. 사업장 A의 경우, 예열작업시의 주입자의 분포는 13.3~17.8 nm이고, 작업 중 주입자의 분포는 31.6~42.2 nm로 대부분의 작은 입자가 분포한다. 사업장 B의 경우, 작업 중 주입자의 분포가 100~133 nm로 나노입자(100 nm 이하) 보다 큰 입자가 분포한다. 사업장 C의 FDM-3D 프린팅 작업장의 경우, 같은 PLA 소재를 사용하지만, 3D Printing Lab의 입자수농도가 연구실보다 높았으나, 표면적농도는 연구실이 3D Printing Lab보다 높았다. 표면적농도는 폐포에 침착되는 입자의 면적으로서 나노입자의 수농도가 많으면 표면적농도도 증가하게 되고, 나노입자 이상의 입자가 많이 분포하여도 표면적농도는 증가할 수 있다. 따라서 나노입자를 측정할 때는 표면적농도만 측정해서는 안 되며, 입자수농도도 함께 측정하여야 한다.

**<표 V-1> 사업장별 작동 중 평균 입자수농도 및 표면적농도 비교**

사업장	작업장	대수*	소재	입자수농도 (개/cm <sup>3</sup> )	표면적농도 ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )
사업장 A	작업장 (FDM)	12	PLA	143,510	51
사업장 B	작업장 (FDM)	2	ABS	5,029	121
	작업장 2 (Metal)	1	Al 분말	523	4
사업장 C	연구실 (FDM)	1	PLA	6,447	20
	3D Printing Lab (FDM)	2	PLA	16,623	17
사업장 D	작업장 1 (DLP, 잉크젯)	각1	ABS, 석고분말	720	7
	작업장 1, 후처리실	-	-	1,430	35
	작업장 2 (산업용 FDM)	1	ABS	1,214	8
	작업장 3 (SLA)	1	PP	728	9
	작업장 4 (Polyjet)	1	ABS	1,774	16

\* 측정시, 가동한 3D 프린팅 기기 대수

나노입자의 경우, 노출기준이 몇 물질을 제외하고는 없고, 3D 프린터의 경우에는 비의도적 나노입자로 분류되어 현재까지 노출기준은 없다. 따라서 노동수준을 평가하기 위해서는 배경농도를 반드시 측정해야 하며, 배경농도를 해석하는 것 또한 중요하다. 사실 나노입자의 발생은 다양하기 때문에 그 발생원을 찾는 것은 쉽지 않다. 미국 NIOSH에서는 Refinement of the nanoparticle emission assessment technique into the nanomaterial exposure assessment technique 2.0(NEAT 2.0) 보고서에 나노입자에 대한 노출을 평가하기 위한 기술을 소개하면서, 배경농도에 대한 측정 방법을 기술하고 있다. 외부에서 발생하는 입자가 실내로 들어오면서 실내의 입자수농도에 영향을 줄 수 있기 때문에 계절, 도로와의 근접성, 날씨, 시간 등의 인자는 배경농도에 밀접한 영향을 줄 수 있다. 나노입자는 환기시스템, 창문, 문, 직원의 옷 및 다른 수단으로 쉽게 이동이 가능하다. 그렇기 때문에 직독식 측정기기를 이용하여 배경농도를 측정할 것을 권장하고 있다. 배경농도의 측정 위치는 측정을 하고자 하는 장소와 떨어져 있는 곳을 선정하되 동일한 환기시스템이 있는 위치에서 측정해야 한다. 또한 측정 중 동일한 시간에 배경농도를 같이 측정할 것을 권장하고 있다. 만약 크린룸에서 측정할 때는 크린룸 내에서 측정하되 될수록 작업하는 장소와 먼 곳에서 배경농도를 측정해야 한다. 이번 연구에서는 SMPS 장비를 한 대를 사용하여 측정하였으므로 작업과 동시에 측정하지 않고, 첫 번째 언급한 동일한 환기시스템이 있는 다른 장소에서 배경농도를 측정하였다. 사업장 A의 작업 중의 평균 입자수농도는 143,510 개/cm<sup>3</sup>으로 배경농도인 109,727 개/cm<sup>3</sup>보다 높았지만 큰 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 사업장 특성상 외부에 측정할 수 없었기 때문에 전날 내부에서 발생한 초미세입자가 배경농도에 영향을 준 것으로 판단된다. 표면적농도는 51  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로 배경농도 52  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 와 큰 차이를 보이지 않았다. 작업 중의 입자수농도 배경농도와 차이가 나지 않는 이유와 같다. 사업장 B, FDM-3D 프린터 작업실의 작업 중의 평균 입자수농도는 5,029 개/cm<sup>3</sup>으로 배경농도인 3,988 개/cm<sup>3</sup>보다 높았고, 표면적농도도 121  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$

으로 배경농도  $85 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 보다 높았다. Metal-3D 프린터 작업실의 작업 중의 평균 입자수농도는  $523 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 배경농도인  $3,734 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 보다 낮았고, 표면적농도도  $4 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로 배경농도  $16 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 보다 낮았다. 이 작업장은 세미 크린룸 형태로 되어 있어서 공조시스템의 영향으로 작업 중의 입자수농도와 표면적농도가 배경농도보다 낮게 과소평가되는 경향이 보인다. 사업장 C, 연구소의 FDM-3D 프린터 작업실의 작업 중의 평균 입자수농도는  $6,447 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 배경농도  $3,815 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 보다 높았고, 표면적농도도  $20 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로 배경농도  $22 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 보다 낮았으나, 예열 작업시 표면적농도는  $49 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 로 배경농도보다 높았다. 이 작업장의 배경농도는 옆 사무실에서 측정하였고, 사무실이 작업장과 분리되어 있으나, 작업 중 사무실의 문은 항상 개방되어 있었다. 입자가 작을수록 바닥에 떨어지는데 걸리는 시간은 오래 걸리므로 작업장에서 발생한 입자가 사무실의 배경농도에서 영향을 주었을 것으로 판단된다. 3D Printing Lab의 작업 중 평균 입자수농도는  $16,623 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 배경농도  $3,892 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 보다 4배 높았고, 평균 표면적농도는  $47 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 로 배경농도  $17 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 보다 3배 높았다. 사업장 D, 작업장 1의 작업 중 평균 입자수농도는  $720 \text{ 개}/\text{cm}^3$ , 원료투입  $1,730 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이고, 표면적농도는 작업 중  $7 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , 원료투입  $12 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 로 원료투입 시에 입자수농도와 표면적농도가 올라갔다. DLP-3D 프린터의 출력물을 후처리하는 작업에서 작업 전, 작업, 작업 후의 평균 입자수농도는 각각  $873 \text{ 개}/\text{cm}^3$ ,  $1,430 \text{ 개}/\text{cm}^3$ ,  $968 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이며, 표면적 농도는 각각  $32 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,  $35 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,  $33 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 으로 후처리 작업 중 입자수농도와 표면적농도가 올라가는 것을 알 수 있다. 작업장 2의 작업 전, 작업 중 평균 입자수농도는 각각  $943 \text{ 개}/\text{cm}^3$ ,  $1,214 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이며, 표면적농도는 각각  $7 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,  $8 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었고, 작업장 3의 작업 중 평균 입자수농도는  $728 \text{ 개}/\text{cm}^3$ , 표면적농도는  $9 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 측정 당시 이 작업장의 3D 프린터는 가동되고 있어서, 작업 전 농도는 별도로 측정하지 않았다. 작업장 4의 작업전, 서포트 출력, 본재료 출력의 평균 입자수농도는 각각  $702 \text{ 개}/\text{cm}^3$ ,  $1,902 \text{ 개}/\text{cm}^3$ ,  $1,774 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이며, 표면적농도는 각각  $15 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ,  $16 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 이었다. 서포트 출력

도중 표면적농도 측정 장비가 갑자기 꺼져서 그 뒤의 값을 알 수 없었지만, 입자수농도와 표면적농도의 상관관계를 봤을 때, 서포트 출력 중 표면적농도가 올라갔을 것으로 예상할 수 있다. 장비 기기간의 상관관계를 보면 입자수농도와 표면적농도와의 강한 양의 상관관계를 보였다. 즉, 입자수농도가 높아질 때 표면적농도도 함께 증가하였다. 입자수농도의 입자측정 범위는 10 nm~20  $\mu\text{m}$ 이며, 표면적농도의 입자측정 범위는 10 nm~1  $\mu\text{m}$ 이다. 본 연구의 입자크기 분포를 보면 대부분 10~200 nm 사이에 있기 때문에 입자수농도와 표면적농도와의 상관관계가 큰 것으로 보인다. 탄소나노튜브 취급 사업장의 탄소나노튜브 노출 특성 및 측정 분석 방법 연구(윤충식, 2015)에서도 입자수농도(SMPS) 장비와 표면적농도(SAM) 장비와의 상관관계가 높게 나타났다.

이번 연구에서 Grid 시료를 TEM-EDS로 분석한 결과 거의 모든 시료에서 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였다. 시료 채취는 프린터 내부 또는 아주 근접한 곳, 작업장 내부, 복도에서 이루어졌고, 프린터 내부 또는 아주 근접한 곳에서 측정된 이미지와 중량비와 비교하였다. 측정된 이미지는 프린터 내부 또는 아주 근접한 곳에서 측정된 것과 유사했고, 그 성분도 유사하여서 3D 프린팅 작업 시 발생한 초미세입자가 작업장 내부, 그리고 복도까지 이동하였을 것으로 예측할 수 있다. 하지만, 비의도적 나노입자의 발생원이 다양해서 복도에서 관찰된 TEM 이미지가 3D 프린팅 작업에서 발생했다고는 단정할 순 없다. TEM-EDS 성분 분석 결과 주로 구성하고 있는 원소는 탄소, 산소, 실리카 또는 탄소, 산소, 실리카, 철로 입자를 이루고 있고, 미량의 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼슘, 크롬으로 구성되어 있었다. 이번 연구에서는 ICP-MS로 중금속을 함께 분석하였다. 이번 중금속 분석결과 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철 등이 미량으로 검출되었다. 이번 분석에는 유리 스프레이 챔버와 토치를 사용하여 실리카는 분석할 수 없었다. Patrick Steinle, 2016 연구에서 TEM으로 입자의 형태를 확인하고 EDS로 성분을 분석하였다. 본 연구와 유사한 형태의 크고 작은 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를

관찰하였고, 구성성분은 탄소를 주성분으로 한 칼륨과 황, 미량의 철이 포함되어 있었다. Nima afshar-Mohajer, 2015 연구에서 SEM으로 입자의 형태를 확인하고 EDS로 성분을 분석하였다. 이 연구에서도 3D 프린터와 0.3m 떨어진 곳에서 채취한 시료에서 서로 뭉쳐있는 입자의 이미지가 관찰되었고, 구성성분은 탄소, 산소, 황, 칼슘이었다.

이번 연구에서는 3D 프린팅 작업 시 유기화합물과 중금속이 일부 검출되었다. TD-GC/MS 분석기기로 유기화합물을 분석한 결과는 에탄올, 아세톤, 이소프로필 알코올, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 메틸이소부틸케톤이 검출되었고, n-헥산, 에틸아세테이트, 벤젠, 헵탄, 스틸렌, 사이클로헥사논은 검출한계 미만이었다. ICP-MS 분석기기로 중금속을 분석한 결과는 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철이 미량 검출되었고, 티타늄, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 지르콘, 몰리브덴, 은, 카드뮴, 금, 철, 주석은 검출되지 않았다. 이번 연구에서 TEM-EDS로 입자를 분석한 결과, 철, 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼슘, 크롬, 실리카 등으로 구성되어 있었다. 구성성분은 EDS분석 결과와 ICP-MS 분석결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

Aleksandr B. Stefaniak, 2017 연구에 따르면 FDM-3D 프린터의 ABS, PLA 소재를 사용할 때, 발생하는 유기화합물을 측정한 결과 아세트알데하이드, 에탄올, 아세톤니트릴, 아세톤, 이소프로필알코올, n-헥산, chloroform, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 스틸렌 등의 물질이 검출되었다. Patrick Steinle, 2016 연구에서도 TVOC의 농도가 ABS, PLA 소재 각각 520, 770 ppb이며, ABS 소재의 성분구성은 스틸렌 49%, 에틸벤젠 9%, 사이클로로헥사논 8%, MMA 3%, n-부탄올 2%, 기타 29%이며, PLA 소재의 성분구성은 Methyl methacrylate(MMA) 37%, n-부탄올 13%, 시클로헥사논 9%, 기타 41%이었다. 김유나, 2015 연구에서는 ABS, PLA 소재를 사용할 때 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 등의 물질이 검출되었고, 벤젠은 검출한계 미만으로 나타났다. 그리고 알데하이드류인 포름알데하이드, 아세트알데하이드, isovaleraldehyde가 검출되었고,

프탈레이트류도 일부 물질이 검출되었다. Parham Azimi, 2015 연구에서는 ABS 소재에 스티렌, 에틸벤젠, 헥사놀 등의 물질이 검출되었고, PLA 소재에서는 Lactide가 acetic acid 등의 물질이 검출되었다. 미국 NIOSH의 HHE 보고서, 2017에 따르면 유기화합물로 아세트알데하이드, 아세톤, 벤젠, diacetyl, 2,3-pentanedione, 에탄올, 이소프로필 알코올, methyl methacrylate(MMA), methylene chloride, 톨루엔, 크실렌 등이 검출되었다. 덴마크의 3D 프린터와 제품에 대한 위험성평가 보고서, 2017에 PLA, ABS 소재 사용 시 발생하는 유기화합물에 대해서 잘 정리하고 있다<표 V-2>.

3D 프린팅 기술은 적층하는 방식으로 열가소성 수지를 가열하여 녹여서 쌓는 재료압출 방식, 액상을 분사하는 재료분사 방식, 액상의 접착제를 분말 소재와 결합하는 접착제 분사방식, 종이, 금속판을 접착제에 바른 후 적층하는 판재 적층 방식, 액체재료를 강한 UV레이저로 광경화하는 광중합 방식, 분말 재료에 고압, 고온으로 레이저 소결하는 분말소결 방식, 레이저로 용융 접착시키는 직접용사 방식이 있으며, 그 사용하는 소재도 다양하다. 소재가 다양한 만큼 그 구성성분도 다양함에도 불구하고 제조사에서는 구성성분에 대한 물질안전보건자료(MSDS)를 정확하게 제공하지 않고 있다. 그리고 최근에 값싼 중국산 3D 프린팅 소재가 국내로 유통되면서, 근로자의 건강영향에 대한 우려가 더욱 커지고 있어 향후 3D 프린팅 소재에 대한 연구가 필요 할 것으로 보인다.

**<표 V-2> FDM-3D 프린터 소재별 유기화합물 구성성분**

물질	PLA	ABS	기타 설명
포름알데하이드	검출	검출	
아세트알데하이드	검출	검출	
이소발레르알데히드	검출	검출	
에틸벤젠		검출	
크실렌	검출		
스틸렌		검출	TVOC의 30-80% 수준
사이클로로헥사논	검출	검출	
프로필렌글리콜		검출	TVOC의 약 33% 수준
n-부탄올	검출	검출	
락티드	검출		TVOC의 50-75% 수준
메틸 메타아크릴레이트	검출	검출	PLA, TVOC의 약 37% 수준
플루오란테인	검출	검출	
피렌	검출	검출	
프탈산 디부틸	검출	검출	
디에틸헥실프탈레이트	검출	검출	

\* Ministry of Environment and Food of Denmark, Risk Assessment of 3D Printers and 3D Printed Products 보고서를 재구성 함

## VI. 결론

- 3D 프린팅 작업 시 발생하는 주입자의 크기는 대체적으로 100 nm보다 작은 나노입자로 구성되어 있었고, 저가형 FDM-3D 프린팅 작업을 PLA 소재로 할 경우에 주입자의 크기가 가장 작았음
- 저가형 FDM-3D 프린팅 예열 작업 시 입자수농도와 표면적농도가 급격하게 증가하였고, 프린팅 노즐 막힘 부분을 수리할 때에도 높은 입자수농도와 표면적농도를 보였음. 하지만 산업용 FDM-3D 프린터의 경우, 예열 작업 및 작업 중 입자수농도와 표면적농도는 낮은 수준이었으며, 특별한 농도의 변화는 없었으나, 작업 중 미세하게 13.3~17.8 nm의 입자수농도가 증가하는 경향을 보였음.
- 입자수농도와 표면적농도간의 높은 상관관계를 보였음. 저가형 FDM-3D 프린팅 작업장의 입자수농도와 표면적농도가 다른 3D 프린팅 작업장에 비해 높았음. 작업 중 농도와 배경농도를 비교했을 때, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않음.
- TEM 시편 분석 결과 대부분의 3D 프린팅 작업장에서 입자가 서로 뭉쳐있는 이미지를 관찰하였고, 프린터 내부, 실내 및 실외에서 측정된 시편의 이미지가 유사함. 성분도 탄소를 중심으로 다양한 원소(산소, 실리콘 등)가 서로 다른 비율로 뭉쳐있었음.
- 유기화합물(이소프로필알콜, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 등) 및 금속(나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철 등)이 미량으로 검출되었음.
- 저가형 FDM-3D 프린터의 경우, 예열 작업과 노즐 막힘 등의 문제가

발생하는 상황에서 높은 입자수농도와 표면적농도를 보이므로 이 작업시에는 국소배기장치를 설치(공학적)하거나, 덮개가 달린 3D 프린터를 구입(대체)하거나, 작업 부스를 설치(격리)하여 근로자의 노출을 최소로 할 필요성이 있다고 판단 됨. 위의 모든 관리방안이 어려울 경우에는 최소한 호흡보호구를 제공하여 위와 같은 작업 시에는 반드시 착용할 것을 권장 함.

- 3D 프린팅 소재는 다양하지만, 제조사에서는 MSDS 상의 물질 구성성분의 명칭 및 함유량을 누락시키는 경향이 있어, 3D 프린팅 소재에 대한 향후 연구가 필요 함.

## VII. 참 고 문 헌

Marina E. Vance, Valerie Pegues, Schuyler Van Montfrans, et al. Aerosol Emissions from Fuse-Deposition Modeling 3D Printers in a Chamber and in Real Indoor Environments. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 9516-9523

Stabile, M.Scungio, G.Buonanno, et al. Airborne particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature. *Indoor Air* 2017; 27: 398-408

Ohhun Kwon, Chungsik Yoon, Seunghon Ham, et al. Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D Printing. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 10357-10368

Aleksandr B. Stefaniak, Ryan F. LeBouf, Jinghai Yi, et al. Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2017, VOL. 14, NO. 7, 540-550

Luis Mendes, Anneli Kangas, Kirsi Kukko, et al. Characterization of Emissions from a Desktop 3D Printer. *Journal of Industrial Ecology* 2017, VOL 21, NO. S1.

Patrick Steinle. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2016, VOL. 13, NO. 2, 121-132

Qian Zhang, Jenny P.S. Wong, Aika Y. Davis, et al. Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers. *Aerosol Science and Technology* 2017, VOL. 51, NO. 11, 1275-1286

Nima Afshar-Mohajer, Chang-Yu Wu, Thomas Ladun, et al.

Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *Building and Environment* 2015, 93, 293-301

Jinghai Yi, Ryan F. LeBouf, Matthew G. Duling, et al. Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2016, VOL. 79, NO. 11, 453-465

Yuna Kim, Chungsik Yoon, Seunghon Ham, et al. Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation. *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49, 12044-12053

Parham Azimi, Dan Zhao, Claire Pouzet, et al. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Sci. Technol.* 2016, 50, 1260-1268

Aika Davis, Marilyn Black, Qian Zhang, et al. Fine Particulate and Chemical Emissions from Consumer 3D printers. *ASHRAE Annual Conference* 2016

Evan L. Floyd, Jung Wang, James L. Regens. Fume emissions from a low cost 3-D printer with various filaments. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2017, VOL. 14, NO. 7, 523-533

Yu Zhou, Xiangri Kong, Ailu Chen, et al. Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room. *ScienceDirect Procedia Engineering* 2015, 121, 506-512

Parham Azimi, Torkan Fazli, Brent Stephens. Prediction Concentrations of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds Resulting from Desktop 3D Printer Operation and the Impact of Potential Control Strategies. *Journal of Industrial Ecology* 2017, VOL 21, NO. S1

Yelin Deng, Shi-Jie Cao, Ailu Chen, et al. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. *Buliding and Environment* 2016, 104, 311-319

Brent Stephens, Parham Azimi, Zeineb El Orch, et al. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment* 2013, 79, 334-339

Samuel Hartikainen, Markus Johansson, Marko Hyttinen, et al. VOC and particle emissions from home and hobby 3D printers. *Indoor air conference* 2016

Aleksandr B. Stefaniak, Duane R. Hammond, Alyson R. Johnson, et al. Evaluation of 3-D Printer Emissions and Personal Exposures at a Manufacturing Workplace. *Health Hazard Evaluation Program Report* 2017, No. 2017-0059-3291

Eva Jacobsen, Inge Bondgaard Nielsen, Jeanette, et al. Risk Assessment of 3D Printers and 3D Printed Products. *Ministry of Environment and Food of Denmark Report* 2017, No. 161

이승환. 3D 프린터 작동시 배출되는 가스상 물질과 입자상 물질 노출 평가 평가. 아주대학교 대학원 석사학위 논문

이미영. 3D Print 작업 환경에서의 작업자 노출평가에 대한 연구. 호서대학교 대학원 석사학위 논문

권오훈. Control of Particulate Material Emission during 3D Printing. 서울대학교 보건대학원 보건학석사 학위논문

김유나. Characterization of Particulate Mather and Gaseous Material Emission at 3D Printer Operation. 서울대학교 보건대학원 보건학석사 학위논문

양창준, 황성환, 최현경 등. 2017년 3D프린팅 산업 실태 및 동향조사. 정보통신산업진흥원 연구보고서 2018.01.

## Abstract

### Title

Ultrafine particle, chemical and metal concentration from 3D printers in real 3D printing sites

### Objective

Three dimensional (3D) printers are currently available and popular to users. 3D printing technology is from additive manufacturing (AM) and it has been under development for over the 30 years. One of most available 3D printer is fused deposition modeling (FDM). During a heated extrusion nozzle, melting, and depositing filaments, ultrafine particles (UFPs), volatile organic compounds (VOCs), and metals are emitted in indoor environment. The purpose of study is that we measure emitted UFPs, VOCs, and metal from inexpensive FDM-3D printers (filament: PLA, ABS) in sites and compare those hazardous substances with other 3D-printers among a stereo lithography apparatus (SLA), digital light processing (DLP), selective laser sintering (SLS), and material jetting (MJ).

### Methods

We measured particle number concentration (PNC), and particle surface area concentration (PSAC) of UFPs using real time samplers in main area and before or after UFPs sampling, measure background concentration for comparing with emitted UFPs during working process. Particle shape and composition were sampled using Mini Particle Sampler (MPS) and analyzed by a transmission electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (TEM-EDS). VOCs were sampled by Tanax TA and were analyzed by

thermal desorption-gas chromatography/mass spectrometry (TD-GC/MS). Metals were sampled by MCE filter and were analyzed by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). Both of them were collected at a personal breathing zone and area samples. Additionally, TVOC, CO, CO<sub>2</sub>, temperature, relative humidity were measured with a real time monitors.

## Results

Size distribution from low-cost FDM-3D printers was 13.3~17.8nm, 31.6~42.2nm (PLA filament), 100~133.4nm (ABS filament) and size distribution from other 3D printers was 75~100nm (SLA, DLP, MJ), 100~133.4nm (SLS). PNC from low-cost FDM-3D printers was from  $5.0 \times 10^3$  to  $1.4 \times 10^5$  ea/cm<sup>3</sup> and NPC from other 3D printers was from  $5.0 \times 10^2$  to  $1.7 \times 10^3$  ea/cm<sup>3</sup>. PSAC from low-cost FDM-3D printers was from 19 to 85 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> and NPC from other 3D printers was from 4 to 16 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>. During a warm-up process from low-cost FDM-3D printers, PNC was higher than working process and background concentration ( $1.8 \times 10^5$  vs  $1.4 \times 10^5$  vs  $1.0 \times 10^5$  ea/cm<sup>3</sup>) in a site A. During a warm-up process from low-cost FDM-3D printers, PNC was higher than working process and background concentration ( $2.0 \times 10^4$  vs  $6.4 \times 10^3$  vs  $3.8 \times 10^3$  ea/cm<sup>3</sup>) in a center of site C. During a warm-up process from low-cost FDM-3D printers, PNC was higher than working process and background concentration ( $5.7 \times 10^4$  vs  $1.6 \times 10^4$  vs  $3.8 \times 10^3$  ea/cm<sup>3</sup>) in a lab of site C. Chemical (ethanol, acetone, IPA, MIBK, toluene, ethylbenzene, xylene, cyclohexanone) and metal (Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, Fe, etc) were detected at a low concentration. Concentration for NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> were lowly detected, but NO was not detected.

## Conclusions

Main size distribution was under 100 nm emitted from low-cost FDM-3D printers. Main size distribution of PLA filament was much lower than ABS filaments. PNC and PSAC concentrations were highly correlation for every sampling results ( $P < 0.01$ ). employees were no detectable concentration of VOCs and metals during working hours. All of VOCs and metal concentration were below occupational exposure limits (OEL) in Korea. Almost emitted UFPs were regular shape, and carbon containing agglomerate. During warm-up process of low-cost FDM-3D printers, PNC was shapely increased, we suggest to install local exhaust ventilation system or to replace encapsulated type 3D printers. If difficult all we suggested, employers should provide employees with personal respiratory equipment.

**Key words** : FDM-3D Printer, UFPs, VOCs, metals, real 3D printing sites

## 〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 김성호 (연 구 원, 직업환경연구실)

공동연구자 : 정은교 (연구위원, 직업환경연구실)

김세동 (연 구 원, 직업환경연구실)

## 〈〈연 구 기 간〉〉

2018. 1. 1 ~ 2018. 11. 30

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

**산업안전보건연구원장**

### **3D 프린터 사용자에 대한 초미세입자 노출평가**

2018-연구원-889

---

발 행 일 : 2018년 11월 30일  
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 직무대리 이관형  
연구 책임자 : 직업환경연구실 연구원 김성호  
발 행 처 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원  
주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400  
전 화 : (052) 7030-914  
F A X : (052) 7030-337  
Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

---