



3D 프린터 사용실태 및 건강영향조사 -교육기관 중심으로-

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



연구보고서

3D 프린터 사용실태 및 건강영향조사

-교육기관 중심으로-

최지형·이경은·최영화·박동준

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2022년 1월~2022년 12월
- 핵심단어 3D 프린터, FDM, PLA, ABS, 발암물질, 나노입자, 건강영향
- 연구과제명 3D 프린터 사용실태 및 건강영향조사

1. 연구배경

국내 교육현장에서는 기초·전문 인력양성을 위해 3D 프린팅 관련 교육기관 지원 및 교육 커리큘럼 개발을 통한 중장기 인재육성이 시행되었으며 2014년부터 초·중 실과, 기술, 가정 등 교과과정에 3D 프린팅 개념이해 및 실습내용을 포함한 시범교육을 시행하였고, 미래창조과학부(현, 과학기술정보통신부)의 무한상상실 운영기관 선정(14년 1월)과 연계하여 초등에서 중등으로 단계적 확산과 마이스터고 등에 실무형 교육 및 장비 보급을 추진하여 2014년경부터 교육현장에서 본격적으로 사용되기 시작하였다(3D 프린팅 산업 발전 전략(미래창조과학부), 2014). 하지만, 사용 후 6~7년이 지난 지금 교육현장에서 3D 프린터를 사용한 교사 7명이 암이 발생했다는 언론보도(KBS, 2020/YTN, 2021)가 있었고 사회적으로도 이슈화가 되었으나, 질병 발생 원인이 3D 프린터 사용에 의한 인과 관계는 불명확한 상태이다. 학교나 교육시설 등에서 대부분 사용하는 FDM(Fused deposition modeling)방식의 3D 프린터는 열가소성 수지를 열로 녹여 적층판에 출력물을 한층 씩 쌓는 방식인데, 이 작업 중 수지가 열에 녹으며 나노입자(nm)가 발생하고, 유기화합물 등 다양한 유해물질이 발생하여 건강상의 문제를 일으킬 가능성이 있다고 한다(김성호 등, 2018). 하지만, 3D 프린터의 유해물질에 대한 선행 연구에서의 발암물질 측정은 부족한 실정이고 나노입자 역시 대부분 노출에 대한 챔버연

구나 사업장 대상 연구로 실제 교육현장에서의 노출과 비교하기에는 무리가 있다. 또한 언론보도 이후 3D 프린터 사용 교육현장에서 불안감을 호소하고 있어, 교육현장에서의 작업환경측정결과와 건강영향조사가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 3D 프린터의 사용실태 및 발암물질 노출실태, 건강영향조사를 통해 학교현장에서의 건강보호관리 방안과 제도적 개선안의 참고자료로 활용되고자 한다.

2. 주요 연구내용

1) 국내

(1) 3D 프린터를 보유한 교육기관의 사용실태 조사

3D 프린터를 보유한 교육기관의 사용실태를 알아보기 위해 인사혁신처를 통해 2020년 3D 프린터 실태조사에 관한 교육부 DB를 재분석하여 정리하였다. 조사대상 학교 전체 10,816개교 중 53.2%(5,742개교)에서 23,553대의 3D 프린터를 보유하고 있었다. 또 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 재료압출방식(ME, Material Extrusion)의 하나인 FDM(Fused deposition modeling)방식이 5,083개교(88.5%)에서 사용 중이었다. 사용소재는 PLA(Polylactic acid)가 90.4%(5,192개교), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 15.1%(868개교) 순으로 많이 사용하였고 신체이상을 경험한 자가 소속된 교육기관은 4.8%(274개교)로 분포하였다. 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 환기형태는 별도의 자체정화장치나 국소배기장치 없이 창문 등 전체 환기만 있는 경우가 79.8%(4,580개교)이었고 창문을 포함한 환기장치가 아예 없는 경우가 0.9%(51개교)로 나타났다.

(2) 교육현장과 유사한 실험 환경과 실제 교육현장에서의 작업환경측정

- ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)와 PLA(Polylactic acid) 필라멘트를 이용한 3D 프린터의 출력물이 바람과 온도 등에 매우 예민하여 3D 프린터와 발암 관련성이 언론보도로 이슈화되기 전까지는 창문이나 문을 모두 닫은 상태에서 3D 프린터를 교육현장에서 사용하였다. 따라서 사무실 형식의 실험실 내에서 창문 및 문을 닫고 측정하였는데 ABS와 PLA 소재에서 노출가능한 발암물질인 아크릴로니트릴, 스티렌, 1,3-부타디엔, 포름알데히드, 에틸벤젠, 염화비닐을 측정한 결과 포름알데히드가 검출한계미만이나 0.002ppm, 0.003ppm 수준으로 매우 낮게 측정되었고 나머지 물질은 모두 검출한계 미만으로 확인되었다. 나노입자(10~420nm)는 ABS와 PLA 각 소재별 3회씩을 측정한 결과 같은 소재임에도 측정 시 마다 입자 수 농도에 차이가 있었으나 3D 프린터 작동 전에 비해 작동 중에서 모두 일관적이며 증가하였다. 또한 모든 측정결과에서 100nm(0.1 μ m)미만의 나노입자에서 농도가 높은 것을 확인하였다.

- 실제교육현장에서는 현재의 환경에서 발암성 노출 확인을 위해 측정하였다. 현재는 3D 프린터가 이슈화 된 이후 국소배기장치 및 후드를 설치한 곳도 있었으며 공기정화장치 도입, 환기팬 설치, 창문개방 등의 환기를 실시하고 있었다. 또한 방문한 10개 학교 모두에서 상대적으로 덜 유해하다고 알려진 PLA(Polylactic acid)만을 사용하고 있어 과거에 비해 현재는 환경이 많이 개선된 것으로 확인되었다. 발암물질인 유기화합물의 경우 10개 학교에서 3D 프린터를 사용하는 곳을 중심으로 측정하였고 대조군으로 3개교는 외기에서도 측정하였다. 염화비닐과 1,3-부타디엔은 모든 학교에서 검출한계 미만으로 확인되었고 학교의 3D 프린터 근접에서 측정한 인자별 평균값(산술)은 포름알데히드 0.0191 ppm(노출기준 : 0.3 ppm), 벤젠 0.0002 ppm(노출기준 : 0.5 ppm), 에틸벤젠 0.001 ppm(노출기준 : 100 ppm), 스티렌 0.0003 ppm(노출기준 : 20 ppm)이었다. 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌은 고용노동부 노출기준에 비해 0.01% 수준으로 노출 정도가 낮았고, 포름알데히드는 노출기준

에 비해 6.37% 정도로 낮았다. 하지만 대조군으로 외기를 측정한 학교에서 3D 프린터실 내에서 측정한 결과에 비해 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌의 경우 워낙 미량이라 외기와 차이가 뚜렷하지 않았으나 포름알데히드는 미량 증가하는 경향을 보여 환기는 필요한 것으로 확인되었다. 중금속의 경우 대부분의 시료에서 검출한계 미만으로 나타났고, 일부 시료에서만 납, 니켈 및 크롬이 검출되었는데 노출기준의 0.001% 이하의 수준으로 노출정도가 매우 낮았다. 나노입자의 경우 창문을 통한 외기의 영향이 큰 것으로 확인되었고 일부에서 사용 환경이나 가동조건, 환기 부족에 따라 농도가 상승하는 학교도 있었다.

즉, 환기가 불충분(창문 및 문 닫힘)한 곳에서 3D 프린터 1대를 가동한 본 연구의 실험에서와 실제 교육기관에서의 발암물질 노출정도는 매우 낮아 우려할 수준은 아니었다. 하지만 연구결과에 따라 장소가 협소하고 환기가 불충분한 곳에서 여러 대의 3D 프린터를 가동할 경우 고장 등의 가동상태 및 필라멘트의 종류에 따라 포름알데히드 미량 증가 및 나노입자의 발생이 높아질 수 있고 환기가 충분할 경우 노출정도가 외기 수준과 유사해지는 것을 확인하였다.

(3) 신체영향 경험 유무에 따른 사용실태 특성 분석

교육부의 “3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사“ DB 분석을 통해 3D 프린터 개방여부와 사용소재, 환기 형태와 신체영향 경험의 유의성을 확인하였다. 신체영향 경험 증상에서는 3D 프린터를 보유한 전체 5,724개교 중 274개교(4.8%)에서 신체영향을 경험한 것으로 응답하였다. 교육기관에서는 호흡기자극 161개교, 두통 152개교 순으로 높았고, 소속된 인원에서 가장 많은 증상을 호소하는 것은 두통 603명, 호흡기자극 219명, 눈자극 198명 순으로 나타났다. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성을 통계 분석한 결과에서 FDM형식, 소재, 환기형태($p < .001$), 보유대수, 사용량, 가동시간, 상주시간($p < .0001$), 공간구분여부($p = 0.007$)에서 모두 통계적으로 유의하였다. 특히 특별한 환기장치 없이 창문 등의 자연환기와 전체환기만 보유한 곳에서 신체영향 경험이 있는 곳이 65%(178개교)의 비율로 가장 높게 나타났다.

(4) 3D 프린터 건강영향사례 조사 및 암 발생률

3D 프린터는 최근 보급되어 급격히 사용량이 증가된 새로운 직업적 유해요인이다. 하지만 사회적 관심에 비하여 암 발생률을 포함한 건강 영향(암 발생)에 대한 조사는 부족한 상태로, 국내·외 문헌의 결과를 종합하여 이에 관련된 종합적 최신의 근거를 제공하고자 체계적 문헌고찰을 수행하였다. 핵심질문은 “3D 프린터 사용자는 암의 발생 위험이 증가하는가?” 이었는데 관련된 논문 200건을 검토한 결과 최종적으로 3D 프린터와 암 발생과 관련 있는 논문은 한국에서 3명의 교사에게 발병한 의학 사례보고 1건이었다. 이 의학사례는 3D 프린터를 사용한 3명의 교사에게 각각 발생한 육종인 Ewing’s sarcoma, Well-differentiated liposarcoma, Malignant peripheral nerve sheath tumor(MPNST)로 앞의 두 케이스가 한 학교에서 잇달아 발생하여 이에 대한 의구심을 제기한 연구였다. 또한 화학물질의 노출과 암 발생 사이에는 일반적으로 용량반응관계가 있으며, 반응의 최소값을 역치(threshold, 임계 값)라고 지칭한다. 한 분자의 발암물질에 의해서 세포내에 종양발생변화가 생긴다고 가정하더라도, 특정 용량 이하의 노출에서는 그 발암물질 분자가 표적세포에 도달할 가능성이 매우 낮다(김수근, 2014). 하지만, 2014년부터 3D 프린터를 사용하는 교사집단에서 이미 암이 발생하였고 특히 육종암 같은 희귀암이 한 학교에서 2명이 발생하여 3D 프린터와의 연관성에 의구심이 있어, 3D 프린터를 사용한 교사들이 포함된 집단과 포함되지 않은 집단 간의 암 발생률을 비교하였다. 교육기관에서는 특별한 환경변화 없이 2014년에 3D 프린터가 도입되었고 개별역학조사를 통해 확인된 교사 3명 모두 2014년부터 2016년까지 3D 프린터를 사용하였으며 2020년에 암이 발생하였다. 따라서 이 시기에 3D 프린터를 사용하는 교육기관에 소속된 집단과 소속되지 않은 집단의 암 발생률을 확인할 필요가 있어, 표준화별병비(Standardized Incidence Ratio)와 오즈비(Odds Ratio)를 확인하였으나 두 집단 간 모든 암에서 통계적으로 유의미한 차이는 없었다. 하지만 나노입자의 경우 불충분한(창문 및 문 닫힘) 환기 조건에서 3D 프린터 가동 시 일관적이게 발생이 된다. 이는 과거 교육기관

에 3D 프린터가 처음 도입될 당시 좁은 환경에서 바람, 온도 등에 예민한 출력물의 상태를 위해 환기가 불충분한(창문 및 문 닫힘) 곳에서 사용하는 교육기관이 대다수였으므로 3D 프린터와 암 발생과 관련된 건강영향은 고형암의 잠재기가 10년 이상(Fraser, 2011)인 걸 감안하여 그 이후에 한 번 더 확인이 필요하다. 또한 나노입자보다 큰 미세먼지(PM10, 10 μ m이하)는 세계보건기구(WHO)산하 국제암연구소(IARC)에서 1급 발암물질로 분류(Group1, 2016)되어 있고, 나노입자 중 100nm 이하에 해당하는 초미세입자(Ultra-fine particle)는 작은 크기의 입자들이 심폐영역이나 폐포의 심부영역까지 쉽게 이동할 수 있어 더욱 강한 독성을 나타낸다는 연구 결과(Brent Stephens et al., 2013)가 있었고 3D 프린터 발생 물질의 독성연구 중 인간 연구에서 염증 유발(Gumperlein., 2018)과 호흡기 문제 발생(House., 2017/Chan., 2018)에 대한 연구도 있었다. 하지만 염증유발 및 호흡기 연관성 외 암과의 연관성 문헌은 부족하였고 현재까지는 암 발병비에서 유의하지 않았다. 따라서 이러한 상황들을 전반적으로 종합하면 '3D 프린터 사용에 따른 암 발생'은 그 연관성에 대한 의심이 제기된 상태이나 그 연관성의 근거가 아직은 부족한 상태로 확인된다. 이는 근본적으로 노출 실태조사에서처럼 3D 프린터의 사용에 따라 노출되는 위험인자의 노출 농도가 매우 낮기 때문일 수도 있으며, 그보다 근본적으로 3D 프린터가 비교적 최근에 도입된 직업적 요인으로서 암 발생 수준을 연구하기 위해 보다 충분한 시간과 인구 조건이 추가적으로 필요하기 때문일 수 있다. 따라서 3D 프린터를 사용한 10년 더 이후의 시점에서 추가적인 후속 연구는 필요할 것으로 판단된다.

3. 연구 활용방안

○ 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 여러 대의 환풍기를 가동하거나 배기장치가 가동되는 등의 충분한 환기 조건일 경우, 3D 프린터에서 유발되는 발암물질이나 나노입자는 환기가 불충분(창문 및 문 닫힘)한 조건에 비해 상대

적으로 노출정도가 낮고 외기 정도의 농도가 유지되는 것을 이번 연구를 통해 확인할 수 있었다. 하지만 산업용 3D 프린터의 경우 산업안전보건법의 적용을 받기 때문에 사업체에서 안전관리를 수행하고 있지만 교육기관에서는 사용자들의 유해물질로부터 보호하기 위한 작업환경 및 환기 등에 대한 관리가 부족한 실정이다. 또한 교사들의 심층인터뷰를 통해 의미 없는 행정보다 실질적인 환기를 위한 예산편성을 요구하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 3D 프린터 사용 시 환기에 따른 노출수준 파악을 통해 환기필요성에 대한 근거와 역학조사의 참고자료로 활용될 수 있다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 역학조사부 과장 최지형
 - ☎ 052) 703. 0873
 - E-mail yayajju@kosha.or.kr

목 차

I. 서 론	1
1. 연구배경 및 필요성	3
2. 조사 목적	4
3. 조사 내용	5
4. 조사 추진체계	6
II. 조사방법	9
1. 문헌고찰	11
2. 3D 프린팅 사용 실태조사	11
3. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성	14
4. 3D 프린터 건강영향사례 및 교육기관의 암 발생률	15

III. 연구결과	17
1. 3D 프린터 사용 실태조사	19
1) 3D 프린터사용 교육기관의 사용 실태조사와 표준산업분류	19
2) 문헌고찰	26
2. 3D 프린터 사용 환경에서의 작업환경측정	34
3. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성	83
4. 건강영향사례 및 교육기관의 암발생률	87
1) 3D 프린터 관련 건강영향사례 조사	87
2) 교육기관의 암 발생률	92
IV. 결론 및 제언	97
참고문헌	107
Abstract	115
부록 1	123
부록 2	125

표 목차

〈표 II-1〉 측정기기	13
〈표 III-1〉 교육기관에서 3D 프린터 보유비율	20
〈표 III-2〉 3D 프린터 보유 교육기관의 일반적 특성	21
〈표 III-3〉 3D 프린터 보유 교육기관의 사용형태 및 신체이상 경험	22
〈표 III-4〉 3D 프린터를 사용하는 교육기관의 상주시간 및 환기형태	23
〈표 III-5〉 3D 프린팅 관련 사업 분류 및 사업체수	25
〈표 III-6〉 국내문헌고찰	26
〈표 III-7〉 국외문헌고찰	29
〈표 III-8〉 측정물질 발암성 표기	35
〈표 III-9〉 평가대상 물질의 분석검출한계	36
〈표 III-10〉 측정 조건	37
〈표 III-11〉 3D 프린터 실험실 유기화합물 측정결과(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid))	38
〈표 III-12〉 배경농도 입자 수 농도(1~3회차)	41
〈표 III-13〉 미세먼지 등급 기준	41
〈표 III-14〉 PLA(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)입자크기	42
〈표 III-15〉 PLA(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)입자크기	43
〈표 III-16〉 PLA(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(3회차)입자크기	44
〈표 III-17〉 ABS(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)입자크기	45
〈표 III-18〉 ABS(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)입자크기	46
〈표 III-19〉 ABS(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(3회차)입자크기	47

〈표 III-20〉 PLA(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)입자크기	48
〈표 III-21〉 PLA(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)입자크기	49
〈표 III-22〉 ABS(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)입자크기	50
〈표 III-23〉 ABS(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)입자크기	51
〈표 III-24〉 ABS(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(3회차)입자크기	52
〈표 III-25〉 소재별 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도 비교(GM)입자크기	53
〈표 III-26〉 소재별 3D 프린터 작동 중 입자 수 농도 비교(최댓값)입자크기	55
〈표 III-27〉 조사당시(2022년) 학교별 3D 프린터 보유대수 및 사용빈도	65
〈표 III-28〉 학교별 3D 프린터실 내·외부 측정결과	68
〈표 III-29〉 학교별 3D 프린터실 내·외부 측정결과(3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 존재)	69
〈표 III-30〉 학교별 3D 프린터실 내 발암성 중금속 측정결과	70
〈표 III-31〉 학교별 3D 프린터실 내 발암성 중금속 측정결과(3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 존재)	70
〈표 III-32〉 학교별 3D 프린터 가동 중 SMPS로 측정된 나노입자(10~420nm) 수 농도와 입자크기	72
〈표 III-33〉 학교별 3D 프린터 가동 중 SMPS로 측정된 나노입자(10~420nm) 수 농도와 입자크기 (3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 존재)	74
〈표 III-34〉 심층 인터뷰 대상자 특성 및 3D 프린터 주용도	75
〈표 III-35〉 3D 프린터 사용 교사 대상 심층 인터뷰 질문 내용	76
〈표 III-36〉 신체영향 경험 증상(복수응답)신체영향 경험 교육기관	84

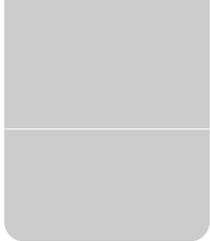


표 목차

〈표 III-37〉 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성(1)	85
〈표 III-38〉 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성(2)	86
〈표 III-39〉 대상자 상세 등록 조건	93
〈표 III-40〉 표준화발병비(SIR) 결과	95
〈표 III-41〉 오즈비(OR) 결과	96

그림목차

[그림 I-1] 조사추진체계	7
[그림 III-1] 3D 프린터 작동원리	19
[그림 III-2] 1~4회차 포름알데히드 발생 흐름(직독식 측정기)	40
[그림 III-3] 측정 중인 나노스캔과 출력물	41
[그림 III-4] 3D 프린터 가동 시 소재별 작동 전, 중, 후 비교(GM)	54
[그림 III-5] 3D 프린터 작동 중 소재별 입자 수 농도 비교(최댓값)	55
[그림 III-6] 입자 수 농도 추이(소재 : PLA)	56
[그림 III-7] 입자 수 농도 추이(소재 : ABS)	57
[그림 III-8] PLA(1)-1 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	58
[그림 III-9] PLA(1)-2 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	58
[그림 III-10] PLA(1)-3 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	59
[그림 III-11] PLA(2)-1 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	59
[그림 III-12] PLA(2)-2 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	60
[그림 III-13] ABS(1)-1 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	60
[그림 III-14] ABS(1)-2 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	61
[그림 III-15] ABS(1)-3 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	61
[그림 III-16] ABS(2)-1 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	62
[그림 III-17] ABS(2)-2 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	62
[그림 III-18] ABS(2)-3 가동중 입자별크기에 따른 입자 수 농도	63
[그림 III-19] Pubmed 체계적 문헌고찰 검색의 flow chart 1	88
[그림 III-20] Pubmed 최종 검색 List	89
[그림 III-21] Pubmed 체계적 문헌고찰 검색의 flow chart 2	90

I. 서론



I. 서론

1. 연구배경 및 필요성

우리나라는 3D 프린팅 산업에 대해 산업통상지원부와 미래창조과학부(현, 과학기술정보통신부)가 공동으로 2014년 4월 23일 '3D 프린팅 산업 발전 전략'을 국가 과학기술 심의회에서 의결하였으며, 범 부처 3D 프린팅 산업 발전협의회를 구성하여 3D 프린팅 장비 기술 개발 및 시장 활성화가 본격화 되었다. 또한 기초·전문 인력양성을 위해 3D 프린팅 관련 교육기관 지원 및 교육 커리큘럼 개발을 통한 중장기 인재육성이 시행되었으며 2014년부터 초·중 실과, 기술, 가정 등 교과과정에 3D 프린팅 개념이해 및 실습내용을 포함한 시범교육을 시행하였고, 미래창조과학부(현, 과학기술정보통신부)의 무한상상실 운영기관 선정(14년 1월)과 연계하여 초등에서 중등으로 단계적 확산과 마이스터고 등에 실무형 교육 및 장비 보급을 추진하여 2014년경부터 교육현장에서 본격적으로 사용되기 시작하였다(3D 프린팅 산업 발전 전략(미래창조과학부), 2014). 또 정부 주도하에 2015년 3D 프린팅 산업 진흥법을 제정하며 3D 산업이 본격화 되었고, 2014년부터 2017년까지 전국 초·중·고에 3D 프린터가 보급되어 사용되었다. 하지만, 사용 후 6~7년이 지난 지금 교육현장에서 3D 프린터를 사용한 교사 7명이 암이 발생했다는 언론보도(KBS, 2020/YTN, 2021)가 있었고 사회적으로도 이슈화가 되었으나, 질병 발생 원인이 3D 프린터 사용에 의한 인과 관계는 불명확한 상태이다.

교육현장에서 사용된 3D 프린팅의 기본 기술은 적층(AM : Additive Manufacturing) 방식으로 2011년에 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 녹여 적층판에 출력물을 한층 씩 쌓는 방식인데, 이 작업 중 수지가 열에 녹으며 나노입자(nm)가 발생하고, 유기화합물 등 다양한 유해물질이 발생하여 건강상의 문제를 일으킬 가능성이 있다고 한다(김성호 등, 2018). 하지만, 3D 프린터의 유해물질에 대한 선행 연구에서의 발암물질 측정은 부족한 실정이고 나노입자 역시 대부분 노출에 대한 챔버연구나 사업장 대상 연구로 실제 교육현장에서의 노출과 비교하기에는 무리가 있다. 또한 언론보도 이후 3D 프린터 산업 및 교육현장에서 불안감을 호소하고 있어, 교육현장에서의 작업환경측정결과와 건강영향조사가 필요한 실정이다. 따라서, 실제 현장에서의 작업환경측정결과와 현장과 유사한 환경에서 3D 프린터를 가동하여 3D 프린터 소재에서 발생하는 발암물질 및 나노입자에 대한 노출정도를 측정하여 유사환경에서의 노출과 실제 교육현장에서의 노출정도를 확인하고자 한다. 또 산업용 3D 프린터의 경우 산업안전보건법의 적용을 받기 때문에 사업체에서 안전관리를 수행하고 있지만 교육기관에서는 유해물질 사용에 대한 가이드라인, 작업환경관리, 환기 등에 대한 관리가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 3D 프린터의 사용실태 및 발암물질 노출실태, 건강영향조사를 통해 학교현장에서의 건강보호관리 방안과 제도적 개선안의 참고자료로 활용되고자 한다.

2. 조사 목적

본 연구는 교육기관에서의 3D 프린터 노출 실태조사 및 발암물질, 나노입자를 중심으로 작업환경측정을 수행하고 교육현장과 유사한 실험환경에서 3D 프린터를 소재별로 가동하여 실제 교육기관에서의 노출과 실험환경에서의 3D 프린터 노출정도 및 건강영향에 대해 파악하고자 하며 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 3D 프린터를 보유한 교육기관의 사용실태를 조사한다.

둘째, 교육현장과 유사한 실험 환경과 실제 교육현장에서 작업환경측정을 실시한다.

셋째, 신체영향 경험 유무에 따른 사용실태 특성을 분석한다.
넷째, 3D 프린터 건강영향사례를 조사하고, 3D 프린터 사용한 교사들이 포함된 집단과 포함되지 않은 집단 간의 암발생률을 비교하였다.

3. 조사 내용

1) 3D 프린터를 사용하는 교육기관의 사용실태 조사

과학기술정보통신부에서 주관하고 인사혁신처를 통해 교육부에서 제공받은 “3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사” 자료 및 DB를 분석하였다.

2) 교육현장과 유사한 실험 환경과 실제 교육현장에서의 작업환경 측정과 심층인터뷰 실시

교육현장과 유사한 실험 환경과 실제 교육현장에서의 발암물질 및 나노입자 노출을 측정하여 노출 유무를 파악하고자 하였다. 또한 위탁연구에서 실시한 실제 교육기관 환경조사에서 3D 프린터를 사용하는 교사를 대상으로 심층인터뷰를 진행하였고, 서울대학교 생명윤리위원회에서 심의 승인(승인번호 : 2207/002 - 007)을 받았다.

3) 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성

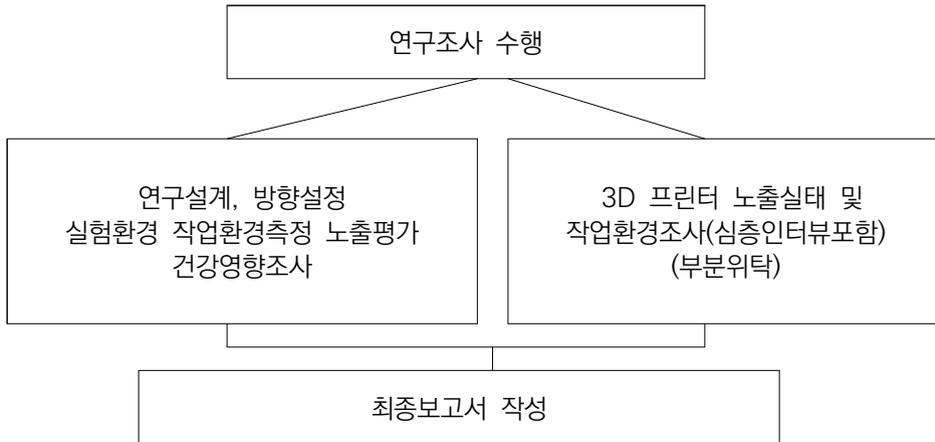
“3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사” DB를 분석하여 노출정도와 연관 있는 3D 프린터 개방여부, 사용소재, 환기 형태, 설치공간구분 및 평균 보유대수, 필라멘트 사용량, 가동시간, 상주시간과의 통계적 유의성을 확인하고자 SPSS ver. 27을 이용하여 기술통계 및 교차분석(χ^2 -test), 비모수 t-test(Wilcoxon rank sum test) 분석을 시행하였다.

4) 3D 프린터 건강영향사례 및 교육기관의 암 발생률 확인

3D 프린터 사용과 연관 있는 국내·외 건강영향사례(암 발생)를 확인하기 위해 체계적 문헌고찰을 수행하였다. 또한, 본 연구 진행을 위해 인사혁신처를 통해 개인정보를 제외한 교육부 실태조사의 DB를 제공받았으며 관련 자료와 건강보험공단 자료를 연계하여 개인식별정보가 익명화 되어 있는 자료를 활용하였으며, 산업안전보건연구원 생명윤리위원회에서 심의 승인(승인번호 : OSHRI - 202202 - HR - 001)을 받았다. 암 발생률은 3D 프린터를 사용한 교사들이 포함된 집단과 전체 교육기관 집단을 대상으로 암 발생률 비교를 위해 표준화발병비(SIR, Standardized Incidence Ratio)와 오즈비(Odds Ratio)를 확인하였다.

4. 조사 추진체계

이 연구의 추진체계는 아래 그림(1)과 같으며, 3D 프린터의 교육기관 사용 현황과 실제 교육현장에서의 3D 프린터 노출실태 및 작업환경조사, 심층인터뷰를 위탁기관인 서울대학교에서 수행하여 진행하였다. 방향 설계, 유사한 환경으로 조성된 실험실 내에서 소재에 따라 노출 가능한 발암물질 및 나노입자 측정, 신체영향 경험 유무에 따른 사용실태 특성, 건강영향에 대한 조사는 연구원에서 수행하였다.



[그림 I-1] 조사추진체계

II. 조사방법



II. 조사방법

1. 문헌고찰

◎ 국내·외 3D 프린터 사용과 관련된 노출평가 및 작업환경, 건강 영향에 대한 선행연구 분석

3D 프린터와 관련한 TVOC(총휘발성유기화합물) 및 나노입자, 유기화합물 노출에 대한 챔버연구 및 사업장 대상 연구, 건강영향 등에 대한 관련 문헌들을 조사하였고, 학술지(산업보건학회, 환경보건학회, 직업환경의학회), Pubmed, google scholar, 산업안전보건연구원 연구보고서 등에서 “3D 프린터”과 “건강 영향” 등의 단어를 개별 또는 조합하여 검색하였다.

2. 3D 프린터 사용 실태조사

1) 시료채취 및 분석방법, 측정물질

시료채취방법은 노출 확인을 위해 지역시료로 진행하였고 각 시료의 작업환경측정 분석·기술 지침에 맞게 유량을 설정하여 측정하였고, 교육기관 실태조사에서 91%이상이 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid) 소재 필라멘트를 사용하고 있어 두 소재에 대해 측정하였다. 평가항목은 선행문헌인 연구원에서 수행한 3D 프린터 소재 PLA(Polylactic acid)와 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)의 성분분석 결과(정은교 등, 2019) 발암성 물질은 스티렌, 에틸벤젠 두 가지가 검출되었고, 다른 문헌에서는 아크릴로니트릴, 스티렌, 1,3-부타디엔이 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 열처리 공정에서 분해산물(zitting and savolainen, 1980:schaper et al.,

2005)로 나온다고 하였으며, 또 다른 문헌에서 3D 프린터 필라멘트에서 포름알데히드(yoon et al., 2015)와 염화비닐(Boowook kim., 2022)이 검출되어, 측정인자로 발암물질인 아크릴로니트릴, 스티렌, 1,3-부타디엔, 에틸벤젠, 포름알데히드, 염화비닐을 선정하였고, 나노입자는 현재까지 노출기준이 설정된 물질이 아니지만 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서 폐와 기도에 달라붙어 건강에 영향을 주는 미세먼지(PM10, 10 μ m이하)를 1급 발암물질로 분류(Group1, 2016)하고 있고, 나노입자 중 100nm 이하에 해당하는 초미세입자(Ultra-fine particle)는 작은 크기의 입자들이 심폐영역이나 폐포의 심부영역까지 쉽게 이동할 수 있기 때문에 더욱 강한 독성을 나타낸다는 연구결과(Brent Stephens et al., 2013)도 있어 3D 프린터에서의 노출이 알려진 나노입자도 측정인자로 선정하였다. 실제 교육기관에서의 노출실태를 확인하기 위해 위의 발암물질 외 중금속 발암물질인 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬도 추가로 현장에서 측정인자로 선정하였다.

〈표 II-1〉 측정기기

측정기기(제조사, 모델)	기기특성
 <p>Nanoscan(SMPS)(TSI, Model 3910)</p>	<p>입자범위 : 10~420 nm(13채널) 측정시간 : 초당 농도범위 : 102~106 당Particle/cm3 응축용액 : 이소프로필알코올 원리 : 입자의 전하량 이용, 전기이동 분석을 통한 나노입자 분포 측정</p>
 <p>직독식측정기(Multirae Pro, Lite)</p>	<p>측정물질 : HCHO 측정시간 : 초당</p>
 <p>작업환경측정 샘플러(Gilian, LFS-113)</p>	<p>유량 : 1~350cc/min 온도 : 0~40℃ 충전시간 : 14h~16h 특징 : 저유량 포집</p>
<p>3D 프린터(A사)*</p>	<p>출력방식 : FDM 형태 : 덮개형 노즐 : 0.3 mm & 0.8 mm 최대출력사이즈 : 21cm × 15cm × 10cm 베드온도 : 110℃ 사용원료 : 전용 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid) 필라멘트</p>
<p>3D 프린터(B사)*</p>	<p>출력방식 : FDM 형태 : 오픈형 노즐 : 0.25 mm ~ 0.8 mm 최대출력사이즈 : 20cm × 20cm × 20cm 베드온도 : 없음 사용원료 : PLA(Polylactic acid) 필라멘트</p>
<p>3D 프린터(C사)*</p>	<p>출력방식 : FDM 형태 : 밀폐형 노즐 : 0.4 mm 베드온도 : 120℃ 사용원료 : ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid) 필라멘트</p>

* 실험 측정 시 사용 - 프린터기 전용 소재 사용으로 인해 블라인드 처리함.

2) 실태조사 및 작업환경측정

교육기관에서의 3D 프린터 사용실태조사는 교육부에서 제공받은 자료 및 DB를 통해 정리 및 재분석하였다. 교육부 조사 결과에서 3D 프린터 사용학교가 5,754개교로 명시되어 있었으나 재분석 결과 중복학교 및 기관명이 없는 곳 등 12곳이 확인되어 제외한 결과 3D 프린터 사용학교는 5,742개교로 확인되었다. 또한 실제 교육기관 환경조사에서 3D 프린터를 사용하는 교사 10명을 대상으로 위해성 인식도, 사용소재, 작업환경, 신체영향, 건의사항에 대해 인터뷰하였다. 또 실제 교육기관에서의 작업환경측정(10개 학교)실시 및 현장조사 시 상세 작업환경을 추가하였으며, 3D 프린터 사용 현장과 유사한 실험실(일반 사무실)에서 측정을 실시하였다. 실험실 환경에서는 입자 수 농도의 경우 소재별로 3회씩 측정하였고, 실제 교육기관에서는 교육부의 실태조사 결과를 토대로 3D 프린터 사용에 따른 건강이상 유증상자가 있었던 학교와 없었던 학교를 고르게 총 20여개를 선정하였다. 이 후 조사에 협조한 학교 중 유증상 5개 학교, 무증상자 5개 학교를 선정하여 작업환경측정과 특성을 조사하였고 학교별로는 대학교 1개, 고등학교 6개, 중학교 3개이다.

3. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성

◎ 신체영향 경험 DB 분석

과학기술정보통신부에서 주관하고 교육부에서 제공받은 “3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사” DB를 분석하여 노출도와 연관 있는 3D 프린터 개방여부, 사용소재, 환기 형태, 설치공간구분과의 유의성을 확인하고자 SPSS ver. 27을 이용하여 기술통계 및 교차분석(χ^2 -test)을 시행하였고 기대빈도가 낮아 교차분석가정을 충족시키지 못하는 경우 피셔 정확 검정(Fisher's exact test)을 시행하였다. 또한 신체영향 경험 여부에 따른 보유대수, 필라멘트 사용량, 가동시간, 상주시간에 대해 비모수 t-test(Wilcoxon rank sum test)분석을 시행하였다.

4. 3D 프린터 건강영향사례 및 교육기관의 암 발생률

1) 3D 프린터 관련 건강영향사례 조사

국내·외 문헌을 토대로 3D 프린터와 관련된 암 발생과의 연관성 확인을 위해 체계적 문헌고찰을 수행하여 건강영향사례에 대해 조사한다.

2) 3D 프린터 사용 집단에서의 암 발생률

3D 프린터를 사용한 교사들이 포함된 집단과 포함되지 않은 집단을 대상으로 암 발생률 비교를 위해 표준화발병비(SIR, Standardized Incidence Ratio)와 오즈비(Odds Ratio)를 확인한다.

Ⅲ. 연구 결과

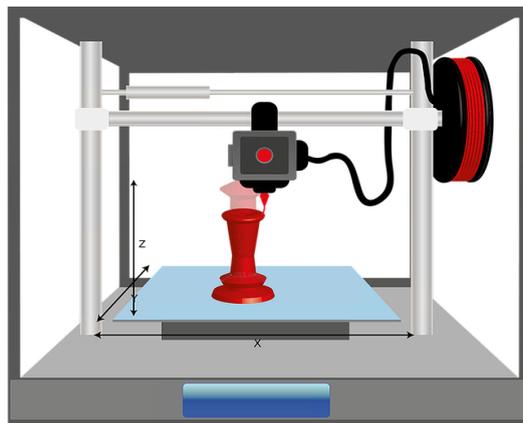


Ⅲ. 연구결과

1. 3D 프린터 사용 실태조사

1) 3D 프린터 사용 교육기관의 사용 실태조사와 표준산업분류

- (1) 3D 프린터란, 기존의 X축, Y축으로 운동했던 2D 프린터에 상하축인 Z축 운동을 추가하여 입체적인 물품을 만들어내는 것으로, 3D 프린터 방식은 재료압출방식, 광중합방식, 분말적층용융방식, 접착제 분사 방식 등이 있다. 이중 가장 보편화되고 교육기관에서 대부분 사용한 것이 바로 재료압출방식(ME, Material Extrusion)의 하나인 FDM(Fused deposition modeling)¹⁾ 방식이다.



<출처 : Pixabay>

[그림 Ⅲ-1] 3D 프린터 작동원리

1) FDM은 특히 만료된 기술로 상품명이기도 하여, FFF(fused filament fabrication)으로 사용되기도 함.

(2) 과학기술정보통신부에서는 3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사를 부처합동으로 실시하여 교육부에 해당하는 DB를 인사혁신처를 통해 제출받았다. 2020년 9월 22일부터 10월 13일까지 전수 조사하였고 고등교육기관인 대학은 전체 398개교 중 333개교(83%)가 조사에 참여하였다.

〈표 Ⅲ-1〉 교육기관에서 3D 프린터 보유비율

(단위 : 교, 개, %)

구 분	조사대상 학교	보유학교		(FDM)보유대수			
		학교 수	비율	개방형	밀폐형	계	
합 계	10,816	5,742	53.2	9,569	13,984	23,553	
초중 고특	소계	10,483	5,505	52.5	7,324	10,661	17,985
	초	5,231	1,961	37.5	1,986	3,119	5,105
	중	2,886	1,841	63.8	2,361	3,031	5,392
	고	2,218	1,663	75.0	2,957	4,479	7,436
	특	148	40	27.0	20	32	52
대학	333	237	71.2	2,245	3,323	5,568	

* 밀폐형(뿔개형 포함)

조사 대상 학교 전체 10,816개교 중 53.2%(5,742개교)에서 23,553개의 3D 프린터를 보유하고 있었고 개방형(9,569개교, 41%)보다 밀폐형(13,984개교, 59%)형태를 더 많이 보유하고 있었다.

〈표 III-2〉 3D 프린터 보유 교육기관의 일반적 특성

(N=5,742개교)

변수	구분	n(%)
규모(학생수)	100명이하	946(16.4)
	101-300	885(15.4)
	301-500	1,075(18.7)
	501-700	1,086(18.9)
	701-1000	1,060(18.4)
	1001-2000	473(8.2)
	2001-5000	64(1.1)
	5000명이상	107(1.9)
	무응답	49(0.9)
지역	서울강원	1,025(17.9)
	경인	1,320(23.0)
	광주전라	781(13.6)
	대전충청	638(11.1)
	부산경남	762(13.3)
	대구경북	1,043(18.1)
	세종	38(0.7)
	제주	135(2.3)

3D 프린터를 보유한 교육기관의 규모는 비슷한 분포를 보였고 1,000명 이하(87.8%)에서 대부분 분포하였다. 3D 프린터를 보유한 교육기관의 지역적 특성은 경인지역 23.0%(1,320개교), 대구경북 18.1%(1,043개교), 서울강원 지역 17.9%(1,025개교) 순으로 높은 분포를 보였다.

〈표 Ⅲ-3〉 3D 프린터 보유 교육기관의 사용형태 및 신체이상 경험

(N=5,742개교)

변수			n	%	
FDM(Fused deposition modeling) 방식	보유여부	보유	5,083	88.5	
		미보유	659	11.5	
	형식	밀폐형	보유	3,920	68.3
			미보유	1,822	31.7
		개방형	보유	2,374	41.3
			미보유	3,368	58.7
		밀폐형+개방형	보유	1,057	18.4
			미보유	4,685	81.6
사용 소재	PLA(Polylactic acid)	보유	5,192	90.4	
		미보유	550	9.6	
	ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)	보유	868	15.1	
		미보유	4,874	84.9	
	PLA+ABS	보유	678	11.8	
		미보유	5,064	88.2	
신체이상 경험	유		274	4.8	
	무		5,468	95.2	

3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 재료 압출방식(ME, Material Extrusion)의 하나인 FDM(Fused deposition modeling)방식이 5,083개교(88.5%)에서 사용 중이었고, 개방형(41.3%)에 비해 밀폐형(68.3%)을 보유한 교육기관의 분포가 높았다. 개방형과 밀폐형 모두 보유한 교육기관은 18.4%(1,057개교)로 분포하였다. 사용소재는 PLA(Polylactic acid)가 90.4%(5,192개교), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)가 15.1%(868개교)에서 사용 중이고 PLA와 ABS를 모두 사용하는 기관은 11.8%(678개교)로 분포하였다. 신체이상을 경험한 자가 소속된 교육기관은 4.8%(274개교), 신체이상을 경험하지 않은 자가 소속된 교육기관은 95.2%(5,468개교)로 분포하였다.

〈표 III-4〉 3D 프린터를 사용하는 교육기관의 상주시간 및 환기형태

(N=5,742개교)

변수		n	(%)
월 평균 상주시간	~1시간미만	2,291	39.9
	1시간~10시간미만	2,402	41.8
	10시간~20시간미만	539	9.4
	20시간~60시간미만	300	5.2
	60시간~100시간미만	85	1.5
	100시간~160시간미만	79	1.4
	160시간이상	46	0.8
환기형태	프린터기 자체 정화장치	464	8.1
	별도 국소배기장치	400	7.0
	프린터기 자체 정화장치+국소배기	110	1.9
	환기장치 없음	51	0.9
	무응답	137	2.4
	창문 등 전체환기	4,580	79.8

3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 3D 프린터 실 월 평균 상주시간은 1시간~10시간미만이 41.8%(2,402개교)로 하루 평균 1시간이 안 되는 기관이 가장 많았고, 월 1시간도 안 들어가는 경우가 39.9%(2,291개교)로 대부분에서 월 20시간미만, 즉 하루 1시간도 안 되는 기관이 전체 81.7%를 차지하였다. 환기형태는 별도의 자체정화장치나 국소배기장치 없이 창문 등 전체환기만 있는 경우가 79.8%(4,580개교), 프린터기 자체 정화장치 8.1%(464개교), 국소배기장치(공기정화장치 포함) 7.0%(400개교), 프린터기 자체 정화장치와 국소배기장치 모두 보유한 기관은 1.9%(110개교), 창문을 포함한 환기장치가 아예 없는 경우가 0.9%(51개교)로 나타났다.

(3) 국내 3D 프린팅 표준산업분류

3D 프린팅은 산업육성을 위해 2014년 삼차원 프린팅 발전전략을 수립하여 국가적인 차원에서 산업육성을 확대하고 있으며 표준산업분류에 3D 프린팅을 반영하여 본격적으로 산업적인 차원에서 3D 프린팅 산업을 지원하고 있다. 3D 프린팅 기술은 표준산업분류 내 “29222 디지털 적층 성형기계 제조업”으로 분류되어 있으며 “3차원 디지털 설계도에 따라 금속, 플라스틱제 등의 액체, 가루분말, 필라멘트사, 박판 등을 재료로 한 층씩 쌓아올리는 적층 방식의 성형 기계(3D 프린터)를 제조하는 산업활동”으로 정의되어 있다(2020 3D 프린팅 산업 실태조사).

〈표 III-5〉 3D 프린팅 관련 사업 분류 및 사업체수

구분	중분류	소분류	KSIC분류명(10차)	전국사업체수
장비 제조	3D프린터	광중합, 접착제분사, 재료분사 방식	(C26323) 컴퓨터 프린터제조업	144
		재료압출, 고에너지직접조사, 분말적층용융방식	(C29222) 디지털적층성형기계 제조업 (C29224) 금속 성형기계 제조업 (C29292) 고무, 화학섬유 및 플라스틱 성형기 제조업	902
		접촉식, 비접촉식, 기타	(C26329) 기타 주변기기 제조업	598
	3D스캐너	접촉식, 비접촉식, 기타	(C26329) 기타 주변기기 제조업	405
		후공정 기기	표면처리, 색채처리, 후경화	(C20411) 일반용 도료 및 관련제품 제조업 (C29132) 기체 펌프 및 압축기 제조업
	기타	구동부	(C28111) 전동기 및 발전기 제조업	1,359
		에너지출력부	(C27309) 기타 광학기기 제조업	204
감지부		(C26299) 그외 기타 전자제품제조업	1,937	
소재 제조	3D프린팅 소재	열가소성/광경화성 플라스틱	(C20501) 합성섬유 제조업	184
		금속	(C24119) 기타 제철 및 제강업	37
		세라믹	(C20412) 요업용 도포제 및 관련제품 제조업	63
S/W	3D프린팅 S/W	모델링, STL편집기, 슬라이서, 역설계 등	(J58222) 응용소프트웨어 개발 및 공급업	6,339
서비스	모델링	디자인	(M73202) 제품 디자인업	1,437
			(M73203) 시각 디자인업	2,346
	출력	출력	(C33932) 전시용 모형 제조업	896
	컨설팅	교육, 컨설팅	(P85701) 교육관련 자문 및 평가업	1,389
	교육	기타	(P85709) 기타 교육지원 서비스업	2,230
콘텐츠 유통	콘텐츠 유통	(J63120) 포털 및 기타 인터넷 정보매개 서비스업	1,447	
유통	3D프린터, 3D스캐너, S/W 유통		(G47311) 컴퓨터 및 주변장치, 소프트웨어 소매업	4,827
	소재유통		(G46733) 합성고무 및 플라스틱 물질 도매업	2,434
합계				30,415

위의 표준 산업 분류에서 교육기관에서 사용하는 3D 프린터는 C20501, C33932에 해당되어, 해당 분류에 속한 모든 사업장의 8년간 작업환경측정결과를 살펴보았다. 초과 물질은 아크릴로니트릴(31.1 ppm)과 고열 두 가지이었고 그 외 물질은 노출기준 미만이었다. 하지만 사업장에서의 3D 프린터는 소재가 다양하고 작업환경측정 대상 공정도 배합 및 믹싱, 도장, CNC가공, 용접, 세척 등으로 확인되어 교육기관에서의 3D 프린터 사용 환경과는 차이가 큰 것으로 나타났다.

2) 문헌고찰

국내·외 3D 프린터 사용과 관련된 노출평가 및 작업환경, 건강 영향에 대한 선행연구를 분석하였다. 3D 프린터와 관련한 TVOC(총휘발성유기화합물) 및 나노입자, 유기화합물 노출에 대한 챔버연구 및 사업장 대상 연구, 건강영향 등에 대한 관련 문헌들을 조사하였다. 학술지(산업보건학회, 환경보건학회, 직업환경의학학회), Pubmed, google scholar, 산업안전보건연구원 연구보고서 등에서 “3D 프린터”과 “건강영향” 등의 단어를 개별 또는 조합하여 검색하였고, 국내·외 연구 문헌을 저자, 제목, 주요내용 순으로 정리하였다.

〈표 III-6〉 국내문헌고찰

저자/제목	주요내용
김유나(2015). Characterization of Particulate Matter and Gaseous Material Emission at 3D Printer Operation. 3D printer에서 발생하는 입자상물질과 가스상물질의 발생특성평가	FDM 방식의 3D 프린터를 챔버 안에서 가동 전, 중, 후 PLA1, PLA2와 ABS를 사용하여 입자상물질과 가스상물질을 측정하였다. 입자상물질의 측정은 SMPS, CPC를 사용하였으며 3D 프린터를 가동하는 동안 입자의 수농도가 급격히 증가하였고, 입자크기 분포는 ABS와 PLA1에서 샘플링 시간 동안 100nm 이하의 입자가 많이 발생하였다. CPC의 경우 ABS를 사용하였을 때 프린터가 작동하는 전 시간 동안 500,000 particles/cm ³ 의 노출 수준으로 나타났고, PLA2는 프린터 가동하는 동안에는 100nm 보다 큰 입자를 나타내었다. 프린터를 가동하는 동안 VOCs, 알데하이드류, 프탈레이트가 발생하였다.
권오훈(2016). Control of particulate material emission during 3D Printing. 3D 프린터 가동 시 발생하는 입자상물질 제어	FDM-3D 프린터 입자농도수준을 챔버 내에서 평가한 학위논문으로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 119,545개/cm ³ , PLA(Polylactic acid)는 40,307개/cm ³ 수준이었다.

저자/제목	주요내용
<p>최치영(2016). 설정 Parameter에 따른 3D 프린터 입자 발생 양상 측정.</p>	<p>본 연구에서는 소형 챔버법을 이용하여 1대의 3D 프린터에서 발생하는 초미세입자를 노즐 온도, 출력 시간, 출력 재질 각 변수를 다르게 설정함에 따라 입자 발생이 어떻게 달라지는지 비교 분석하였다. 그 결과 설정 노즐 온도가 높을수록 입자가 많이 발생하였으며 그 수 농도 값은 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 의 경우 약 $1.12 \times 10^5/cc \sim 7 \times 10^5/cc$ 이며, PLA(Polylactic acid) 의 경우 $2 \times 10^4/cc \sim 1.7 \times 10^5/cc$ 로 매우 고농도의 초미세 입자가 발생함을 확인할 수 있었다. 출력 시간은 그에 비하여 총 발생입자 수에 크게 영향을 미치지 않았고 재질에 따라서 발생 양상이 다르게 나타남을 확인하였다. 입자의 입경 분포는 ABS와 PLA 모두 10nm 이하의 입경에서 수 농도가 가장 높았다.</p>
<p>김성호 등(2018). 3D 프린터 사용자에 대한 초미세입자 노출평가.</p>	<p>3D 프린팅 작업 시 발생하는 주입자의 크기는 대체적으로 100 nm보다 작은 나노입자이며, 저가형 FDM-3D 프린팅 작업을 PLA(Polylactic acid) 소재로 할 경우 주입자의 크기가 가장 작았으며, 프린팅 예열 작업 시 입자수농도와 표면적농도가 급격히 증가하였고, 노즐 막힌 부분을 수리하는 경우 높은입자 수 농도와 표면적농도를 보였다. 유기화합물(이소프로필알콜, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 등) 및 금속(나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 칼륨, 칼슘, 크롬, 철 등)이 미량으로 검출되었다.</p>
<p>이승한(2018). 3D 프린터 작동 시 배출되는 가스상 물질과 입자상 물질 노출 특성 평가.</p>	<p>FDM-3D 프린터 중 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재와 PLA(Polylactic acid) 소재에 따라 입자 및 VOC농도를 평가한 학위논문으로 ABS는 PLA에 비해 4배 이상 급격히 증가하였고, 출력전과 중을 명확히 구별할 수 있을 정도로 급격히 상승하였다.</p>
<p>이성배(2019). 실험동물을 이용한 3D 프린터 발생 독성물질에 대한 생체영향 연구(Ⅰ) - 다중 발생장치 개발 중심으로-</p>	<p>다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하여 동물실험을 위한 최적의 조건을 만들기 위해 본 연구를 수행하였다. 발생시작 후 작은 nm 크기의 초미세입자의 발생이 급격하게 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였으며, 1시간 후부터는 안정적으로 발생하였다. 기성품 발생조건의 실험은 제조사에서 권장하는 요구조건으로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트 직경 1.75mm, 노즐의 토출 직경은 0.4mm, 노즐의 토출 온도는 240°C 실험결과 실험물질 발생량이 최대로 발생되지는 않았으며, 양질의 3D 프린터 제품 성형을 위한 조건이었다. 노즐 토출 온도에 따른 실험에서 210°C에서 300°C로 노즐 토출 온도가 높아짐에 따라 입자 발생농도는 증가하였다. 노즐 토출 직경이 0.4mm 또는 0.6mm일 때 입자 발생 농도는 높았다. 노즐 토출 속도에 따른 실험에서 속도가 빠를수록 입자 발생농도는 증가하였다. 개인시료 시료 채취기로 포집한 필터 중량법으로 측정한 농도는 같은시간대에 SMPS로 측정된 중량농도와 비교하여 157.8%로 더 높았다. OPC를 이용하여 농도를 측정된 결과, SMPS 측정범위 이상인 1.0~2.5μm에서 입자가 측정되었다.</p>

저자/제목	주요내용
<p>정은교 등(2019). 3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성연구.</p>	<p>3D 프린팅 소재를 바탕으로 소재의 화학물질 성분을 분석한 결과 PLA(Polylactic acid) 소재의 경우 관리대상물질 5~7종(아크로레인, 노말부틸알콜, 톨루엔, 스티렌 등), 고분자 물질은 20~25종(L-Lactide 등)이 검출되었고 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재의 경우에는 관리대상물질은 5~6종(아크로레인, 톨루엔, 스티렌 등), 고분자물질은 15~23종(1,3,5-Cycloheptatriene, Benzene 등)이 검출되었으며 기타 소재에서는 관리대상물질로 2~8종(톨루엔, 스티렌 등), 고분자물질로는 15~23종(L-Lactide 등)이 검출되었다. 그리고 금속 소재의 경우에는 관리대상물질인 구리, 철, 알루미늄 3종이 검출되었다.</p>
<p>김부욱(2020). 실 사무실 환경에서 3D 프린터 배출물질 정밀 측정.</p>	<p>사무실에서 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재를 이용하여 나노 크기의 초미세입자(UFPs)와 휘발성유기화합물(VOCs) 평가를 실시하였다. 그 결과 3D 프린터 가동후 얼마 후부터 UFPs 농도는 증가하기 시작하였고 약 20,000개/cc(가동전 3,000개/cc) 농도에 도달한 후 유지되는 것으로 나타났다. 100 ppb 미만의 낮은 농도이지만 포름알데히드, 아세트알데히드, 아크롤레인, 벤젠, 톨루엔, 스티렌 등의 주요 VOC가 검출되었다.</p>
<p>박경훈(2020). 보급형 3D 프린터 가동 시 소재에 따른 입자상 물질의 발생 특성.</p>	<p>FDM-3D 프린터 실험연구로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid) 등을 사용하여 온도에 따른 입자상 물질 특성을 평가하였다. 노출온도가 제일 높았던 260°C에서 입자상 물질이 가장 높았고 ABS에서는 1,290,000개/cm³ PLA에서는 344,000개/cm³ 수준으로 확인되어 ABS에서 가장 많은 입자를 방출하였다.</p>

〈표 III-7〉 국외문헌고찰

저자/제목	주요내용
Brent Stephens et al(2013). Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers.	챔버연구이며 FDM-3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid)를 사용하여 평가하였고 3D 프린터의 (PLA2개)와 (PLA2개+ABS3개)의 작업 중 입자수 농도를 비교하였고 ABS를 사용한 후 입자수 농도가 크게 증가하였다.
Yu Zhou et al(2015). Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D printers in the Clean Room.	클린룸(10,000 level)에서 Desktop 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)를 사용하여 평가하였다. 3D 프린터에서 생성되는 입자의 주요 크기는 10 μ m(PM ₁₀) 미만이었다. 입자의 크기가 작을수록 입자의 농도가 높아지며 입자 크기는 0.25 μ m-0.28 μ m 사이이다.
NimaAfshar-Mohajer et al(2015). Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer.	Binder jetting 3D는 적층 제조 유형이다. 2시간 연속 작동 동안 총 VOC 및 에어로졸(10 nm- 10 μ m)의 실시간 측정을 시간에 따른 질량 균형 모델에 통합하여 방출 속도를 구하였다. 205-407 nm 사이의 입자크기는 개수별로 가장 높은 방출 속도를 보였다. 미세먼지(PM _{2.5} , PM ₁₀) 및 TVOC는 모두 미국 EPA 기준을 초과하였다. 초미세입자 방출은 PLA(Polylactic acid)를 사용하는 FDM 3D 프린터보다 낮지만 200 nm보다 큰 입자 생성이 높았다.
Yu Zhou et al(2015). Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D printers in the Clean Room.	클린룸(10,000 level)에서 Desktop 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)를 사용하여 평가하였다. 3D 프린터에서 생성되는 입자의 주요 크기는 10 μ m(PM ₁₀) 미만이었다. 입자의 크기가 작을수록 입자의 농도가 높아지며 입자 크기는 0.25 μ m-0.28 μ m 사이이다.
Aika Davis et al(2016). Fine Particulate and Chemical Emissions from Consumer 3D printers.	챔버에서 FDM 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid), Nylon을 사용하여 평가하였다. 연구 결과 모두 초미세먼지(UFP)를 발생하였고, 약 70%는 직경이 50 nm 미만이었다. ABS는 스티렌 및 에틸벤젠이 검출되었고, PLA는 메틸 메타크릴레이트(MMA)가 검출되었으며, Nylon은 카프로락탐(caprolactam)이 검출되었다. 모든 소재에서 아세트알데히드와 포름알데히드가 검출되었다. ABS는 PLA, Nylon 보다 더 많은 입자를 방출하였다. 입자수농도는 10 ³ ~10 ⁶ particles/cm ³ 까지 급증하였다가 시간이 지남에 따라 감소하였다.

저자/제목	주요내용
Yelin Deng et al(2016). The Impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction.	본 연구는 3D 프린팅 공정 4단계(로딩, 가열, 프린팅, 언로딩)에 따라 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 와 PLA(Polylactic acid)에서 방출되는 입자를 조사하였다. ABS가 PLA보다 더 많은 입자를 방출하였다.
Jinghai Yi et al(2016). Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional(3D) printer.	챔버 및 실험연구로 Desktop 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 및 PLA(Polylactic acid)를 사용하여 평가하였다. ABS는 PLA보다 더 큰 입자를 방출하였다. 총 입자수는 필라멘트 종류와 색상에 따라 다르게 나타났으며, 프린터 덮개를 사용할 경우 총 입자 수의 배출량이 2배 감소하였다.
Parham Azimi et al(2016). Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments.	챔버연구로 FDM방식 3D 프린터로 색이 다른 PLA(Polylactic acid), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 등의 소재를 사용하였고, 노즐의 온도와 입자 발생율이 영향이 있는 것을 확인하였으며, ABS소재가 PLA소재보다 입자 수 농도가 높았다.
Patrick Steinle et al(2016). Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings.	챔버 및 실험연구이며 FDM-3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 및 PLA(Polylactic acid)를 사용하여 측정하였다. 초미세에어로졸(Ultra fine aerosol)방출은 ABS($2.4 \times 10^8 \#/\text{min}$)보다 PLA($2.1 \times 10^9 \#/\text{min}$) 가 높았다.
Samuel Hartikainen(2016). VOC and particle emissions from home and hobby 3D printers.	실험연구이며 Desktop 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid)를 사용하여 평가하였다. 초미세먼지 농도는 $4.3 \times 10^{10} \#/\text{m}^3$ 이며, ABS에서 스티렌이 검출되었고 농도는 $20-70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.
Shirin Mesbah Os Kui et al(2016). Assessing and Reducing the Toxicity of 3D-Printed Parts.	FDM 및 STL 3D 프린터를 사용하여 출력물을 Zebrafish의 배아에 노출시켰을 때 독성이 있다는 것을 발견하였으며, STL의 출력물이 FDM보다 훨씬 더 독성이 강한 것으로 나타났다.
Aleksandr B. Stefaniak et al(2017). Charaterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer.	챔버연구이며 FDM-3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)와 PLA(Polylactic acid)를 사용하였으며, 아세트알데히드, 에탄올, 아세토니트릴, 아세톤, 이소프로필알콜, 노말헥산, 클로로포름, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, m,p-크실렌, o-스티렌, D-리모렌이 검출되었다.

저자/제목	주요내용
Evan L. Floyd et al(2017). Fume emissions from a low-cost 3D printer with various filaments.	챔버연구이며 FDM 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid), PVA, HIPS, PCABS, Nylon, Bronze-PLA, PET 필라멘트를 사용하여 평가하였다. ABS, Bronze-PLA 및 PVA는 가장 높은 입자 방출을 생성하였다.
Eva Jacobsen et al(2017). Risk assessment of 3D printers and 3D printed products.	FDM 3D 프린팅에서 발생하는 입자상물질과 휘발성물질 배출에 따른 건강위해성을 평가하였다. 휘발성물질로 lactide(PLA), styrene(ABS), caprolactam(Nylon)을 호흡기 및 눈 자극의 영향을 제시하였다.
Luis Mendes et al(2017). Characterization of Emissions from a Desktop 3D Printer.	챔버 및 실험연구이며 FDM-3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 및 PLA(Polylactic acid)를 사용하여 측정하였다. 입자의 평균 크기는 7.8~10.5 nm였으며, ABS의 aerosol 방출율이 가장 높은 소재였다. SMPS와 PSM을 사용하여 평가한 나노입자 방출결과는 ABS $2.6 \times 10^4 \text{ #/cm}^3$, PLA $7.4 \times 10^2 \text{ #/cm}^3$ 이고, 나노입자 방출 속도는 ABS $3.7 \times 10^8 \text{ -} 1.4 \times 10^9 \text{ #/sec}$, PLA $1.0 \times 10^7 \text{ #/sec}$ 이었다. 휘발성 유기 및 기타 기체 화합물은 검출되지 않았거나 발견된 경우 노출 한계 값보다 낮은 수준이며, ABS에서 스티렌이 낮은 수준으로 검출되었다.
Marina E. Vance et al(2017). Aerosol Emissions from Fuse-Deposition Modeling 3D Printers in a Chamber and in Real Indoor Environments.	챔버연구이며 FDM-3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 및 PLA(Polylactic acid)를 사용하여 측정하였다. ABS의 TVOC 농도는 $0.83 \pm 0.01 \text{ ppm}$, CO 농도는 $0.69 \pm 0.01 \text{ ppm}$ 으로 나타났다. PLA는 검출되지 않았다.
Ohhun Kwon et al(2017). Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D Printing.	챔버에서 FDM 3D 프린터로 7가지 다른 열가소성 재료(ABS1, ABS2, Laywood, HIPS, Nylon)를 사용하여 온도 조건에 따라 입자 수 농도를 측정하였다. 프린터 가동 시 나노 입자가 발생하였으며, 재료별 제조사 권장 온도 실험조건 보다 압출기 온도가 높은 실험조건에서 모든 재료가 더 높은 나노 입자 발생률을 보였다. 입자상 물질을 제어는 HEPA 필터가 있는 경우 제거효과(99.95%)가 가장 높게 나타났다.
Parham Azimi et al(2017). Predicting Concentrations of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds Resulting from Desktop 3D Printer Operation and the Impact of Potential Control Strategies.	실험연구이며 FFF 3D 프린터로 PLA(Polylactic acid), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), HIPS, Nylon, PCTPE, Laybrick, Laywood, TGase, Polycarbonate 소재를 사용하여 평가하였다. 입자수 농도는 ABS가 PLA보다 높았다. ABS, Nylon, PLA에서 스티렌, 카프로락탐, 락티드가 방출되었다.

저자/제목	주요내용
<p>Qian Zhang et al(2017). Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers.</p>	<p>챔버연구이며 FDM 3D 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)를 사용하여 평가하였다. 인쇄가 시작되면 입자농도가 급격히 증가하였고, 평균 입자 크기는 20-40 nm, 순간농도는 $10^9\#/cm^3$로 나타났다.</p>
<p>Tracy L. Zontek et al(2017). An exposure assessment of desktop 3D printing.</p>	<p>본 연구는 환기가 잘되는 실험실에서 Makerbot 프린터로 PLA(Polylactic acid)를 사용하였고, 환기가 잘 되지 않는 실험실에서 Da Vinci XYZ 프린터로 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)를 사용하여 측정된 결과 입자수 농도는 $10^3\sim 10^5$ particles/cm^3 이었다.</p>
<p>Davis AY et al(2019). Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printer.</p>	<p>챔버연구이며 FFF 3D 프린터에서 PLA(Polylactic acid), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), HIPS, Nylon, PVA를 사용하여 미립자 및 휘발성 유기화합물 농도를 측정하였다. 각 필라멘트 재료에서 30개 이상의 알려지지거나 의심되는 자극물질 및 발암물질을 확인되었다.</p>
<p>Gu J et al(2019). Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer.</p>	<p>챔버연구이며 3D 프린팅 소재 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), ASA, HIPS, PETG, PCABS, ULTRAT, ESD, GLASS를 사용하여 평가하였다. 5.6~560 nm 크기 범위의 입자에 대한 특정 방출속도는 2.0×10^9 #/min(GLASS, PETG)-1.7×10^{11} #/min(ASA)이었으며, ABS는 $(4.7 \pm 1.1) \times 10^{10}$ #/min 이다. TVOC 방출 속도는 0.2 μg/min(GLASS,PETG)-40.5 μg/min(ULTRAT, ABS), 주요 VOC는 스티렌이었다.</p>
<p>Youn JS et al(2019). Characteristics of nanoparticle formation and hazardous air pollutants emitted by 3D printer operations:From emission to inhalation.</p>	<p>3D 프린터 사용에 따른 나노입자와 유해대기오염물질(HAP)의 배출을 FFF 방식의 3D 프린터 5대로 모두 백색 PLA(Polylactic acid)를 사용하여 평가하였다. 나노입자의 수 크기 분포는 70-100 nm사이의 큰 크기 범위와 10-20 nm 사이의 작은 크기 범위에 걸쳐 우세한 피크를 갖는 분포가 나타났다. 3D 프린터 가동이 증가함에 따라 10 nm 입자의 수 농도가 증가하였고 최종 수 농도는 배경 농도 보다 3.6배 높았다. 총 14종의 유해대기오염물질(HAP)가 검출되었으며 그 중 핵산, 아크릴로니트릴, 벤젠 농도가 가장 높았다.</p>

저자/제목	주요내용
Stefaniak AB et al (2019). Evaluation of emissions and exposures at workPLA(Polylactic acid)ces using desktop 3-dimensional printers.	3D 프린터(FFF 및 sheer)를 사용하는 4개 작업장에서 입자상 물질과 총 휘발성 유기화합물(TVOC)를 측정하였다. FFF 3D 프린터는 입자상물질이 $9.4 \times 10^9 \sim 4.4 \times 10^{11} (\#/min)$ 배출되었다. 환기 장비를 사용한 곳의 경우 입자상 물질과 총 휘발성 유기화합물 농도가 각각 99.7%, 53.2% 줄일 수 있었다.
Byrley P et al(2020). Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder.	챔버연구이며 FDM 3D 프린터로 PLA(Polylactic acid), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA 펠릿을 사용하여 평가하였다. 방출된 입자의 대부분은 기존 3D 프린터 연구와 유사한 초미세(1~100 nm)이었으며, 스티렌과 에틸벤젠이 포함되어 있었다.
Bernatikova S et al(2021). Characterization of ultrafine particles and VOCs emitted from a 3D printer.	챔버연구이며 3D 프린터로 PETG 및 NGEN을 사용하여 초미세입자(UFP)와 휘발성 유기화합물(VOC) 방출을 평가하였다. 총 입자수 농도는 PETG 3.88×10^{10} NGEN 6.01×10^9 이었다. 두 필라멘트 모두 에틸벤젠, 톨루엔, 자일렌의 농도가 매우 낮게 검출되었으며, PETG의 경우 스티렌이 확인되었다.
Booook Kim et al (2022). Assessment and Mitigation of Exposure of 3-D Printer Emissions.	본 연구는 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트를 사용하는 2대의 3D 프린터를 가동하는 실내 공간과 별도의 격리공간에서 3D 프린터 배출 물질에 대한 평가를 실시하였다. SMPS와 OPS를 사용하여 나노입자에서부터 마이크로입자(4 nm~32 μm)의 입자수 농도를 측정한 결과, 근로자가 근무하는 인근에서 각각 평균 $16,290 \pm 4,468 \# / cc$, $37 \pm 7 \# / L$ 였으나 격리 이동 후 $4,981 \# / cc$, $71 \# / L$ 로 나타났다. PTE-Tof-MS로 분석한 휘발성 유기화합물의 농도는 포르말데히드 29.8 ppb, 트리메틸아민 13.1 ppb, 톨루엔 13.0 ppb, 아크롤레인 6.3 ppb, 클로로포름 3.3 ppb, 스티렌 2.7 ppb, 염화비닐 1.1 ppb, 벤젠 0.4 ppb, 1,3-부타디엔 0.2 ppb 등으로 매우 낮은 농도로 나타났다.

2. 3D 프린터 사용 시 실태조사 및 작업환경측정

산업용 3D 프린터의 경우 산업안전보건법의 적용을 받기 때문에 사업체에서 안전관리를 수행하고 있지만 교육기관에서는 유해물질 사용에 대한 가이드라인, 작업환경관리, 환기 등에 대한 관리가 2014년부터 사용할 당시에는 부족하였다. 교사집단에서 3D 프린터와 관련하여 암이 발생하였다는 2020년, 2021년의 언론보도(KBS, YTN)를 통해 위험성을 인지하였고 현재는 공기정화장치, 3D 프린터실 격리 등 환기를 위해 노력하고 있었으며, 교육부의 “교육기관 3D 프린팅 설치 및 운용 가이드라인”과 정보통신산업진흥원의 “3D 프린팅 안전 이용 가이드라인”과 2022년 7월 과학기술정보통신부에서 “삼차원프린팅 안전이용지침(가이드라인)”도 배포하였다. 하지만 2014년부터 3D 프린터가 배포될 당시 건강영향 등에 대한 기초 자료가 부족하였고, 출력물은 온도나 바람에 특히 예민해 환기 등을 생각하지 못하고 창문을 닫은 상태로 출력을 하였다. 따라서 당시의 상황에서 각 소재별 발암물질 및 나노입자 노출 여부 확인이 필요하여 유사한 실험실에서의 작업환경측정을 실시하였고, 교육기관에서의 작업환경측정도 실시하였으며 실제 환경에서의 중금속 노출 확인을 위해 중금속 발암물질도 추가하였다. 또한 3D 프린터를 사용하는 교사 10명을 대상으로 위해성 인식도, 사용소재, 작업환경, 신체영향, 건의사항에 대해 심층 인터뷰도 실시하였다.

〈표 III-8〉 측정물질 발암성 표기

고용노동부고시 제2018-62	
발암성1A	사람에게 충분한 발암성 증거가 있는 물질
발암성1B	시험동물에서 발암성 증거 충분, 시험동물과 사람 모두에서 제한된 발암성 증거가 있는 물질
발암성2	사람이나 동물에서 제한된 근거 있으나 구분 1로 분류하기엔 증거 불충분
측정물질	발암성 표기
아크릴로니트릴	발암성1B
스티렌	발암성2
1,3-부타디엔	발암성1A
포름알데히드	발암성1A
에틸벤젠	발암성2
염화비닐	발암성1A
벤젠	발암성1A
나노입자	미세먼지(PM10, 10 μ m이하) 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC) 1급 발암물질로 분류(Group1, 2016)

〈표 III-9〉 평가대상 물질의 분석검출한계

항목		검출한계(현장)	검출한계(실험실)
휘발성 유기 화합물	포름알데히드	0.053 $\mu\text{g}/\text{sample}$	0.009 $\mu\text{g}/\text{sample}$
	벤젠	0.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3^{**}$	-
	아크릴로니트릴	-	1.37 $\mu\text{g}/\text{sample}$
	에틸벤젠	0.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3^{**}$	0.44 $\mu\text{g}/\text{sample}$
	스티렌	0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3^{**}$	4.08 $\mu\text{g}/\text{sample}$
	염화비닐	2.512 $\mu\text{g}/\text{sample}$	0.36 $\mu\text{g}/\text{sample}$
	1,3-부타디엔	0.709 $\mu\text{g}/\text{sample}$	0.74 $\mu\text{g}/\text{sample}$
금속	카드뮴	0.010 $\mu\text{g}/\text{sample}$	
	코발트	0.010 $\mu\text{g}/\text{sample}$	
	납	0.010 $\mu\text{g}/\text{sample}$	
	니켈(금속)	0.010 $\mu\text{g}/\text{sample}$	
	크롬(금속)	0.010 $\mu\text{g}/\text{sample}$	

(1) 실험실 작업환경측정

가) 실험실 측정 조건

교육기관 3D 프린터실의 환경과 유사한 실험실에서 각 소재별 발암물질 노출 유무 확인을 위해 지역시료로 측정하였으며 측정 조건은 다음과 같다.

〈표 III-10〉 측정 조건

측정 장소 : 연구원 내 실험실	
측정시간	6시간 이상
측정공간	3.1m×2.9m×3.0m(가로×세로×높이)
소재	PLA(Polylactic acid), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)
온도	PLA(베드온도 없음, 필라멘트 200 °C) ABS(베드온도 110 °C, 필라멘트 240 °C)
사용프린터기	A사, B사의 FDM 방식의 3D 프린터기
측정물질	아크릴로니트릴, 1,3-부타디엔, 스티렌, 포름알데히드, 에틸벤젠, 염화비닐, 나노입자

측정인자로 발암물질인 아크릴로니트릴, 스티렌, 1,3-부타디엔, 에틸벤젠, 포름알데히드, 염화비닐을 선정하였고, 나노입자는 현재까지 노출기준이 설정된 물질이 아니지만 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서 폐와 기도에 달라붙어 건강에 영향을 주는 미세먼지(PM10, 10 μ m이하)를 1급 발암물질로 분류(Group1, 2016)하고 있고, 나노입자 중 100nm 이하에 해당하는 초미세입자(Ultra-fine particle)는 작은 크기의 입자들이 심폐영역이나 폐포의 심부영역까지 쉽게 이동할 수 있기 때문에 더욱 강한 독성을 나타낸다는 연구 결과도 있어 3D 프린터에서의 노출이 알려진 나노입자도 측정인자로 선정하였다. 유기화합물은 KOSHA GUIDE, OSHA, NIOSH 등의 측정 및 분석 지침에 맞게 유량을 설정하여 측정하였고 초미세입자인 나노입자의 경우 Nanoscan nanoparticle sizer(TSI, Model 3910)를 사용하여 입자 수 농도 변화를 확인하였다.

나) 실험실에서 유기화합물 측정 결과

소재에 따른 노출을 확인하기 위해 A사와 B사 두 종류의 3D 프린터를 이용하였고, 소재는 정품 PLA(Polylactic acid)와 정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), 인터넷에서 판매량 1위 중국산 PLA와 한국폴리텍 대학에 도움을 얻어 3D 프린터실에서 가장 많이 사용하는 중국산 ABS를 이용하여 3D 프린터(밀폐형)내에 측정기를 넣어 측정하였다. 6시간 이상 측정하였고 이소프로필알코올(ISP)로 측정하는 Nanoscan의 특성상 직독식 기기에서 포름알데히드와 휘발성유기화합물(VOC) 측정값에 영향을 미치는 것을 확인하여 정확한 측정을 위해 유기화합물과 나노입자를 따로 측정하였다. 유기화합물 측정결과는 대부분 검출한계 미만으로 확인되었고 포름알데히드만 0.002~0.003 ppm 수준으로 노출기준(0.3 ppm)에 비해 매우 낮게 측정되었다.

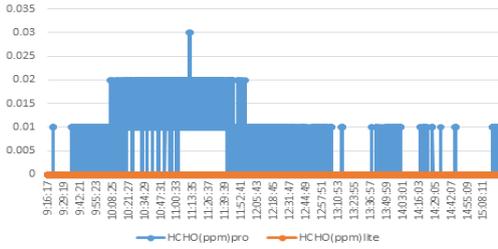
〈표 III-11〉 3D 프린터 실험실 유기화합물 측정결과(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene), PLA(Polylactic acid))

(단위 : ppm)

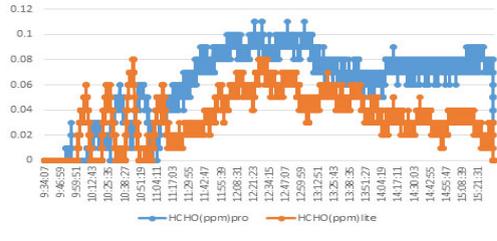
회차	아크릴로 니트릴	1,3- 부타디엔	스티렌	포름 알데히드	염화비닐	에틸벤젠
노출기준(TWA)	2	2	20	0.3	1	100
1회차 (정품 PLA)	<LOD	<LOD	<LOD	0.002	<LOD	<LOD
	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
2회차 (정품ABS)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
3회차 (중국산 PLA)	<LOD	<LOD	<LOD	0.003	<LOD	<LOD
	<LOD	<LOD	<LOD	0.003	<LOD	<LOD
4회차 (중국산 ABS)	<LOD	<LOD	<LOD	0.002	<LOD	<LOD
	<LOD	<LOD	<LOD	0.002	<LOD	<LOD

- 검출한계($\mu\text{g}/\text{sample}$) : 포름알데히드 0.009, 염화비닐 0.36, 1,3-부타디엔 0.74, 에틸벤젠 0.44, 아크릴로니트릴 1.37, 스티렌 4.08

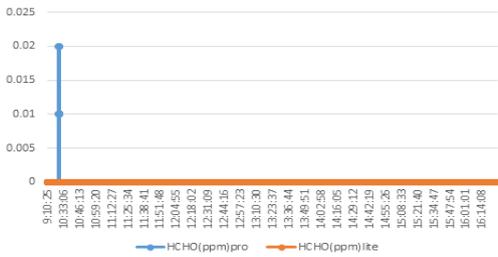
3D 프린터 발암물질 노출 측정 시 직독식측정기(Multirae Pro, Lite) 두 대를 이용하여 포름알데히드 발생 흐름을 파악하고자 하였고 휘발성유기화합물(VOC)은 Multirae Lite에서 4회 모두 “0”ppm으로 측정되었으며 Multirae Pro에서도 ppb 수준으로 매우 낮아 제외하였다. 2회차에서 포름알데히드는 연구원 내 작업환경측정에서 검출한계미만이었으나 직독식에서 기록된 최대치(peak)는 Multirae Pro(파란색그래프)에서 0.11 ppm, Multirae Lite(주황색그래프)에서 0.08 ppm으로 가장 높았다. 또 1, 3~4회차에서 Multirae Pro는 최대치(peak)가 0.02~0.03 ppm이 측정되었으나 Multirae Lite에서는 “0”으로 기록되어 Multirae Lite보다 Multirae Pro가 보다 정교한 측정이 가능한 것으로 확인된다. 또한 2회차 직독식측정기에서 포름알데히드 발생이 제일 높은 것으로 나타났으나 작업환경측정 결과는 검출한계미만으로 직독식 측정기의 측정값과 작업환경측정 분석결과가 상이하여 농도가 낮을 경우 비교가 어려운 것으로 나타났다. 다만 순간 측정값에 대한 신뢰도는 떨어지지만 흐름으로 봤을 때 3D 프린터가 가동되면 포름알데히드가 미량은 발생하는 것으로 확인된다(그림 III-2).



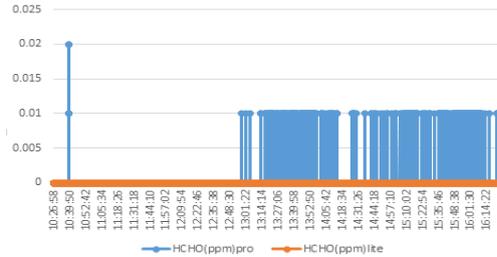
1회차(정품 PLA(Polylactic acid))



2회차(정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene))



3회차(중국산 PLA(Polylactic acid))

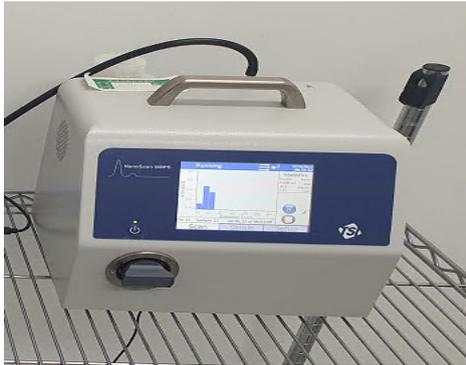


4회차(중국산 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene))

[그림 III-2] 1~4회차 포름알데히드(HCHO) 발생 흐름(직독식 측정기)

다) 실험실에서 나노입자(10~420nm) 흐름 측정 결과

나노입자의 경우 온도, 습도 등의 대기환경에 매우 민감하여 배경농도 24 시간 측정을 3회 실시하였고, 소재별 정품 PLA(Polylactic acid), 중국산 PLA, 정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)1, ABS2를 각 3회씩 측정하여 나노 수 농도 흐름을 확인하였다. ABS의 경우 중국산 ABS의 유기화합물 측정은 노출 확인을 위해 한국폴리텍 내 밀폐형 3D 프린터 내에 측정기를 넣어 측정하였는데, 나노 입자 측정은 3D 프린터 내 자체정화장치와 작업 공간 내 전체환기장치, 공기정화장치가 마련되어있어 측정하지 않았고, 대어한 3D 프린터는 정품 ABS만 가동이 가능하여 색깔별(분홍(1),주홍(2))로 측정하였다. 작동 전, 후를 포함하여 6시간 이상을 측정하였고, 측정 중인 나노 스캔과 출력물은 다음과 같다.



측정 중인 나노스캔
(3D 프린터는 제조사 노출로 사진에서 제외)



실험실에서 출력한 3D 프린터 결과물

[그림 III-3] 측정 중인 나노스캔과 출력물

〈표 III-12〉 배경농도 입자 수 농도(1~3회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기 미세먼지 (PM10, PM2.5)	보통/나쁨	보통/보통	좋음/좋음
배경농도	1회차	2회차	3회차
GM(GSD)	2594(1.90)	2860(1.92)	978(2.01)
range	937~5726	1168~4803	383~2488
Mode(nm)	86.60	86.59	36.52
Median(nm)	81.47	81.92	48.18
Geo. mean(nm)	73.54	68.12	53.38

〈표 III-13〉 미세먼지 등급 기준

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균

미세먼지농도	좋음	보통	나쁨	매우나쁨
PM10	0~30	31~80	81~150	151이상
PM2.5	0~15	16~35	36~75	76이상

측정하고자 하는 실험실 내 배경농도 확인을 위해 창문을 닫은 상태에서 실시하였고 서로의 간섭을 배제하기 위해 1일 측정 후, 1일 환기, 1일간은 창문

을 닫고, 다음날 측정으로 3회간 24시간 측정하였다. 대기 미세먼지는 PM 10, PM 2.5의 농도에 따른 등급으로 24시간 무게를 측정하여 등급을 나눈다. PM 10은 0~30은 “좋음”, 31~80은 “보통”, 81~150은 “나쁨”, 151이상은 “매우 나쁨”이고 PM 2.5는 0~15 “좋음”, 16~35 “보통”, 36~75 “나쁨”, 76이상은 “매우나쁨” (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이다. 나노입자 측정을 위해 같은 환기조건에서 측정하였고, 1회차에서는 PM 10은 “보통“, PM 2.5는 “나쁨”. 2회차는 모두 “보통”, 3회차 모두 “좋음”으로 나타났다. 외기 농도의 경우 48시간 2회 측정하였는데 모두 “좋음” 에서 약 5,000개/cm³이하, 모두 “보통”에서 약 12,000개/cm³이하의 농도를 나타냈다.

〈표 III-14〉 PLA(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 1회차				
GM(GSD)	978(2.01)	1313(2.00)	8714(2.06)	4543(2.10)
range	383~2488	1208~1433	4903~37500	3886~5204
Mode(nm)	36.52	27.38	20.53	64.94
Median(nm)	48.18	40.85	40.00	49.19
Geo. mean(nm)	53.38	47.43	42.05	44.21

정품 PLA(Polylactic acid) 소재를 1회차로 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도를 확인하였는데 기하평균에서 작동 중(8714)은 작동 전(1313)보다 약 7배 높았고 작동 후(4543)보다 약 2배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(37500)이 작동 전(1433)보다 약 26배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 20.53nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 40.00nm, 기하평균입자 42.05nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 1회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린

터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 1,000개/cm³ 전, 후로 유사하였다.

〈표 III-15〉 PLA(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 2회차				
GM(GSD)	978(2.01)	774(2.05)	7053(2.00)	2785(2.14)
range	383~2488	629~1054	2561~29600	2433~2967
Mode(nm)	36.52	36.52	20.53	86.59
Median(nm)	48.18	54.44	42.54	69.10
Geo. mean(nm)	53.38	56.7	44.23	55.60

정품 PLA(Polylactic acid) 소재 2회차는 기하평균에서 작동 중(7053)은 작동 전(774)보다 약 9배 높았고 작동 후(2785)보다 약 3배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(29600)이 작동 전(1054)보다 약 28배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 20.53nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 42.54nm, 기하평균입자 44.23nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 2회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 1,000개/cm³이하로 유사하였다.

〈표 III-16〉 PLA(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(3회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 보통/보통			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 2회차, 측정 3회차				
GM(GSD)	2860(1.92)	2354(1.81)	4674(2.28)	2065(1.92)
range	1168~4803	1774~4842	2052~30804	1353~7503
Mode(nm)	86.59	86.60	15.40	86.60
Median(nm)	81.92	84.67	22.92	74.78
Geo. mean(nm)	68.12	75.17	31.89	62.83

정품 PLA(Polylactic acid) 소재 3회차는 기하평균에서 작동 중(4674)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(4674)은 작동 전(2354), 후(2065)보다 약 2배 높았으며, 최대측정값으로는 작동 중(30804)이 작동 전(4842)보다 약 6배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 15.40nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 22.92nm, 기하평균입자 31.89nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 3회차 측정 시 대기환경은 “보통”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “보통”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 3,000개/cm³이하로 유사하였다.

〈표 III-17〉 ABS(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 1회차				
GM(GSD)	978(2.01)	981(2.00)	8515(1.80)	1735(1.94)
range	383~2488	921~1062	2228~556569	1446~2233
Mode(nm)	36.52	86.60	36.52	86.60
Median(nm)	48.18	69.54	33.94	62.35
Geo. mean(nm)	53.38	60.58	35.52	58.47

정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(1, 색:분홍) 소재 1회차는 기하평균에서 작동 중(8515)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(8515)은 작동 전(981)보다 약 9배, 작동 후(1735)보다 약 5배 높았다. 최대측정값으로 는 작동 중(556569)이 작동 전(1062)보다 약 524배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 36.52nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 33.94nm, 기하평균입자 35.52nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 1회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 1,000 개/cm³ 이하로 유사하였다.

〈표 III-18〉 ABS(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 2회차				
GM(GSD)	978(2.01)	487(2.04)	2657(1.97)	652(2.06)
range	383~2488	383~855	426~279431	592~747
Mode(nm)	36.52	115.48	27.38	115.48
Median(nm)	48.18	76.85	41.47	79.61
Geo. mean(nm)	53.38	66.15	49.40	67.27

정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(1) 소재 2회차 기하평균에서는 작동 중(2657)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(2657)은 작동 전(487)보다 약 5배, 작동 후(652)보다 약 4배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(279431)이 작동 전(855)보다 약 327배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 27.38nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 41.47nm, 기하평균입자 49.40nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 2회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 1,000개/cm³이하로 유사하였다.

〈표 III-19〉 ABS(1) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(3회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 보통/보통			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 2회차, 측정 3회차				
GM(GSD)	2860(1.92)	2078(1.66)	8661(1.90)	3255(1.79)
range	1168~4803	1761~3741	1844~1415370	2046~7612
Mode(nm)	86.59	86.60	27.38	86.60
Median(nm)	81.92	87.66	33.95	65.43
Geo. mean(nm)	68.12	80.38	40.43	60.50

정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(1) 소재 3회차 기하평균에서 는 작동 중(8661)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(8661)은 작동 전 (2078)보다 약 4배, 작동 후(3255)보다 약 3배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(1415370)이 작동 전(3741)보다 약 378배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈 값(mode)은 27.38nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 33.95nm, 기하평균입자 40.43nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 3회차 측정 시 대기환경은 “보통”날이 었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도 의 대기환경이 “보통”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 3,000개/cm³이 하로 유사하였다.

〈표 Ⅲ-20〉 PLA(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 1회차				
GM(GSD)	978(2.01)	1701(1.98)	3170(2.00)	1075(2.15)
range	383~2488	1556~2041	1569~6586	678~2455
Mode(nm)	36.52	102.64	54.74	95.31
Median(nm)	48.18	84.73	52.89	80.34
Geo. mean(nm)	53.38	73.38	53.07	76.05

중국산 PLA(Polylactic acid) 소재 1회차는 기하평균에서 작동 중(3170)은 작동 전(1701)보다 약 2배 높았고 작동 후(1075)보다 약 3배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(6586)이 작동 전(2041)보다 약 3배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 54.74nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 52.89nm, 기하평균입자 53.07nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 1회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 유사하였다.

〈표 III-21〉 PLA(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 2회차				
GM(GSD)	978(2.01)	1712(2.03)	4608(1.84)	5296(1.79)
range	383~2488	1198~2008	1461~287187	4901~5679
Mode(nm)	36.52	48.70	48.70	64.94
Median(nm)	48.18	57.47	51.14	59.25
Geo. mean(nm)	53.38	55.71	50.05	58.20

* 최대 측정값 : 작동 중 출력물이 엉키면서 배출되었음(에러 발생)

중국산 PLA(Polylactic acid) 소재 2회차는 기하평균에서 작동 중(4608)은 작동 전(1712)보다 약 3배 높았고 작동 후(5296)보다 약 1배 낮았다. 최대측정값으로는 작동 중(287187)이 작동 전(2008)보다 약 143배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 48.70nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 51.14nm, 기하평균입자 50.05nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 비슷하거나 약간 작은 것으로 확인되었다. 또한 2회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 유사하였다. 3회차도 측정은 하였으나 나노스캔의 Inlet flow error로 측정값을 신뢰할 수 없어 제외하였다.

〈표 III-22〉 ABS(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(1회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 좋음/좋음			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 3회차, 측정 1회차				
GM(GSD)	978(2.01)	271(1.79)	81681(1.76)	901(2.04)
range	383~2488	213~666	576~823037	485~5717
Mode(nm)	36.52	115.48	27.38	36.52
Median(nm)	48.18	112.91	28.35	47.78
Geo. mean(nm)	53.38	98.89	30.28	50.63

정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(1, 색:주황) 소재 1회차는 기하평균에서 작동 중(81681)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(81681)은 작동 전(271)보다 약 301배, 작동 후(901)보다 약 91배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(823037)이 작동 전(666)보다 약 1,236배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 27.38nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 28.35nm, 기하평균입자 30.28nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 1회차 측정 시 대기환경은 “좋음”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “좋음”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 1,000개/cm³ 이하로 유사하였다.

〈표 III-23〉 ABS(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(2회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 보통/보통			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 2회차, 측정 2회차				
GM(GSD)	2860(1.92)	2133(1.72)	9112(1.88)	4598(1.70)
range	1168~4803	1430~3307	3079~197613	4199~5060
Mode(nm)	86.59	115.5	27.38	64.94
Median(nm)	81.92	94.63	49.59	68.68
Geo. mean(nm)	68.12	87.12	48.53	65.81

정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(2) 소재 2회차 기하평균에서는 작동 중(9112)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(9112)은 작동 전(2133)보다 약 4배, 작동 후(4598)보다 약 2배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(197613)이 작동 전(3307)보다 약 60배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 27.38nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 49.59nm, 기하평균입자 48.53nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 2회차 측정 시 대기환경은 “보통”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “보통”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 3,000개/cm³ 이하로 유사하였다.

〈표 III-24〉 ABS(2) 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도(3회차)

입자크기 : 10~420nm / Geometric mean, range : 개/cm³

대기미세먼지	PM10/PM2.5 : 보통/보통			
	배경농도	작동 전	작동 중	작동 후(출력끝)
배경농도 2회차, 측정 3회차				
GM(GSD)	2860(1.92)	2944(1.77)	34468(1.77)	4488(1.83)
range	1168~4803	2706~3270	2808~513812	3726~5345
Mode(nm)	86.59	64.94	36.52	35.52
Median(nm)	81.92	58.91	34.46	50.98
Geo. mean(nm)	68.12	56.44	34.72	50.89

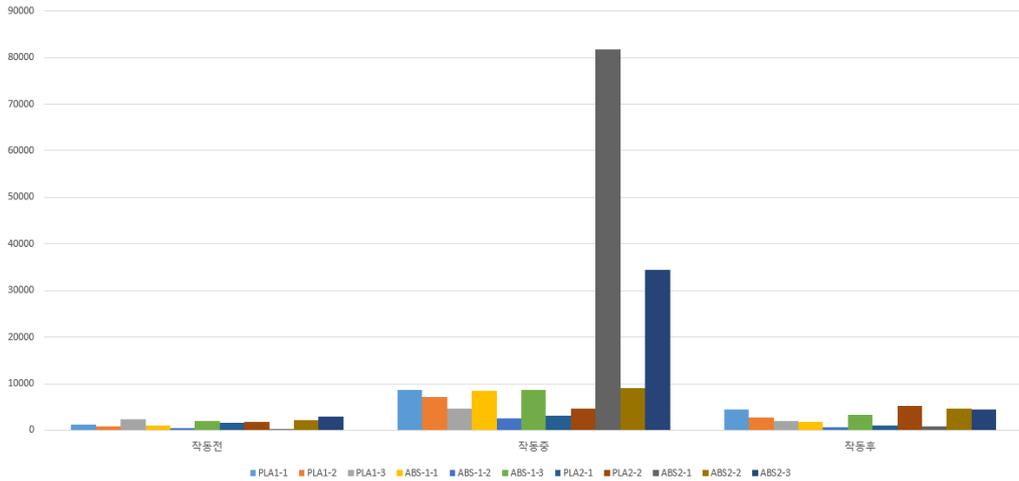
정품 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(2) 소재 3회차 기하평균에서는 작동 중(34468)이 작동 전, 후보다 높았고 작동 중은(34468)은 작동 전(2944)보다 약 12배, 작동 후(4488)보다 약 8배 높았다. 최대측정값으로는 작동 중(513812)이 작동 전(2944)보다 약 157배 높았다. 출력 중 직경 크기 최빈값(mode)은 36.52nm, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 34.46nm, 기하평균입자 34.72nm로 작동 전과 작동 후의 입자보다 작은 것으로 확인되었다. 또한 3회차 측정 시 대기환경은 “보통”날이었고 이 날 측정한 3D 프린터 작동 전 입자 수 농도의 측정값 범위는 배경농도의 대기환경이 “보통”인 날의 측정값과 측정범위가 기하평균 3,000개/cm³이하로 유사하였다.

〈표 III-25〉 소재별 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도 비교(GM)

입자크기 : 10~420nm / 단위 : 개/cm³

재료		작동 전 GM(GSD)	작동 중 GM(GSD)	작동 후 GM(GSD)
PLA(1)	1회	1313(2.00)	8714(2.06)	4543(2.10)
	2회	774(2.05)	7053(2.00)	2785(2.14)
	3회	2354(1.81)	4674(2.28)	2065(1.92)
ABS(1)	1회	981(2.00)	8515(1.80)	1735(1.94)
	2회	487(2.04)	2657(1.97)	652(2.06)
	3회	2078(1.66)	8661(1.90)	3255(1.79)
PLA(2)	1회	1701(1.98)	3170(2.00)	1075(2.15)
	2회	1712(2.03)	4608(1.84)	5296(1.79)
	3회	-	-	-
ABS(2)	1회	271(1.79)	81681(1.76)	901(2.04)
	2회	2133(1.72)	9112(1.88)	4598(1.70)
	3회	2944(1.77)	34468(1.77)	4488(1.83)
평균	11회	1523	15756	2854

소재별 3D 프린터 가동 시 입자 수 농도를 기하평균으로 비교하기 위해 정리하였고, 작동 중에서 작동 전보다 일관적이게 입자 수 농도가 증가하는 것을 확인하였다. 또 대기상태가 상대적으로 더 나쁠 경우 좋은 날보다 입자 수 농도가 증가할 것으로 예상하였으나 일관성은 없었고 3D 프린터의 가동상태(노즐온도, 에러 등)에 대한 연관성이 더 높았다.



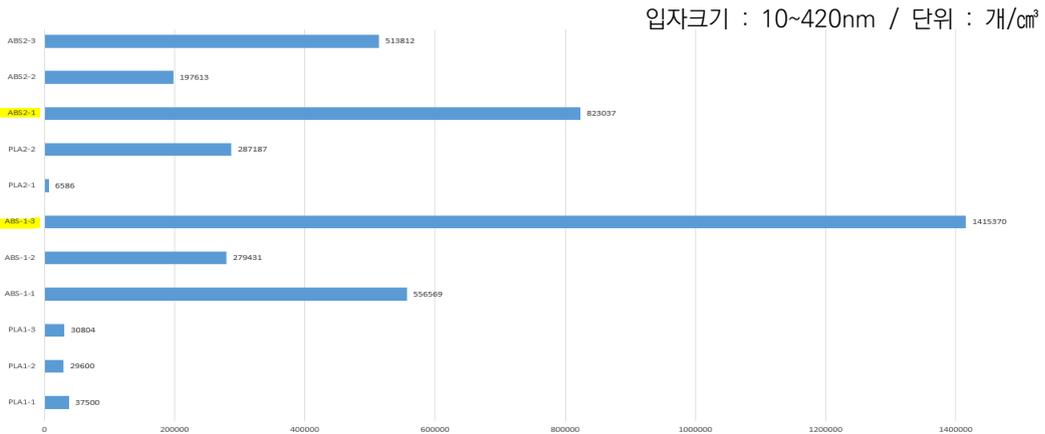
[그림 III-4] 3D 프린터 가동 시 소재별 작동 전, 중, 후 비교(GM)

3D 프린터 가동 소재로 PLA(Polylactic acid)와 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)를 가동하여 각 3회씩 측정한 결과, 대푯값인 기하평균은 작동 전과 후에 비해 작동 중에서 측정값이 높았다. 다만 흐름은 작동전과 후에 비해 작동중이 높아지긴 했으나 같은 소재임에도 측정할 때 마다 입자 수 농도에 차이가 있었다. 이는 나노입자가 워낙 작기에 3D 프린터의 노즐온도나 에러 상황 등에 매우 예민하게 반응하는 것으로 확인되었다. 3회의 측정 중 PLA 소재에서 작동 중 기하평균이 가장 높았던 것은 PLA(1), 1회차 8,714개/cm³이고, ABS 소재에서는 ABS(2) 1회차 81,681개/cm³이었고 PLA 소재보다 ABS 소재에서 더 많은 입자 수가 분포하는 경향을 보였다.

〈표 III-26〉 소재별 3D 프린터 작동 중 입자 수 농도 비교(최댓값)

입자크기 : 10~420nm / 단위 : 개/cm³

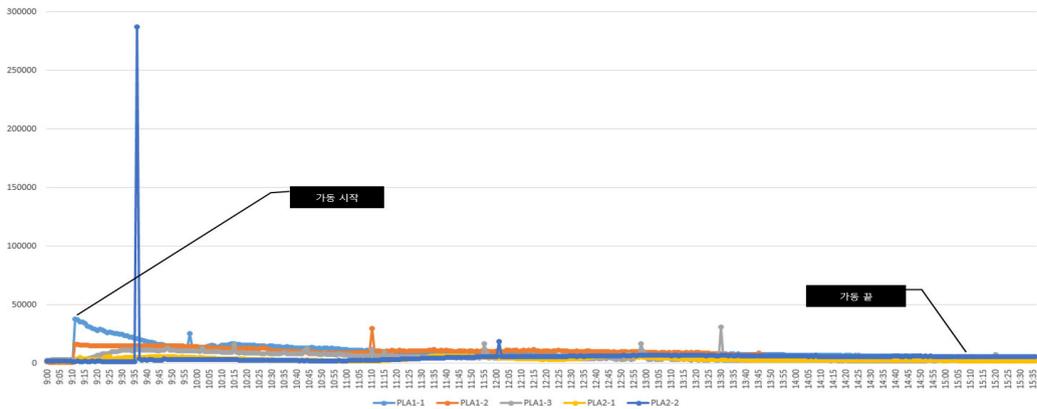
재료		작동 중 최대측정값
PLA1	1회	37500
	2회	29600
	3회	30804
ABS1	1회	556569
	2회	279431
	3회	1415370
PLA2	1회	6586
	2회	287187
	3회	-
ABS2	1회	823037
	2회	197613
	3회	513812



[그림 III-5] 3D 프린터 작동 중 소재별 입자 수 농도 비교(최댓값)

3D 프린터 작동 중 소재별 입자 수 농도 최댓값 중 가장 높았던 것은 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)(1) 소재로 3회차 최대 측정값이 1,415,370개/cm³이었고, ABS(2) 소재 1회차 최대 측정값은 823,037개/cm³로 두 번째로 높았다. 2번 모두 3D 프린터 가동 중 에러 등으로 인해 조치해야 하는 경우였다.

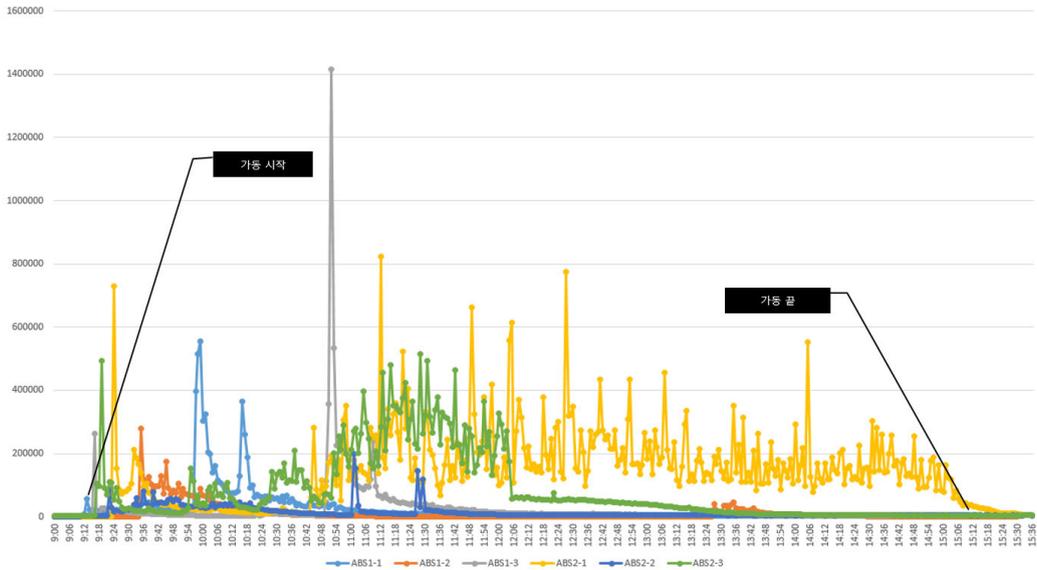
입자크기 : 10~420nm / 단위 : 개/cm³



[그림 Ⅲ-6] 입자 수 농도(개/cm³) 추이(소재 : PLA)

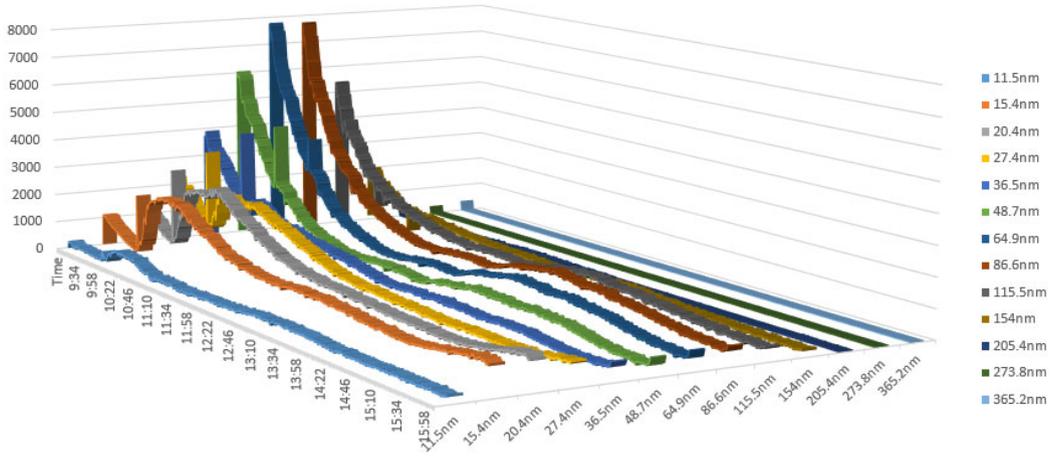
PLA(1)소재로 3번, PLA(2)소재로 2번 가동한 결과 가동 시작 시 조금 높아지는 경향을 보였고, 특히 PLA(2)에서 갑자기 높게 측정(287187개/cm³)되었는데, 이는 에러가 발생하여 필라멘트가 녹으며 적층되지 않고 노즐이 조금 막힌 상태에서 얇은 실처럼 튀어나오는 현상이 발생할 때이었다. PLA 5번 측정 모두에서 입자 수 농도의 차이는 있으나 3D 프린터를 가동할 때 입자 수 농도가 높아지는 것은 일관되게 나타났다.

입자크기 : 10~420nm / 단위 : 개/cm³

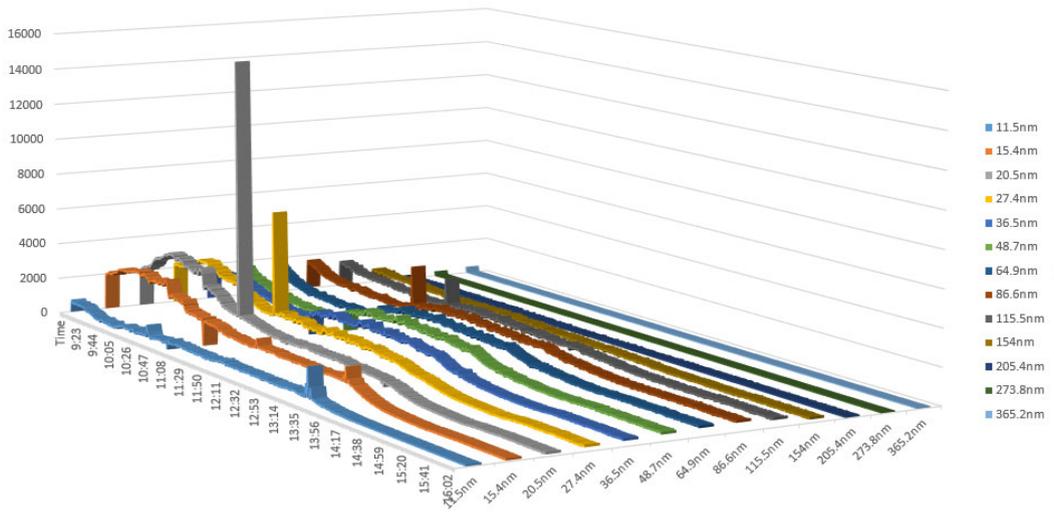


[그림 III-7] 입자 수 농도(개/cm³) 추이(소재 : ABS)

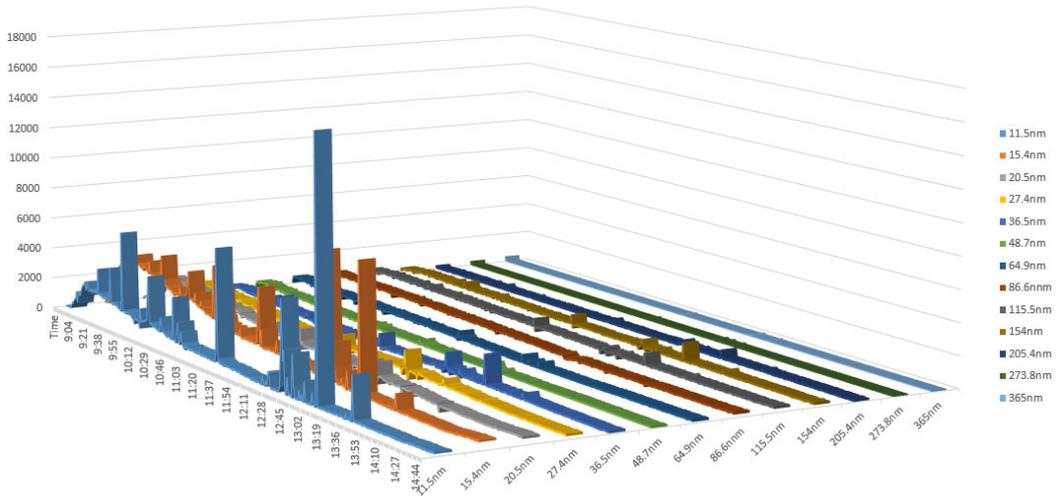
ABS(1),(2)도 각 3번씩 측정된 결과, 적층되는 중에도 계속해서 나노입자가 발생하였고, 특히 출력물이 안정적이게 적층되지 않고 뒤엉켜 나오거나 에러가 발생할 경우, 노즐이 막힌 상태에서 가동 되는 경우 등에서 나노입자가 계속 발생하는 경향을 보였다. 특히 ABS(2)-1(그래프-노랑)측정 시에는 계속 에러가 발생하여 끝날 때까지 나노입자가 안정적이지 않고 계속 발생하는 것을 확인하였다. 또한 ABS(1)-3(그래프-회색)에서 최대 측정값이 백 만개가 넘어갔을 때 역시 적층 중이던 출력물 위로 녹은 필라멘트들이 실 같이 뒤엉켜 에러가 발생할 때이었다. ABS 6번 측정 모두에서 입자 수 농도의 차이는 있으나 3D 프린터를 가동할 때 입자 수 농도가 높아지는 것은 일관되게 나타났다.



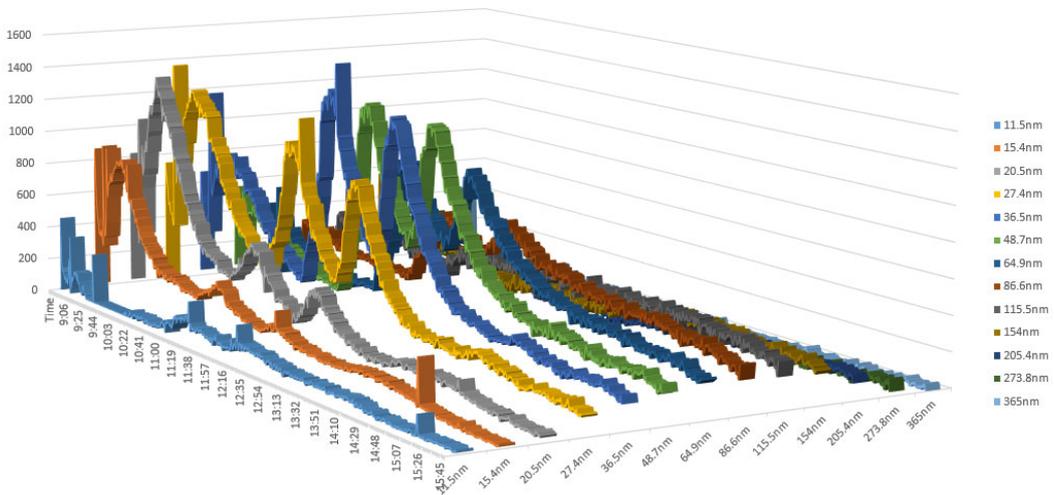
[그림 Ⅲ-8] PLA(1)-1 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



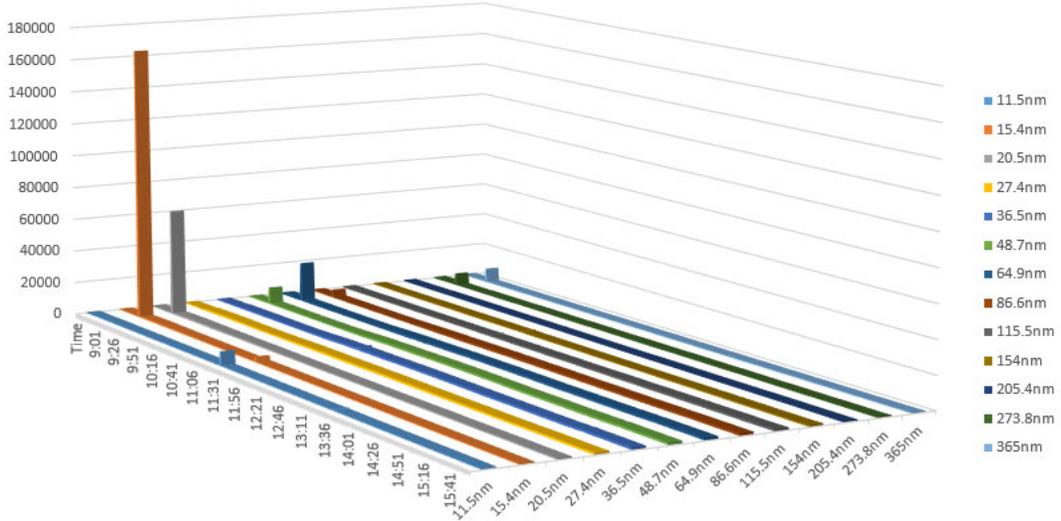
[그림 Ⅲ-9] PLA(1)-2 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



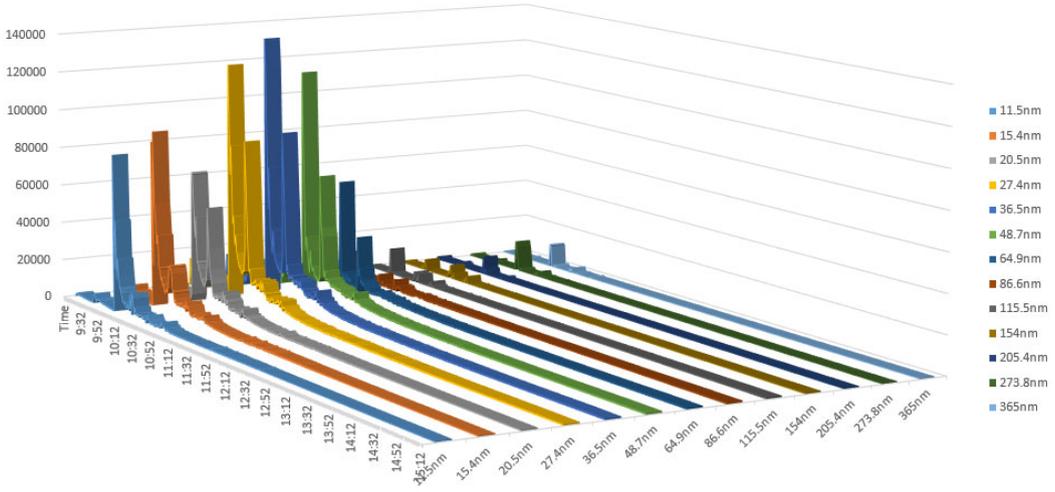
[그림 III-10] PLA(1)-3 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



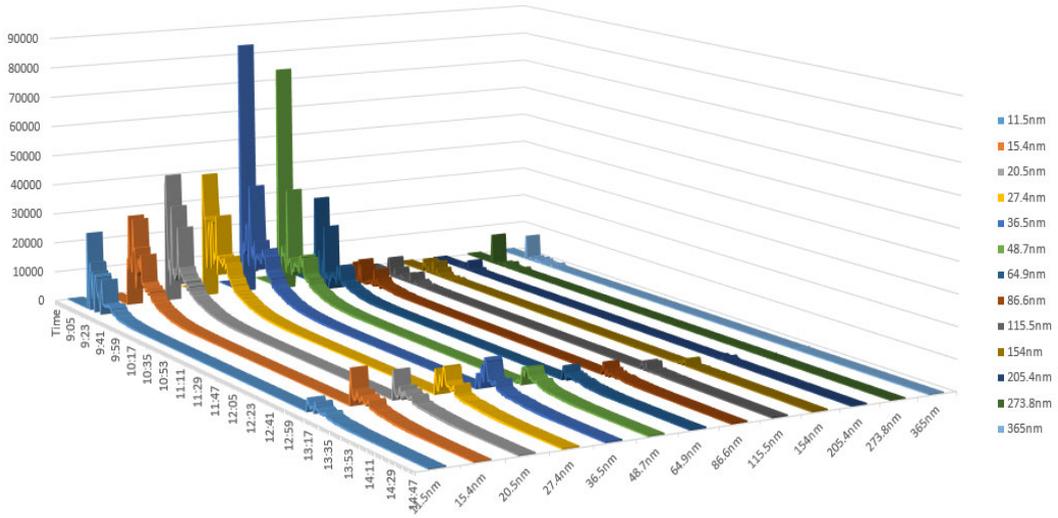
[그림 III-11] PLA(2)-1 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



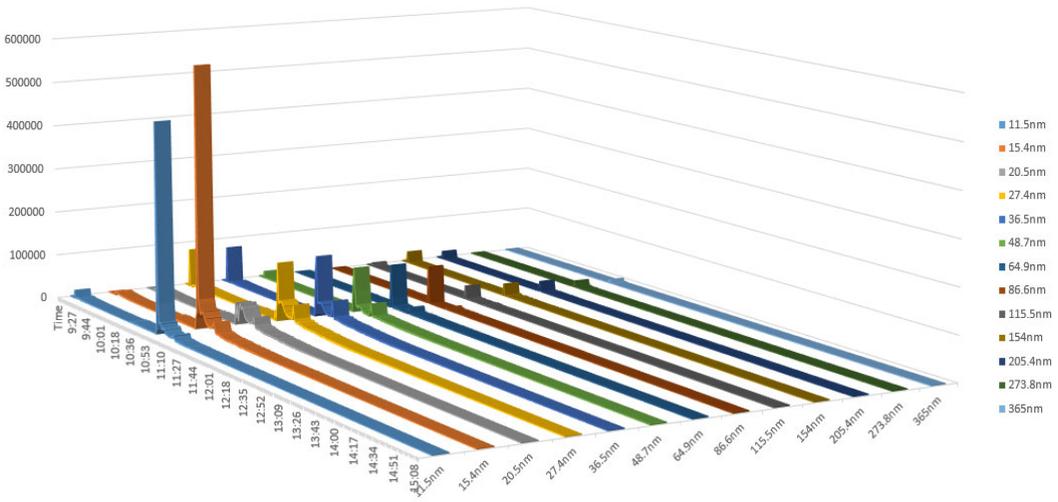
[그림 Ⅲ-12] PLA(2)-2 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



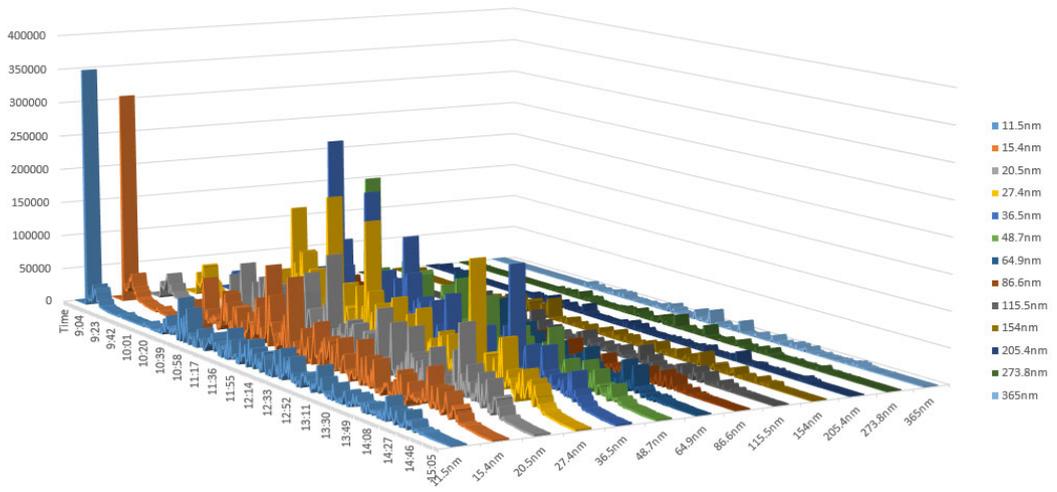
[그림 Ⅲ-13] ABS(1)-1 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



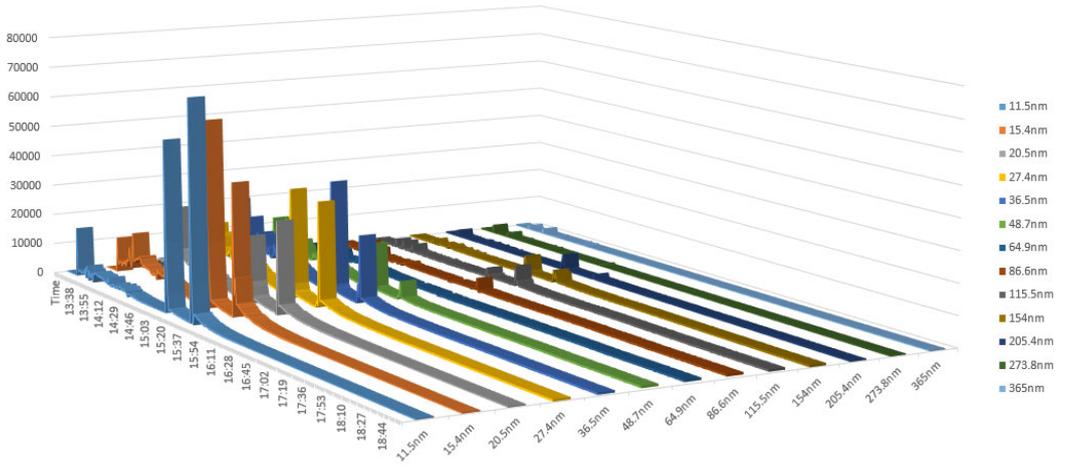
[그림 III-14] ABS(1)-2 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



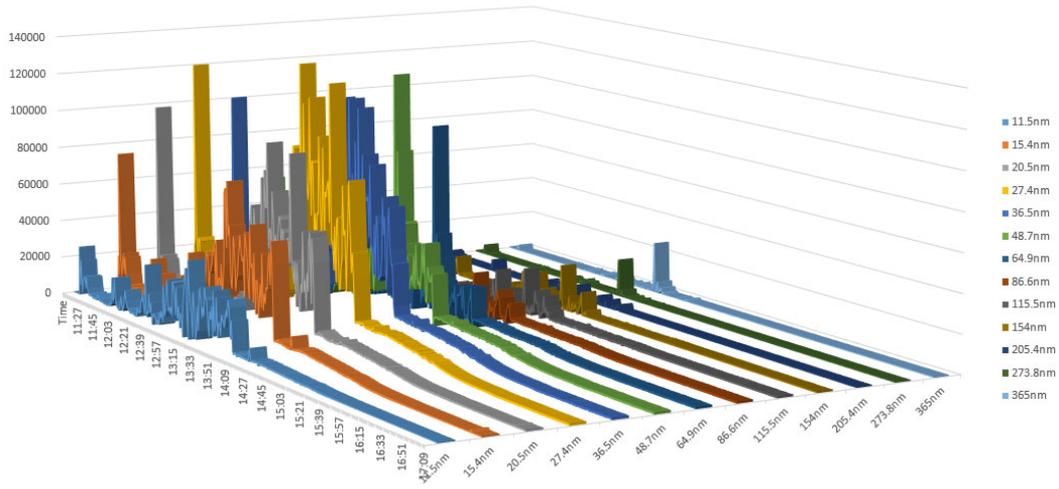
[그림 III-15] ABS(1)-3 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



[그림 III-16] ABS(2)-1 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



[그림 III-17] ABS(2)-2 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)



[그림 III-18] ABS(2)-3 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도(개/cm³)

PLA(Polylactic acid)와 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)소재로 3D 프린터 가동 중 입자별 크기에 따른 입자 수 농도를 확인하였다(그림III, 8~18). 나노입자는 워낙 입자가 작아 같은 소재, 같은 3D 프린터로 측정 하여도 노즐의 온도나 기기 상태, 대기 상태, 예러 등에 따라 측정 결과가 다양하게 나타났으며, 대부분 100nm(0.1 μ m) 미만에서 농도가 높은 것을 확인하였다.

(2) 실제 교육기관에서의 작업환경조사와 작업환경측정

실제 교육기관인 학교 10개소를 대상으로 3D 프린터 사용현황 및 발암물질인 유기화합물, 중금속, 나노입자에 대해 측정하였다.

가) 작업환경조사

연구 대상 10개 학교는 평균 11대(4대~40대)의 3D 프린터를 보유하고 있었고, 10개 학교 중 4개 학교에서 현재는 3D 프린터를 거의 사용하고 있지 않았다. 사용하고 있는 학교 6개 학교의 3D 프린터 사용 빈도는 적게는 분기 1일 정도, 많게는 학기 8개월 중 5개월을 거의 매일 사용하고 있었다. 1회 사용 시 일반적으로 5시간 이상 가동하였고, 3D 프린터 사용 시 담당 교사가 3D 프린터 주변을 머무르는 시간은 대부분 1시간 미만이었지만, 일부 학교에서는 대부분의 시간 동안 3D 프린터 주변에 머무르는 교사도 있었다. 3D 프린터 출력방식은 모든 학교가 FDM 방식이었고 완전 밀폐형은 사용하고 있지 않았으며 필라멘트는 과거와 달리 현재에는 상대적으로 덜 유해하다고 알려진 PLA(Polylactic acid) 소재만을 사용하고 있었다. 후처리 작업은 완성된 3D 프린터 출력물의 표면을 가위나 니퍼 등의 공구를 사용해 다듬는 작업인데, 대부분의 학교는 후처리 작업이 없었으며 본 조사 시 간단한 후처리 작업을 하는 2개 학교를 포함하여 모든 학교에서 후처리 작업은 하고 있지 않았다. 또한 교육기관에서 수행하는 후처리 작업은 간단하여 분진 및 유기화합물 발생 작업은 아닌 것으로 판단된다.

〈표 Ⅲ-27〉 조사당시(2022년) 학교별 3D 프린터 보유대수 및 사용빈도

학교	3D 프린터 보유대수	3D 프린터 형태	3D 프린터 사용빈도
A	1교실 1: 2대, 2교실 2: 4대	덮개형	교실 1: 사용안함, 교실 2: 주당 2~3일
B	4	덮개형	분기에 1회
C	38	개방형	1년에 1개월
D	19	덮개형	주당 2~3회
E	6	덮개형	사용안함
F	10	개방형*	사용안함
G	18	덮개형	년간(학기 8개월) 5개월
H	5	준개방형**	사용안함
I	11	덮개형	주당 1일
J	6	개방형***	사용안함

* 프린터는 덮개형이나, 온도 등의 이유로 프린터 상부를 개방하여 국소배기장치가 있는 전용부스 안에서 사용하고 있음

** 프린터는 준개방형 즉, 프린터 덮개(케이스)에 구멍이 있어 내부에서 발생하는 물질이 외부로 그대로 배출되는 형태임

*** 프린터는 개방형이지만 전용 부스 안에서 가동되고 있음

나) 실제 교육기관에서 유기화합물 측정 결과

10개 학교에서 3D 프린터를 사용하는 교실에서 발암물질인 유기화합물을 중심으로 6시간 측정하였다. 실험실 환경에서의 측정인자인 아크릴로니트릴의 경우 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트 사용 시 노출이 가능하나 현장에서는 PLA(Polylactic acid)만 사용하고 있어 측정물질에서 제외하고 발암물질인 벤젠을 추가하여 측정하였다. 10개 학교의 3D 프린터 근접에서 측정한 인자별 평균값(산술)은 포름알데히드 0.0191 ppm(노출기준 : 0.3 ppm), 벤젠 0.0002 ppm(노출기준 : 0.5 ppm), 에틸벤젠 0.001 ppm(노출기준 : 100 ppm), 스티렌 0.0003 ppm(노출기준 : 20 ppm)이었다. 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌은 고용노동부 노출기준에 비해 0.01% 수준 정도로 낮았고, 포름알데히드는 노출기준에 비해 6.37% 정도로 낮았으며, 염화비닐과 1,3-부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다. 포름알데히드의 경우 12개 시료의 범위가 검출한계미만 ~ 최대 0.0474 ppm으로 나타났고, 최대 측정값인 0.0474 ppm은 노출기준의 15.8 % 정도로 낮긴 하였으나 외기 농도는 포름알데히드가 검출한계미만으로 측정되었다. 이 E학교는 창문을 모두 닫고 환풍기가 미가동되는 상태에서 4대의 3D 프린터를 가동하여 타 학교에 비해 환기가 불충분한 곳으로 파악되었다. 또 환기상태에 따른 노출정도를 확인하기 위해 A학교와 C학교에서도 외기 및 3D 프린터 근접 측정 결과를 비교하였는데 A학교의 경우 외기에 비해 유기화합물이 미량 증가하는 경향을 보였다. C학교의 경우 창문을 열고 환풍기를 가동한 결과에서 창문을 닫고 환풍기를 미가동한 결과보다 포름알데히드와 벤젠은 미량 증가, 에틸벤젠과 스티렌은 미량 감소하였고 E학교에서의 벤젠은 외기와 3D 프린터 근접에서 측정한 값과 같은 수치로 확인되었다. 따라서 비교를 위해 외기를 측정한 A, C, E학교에서 측정한 유기화합물이 환기가 불충분한 곳에서 미량 증가하는 경향을 보긴 하였으나 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌은 측정결과가 같거나 오히려 3D 프린터 근접에서 더 낮아지는 경우도 있었다. 이는 워낙 미량 측정되어 환기상태에 따른 구분이 어려운 것으로 파악된다. 다만, 포름알데히드는

3곳 모두에서 외기에 비해 3D 프린터를 가동한 교실에서 미량 증가하였고 학교에 따라 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌이 미량 증가하는 경우도 있어 환기가 불충분할 경우 3D 프린터 가동대수가 증가하거나 3D 프린터 소재 및 제조사에 따라 3D 프린터 영향이 있는 것으로 파악된다. 하지만 측정결과에서 환기가 불충분한 경우에도 노출수준은 여전히 낮았다.

〈표 III-28〉 학교별 3D 프린터실 내·외부 측정결과

(단위 : ppb)

학교	측정당시 3D 프린터 가동대수	3D 프린터(FDM, 필터없음, 소재 : PLA)	3D 프린터 가동시간	창문 개방 유무	창문의 환풍기 가동 유무		국소배기장치 설치 및 개방 유무		측정위치	포름알데히드	벤젠	에틸벤젠	스티렌	체적 (가*세*높)
A	1대	밀폐형 (덮개)		4시간 32분 (도중에 폴트)	닫힘	4대	가동	-	*3D 프린터 옆(2.4m 위치)	10.3	0.25	0.35	<LOD	7.6*11.0* 2.4
									3D 프린터에서 9m 떨어진 위치	<LOD	0.28	0.30	<LOD	
									외기	<LOD	0.21	0.22	<LOD	
B	1대	밀폐형 (덮개)		약 3시간 (도중에 폴트)	닫힘	무	-	*3D 프린터 앞 1m	34.3	<LOD	0.35	0.18	10.8*7.5* 2.7	
								3D 프린터에서 9m	23.0	0.07	0.37	0.22		
C	22대	개방형		약 5시간 30분	닫힘	미가동	-	*컴퓨터실 3D 프린터 앞(30cm)	17.0	0.85	0.06	<LOD	8.2*12.6* 2.4	
								*컴퓨터실 3D 프린터 뒤(30cm)	24.8	<LOD	4.29	0.37		
								교사테이블(3D 프린터에서 7m)	27.5	<LOD	3.57	0.29		
					열림	4대	가동	-	외기	<LOD	<LOD	0.82		0.25
									*컴퓨터실 3D 프린터 앞(30cm)	12.5	0.04	0.90		0.22
									*컴퓨터실 3D 프린터 뒤(30cm)	12.2	0.22	0.47		0.12
E	4대	밀폐형 (덮개)		약 10시간	닫힘	미가동	-	*3D 프린터 앞	47.4	0.16	0.94	0.50	5.5*3.1* 2.6	
								3D 프린터실 앞 교실	36.9	0.15	0.86	0.37		
F	8대	개방형 (덮개 제거)		약 5.5시간	닫힘	무	국소배기 장치 부스 설치	부스닫힘 (on)	*3D 프린터 앞	20.4	0.09	0.65	0.90	3.5*6.9* 2.5
								3D 프린터실 앞 교실	32.6	0.06	0.49	<LOD		
								부스개방 (off)	*3D 프린터 앞	23.3	0.11	0.82	0.17	
								3D 프린터실 앞 교실	71.1	0.22	1.93	0.97		
G	13대	밀폐형 (덮개)		약 5시간	닫힘	무	캐노피후드 설치	*3D 프린터 옆	4.4	0.18	1.68	1.06	11.4*2.1* 3.0	
								3D 프린터실 앞 교실	7.4	0.07	2.45	0.29		
H	4대	준개방형 (덮개구멍)		약 5시간	닫힘	무	-	*3D 프린터 앞	12.6	0.13	0.77	0.37	8.8*7.3* 2.7	
								3D 프린터실 앞 복도	12.0	0.10	0.59	0.10		
I	5대	밀폐형 (덮개)		약 5시간	닫힘	미가동	-	*3D 프린터 앞	9.5	0.47	1.25	0.21	7.1*4.4* 2.5	
								복도	<LOD	0.19	0.38	<LOD		
*3D 프린터에서의 근접 측정결과									*산술평균	19.1	0.2	1.0	0.3	
									*표준편차	12.1	0.2	1.1	0.3	
									*기하평균	15.9	0.1	0.7	0.2	

* 평균계산 : $LOD \div \sqrt{2}$ 를 나눈 값으로 대체(벤젠 0.007 ppb, 스티렌 0.064 ppb)

〈표 III-29〉 학교별 3D 프린터실 내·외부 측정결과(3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 존재)

(단위 : ppb)

학교	측정당시 3D 프린터 가동대수	3D 프린터(FDM, 필터없음, 소재 : PLA)	3D 프린터 가동시간	창문 개방 유무	창문의 환풍기 가동 유무		국소배기장치 설치 및 개방 유무	측정위치	포름알데히드	벤젠	에틸벤젠	스티렌	체적 (가*세*높)	
A	2대	밀폐형 (덮개)		1시간	일부 열림	2대	가동	-	메이크실 3D 프린터 옆 선반	24.04	0.06	7.51	1.79	7.6*11.0*2.4
									메이크실 레이저가공기 옆	130.3	<LOD	11.49	4.39	
									교육실 중앙	149.6	0.02	11.67	4.46	
									외기	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
D	6대	밀폐형 (덮개)		약 9시간	닫힘	무	-	3D 프린터 옆	12.80	3.84	8.39	0.96	12.6*7.2*3.7	
								3D 프린터 인근(3m)	11.6	3.60	7.10	0.92		
								3D 프린터실 밖 복도	13.20	8.13	5.50	0.87		
								레이저가공기 앞	NA	6.7	23.2	3.8		
J	7대	개방형		약 4시간	닫힘	미가동	-	3D 프린터 앞	9.1	0.34	1.50	0.15	8.0*9.7*2.5	
								복도	<LOD	0.34	0.91	<LOD		

* 3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 : A-실내페인트, MDF 자재, D-레이저가공기 사용, J-에어프라이기 사용

3D 프린터에서 발생하는 유기화합물인 발암물질 확인을 위한 측정이었으나 위의 A, D, J 학교에서는 측정 중 합판목재(MDF)를 자르거나 합판목재의 자재가 가득 쌓여있는 공간이라 포름알데히드가 발생할 수 있었다. 또 J 학교의 경우 에어프라이기 가동으로 영향을 받을 수도 있어 3D 프린터로 인한 영향인지 알 수 없기 때문에 위의 세 학교에서의 측정값은 신뢰할 수 없어 참고용으로만 정리하였다.

다) 실제 교육기관에서의 중금속 측정 결과

측정대상 중금속의 농도는 대부분의 시료가 검출한계 미만이었고 일부 시료에서 납, 니켈, 크롬이 미량 검출되었는데 모두 고용노동부 노출기준에 비해 0.001% 보다도 낮은 수준이었다.

〈표 III-30〉 학교별 3D 프린터실 내 발암성 중금속 측정결과

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

학교	카드뮴	코발트	납	니켈	크롬
A	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD-0.474
B	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
C	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD-0.136
E	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
F	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD-0.020
G	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
H	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
I	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD-0.027	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

〈표 III-31〉 학교별 3D 프린터실 내 발암성 중금속 측정결과
(3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 존재)(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

학교	카드뮴	코발트	납	니켈	크롬
A	<LOD	<LOD	<LOD-0.051	<LOD	<LOD
D	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
J	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

라) 실제 교육기관에서의 나노입자 흐름 측정 결과

SMPS(10~420nm)로 측정한 학교에서의 나노입자는 3D 프린터 근접에서 측정한 가동 중 평균 나노입자 수 농도가 평균 79,414개/cm³, 표준편차는 2,582개/cm³, 평균 입자의 크기는 47.6 nm이었다. 또한 대부분의 학교에서 인근 대기측정망의 PM2.5 농도와 유사한 영향을 보여 외기의 농도변화가 실내 초미세입자 발생에 영향을 미치는 것으로 나타났다(부록의 그래프 참조). 하지만 C학교와 F, G 학교에서 환기상태에 따른 측정을 비교한 결과에서 환기가 불충분할 경우 3D 프린터에서 발생하는 나노입자의 농도에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

〈표 Ⅲ-32〉 학교별 3D 프린터 가동 중 SMPS로 측정된 나노입자(10~420nm)
수 농도와 입자크기

(단위 : 개/cm³)

학교	N		산술평균 ±표준편차	기하평균 (기하표준편차)	범위	평균직경 (기하평균),nm
A	교실1	270	6,076 ±1,538	5,883 (1.12)	4,057-8,736	58
B	1,152		2,872 ±1,102	2,704 (1.40)	1,638-6,145	46
C	미환기	332	10,174 ±3,351	9,706 (1.35)	6,397-28,690	64
	환기	248	8,558 ±5,004	7,585 (1.57)	4,582-20,332	50
E	180		5,531 ±1,570	5,316 (1.33)	3,502-8,523	49
F	부스	331	6,099 ±2,185	5,685 (1.47)	3,180-9,332	37
	개방	331	15,969 ±4,949	15,333 (1.32)	6,845-34,208	42
G	297 (캐노피후드)		5,184 ±950	5,094 (1.21)	3,751-7,093	35
H	291		6,516 ±922	6,448 (1.16)	3,994-10,508	46
I	236		12,435 ±4,247	11,811 (1.37)	7,525-23,869	49
평균			79,414 ±2,582	-	-	47.6

* 표준오차, NA: 해당없음

n수는 1분 간격으로 측정된 측정치의 수를 의미하며 실제 측정시간이기도 함

10개 학교 중 C중학교 교실에는 3D 프린터용 국소배기 장치는 없었지만 3D 프린터 교실의 창문이 모두 닫혀 있을 때와 창문이 개방되어 있을 때 각각 측정하였고, F고등학교의 3D 프린터들은 배기장치가 가동되는 부스 내에 있었는데, 부스의 도어가 닫혀있을 때와 부스의 도어를 개방하고 국소배기장치 미가동 상태에서 각각 측정하였다. 그리고 G고등학교는 3D 프린터 상부

에 캐노피 후드가 가동되는 상태였다. 나머지 7개 학교의 교실에는 3D 프린터용 국소배기 장치가 설치되어 있지 않았다.

C중학교에서 교실 창문이 닫혀 있는 상태에서 나노입자의 입자 수 농도는 평균 10,174 개/cm³으로 교실 창문이 개방 되었을 때 보다 약 20% 높았고, 최고 농도는 28,690 개/cm³로 평균 농도에 비해 약 3배 높은 것으로 나타나 환기상태가 3D 프린터에서 발생하는 나노입자의 실내 농도에 영향을 미치는 것으로 보였다. 또한 3D 프린터 가동 직후 입자 수 농도가 증가하였는데, 교실 창문이 열려 있을 때 보다 닫혀 있을 때 농도 상승이 더 컸으며 3D 프린터가 가동되는 동안의 평균 입경분포에서 Mode 직경이 약 60 nm이었고, 3D 프린터 가동 초기 입자 수 농도가 증가하여 최고 농도를 나타낸 11시 8분의 입경분포에서는 Mode 직경이 약 30 nm로 확인되어 3D 프린터에서 나노크기의 초미세입자가 발생된다는 것을 나타내었다.

F고등학교에서 3D 프린터 부스의 도어를 개방하고 국소배기장치를 off한 상태에서는 나노입자의 평균 농도가 15,969 개/cm³으로 국소배기장치 on 상태에서 부스 도어까지 미개방한 상태에 비해 2배 이상 높았고, 최고 농도는 34,208 개/cm³으로 평균 농도에 비해 2배 이상 높아 실내 환기상태가 3D 프린터에 의해 발생하는 나노입자의 실내 농도에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보였다. 또 도어 개방 후 3D 프린터 가동 시에는 C학교와 마찬가지로 초기에 급격히 농도가 증가하는 것을 보여주며 환기가 되는 부스 안에서 3D 프린터가 가동될 때의 실내 평균 입경분포를 보면 Mode 직경이 약 37 nm이었고, 환기장치를 끄고 부스의 도어를 개방하였을 때에는 입자 수 농도가 최고이었던 17시 8분의 입경분포에서도 Mode 직경이 약 30 nm를 보여 C학교와 마찬가지로 3D 프린터에서 나노크기의 초미세입자가 발생하는 것으로 보였다(부록 그래프 참조).

한편, G고등학교에서는 13대의 3D 프린터가 가동되는 환경이었지만 3D 프린터 상부(천정)에 캐노피 후드가 가동되고 있어 가동대수에 비해 나노입자 발생이 높지 않은 것으로 나타났다.

〈표 III-33〉 학교별 3D 프린터 가동 중 SMPS로 측정된
나노입자(10~420nm) 수 농도와 입자크기
(3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원 존재)

(단위 : 개/cm³)

학교	N		산술평균 ± 표준편차	기하평균 (기하표준편차)	범위	평균직경 (기하평균)(nm)
A	교실2	60	2,142 ±146	2,138 (1.07)	1,833-2,456	72
D	646		1,494 ±400	1,436 (1.34)	793-2,610	56
J	238		10,852 ±22,236	6,299 (2.10)	3,550-146,457**	52

* 표준오차, NA: 해당없음

** 12시 10분~20분 에어프라이기 사용으로 농도 증가

n 수는 1분 간격으로 측정된 측정치의 수를 의미하며 실제 측정시간이기도 함

3D 프린터에서 발생하는 나노입자를 확인하기 위한 측정이었으나 위의 A, D 학교에서는 측정 중 합판목재(MDF)를 자르거나 합판목재의 자재가 가득 쌓여있는 공간이라 유기화합물 측정결과에서도 따로 정리하였다. 또 J학교의 경우 에어프라이기 가동으로 나노입자에 영향을 받을 수도 있어 3D 프린터로 인한 영향인지 알 수 없기 때문에 위의 세 학교에서의 측정값은 신뢰할 수 없어 참고용으로만 정리하였다.

(3) 심층인터뷰 결과

가) 심층 인터뷰 대상자 특성

심층 인터뷰는 현장 측정 조사 대상 학교 중 인터뷰에 응한 3D 프린터를 사용하는 교사 10명을 대상으로 진행하였다. 심층 인터뷰 주요 질문을 시작하기 전에 대상자의 기본 사항(이름, 연령, 근무년수, 전공, 현재 하고 있는 일) 및 3D 프린터 주 용도를 질문하였다. 심층 인터뷰 대상자 특성은 아래와 같다.

〈표 III-34〉 심층 인터뷰 대상자 특성 및 3D 프린터 주용도

구분		소재지	근무년수	전공	3D 프린터 주용도	
중학교	A	A1	서울	3년 3개월	기술교육	정규교과/동아리
		A2		30년	물리	제품 제작
	B	서울	2년 4개월	물리	동아리(로봇/메이커)	
	C	경기	20년	컴퓨터	정규교과/동아리	
일반고	D	서울	30년	정보	동아리	
	E	인천	25년	화학	동아리	
	F	경기	18년	기술	정규교과	
특목고/ 특성화고	G	경남	9년	물리교육	동아리/연구(발명)	
	H	대전	10년	기계금속	정규교과/동아리	
대학교	I	서울	6년	기계공학	시제품 제작	

심층 인터뷰 대상자 구분은 크게 학교급별로 4개 그룹으로 구분하였다. 1 그룹은 중학교, 2그룹은 일반고, 3그룹은 특목고/특성화고, 4그룹은 대학교로 구분하였다. 인터뷰 참여자 성별은 모두 남성이었으며, 연령대는 20대 1명, 30대 3명, 40대 2명, 50대 3명, 60대 1명이었다. 근무년수는 최소 2년 4개월부터 최대 30년까지 있었으며, 평균 근무년수는 15년인 것으로 나타났다. 인터뷰 참여자의 3D 프린터 주 용도는 대부분 동아리인 것으로 나타났고 인터뷰는 1회만 진행하였다. 소요시간은 약 30~60분이며 향후 분석을 위해 동의하에 인터뷰 진행 과정을 녹음하였다. 심층 인터뷰 질문 내용은 2020년 교육부 설문조사 항목과 과학기술정보통신부 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인을 참고하여 설계하였고 위해성 인식도, 사용소재, 작업환경, 신체영향, 건의사항에 대한 상세 질문 내용은 다음과 같다.

〈표 III-35〉 3D 프린터 사용 교사 대상 심층 인터뷰 질문 내용

구분	질문 내용
3D 프린터 위해성 인식도	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3D 프린터 사용이 인체에 유해하다는 사실을 어떻게 처음 아셨습니까? ■ 3D프린팅 작업이 유해하다고 생각하십니까? ■ 3D프린팅 작업 중 어떤 공정과 물질이 건강에 영향을 준다고 생각하십니까? ■ 정부의 3D프린팅 안전이용가이드라인과 온라인 안전교육을 보신 적이 있으십니까? 실제로 도움이 되셨습니까?
3D 프린터 및 소재 (필라멘트)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 안전하다고 생각하시는 3D 프린터와 3D 프린터 소재 기준은 무엇입니까? ■ 안전한 3D 프린터와 소재를 구매하기 위해 어떤 노력을 하십니까?
3D프린팅 작업 환경	<ul style="list-style-type: none"> ■ 과거 3D프린팅 작업은 주로 어떻게 하셨습니까?(가동시간, 상주시간, 후처리) ■ 과거 3D 프린터실 환경은 어떠했습니까?(분리공간, 환기시설) ■ 3D 프린터 위해성이 알려진 이후 실제 작업환경은 어떻게 바뀌었습니까? ■ 3D프린팅 작업환경 관련 문제점과 개선시 저해 요인은 무엇이라고 생각하십니까?
3D프린팅 작업 후 신체 영향	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3D프린팅 작업시 실제로 느낀 신체 이상 증상은 어떤 것이 있었고 어떤 조치를 취하셨나요?(2020년 교육부 설문조사 이전과 이후) ■ 현재 상태는 어떠신가요?
학교 및 정부 대상 제안	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현재 3D 프린터 안전 이용에 대한 정부와 학교 정책에 대해 어떻게 생각하십니까? ■ 정부와 학교에 건의사항이 있으십니까?

나) 주제별 심층 인터뷰 결과

주제별 심층 인터뷰 내용 분석 결과는 아래와 같으며, 주제에 따른 기관별 심층 인터뷰 내용은 부록에 수록하였다.

주제1) 3D 프린터 위해성 인식도

○ 3D 프린터 위해성을 처음 접하게 된 시기

대부분의 교사들은 방송을 통해 3D 프린터 사용 과학교사의 육종암 발병사례 보도를 보고 처음으로 3D 프린터가 인체에 유해하다는 사실을 알게 되었다고 답하였다. 반면, 교사 2명은 뉴스 보도 이전부터 3D 프린터가 인체에 유해할 것으로 알고 있었다고 답하였다.

○ 3D 프린팅 작업에 대한 위해성 인식도

인터뷰 참여 교사 중 6명은 3D 프린팅 작업이 유해하다는 생각을 못했다고 답하였다. 반면 참여 교사 중 3명은 정도의 차이는 있지만 3D 프린터 작업이 유해할 거라는 생각은 했던 것으로 답하였다. 이들 중 1명은 주변 알고 있는 교사의 사망 및 발병 사례와 본인의 급격한 건강 악화로 인식하게 되었다고 답하였다.

○ 3D 프린터 작업 중 의심되는 유해 공정과 물질

3D 프린터 사용 교사의 육종암 발병 사례 뉴스 보도 전후를 통틀어 3D 프린터 작업 중 의심되는 유해 공정과 물질로는 대부분의 교사들이 플라스틱 소재를 고온으로 가열하여 녹이는 과정에서 유해물질이 나온다고 답하였다(출력시). 이 외에 교사 1명은 후가공이 위험하다고 인식하여 후 가공을 하지 않는다고 답하였다.

○ 정부의 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인과 온라인 안전 교육

교사 3명은 정부의 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인을 훑어봤다고 답하였다. 보다가 말거나 아예 읽어 보지 못했다고 응답한 교사가 4명이었으며, 이유는 불필요한 내용이 많다거나 받아 본 적이 없기 때문이라고 답하였다. 읽어 보았다는 교사 중 작업 환경 개선에 도움을 받았다는 교사는 1명, 번거로운 절차가 기술된 내용으로 불만을 표시한 교사가 1명 있었다. 또한 올해 7월 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인 내용이 보완되어 개정판이 배포된 사실에 대해 인터뷰 참여 교사 모두 알지 못했다.

온라인 안전 교육을 들어보지 않았다고 응답한 교사는 3명이었으며, 교사 1명은 들어보긴 했지만 구체적인 내용을 답변하지 못하였다. 3D 프린터 실태 조사원이 들으라고 해서 잠깐 들어봤다고 응답한 교사가 1명 있었다.

3D 프린팅 출력과정 중 나노입자가 나온다는 사실을 알고 있는지에 대한 질문에 모든 교사들이 모른다고 답하였다.

주제2) 3D 프린터 및 소재(필라멘트)

○ 본인이 생각하는 안전한 3D 프린터 및 소재(필라멘트) 기준

안전한 3D 프린터에 대해 대다수 교사가 밀폐형이거나 필터가 장착된 밀폐형 3D 프린터가 안전하다고 답하였다. 안전한 소재(필라멘트) 관련해서는 교사 4명은 옥수수 전분으로 만들어진 PLA(Polylactic acid)이지만 친환경 소재라고 볼 수 없으며, 그나마 PLA 소재가 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재보다 낫다고 답하였다. 교사 2명은 PLA가 옥수수 전분으로 만들어진 친환경 소재로 알고 있다고 응답하였으며, 이들 중에서 PLA가 친환경 소재라는 인식은 기술/가정 교과서와 제품 박스에 '친환경'으로 표기되어 있기 때문이라고 응답한 교사도 1명 있었다.

이외에도 소재보다 환기가 중요하다고 답한 교사도 1명 있었으며, 밀폐형 3D 프린터보다는 음압식 국소배기장치 같은 구체적인 환기 시스템을 말한 교사도 1명 있었다.

○ 안전한 3D 프린터와 소재(필라멘트)를 사용하기 위한 노력

3D 프린터 소재 관련해서 교사 모두 PLA(Polylactic acid) 소재만을 사용한다고 답하였으며, PLA소재와 함께 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재를 부수적으로 사용했던 학교의 경우 ABS 사용을 중지하거나 권유하지 않는 것으로 방침을 바꿨다고 답한 교사는 2명 있었다.

주제3) 3D프린팅 작업 환경

○ 과거 3D 프린팅 작업(가동시간, 상주시간, 후처리)

구체적인 가동시간을 언급한 교사들의 공통점은 가동시간이 제품 크기에 따라 짧게는 몇 시간에서 많게는 며칠을 가동하는 등 편차가 크다는 점이었다. 그리고 균일하게 사용하기 보다는 시즌(학교축제, 대회 등)에 따라 집중적으로 사용하는 것으로 나타났다. 특이사항은 하루 이상을 넘기는 3D 프린팅 작업의 경우 밤새 3D 프린터를 가동하고 다음날 출력물을 떼어 가는데 밤새 축적된 오염된 공기를 빼내는 않고 바로 출력물을 떼어 가거나 출력물을 떼어 낸 뒤 환기를 시키는 것으로 답하였다. 이때 냄새 여부로 환기 여부를 결정한다고 답한 교사도 있었다.

상주시간을 구체적으로 5분~10분 또는 30분 정도라고 답한 교사가 2명 있었다. 이외에 3D 프린터 고장으로 가동시간이 늘어나거나 자주 가서 확인한다고 답한 교사도 있었다.

재료압출방식 3D 프린터와 함께 광중합방식 3D 프린터를 부수적으로 사용하는 교사 1명은 화학적 후처리를 하는 것으로 나타났다. 물리적 후처리의 경우 글라인더(연마기)가 아닌 간단한 사포질, 니퍼로 다듬거나 줄로 떼어내는 정도의 작업을 한다고 답하였다. I학교의 경우 화학적 후처리는 FDM 방식이 아닌 SLA 방식인 경우에 적용하고 있으며, 3D 프린터 출력물 후가공장비에 제품을 넣고 (이소프로필)알코올로 훈증하는 방식이라고 답하였다.

○ 과거 3D 프린팅 작업실 환경(분리공간, 환기시설)

과거에 F학교와 I학교를 제외한 대다수 교사들은 3D 프린터실을 별도로 만들지 않고 교실(강의실)에 3D 프린터를 설치하고 사용했던 것으로 답하였다. H학교를 제외하고 학교에서 환기 방식은 자연환기를 했다고 답하였다. 특히 겨울철에 학생 대상 환기 지도가 어려웠다고 답한 교사가 있었다. 이외에 환기 여부를 냄새로 판단해서 환기시켰다거나 학생들이 자주 출입문을 여닫는 것도 환기로 보는 교사도 있었다. 3D 프린터의 원활한 작동을 위해 난방기를 사용했다고 답한 교사도 있었다. 3D 프린터와는 달리 레이저 커팅기의 경우는 별도로 환풍기를 설치하거나 밀폐형으로 설치한 것으로 답하였다.

○ 보도 이후 3D 프린팅 작업 환경 개선

교사 6명은 사건 이후 자연환기에서 기계식 환기로 교체했다고 답하였다. 보도 이후에도 자연환기를 하는 학교의 경우 더 자주 환기하고 공기청정기를 사용한다고 답하였다. 설계공간과 분리된 3D 프린터실 관련 보도 이전부터 3D 프린터실이 따로 있었던 학교 2곳도 이후 3D 프린터실을 따로 설치했다고 답한 교사는 4명 있었다.

3D 프린터실 설치 유무와 상관없이 3D 프린터실에 머무는 시간을 최소화하려고 한다고 답한 교사가 5명 있었다. 이외에 이전에 없었던 보호장구, MSDS(물질안전보건자료), 출입대장을 비치했다고 답한 교사들도 있었다. 학생 노출을 줄이기 위해 방과 후 따로 작업한다고 답한 교사도 있었다. 3D 프린터실에 실내공기질 측정기를 설치했다는 교사가 있었으며, 3D 프린터 업체에 3D 프린터에 환기장치를 연결할 수 있는 방안을 직접 제안한 적도 있다고 말한 교사도 있었다.

○ 작업환경 관련 문제점 및 개선시 저해 요인

대다수 교사들이 MSDS(물질안전보건자료)에 대해 부정적인 반응을 보였다. 구체적인 이유로는 어려운 내용으로 이해가 어렵다가 가장 많았고, 실제 현장에 실제로 도움이 안 된다는 점, 강압적인 상부 지시라고 답했다. 대부분

교사들은 MSDS의 필요성을 느끼지 못하고 수동적으로 3D 프린터실에 비치했으며, 이를 두고 탁상행정 또는 요식행위라고 지적하였다. 작업 환경 개선 시 저해 요인으로는 환기설치에 대한 예산 부족 문제가 많았으며, 학교 특성상 과밀학급 문제로 3D 프린터실 별도 설치의 현실적 어려움을 말하는 교사도 있었다.

교육부에서 정기적으로 실시하는 실내 공기질 측정 관련해서는 일반 교실 대상으로만 진행되는 것으로 나타났다. 또한 앞서 3D 프린터 안전 기준에 필터가 장착된 밀폐형 3D 프린터를 언급한 교사들이 있었으나, 막상 현장에서는 필터 교체 주기에 대해서는 인지하지 못하는 것으로 나타났다. 이외에 학생 통제의 어려움을 호소한 교사도 있었다.

주제4) 3D프린팅 작업 후 신체 영향

○ 신체 이상 증상

3D 프린터가 아닌 레이저 커팅기에서 나오는 냄새나 분진으로 인한 신체 이상 증상인 것 같다고 호소한 교사가 2명 있었으며, 신체 이상 증상이 없다고 답한 교사는 3명인 것으로 나타났다. 신체 이상 증상 또는 진단 치료 받고 있는 교사는 5명으로 C학교(자율신경계 이상), D학교(눈 피로), F학교(갑상선암), G학교(본인(육종암)/동료교사(유방암과 간유리음영)), H학교(눈/피부 알레르기 반응, 호흡곤란 증상)인 것으로 나타났다. 이들 중 교사 1명은 학교 내부에서 갈등 초래를 원치 않기 때문에 신체 이상 증상 문제를 적극적으로 대처하기 어렵다고 답하였다.

교사를 통해 확인한 결과 3D 프린터와 관련성은 모르겠으나 신체 이상 증상 또는 진단 치료 받고 있는 학생의 경우 D학교(눈 자극, 피부 자극, 두통)와 G학교(혈액암)에 있는 것으로 나타났다.

주제5) 학교 및 정부 대상 제안

○ 정책 건의 사항

환기나 시설 확충에 대한 학교나 정부의 예산 지원이 다수의 건의 사항이었다. 이외에 3D 프린터 인증이나 소재 개발이 필요하다는 의견이 있었다. 문제 해결을 위해 원인 규명이 시급하며, 3D 프린터를 포함하여 신기술 도입 시 관리 환경 조성 및 전문 지식 확충 이후 도입이 필요함을 지적하였다. 실효성을 높이기 위해 3D 프린팅 온라인 교육 대신 교사 직무 연수과정 내 안전 연수에 3D 프린팅 안전 교육을 넣는 방안을 제안하였다. 또한 학교 내 3D 프린터 작업환경조사(설문조사)에 전문가 투입이 필요하다는 의견도 있었다. 교육자 관점에서 중학생 대상 3D 프린팅 교육 필요성에 대해 문제를 제기한 교사도 있었다. 3D 프린터의 유해성 관련 산업안전보건법 등에 적용하려는 정부 움직임과 출입관리대장 성격의 어플 개발 도입에 부정적인 견해를 보였다. 학교 이외에 또 다른 관리 사각지대인 개인 사설 3D 프린팅 학원에 대한 정부의 관리가 필요하다고 제안하였다.

다) 인터뷰의 주요 결과

현재와는 달리 과거에는 3D 프린터실이 별도로 없어 일반 교실에서 3D 프린터를 함께 사용했다고 응답한 경우가 많았고, 같은 공간에서 3D 프린터와는 관계없는 레이저 커팅기가 위치하여 레이저 커팅기로 인해 발생하는 연소물질에 노출되어 신체 이상 증상을 호소한 교사도 10명 중 2명이었다. 3D 프린터로 제작된 출력물 후 후처리작업에 의한 유해물질 노출은 우려하였으나 대다수 교사가 화학적 후처리는 하지 않았고, 단순히 사포질 등의 간단한 작업인 것으로 확인되었다. 3D 프린터 가동시간은 짧게는 몇 시간에서 길게는 몇 일간 지속적으로 가동하는 등 편차가 큰 것으로 확인되었고, 평소 균일하게 사용하기 보다는 시즌(학교축제, 대회 등)에 따라 집중적으로 사용하는 경우가 많았다. 한편, 장시간 소요되는 3D 프린팅의 경우 밤새 3D 프린터기를

돌리고 다음날 출력물을 떼어 가는데 밤새 실내에 축적된 오염 공기를 빼내는 환기 작업 없이 바로 출력물 상태를 보고 출력물을 떼어낸 뒤에 환기를 시키는 것으로 응답하였다. 소재는 모두 PLA(Polylactic acid)를 사용하는 것으로 응답하였고 작업환경 인터뷰에서는 교육부에서 실시하는 실내 공기질 측정을 일반 교실 뿐 아니라 3D 프린터 교실에 대한 측정이 필요하다는 것과 환기나 시설 확충에 예산 지원 요청이 있었다. 이 외 3D 프린터 안전인증이나 안전한 소재 개발이 필요하다는 의견 및 교사 직무 연수과정 내 3D 프린팅 안전 교육을 넣자는 제안도 있었다.

3. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성

“3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사” DB를 분석하여 노출정도와 연관 있는 3D 프린터 개방여부, 사용소재, 환기 형태, 설치공간 구분과의 유의성을 확인하고자 SPSS ver. 27을 이용하여 기술통계 및 교차분석(χ^2 -test)을 시행하였고 기대빈도가 낮아 교차분석 가정을 충족시키지 못하는 경우 피셔 정확 검정 (Fisher's exact test)을 시행하였다. 또한 신체영향 경험 여부에 따른 보유대수, 필라멘트 사용량, 가동시간, 상주시간에 대해 비모수 t-test(Wilcoxon rank sum test) 분석을 시행하였고다.

〈표 III-36〉 신체영향 경험 증상(복수응답)

신체영향 경험 교육기관 : 274개교

신체이상경험		개교	명수
증상	호흡기자극	161	219
	잡은재채기	94	119
	눈자극	121	198
	피부자극	72	126
	알레르기	18	27
	두통	152	603
	어지러움	42	65
	기타	17	29

실태조사는 3D 프린터 사용과 직접적인 관계가 있는 경우에만 작성토록 하였는데, 3D 프린터를 보유한 전체 5,742개교 중 274개교(4.8%)에서 신체 영향을 경험한 것으로 응답하였다. 교육기관에서는 호흡기자극 161개교, 두통 152개교, 눈자극 121개교 순으로 높았고, 소속된 인원에서 가장 많은 증상을 호소하는 것은 두통 603명, 호흡기자극 219명, 눈자극 198명, 피부자극 126명 순으로 나타났다. 기타에서는 증상 무 기입 외 육종암(1명), 유방암(1명), 혈액암(1명), 갑상선암(1명), 간유리음영(1명), 요통(2명), 이명증(2명), 꼬리뼈 통증(1명), 흉부통증(1명), 다리저림(2명), 목소리 이상(1명)으로 응답하였다.

〈표 III-37〉 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성(1)

신체이상경험		유(%)	무(%)	<i>p</i>	
전체 5,742개교(100%)		274(4.8)	5468(95.2)		
FDM보유	보유	232(84.7)	4851(88.7)	.051 [†]	
	미보유	42(15.3)	617(11.3)		
	밀폐형	유	184(67.2)	3736(68.3)	.690 [†]
		무	90(32.8)	1732(31.7)	
	개방형	유	149(54.4)	2225(40.7)	<.001 [†]
		무	125(45.6)	3243(59.3)	
	밀폐+개방	모두 보유	89(32.5)	968(17.7)	
		한 종류 보유	185(67.5)	4500(82.3)	
소재	PLA(Polylactic acid)사용	유	266(97.1)	<.001 [†]	
		무	8(2.9)		
	ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)사용	유	78(28.5)		790(14.4)
		무	196(71.5)		4678(85.6)
	PLA+ABS	모두 사용	72(26.3)		606(11.1)
		한 종류 사용	202(73.7)		4862(88.9)
환기	프린터기 자체 정화장치		24(8.8)	<.001 [†]	
	별도 국소배기장치		45(16.4)		
	자체정화+국소배기		23(8.4)		
	환기장치 없음		2(0.7)		
	무응답		2(0.7)		
	자연환기 및 전체환기		178(65)		
신체이상여부		274(100)	5468(100)		

† Fisher exact test

신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성(1)을 교차분석한 결과에서 FDM 형식, 소재, 환기형태 모두 통계적으로 유의하였다($p < .001$). FDM 방식에서 개방형 54.4%(149개교)에서 신체영향을 경험하였다고 응답하였고, 소재에서는 신체영향을 경험한 274개교 중에서 97.1%(266개교)가 PLA(Polylactic acid)를 사용한다고 응답하였다. 환기에서는 특별한 환기장치 없이 창문 등의 자연환기와 전체환기만 보유한 곳에서 신체영향 경험이 있는 곳이 65%(178개교)의 비율로 가장 높게 나타났다.

〈표 III-38〉 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성(2)

평균	신체이상경험유무별		<i>p</i>
	유	무	
3D 프린터 보유대수	9.4대	3.8대	<.0001
월평균 PLA(Polylactic acid) 사용량	5.0kg	1.5kg	
월평균 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 사용량	3.6kg	1.2kg	
월평균 가동시간	130.8(h)	31.3(h)	
월평균 상주시간	47.4(h)	11.8(h)	
공간분리 없는 학교	237개교	4,367개교	0.007
공간분리 있는 학교	37개교	1,100개교	

신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성(2)에서 t-test를 수행한 3D 프린터 보유대수와 사용량, 가동시간 및 상주시간 모두에서 통계적으로 유의(<.0001)하였고 공간분리 여부의 연관성 확인을 위해 실시한 카이제곱 검정 분석결과에서도 공간 구분 여부와 신체증상 여부 간에는 통계적으로 유의하였다(0.007).

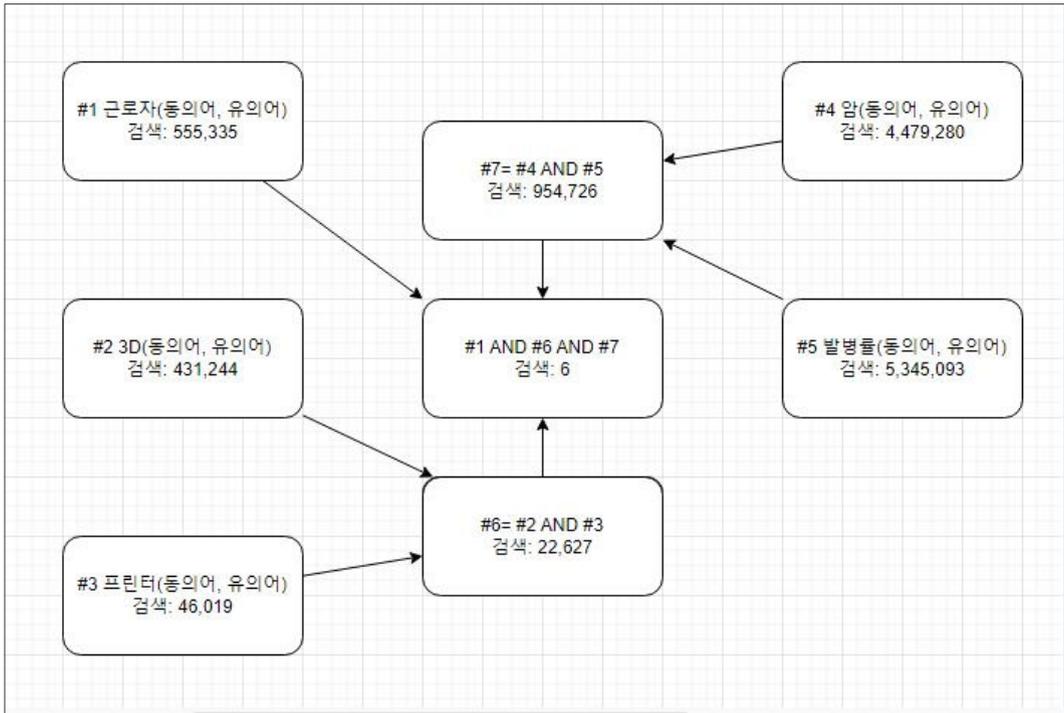
4. 건강영향사례 및 교육기관의 암발생률

1) 3D 프린터 관련 건강영향사례 조사

3D 프린터는 최근 보급되어 급격히 사용량이 증가된 새로운 직업적 유해 요인이다. 사회적 관심에 비하여 암 발생률을 포함한 건강 영향(암 발생)에 대한 조사는 부족한 상태로, 국내·외 문헌의 결과를 종합하여 이에 관련된 종합적 최신의 근거를 제공하고자 체계적 문헌고찰을 수행하였으며 코크란 연합(Cochrane Association)에서 제시한 매뉴얼을 따랐다. 2022년 10월 6일 국내 데이터베이스는 KoreaMed, 한국교육학술정보원(Research Information Sharing Service, RISS), 한국학술정보(Korean studies Information Service System, KISS)에서 ‘3D 프린터 OR 3D 프린팅 AND 근로자’의 키워드를 이용하여 문헌을 확인하였고, 국외 데이터 베이스는 Pubmed에서 ‘3D printing OR 3D printer AND worker’를 입력하여 간략 검색을 수행하였다, 간략검색의 문헌을 토대로 핵심질문(Population-Intervention-Comparison-Outcome, PICO)과 검색어를 정하였다. 간략 검색을 통해 결정된 핵심질문은 “3D 프린터 사용근로자는 암의 발생 위험이 증가하는가?” 이었다.

(1) 문헌 고찰

문헌검색은 전자데이터베이스를 이용하였으며, 주요 검색어는 “worker(s)”, “3D printer(s)”, “cancer(s)”로 이들의 동의어, 유의어들을 조합하여 검색하였다. 간략검색에서 국내 문헌은 확인되지 않았으므로 국내데이터베이스는 제외하였고, 국외 데이터베이스는 Pubmed로 언어는 영어로 제한하여 검색하였다.



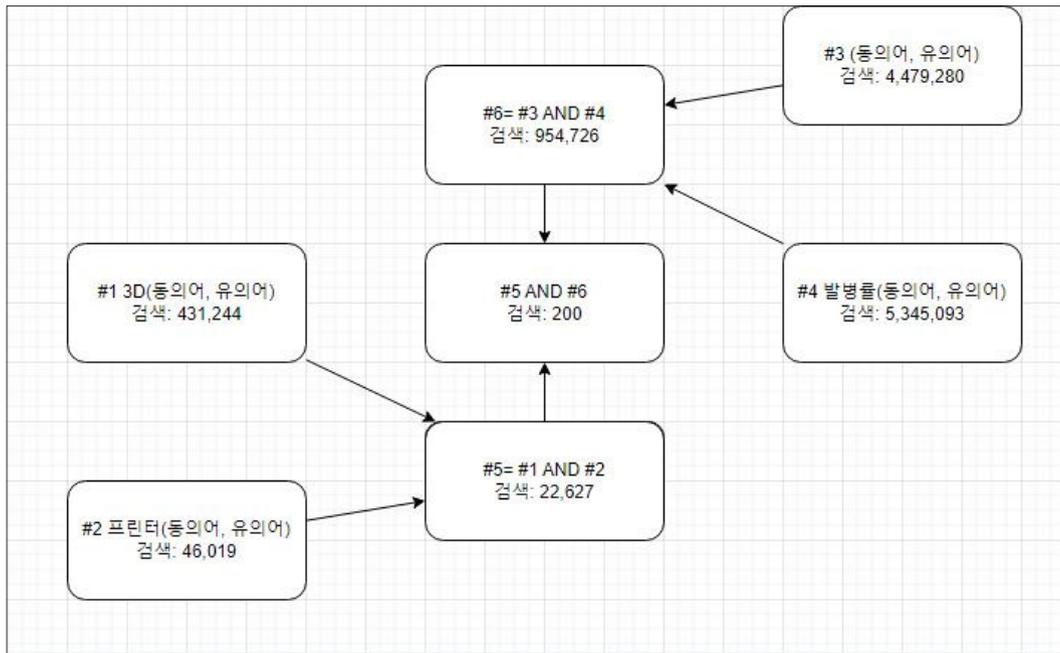
[그림 III-19] Pubmed 체계적 문헌고찰 검색의 flow chart 1

검색된 6개의 논문제목과 초록을 검토하였다. 그 중 1개의 연구가 레이저 또는 잉크젯의 고전적인 프린팅 방법에 따른 benzene, toluene, ethylbenzenem xylene 등의 BTEX 노출 농도를 통계적으로 추정하여, USEPA(2018)에서 제공된 방법론에 따라 암 위험도를 예측하여 보고 ROSTAMI, Roohollah, et al, 2021)하였으나, 3D 프린팅과 관련된 내용은 없었다. 나머지 5개의 논문들도 그림19에서 확인할 수 있듯이 암을 검사하거나 또는 치료하기 위한 3D 프린팅 기술을 다루는 논문들로 해당 핵심 질문에 대한 연관성이 없는 문헌들이었다.

<p><input type="checkbox"/> Exposure to BTEX concentration and the related health risk assessment in printing and copying centers.</p> <p>1 Cite: Rostami R, Fazizadeh M, Babaei-Pouya A, Abazari M, Rastgho L, Ghasemi R, Saranjam B. Environ Sci Pollut Res Int. 2021 Jun;28(24):31195-31206. doi: 10.1007/s11356-021-12873-2. Epub 2021 Feb 17. PMID: 33598835</p> <p>Share: The mean inhalation lifetime cancer risk (LTCR) value for benzene and ethylbenzene in the indoor air of the PCCs with Laserjet and Inkjet printers was 44.4 10(-6) and 153.3 10(-6), and 23.410(-6) and 54.2 10(-6), respectively, which were higher than EP ...</p> <p><input type="checkbox"/> Development and validation of a synthetic 3D-printed simulator for training in neuroendoscopic ventricular lesion removal.</p> <p>2 Cite: Lici M, Thieringer FM, Guzman R, Soleman J. Neurosurg Focus. 2020 Mar 1;48(3):E18. doi: 10.3171/2019.12.FOCUS19841. PMID: 32114554</p> <p>Share: The anatomical features were segmented, and several realistic 1:1 skull models with all relevant ventricular structures were fabricated by a 3D printer. Vascular structures and the choroid plexus were included. ...CONCLUSIONS: A low-cost, patient-specific, reusable ...</p> <p><input type="checkbox"/> Three-Dimensional Printing and Its Potential to Develop Sensors for Cancer with Improved Performance.</p> <p>3 Cite: Rocha Neto JBM, Soares JC, Longhitano GA, Coatrini-Soares A, Carvalho HF, Oliveira ON Jr, Beppu MM, da Silva JW. Biosensors (Basel). 2022 Aug 26;12(9):685. doi: 10.3390/bios12090685. PMID: 36140070 Free PMC article. Review.</p> <p>Share: Three-dimensional printing may offer the features to produce complex geometries in the design of high-precision, low-cost sensors. Three-dimensional printing, also known as additive manufacturing, allows for the production of sensitive, ...</p>	<p><input type="checkbox"/> Technical Note: Manufacturing of a realistic mouse phantom for dosimetry of radiobiology experiments.</p> <p>4 Cite: Espien N, Ayaqoub E, Bazalova-Carter M. Med Phys. 2019 Feb;46(2):1030-1036. doi: 10.1002/mp.13310. Epub 2019 Jan 21. PMID: 30488962</p> <p>Share: The resulting geometries were converted into a stereolithographic file format (STL) and sent to a multimaterial 3D printer. The phantom was split into two parts to allow for lung excavation and 3D-printed with an acrylic-like material and consisted of ...</p> <p><input type="checkbox"/> Experimental Multicenter and Multivendor Evaluation of the Performance of PET Radiomic Features Using 3-Dimensionally Printed Phantom Inserts.</p> <p>5 Cite: Pfähler E, van Sluis J, Merema BBJ, van Ooijen P, Berendsen RCM, van Velden FHP, Boellaard R. J Nucl Med. 2020 Mar;61(3):469-476. doi: 10.2967/jnumed.119.229724. Epub 2019 Aug 16. PMID: 31420497 Free PMC article.</p> <p>Share: To investigate the impact of harmonized image reconstructions on feature consistency, a multicenter phantom study was performed using 3-dimensionally printed phantom inserts reflecting realistic tumor shapes and heterogeneity uptakes. Methods: Tumors e ...</p> <p><input type="checkbox"/> Feasibility, Acceptability, and Behavioral Outcomes from a Technology-enhanced Behavioral Change Intervention (Prostate 8): A Pilot Randomized Controlled Trial in Men with Prostate Cancer.</p> <p>6 Cite: Kenfield SA, Van Blarigan EL, Ameli N, Lavaki E, Cedars B, Paciorek AT, Monroy C, Tatum LK, Newton RU, Signorell C, Suh JH, Zhang L, Cooperberg MR, Carroll PR, Chan JM. Eur Urol. 2019 Jun;75(6):950-958. doi: 10.1016/j.eururo.2018.12.040. Epub 2019 Jan 10. PMID: 30638635 Clinical Trial.</p> <p>Share: OBJECTIVE: To determine the feasibility and acceptability of a digital lifestyle intervention among men with prostate cancer. DESIGN, SETTING, AND PARTICIPANTS: A 12-wk pilot randomized controlled trial among 76 men with clinical stage T1-T3a prostate canc ...</p>
--	--

[그림 III-20] Pubmed 최종 검색 List

이에 검색된 문헌의 범주를 넓히고자 Pubmed 데이터베이스에서 검색어로 지정하였던 연구대상자의 제시어 “worker(s)”와 그 동의어, 유의어들을 제거하여 연구대상자에 제한을 두지 않은 상태로 데이터베이스를 재검색하였다.



[그림 III-21] Pubmed 체계적 문헌고찰 검색의 flow chart 2

제시된 검색어를 통해 검색된 200개의 문헌들을 논문제목과 초록을 기준으로 검토하였다. 200개의 문헌 중에서 해당 질문에 연관성이 있는 무작위배정 비교임상시험연구에 대한 체계적 문헌고찰, 비 무작위배정 비교임상시험 연구, 전향적 코호트 연구 등은 존재하지 않았다.

검색된 200개의 논문 중에서 3개의 논문을 제외하고는 핵심 질문과의 연관성이 존재하는 연구는 없었다. 3개의 논문 중에서 1편은 앞에서 설명한 고전적인 프린팅 업종에서의 BTEX 노출에 따른 건강 위험을 보고한 리서치 논문이었으며, 다른 1편은 한국에서 3명의 교사에게 발병한 육종을 보고한 의학 사례보고(JOO Min Wook et al., 2022)였고, 나머지 1편은 3D 프린터로부터 방출되는 Ultrafine Particles와 VOCs의 특징에 대해 보고한 논문(BERNATIKOVA et al., 2021)이었다. 이 논문은 3D 프린터로부터 방출되는 Ultrafine Particles와 VOCs의 특징에 대해 보고한 것으로, PETG와 NGEN 필라멘트를 사용한 3D 프린터(ORIGINAL PRAUSAi3 MK2 printer)에서

발생하는 UFPs와 VOCs를 가스크래마토그래피-매스스펙트로메트리를 이용하여 각각의 입자 농도와 노출 가능 화학 물질을 분석하였다. 분석 결과에서 ethylbenzene, toluene과 xylene의 농도는 매우 낮게(very low) 측정되었으나 좀 더 정확한 정량적 평가가 필요하며, 이러한 물질들이 잠재적인 암 발생의 위험인자가 될 수 있다고 보고하였다.

따라서, 3D 프린터와 건강영향사례에서 암 발병과 관련 있는 논문은 한국에서 3명의 교사에게 발병한 의학 사례보고 1건으로 확인되었다. 이 의학 사례는 3D 프린터를 사용한 3명의 교사에게 각각 발생한 육종인 Ewing's sarcoma, Well-differentiated liposarcoma, Malignant peripheral nerve sheath tumor(MPNST)로 앞의 두 케이스가 한 학교에서 잇달아 발생하여 이에 대한 의구심을 제기한 연구였다. 3D 프린터의 필라멘트에 따라 노출 가능한 발암 물질(ex. formaldehyde, 1,3-butadiene 등)과 발암 가능 물질(ex. ethylbenzene, styrene 등)을 제시하였으며, 최근 연구를 인용하여 “3D 프린터 사용에 따라 만 명당 약 4.45명에서 암이 발생한다.”고 언급하였다. 인용된 최근 연구는 [Letter to Editor] 형식의 article로(JOOB et al., 2017) 이를 살펴보면 개인이 전생애 걸쳐 암이 생길 위험성은 “concentration of contaminated particle in atmospheric air × lifetime unit risk factor”라고 보고하였다. 3D 프린터의 사용에 따라 환경적 오염 대기의 UFPs 평균 농도보다 약 3.44배 UFPs(Ultrafine Particles)의 노출이 가능하다고 언급하였으며, 이를 활용하여 환경적 오염 대기에 의해 발생된 암으로부터 3D 프린터를 사용한 환경에서의 암 발생을 추정한 article이었다.

(2) 문헌 고찰의 한계

체계적 문헌고찰은 기존 연구들의 결과를 종합하여 요약한 결과를 제시하면서 비뚤림을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 ‘3D 프린터 사용에 따른 건강영향(암 발생)’에 대하여 수행한 Pubmed에서의 체계적 문헌고찰은 핵심 질문에 대한 적격 연구가 거의 존재하지 않아 추가적인 양적, 질적 연구

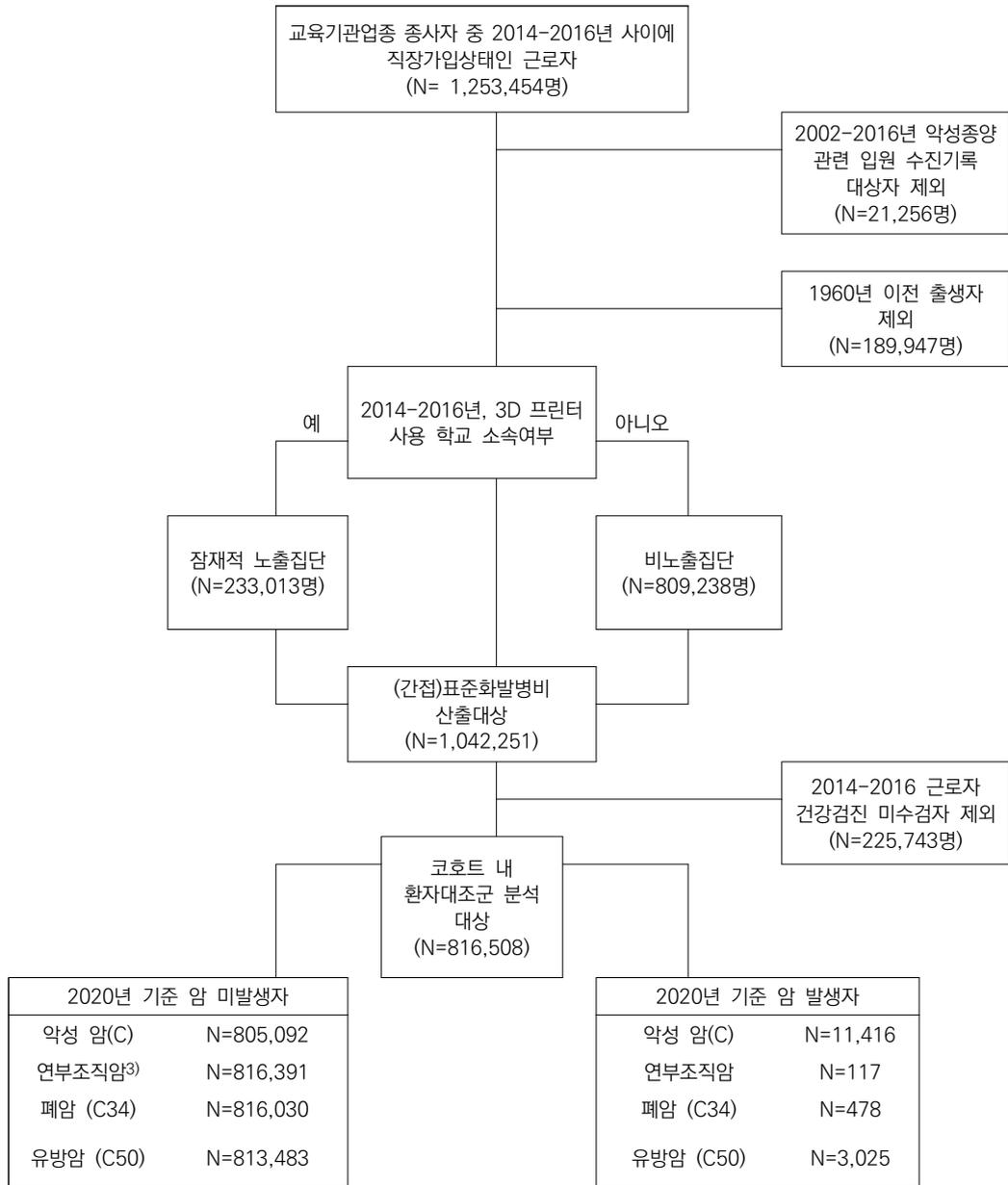
의 합성을 수행할 수 없었다.

핵심 질문에 대해 고찰이 가능한 연구도 환자 사례 보고 수준 1건이었고 이 사례보고도 특정 물질의 노출에 따른 암 발생의 위험도가 노출 농도에 따라 선형적으로 비례하여 증가하는지에 대한 근거는 제시되지 않았다. 단순히 환경적 오염대기의 수준에서 암환자 발생수를 기반으로 UFPs 농도가 몇 배가 되었다고 해서 산술적으로 그 만큼의 증가를 추정할 수 있는지에 대한 근거도 역학적으로 제공되지 않았다.

2) 교육기관의 암 발생률

대상자등록 조건은 국민건강보험자료에 등록된 교육기관업종²⁾ 소속 종사자 중 2014~2016년 사이에 국민건강보험가입자 구분이 직장가입상태인 근로자로 모집한 결과 등록대상자 규모는 1,253,454명이었다. 이 중 한 번이라도 악성종양(C)을 주소로 입원이력이 있는 대상자 21,256명을 제외하였고, 1960년생 이전 출생자 189,947명을 분석대상에서 제외하였다. 최종 분석에 포함된 대상자 규모는 1,042,251명으로 이중 2014~2016년 사이에 한번이라도 3D프린터를 사용한다고 보고된 학교 (5,742개 학교)를 거친 근로자는 233,013명으로 학교 내 3D 프린터사용에 따른 잠재적 노출집단으로 정의하였다. 한편, 이를 제외한 나머지 교육기관 소속 근로자의 경우 비노출집단(N=809,238)으로 정의하여 분류하였다.

2) 초등, 중등(일반, 기술 및 직업), 고등학교 및 교육기관 및 특수학교



〈표 III-39〉 대상자 상세 등록 조건

3) 입원 주상병 질병분류기호가 C47(말초신경 및 자율신경계통의 악성신생물), C48(후복막 및 복막의 악성신생물), C49(결합조직 및 연조직의 악성 신생물)

(1) 표준화발병비(Standardized Incidence Ratio)

고형암은 잠복기가 10년 이상으로(Fraser, 2011) 알려져 있으나 2014년부터 3D 프린터를 사용하는 교사집단에서 이미 암이 발생하였고, 특히 육종암 같은 희귀암이 한 학교에서 2명이 발생하여 3D 프린터와의 연관성에 의구심이 있었다. 따라서, 건강보험자료를 이용하여 3D 프린터를 사용하는 교사 집단과 사용하지 않는 교사 집단 간의 암발병비를 비교하고자 간접표준화방법을 시행코자하였다. 이때 사용하는 간접 표준화발병비(Standardized Incidence Ratio)는 예상 발생자 수를 계산하는 방법으로 3D 프린터를 사용하는 교육기관에 소속된 집단과 속하지 않는 교육기관의 집단에 비해 높은지, 낮은지를 판단하기 위한 것이었다. 또한 간접표준화방법은 연구 집단의 가중치를 사용하여 참조집단의 계층별 추정치의 가중 평균을 계산하며, 연구 모집단이 작거나 불안정한 경우에도 적용가능하다. 하지만 3D 프린터를 사용하는 교육기관 5,742개교 중 3D 프린터를 사용하는 교사에 대한 개인정보를 교육부에서 개인정보동의를 이유로 제출하기를 거부하여, 3D 프린터를 사용하는 교육기관 명단을 건강보험공단에 제출하여 역으로 교육기관에 소속된 대상자를 확인 할 수 있었다.

다만, 개별역학조사에서 확인된 근무력에서 3D 프린터가 도입된 2014년~2016년까지 3D 프린터가 가장 활발히 사용되었으며, 이 기간 동안 3D 프린터를 사용한 교사 3명에게서 2020년 암이 발생하였다는 것을 개별역학조사 의뢰서를 통해 확인하였다. 따라서 고형암의 잠재기를 고려하여 2014년~2016년까지 3D 프린터를 사용한 교육기관에 한 번이라도 소속되었던 대상자들을 잠재적 노출집단으로 선정하였는데 이는 3D 프린터를 사용했던 당시 교사집단이 포함된 것이었다. 또한 2014년~2016년까지 3D 프린터를 사용한 교육기관에 소속되지 않았던 대상자들은 대조군인 비노출집단으로 선정하여 두 집단 간의 (간접)표준화발병비(SIR) 확인을 위해 분석하였다. 암은 전체암과 개별역학조사의 사례에서 확인된 연부조직종양(유령씨육종, MPNST 포함), 폐암, 유방암에 대해 분석하였으나 모두에서 유의미한 차이는 없었다

(SIR<1>). 각 암 종류에 따라 성별, 연령대별 표준화발병비는 부록에 제시하였다 (부록 1).

〈표 III-40〉 표준화발병비(Standardized Incidence Ratio) 결과

질병	전체,성별	SIR	95% CI	암발생(건)
전체암	전체	0.995	0.961-1.030	3,196
	남성	0.931	0.870-0.995	867
	여성	1.022	0.981-1.064	2,329
연부조직암	전체	0.818	0.543-1.182	28
	남성	0.857	0.443-1.497	12
	여성	0.791	0.452-1.284	16
폐암	전체	0.858	0.716-1.019	129
	남성	0.744	0.560-0.968	55
	여성	0.968	0.760-1.215	74
유방암	여성	0.990	0.922-1.061	789

(2)오즈비(odds ratio)

환자-대조군 연구(Case-Control Study)설계는 노출요인과 특정 질병발생과의 관련성을 연구하기 위해 질병을 가지고 있는 집단(환자군)을 선정하고, 비교를 위해 질병을 가지고 있지 않은 집단(대조군)을 선정해야 한다. 또한 환자군 내 노출군과 비노출군의 분포를 조사하고 대조군 내에서도 역시 노출군과 비노출군의 분포를 조사한다. 환자-대조군 연구의 가장 큰 특징은 질병이 있는 사람들(환자군)을 선정하여 질병이 없는 집단(대조군)과 비교하는 것이다. 이때 연관성을 측정하는 방법인 오즈비(odds ratio)를 사용하는데, 이는 환자군이 과거의 위험요인에 노출되었을 오즈는 얼마인가? 로 노출과 질병사이 관련성이 없다면 오즈비는 1일 될 것이고, 양의 관련성이 있다면 오즈비가 1보다 크고, 음의 관련성이 있다면 오즈비는 1보다 작게 된다(역학, 2009).

또한 결과에 영향을 미치는 교란문제를 해결하기 위해 혼란변수(음주, 비만, 흡연, 나이)를 통제하였다.

2014년부터 2016년까지 3D 프린터를 사용한 교육기관에 소속된 집단과 소속되지 않은 집단에서 환자군과 대조군을 선정하고 노출, 비노출 여부를 반영하여 3D 프린터 사용과 환자군 사이에 연관성이 있는지를 확인코자 하였으며, 질병은 전체암, 연부조직종양(유잉씨육종, MPNST 포함), 폐암, 유방암으로 나누어 성별과 생년 80년 이전, 이후로 층화하여 오즈비를 확인하였다. 하지만 오즈비 결과에서도 3D 프린터 사용 집단과 암 발병과의 연관성은 통계적으로 유의하지 않았다(95% CI, 1포함).

〈표 III-41〉 오즈비(odds ratio) 결과

질병	년생	성별	OR	95% CI	P-value
전체암	80년 이전	남	0.948	0.868-1.037	0.242
		여	1.027	0.972-1.086	0.340
	80년 이후	남	0.921	0.698-1.215	0.560
		여	1.102	0.977-1.243	0.115
연부조직암	80년 이전	남	0.605	0.262-1.399	0.240
		여	1.050	0.587-1.879	0.870
	80년 이후	남	2.633	0.655-10.581	0.173
		여	0.301	0.039-2.321	0.249
폐암	80년 이전	남	0.796	0.568-1.115	0.185
		여	0.990	0.750-1.307	0.943
	80년 이후	남	0.903	0.105-7.779	0.926
		여	2.012	0.740-5.469	0.171
유방암	80년 이전	여	0.981	0.897-1.074	0.682
	80년 이후	여	1.152	0.891-1.488	0.280

IV. 결론 및 제언



IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 3D 프린터를 사용했던 교사에게 여러 암이 발병하였다는 언론보도 이후 사업장이 아닌 교육기관에서의 3D 프린터 노출평가 및 안전보건관리에 대한 필요성이 대두하였고, 인사혁신처에서도 이례적으로 교사에 대한 개별역학조사 3건을 의뢰하였다. 또한 교사들에 대한 3D 프린터 발암물질 언론보도 이후 3D 프린터 사용 교육기관에서는 불안감으로 인해 위축된 분위기가 형성되었고, 실제 교육현장에서도 언론보도 이후 3D 프린터를 활용한 방과 후 수업 및 동아리 활동을 없앴 경우도 확인되었다. 또 역학조사 과정에서 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서의 발암물질 노출에 대한 명확한 자료 및 과학적 근거가 필요하여, 교육현장에서 사용하는 3D 프린터를 대상으로 소재에서 발생하는 발암물질 및 나노입자에 대한 노출정도와 건강영향(암 발생)에 대해 조사하였다.

(1) 3D 프린터를 보유한 교육기관의 사용실태 조사

3D 프린터를 보유한 교육기관의 사용실태를 알아보기 위해 인사혁신처를 통해 2020년 3D 프린터 실태조사에 관한 DB를 재분석하여 정리하였다. 조사대상 학교 전체 10,816개교 중 53.2%(5,742개교)에서 23,553개의 3D 프린터를 보유하고 있었다. 또 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 재료압출방식(ME, Material Extrusion)의 하나인 FDM(Fused deposition modeling)방식이 5,083개교(88.5%)에서 사용 중이었다. 사용소재는 PLA(Polylactic acid)가 90.4%(5,192개교), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)가 15.1%(868개교)에서 사용 중이고 PLA와 ABS를 모두 사용하는 기관은 11.8%(678개교)로 분포하였다. 신체이상을 경험한 자가 소속된 교육기관은 4.8%(274개교)로 분포하였다. 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 3D 프린터실 월 평균 상주시간은 1시간~10시간미만이 41.8%(2,402개교)로

하루 평균 1시간이 안 되는 기관이 가장 많았고, 월 1시간도 안 들어가는 경우가 39.9%(2,291개교)로 대부분에서 월 20시간미만, 즉 하루 1시간도 안 되는 기관이 전체 81.7%를 차지하였다. 환기형태는 별도의 자체정화장치나 국소배기장치 없이 창문 등 전체환기만 있는 경우가 79.8%(4,580개교)이었고 창문을 포함한 환기장치가 아예 없는 경우가 0.9%(51개교)로 나타났다.

(2) 교육현장과 유사한 실험 환경과 실제 교육현장에서의 작업환경측정

- ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)와 PLA(Polylactic acid) 필라멘트를 이용한 3D 프린터의 출력물이 바람과 온도 등에 매우 예민하여 3D 프린터와 발암 관련성이 언론보도로 이슈화되기 전까지는 창문 및 문을 닫은 상태에서 3D 프린터를 교육현장에서 사용하였다. 따라서 사무실 형식의 실험실 내에서 창문 및 문을 닫은 상태에서 3D프린터 1대를 가동하여 실험 측정하였는데 ABS와 PLA 소재에서 노출가능한 발암물질인 아크릴로니트릴, 스티렌, 1,3-부타디엔, 포름알데히드, 에틸벤젠, 염화비닐을 측정한 결과 포름알데히드가 검출한계 미만이나 0.002ppm, 0.003ppm 수준으로 낮게 측정되었고 나머지 물질은 모두 검출한계 미만으로 확인되었다. 나노입자(10~420nm)는 ABS와 PLA 각 소재별 3회씩을 측정한 결과 같은 소재임에도 측정 시 마다 입자 수 농도에 차이가 있었으나 3D 프린터 작동 전에 비해 작동 중에서 모두 일관적이며 높게 나타났다. 또한 모든 측정결과에서 100nm(0.1 μ m)미만의 나노입자에서 농도가 높은 것을 확인하였다. 즉, 환기가 불충분한(창문 및 문 닫힘) 곳에서 3D 프린터 1대를 가동한 본 연구의 실험결과에서는 유기화합물인 발암물질의 경우 검출한계미만 수준으로 노출정도가 낮았으나 직독식 측정기를 통해 외기에서는 측정되지 않았던 포름알데히드가 실험실 내에서는 극미량 노출이 확인되기도 하였다. 또 나노입자는 환기가 불충분할 경우 1대의 프린터에서도 농도가 높아지는 것을 확인하였다. 하지만, 이번 실험이 전국에 유통되는 모든 필라멘트를 실험한 결과가 아니었다는 한계점이 있었다.

- 실제교육현장에서는 현재의 환경에서 발암성 노출 확인을 위해 측정하였

다. 현재는 3D 프린터가 이슈화 된 이후 공기정화장치 및 국소배기장치가 도입된 곳도 있었고, 상대적으로 덜 유해하다고 알려진 PLA(Polylactic acid) 만을 사용하였으며 과거에 비해 환기가 잘 되고 있었다. 10개 학교에서 3D 프린터를 사용하는 곳을 모두 측정하였고 대조군으로 3개 학교에서는 외기를 측정하기도 하였다. 3D 프린터 근접 측정결과 포름알데히드 12개 시료의 범위가 검출한계미만에서 최대 0.0474 ppm으로 나타났고, 평균값은 0.0191 ppm (기하평균 0.0159 ppm), 최대측정값 0.0474 ppm으로 고용노동부 노출기준 0.3 ppm에 비해 노출정도는 6.37%와 15.8% 수준으로 낮았다. 그 외 물질인 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌은 고용노동부 노출기준에 비해 0.01% 보다도 낮은 수준이었고, 염화비닐과 1,3-부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다. 외기를 비교한 C학교에서는 창문을 개방하였을 때와 닫았을 때를 비교하였고 A학교와 E학교에서는 외기에서의 측정과 3D 프린터 실 내 측정을 동시 측정하였다. 측정결과는 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌은 측정량이 워낙 미량이라 외기와의 차이를 확인 할 수 없었고, 포름알데히드는 외기를 측정한 학교 3곳을 비교하였을 때 외기에 비해 일관적이게 미량 높아지는 것과 1대의 측정결과 보다 대수가 많거나 시간이 긴 학교가 포름알데히드가 미량 더 높아지는 것을 확인하였으나 여전히 노출정도는 매우 낮았다. 또한 나노입자의 경우 환풍기의 가동유무와 관계없이 외기에 의한 영향이 큰 것으로 나타났고 인근대기측정망 미세먼지(PM2.5)농도와 유사한 경향을 보였다. 하지만 C학교와 F학교에서 창문 및 환풍기를 가동하였을 때와 가동하지 않았을 때 및 국소배기장치를 끄고 부스를 열었을 때(환기불충분)와 국소배기장치를 켜고 부스를 닫고 측정한 결과(환기충분)에서 환기가 불충분할 경우 나노입자는 확실히 증가하는 것을 확인하였다. 또 기존 문헌(Zontek 등(2019), Patrick Steinle(2016년))에서 3D 프린터 가동 시 본 연구와 유사한 프로토콜로 수행되어 학교현장의 환기상태가 유사한 곳인 C학교와의 나노입자 수를 비교하였는데 논문에 비해 학교현장에서 약 2배 더 높은 경향을 보였다. 이는 환경이 유사하지만 3D 프린터 대수가 논문에 비해 현장에서는 22대로 3D 프린터가 많아 개수의

차이에 따라 나노입자 발생이 높아지는 것으로 파악되었고, 이는 교육부 재분석 결과에서도 3D 프린터 가동대수와 신체영향 유무는 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다($p < .001$).

따라서, 환기가 불충분한(창문 및 문 닫힘) 좁은 공간에서 출처가 불분명한 필라멘트를 사용하거나 여러 대의 3D 프린터를 가동할 경우 포름알데히드가 미량 증가 할 수 있고 나노입자의 발생은 더 높아질 수 있는 것으로 나타났다.

(3) 신체영향 경험 유무에 따른 사용실태 특성 분석

교육부의 “3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사“ DB 분석을 통해 3D 프린터 개방여부와 사용소재, 환기 형태와 신체영향 경험의 유의성을 확인하였다. 신체영향 경험 증상에서는 3D 프린터를 보유한 전체 5,724개교 중 274개교 (4.8%)에서 신체영향을 경험한 것으로 응답하였다. 교육기관에서는 호흡기 자극 161개교, 두통 152개교 순으로 높았고, 소속된 인원에서 가장 많은 증상을 호소하는 것은 두통 603명, 호흡기 자극 219명, 눈자극 198명 순으로 나타났다. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성을 교차분석한 결과에서 FDM형식, 소재, 환기형태 모두 통계적으로 유의하였다($p < .001$). 특히 특별한 환기장치 없이 창문 등의 자연환기와 전체환기만 보유한 곳에서 신체영향 경험이 있는 곳이 65%(178개교)의 비율로 가장 높게 나타났다. 또한 t-test를 수행한 3D 프린터 보유대수와 사용량, 가동시간 및 상주시간 모두에서도 통계적으로 유의($p < .0001$)하였고 공간분리 여부의 연관성 확인을 위해 실시한 카이제곱 분석결과에서도 공간 구분 여부와 신체증상 여부 간에는 통계적으로 유의하였다($p = 0.007$).

(4) 3D 프린터 건강영향사례 조사 및 암 발생률

3D 프린터는 최근 보급되어 급격히 사용량이 증가된 새로운 직업적 유해요인이다. 하지만 사회적 관심에 비하여 암 발생률을 포함한 건강 영향(암 발

생)에 대한 조사는 부족한 상태로, 국내·외 문헌의 결과를 종합하여 이에 관련된 종합적 최신의 근거를 제공하고자 체계적 문헌고찰을 수행하였다. 핵심질문은 “3D 프린터 사용자는 암의 발생 위험이 증가하는가?” 이었는데 관련된 논문 200개를 검토한 결과 3D 프린터와 암 발병과 관련 있는 논문은 한국에서 3명의 교사에게 발병한 의학 사례보고 1건이었다. 이 의학사례는 3D 프린터를 사용한 3명의 교사에게 각각 발생한 육종인 Ewing’s sarcoma, Well-differentiated liposarcoma, Malignant peripheral nerve sheath tumor(MPNST)로 앞의 두 케이스가 한 학교에서 잇달아 발생하여 이에 대한 의구심을 제기한 연구였다. 또 3D 프린터 사용실태조사와 유사하게 3D 프린터 환경에서의 유해물질 측정 결과가 포함된 위의 연구들에서도 노출 농도는 매우 낮았다. 또한 화학물질의 노출과 암 발생 사이에는 일반적으로 용량반응관계가 있으며, 반응의 최소값을 역치(threshold, 임계 값)라고 지칭한다. 한 분자의 발암물질에 의해서 세포내에 종양발생변화가 생긴다고 가정하더라도, 특정 용량 이하의 노출에서는 그 발암물질 분자가 표적세포에 도달할 가능성이 매우 낮다(김수근, 2014). 하지만, 2014년부터 3D 프린터를 사용하는 교사집단에서 이미 암이 발생하였고 특히 육종암 같은 희귀암이 한 학교에서 2명이 발생하여 3D 프린터와의 연관성에 의구심이 있었다. 따라서 3D 프린터를 사용한 교사들과 전체교사집단의 암 발생률을 비교하기 위해 건강보험공단 자료로 분석하고자 하였으나 교육부의 개인정보동의를 이유로 3D 프린터 사용 교사에 대한 개인정보를 확보하지 못 하였다. 다만 교육기관에서 특별한 환경변화 없이 2014년에 3D 프린터가 도입되었고 개별역학조사 의뢰서에서 3D 프린터를 2014년부터 사용했던 교사 3명에게서 2020년 암이 발생하였다는 것이 확인되어 2014년~2016년까지 3D 프린터를 사용하는 교육기관에 소속되었던 집단과 소속되지 않았던 집단 간의 전체암, 연부조직종양(유형씨육종, MPNST 포함), 폐암, 유방암에 대한 표준화별병비(SIR)를 확인하였으나 두 집단 간 모두에서 유의미한 차이는 없었다(SIR<1). 추가적으로 환자-대조군 연구(Case-Control Study) 연구 설계를 통해 환자군 내 노출군과 비 노출군조사와 비 환자군 내

노출군과 비 노출군도 조사하여 연관성 측정방법인 오즈비(Odds Ratio)를 확인하였다. 교란문제를 해결하기 위해 혼란변수(음주, 비만, 흡연, 나이)를 보정하였고 질병은 전체암, 연부조직종양(유방암, MPNST 포함), 폐암, 유방암으로 나누어 성별, 생년(80년 이전, 이후)로 층화하여 오즈비를 확인하였으나 유의성은 없었다(95% CI, 1포함). 이는 노출집단 및 환자군에 3D 프린터를 사용했던 당시의 교사집단이 포함된 것임에도 불구하고 3D 프린터를 사용했던 교육기관에 소속된 대상자와 소속되지 않은 대상자간의 암 발병비에 차이가 없는 것으로 현재는 확인된 결과였다.

또, 이번 연구를 통해 3D 프린터를 현재의 학교 환경에서 사용할 경우 유기화합물인 발암물질 노출은 우려할 수준이 아니었다. 다만 좁은 환경에서 환기가 불충분할(창문 및 문 닫힘) 경우 여러 대의 환풍기를 가동하거나 배기장치가 가동되는 등의 환기가 충분한 곳에 비해 미량의 포름알데히드가 발생할 수 있고 나노입자도 환기가 불충분한 곳에서 작동 전에 비해 작동 중에서 높아지는 것을 확인하였다. 또한, 지금의 교육기관은 창문개방 및 환기팬, 국소배기장치, 공기정화장치 등을 이용하여 환기가 이뤄지는 상태에서 3D 프린터를 사용하기 위해 노력하고 있었고, 상대적으로 덜 유해하다고 알려진 PLA(Polylactic acid)만 사용하고 있어 현재의 교육기관과 과거의 교육기관에서의 환경은 많이 달라진 것으로 파악되었다. 또 3D 프린터를 사용한 같은 학교 교사 2명이 육종암 같은 희귀암이 발생하여 3D 프린터를 사용한 교사와 암 발생과의 연관성을 확인하고자 하였으나 현재의 환경에서는 유기화합물인 발암물질의 노출이 미량으로 매우 낮았고 이는 환기가 불충분한(창문 및 문 닫힘) 실험실 환경에서도 마찬가지였다. 다만, 실험 환경에서는 1대의 3D 프린터만을 사용하였고 현재의 학교 환경에서는 상대적으로 체적이 크고 기본적인 환기가 되는 곳이라, 환기가 불충분한 좁은 공간에서 여러 대의 3D 프린터를 동시에 가동하거나 소재의 종류 및 제조사에 따라 유기화합물인 발암물질이 발생할 가능성은 있다고 판단된다. 또한 나노입자의 경우 환기가 불충분할 경우 3D 프린터 가동 전에 비해 가동 중에서 일관적이게 높아지는 것을 실험환경과 현장측정에서 확인하였다. 또

나노입자보다도 큰 미세먼지(PM10, 10 μ m이하)는 세계보건기구(WHO)산하 국제암연구소(IARC)에서 1급 발암물질로 분류(Group1, 2016)되어 있고, 나노입자 중 100nm 이하에 해당하는 초미세입자(Ultra-fine particle)는 작은 크기의 입자들이 심폐영역이나 폐포의 심부영역까지 쉽게 이동할 수 있어 더욱 강한 독성을 나타낸다는 연구 결과(Brent Stephens et al., 2013)가 있었고 3D 프린터 발생 물질의 독성연구 중 인간 연구에서 염증유발(Gumperlein., 2018)과 호흡기 문제 발생(House., 2017/Chan., 2018)에 대한 연구도 있었다. 하지만 염증유발 및 호흡기 연관성 외 암과의 연관성 문헌은 부족하였으며 암 발생에 대한 명확한 인과관계도 현재까지는 확인하지 못 하였다. 이는 근본적으로 실험실 및 학교현장의 노출 측정 결과에서처럼 3D 프린터의 사용에 따라 노출되는 위험인자인 발암물질의 노출 농도가 노출기준에 비해 매우 낮기 때문일 수도 있으나, 그보다 근본적으로 3D 프린터가 비교적 최근에 도입된 직업적 요인으로서, 암 발생 수준을 연구하기 위해 보다 충분한 시간과 인구 조건이 추가적으로 필요하기 때문일 수 있다. 또한, 나노입자의 경우 불충분한(창문 및 문 닫힘) 환기 조건에서 3D 프린터 가동 시 일관적이며 발생이 된다. 이는 과거 교육기관에 3D 프린터가 처음 도입될 당시 좁은 환경에서 바람, 온도 등에 예민한 출력물의 상태를 위해 창문 및 문을 모두 닫아 환기가 불충분한 곳에서 사용하는 교육기관이 대다수였으므로 3D 프린터와 암 발생과 관련된 건강영향은 고형암의 잠재기가 10년 이상(Fraser, 2011)인 걸 감안하여 그 이후의 시점에서 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 지금의 학교 현장에서, 창문을 열고 환기팬 가동 및 공기정화 장치를 가동하는 등 환기가 충분한 곳에서는 나노입자가 외부 대기 미세먼지의 영향을 받아 외기수준의 농도가 유지되는 것을 확인하였다. 유기화합물인 발암물질 역시 외기 수준이거나 농도가 낮아지는 것을 확인하였고, 창문을 닫고 환기를 미가동 시키는 현재의 3D 프린터 교실 내부 및 실험환경에서도 유기화합물의 노출정도는 낮은 것으로 확인되었다. 하지만 창문 및 문을 닫은 환기가 불충분하고 좁은 공간에서는 여러 대의 3D 프린터 가동 시 포름알데히드

미량 증가 및 나노입자 농도가 높아질 수 있으므로 3D 프린터 사용 시 충분한 환기(창문, 환기팬, 배기장치, 공기정화장치 등 활용)와 정품 필라멘트 구매, 3D 프린터 실 상주시간 최소화, 보호마스크 의무착용은 필수적으로 필요하다. 또한 교사들의 심층인터뷰를 분석한 결과, 현장에서 꼭 필요한 것은 어렵고 이해하기도 힘든 물질안전보건자료(MSDS)비치나 보여주기 행정 및 안전보건교육이 아니라 3D 프린터를 안전하게 사용하기 위한 환기시설을 원하는 것으로 파악되었다. 따라서 3D 프린터 사용 시 현재의 조건에서는 유기화합물의 발암물질 노출 수준이 낮아 우려할 수준은 아니지만 환기가 불충분(창문 및 문 닫힘)할 경우 비의도적인 나노입자 발생과 미량의 포름알데히드 발생 가능성은 충분히 있고 창문을 모두 개방하고 환기팬 가동 및 국소배기장치 가동 등 환기가 충분할 경우에는 노출정도가 낮아지는 경향을 본 연구를 통해 확인하였다. 따라서 3D 프린터를 교육기관에서 계속 사용하려면 화학물질 노출원 감소를 위한 대체, 격리, 환기 3요소에 맞게 제조사 및 제조국을 알 수 없는 필라멘트는 사용하지 말고 정품 필라멘트만을 사용토록 한다. 또 배기장치가 설치된 부스 안에서 3D 프린터를 사용하도록 하거나 후드 및 배기장치를 필수로 설치하도록 하며, 필터가 내장되어 있는 밀폐형을 사용하도록 제언한다. 또 3D 프린터 예러 발생 시나 초기 가동 시 나노입자가 급격히 높아지는 경향이 확인되어 이때는 2022년 7월 19일 과학기술정보통신부에서 배포한 “삼차원 프린팅 안전이용지침(가이드라인)”에 따라 안면부 부과식, 분리식 방진마스크를 착용하거나 사용량이 많을 경우 방독마스크를 권장하고 있으므로 호흡용 보호마스크를 의무적으로 착용 후 3D 프린터실 내부에 들어가도록 한다. 또 마스크 필터 및 밀폐형 내장 필터는 충분히 비치하여 사용량과 시간 및 주기에 따라 교체해주도록 관리하여야 한다. 또한, 앞으로는 기본적으로 새로운 장비 도입 시 노출물질에 대해 미리 확인하고 교육기관 종사자들의 건강보호를 위해 노출물질에 대한 위험성 교육과 기본적인 보호구 준비, 환기가 충분히 이루어지는 환경을 조성하여 노출물질의 영향을 최소화할 수 있을 때 도입하기를 제언한다.

참고문헌

- 과학기술정보통신부. 삼차원프린팅 안전이용지침(가이드라인). 2022
- 권오훈. Control of particulate material emission during 3D Printing. 서울대학교 보건대학원 환경보건학과 석사학위 논문. 2016
- 김수근. 직업성 암 인정기준_발암물질의 역치. 2014
- 김유나. Characterization of Particulate Mather and Gaseous Material Emission at 3D Printer Operation. 서울대학교 보건대학원 환경보건학과 석사학위 논문. 2015
- 김부욱. 실 사무실 환경에서 3D 프린터 배출물질 정밀 측정. 근로복지공단 직업환경연구원
- 김성호. 정은교, 김세동. 3D 프린터 사용자에게 대한 초미세입자 노출평가. 산업 안전보건연구원. 2018
- 이성배. 실험동물을 이용한 3D 프린터 발생 독성물질에 대한 생체영향 연구 (I)-다중 발생장치 개발 중심으로-. 산업안전보건연구원. 2019.
- 이승한. 3D 프린터 작동 시 배출되는 가스상 물질과 입자상 물질 노출 특성 평가. 아주대학교 환경안전공학과 석사학위 논문. 2018
- 이장수. 3D 프린팅 작업현장에서 발생하는 유해물질 방출량 평가 및 저감방안 연구. 아주대학교 공학대학원 석사논문. 2018
- 박경훈. 보급형 3D 프린터 가동 시 소재에 따른 입자상 물질의 발생 특성. 가톨릭대학교 대학원 보건학과 박사학위 논문. 2020

- 미래창조과학부. 3D 프린팅 산업 발전 전략. The optical journal no.152, 48-65. 2014
- 정은교, 김성호. 3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성연구. 산업안전보건연구원. 2019
- 최치형. 설정 Parameter에 따른 3D 프린터 입자 발생 양상 측정. 한양대학교 대학원 기계공학과 석사학위 논문. 2016
- 한국역학회 율김(주). 역학(EPIDEMIOLOGY). ㈜이퍼블릭코리아. 2009
- Aika Davis, Marilyn Black, Qian Zhang, Jenny P.S.Wong, Rodeny Weber. Fine Particulate and Chemical Emissions from Consumer 3D printers. ASHRAE Annual Conference St.Louis, MO,USA. June 2016
- Aleksandr B. Stefaniak, Ryan F. LeBouf, Jinghai Yi, et al. Charaterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2017, volume 14, Issue 7, pages 540-550
- A. zitting, H. Savolainen, Effects of single and repeated exposures to thermo-oxidative degradation products of poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)) on rat lung, liver, kidney, and brain. Archivers of toxicology. 1980.
- Bernatikova S, Dudacek A, Prichystalova R, klecka V, Kocurkova L. Charaterization of ultrafine particles and VOCs emitted from a 3D printer. International journal of environmental research and public health. 2021 Jan;18(3):929

- Brent Stephens, Parham Azimi, Zeineb El Orch, et al. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment* 2013, volume 79, pages 334-339
- Byrley P, Wallace MA, Boyes WK, Rogers K. Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder. *Science of The Total Environment*. 2020 Sep 20;736:139604
- Boowook Kim, Jae Hoo Shin, Hoi Pin Kim, Mi Seong Jo et al. Assessment and Mitigation of Exposure of 3-D Printer Emissions. *Front Toxicol* 2022;3:917454
- Chan FL, House R, Kudla I, Lipszyc JC, Rajaram N, Tarlo SM. Health survey of employees regularly using 3D printers. *Occup Med (Chic Ill)*. 2018 May 17;68(3):211-4.
- Chung sik yoon, Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation. 2015.
- Davis AY, Zhang Q, Wong JP, Weber RJ, Black MS. Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers. *Building and Environment*. 2019 Aug 1;160:106209
- Evan L. Floyd, Jung Wang, James L. Fume emissions from a low cost 3-D printer with various filaments. *ournal of Occupational and Environmental Hygiene* 2017, vol 14, no 7, pages 523-533
- Eva Jacobsen et al. Risk assessment of 3D printers and 3D printed products. EPA, Denmark. 2017

- Gu J, Wensing M, Uhde E, Salthammer T. Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. *Environment international*. 2019 Feb 1;123:476-485
- Gümperlein I, Fischer E, Dietrich-Gümperlein G, Karrasch S, Nowak D, Jörres RA, et al. Acute health effects of desktop 3D printing (fused deposition modeling) using acrylonitrilebutadiene styrene and polylactic acid materials: An experimental exposure study in human volunteers. *Indoor Air*. 2018 Jul 1;28(4):611-23.
- House R, Rajaram N, Tarlo SM. Case report of asthma associated with 3D printing. *Occup Med (Chic Ill)*. 2017 Dec2;67(8):652-4.
- Joo, Min Wook, et al. Sarcomas in Techers Using Three-Dimensional Printer: A Report of Three Patients and Literature Review. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 2022, 14.2:310.
- JooB, Beuy; WIWANITKIT, Viroj. Estimation of Cancer Risk Due to Exposure to Airborne Particle Emission of a Commercial Three-dimensional Printer. *Indian journal of medical and paediatric oncology*, 2017, 38.03: 409-409.
- 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
- L.Stabile, M.Scungio, G.Buonanno, et al. Airbone particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature. *Indoor Air* 2017;27:398-408

- Luis Mendes et al. Characterization of Emissions from a Desktop 3D Printer. *Journal of Industrial Ecology* 2017, volume 21, Issue S1, pages S94-S106
- 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
- Nima Afshat-Mohajer et al. Characterization of particle matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *Building and Environment* 2015, volume 93, part2, pages 293-301
- Ohhun Kwon, Chungsik Yoon, Seunghon Ham, et al. Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D Printing. *Environ. Sci. Technol* 2017, 51, 10357-10368
- 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
- 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
- Parham Azimi, Torkan Fazli, Brent Stephens. Predicting 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
- 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
- ROSTAMI, Roohollah, et al. Exposure to BTEX concentration and the related health risk assessment in printing and copying centers. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28.24: 31195-31206.
- Samule Hartikainen. VOC and particle emissions from home and hobby 3D printers. *The 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor air 2016*
- Schaper et al. Respiratory response of mice exposed to thermal decomposition products from polymers heated at and above workPLA(Polylactic acid)ce processing temperatures. *American industrial Hygiene Association Journal*. 1994
- Shirin Mesbah Os Kui et al. Assessing and Reducing the Toxicity of 3D-Printed Parts. *Environmental Science&Technolohy*. 2016
- Stefaniak AB, Johnson AR, Du Preez S, Hammond DR, Wells JR, Ham JE, LeBouf RF, Menchaca KW, Martin Jr SB, Duling MG, Bowers LN. Evaluation of emissions and exposures at workpalces using desktop 3-dimensional printers. *Jounal of chemical health&safety*. 2019 Mar 1;26(2):19-30
- 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. *Building and Environment* 2016, 104, 311-319
- Youn JS, Seo JW, Han S, Jeon KJ. Characteristics of nanoparticle formation and hazardous air pollutants emitted by 3D printer operations: From emission to inhalation. *RSC advances*. 2019;9(34):19606-12
- Yu Zhou, Xiangri Kong, Ailu Chen, et al. Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room. *Science Direct Procedia Engineering* 2015, 121, 506-512
- Yuna Kim et al. Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation. *Environ. Sci. Technol* 2015, 49, 20, 12044-12053
- Zontek TL, Hollenbeck S, Jankovic J, Ogle BR. Modeling Particle Emissions from Three-Dimensional Printing with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Polymer Filament. *Environ Sci Technol*. 2019 Aug 20;53(16):9656-63.

Abstract

Study on the Use of 3D Printer and health Effects

Objectives :

In the domestic education field, 3D printers have been used in educational institutions since 2014 for creative education. However, after 6 to 7 years of use, there were media reports that 7 teachers who used 3D printers developed cancer in the education field. Although it has become a social issue, it is unclear whether the cause of the disease is caused by the use of 3D printers. FDM (Fused deposition modeling) type 3D printers, which are mostly used in educational institutions, melt filaments with heat and stack the output layer by layer on a laminated plate. During this process, the resin melts with heat, generating nanoparticles(nm) and generating various harmful substances such as organic compounds, which may cause health problems (Kim Seong-ho et al., 2018). However, studies on the use of 3D printers and health effects in educational institutions are lacking. In addition, after the media report, there is a feeling of anxiety at the training site for using 3D printers. Therefore, in this study, it is intended to be used as basic data for health protection management measures at school sites through the use of 3D printers and health impact surveys.

Method :

The original data results of the “3D printer Safety and health

Management Survey” by the Ministry of Education in 2020 were re-analyzed based on the survey conducted for teachers.

Measurements were taken to determine carcinogen and nanoparticle exposure in a laboratory environment. 10 school sites were also visited to measure the working environment. In-depth interviews were also conducted with 10 teachers. Based on the results of the fact-finding survey, the significance according to the presence or absence of health symptoms was reviewed. A systematic literature review was conducted to find the association between 3D printer use and cancer. The cancer incidence rate between the group with and without the teacher group using 3d printers was confirmed by SIR and OR.

Results :

(1) A survey on the use of 3D printers by educational institutions

Of the total 10,816 schools surveyed, 53.2% (5,742 schools) had 23,553 3D printers. The FDM (Fused deposition modeling) method, one of the most commonly used ME (Material Extrusion) methods in educational institutions using 3D printers, was being used in 5,083 schools (88.5%). As for the materials used, PLA (Polylactic acid) was 90.4% (5,192 schools) and ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) 15.1% (868 schools) were used the most. The number of educational institutions belonging to those who experienced physical abnormalities was 4.8% (274 schools). As for the type of ventilation, 79.8% (4,580 schools) had only total ventilation such as windows without any separate device. 0.9% (51 schools) had no ventilation system including windows.

(2) Experimental environment similar to the training site and measurement of the working environment in the actual training site

- The output of the 3D printer using filament is very sensitive to wind and temperature, so it was used with the window closed until the media report on the relationship between the 3D printer and carcinogenesis became an issue. Therefore, we closed the windows in the laboratory and measured acrylonitrile, styrene, 1,3-butadiene, formaldehyde, ethylbenzene, and vinyl chloride, which are carcinogens that can be exposed to ABS and PLA materials. Formaldehyde was measured at very low levels of 0.002ppm and 0.003ppm, below the detection limit, and all other substances were confirmed to be below the detection limit. As a result of measuring the nanoparticles (10~420nm) three times for each material of ABS and PLA, there was a difference in particle number concentration each time the measurement was made even though it was the same material. However, they all increased consistently during operation compared to before the 3D printer operation. In addition, it was confirmed that the concentration was high in nanoparticles of less than 100 nm (0.1 μm) in all measurement results.

- In the actual education field, it was measured to confirm carcinogenicity exposure in the current environment. Currently, since 3D printers became an issue, ventilation has been implemented by introducing air purifiers, installing ventilation fans, and opening windows. In addition, all 10 schools visited were using only PLA, which is known to be relatively less harmful. Compared to the past, the current environment has been confirmed to be much improved. In the case of organic compounds, which are carcinogens, they were measured mainly in places where 3D

printers were used in 10 schools. As a control, three schools were measured in the outdoor air. Vinyl chloride and 1,3-butadiene were found to be below the detection limit in all schools. The average value (arithmetic) for each factor measured in the vicinity of the school's 3D printer was 0.0191 ppm of formaldehyde (exposure standard: 0.3 ppm), benzene 0.0002 ppm (exposure standard: 0.5 ppm), ethylbenzene 0.001 ppm (exposure standard: 100 ppm), Styrene was 0.0003 ppm (exposure standard: 20 ppm). Benzene, ethylbenzene, and styrene had a low exposure level of 0.01% compared to the exposure standard of the Ministry of Employment and Labor. Formaldehyde was as low as 6.37% compared to the exposure standard. and compared to the results measured in the 3D printer room at the school where outdoor air was measured as a control group, the difference between benzene, ethylbenzene, and styrene was so small that it was not clear. However, formaldehyde tended to increase in small amounts, and ventilation was confirmed to be necessary. In the case of heavy metals, the degree of exposure was very low, below the detection limit in most samples. In the case of nanoparticles, it was confirmed that the effect of outdoor air through windows was significant. In some schools, the concentration increased depending on the usage environment or operating conditions. In one school operating open 3D printers (22 units), the average concentration increased by about 20% when ventilation was insufficient compared to when ventilation was sufficient. The initial concentration of 3D printer operation increased up to 4 times compared to the background. In addition, even in a school operating 8 open 3D printers, the average particle number concentration was 15,969 particles/cm³ when ventilation was insufficient. However, the concentration of nanoparticles was more

than twice as high as in the well-ventilated case where the local ventilation system was operated. The highest concentration was 34,208 particles/cm³, which was about 10 times higher than the indoor background concentration before the 3D printer started operating.

In other words, in the experiment of this study where one 3D printer was operated in a place with insufficient ventilation, and in the actual educational institution, the degree of exposure to carcinogens was very low. However, it was confirmed that if several 3D printers are operated in a place with insufficient ventilation, exposure to carcinogens may increase depending on the operating conditions and types of filaments, and the generation of nanoparticles may increase.

(3) Analysis of use condition characteristics according to the presence or absence of physical impact experience

Through the fact-finding analysis of the Ministry of Education, it was confirmed whether the 3D printer was opened, the material used, the type of ventilation, and the significance of the body effect experience. Regarding symptoms of experiencing physical effects, 274 schools (4.8%) out of a total of 5,724 schools with 3D printers responded that they experienced physical effects. As a result of statistical analysis of the characteristics of usage conditions according to the experience of physical impact, FDM type, material, ventilation type ($p < .001$), number of units owned, usage, operating time, residence time ($p < .0001$), whether or not space is divided (All were statistically significant at $p = 0.007$). In particular, 65% (178 schools) responded that they experienced physical effects in places with only windows and overall ventilation without special ventilation devices.

(4) 3D printer health effect case study and cancer incidence

3D printers are a new occupational hazard that has recently spread and rapidly increased usage. Compared to social interest, research on health effects(cancer incidence), including cancer incidence, is lacking. Therefore, a systematic literature review was conducted to provide comprehensive and up-to-date evidence by synthesizing the results of domestic and foreign literature. The key question is “Are 3D printer users at increased risk of cancer?” As a result of reviewing 200 related papers, the final paper related to 3D printers and cancer was one medical case report in 3 teachers in Korea. This medical case is Ewing's sarcoma, Well-differentiated liposarcoma, and Malignant peripheral nerve sheath tumor(MPNST), which are sarcomas that occurred in 3 teachers using 3D printers. It was a study. In addition, similar to the 3D printer usage survey, the exposure concentration was very low in the above studies that included the measurement results of hazardous substances in the 3D printer environment. In addition, there is generally a dose-response relationship between chemical exposure and cancer occurrence, and the minimum value of the response is referred to as the threshold. Even if it is assumed that a tumorigenic change occurs in a cell by a single molecule of a carcinogen, the possibility of the carcinogen molecule reaching the target cell is very low under exposure below a certain dose (Kim Soo-geun, 2014). However, since 2014, cancer has already occurred in a group of teachers who use 3D printers, and in particular, rare cancers such as sarcoma have occurred in two students in one school, raising doubts about the association with 3D printers. Therefore, cancer incidence rates were compared between a group that included teachers using 3D printers and a group that did not.

However, SIR and Odds Ratio were checked, but there was no significant difference in all cancers between the two groups. It was confirmed that there was no difference in cancer incidence rates between subjects who belonged to an educational institution that used 3D printers and subjects who did not belong to an educational institution that used 3D printers, even though the exposed group included teachers at the time who used 3D printers.

Therefore, comprehensively synthesizing these situations through literature review and cancer incidence, it is confirmed that 'cancer caused by 3D printer use' is in a state of doubt about the relevance, but there is still insufficient evidence for the relevance. This may be fundamentally due to the low exposure concentration of risk factors exposed according to the use of 3D printers, as in the exposure survey. This may be due to additional time and population requirements. In addition, there were research results on the strong toxicity of nanoparticles (Brent Stephens et al., 2013), but the literature on their association with cancer has been lacking so far. Therefore, it is judged that additional follow-up studies are needed after 10 years of using 3D printers.

Conclusion :

In the case of sufficient ventilation conditions in educational institutions using 3D printers, this study confirmed that the degree of exposure to carcinogens or nanoparticles induced by 3D printers is relatively low compared to conditions with insufficient ventilation. However, since industrial 3D printers are subject to the Industrial Safety and Health Act, businesses perform safety management, but educational institutions lack

guidelines to protect users from harmful substances, work environment management, and ventilation. In addition, through in-depth interviews, it was found that budgeting for practical ventilation was requested. Therefore, through this study, it can be used as a reference for epidemiological investigation and presentation of evidence for the need for ventilation at school sites using 3D printers.

Key words :

3D printer, FDM, PLA, ABS, carcinogen, nanoparticles, health effects

- 부록 1 -

1. 3D 프린터 사용기관 소속 근로자의 성·연령(출생년도)별 암발병 위험도

1) 전체 암

성별	출생년도	발생 수	기대 발병수	추적인년	표준화 발병비	95% 신뢰구간 (포아송분포)		p값
						하위	상위	
남자	1960~1969	620	665.95	228768	0.93	0.86	1.01	0.0751
	1970~1979	165	185.05	156467	0.89	0.76	1.03	0.1408
	1980년 이후	82	80.76	139718	1.02	0.81	1.25	0.89
여자	1960~1969	947	936.68	236456	1.01	0.95	1.08	0.7359
	1970~1979	919	915.11	278158	1.00	0.94	1.07	0.8976
	1980년 이후	463	427.96	298645	1.08	0.99	1.18	0.0904

대조집단 : 3D 프린터 미사용 기관 소속

2) 연부조직암

성별	출생년도	발생 수	기대 발병수	추적인년	표준화 발병비	95% 신뢰구간 (포아송분포)		p값
						하위	상위	
남자	1960~1969	6	8.28	229539	0.72	0.29	1.47	0.4294
	1970~1979	2	3.71	156669	0.54	0.09	1.66	0.3815
	1980년 이후	4	2.01	139812	1.99	0.62	4.62	0.1684
여자	1960~1969	9	7.65	237819	1.18	0.57	2.12	0.6261
	1970~1979	6	8.16	279445	0.74	0.29	1.49	0.4508
	1980년 이후	1	4.42	299263	0.23	0.01	1.00	0.1375

대조집단 : 3D 프린터 미사용 기관 소속

3) 폐암

성별	출생년도	발생 수	기대 발병수	추적인년	표준화 발병비	95% 신뢰구간 (포아송분포)		p값
						하위	상위	
남자	1960-1969	47	66.87	229493	0.7	0.52	0.92	0.0156
	1970-1979	7	5.63	156667	1.24	0.53	2.4	0.5659
	1980년 이후	1	1.43	139814	0.7	0.04	3.08	0.7207
여자	1960-1969	46	52.75	237770	0.87	0.64	1.15	0.3533
	1970-1979	21	19.21	279426	1.09	0.69	1.63	0.683
	1980년 이후	7	4.5	299257	1.55	0.67	3.01	0.2433

대조집단 : 3D 프린터 미사용 기관 소속

3) 유방암

성별	출생년도	발생 수	기대 발병수	추적인년	표준화 발병비	95% 신뢰구간 (포아송분포)		p값
						하위	상위	
여자	1960-1969	336	321.94	237308	1.04	0.94	1.16	0.4335
	1970-1979	355	381.66	278950	0.93	0.84	1.03	0.1725
	1980년 이후	98	93.62	299120	1.05	0.85	1.27	0.6506

대조집단 : 3D 프린터 미사용 기관 소속

부록 2_부분위탁 기관인 서울대학교에서 수행

- 부록 2 -

【약어】

ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ASA: Acrylonitrile Styrene Acrylate

ATR: Attenuated Total Reflectance

EDX: Energy Dispersive X-ray Spectrometer

ESD: Electrostatic Discharge

FDM: Fused Deposition Modelling

FFF: Fused Filament Fabrication

FTIR: Fourier Transform Infrared Spectrometer

GC-MS: Gas Chromatography Mass Spectrometry

HIPS: High Impact Poly Styrene

IRIS: Integrated Risk Information System

LC: Liquid Chromatography

PLA: Poly Lactic Acid

ME: Material Extrusion

MCE: Mixed Cellulose Ester

NGEN: Styrene free co-polyester

NIOSH: National Institute of Occupational Safety & Health

SMPS: Scanning Mobility Particle Sizer

OPS: Optical Particle Counter

OSHA: Occupational Safety and Health Administration

PC-ABS: Polycarbonate-Acrylonitrile Butadiene Styrene

PETG: Poly(ethylene terephthalate)-Glycol

PVA: Poly Vinyl Alcohol

SEM: Scanning Electron Microscope

TEM: Transmission Electron Microscopy

ULTRAT: a unique ABS plastic blend manufactured by Zortrax

VOC: Volatile Organic Compounds

1. 문헌고찰

1) 3D 프린터의 유해, 위험성

3D 프린터의 유해, 위험성에 관한 문헌을 검색하여 인간을 대상으로 실시한 연구 3편, 국내 교사에서 발생한 육종암 사례를 보고한 논문, 동물 연구(in vivo) 2편, 세포 독성 연구(in vitro) 3편을 선정하였다. 논문의 주요내용은 아래 표1에 요약하였다.

〈표 1〉 3D 프린터 발생물질의 독성 연구결과 요약

NO	대상	실험물질	실험방법	건강영향
1	사람	ABS, PLA	1시간 동안 26명의 지원자(남13명, 여13명)에게 노출 실험	오존 및 코 분비물에서 염증성 마커에 대한 급성 영향이 없음, 호기산화질소농도($FeNO$)가 증가하여 ABS 노출시 호산성 염증을 유발할 수 있음
2	사람	ABS	어렸을 적 천식 앓았던 자영업자가 10일 동안 밀폐된 공간에서 10대의 FDM 프린터를 가동	호흡기 문제, 메타콜린(Methacholine)으로 인한 천식 증상, PLA보다 ABS가 증상을 더 악화
3	사람	정보 없음	46명의 노동자에게 설문 조사	57%가 호흡기관 관련 증상을 호소
4	사람	PLA, ABS	환자 3명의 사례 연구	3D프린터를 사용한 교사 3명에서 육종암이 발생
5	동물	ABS	쥐 노출 실험	급성 고혈압 및 미세혈관 기능 장애 (24시간 ABS 입자에 노출 후 혈압이 30% 증가)

NO	대상	실험 물질	실험방법	건강영향
6	동물	ABS	하루 4시간 동안 쥐에게 노출	ABS 필라멘트에서 나온 물질이 소량의 일시적인 폐 및 전신 독성을 유발
7	세포	ABS	기도상피세포에 24시간 노출	24시간 노출 후, 세포독성, 산화성 스트레스, 세포 사멸, 괴사, 그리고 염증성 사이토카인과 케모카인의 생산의 증가
8	세포	ABS, PLA	쥐의 폐포 대식세포와 인간 종양유전성 폐상피 세포를 사용하여 입자의 세포독성 파악	PLA에서 방출된 입자들은 유사한 질량의 ABS에서 방출된 입자들보다 높은 반응 수준을 보였지만 ABS에서 방출되는 입자가 더 많아 전체적인 노출 측면에서는 ABS가 더 해로움 (세포사멸, 산화성 스트레스, 염증반응)
9	세포	ABS	폐상피 세포에 2시간 노출 후 배양	염증 신호에 관여하는 IL-1b, IL-6의 mRNA 수치가 노출 후 증가함

가) Gumperlein 등(2018)은 3D프린터 인쇄 시 발생하는 초미세먼지(Ultrafine particle)로 인한 건강상 악영향을 확인하기 위해 FDM 방식의 3D프린터를 이용하여 건강한 성인 26명에 대한 1시간 노출을 진행하였다. 각 참가자는 높은 수준의 노출(ABS, 입자 수농도 $> 10^6$ 개/cm³, 낮은 수준의 노출(PLA, 입자 수농도 $< 6 \times 10^3$ 개/cm³)에 해당하는 ABS,

PLA 두 물질에 노출되었다. 노출 전후 비강 분비물 내 사이토카인(IL-1 β , IL-6, TNF- α , INF- γ) 및 소변의 염증성 마커(8-iso PGF2 α)에 유의미한 차이가 없었다. 하지만 노출 후 2~3시간 후 측정된 FeNO 수치가 ABS에서 더 높은 수치를 나타냈다. 저자는 이를 ABS의 극초미세먼지(UFP)에 대한 호산성 염증으로 추정한다. 결과적으로 3D프린터 배출물에 노출된 성인 26명의 비강 분비물 내 사이토카인, 소변의 염증성 마커 수치는 3D프린터 배출에 대한 1시간 실험 노출은 임상적으로 ABS, PLA의 급성 염증 효과를 나타내지 않음을 보여준다.

나) House 등(2017)은 3D프린터를 사용하다가 천식이 발병한 작업자의 사례를 제시하면서 3D프린터 인쇄 시 발생하는 배출물과 호흡기 질환이 관련이 있을 수 있음을 보여준다. 사건의 내용은 다음과 같다. 과거 소아 천식 전력이 있던 28세 작업자가 10대의 ABS 필라멘트를 사용하는 FDM 방식의 3D프린터를 사용하면서부터 10일 만에 가슴 조임, 호흡 곤란, 기침의 증상이 발현한 사건이다. 이러한 증상은 3D프린터 작업장에서 발현했으며 주말에는 증상이 완화되었다. 따라서 작업자는 증상이 발현된 후 3개월 만에 사용하는 필라멘트의 종류를 ABS에서 PLA로 전환했고 프린터의 수를 5대로 줄였다. 또한 고효율 공기 필터와 유기 카트리지가 장착된 공기청정기를 사용하기 시작했다. 이후 증상은 점차 완화되었고 증상 시작 후 15개월 후에 실시한 메타콜린 기관지 검사에서 정상 수치를 나타냈다. 해당 사건에서 필라멘트의 종류를 ABS에서 PLA로 변경 후 증상과 기도 과민 반응이 완화되고 최종적으로 사라지는 것은 자극적인 반응이나 감작에 의한 직업성 천식과 일치한다. 따라서 해당 사건이 감작제로 인한 사건인지 자극제로 인한 사건인지 확실하지 않지만 이러한 사건을 통해 3D프린터를 사용하는 근로자들이 직업성 천식을 포함한 호흡기 질환의 위험에 처할 수 있음을 보여준다.

다) Chan 등(2018)은 3D프린터 인쇄 시 발생하는 초미세먼지(UFP), 휘발성유기화합물(VOCs)에 대한 노출이 작업자들에게 직업상 호흡기 질환의 위험 발생하는지 평가했다. 연구진은 캐나다 토론토 지역에서 상업용 시제품 제작 사업, 교육 기관 및 공공도서관을 포함한 3D프린터를 사용하는 17개 회사의 근로자들을 대상으로 인구 통계, 직업 및 건강 정보에 관한 설문지 작성을 통해 연구를 진행했다. 연구 결과 설문지를 작성한 근로자 46명 중 27명(59%)이 지난 1년 동안 일주일에 한 번 이상의 호흡기 증상이 있다고 보고했으며 주당 근로시간과 관련하여 증상이나 진단을 평가했을 때, 천식이나 알레르기 비염을 포함한 과거 호흡기 진단이 주당 40시간 초과 일하는 것(56%)과 주당 40시간 이하 일하는 것(6%)이 유의미하게 연관이 있는 것을 확인했다($p < 0.05$).

라) Joo 등(2022)은 FDM방식 3D프린터를 사용했던 선생님 3명의 의료 기록을 기반으로 case study를 진행하였다. 환자1은 2014년부터 2016년 동안 환기장치가 제대로 설치되어 있지 않은 공간에서 총 4대의 open-type 3D프린터를 사용했고 그중 2대는 헤파 필터가 설치되어 있지 않았다. 또한 하루에 최소 3시간은 프린터실에 있었고 PLA와 ABS 필라멘트를 혼용해서 사용하였다. 2017년 9월에 우측 둔부에 처음으로 고통을 호소하였고 2018년에 육종암으로 진단받았다. 폐 기능이나 피부 상태에는 이상이 없었지만 혈액 검사 결과 백혈구 $11,340/\text{mm}^3$, 71.1% 분엽핵 호중구, 적혈구 침전 속도 $26\text{mm}/\text{hr}$ 등의 염증반응이 비정상적으로 나타났다. 결국 육종암 진단 후 2년 4개월 만에 사망하였다. 환자2는 환기장치나 공기청정기가 설치되어 있지 않은 고등학교에서 총 10대의 3D프린터를 가동하였다. 프린터 중 8대는 open-type이었고 2대는 헤파 필터가 설치되어 있지 않은 closed-type이었으며 주로 PLA 필라멘트를 사용하였다. 환자 2는 하루에 10시간 정도 프린터실에서 작업을 하였다.

2019년 5월에 좌측 둔부에 고통으로 진단 결과 악성 말초 신경 피복 종양이 발견되었다. 그는 폐나 피부 상태에 아무런 문제가 없었으나, 혈액 검사에서 $14,290/\text{mm}^3$ 의 백혈구와 88% 분엽핵 호중구를 포함한 비정상적인 결과로 나타났다. 결국 환자2는 육종암 진단 후 2년 9개월 만에 사망하였다. 환자3은 2015년에 환자1과 같은 학교에서 근무하였고 환기장치가 제대로 설치되어 있지 않은 방에서 총 4대의 open-type 3D프린터를 사용하였다. 주로 PLA 필라멘트를 사용하였고 하루에 2시간 이상 방에서 수업을 진행하였다. 2017년 오른쪽 허벅지가 붓기 시작하였고, 2019년 MRI 결과, 중간넓은근에 지방 종양이 관찰되었고 흉부, 복부, 골반 CT 및 전신 PER/CT 검사에서 관련 병변이 나타나지 않았다. 종양은 고분화 지방육종으로 의심되어 절제하였다. 환자 1, 2, 3 모두 과거나 가족력에는 관련 이상이 드러나지 않았고 환자의 폐나 피부 상태에 이상이 없었다.

마) Stefaniak 등(2017)은 3D프린터 인쇄 시 발생하는 배출물(3D Printer Emission, 3DPE)이 극초미세먼지(UFP)를 포함한 복잡한 혼합물이고, 이러한 크기의 생체 외 입자의 흡입이 심혈관 장애와 관련이 있다는 연구를 진행했고, 이러한 실험을 SD rat의 흡입노출실험을 통해 진행했다. 3DPE 실험군 그룹은 FDM 방식의 3D프린터에서 ABS 필라멘트를 사용하여 발생하는 3DPE 에어로졸을 SD rat의 코에 노출하였으며, 대조군은 이와 마찬가지로 노출탑에 위치시킨 후 HEPA필터를 통과된 공기에 노출했다. 노출 24시간 후, 척수 근육의 미세혈관 기능을 평가하기 위해 생체 내 현미경 검사를 진행했고, 내피 의존성 및 독립적인 세동맥 팽창은 아세틸콜린(ACh)과 니트로프루시드나트륨(SNP)의 국소 미세 이온 공생에 의해 자극되었다. 실험 당시 실험군과 대조군의 체중 차이는 없었다. 3DPE 그룹의 평균 동맥압이 $125 \pm 4 \text{ mmHg}$ 이었고, 이

는 대조군의 평균 동맥압 94 ± 3 mmHg 보다 상당히 높았다(28% 상승). 내피 의존성 동맥확장은 모든 이온영양학적 토출 전류에 걸쳐 3DPE 흡입 후 현저하게 손상되었다($0-27 \pm 15\%$, 대조군: $15-120 \pm 21\%$). 대조군 그룹의 세동맥이 ACh 이온삼투법에 대한 용량 의존적 반응을 40 nA 및 100 nA 배출 전류에서 보였지만 3DPE 그룹은 그렇지 않았다. 따라서 3D프린터 인쇄 시 발생하는 배출물(3DPE)의 흡입이 동맥압 상승 반응과 관련이 있으며, 이는 전신 미세혈관 저항의 증가 및 내피 반응의 장애에 크게 좌우될 수 있음을 보여준다.

바) Farcas 등(2020)은 ABS 필라멘트를 사용하는 FFF 방식의 3D프린터에서 나오는 극초미세먼지(UFP), 휘발성유기화합물(VOCs)의 생체 내 독성을 SD rat의 공기 중 노출을 통해 평가했다. SD rats는 단일노출 또는 5번의 노출 기간(1, 4, 8, 15, 30일) 동안 하루 4시간, 일주일에 4일 동안 ABS 배출물로 노출된 후 마지막 노출로부터 24시간 후 전신 독성, 폐 손상, 염증, 산화 스트레스를 평가했다. 실험 중 평균 입자 질량 농도가 240 ± 90 mg/m³이고, 평균 기하학적 평균 입자 이동 직경이 85 nm(기하표준편차 ≤ 1.6)인 입자를 생성했다. 대식세포의 수는 15일째에 현저하게 증가했으나 이러한 증가는 노출 30일이 되면 대조군 수준으로 돌아왔다. 노출 후 1일과 4일째에 BALFe에서 사이토카인(IFN- γ 및 IL-10)이 증가했으며, 15일째에는 IL-10이 최고조에 달했다. 결과적으로 폐 산화 스트레스 반응이나 폐와 코의 조직병리학적 변화는 발견되지 않았다. 해당 실험에서 ABS 필라멘트 배출물은 최소한의 일시적인 폐 및 전신 독성을 유발한다고 볼 수 있다.

사) Farcas 등(2019)은 인간 소기도 상피세포에서 FFF 방식의 3D프린터에서 발생하는 분당 수십억 개의 입자와 유기화합물의 독성을 평가한

다. 발생한 입자는 ABS 또는 PC 필라멘트로 1.5시간 동안 챔버 내부 3D프린터로부터 생성되어 셀 배지에 수집되었다. 세포 배양 배지의 평균 입자 크기는 PC와 ABS의 경우 각각 201 ± 18 nm, 202 ± 8 nm이다. 노출 후 24시간 동안 PC와 ABS 모두 용량 의존적인 세포독성, 산화스트레스, 세포 사멸, 괴사 및 인간 소기도 상피세포에서 전 염증성 사이토카인 및 케모카인의 생성을 유도했다. 그 결과로 PC 및 ABS 입자 10^4 개의 입자에 노출된 경우 인간 소기도 상피세포에서 괴사 세포 수가 0.285%, 0.375% 증가하는 것으로 나타났다. 인간 소기도 상피세포에서 PC와 ABS의 경우 GPx 활성도가 각각 0.016%, 0.035% 감소하였다. 종합해 보면, 이러한 결과는 세포 배양 배지에서 수집된 PC 및 ABS 배출물에 대한 노출이 인간 소기도 상피세포에서 용량 의존적 독성을 나타냈음을 보여준다.

아) Zhang 등(2019)은 3D프린터 인쇄 시 발생하는 입자의 화학적 구성과 잠재적인 건강에 미치는 영향에 초점을 맞춰 네 개의 필라멘트 ABS c, ABS d, PLA, 나일론의 입자에 노출되었을 때 생체 내 염증 모델, 산화 스트레스 메커니즘을 통해 시험관 내 세포분석을 진행하여 필라멘트의 잠재적 독성을 파악했다. 시험관 내 세포분석은 모두 PLA 및 ABS 방출 입자에 노출되었을 때 독성 반응을 보였으며, PLA 방출 입자는 유사한 질량 선량으로 ABS 방출 입자보다 높은 반응 수준을 유도했다. 그러나 ABS 필라멘트로부터의 입자 방출은 훨씬 더 높은 수준의 방출로 인해 전체적인 노출을 고려할 때 더 해로울 수 있다. 또한 ABS d와 PLA는 블랭크에 비해 세포 내 ROS 생성을 13~24% 증가시켰다. 결과적으로 ABS, PLA, 나일론을 사용하는 3D프린터 입자 방출이 건강상 악영향을 미칠 수 있으며 생물학적 화학적 분석에 의한 세포 사멸, 산화스트레스 및 염증반응의 증가는 잠재적으로 폐 기능의 부정적인 영향을

미치며 호흡기 질환과 합병증의 수준을 증가시킬 수 있다.

자) Kim 등(2022)은 Air-liquid interface (ALI)기반의 급성 세포독성 및 염증과 같은 다양한 다른 바이오마커를 평가할 수 있는 세포 기반 생체 모니터링 장치를 이용하여 3D프린터(ABS) in-vitro 실험을 진행하였다. ALI 장치 안의 A549 폐 상피 세포를 2시간 동안 3D프린터 작업 환경에 노출시키고 24시간 동안 post-exposure 배양을 진행하였고, 대조군을 위해 Ag 나노입자도 동일 조건으로 세포에 노출시켰다. 염증 신호에 관여하는 IL-1b, IL-6 및 TNF- α 에 대한 mRNA 수치를 관찰하였다. 대조군 Ag 나노입자에 A549 세포를 2시간 노출한 후, IL-1b, IL-6 및 TNF- α 에 대한 mRNA 수치가 유의하게 증가하였고 TNF- α 를 제외하고 나머지는 24시간 배양 후에도 계속 증가하였다. ABS에 노출된 세포는 IL-1b과 IL-6의 mRNA 수치는 Ag 나노입자 노출 결과와 같이 증가했지만 TNF- α 는 감소했으며 24시간 배양 후에는 더욱 감소하였다.

2) 3D 프린터 발생물질 평가에 관한 선행 연구

3D 프린터에서 발생하는 초미세입자 입자와 휘발성유기화합물에 관한 챔버 연구 9편, 실내 환경에서 평가된 연구를 10편을 선정하였고, 아래 표6~9에 요약하였다.

〈표 2〉 챔버내 3D 프린터 발생물질 평가 연구결과 요약

챔버 크기, m ³	농도, 개/cm ³	평균 입경, nm	ACH	발생량, 개/min	참고 문헌
2.5	PLA: 4.3×10^2 ABS: 9.2×10^3	NA	36	PLA: 3.35×10^8 ABS: 1.5×10^{10}	Jeon et al. (2019)
2.5	PLA: 10^3 ABS: $1.1 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^4$	NA	36	PLA: 3.18×10^8 ABS: $1.83 \sim 3.00 \times 10^{10}$	Kwon et al. (2017)
1.0	ABS: 1.7×10^6 PLA: $4.5 \sim 5.2 \times 10^4$	ABS:32 PLA1:27 PLA2:188	NA	ABS: 1.61×10^{10} ABS: 1.67×10^{11} 개/g PLA1: $4.27 \sim 4.89 \times 10^8$ PLA2: $3.77 \sim 3.91 \times 10^9$ 개/g	Kim et al. (2015)
3.0	ABS: 2.7×10^5	27	1.0~1.5	6.5×10^{10}	Gu et al. (2019)
1.0	NA	NA	1	TVOC 발생량: ABS: $835 \mu\text{g}/\text{시간}$ PLA: $193 \mu\text{g}/\text{시간}$	Davis et al. (2019)
2.0	NA	NA	1	ABS: 3.5×10^{11} PLA: 5.6×10^{10} 분쇄된 PLA: 1.7×10^9	Byrley et al. (2020)

* ACH: 시간당 공기교환 횟수, NA: 해당없음

〈표 3〉 챔버내 3D 프린터 발생물질 평가 연구결과 요약(계속)

챔버 크기, m ³	농도, 개/cm ³	평균 입경, nm	ACH	발생량, 개/min	참고 문헌
0.29	PETG: 3.88×10^{10} NGEN: 6.01×10^9	PETG: 50 NGEN: 48	NA	PETG: 1.28×10^9 NGEN: 1.73×10^8	Bernatiko va et al. (2021)
0.3	ABS: 7,100~37,000 PLA: 1,900~5,700	ABS: 18 PLA: 12	20	ABS: 4.7×10^7 개/초 PLA: 7.4×10^6 개/초	Poikkima ki et al. (2019)
3.6	-	-	NA	ABS: $2 \sim 9 \times 10^{10}$ PLA: 10^8	Azimi et al. (2016)

* ACH: 시간당 공기교환 횟수, 발생량: 입자의 개수/분, NA: 해당없음

〈표 4〉 실제 환경에서 3D 프린터 발생물질 평가 연구결과 요약

공간	공간 넓이, m ³	측정위치	농도, 개수/cm ³	평균입경, nm	기타 특징	참고문헌
A	206	3D프린터 인근 근무자 위치	16,290 (SMPS)	30(CMD) 70(MMD)	·3D프린터 격리 후 나노입자 70% 감소 ·입자상PAH 불검출 ·알데히드, 스티렌 등 22가지 이상의 VOCs 미량 검출	Kim et al.(2022)
A	600	3D프린터 옆	4,000	NA	ACH = 20	Zontek et al. (2017)
B	162	3D프린터 옆	10,000	16.3	ACH = 1.8	
A	32.7	3D프린터 옆 (10cm)	1.9×10 ⁵	NA	ACH = 0.3, ABS(natural)	Yi et al. (2015)
A	81	방 중앙 (높이: 74cm)	2.8×10 ⁴ (ABS) 2.9×10 ² (PLA)	8.2 (ABS) 26.4 (PLA)	airflow rate : 0.115 m ³ /s	Mendes et al. (2017)
A	126	3D프린터 옆 (1m)	NA	19.85	PLA	Youn et al. (2019)
A	180	3D프린터 옆 (0.3m, 2.5m)	1700 (0.3m) 1700 (2.5m)	NA	천장 공조기, 에어컨 가동. ACH = 2	Steinle et al. (2016)
B	30	3D프린터 옆 (0.3m, 1.5m)	3200 (0.3m) 2900 (1.5m)	NA	환기 없음	

* ACH: 시간당 공기교환 횟수, NA: 해당없음

〈표 5〉 실제환경에서 3D 프린터 발생물질 평가 연구결과 요약(계속)

공간	공간 넓이, m ³	측정위치	농도, 개수/cm ³	평균입경, nm	기타 특징	참고문헌
A	45	3D 프린터 옆 (2m, 책상 위)	2.78×10 ⁴ (PLA) 1.42×10 ⁵ (PLA+ABS)	NA	환기에 대한 언급없음	Stephens et al. (2013)
A	8	클린룸 옆 방에서 튜브를 통해 프린터 옆에서 샘플링 (지상 0.3m)	10 ³ (ABS_200도) 10 ⁵ (ABS_240도) 2×10 ³ (PLA_180도) 10 ⁴ (PLA_220도)	NA	1. 3D프린터 가동은 클린룸, 실시간 장비 가동은 클린룸 옆 모니터링실에서 수행. (샘플링 튜브 통해 프린터 옆에서 샘플링) 2. 실험 중 환기 장치 정지. (환기 장치 정지 시 ACH=0.1/h)	Deng et al. (2016)
A	40	3D프린터 옆 (2m, 지상 1m)	5.15×10 ³ (220도) 8.21×10 ³ (230도) 4.87×10 ⁴ (240도)	15.3 (220도) 12.9 (230도) 14.3 (240도)	환기 없음	Stabile et al. (2017)
A	40	3D프린터 옆 (1m 이내)	9.7×10 ¹⁰ 개/분	NA	환기 정보 없음 ACH:0.22	Stefaniak et al. (2019)
B	76	3D프린터 옆 (1m 이내)	7.3×10 ¹⁰ 개/분	NA	환기장치 가동 유량 정보 없음	
C	466, 320	3D프린터 옆 (1m 이내)	1.9×10 ⁹ 개/분 5.5×10 ⁹ 개/분	NA	큰 방: ACH=2 작은 방: 개방 공간 ACH: 0.22	
D	44.5	3D프린터 옆 (1m 이내)	1.7×10 ¹¹ 개/분	NA	에어컨 등 환기장치 가동(ACH:2)	

* ACH: 시간당 공기교환 횟수, NA: 해당없음

(1) 챔버 연구

가) Jeon 등(2019)은 3D 프린터 인쇄 시 입자상 물질의 방출 속도에 대한 노즐 온도의 영향을 필라멘트 소재 별로 평가하였다. 사용한 필라멘트는 PLA, Laywood, ABS, Nylon 총 4종류였으며, 실험은 3개의 부분으로 구성된 2.5 m³의 챔버에서 수행되었다. 내부의 팬은 챔버 내부에 0.1 m/s의 유속을 제공했고, 측정 위치에선 1.5 m³/s의 유량을 가졌다. 배출 온도는 제조사 권장온도에서 15°C씩 올려, 총 185°C~290°C의 범위를 가졌다. 입자상 물질의 측정은 SMPS와 OPS를 사용하였다. 입자상 물질의 방출 속도의 경우, 모든 필라멘트에서 가장 낮은 작동 온도에선 107~109 개/분의 발생량을 보인 반면, 가장 높은 온도에선 1,011 개/분의 방출량을 보였다. 입자 수 농도의 경우 인쇄 온도에 따라 PLA는 $2.4 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^5$ 개/cm³, ABS는 $6.8 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^5$ 개/cm³의 입자 수 농도를 보였다. 결과적으로, 온도는 모든 필라멘트 유형에서 입자의 발생량을 10²~10⁴배 증가시키는 강한 요소였다.

나) Kwon 등(2017)은 3D 프린팅 도중 발생하는 입자의 방출특성을 연구하기 위해 권장 온도 조건에서 입자 수 농도, 방출 속도, 형태 및 화학 조성을 측정했다. 실험은 3개의 부분으로 구성된 2.5 m³의 다이내믹 챔버에서 수행되었으며, 내부의 팬은 챔버 내부에 0.1 m/s의 기류를 제공했다. 필라멘트는 PLA, HIPS, 나일론, PVA, Laywood 및 두 가지 브랜드의 ABS(ABS1, ABS2)를 사용하였으며 각각의 색은 서로 달랐다. 또한 필라멘트 별로 다른 권장 인쇄온도 대신, 더 높은 일정한 온도(압출기: 265°C 집적판: 90°C)에서 인쇄 후 이를 비교하였다. ABS와 PLA는 권장온도 조건에서 각각 $1.1 \sim 1.81 \times 10^4$ 개/cm³, 10³ 개/cm³의 수 농도를 보였다. 권장온도보다 높은 일정한 온도에서 인쇄 시 ABS, PLA는 각각 $1 \sim 1.2 \times 10^5$ 개/cm³,

5.2×10^4 개/ cm^3 의 수 농도를 보였다. SEM-EDX를 통한 형태 및 화학 조성의 분석 결과 PVA를 제외한 나머지 필라멘트에서 대부분의 응축된 크기는 100~300 nm이었다. 화학 조성의 경우 모든 필라멘트 재료의 주요 구성 요소가 탄소와 산소였다. 필라멘트 중 ABS와 HIPS를 선택하여 케이스, 압출기 흡입 팬, 케이스 환기 팬 등 여러 유형의 필터 매체를 포함하여 8가지 조합의 제어 방법을 테스트 하였다. 8가지 제어 방법 중 5가지가 90% 이상의 제거 효과를 나타내는 것으로 나타났으며, HEPA 필터를 케이스 내부의 환기팬에 부착하는 방법에서 나노 입자에 대한 가장 높은 제거 효율(99.95%)을 가졌다.

다) Kim 등(2015)은 FDM 기반 3D 프린터를 사용하여 유해 물질의 방출 특성을 평가하기 위해 실험을 진행하였다. 실험은 챔버(부피:1 m^3)에서 진행되었으며, 챔버는 아크릴로 제작되었다. 필라멘트의 경우 ABS 한 종류와 두 종류의 PLA(PLA1, PLA2)를 사용하였다. 실시간 장비는 SMPS, CPC(P-trak), Dusttrak, ppbRAE를 사용하였으며, 입자 질량 농도의 경우 PC 필터에 포집하여 중량 분석을 진행하였다. 또한 알데히드, VOC, 프탈레이트 역시 표준 방법에 따라 측정, 분석되었다. 입자 수 농도의 경우 배경 농도, 작업 전후에 비하여 3D 프린터를 작동 할 때 훨씬 높았다. 소재 간 비교 시 ABS는 1.7×10^6 개/ cm^3 , PLA는 $4.5 \sim 5.2 \times 10^4$ 개/ cm^3 로 ABS가 PLA보다 33~38배 높았다. 나노입자(<100 nm)의 경우 ABS와 PLA1은 각각 발생 입자의 96%와 98%로 높은 비율을 차지하였지만, PLA2의 경우 12%에 불과했다. 또한 발생률의 경우 ABS는 1.61×10^{10} 개/분, 1.67×10^{11} 개/g, PLA는 $4.27 \sim 4.89 \times 10^8$ 개/분, $3.77 \sim 3.91 \times 10^9$ 개/g를 보였다. TVOC는 ABS를 사용할 때 155 ppb 수준에서 검출되었으며, PLA 사용 시엔 검출되지 않았다. VOCs의 경우 ABS 필라멘트를 인쇄 시 11.5 ppb로 높은 에틸벤젠 농도(외기의 16.4배)가 기록되었다. PLA 필라

멘트를 인쇄 시 m-,p-자일렌의 농도는 1.8 ppb로 외기보다 2.9배 높았다. 알데히드류의 경우 포름알데히드, 아세트알데히드 및 이소발레르알데히드의 농도가 3D 프린팅에 따라 증가했다. 3D 프린팅에 작동에 따라 ABS의 경우 이소발레르알데히드와 아세트알데히드 농도는 실외 농도보다 각각 11.9배, 3.2배 높았다. PLA2 카트리지를 사용 시 포름알데히드 농도는 실외 농도보다 5.2배 높았다. 프탈레이트의 경우 대부분의 경우 LOD 미만이었지만 3D 프린트 가동에 따라 ABS, PLA 필라멘트 모두에서 DEP, DBP, DEHP 미량(0.7-2.7ppb) 검출되었다.

라) Gu 등(2019)은 이 연구는 3D 프린팅으로 인한 입자 발생과 가스상 오염 물질을 평가하기 위해 입자 크기 분포, 입자 수 농도, 입자 화학 조성 및 입자 휘발성을 측정했다. 실험은 챔버에서 진행되었으며, 부피는 3 m³이고 스테인레스로 만들어졌다. 소재의 경우 ABS, ASA, HIPS, PETG, PCABS, ULTRAT, ESD, GLASS로 총 8가지 종류의 필라멘트를 사용했다. 입자 수 분포는 FMPS와 OPS를 통해 측정되었다. 5.6~560 nm 입자의 발생량은 소재별로 2.0×10^9 개/분(Glass) ~ 1.7×10^{11} 개/분(ASA)였으며, ABS의 발생량은 $(4.7 \pm 1.1) \times 10^{10}$ 개/분 이었다. 입자 화학 조성을 평가하기 위해 석영 필터, tenax tube, carbotrap tube를 통한 샘플링이 수반되었다. 샘플링 된 시료는 GC/MS를 통해 분석되었다. 또한 PC 필터로 포집된 입자는 SEM을 통해 분석되었다. 석영 필터에는 주로 SVOCs가 포집되었으며, 이는 3D 프린터에서 운할제로 사용될 수 있는 가소제, 난연제 등으로 구성되어 있었다. TVOC의 경우 소재 별로 $0.2 \mu\text{g}/\text{min}$ (GLASS) ~ $40.5 \mu\text{g}/\text{min}$ (ULTRAT, anABS-based filament)의 발생률을 가졌다. VOC 분석 결과 가장 주요한 VOC는 스티렌으로, PETG 기반 필라멘트(PETG, GLASS 및 ESD)를 제외한 대부분의 필라멘트에서 높은 방출을 보였다. 또한 8개의 필라멘트에서 benzaldehyde(8회), acetophenone(6회),

ethylbenzene(5회), toluene(5회), other C3-benzenes(5회)이 검출되었다. VVOC는 분석 결과 주로 lower aldehydes, alcohols, acrylonitrile가 검출되었으며, 배경 농도 보다 인쇄 중 농도가 더 높았다.

마) Davis 등(2019)은 사무용, 교육용, 소비자용 등의 용도로 사용되는 FFF 방식의 3D 프린터(총 5대)에서의 미립자(UFP)와 VOCs의 배출을 특성화하고 정량화하기 위한 연구로 서로 다른 8개 제조사의 4종류 필라멘트(PLA, ABS, HIPS, Nylon)를 사용하여 평가하였다. 연구는 부피 1 m³의 챔버에서 수행되었으며 챔버의 ACH는 1회/hr였다. 5대의 프린터 중 2대의 프린터는 완전 밀폐형이었으며, 그 중 한 대의 프린터는 HEPA 필터가 부착되어 있었다. 휘발성 유기 화합물(VOC) 농도를 측정하기 위해 Tenax TA 흡착튜브와 2,4-dinitrophenylhydrazine(DNPH) 고체 흡착관을 사용하였다. 연구결과 3D 프린터에서 216종의 VOC가 방출되며, 이러한 VOC는 실내 공기질과 인체에 영향을 끼칠 수 있다고 하였다. 총 VOC 방출량은 PLA는 193 µg/h, ABS는 835 µg/h였으며, PVA에서 147 µg/h로 가장 낮았고, Nylon에서 1,660 µg/h로 가장 높았다. 또한, 필라멘트, 노즐 온도, 필라멘트 재료, 필라멘트 브랜드, 프린터 브랜드 및 필라멘트 색상은 모두 VOCs 방출에 영향을 미쳤다.

바) Byrley 등(2021)은 2 m³ 챔버(환기가 잘 되지 않는 좁은 공간)안에서 FFF 기반의 3D 프린터를 사용하여 연구를 수행하였다. PLA, ABS, PLA조각(지름 약 4 mm 구형)을 사용하였으며 모두 180°C에서 인쇄되었다. 수 농도를 평가하기 위한 실시간 장비로는 SMPS와 P-track이 사용되었다. 본 실험 전 8분간 2분 간격으로 배경농도 샘플링을 진행한 뒤, ABS와 PLA의 경우 평균 51분, PLA 조각은 평균 40분 정도 진행되었다. 방출된 입자의 대부분은 3D 프린터 연구와 유사한 범위(1~100 µm)인 것으로 밝혀졌다.

입자 수 발생량의 경우 ABS, PLA, 분쇄된 PLA가 각각 3.5×10^{11} 개/분, 5.6×10^{10} 개/분, 1.7×10^9 개/분으로 ABS가 가장 높은 발생량을 보였다. 또한, 인쇄 공정 초기에 입자 수농도가 최고조에 달하는 기존 선행연구와는 대조적인 결과도 보였다. 휘발성 유기화합물(VOC)은 Carbograph 2TD/1TD dual bed 흡착관을 통해 포집되었으며, TD-GC/MS를 통해 분석되었다. 스티렌과 에틸벤젠을 포함한 다양한 VOC가 확인되었으며, ABS 필라멘트 인쇄 중 방출된 스티렌의 평균 질량농도는 0.788 mg/m^3 로 EPA의 IRIS 흡입 노출에 대한 기준 농도(1 mg/m^3)에 근접한 값을 가졌다. 또한, 인쇄 공정 초기에 입자 수농도가 최고조에 달하는 기존 선행연구와는 대조적인 결과도 보였다. 이러한 결과들은 필라멘트 압출기의 사용이 3D 프린터 이용자에게 추가적인 노출 위험을 줄 수 있다는 가설을 뒷받침한다.

사) Bernatikova 등(2021)은 FDM 기반 3D 프린터에서 방출되는 초미세 입자(UFP)와 휘발성 유기화합물(VOCs)를 평가하기 위해, 환기가 되지 않는 0.29 m^3 부피의 유리 챔버 내에서 연구를 수행하였다. 필라멘트는 PETG 필라멘트와 NGEN 필라멘트 두 종류를 사용하여 비교하였다. 초미세입자(UFP)를 평가하기 위해선 CPC와 SMPS를 사용하였으며, 3D 프린팅 시 방출되는 입자의 총 수농도는 PETG: 3.88×10^{10} 개/ cm^3 , NGEN 6.01×10^9 개/ cm^3 로 PETG에서 초미세입자가 더 높은 수 농도를 가졌다. 또한 입자의 발생량은 PETG: 1.28×10^9 개/g, NGEN: 1.73×10^8 개/g으로 PETG가 NGEN 대비 인쇄 중량 대비 많은 입자를 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 총 휘발성 유기화합물(TVOC)의 경우 두 필라멘트 모두에서 낮은 농도(PETG : 500ppb, NGEN : 600 ppb)였으며 PETG의 경우 스티렌이 검출되었다. 이러한 휘발성 유기화합물에 대해, 단기 노출량만 본다면 매우 낮은 수치이나 휘발성 유기화합물(VOCs) 물질 중 일부는 발암물질이기에 노출될 경우 주의할 필요가 있다.

아) Poikkimaki 등(2019)은 3D 프린트 인쇄 중 발생하는 입자 중 NCA (나노 클러스터 에어로졸) 즉, 3 mm 미만의 입자의 방출특성을 연구하였다. 사용한 필라멘트는 PLA 3종류(일반, 나무 소재 첨가, 구리 소재 첨가), Polyester, ABS로 총 5종류였다. 필라멘트는 각 제조사의 권장온도에 따라 210~250°C 사이에서 인쇄되었다. 실험은 부피가 0.3 m³인 챔버에서 수행되었으며, ACH는 20/hr였다. 실시간 수 농도를 보기 위해서 PSM을 사용하였으며, 크기 분포를 측정하기 위해 SMPS를 활용하였다. 총 입자 수농도의 경우 ABS는 7,100~37,000 개/cm³, PLA는 1,900~5,700 개/cm³였으며 총 입자 수 발생량의 경우 ABS는 4.7×10^7 개/초, PLA는 7.4×10^6 개/초였다. 또한 총 입자 중 NCA의 비율은 9~48%를 차지하였다.

자) Azimi 등(2016)은 3D 프린터 인쇄 중 발생하는 초미립자(UFP)와 일부 휘발성 유기 화합물(VOC)의 방출을 연구하였다, 모든 측정은 3.6 m³ 크기의 챔버 내에서 수행되었으며, 일정한 배경농도를 위해 인쇄 전 8시간 이상 환기 후 밀폐 되었다. 또한 5가지 서로 다른 브랜드의 3D 프린터와 ABS, PLA, HIPS 등 여러 소재의 필라멘트를 조합한 16가지 조합에 대해서 평가, 비교하였다. 초미립자(UFP)를 평가하기 위한 실시간 장비로는 CPC와 SMPS를 사용하였다. 초미립자(UFP)의 입자 수농도는 인쇄가 시작된 직후에 빠르게 증가하여 처음 10-20분 동안 지속된 후 점차 감소했으며, 이는 기존 선행연구와 유사하다. 가장 높은 초미립자 발생량은 일반적으로 ABS 필라멘트를 사용하는 프린터에서 가장 높게 발생했으며 그 중앙값은 $2 \sim 9 \times 10^{10}$ 개/분이었다. PLA 필라멘트를 사용하는 프린터에서 가장 낮은 초미립자 발생량을 보였고, 중앙값은 10^8 개/분이었다. 휘발성 유기 화합물(VOC)를 평가하기 위해선 Tenax-GR 튜브를 사용하여 샘플링 후 TD/GC/MS로 분석하였다. ABS 필라멘트로 인쇄하였을 때 스티렌이 10 µg/분 수준으로 방출되었으며, PLA 필라멘트에선 락타이드가 4~5 µg/분

수준으로 방출되었다. 이러한 결과는 환기 상태가 불량한 공간에서 3D 프린팅을 할 때 잠재적 노출에 주의해야 함을 시사한다.

(2) 현장 연구

가) Kim 등은 ABS 필라멘트를 사용하는 2대의 3D프린터(모델1: Sindoh, 3-DWOX 7X, 모델2: AFINIA, 3-D-H800+)를 가동하는 실내 사무공간에서 3D프린터 배출물질에 대한 평가를 실시한 후, 3D프린터를 별도의 격리공간으로 이동시킨 후 재평가하였다. 실내공간의 크기는 206.55 m³, 출입문은 1개, 별도의 창문은 없는 공간이었다. 3개의 급기구와 3개의 배기구가 있는 천정 전체공조시스템이 가동 중이었고, 1개의 천정시스템에어컨이 가동 중인 환경이었다. 근로자가 근무하는 테이블 인근에서 SMPS와 OPS를 사용하여 나노입자에서부터 마이크로입자(0.004 μm ~ 32 μm)의 입자 수농도를 측정된 결과, SMPS와 OPS의 수농도는 각각 평균 16,290(±4,468) 개/cm³, 37(±7) 개/L였으나, 격리 이동 후에는 SMPS에 의한 나노입자 농도는 4,981 개/cm³로 70% 감소하였고, OPS에 의한 마이크로입자는 다소 증가한 것으로 나타났다. 3D프린터의 격리 이동 전 시간대별 농도의 변화는 3D프린터는 가동되고 나노입자 농도는 10,000 개/cm³ 미만에서 20,000 개/cm³ 정도로 증가하다가, 3D프린터가 중단되고 나서는 다시 농도가 10,000 개/cm³ 미만으로 감소하였으나, 마이크로입자는 다음날까지도 농도가 증가하는 경향을 보였는데, 그 이유는 3D프린터에서 발생된 나노입자가 공기 중에서 서서히 응집됨으로 인해 마이크로입자로 변하기 때문으로 해석되었다. NanoMoudi cascade 임팩터로 평가한 공기 중 입자의 계수중양직경(CMD)는 30 nm이었고, 질량중위직경은 71 nm이었다.

실시간으로 입자상 다핵방향족탄화수소류(PAHs) 농도를 측정된 결과

PAHs 농도는 측정시간 내내 1 ng/m^3 으로 거의 검출되지 않았다(대기중 농도보다 낮음). PTR-Tof-MS를 이용해 휘발성유기화합물을 분석한 결과 20여 가지 이상의 물질이 검출되었고, 농도는 포름알데히드 29.8 ppb, 트리메틸아민 13.1 ppb, 톨루엔 13.0 ppb, 아크롤레인 6.3 ppb, 클로로포름 3.3 ppb, 스티렌 2.7 ppb, 염화비닐 1.1 ppb, 벤젠 0.4 ppb, 1,3-부타디엔 0.2 ppb 등으로 매우 낮았다. 3D 프린트 앞에서 공기 중 입자를 포집해 투과전자현미경으로 분석한 결과, 탄소 기반의 (ABS) 나노입자들이 다수 관찰되었고, 구리 나노입자도 일부 관찰되었는데, 이는 ABS 필라멘트의 구리성분(ICP 분석결과 구리 3 ppm 함유)에 기인한 것으로 추정하였다.

나) Zontek 등(2019)은 3D 프린팅 시 방출되는 입자의 특성을 연구하기 위해 크고 환기가 잘되는 실험실(600 m^3 , ACH=20/hr)과 작고 환기가 잘 안되는 실험실(162 m^3 , ACH=1.8/hr), 두 환경에서 FDM 방식의 3D 프린터를 사용하였다. 크고 환기가 잘되는 실험실에선 Makerbot 프린터를 사용하여 PLA 필라멘트를 인쇄하고, 작고 환기가 잘 되지 않는 실험실에서는 DaVinci XYZ 프린터를 사용하여 ABS 필라멘트를 인쇄하였다. 사용된 실시간 장비는 CPC, OPS, SMPS로 입자 수, 직경 및 질량농도를 평가하였다. PLA를 사용하는 Makerbot 프린터는 3D 프린터 근처의 호흡 구역에서 4×10^3 개/ cm^3 의 수농도를 보였고, ABS를 사용하는 DaVinci XYZ 프린터에서는 3D 프린터 근처의 호흡 구역에서 10^4 개/ cm^3 의 수 농도를 보였다. 또한 TEM/EDAX를 통해 입자의 형태와 원소 조성을 파악하였으며 액체 에어로졸의 경우 ATR-FTIR로 분석되었다. 분석 결과 ABS와 PLA 모두에서 탄소가 가장 많이 존재했으며, ABS에서는 cyclohexane, n-decane, ethylenepropylene-diene terpolymer, 1-decanol, isocyanic acid이 검출되었다.

다) Yi 등(2015)은 3D 프린터에서 방출되는 입자의 수, 크기 분포, 질량 및 표면적 등을 연구하기 위해 챔버(0.5 m^3)와 작은 방(32.7 m^3) 두 곳에서 연구를 수행하였다. 선정된 프린터는 FDM 방식이었으며 소재는 ABS(Natural, Red, Blue, Black)와 PLA(Green, Red, Ocean blue, Trans blue) 두 가지를 사용했다. 이 연구는 Particle emission에 대한 소재 및 소재의 색깔, 프린터 배출의 막힘, 프린터 커버, 배출하는 노즐의 개수를 변수로 하여 평가하였다. 이에 대한 결과로, 필라멘트의 종류는 입자 발생에 큰 영향을 미치며, ABS가 PLA보다 큰 입자를 방출했다. 총 입자 수 역시 필라멘트 종류와 색상 간 크게 다른 모습을 보였다. 챔버 실험에서는 ABS에선 natural 색상이 2.27×10^{11} 개/ cm^3 로 가장 높은 입자 수 방출을 보였으며, PLA에선 trans blue 색상이 2.18×10^{11} 개/ cm^3 로 가장 높은 입자 수 방출을 보였다. 입자 직경의 경우 각각 70.1 nm와 30.1 nm였다. 작은 방에서 진행된 실험에선 ABS natural 색상이 사용되었으며, 1.9×10^5 개/ cm^3 의 입자 수 농도를 보였다. 또한, 프린터의 커버를 사용 할 경우 총 입자 수의 배출량이 2배 감소하였다. 프린터의 필라멘트가 배출 중 막힌 경우 총 분진의 수는 정상 작동과 차이 나지 않았지만, SMPS(14.6 nm ~ 660 nm)를 통해 측정된 입자들에선 정상 작동 (2.8×10^5 개/ cm^3)에 비해 더 많은 수의 입자(8.4×10^4 개/ cm^3)를 방출 했다.

라) Mendes 등(2017)은 챔버(부피: 0.18 m^3 , airflow rate: $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$) 및 실험실(부피: 81 m^3 , airflow rate: $0.115 \text{ m}^3/\text{s}$)에서 FDM 방식 3D 프린터를 사용하여 실험을 진행하였다. 이 연구의 목적은 챔버와 실험실 환경에서 노즐과 적층판의 온도변화에 따른 입자 수 농도를 소재(ABS, PLA)에 따라 비교하는 것으로 SMPS와 PSM을 사용하여 평가하였다. 챔버에선 ABS는 2.6×10^4 개/ cm^3 로 높은 수의 나노입자를 방출한 반면 PLA의 경우 7.4×10^2 개/ cm^3 로 나노입자의 방출이 높지 않았다. 실험실 환경에서 역시

ABS는 2.8×10^4 개/ cm^3 의 나노입자를 방출한 반면 PLA의 경우 2.9×10^2 개/ cm^3 로 나노입자의 방출이 높지 않았다. 정상 작동 조건에서 ABS의 나노입자 방출 속도는 $3.7 \times 10^8 \sim 4.0 \times 10^9$ 개/초로 PLA의 방출속도 $1.0 \sim 6.0 \times 10^7$ 개/초 보다 높았다. 노즐의 온도는 입자 배출에 강한 영향을 미쳤으며, 온도가 상승함에 따라 입자 발생이 증가했다. 또한 ppbRAE와 GC, LC 분석을 통해 가스상 물질을 평가하였다. 각 소재에서 휘발성 유기 및 기타 기체 화합물은 검출되지 않았거나 발견된 경우 노출 한계 값보다 낮은 수준이며, ABS에서 스틸렌이 낮은 수준으로 검출되었다.

마) Youn 등(2019)은 3D 프린터 사용에 따른 나노입자와 유해 대기오염 물질(HAP)의 배출을 평가하였다. 총 5대의 FFF형 3D 프린터를 사용했으며, 실험장소는 교내 126 m^3 부피의 3D 프린팅 센터에서 수행되었다. 사용 필라멘트는 유색 염료에 의한 영향을 배제하기 위해 모두 백색 PLA 필라멘트를 사용하였다. 실시간 입자 분포는 SMPS를 사용하였으며 TEM-EDS로 나노입자의 형태와 원소 조성을 평가하였다. 또한 필라멘트의 형태 및 원소 조성은 SEM-EDS로 평가하였다. 나노입자의 수 농도 분포는 10~20 nm와 70~100 nm에서 지배적이었으며, 10 nm 입자를 기준으로 3D 프린터에 의한 최종 수 농도는 배경 농도 보다 3.6배 높았다. 유해 대기오염물질의 경우 총 14종이 검출되었으며 그 중 헥산(8.46 ppb), 아크릴로니트릴(3.36 ppb), 벤젠(0.52 ppb)의 농도가 가장 높았다.

바) Steinle 등(2016)은 FDM 타입의 데스크탑 3D 프린터를 사용하여 챔버와 실제 사무실 두 곳에서 에어로졸 및 유해물질의 발생을 연구하였다. 초미세 에어로졸(UFA)의 발생량은 PLA로 인쇄하였을 때 2.1×10^9 개/분, ABS로 인쇄하였을 때 2.4×10^8 개/분으로 ABS보다 PLA에서 발생량이 더 많았다. 측정된 UFA는 주로 휘발성 droplet으로 이루어져 있었고,

100~300 mm의 입자 중 일부에서 첩과 그을린 입자를 발견할 수 있었다. 실제 환경에서의 연구는 큰 사무실(180 m³)과 작은 사무실(30 m³)에서 PLA 필라멘트로 수행되었다. 큰 사무실의 ACH는 2/h였으며 건물의 공조 시스템 및 에어컨 시스템에 의해 환기되고 있었다. 작은 사무실은 공조 장치가 아닌 자연환기에 의존하였지만, 측정 기간 동안 문이 닫혀 환기되지 않았다. 큰 사무실은 3D 프린팅이 UFA 및 VOC 농도를 크게 증가시키지 않은 반면, 작은 방에서는 인쇄 전/후 대비 인쇄 하는 동안 유의미하게 높아짐을 볼 수 있었다. 작은 방에선 UFA 농도는 2,000 개/cm³ 증가 하고 TVOC의 37%에 해당하는 MMA(메틸메타크릴레이트) 농도 역시 최대 21 µg/m³에 도달하여 인쇄 후 20시간 이후에도 감지할 수 있었다.

사) Stephens 등(2013)은 45 m³ 크기의 상업용 사무실 공간 내에서 5대의 3D 프린터를 통해 연구를 수행하였다. 5대의 3D 프린터는 PLA를 사용하는 프린터 2대, ABS를 사용하는 프린터 3대로 구성되어 있었다. 총 2.5시간 동안 측정이 진행되었으며 3D 프린터에서 2 m 떨어진 위치에서 SMPS를 이용하여 10~420 nm 범위의 UFP를 측정하였다. 실험은 총 2.5 시간의 기간 동안 4단계의 구간으로 나누어져 수행되었는데 구간1은 배경 농도, 구간2는 PLA 기반 프린터 2대만 가동, 구간3는 PLA 기반 프린터 2대와 ABS 기반 프린터 3대 모두 가동, 구간4는 감소 양상으로 나뉘었다. 수 농도의 경우 2대의 PLA 기반 프린터를 가동한 구간2(2.78×10^4 개/cm³)가 배경 농도인 구간 1(9.7×10^3 개/cm³)에 비해 1~4배 높았으며 36~86 nm의 크기의 입자에서 입자 수가 가장 크게 증가하였다. 2대의 PLA 기반 프린터와 3대의 ABS 기반 프린터를 가동한 구간3의 수 농도는 1.42×10^5 개/cm³로 2대의 PLA 기반 프린터만 작동하는 것보다 5배 높았고, 배경 농도보다 15배 높았다. 발생량의 경우 PLA를 기반으로 한 3D 프린터의 경우 2.0×10^{10} 개/분, ABS 기반으로 한 프린터의 경우

1.9×10^{11} 개/분의 UFP 배출량이 측정되었다. 이러한 두 가지 유형 모두 UFP "High emitters"로 구분될 수 있기에 상업적으로 이용 가능한 일부 3D 프린터를 필터링(환기)이 잘 안된 실내 환경에서 사용할 때 주의를 기울여야 한다.

아) Deng 등(2016)은 ABS와 PLA 두 필라멘트를 사용하여 3D 프린팅의 입자 방출을 연구하였다. FFC 기반의 3D 프린터를 사용하였으며, 측정 장소는 8 m³ 클린룸(4m×2m×1m)에서 실시되었다. 실시간 장비는 CPC가 사용되었으며 바닥에서 0.3 m 위에 위치하였다. 각 필라멘트는 세 가지 온도조건에서 인쇄되었는데 ABS는 200℃, 220℃, 240℃에서 인쇄되었고 PLA는 180℃, 200℃, 220℃에서 인쇄되었다. 입자 수 농도의 경우 ABS는 240℃에서 200℃에서 보다 100배 더 많이 검출(10^3 개/cm³ vs 10^5 개/cm³) 되었고 PLA는 220℃에서 180℃에서 보다 4~8배 더 배출 (2×10^3 개/cm³ vs 10^4 개/cm³)되었다. 이는 ABS가 PLA보다 몇 배 더 많은 입자 방출을 유발한다는 것과 입자 수 농도가 노즐 온도에 강한 영향을 받음을 보여준다. 또한, PLA에서 인쇄 전 노즐과 베드를 가열하는 예열과정은 그렇지 않은 인쇄과정과 비교할 때 ABS 필라멘트에 대해 입자 방출을 75% 감소시키는 것으로 나타났다.

자) Stabile 등(2017)은 FDM 기반의 저가형 데스크탑 3D 프린터를 사용하였으며, 40 m³의 실내 연구실에서 실험을 수행하였다. 측정하는 동안 문과 창문은 닫혔으며, 기계적 환기 장치 또한 정지되었다. 필라멘트는 일반 PLA 필라멘트를 비롯한 다양한 첨가물(Wood, Copper, Bamboo 등)이 포함된 PLA 필라멘트, 나일론 등 총 10가지 종류를 사용하였다. 실시간 장비는 CPC, DustTrak, NSAM, SMPS 등이 사용되었으며 샘플링 위치는 프린터에서 약 2 m 떨어진 1 m 높이의 책상 위였다. 위 연구에서 사

용된 모든 필라멘트들은 180~240℃ 사이에서 인쇄되어 평가되었으며, 10~30 mm 범위에서 입자를 방출하였다. PLA의 경우 220℃, 230℃, 240℃에서 각각 인쇄되었으며 이때의 최고 수 농도는 각각 5.15×10^3 개/cm³, 8.21×10^3 개/cm³, 4.87×10^4 개/cm³로 배출은 압출 온도의 영향을 크게 받았음을 알 수 있다.

차) Stefaniak 등(2019)은 실제 산업현장에서 3D 프린팅의 유해물질 배출 특성 연구 및 노출평가를 수행하였다. 연구는 총 4개 사업장(A사업장, B사업장, C사업장, D사업장)에서 각각 수행되었다. A사업장의 경우 40 m³ 크기 공간에 10개의 3D 프린터(FFF)가 존재하였으며 ABS, PLA 필라멘트를 사용했다. 샘플링 당시엔 10대 중 7대만 가동되고 있었다. 에어컨 장치를 제외한 환기장치는 없었다. B사업장은 76 m³에서 1대의 3D 프린터(UP BOX, Beijing)를 사용했다. 공간 내 환기장치는 있었지만 풍량은 제시되지 않았다. C사업장은 방 두 개로 구성되어 있었으며 각각의 방에 3D 프린터가 존재했다. 첫번째 방에는 PLA 필라멘트를 사용하는 FFF 방식과 액체 전도성 금속을 함께 사용하는 다중재료방식의 3D 프린터가 사용되었다. 방의 부피는 466 m³였으며 ACH는 2/hr이었다. 320 m³크기의 두번째 방에는 FFF기반 3D 프린터가 존재했으며, 난방 및 환기가 되고 있었다. D사업장에선 FFF 타입의 3D 프린터 10대를 44.5 m³에서 사용했으며 에어컨 등의 환기장치가 가동되고 있었다. 입자 측정의 경우, OPC, P-trak, FMPS가 사용되었다. VOC의 경우 RAE System을 이용하여 TVOC 측정을, TD-GC/MS를 이용하여 개별 VOC를 분석하였다. 각 사업장의 입자 수 발생량은 A사업장(9.7×10^{10} 개/분), B사업장(7.3×10^{10} 개/분), C사업장 (1.9×10^9 개/분, 5.5×10^9 개/분), D사업장(1.7×10^{11} 개/분) 중 D사업장에서 가장 높았다. TVOC의 경우 사업장에 따라 A사업장(3.3×10^6 µg/분), B사업장(1.2×10^5 µg/분), C사업장 (3.1×10^4 µg/분, 1.3×10^4 µg/

분), D사업장(1.1×10^4 $\mu\text{g}/\text{분}$)로 A사업장에서 가장 높았다. 맞춤형 환기설비를 사용한 곳의 경우 입자상 물질과 TVOC의 경우 각각 99.7%, 53.2% 줄일 수 있었다. 배출된 VOC 분석 결과 주목할 만한 농도변화를 보인 구간은 없었으며 개인 노출평가 결과는 NIOSH 기준 값 미만이었다.

2. 교육부 실태조사 자료 재분석 결과

교육부 실태조사 DB 5,754개소 중 중복학교와 기관명이 없는 경우 등 12개소를 제외한 5,743개소를 대상으로 교육부에서 기록한 결과 값은 임의로 수정하지 않고 재분석하였으며, 사용조건에 따른 신체영향 t-test 분석도 추가하였다.

1) 학교급별 3D 프린터 보유 학교 수 현황

조사대상 학교(10,816개교) 중 3D 프린터 보유 학교 수는 5,742개교(53.1%)인 것으로 나타났다. 학교급 별로 분석 결과 초등학교 1,961개교(34.2%)로 가장 많았으며, 중학교 1,841개교(32.1%), 일반고(자율고 포함) 1,211개교(21.1%), 특성화고 357개교(6.2%), 대학교 237개교(4.1%), 특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등) 95개교(1.6%), 특수학교 40개교(0.7%) 순인 것으로 나타났다.

표 6. 학교급별 3D 프린터 보유 학교수

학교급	조사대상 학교(개교)	3D 프린터 보유 학교	
		학교수(개교)	비율(%)
초등학교	5,231	1,961	34.2
중학교	2,886	1,841	32.1
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	1,211	21.1
	특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등)	95	1.6
	특성화고	357	6.2
특수학교	148	40	0.7
대학교	333	237	4.1
합계	10,816	5,742	100.0

2) 교육기관 소재지 현황

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 중 전국 시도별로 분석 결과 경기 983개교(17.1%)로 가장 많았으며, 서울 785개교(13.7%), 경북 481개교(8.4%), 전남 469개교(8.2%), 부산 460개교(8.0%), 경남 420개교(7.3%), 인천 337개교(5.9%), 대구 278개교(4.8%), 충남 271개교(4.7%), 강원 239개교(4.2%), 충북 233개교(4.1%), 전북 196개교(3.4%), 울산 167개교(2.9%), 대전과 제주는 각각 135개교(2.4%), 광주 115개교(2.0%), 세종 38개교(0.7%) 순인 것으로 나타났다.

표 7. 전국 시도별 3D 프린터 보유 학교수

전국 시도별	3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
서울	785	13.7
부산	460	8.0
대구	278	4.8
인천	337	5.9
광주	115	2.0
대전	135	2.4
울산	167	2.9
경기	983	17.1
강원	239	4.2
충북	233	4.1
충남	271	4.7
전북	196	3.4
전남	469	8.2
경북	481	8.4
경남	420	7.3
제주	135	2.4
세종	38	0.7
합계	5,742	100.0

3) 전국 3D 프린터 작업 교사 대상 신체 유증상 학교 현황

전국 시도별 3D 프린터 작업 교사 대상 신체 유증상 학교 274개교 중 서울 58개교(21.2%)로 가장 많았으며, 부산 44개교(16.1%), 경기 39개교(14.2%), 경북 27개교(9.9%), 경남 17개교(6.2%), 대전 13개교(4.7%), 전북과 광주는 각각 12개교(4.4%), 충북 11개교(4.0%), 충남 10개교(3.6%), 인천 9개교(3.3%), 울산과 강원 각각 6개교(2.2%), 전남 5개교(1.8%), 대구 4개교(1.5%), 세종 1개교(0.4%) 순이었으며, 제주에는 없는 것으로 나타났다.

표 8. 전국 시도별 3D 프린터 관련 신체 유증상 학교수

전국 시도별	3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
서울	58	21.2
부산	44	16.1
대구	4	1.5
인천	9	3.3
광주	12	4.4
대전	13	4.7
울산	6	2.2
경기	39	14.2
강원	6	2.2
충북	11	4.0
충남	10	3.6
전북	12	4.4
전남	5	1.8
경북	27	9.9
경남	17	6.2
제주	0	0.0
세종	1	0.4
합계	274	100.0

4) 지역 규모별 3D 프린터 보유학교 현황

지역 규모별로 크게 대도시, 중소도시, 농어촌(읍·면지역), 도서벽지로 구분하였다. 지역규모 구분 기준은 대도시의 경우 지방자치법에 따라 구분하였다. 지방자치법에는 특별시, 광역시, 특별시 및 인구 50만 이상 또는 면적 1000 km² 이상인 인구 30만 이상의 도시를 대도시로 규정하고 있다. 중소도시는 인구 최소 5만명 이상으로 구분하였으며, 농어촌은 읍면지역으로 구분하였다. 도서벽지는 도서·벽지 교육진흥법에서 정하고 있는 도서·벽지 지역으로 분류하였다.

지역 규모별로 분석한 결과 3D 프린터 보유 학교 5,742개교 중 대도시 3,139개교(54.7%)로 가장 많았으며, 중소도시 2,018개교(35.2%), 농어촌 383개교(6.7%), 도서벽지 202개교(3.5%) 순인 것으로 나타났다.

표 9. 지역 규모별 3D 프린터 보유 학교 수

지역 규모별	3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
대도시	3,139	54.7
중소도시	2,018	35.2
농어촌	383	6.7
도서벽지	202	3.5
합계	5,742	100.0

5) 교육기관의 3D 프린터 주용도 현황

교육기관의 3D 프린터 주용도 현황(다중응답)을 분석한 결과, 응답 학교 5,676개교 중 3,336개교(59.1%)가 '동아리활동'에 가장 많이 응답했으며, 그 다음 '정규 교과과정' 1,837개교(32.5%), '방과후 활동' 1,307개교(23.1%), '기타' 1,082개교(19.1%), '연구용' 980개교(17.3%), '자유학기제' 537개교(9.5%), '창업' 126개교(2.2%) 순으로 나타났다.

표 10. 학교 내 3D 프린터 주용도 현황(다중응답)

주용도	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%)
정규 교과과정	1,837	20.0	32.5
동아리 활동	3,336	36.2	59.1
방과후 활동	1,307	14.2	23.1
자유학기제	537	5.8	9.5
연구용	980	10.6	17.3
창업	126	1.4	2.2
기타	1,082	11.8	19.1
합계	9,205	100.0	162.8

6) 기술방식별 3D 프린터 사용 현황

(1) 재료압출방식(FDM, FFF)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 재료압출방식(FDM, FFF) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 재료압출방식 3D 프린터는 총 23,553대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 밀폐형 재료압출방식 13,984대(59.4%)로 개방형 재료압출방식 9,569대(40.6%)보다 다소 많이 사용하는 것으로 나타났다.

표 11. 학교 내 재료압출방식 3D 프린터 보유대수 현황

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
재료압출방식	9,569	40.6	13,984	59.4

학교급별 재료압출방식 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 229개교 대학교가 5,568대로 재료압출방식 3D 프린터를 가장

많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 84개교 특목고에서 818대, 326개교 특성화고에서 2,606대, 1,090개교 일반고에서 4,012대, 1,683개교 중학교에서 5,392대, 1,789개교 초등학교에서 5,105대, 36개교 특수학교에서 52대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 12. 학교급별 재료압출방식 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급		재료압출방식 3D 프린터(대)	학교수 (개교)
초등학교		5,105	1,789
중학교		5,392	1,683
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	4,012	1,090
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	818	84
	특성화고	2,606	326
특수학교		52	36
대학교		5,568	229
합계		23,553	5,237

학교급별 재료압출방식 3D 프린터 평균 보유대수를 분석한 결과, 학교당 평균 재료압출방식 3D 프린터 보유대수가 가장 많은 학교는 대학교로 학교당 23.5대인 것으로 나타났다. 그 다음으로 특목고 8.6대, 특성화고 7.3대, 일반고 3.3대, 중학교 2.9대, 초등학교 2.6대, 특수학교 1.3대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 13. 학교급별 재료압출방식 3D 프린터 보유대수 기술통계량

(단위: 대)

학교급	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위 범위	
초등학교	2.6	2.0	0.0	22.0	2.7	2.0	
중학교	2.9	2.0	0.0	34.0	2.9	3.0	
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	3.3	2.0	0.0	31.0	3.4	3.0
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	8.6	8.0	0.0	29.0	7.8	11.0
	특성화고	7.3	4.0	0.0	99.0	10.2	6.0
특수학교	1.3	1.0	0.0	3.0	0.8	1.0	
대학교	23.5	16.0	0.0	187.0	25.8	23.0	

학교급별 재료압출방식 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 학교급별 모든 학교에서 밀폐형 재료압출방식 3D 프린터를 개방형 재료압출방식 3D 프린터보다 더 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 14. 학교급별 재료압출방식 3D 프린터 유형별 보유대수

(단위: 대)

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
초등학교			5,105	1,986	3,119
중학교			5,392	2,361	3,031
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)		4,012	1,842	2,170
	특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등)		818	260	558
	특성화고		2,606	855	1,751
특수학교			52	20	32
대학교			5,568	2,245	3,323
합계			23,553	9,569	13,984

학교급별 재료압출방식 개방형 3D 프린터 평균 보유대수를 분석한 결과, 대학교가 9.5대로 가장 많았으며, 그 다음으로 특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등) 2.8대, 특성화고 2.4대, 일반고(자율고 포함) 1.5대, 중학교 1.3대, 초등학교 1.0대, 특수학교 0.5대 순인 것으로 나타났다.

표 15. 학교급별 개방형 재료압출방식 3D 프린터 보유대수 기술통계량

(단위: 대)

학교급	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위범 위	
초등학교	1.0	0.0	0.0	16.0	2.1	1.0	
중학교	1.3	0.0	0.0	34.0	2.4	2.0	
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	1.5	0.0	0.0	27.0	2.8	2.0
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	2.8	0.5	0.0	20.0	4.4	4.8
	특성화고	2.4	0.0	0.0	31.0	4.6	3.0
특수학교	0.5	0.0	0.0	3.0	0.8	1.0	
대학교	9.5	4.0	0.0	97.0	14.3	13.0	

학교급별 재료압출방식 밀폐형 3D 프린터 평균 보유대수를 분석한 결과, 대학교가 14.0대로 가장 많았으며, 그 다음으로 특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등) 5.9대, 특성화고 4.9대, 일반고(자율고 포함) 1.8대, 초등학교와 중학교 각각 1.6대, 특수학교 0.8대 순인 것으로 나타났다.

표 16. 학교급별 밀폐형 재료압출방식 3D 프린터 보유대수 기술통계량

(단위: 대)

학교급		평균	중앙값	최소값	최대값	표준편차	사분위범위
초등학교		1.6	1.0	0.0	22.0	2.1	2.0
중학교		1.6	1.0	0.0	26.0	2.2	2.0
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	1.8	1.0	0.0	21.0	2.2	2.0
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	5.9	2.5	0.0	26.0	6.8	6.0
	특성화고	4.9	2.0	0.0	79.0	8.6	6.0
특수학교		0.8	1.0	0.0	3.0	0.8	1.0
대학교		14.0	9.0	0.0	96.0	16.5	16.0

재료압출방식 3D 프린터 보유대수별 학교 수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 재료압출방식 3D 프린터 보유 학교(1,630개교, 31.1%)가 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 2대 보유 학교(1,094개교, 20.9%), 3대 보유 학교 (690개교, 13.2%), 10대 이상 보유 학교(471개교, 9.0%), 4대 보유 학교(446개교, 8.5%), 5대 보유 학교(308개교, 5.9%), 6대 보유 학교(239개교, 4.6%), 7대 보유 학교(165개교, 3.2%), 8대 보유 학교 (127개교, 2.4%), 9대 보유 학교(67개교, 1.3%) 순인 것으로 나타났다.

표 17. 재료압출방식 3D 프린터 보유대수별 학교수

보유대수	재료압출방식 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	1,630	31.1
2대	1,094	20.9
3대	690	13.2
4대	446	8.5
5대	308	5.9
6대	239	4.6
7대	165	3.2
8대	127	2.4
9대	67	1.3
10대 이상	471	9.0
합계	5,237	100.0

(2) 광중합방식(DLP,SLA)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 광중합방식(DLP,SLA) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 광중합방식 3D 프린터는 총 2,153대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 밀폐형 광중합방식 1,439대(66.8%)로 개방형 광중합방식 714대(33.2%)보다 더 많이 사용하는 것으로 나타났다.

표 18. 학교 내 광중합방식 3D 프린터 보유대수

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
광중합방식	714	33.2	1,439	66.8

학교급별 광중합방식(DLP,SLA) 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 619개교 대학교가 134대로 광중합방식 3D 프린터를 가장 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 448개교 중학교에서 150대, 431개교 초등학교에서 122대, 288개교 일반고에서 90대, 270개교 특성화고에서 54대, 87개교 특목고에서 18대, 10개교 특수학교에서 4대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 19. 학교급별 광중합방식 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급	광중합방식 3D 프린터(대)	학교수(개교)
초등학교	431	122
중학교	448	150
고등학교	일반고(자율고 포함)	90
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	18
	특성화고	54
특수학교	10	4
대학교	619	134
합계	2,153	572

학교급별 광중합방식 3D 프린터 평균 보유대수를 분석한 결과, 광중합방식 3D 프린터 보유대수가 가장 많은 학교는 대학교로 2.6대인 것으로 나타났다. 그 다음으로 특목고 0.9대, 특성화고 0.8대, 특수학교 0.3대, 초/중/일반고 각각 0.2대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 20. 학교급별 광중합방식 3D 프린터 보유대수 기술통계량

(단위: 대)

학교급		평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위범 위
초등학교		0.2	0.0	0.0	24.0	1.2	0.0
중학교		0.2	0.0	0.0	16.0	1.1	0.0
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	0.2	0.0	0.0	11.0	1.1	0.0
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	0.9	0.0	0.0	18.0	2.9	0.0
	특성화고	0.8	0.0	0.0	36.0	3.2	0.0
	특수학교	0.3	0.0	0.0	5.0	0.9	0.0
대학교		2.6	1.0	0.0	33.0	4.6	3.0

학교급별 광중합방식(DLP,SLA) 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 개방형과 밀폐형이 각각 50%인 특수학교를 제외한 나머지 학교들은 밀폐형 광중합방식 3D 프린터를 개방형 광중합방식 3D 프린터보다 더 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 21. 학교급별 광중합방식 3D 프린터 유형별 보유대수

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
초등학교			431	173	258
중학교			448	173	275
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)		288	120	168
	특목고 (과학고,마이스터고,외고 등)		87	16	71
	특성화고		270	95	175
특수학교			10	5	5
대학교			619	132	487
합계			2,153	714	1,439

광중합방식(DLP,SLA) 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 광중합방식 3D 프린터 보유 학교(189개교, 33.3%)가 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 2대 보유 학교(107개교, 18.7%), 5대 보유 학교 (98개교, 17.1%), 3대 보유 학교(58대, 10.1%), 10대 이상 보유 학교(32개교, 5.6%), 4대 보유 학교(31개교, 5.4%), 6대,8대 보유 학교(17개교, 3.0%), 7대 보유 학교(16개교, 2.8%), 9대 보유 학교(7개교, 1.2%) 순인 것으로 나타났다.

표 22. 광중합방식 3D 프린터 보유대수별 학교수

보유대수	광중합방식 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	189	33.3
2대	107	18.7
3대	58	10.1
4대	31	5.4
5대	98	17.1
6대	17	3.0
7대	16	2.8
8대	17	3.0
9대	7	1.2
10대 이상	32	5.6
합계	572	100.0

(3) 분말적층용융(SLS, SLM, EBM, SHS)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 분말적층용융방식(SLS, SLM, EBM, SHS) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 분말적층용융방식 3D 프린터는 총 214대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 개방형 분말적층용융방식 3D 프린터 (86대, 40.2%)보다 밀폐형 분말적층용융방식 3D 프린터(128대, 59.8%)를 많이 사용하는 것으로 나타났다.

표 23. 학교 내 분말적층용융방식 3D 프린터 보유대수

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
분말적층용융 방식	86	40.2	128	59.8

학교급별 분말적층용융방식 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 38개교 대학교가 57대로 분말적층용융방식 3D 프린터를 가장 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 19개교 중학교에서 51대, 15개교 초등학교에서 40대, 13개교 일반고에서 29대, 7개교 특성화고에서 24대, 3개교 특목고에서 11대, 1개교 특수학교에서 2대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 24. 학교급별 분말적층용융방식 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급		분말적층용융방식 3D 프린터(대)	학교수(개교)
초등학교		40	15
중학교		51	19
고등 학교	일반고(자율고 포함)	29	13
	특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등)	11	3
	특성화고	24	7
특수학교		2	1
대학교		57	38
합계		214	96

학교급별 분말적층용융방식 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 중학교/특목고/특성화고/대학교의 경우 밀폐형 분말적층용융방식 3D 프린터가 더 많았으며, 초등학교/일반고는 개방형 분말적층용융방식 3D 프린터가 더 많았다. 특수학교는 개방형과 밀폐형 각각 1대씩 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 25. 학교급별 분말적층용융방식 3D 프린터 유형별 보유대수

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
		초등학교		40	30
고 등 학 교	중학교		51	25	26
	일반고(자율고 포함)		29	19	10
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)		11	2	9
	특성화고		24	6	18
	특수학교		2	1	1
	대학교		57	3	54
합계			214	86	128

분말적층용융방식 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 분말적층용융방식 3D 프린터 보유 학교(51개교, 53.1%)가 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 3대 보유 학교(17개교, 17.7%), 2대 보유 학교(15개교, 15.6%), 4대 보유 학교(6대, 6.3%), 6대와 10대 이상 보유 학교(2개교, 2.1%), 7대와 8대 보유 학교(1개교, 1.0%) 순인 것으로 나타났다.

표 26. 분말적층용융방식 3D 프린터 보유대수별 학교수

보유대수	분말적층용융방식 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	51	53.1
2대	15	15.6
3대	17	17.7
4대	6	6.3
5대	1	1.0
6대	2	2.1
7대	1	1.0
8대	1	1.0
10대 이상	2	2.1
합계	96	100.0

(4) 재료분사(Polyjet, MJM)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 재료분사방식(Polyjet, MJM) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 재료분사방식 3D 프린터는 총 163대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 개방형 재료분사방식 3D 프린터(45대, 27.6%)보다 밀폐형 재료분사방식 3D 프린터(118대, 72.4%)를 많이 사용하는 것으로 나타났다.

표 27. 학교 내 재료분사방식 3D 프린터 보유대수

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
재료분사방식	45	27.6	118	72.4

학교급별 재료분사방식 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 54개교 대학교가 93대로 재료분사방식 3D 프린터를 가장 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 10개교 중학교에서 26대, 8개교 초등학교에서 20대, 7개교 일반고에서 14대, 4개교 특성화고에서 6대, 3개교 특목고와 특수학교에서 각각 2대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 28. 학교급별 재료분사방식 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급	재료분사방식 3D 프린터(대)	학교수(개교)
초등학교	20	8
중학교	26	10
고등학교	일반고(자율고 포함)	7
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	2
	특성화고	4
특수학교	2	1
대학교	93	54
합계	163	86

학교급별 재료분사방식 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 중학교/일반고/특목고/특성화고/대학교의 경우 밀폐형 재료분사방식 3D 프린터가 더 많았으며, 초등학교는 개방형 재료분사방식 3D 프린터가 더 많았다. 특성화고와 특수학교는 개방형과 밀폐형 각각 50%씩 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 29. 학교급별 재료분사방식 3D 프린터 유형별 보유대수

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
초등학교			20	11	9
중학교			26	9	17
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)		14	4	10
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)		2	0	2
	특성화고		6	3	3
특수학교			2	1	1
대학교			93	17	76
합계			163	45	118

재료분사방식 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 재료분사방식 3D 프린터 보유 학교(49개교, 57.0%)가 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 2대 보유 학교(19개교, 22.1%), 3대 보유 학교 (12개교, 14.0%), 4대와 7대 보유 학교(2개교, 2.3%), 8대와 10대 보유 학교(1개교, 1.2%) 순인 것으로 나타났다.

표 30. 재료분사방식 3D 프린터 보유대수별 학교수

보유대수	재료분사방식 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	49	57.0
2대	19	22.1
3대	12	14.0
4대	2	2.3
7대	2	2.3
8대	1	1.2
10대	1	1.2
합계	86	100.0

(5) 접착제분사(CJP,MJP,3DP)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 접착제분사방식(CJP,MJP,3DP) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 접착제분사방식 3D 프린터는 총 115대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 개방형 접착제분사방식 3D 프린터(28대, 24.3%) 보다 밀폐형 접착제분사방식 3D 프린터(87대, 75.7%)을 많이 보유한 것으로 나타났다.

표 31. 학교 내 접착제분사방식 3D 프린터 보유대수

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
접착제분사방식	28	24.3	87	75.7

학교급별 접착제분사방식 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 36개교 대학교가 75대 접착제분사방식 3D 프린터를 가장 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 5개교 중학교에서 12대, 4개교 일반고에서 10대, 4개교 초등학교와 5개교 특성화고에서 각각 7대, 2개교 특목고와 1개교 특수학교에서 각각 2대 순으로 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 32. 학교급별 접착제분사방식 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급		접착제분사방식 3D 프린터(대)	학교수(개교)
초등학교		7	4
중학교		12	5
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)	10	4
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	2	2
	특성화고	7	5
	특수학교	2	1
대학교		75	36
합계		115	57

학교급별 접착제분사방식 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 초등학교/일반고/특목고/특성화고/대학교의 경우 밀폐형 접착제 분사방식 3D 프린터가 더 많았으며, 중학교는 개방형 접착제분사방식 3D 프린터가 더 많았다. 특수학교는 개방형과 밀폐형 각각 50%씩 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 33. 학교급별 접착제분사방식 3D 프린터 유형별 보유대수

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
초등학교			7	3	4
중학교			12	8	4
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)		10	2	8
	특목고(과학고, 마이스터고,외고 등)		2	0	2
	특성화고		7	0	7
특수학교			2	1	1
대학교			75	14	61
합계			115	28	87

접착제분사방식 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 접착제분사방식 3D 프린터 보유 학교(32개교, 56.1%)가 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 2대 보유 학교(12개교, 21.1%), 4대 보유 학교(6개교, 10.5%), 3대 보유 학교(5개교, 8.8%), 10대 보유 학교(2개교, 3.5 %) 순인 것으로 나타났다.

표 34. 접착제분사방식 3D 프린터 보유대수별 학교수

보유대수	접착제분사방식 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	32	56.1
2대	12	21.1
3대	5	8.8
4대	6	10.5
10대	2	3.5
합계	57	100.0

(6) 고에너지직접조사 방식(DMT, DMD)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 고에너지직접조사 방식(DMT, DMD) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 고에너지직접조사 방식 3D 프린터는 총 17대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 개방형 고에너지직접조사 방식 3D 프린터(5대, 29.4%)보다 밀폐형 고에너지직접조사 방식 3D 프린터(12대, 70.6%)을 더 많이 보유한 것으로 나타났다.

표 35. 학교 내 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유대수 현황

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
고에너지직접 조사 방식	5	29.4	12	70.6

학교급별 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 6개교 대학교가 7대 고에너지직접조사 방식 3D 프린터를 가장 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 1개교 초등학교에서 3대, 2대를 보유한 학교는 1개교 중학교, 2개교 일반고, 1개교 특수학교인 것으로 나타났다. 1개교 특성화고는 1대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 특목고는 고에너지직접조사 방식 3D 프린터를 보유하지 않은 것으로 나타났다.

표 36. 학교급별 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급		고에너지직접조사방식 3D 프린터(대)	학교수(개교)
초등학교		3	1
중학교		2	1
고등 학교	일반고(자율고 포함)	2	2
	특목고 (과학고, 마이스터고, 외고 등)	0	0
	특성화고	1	1
특수학교		2	1
대학교		7	6
합계		17	12

학교급별 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 초등학교/일반고/대학교의 경우 밀폐형 고에너지직접조사 방식 3D 프린터가 더 많았으며, 중학교는 개방형 고에너지직접조사 방식 3D 프린터가 더 많았다. 특수학교는 개방형과 밀폐형 각각 50%씩 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 37. 학교급별 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 유형별 보유대수

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
		초등학교	3	0	3
		중학교	2	2	0
고 등 학 교		일반고(자율고 포함)	2	0	2
		특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등)	0	0	0
		특성화고	1	1	0
		특수학교	2	1	1
		대학교	7	1	6
		합계	17	5	12

고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유 학교(8개교, 66.7 %)가 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 2대 보유 학교(3개교, 25.0 %), 3대 보유 학교(1개교, 8.3%) 순인 것으로 나타났다.

표 38. 고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유대수별 학교수

보유대수	고에너지직접조사 방식 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	8	66.7
2대	3	25.0
3대	1	8.3
합계	12	100.0

(7) 판재적층(LOM, UAM)

3D 프린터 보유 학교 5,742개교 대상으로 판재적층(LOM,UAM) 3D 프린터 보유 현황을 분석한 결과, 판재적층 3D 프린터는 총 161대를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 개방형 판재적층 3D 프린터(74대, 46.0%)보다 밀폐형 판재적층 3D 프린터(87대, 54.0%)을 더 많이 보유한 것으로 나타났다.

표 39. 학교 내 판재적층 3D 프린터 보유대수

3D 프린터 기술방식	개방형		밀폐형	
	보유대수(대)	비율(%)	보유대수(대)	비율(%)
판재적층	74	46.0	87	54.0

학교급별 판재적층 3D 프린터 보유대수와 학교수를 비교한 결과는 아래 표와 같다. 12개교 대학교가 83대 판재적층 3D 프린터를 가장 많이 보유하고 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 13개교 중학교 41대, 5개교 초등학교

14대, 4개교 일반고 9대, 3개교 특성화고 7대, 1개교 특목고 5대, 1개교 특수학교 2대 순인 것으로 나타났다.

표 40. 학교급별 판재적층 3D 프린터 보유대수 및 학교수

학교급		판재적층 3D 프린터(대)	학교수 (개교)
초등학교		14	5
중학교		41	13
고등학교	일반고(자율고 포함)	9	4
	특목고(과학고, 마이스터고, 외고 등)	5	1
	특성화고	7	3
특수학교		2	1
대학교		83	12
합계		161	39

학교급별 판재적층 3D 프린터 유형별 보유대수 분석 결과는 아래 표와 같다. 초/중/대학교의 경우 밀폐형 고에너지직접조사 방식 3D 프린터가 더 많았으며, 고등학교는 개방형 고에너지직접조사 방식 3D 프린터가 더 많았다. 특수학교는 개방형과 밀폐형 각각 50%씩 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 41. 학교급별 판재적층 3D 프린터 유형별 보유대수

학교급		보유대수	합계	개방형	밀폐형
초등학교			14	5	9
중학교			41	18	23
고 등 학 교	일반고(자율고 포함)		9	7	2
	특목고(과학고, 마이스터고,외고 등)		5	4	1
	특성화고		7	4	3
특수학교			2	1	1
대학교			83	35	48
합계			161	74	87

판재적층 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 1대 판재적층 3D 프린터 보유 학교(12개교, 30.8%)가 가장 많은 것으로 나타났다. 그 다음으로 3대와 5대 보유 학교(6개교, 15.4%), 4,6,10대 이상(3개교, 7.7%) 순인 것으로 나타났다.

표 42. 판재적층 3D 프린터 보유대수별 학교수 현황

보유대수	판재적층 3D 프린터 보유 학교	
	학교수(개교)	비율(%)
1대	12	30.8
2대	5	12.8
3대	6	15.4
4대	3	7.7
5대	6	15.4
6대	3	7.7
9대	1	2.6
10대 이상	3	7.7
합계	39	100.0

7) 사용 소재

(1) 교육기관의 3D프린팅 사용 소재

교육기관의 3D프린팅 사용 소재를 분석한 결과, 응답 학교 4,132개교 중 3,722개교(80.8%)가 ‘열가소성 플라스틱(PLA(Polylactic acid) 필라멘트)’에 가장 많이 응답했으며, 그 다음 ‘열가소성 플라스틱(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트)’ 371개교(8.1%), ‘기타’ 179개교(3.9%), ‘열경화성 플라스틱(레진)’ 154개교(3.3%), ‘열가소성 플라스틱(기타 필라멘트)’ 107개교(2.3%), ‘열가소성 플라스틱(파우더)’ 44개교(1.0%), ‘세라믹(분말, 슬러리)’ 20개교(0.4%), ‘금속(금속 및 금속계 복합소재)’ 11개교(0.2%) 순으로 나타났다.

표 43. 교육기관의 3D프린팅 사용 소재 현황

3D 프린팅 사용 소재	학교수(개교)	비율(%)
열가소성 플라스틱(PLA(Polylactic acid) 필라멘트)	3,722	80.8
열가소성 플라스틱(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트)	371	8.1
열가소성 플라스틱(기타 필라멘트)	107	2.3
열가소성 플라스틱(파우더)	44	1.0
열경화성 플라스틱(레진)	154	3.3
금속(금속 및 금속계 복합소재)	11	0.2
세라믹(분말, 슬러리)	20	0.4
기타	179	3.9
합계	4,608	100.0

‘기타’에 응답한 내용을 살펴보면, 열가소성 폴리우레탄(TPU), 점성있는 식재료(초콜릿), 울트라로 답변한 내용이 있었다.

(2) 3D프린팅 사용 소재별 원산지 현황

학교 내 3D프린팅 사용 소재 중 가장 많이 사용하고 있는 PLA(Polylactic acid) 필라멘트에 대한 원산지 확인 결과는 아래 그림과 같다. 중국이 1,774건으로 가장 많았다. 단어 빈도 10건 이상을 살펴보면 대한민국(1,307건), 미국(631건), 대만(73건), 태국(38건), 일본(36건), 네덜란드(23건), 영국(10건) 순인 것으로 나타났다. 이외에 소재 확인 불가의 경우 27건으로 제품에 소재 원산지 표기가 되어 있지 않은 경우도 있었다. 추가 기재 사항에 일부 3D 프린터 작업 교사가 원산지가 ‘대한민국’이라고 표기했지만 중국에서 제조하고 국내에서 판매하는 소재의 경우도 혼동하여 ‘대한민국’으로 표기된 경우도 있기 때문에 단어 빈도 분석 결과는 다소 차이가 있을 수 있다.

옥수수 전분으로 만든 PLA(Polylactic acid) 필라멘트 특성으로 인해 일부 3D 프린터 작업 교사는 ‘친환경’ 소재로 소재 기타란에 표기한 경우도 있었다.

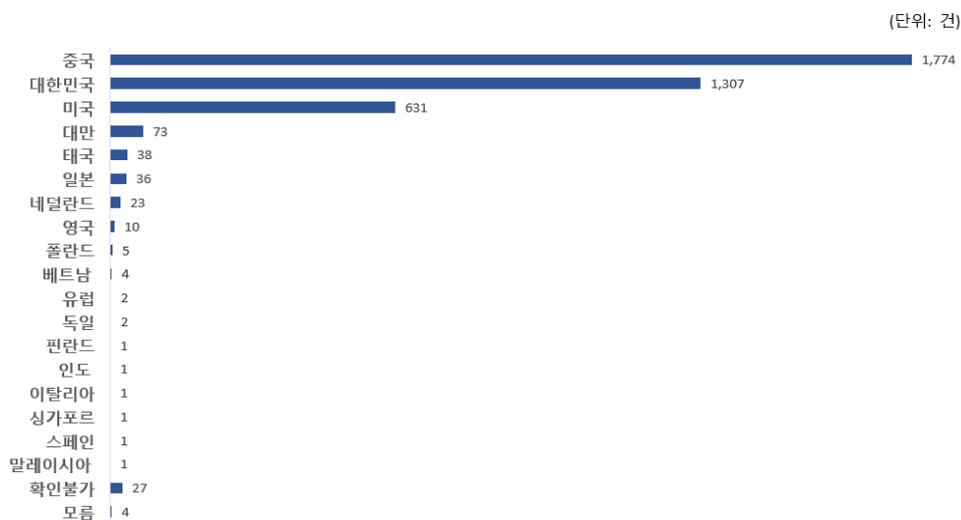


그림 1. 학교 내 3D프린팅 소재(PLA(Polylactic acid) 필라멘트) 원산지 현황

학교 내 3D프린팅 사용 소재 중 PLA(Polylactic acid) 필라멘트 다음으로 많이 사용하고 있는 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트에 대

한 원산지 확인 결과는 아래 그림과 같다. 단어 빈도 10건 이상을 살펴보면 중국이 120건으로 가장 많았다. 대한민국(117건), 일본(80건), 미국(13건) 순인 것으로 나타났다. 이외에 소재 확인 불가의 경우 1건으로 제품에 소재 원산지 표기가 되어 있지 않은 경우도 있었다.

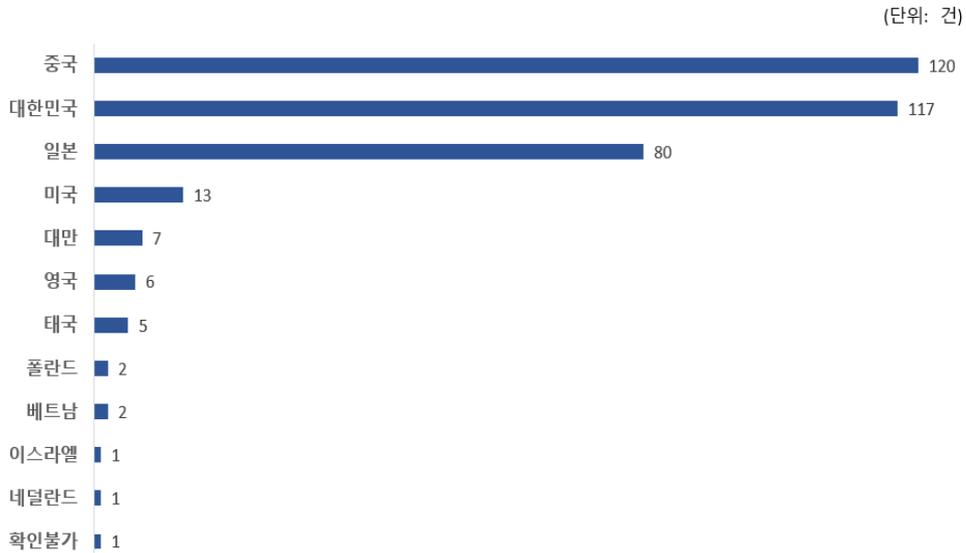


그림 2. 학교 내 3D프린팅 소재(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트) 원산지 현황

(3) 학교급 및 소재별 주요 3D 프린팅 사용량 현황

학교급별 월평균 3D프린팅 소재(PLA(Polylactic acid) 필라멘트) 사용량을 분석한 결과, 대학교가 9.8 kg으로 가장 많이 사용하는 것으로 나타났다. 그 다음으로 특목고 2.8 kg, 특성화고 2.4 kg, 일반고 1.1 kg, 중학교 1.0 kg, 초등학교 0.8 kg, 특수학교 0.6 kg순인 것으로 나타났다.

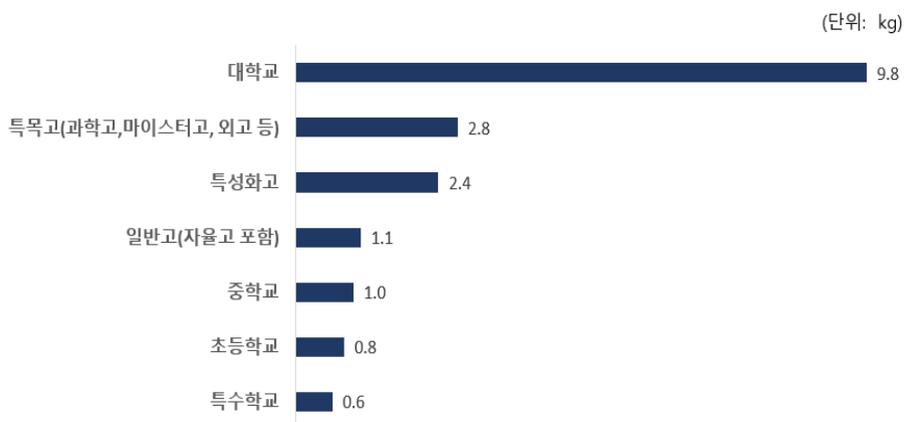


그림 3. 학교급별 월평균 3D프린팅 소재(PLA(Polylactic acid) 필라멘트) 사용량

학교급별 월평균 3D프린팅 소재(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트) 사용량을 분석한 결과, 대학교가 4.1 kg으로 가장 많이 사용하는 것으로 나타났다. 그 다음으로 특목고 4.0 kg, 특성화고 1.5 kg, 초등학교 1.3 kg, 일반고(자율고 포함) 1.1 kg, 중학교 0.9 kg, 특수학교 0.5 kg 순인 것으로 나타났다.

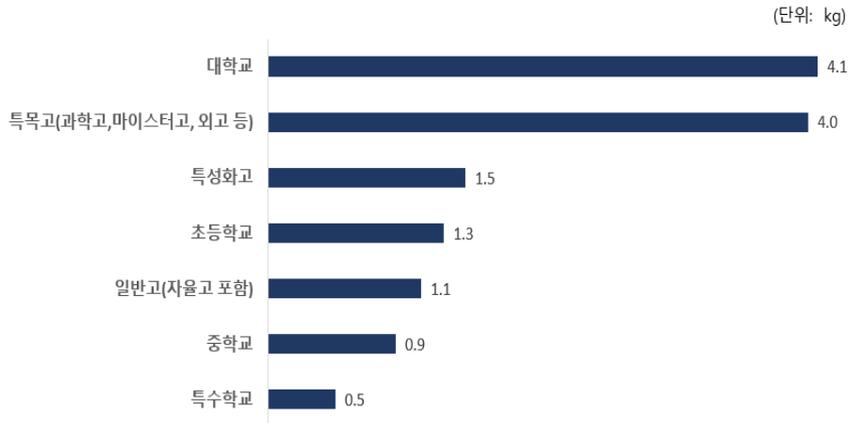


그림 4. 학교급별 월평균 3D프린팅 소재(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트) 사용량

8) 학교급별 월평균 3D 프린터 가동시간

학교급별 월평균 3D 프린터 가동시간을 분석한 결과, 대학교가 279.3시간으로 가장 긴 것으로 나타났다. 그 다음으로 특성화고 78.1시간, 특목고 57.2시간, 일반고 26.9시간, 중학교 20.2시간, 특수학교 14.2시간, 초등학교 13.7시간 순인 것으로 나타났다.

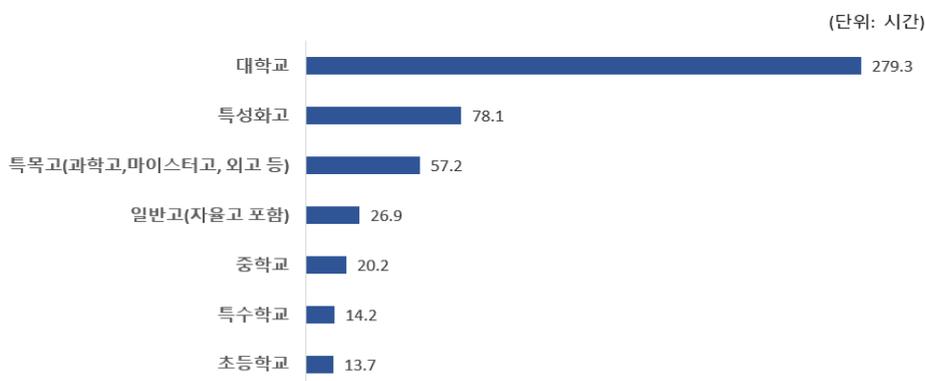


그림 5. 학교급별 월평균 3D 프린터 가동시간

9) 학교급별 월평균 3D 프린터 설치공간 내 상주시간

월평균 가동 중인 3D 프린터 설치공간에 들어가 있는 시간에는 설비셋팅, 소재투입, 완성물 탈착 등에 소요되는 시간을 포함한다. 학교급별 월평균 3D 프린팅 설치공간 내 상주시간을 분석한 결과, 대학교가 70.5시간으로 가장 긴 것으로 나타났다. 그 다음으로 특수학교 22.1시간, 특성화고 18.6시간, 특목고 13.0 시간, 일반고 11.4시간, 초등학교 9.9시간, 중학교 9.3시간 순인 것으로 나타났다.

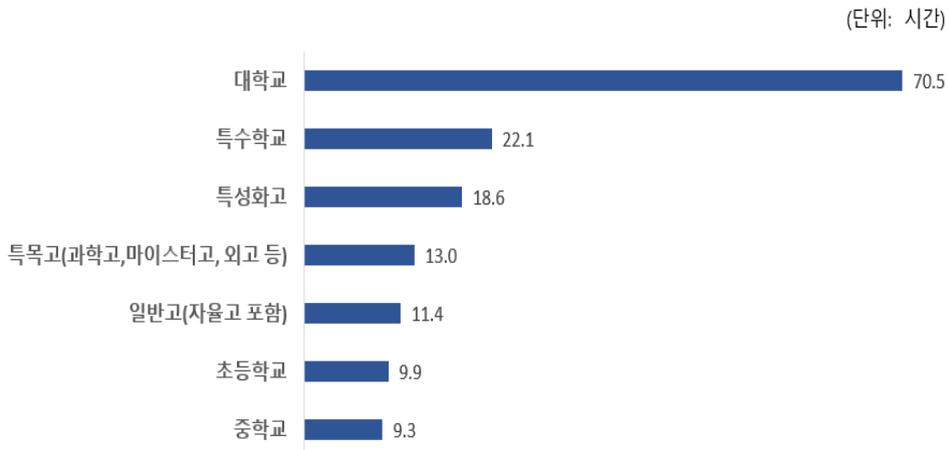


그림 6 학교급별 월평균 3D 프린터 설치공간 내 상주시간

10) 학교 내 안면보호구 구비 현황

학교 내 안면보호구 구비 현황(다중응답)을 분석한 결과, 응답 학교 4,050 개교 중 2,404개교(59.4%)가 ‘없음’에 가장 많이 응답했으며, 그 다음으로는 ‘보안경’ 1,623개교(40.1%), ‘보안면’ 91개교(2.2%) 순으로 나타났다.

표 44. 학교 내 안면보호구 구비 현황(다중응답)

안면보호구 종류	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%)
보안경	1,623	39.4	40.1
보안면	91	2.2	2.2
없음	2,404	58.4	59.4
합계	4,118	100.0	101.7

11) 후처리 작업

(1) 후처리 작업 유무

학교 내 후처리 작업 유무에 대해 ‘후처리 작업 있음’에 답한 학교는 1,202개교(23.7%), ‘후처리 작업 없음’에 답한 학교는 3,872개교(76.3%)인 것으로 나타났다.

표 45. 학교 내 후처리 작업 유무

후처리 작업 유무	학교수(개교)	퍼센트(%)
후처리 작업 있음	1,202	23.7
후처리 작업 없음	3,872	76.3
합계	5,074	100.0

(2) 후처리실 별도설치 여부

학교 내 후처리실 별도설치 여부에 대해 ‘별도 공간에 설치’에 답한 학교는 126개교(11.6%), ‘별도 공간 없이 3D 프린터 설치장소 또는 사무실 등에서 작업’에 답한 학교는 964개교(88.4%)인 것으로 나타났다.

표 46. 후처리실 별도설치 여부

후처리실 별도설치 여부	학교수(개교)	퍼센트(%)
별도 공간에 설치	126	11.6
별도 공간 없이 3D 프린터 설치장소 또는 사무실 등에서 작업	964	88.4
합계	1,090	100.0

후처리실 별도 설치 유무와 후처리 증상 유무와의 연관성을 파악하기 위해 카이제곱 검정을 실시한 결과 후처리실 별도 설치 유무와 후처리 증상 유무와의 통계적으로 연관성이 없는 것으로 나타났다($p=0.3504$).

12) 3D프린팅 작업 시 신체영향 경험

(1) 3D프린팅 작업 시 신체영향 경험 유무

3D프린팅 작업 시 신체영향 경험 유무에 대해 무응답 1개교를 제외하고 ‘신체 영향 있음’을 답한 학교는 274개교(4.8%), ‘신체 영향 없음’을 답한 학교는 5,467개교(95.2%)인 것으로 나타났다.

표 47. 3D프린팅 작업시 신체영향 경험 유무

신체영향 경험 유무	학교수(개교)	퍼센트(%)
신체 영향 있음	274	4.8
신체 영향 없음	5,467	95.2
합계	5,741	100.0

3D프린팅 작업 시 증상 유무별 재료압출방식 3D 프린터 평균 보유대수를 분석한 결과, 신체 유증상 학교 대상 재료압출방식 3D 프린터 평균 보유대수는 9.4대였으며, 신체 무증상 학교 대상 재료압출방식 3D 프린터 평균 보유대수는 3.8대인 것으로 나타났다. 데이터 갯수 5,000개 이상일 때 적용하는 Anderson-Darling normality test(정규성 검정)을 시행한 결과 유의확률(p-value)값은 2.2e-16으로 비모수 t-test(Wilcoxon rank sum test)를 실행하였다.

비모수 t-test 분석 결과 3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별 재료압출방식 3D 프린터 평균 보유대수는 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다($p=3.0e-06$).

표 48. 신체 증상 유무별 재료압출방식 3D 프린터 보유대수 기술통계량

(단위: 대)

3D 프린터 사용시 신체 증상 유무별	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위범 위
신체 유증상	9.4	3.0	0.0	120.0	18.8	7.0
신체 무증상	3.8	2.0	0.0	187.0	6.6	3.0

(2) 3D프린팅 작업 시 신체 증상 유무 및 소재별 사용량 분석 결과

3D프린팅 작업 시 증상 유무별 월평균 3D프린팅 소재(PLA(Polylactic acid) 필라멘트) 사용량을 분석한 결과, 신체 유증상 학교 대상 월평균 PLA 필라멘트 사용량은 5.0 kg이었으며, 신체 무증상 학교 대상 월평균 PLA 필라멘트 사용량은 1.5 kg인 것으로 나타났다. 비모수 t-test 분석 결과 3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별 월평균 PLA 필라멘트 사용량은 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 2.2e-16$).

표 49. 3D프린팅 작업 시 신체 증상 유무별 월평균 PLA(Polylactic acid) 필라멘트 사용량

(단위: kg)

3D 프린터 작업 시 신체 증상 유무별	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위범위
신체 유증상	5.0	1.0	0.0	75.0	10.4	2.0
신체 무증상	1.5	1.0	0.0	60.0	3.5	1.0

3D프린팅 작업 시 증상 유무별 월평균 3D프린팅 소재(ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트) 사용량을 분석한 결과, 신체 유증상 학교 대상 월평균 ABS 필라멘트 사용량은 3.6 kg이었으며, 신체 무증상 학교 대상 월평균 ABS 필라멘트 사용량은 1.2 kg인 것으로 나타났다. 비모수 t-test 분석 결과 3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별 월평균 ABS 필라멘트 사용량은 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다($p= 1.0e-05$).

표 50. 3D프린팅 작업 시 신체 증상 유무별 월평균 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트 사용량

(단위: kg)

3D프린팅 작업시 신체 증상 유무별	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위 범위
신체 유증상	3.6	3.0	1.0	22.3	10.4	2.0
신체 무증상	1.2	1.0	0.0	13.0	3.5	2.0

(3) 학교 내 3D 프린터 실 환기방식(다중응답) 분석 결과

학교 내 3D 프린터실 환기방식(다중응답) 분석 결과, 응답 학교 5,604개교 중 5,205개교(92.9%)가 ‘자연환기’에 가장 많이 응답했으며, 그 다음으로는 ‘전체환기(중앙공조)’ 767개교(13.7%), ‘3D 프린터 자체 필터 등 정화장치 장착(제조사)’ 562개교(10.0%), ‘국소배기장치 설치(또는 3D 프린터 자체를

흡후드 내부 설치’ 498개교(8.9%), ‘환기방식 없음’ 87개교(1.6%) 순으로 나타났다. 전체환기(중앙공조)에 ‘공기청정기’를 추가로 표기한 학교도 있었다.

표 51. 학교 내 3D 프린터실 환기방식(다중응답)

3D 프린터실 환기방식	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%) *
자연환기	5,205	73.1	92.9
전체환기(중앙공조)	767	10.8	13.7
3D 프린터 자체 필터 등 정화장치 장착(제조사)	562	7.9	10.0
국소배기장치 설치(또는 3D 프린터 자체를 흡후드 내부 설치)	498	7.0	8.9
환기방식 없음	87	1.2	1.6
합계	7,119	100.0	127.0

* 전체 응답자 중 각 항목을 선택한 응답의 비율

(4) 학교 내 3D 프린터 설치 공간 구분 현황 분석 결과

학교 내 설계 장소와 3D 프린터 설치 공간 구분을 분석한 결과, 응답 학교 5,440개교 중 3,759개교(69.1%)가 ‘공간 미구분(단순 파티션 구분도 포함)’에 가장 많이 응답했으며, 그 다음으로는 ‘공간 구분’ 1,137개교(20.9%), ‘혼합형’ 544개교(10.0%) 순인 것으로 나타났다. 기타 3D 프린터 설치 장소로 ‘과학실’, ‘과학준비실’, ‘멀티미디어실’, ‘융합과학실’, ‘정보실’, ‘창고’, ‘컴퓨터실’인 것으로 나타났다.

표 52. 3D 프린터 설치 공간 구분 유형별 학교수

구분	학교수(개교)	비율(%)
공간 미구분(단순 파티션 구분도 포함)	3,759	69.1
공간 구분	1,137	20.9
혼합형	544	10.0
합계	5,440	100.0

3D 프린터 설치 공간 구분 방식과 3D프린팅 출력시 신체 증상 유무 학교와의 연관성을 파악하기 위해 카이제곱 검정으로 분석하였으며, 그 결과는 아래 표와 같다. 3D 프린터 설치 공간 분리가 없는 학교에서는 3D프린팅 출력시 신체 무증상 학교가 4,367개교였으며, 신체 유증상 학교는 237개교인 것으로 나타났다. 3D 프린터 설치 공간 분리가 있는 학교에서는 3D프린팅 출력시 신체 무증상 학교가 1,100개교였으며, 신체 유증상 학교는 37개교인 것으로 나타났다. 카이제곱 검정 분석 결과 학교 내 설제 장소와 3D 프린터 설치 공간 구분 여부와 3D프린팅 출력 시 신체 증상 유무 간에는 연관성이 있는 것으로 나타났다($p=0.007$).

표 53. 3D 프린터 설치 공간 구분 여부와 3D프린팅 출력시 증상 유무 연관성 분석 결과

구분		무증상	유증상	X-squared	유의확률 (p-value)
공간분리 없는 학교	관찰빈도	4,367	237	7.193	0.007
	기대빈도	4,384.3	219.7		
공간분리 있는 학교	관찰빈도	1,100	37		
	기대빈도	1,082.7	54.3		

* 카이제곱 검정

(5) 신체 증상 유무별 3D프린팅 작업시 월평균 가동시간 분석 결과

3D프린팅 작업시 증상유무별 월평균 3D 프린터 가동시간을 분석한 결과, 신체 유증상 학교 대상 월평균 가동시간은 130.8시간이었으며, 신체 무증상 학교 대상 월평균 상주시간은 31.3시간인 것으로 나타났다. 비모수 t-test 분석 결과 3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별 3D 프린터 가동시간은 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 2.2e-16$). 스피어만 상관계수 (rho)는 0.7로 두 변수간에는 양의 상관관계로 3D 프린팅 가동시간이 길수록 월평균 3D 프린터 설치공간 내 상주시간도 길어지는 것으로 나타났다.

표 54. 신체 증상 유무별 3D 프린터 작업시 월평균 가동시간

(단위: 시간)

3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위 범위
신체 유증상	130.8	30.0	0.0	2843.0	331.7	7.0
신체 무증상	31.3	4.0	0.0	5800.0	145.5	20.0

(6) 신체 증상 유무별 3D프린팅 작업시 월평균 상주시간 분석 결과

3D프린팅 작업시 증상유무별 월평균 상주시간을 분석한 결과, 신체 유증상 학교 대상 월평균 상주시간은 47.4시간이었으며, 신체 무증상 학교 대상 월평균 상주시간은 11.8시간인 것으로 나타났다. 비모수 t-test 분석 결과 3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별 월평균 상주시간은 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 2.2e-16$).

표 55. 신체 증상 유무별 3D프린팅 작업시 월평균 상주시간

(단위: 시간)

3D 프린터 작업시 신체 증상 유무별	평균	중앙값	최소값	최대값	표준 편차	사분위 범위
신체 유증상	47.4	10.0	0.0	1835.0	165.0	22.8
신체 무증상	11.8	2.0	0.0	1200.0	37.8	10.0

(7) 학교 내 호흡보호구 구비 현황(다중응답) 분석 결과

학교 내 호흡보호구 구비 현황(다중응답) 분석 결과, 응답 학교 4,563개교 중 2,176개교(47.7%)가 'KF마스크'에 가장 많이 응답했으며, 그 다음으로는 '없음' 1,881개교(41.2%), '방진1급마스크' 567개교(12.4%), '방진2급마스크' 437개교(9.6%), '방독마스크' 364개교(8.0%), 방진특급마스크 231개교(5.1%) 순으로 나타났다.

표 56. 학교 내 호흡보호구 구비 현황(다중응답)

호흡보호구 종류	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%)*
방진1급마스크	567	10.0	12.4
방진2급마스크	437	7.7	9.6
방진특급마스크	231	4.1	5.1
방독마스크	364	6.4	8.0
KF마스크	2,176	38.5	47.7
없음	1,881	33.3	41.2
합계	5,656	100.0	124.0

* 전체 응답자 중 각 항목을 선택한 응답의 비율

(8) 3D프린팅 작업시 신체영향 증상 분석 결과

3D프린팅 작업시 신체영향 경험 유무에 대해 ‘신체 영향 있음’을 답한 학교는 274개교(4.8%), ‘신체 영향 없음’을 답한 학교는 5,467개교(95.2%)인 것으로 나타났다. 3D프린팅 작업시 신체 영향 증상 종류(다중응답) 분석 결과, 응답 학교 274개교 중 161개교(59.0%)가 ‘호흡기 자극’에 가장 많이 응답했으며, 그 다음으로는 ‘두통’ 152개교(55.7%), ‘눈 자극’ 121개교(44.3%), ‘짚은 재채기’ 94개교(34.4%), ‘피부자극’ 72개교(26.4%), ‘어지러움’ 42개교(15.4%), ‘알레르기’ 18개교(6.6%) 순으로 나타났다.

표 57. 3D프린팅 작업시 신체영향 증상 종류(다중응답)

신체영향 증상 종류	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%)*
호흡기 자극	161	24.4	59.0
짚은 재채기	94	14.2	34.4
눈 자극	121	18.3	44.3
피부 자극	72	10.9	26.4
알레르기	18	2.7	6.6
두통	152	23.0	55.7
어지러움	42	6.4	15.4
합계	660	100.0	241.8

* 전체 응답자 중 각 항목을 선택한 응답의 비율

13) 후처리 작업 시 신체영향 경험 유무

후처리 작업시 신체영향 경험 유무에 대해 ‘신체 영향 있음’에 답한 학교는 267개교(5.3%), ‘신체 영향 없음’에 답한 학교는 4,807개교(94.7%)인 것으로 나타났다.

표 58. 후처리 작업시 신체영향 경험 유무

후처리 작업시 신체영향 경험 유무	학교수(개교)	퍼센트(%)
신체 영향 있음	267	5.3
신체 영향 없음	4,807	94.7
합계	5,074	100.0

(1) 후처리 작업시 신체영향 증상 분석 결과

‘후처리 작업 있음’에 답한 학교 1,202개교 중 후처리 작업시 신체영향 경험 유무에 대해 ‘신체 영향 있음’에 답한 학교는 267개교(22.2%)인 것으로 나타났다. 후처리 공정시 신체 영향 증상 종류(다중응답)를 분석한 결과, 응답 학교 267개교 중 173개교(64.8%)가 ‘눈 자극’에 가장 많이 응답했으며, 그 다음으로는 ‘두통’ 171개교(64.0%), ‘호흡기 자극’ 164개교(61.4%), ‘젖은 재채기’ 24개교(9.0%), ‘피부자극’ 20개교(7.5%), ‘어지러움’ 14개교(5.2%), ‘알레르기’ 9개교(3.4%) 순으로 나타났다.

표 59. 후처리 공정 시 신체영향 증상 종류(다중응답)

신체영향 증상 종류	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%) *
호흡기 자극	164	28.5	61.4
젖은 재채기	24	4.2	9.0
눈 자극	173	30.1	64.8
피부 자극	20	3.5	7.5
알레르기	9	1.6	3.4
두통	171	29.7	64.0
어지러움	14	2.4	5.2
합계	575	100.0	215.4

* 전체 응답자 중 각 항목을 선택한 응답의 비율

14) 안전보건관리_공기질 평가

(1) 공기질 평가 실시 유무

학교 내 공기질 평가 실시 유무에 대해 ‘실시’에 답한 학교는 5,261개교 (91.6 %), ‘미실시’에 답한 학교는 480개교(8.4%)인 것으로 나타났다.

표 60. 공기질 평가 실시 유무

공기질 평가 실시 유무	학교수(개교)	퍼센트(%)
실시	5,261	91.6
미실시	480	8.4
합계	5,741	100.0

15) 3D 프린터 관련 안전보건 관리체계

3D 프린터 관련 안전보건 관리체계(다중응답)을 분석한 결과, 응답 학교 3,912개교 중 3,082개교(78.8%)가 ‘대표자 안전교육’에 가장 많이 응답했다. 그 다음으로는 ‘안전보건담당자 지정’ 2,613개교(66.8%), ‘종업원 안전교육’ 2,055개교(52.5%), ‘안전가이드라인 구비’ 1,453개교(37.1%) 순으로 나타났다.

표 61. 3D 프린터 관련 안전보건 관리체계(다중응답)

안전보건 관리체계	학교수(개교)	퍼센트(%)	케이스 퍼센트(%)
대표자 안전교육	3,082	33.5	78.8
종업원 안전교육	2,055	22.3	52.5
안전보건담당자 지정	2,613	28.4	66.8
안전가이드라인 구비	1,453	15.8	37.1
합계	9,203	100.0	235.3

공기질 평가 실시와 증상유무와의 연관성을 파악하기 위해 카이제곱 검정으로 분석하였다. 분석 결과 공기질 평가 실시와 증상유무와는 통계적으로 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다(p=1).

2. 3D 프린터 사용 교사 심층 인터뷰 결과

1) 심층 인터뷰 대상자의 특성

심층 인터뷰는 현장 측정 조사 대상 학교 중 인터뷰에 응한 3D 프린터를 사용하는 교사 10명을 대상으로 진행하였다. 심층 인터뷰 주요 질문을 시작하기 전에 대상자의 기본 사항(이름, 연령, 근무년수, 전공, 현재 하고 있는 일) 및 3D 프린터 주용도를 질문하였다. 심층 인터뷰 대상자 특성은 아래 표와 같다.

심층 인터뷰 대상자 구분은 크게 학교급 별로 4개 그룹으로 구분하였다. 1그룹은 중학교, 2그룹은 일반고, 3그룹은 특목고/특성화고, 4그룹은 대학교로 구분하였다. 인터뷰 참여자 성별은 모두 남성이었으며, 연령대는 20대 1명, 30대 3명, 40대 2명, 50대 3명, 60대 1명이었다. 근무년수는 최소 2년 4개월부터 최대 30년까지 있었으며, 평균 근무년수는 15년인 것으로 나타났다. 인터뷰 참여자의 3D 프린터 주용도는 대부분 동아리인 것으로 나타났다.

표 62. 심층 인터뷰 대상자 특성 및 3D 프린터 주용도

구분		소재지	근무년수	전공	3D 프린터 주용도
중학교	A	A1	3년 3개월	기술교육	정규교과/동아리
		A2	30년	물리	제품 제작
	B	서울	2년 4개월	물리	동아리(로봇/메이커)
	C	경기	20년	컴퓨터	정규교과/동아리
일반고	D	서울	30년	정보	동아리
	E	인천	25년	화학	동아리
	F	경기	18년	기술	정규교과
특목고/ 특성화고	G	경남	9년	물리교육	동아리/연구(발명)
	H	대전	10년	기계금속	정규교과/동아리
대학교	I	서울	6년	기계공학	시제품 제작

2) 주제별 심층 인터뷰 결과

(1) 주제1: 3D 프린터 위해성 인식도

가) 3D 프린터 위해성을 처음 접하게 된 시기

대부분의 교사들은 뉴스(방송 매스컴)를 통해 3D 프린터 사용 과학고 교사의 육종암 발병사례 보도를 보고 처음으로 3D 프린터가 인체에 유해하다는 사실을 알게 되었다고 응답하였다. 반면 교사 2명은 뉴스 보도 이전부터 3D 프린터 인체에 유해할 것으로 알고 있었다고 응답하였다.

〈중학교〉

“처음에는 뉴스 보고 알았습니다. 과학고 선생님들 사례요.”(A1학교)

“그 사건 전에도 문제가 있다라는 거는 알고 있었고요. 그 사건이 벌어지면서 치명적일 수도 있겠다라는 생각을 하게 됐죠.”(A2학교)

“작년인가? 뉴스 봐서 교사들이 무슨 암 걸렸다고..그렇기도 하고 3D 프린터 처음 교육받을 때 항상 환기하라고..4년 전에 그냥 제가 개인적으로 (3D 프린터 교육을) 취미로 들었어요.”(B학교)

“뉴스 매스컴에 3D 프린터로 인하여 유해성이 있다라는 게 나왔고, 아시는 분이 그것 때문인지는 모르겠지만.. 그걸 많이 하다가 돌아가셨다라는 이야기를 듣고..”(C학교)

〈일반고〉

“그거는 뉴스를 통해서.. 뉴스 보도와 아울러서 공문들이 막 오죠. 유해성이 있으니까 사용에 주의하라 환기를 잘 시키고 이런 것들이 왔죠. 공문이 왔지만 저희는 사용을 많이 안 하니까..”(D학교)

“신문기사에 과학고 교사의 특수암인가 그런 기사를 봤죠.”(E학교)

“몰랐는데 방송을 통해서 알게 되었어요.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“그게 기사를 보고 알았죠. 저희도.. ○○과학고 선생님 사건을 접하고 저희도 이게 조금 문제가 있구나 싶어서 그때 좀 이렇게 경각심을 느끼게 됐죠.”(G학교)
“당연히 처음부터 항상 유해할 거라고 생각은 했고요.”(H학교)

〈대학교〉

“우선 뉴스나 그런 데서 유해할 수 있다는 것은 아는데..”(I학교)

나) 3D 프린팅 작업에 대한 위해성 인식도

인터뷰 참여 교사 중 5명은 3D 프린팅 작업이 유해하다는 생각을 못했다고 응답하였다. 반면 참여 교사 중 3명은 정도의 차이는 있지만 3D 프린터 작업이 유해할 거라는 생각은 했던 것으로 응답하였다. 이외에도 주변 알고 있는 교사의 사망 및 발병 사례와 본인의 급격한 건강 악화로 인식하게 되었다고 응답한 교사도 1명 있었다.

〈중학교〉

“(뉴스 접하기 전에도) 조금 있긴 있었습니다.”(A1학교)
“제 생각에는 지금 PLA(Polylactic acid)만 계속 쓰고 있어서 크게 유해하지는 않은 것 같아요.” (B학교)
“(○○ ○○ 연구회에서) 돌아가신 분뿐만 아니라 아프신 분이 많이 생겼어요. 그걸 하시는 분들이..근데 그게 원인인지..하시는 분이 많이 있어 가지고...저를 뒤돌아보니까 그때 많이 아팠던 것 같아요.”(C학교)

〈일반고〉

“공문으로는 지금 제가 기억하는 건 필라멘트 자체가.. 소재 문제가 있다. 쓰지 말라고는 아니에요. 소재를 PLA(Polylactic acid)로 써라 그 다음에 환기를 잘 시켜라 뭐 그런 것들이 내려왔죠. 어쨌든 플라스틱 같은 소재니까 의심이 나죠.”(D학교)
“몰랐죠. 이론적으로만 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 좀 안 좋더라

는 것만 알고 있었죠.”(E학교)

“유해하다는 거는 몰랐죠. 이게 계속 지켜보면 재밌어요. 왔다 갔다 이렇게 해서 그냥 멍 때리듯이 불명이나 이런 거 하듯이 볼 때도 있었고, 근데 나중에 마스크를 통해서 보니까는 그게 좀 유해하다 해서..”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“전혀 몰랐어요. 그러니까 애들도 그냥 옆에서 연구하고 전혀 신경을 못 쓰고 있었거든요. PLA(Polylactic acid) 필라멘트가 생각보다 플라스틱 타는 냄새가 아닌 약간 고소한 듯한 냄새가 나고.. 그래서 그런 거에 대해서 거부감이 전혀 없더라고요. 약간 전분 타는 냄새, 플라스틱 타는 냄새 같은 역한 냄새가 아니라 그런 냄새가 나서..(중략) 근데 간혹 노즐이 막혔다가 과열돼가지고 순간 탁 타는 경우에 연기가 잠깐 팍 났다가 연기가 진짜 정말 조금 나거든요. 그래서 크게 느껴지는 경우는 없거든요.”(G학교)

“당연히 애는 유해하다 그렇기 때문에 밀폐형을 계속 고수했던 거고 이게 인체에 어떤 영향을 미쳐서 객관적으로 어떤 결과가 도출되는 거는 그 당시에는 없었기 때문에 몇 년 후에 어쨌든 뉴스에서 나왔나 하여튼 그런 걸 통해서 유해한 거가 맞긴 맞나 보구나라는 걸 접하게 됐죠.”(H학교)

〈대학교〉

“직접적으로 체감이 되지 않고 눈에 보이지 않으니까 유해할 수 있다는 사실은 2~3년 전부터 알게 된 것 같아요. (중략) 3D 프린터라는 게 일은 기계가 하는 거잖아요. 출력만 종이 프린터하듯이 버튼을 눌러 걸어 넣으면 제가 프린터와 쪽 같이 있는게 아니잖아요. 그래서 그렇게 유해하다는 생각은 많이 하지 않아요.”(I학교)

다) 3D 프린터 작업 중 의심되는 유해 공정과 물질

3D 프린터 사용 교사의 육종암 발병 사례 뉴스 보도 전후를 통틀어 3D 프린터 작업 중 의심되는 유해 공정과 물질로는 대부분의 교사들이 플라스틱 소재를 고온으로 가열하여 녹이는 과정에서 유해물질이 나온다고 응답하였다.

이외에 교사 2명은 출력시(후가공시) 미세먼지(미세플라스틱)이 나온다고 응답하였다.

〈중학교〉

“애초에 PLA(Polylactic acid)라고 해도 화학약품이 결국 들어 갔을테니까.. 그걸 열로 녹이는 과정에서 필연적으로 뭔가 나오겠거니 하고 생각을 하고 있었어요.”(A1학교)

“지금 밝혀진 것도 없는 거잖아요. 그 물질에 대해서는 잘 모르구요. 흡입하는 거니까.. 필라멘트를 가열해 가지고 액체로 만드는 과정에서 증발이 일어나서 그게 호흡으로 들어오게 되는 거겠죠. 경로는...PLA(Polylactic acid) 필라멘트 같은 경우에는 전분으로 만든다고 그러는데 만드는 과정에서 어떤 물질이 들어갔는지는 사용자들은 잘 모르죠. 전분이 문제가 발생할 거라고 생각하지 않고 필라멘트를 만들기 위해 전분 이외에 들어간 물질들이 있을 텐데 그런 물질들이 유해한 물질이겠죠. 그렇게 추정을 할 뿐이죠.”(A2학교)

“딱히 없었던 것 같아요. 미세먼지 정도는 발생할 수 있다고 들었는데..”(B학교)

“애네들이 플라스틱을 태우면서 거기에서 나온 연기인데..(중략) 또 신문 광고에는 필라멘트를 플라스틱이 아니라 식물성.. 옥수수라든가 식품으로 만들기 때문에 전혀 무해하다고 했기 때문에 안전하다고 생각했는데...그때 태우거나 녹였을 때 그때가 제일 위험하다고... 저는 화학 전공도 아니고 의학 전공도 아니고 컴퓨터 전공이고 프로그램 전공이에요. 피해 본 사람들의 이야기를 듣고 증상이 이렇다더라 뭐 그거 때문인지는 모르지만 하여튼 그걸 사용했더니 이런 증상이 나오더라..아..나도 비슷한데..나도 그런 증상이 일어나는데..그럼 그걸 사용하면 이런 증상들이 나오는구나 그래서 피해야 되겠구나 이렇게..”(C학교)

〈일반고〉

“재료 자체의 문제로 보거든요. 기계보다는요.”(D학교)

“후가공이요. 후가공에 의해서 많이 나오잖아요. 미세먼지가 더 많이 나오니까.. 흡입의 가능성이 있겠죠. 후가공은 절대 안 하고 있어요. 출력시(에도) 나온다고 생각하죠.”(E학교)

“만약 의심 들었으면 안 했겠죠. 왜냐하면 학교에서 글루건 같은 것도 쓰잖아요. 글루건도 잔뜩 있는데 저거 녹여서 쓰는데...저런 거는 학교에서 늘상 사용하는 거고 초딩들도 쓰고 가정에서도 쓰고 언제든지 사용하는 건데 저거하고 다름이 뭐가 있어요. 그러니까 그런 개념으로 알고 있는 거지.. 만약에 혹시나 저기에서 미세 뭐 이런 게 나오고 연구 결과가 안전 진단이 그렇게 걸렸다면 당연히 안 쓰죠. 제가 마스크용으로 알게 된 거는 초반에 가열될 때 노즐에서 미세 플라스틱이 나온다. 그거를 알게 돼서..”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“아는 건 없고요. 이게 플라스틱을 결국은 녹이는 거라서 당연히 그래 안 좋은 게 나올 수는 있는 거였구나라는 그런 생각을 다시 하는 거죠. 이제는..”

“저는 너무 필라멘트의 친환경 소재라는 거에 그냥 꽂혀 있어서 그냥 별 문제가 없겠거니하고 생각했는데.. 결과적으로는 플라스틱을 녹이는 상황인 거라서 거기서 유해물질이 나올 수가 있는 거구나 그리고 그때 저희 보통 이렇게 환기 장치 같은 게 전혀 안 되어 있었던 상황이라서 이것도 누적이 되면 생각보다 농도가 엄청 높겠구나 그런 고민을 했었죠.”(G학교)

“일단 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 합성 수지이기 때문에 일반 상식선에서 이거 당연히 그 수지를 녹여서 용융을 시켜서 뭔가를 조형을 하는 거기 때문에 당연히 기화되는 거에 대한 피해가 있을 거라고 생각을 해서 피했거든요. 그리고 학교에서 선택할 수 있는 게 그 당시에는 PLA(Polylactic acid)밖에 없었고.. (중략) ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 어쨌든 유해성이 높다. 저는 (PLA(Polylactic acid)도 유해성이) 있다고 생각했어요. 있는데도 어쩔 수 없이 써야 되는 선택이여서 소재가 그거 밖에 없으니까 그나마 좀 유해성이 적다라고 하는 게 그거니까.. (PLA(Polylactic acid)) 소재 자체는 친환경이겠죠. 소재 자체는 옥수수 전분 가루든 녹말 가루든 하여튼 그런 곡물에서 추출을 했으니까 친환경이겠지만.. (중략) 어쨌든 본딩 성분이 들어가 있었을 거라고 생각을 하고 당연히 그 성분만큼은 특별히 유해할 수 있다. 애를 태웠을 때는 기화되면서 안 좋은 게 나올 수 있을 거라고 생각을 해요”(H학교)

〈대학교〉

“PLA(Polylactic acid) 재료를 녹이는 거잖아요. 녹이면서 눈에 보이지는 않지만 뭔가가 나올 것 같긴 해요. 냄새도 좀 나기는 하거든요. 그 부분이 유해하면 유해하다고 생각하고..레진 같은 경우(SLA 방식) FDM보다는 눈에 보이고 촉감도 만지면 끈적끈적하고 화학제품이니까 안 좋다는 인식이 더 크긴 하거든요. 냄새는 나지 않지만 FDM보다는 거부감이 있고 촉감적으로도 그렇고 시각적으로도 그렇구요.”(I학교)

라) 정부의 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인과 온라인 안전 교육

교사 3명은 정부의 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인을 훑어봤다고 응답하였다. 보다가 말거나 아예 읽어 보지 못했다고 응답한 교사가 4명이었으며, 이유는 불필요한 내용이 많다거나 받아 본 적이 없기 때문이라고 응답하였다. 읽어 봤는다는 교사 중 작업 환경 개선에 도움을 받았다는 교사는 1명, 번거로운 절차가 기술된 내용으로 불만을 표시한 교사 1명이 있었다. 또한 올해 7월 3D프린팅 안전 이용 가이드라인 내용이 보완되어 개정판이 배포된 사실에 대해 인터뷰 참여 교사 모두 알지 못했다.

온라인 안전 교육을 들어보지 않았다고 응답한 교사는 3명이었으며, 교사 1명은 들어보긴 했지만 구체적인 내용을 답변하지 못하였다. 3D 프린터 실태 조사원이 들으라고 해서 잠깐 들어봤다고 응답한 교사가 1명 있었다.

3D 프린팅 출력과정 중 나노입자가 나온다는 사실을 알고 있는지에 대한 질문에 모든 교사들이 모른다고 응답하였다.

〈중학교〉

“네. 읽어봤습니다. 허무맹랑하죠. 저거를 하나 돌리겠다고 방진 마스크 같은 걸 다 쓰고 장갑을 끼고 기계식 환기를 다 설치하고 그 다음에 이것 저것 하라고 하는데...그걸 다 일일이 하고 아이들이 쓰기에는 잠깐 들어가서 작업 거는 게 한 5분도 안 걸리거든요? (중략) 작업 걸러 들어가는 사이에 그거를 다 하고 들어가야 된다는 게 조금 황당하죠. 애들이 실제로 모형이 만들어지는 걸 보지도

않고 그 옆에 있지도 않는데 그 작업을 꼭 해야 되나라는 생각이 들면서 귀찮아지는 거죠. 애들을 관리를 하려면..”(A1학교)

“(3D 프린팅 안전 이용 가이드라인) 보통 공문으로 보냈다면 받기는 했겠죠. 근데 그런 걸 주의깊게 보지는 않아요. (3D 프린팅 온라인 안전교육) 근데 그 위에서 내려 오는 건 뻔해요. 일단 공문으로 안 내려온 것 같은데 일단 제가 다 보기는 하는데..보통은 그냥 안 봐요. 한두 번 경험하는 것도 아니고..”(A2학교)

“비치만 해놓고요. 훑어 보기만.. 가동 전후로 30분 이상 환기. 가동시에는 상주하지 않거나 뭐 이런 식으로.. (미세먼지 이외에 나노입자에 대해) 전공이 물리다 보니까 나노 입자는 알고는 있는데..(안전 교육에서 나노 입자에 대한 설명 들은 적이 없는지에 대해) 네. 나노입자면.. 환경오염의 주범인 미세 플라스틱보다 더 작으니까.. 그거 보다 더 미세한 거니까.. 그러면 더 안 좋을 것 같은데요.”(B학교)

“하도 많아서..(중략) 과기부 것도 다 찾아보고 또 공문에 오는 것도 다 보고..저렇게 40대 (3D 프린터)를 가지고 있지만, 매뉴얼을 보고 나서 내가 견뎌낼 수 있는 프린터 대수가 4~5대다라고 본거죠. 그 매뉴얼 때문에 제가 그 기준을 잡을 수 있었던 거죠. 시간도 결정하고 환경도 내가 결정할 수 있고..(나노입자에 대해) 전혀..컴퓨터는 요즘에 나오는 나노칩은 알아도..”(C학교)

〈일반고〉

“여러 가지 막 오는데요. 이것 저것 하다 보니까 자세히는 못 봤어요. 코팅까지 해 가지고 정리하면서 그냥 수납장에 넣어 놨는데.. (나노입자에 대해) 들어 보지는 못했지만..아마 그럴 수도 있다고 생각됩니다.”(D학교)

“조사하고 비치하라고 나오고 했었어요. 보다가 말았어요. 별 필요 없는 내용들이 많고요. 제가 봤을 때는 안전 관련이잖아요. 우리가 물질의 구성이라든가 이런 건 별로 전혀 도움이 되지 않아요. 우리가 관리하는데 도움이 될 만한 거 예를 들어서 환기구는 어디다 설치하고 할 때는 맞바람 치게 어떻게 해야 된다 이런 것들은 좋아요. 우리가 인쇄할 때 잉크의 성분이 뭔지는 이거는 안 하잖아요. 우리가 프린트 사용 방법이라든가 주의사항은 봐야 되지만 잉크의 성분이 뭐가 있다 이런 건 전혀 의미가 없고, 잉크가 유해하다면 유해하기 때문에 이런 건 안 해야 된다 이렇게 간략하게 하면 좋을 것 같아요. 나노입자? 초미세먼지가

거기까지 포함이 되는지 모르겠고요. 그건 몰랐어요.”(E학교)

“(온라인 안전교육 관련) 누가 여기 한 번 왔었거든요. 실태조사한다는 분이 그거 들으라고 해서 잠깐 들었어요. 바빠 가지고.. 안전교육 연수 받아야죠. 연수로 나온 건 아니잖아요. (나노입자 관련) 모르겠어요. 저는 일단 미세 플라스틱이 나온다. 미세 크기가 거의 나노 크기 아닌가요. 저는 그렇게 알고 있는데.. 그런 것에 대해서 깊이 생각은 하고 있지 않아서요. 그냥 미세 플라스틱이 나온다. 나노 크기인지 어느 크기인지 저는 확인은 안 해봤으니까 ”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“그냥 한번 (3D 프린팅 안전 이용 가이드라인) 쪽 훑어는 봤는데..그냥 너무 최소한의 뭐랄까.. 온라인 안전 이용 연수 관련해서 뭔가 나온다는 거는 얘기는 들었던 것 같습니다.(나노입자 관련) 아니요. 전혀 들어본 적이 없는데요. 저는 그냥 이렇게(초미세먼지)..”(G학교)

“(3D 프린팅 안전 이용 가이드라인 개정판) 그거 몰랐어요. 보급이 문제인 것 같아요. 보급을 좀 얼마나 적극적으로 하느냐 그리고 저것도(1차 3D 프린팅 안전 이용 가이드라인)도 보셨겠지만 제가 다 출력한 거거든요. 책자를 주고 포스터나 이런 것도 주면 되게 좋거든요. 그냥 파일만 준 거예요. 하다 못해 안전 스티커 같은 거 있잖아요. 그것도 저희가 다 만드는 거예요. 주지 않아 가지고.. (나노입자 관련 질문에) 그거(나노입자)는 정확하게 모르겠어요. 그거는 몰랐어요. 그냥 추상적으로 눈에 보이지 않는 미세한 입자일 것이다. 그거를 총칭해서 미세먼지 형태이지 않겠냐라고만 생각을 했지.. 그걸 조금 더 세분화해서 나노 입자의 정말 작은 그렇게까지는 생각한 적은.. 그렇게 단어나 그걸 들어보지 못한 것 같아요.”(H학교)

“(3D 프린팅 온라인 안전교육) 어렵듯이 본 것이 있는 것 같아요. (중략) 수많은 기관에서 뭔가를 만들고 하실텐데 이거를 교육기관에 할 때는 어쨌든 교육청에서 다 내려와야 돼요. (중략) 교육기관에는 딱 이렇게 정리가 돼서 아이들한테 배포하는 거 있잖아요. 쉽게 우리 손씻기 어떻게 해요. 이런 것처럼 이거를 의사 수술 전에 씻는 방법 영문으로 써서 주지 않잖아요. 그렇게 안내가 왔으면 좋겠어요. 그리고 포스터도 주고.. 저거(3D 프린팅 안전 이용 가이드라인)를 또 비치

해야 된다는 거예요. 그래서 한 건데 그러니까 요식행위죠.”(H학교)

〈대학교〉

“(온라인 안전교육 관련) 있다라는 건 들었는데 어디서 듣는지는 확실히 모르겠네요. 공공기관에서 있는 그런 거는 제가 찾아보지 않았어요. 이전에 한 번 기관에서 왔었거든요. 전체적인 교육이라기보다는 어떤 필요한 시설이나 장비라든지 그런 대략적인 프로세스 그런 걸 알려 줄려고 오신 적이 있어요. 한 2년 전인가 3년 전에 한 번 왔었어요. (3D 프린팅 안전 이용 가이드라인) 따로 받아본 적은 없어요. 홍보가 부족한 거 같네요.”(I학교)

(2) 주제2: 3D 프린터 및 소재(필라멘트)

가) 본인이 생각하는 안전한 3D 프린터 및 소재(필라멘트) 기준

안전한 3D 프린터에 대해 대다수 교사가 밀폐형이거나 필터가 장착된 밀폐형 3D 프린터가 안전하다고 응답하였다. 안전한 소재(필라멘트) 관련해서는 교사 4명은 PLA(Polylactic acid)가 옥수수 전분으로 만들어져 친환경이라고 볼 수 없지만 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재보다 PLA(Polylactic acid) 소재가 낫다고 응답하였다. 교사 2명은 PLA(Polylactic acid)가 옥수수 전분으로 만들어진 친환경 소재로 알고 있다고 응답하였으며, 이들 중에서 PLA(Polylactic acid)가 친환경 소재라는 인식은 기술·가정 교과서와 제품 박스에 ‘친환경’으로 표기되어 있기 때문이라고 응답한 교사도 1명 있었다.

이외에도 소재보다 환기가 중요하다고 응답한 교사도 1명 있었으며, 밀폐형 3D 프린터기보다는 음압식 국소배기장치 같은 구체적인 환기 시스템을 말한 교사도 1명 있었다.

〈중학교〉

“일단은 밀폐형이 확실히 그런 것 같고, 그 안에 필터가 있냐 없냐 차이가 좀 큰 것 같아요. 일단 일차적으로 한번 걸러주는 필터가 지금 저희가 산 건 있긴

있더라고요. 있어서 그나마 좀 괜찮은 것 같은데.. 노출형 하면 필터가 없잖아요. 그래서 그거는 조금 애매할 것 같고 밀폐형에다가 필터 있는 거 쓰면 그래도 좀 안전하지 않나. (필터 교체 주기에 대해) 한 한기에 쓴다 하면 6개월에 한 번씩 바꿔주는 게 안전하지 않을까..(업체 권장 교체 주기에 대해 그건 제가 아직 설명서를 제대로 안 읽어서.. (3D 프린터 소재 관련) PLA(Polylactic acid)가 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)보다는.. 옥수수 전분인가. 그걸로 만들었다고 그러더라고요. 그래서 그게 그래도 낫지 않나 생각을 하고 있어요”(A1학교)

“3D 프린터 내에서 증기를 완전히 잡아 주는 필터를 장착해 가지고 밖으로 안 내보내게 한다든지.. 소재보다는 환기시키는게 중요하죠. 그리고 공간 자체가 좀 넓은 게 어쨌든 확산이 되니까 그게 필요할 거고.. 환기가 가장 필요할 것 같아요.”(A2학교)

“저는 없는 거 같아요. 프린터의 그것보다는 소재가 더 중요하다고 생각해요.(PLA(Polylactic acid)가) 재료도 옥수수니까.. 유해 가스는 안 나오지만 그래도 작동상 미세먼지는 배출된다고 그 정도로 알고 있어요.”(B학교)

“당연히 교육부에서 제시하는 게 제일 안전하죠. 거기에 나오는 유해물질을 다 정화시킬 수 있는 3D 프린터기.. 밀폐된 그런 것들은 몇 천만원이에요.”(C학교)

〈일반고〉

“소재를 규격품을 써야 한다고 생각하고요. 그 다음에 이런 환기라든가 또 학생들에 대한 안전교육 이렇게 필요하다고 생각합니다.”(D학교)

“(3D 프린터는) 밀폐형이 안전하겠죠. (소재는) PLA(Polylactic acid)가 안전한 게 아니라 약간 (ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)보다) 낫다는 거겠죠. 약간 괜찮다는 거지..(중략) 플라스틱이 친환경일 리가 있겠습니까? 친환경이라는 거는 보통 얘기할 때는 이거보다 조금 나은 거를 친환경이라고 하잖아요. 전공 때문에 그런지 몰라도 그 정도는 그렇게 생각하고 있어요. 예전에도 석탄보다는 석유 나왔을 때 조금 친환경이라고 얘기했다고 그런 것도 있으니까..”(E학교)

“소재가 일단 개발이 돼야죠. 원천적으로.. 그게 아니면 여기 오픈해도 되잖아요. 옥수수 전분가루라고 해서 친환경이라고 해서 쓰는 거예요. 저기 글루건이나

저런 거는 친환경은 아니잖아요. 그래서 학생들 교육 현장에서 교사의 양심상 그래도 친환경 제품을 사용해야지 제품의 어떤 퀄리티를 높이기 위해 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)나 이런 걸 쓸 수는 없잖아요. 저도 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 잠깐 쓰려고 했는데 냄새가 너무 역한 거예요. 그래서 이거는 도저히 학교에서는 할 수 있는게 아니다 해서 당연히 교사의 양심상 PLA(Polylactic acid)를 쓰는 거죠. 상품 박스에 친환경 옥수수 전분가루로.. 그리고 교과서(기술·가정 교과서)에도 나와요. 여기 친환경 수지라고 되어 있어요. 옥수수 전분하면 당연히 먹는 건데.. 그걸로 만든다고 하니까 의심할 여지는 없죠. 그리고 사실 옥수수 전분가루로 만들었으니까 다른 거보다는 친환경인가 보죠. 그렇게 얘기하면 그 사람들이 그렇게 주장할 수 있는거죠.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“친환경이라고 하기에는 그렇고..아무튼 옥수수 전분 이런 식으로 해 가지고..(중략) 유해물질이 안 나올 수 없는 거 아닌가요. 저희는 여기 했던 것처럼 진짜로 밀폐식이라고 해도 실제로 그 내부에는 계속 뭔가 쌓여 있을 테고.. 그래서 차라리 환기 형태로 음압으로 계속 이렇게 뿜어주는 형태가 가장 안정적인 것 같긴 한데.. 근데 그게 세팅이 또 그렇게 쉬운 세팅은 아닐 것 같고.. 저희도 선생님들하고 고민하다가 그냥 저 세팅을 그래도 돈 들여서 한 건데.. 아무튼 저런 상태가 제일 낫지 않을까요. 고온으로 녹이는 상황인 거라서 어차피 나온다. 안 나오는데 제일 좋긴 하겠지만 그런 소재가 있느냐가 문제인 거죠.”(G학교)

“아무래도 저는 그때 회사를 오래 다니다가 학교를 왔기 때문에 그런 거에 대한 안전 의식이나 인식에 대한 거는 워낙 교육을 많이 받아왔고 그래서 저거를 쓰려면 저는 그냥 자연스럽게 당연히 밀폐형을 써야 된다고 생각을 했어요. (가격은) 10배 넘게 차이가 났었어요. 하지만 그거는 이런 거죠. 비가 많은 지역에서 운송도구가 필요한데 오토바이는 싸지만 비를 계속 맞아야 되고 자동차는 비를 피할 수 있으니까 비싸더라도 자동차를 사야 된다는 그런 선택을 했던 것 같아요. 당연히 이거 오픈용으로 하면 안된다고 생각을 했어요.”(H학교)

〈대학교〉

“PLA(Polylactic acid)가 옥수수 친환경 재료로 친환경이라고 하기는 좀 그렇지

만 그런 거라서 괜찮고 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 그래서 아니라서 좀 더 나쁘다라고 들었던 것 같아요. (중략) 최소한의 시간으로 있으라고 한 건데.. 필요하다면 국소배기장치 같은 걸 하고 헤파필터가 기본적으로 있는 장비이긴 하거든요.”(I학교)

나) 안전한 3D 프린터와 소재(필라멘트)를 사용하기 위한 노력

3D 프린터 소재 관련해서 교사 모두 PLA(Polylactic acid) 소재만을 사용한다고 응답하였으며, ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 소재 관련 사용을 중지하거나 권유하지 않는 것으로 방침을 바꿨다고 응답한 교사는 2명 있었다.

〈중학교〉

“ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 필라멘트가 일단은 위험하다라는 얘기가 되는 거니까 일단 저희는 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 사용하지 않고 PLA(Polylactic acid)만 사용하고 있으니까 그 위험도는 적을 거라고 생각을 하고..꼭 3D 프린팅 작업을 해야 한다면 환기에 유의를 해서 밀폐된 공간이 아닌 공간에서 작업을 하는 게 그렇게 해야 된다고 생각합니다.”(A2학교)

〈일반고〉

“학생들 그런 유해성 문제 생각해서.. 또 이쪽 회사에서도 처음에 권하고 해서..건강을 위해서 이거(PLA(Polylactic acid)) 쓰는게 좋다해서.. (선택) 재질이 옥수수 그런 재질로 했기 때문에..”(D학교)

“(PLA(Polylactic acid))를 써서 안전한게 아니고 3D 프린터실에) 안 들어가니까 안전하다. 애들은 (출력 과정) 보고 싶어 해요. 지금은 다 내보내고 저도 빨리 나와요.”(E학교)

“저는 그거 딱 눌러놓고 바로 문 닫고 환기장치를 틀고 했었죠. 제 건강이 중요하니까 제 목숨을 담보로 이렇게 할 수 없는 거니까요.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는...저희가 이게 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)구나 해서 쓴 거는 거의 없는 것 같고 이게 같이 섞여서

써 버리는 경우가 있었더라고요. 예전에 보니까.. 의도적으로 쓴 건 아닌 것 같긴 한데... 저희는 사건이 터지고 나서 바로 다 거의 아예 중지시키고 싹 다 바꿨거든요.(G학교)

〈대학교〉

“ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 사용할 수 있는데 저희가 쓰라고 하진 않습니다. 저희가 한 달에 1,000건 쓴다고 하면 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)는 1~2건 정도 쓰기 때문에 거의 안 쓴다고 보시면 됩니다.”(I학교)

(3) 주제3: 3D프린팅 작업 환경

가) 과거 3D 프린팅 작업(가동시간, 상주시간, 후처리)

구체적인 가동시간을 언급한 교사들의 공통점은 가동시간이 제품 크기에 따라 짧게는 몇 시간에서 많게는 몇 일을 가동하는 등 편차가 크다는 점이었다. 그리고 균일하게 사용하기 보다는 시즌(학교축제, 대회 등)에 따라 집중적으로 사용하는 것으로 나타났다. 특이사항은 하루 이상을 넘기는 3D 프린팅 작업의 경우 밤새 3D 프린터를 돌리고 다음날 출력물을 떼어 가는데 밤새 축적된 오염된 공기를 빼내는 환기 작업 없이 바로 출력물을 떼어 가거나 출력물을 떼어 낸 뒤 환기를 시키는 것으로 응답하였다. 이때 냄새 여부로 환기 여부를 결정한다고 응답한 교사도 있었다.

상주시간을 구체적으로 5분~10분 또는 30분 정도라고 응답한 교사가 2명 있었다. 이외에 3D 프린터기 고장으로 가동시간이 늘어나거나 자주 가서 확인한다고 응답한 교사도 있었다.

후처리의 경우 I학교 교사를 제외한 모든 교사들이 화학적 후처리는 하지 않는다고 응답하였다. 물리적 후처리의 경우 글라인더(연마기)가 아닌 간단한 사포질, 니퍼로 다듬거나 줄로 떼어내는 정도의 작업을 한다고 응답하였다. I학교의 경우 화학적 후처리는 FDM 방식이 아닌 SLA 방식인 경우에 적용하

고 있으며, 3D 프린터 출력물 후가공장비에 제품을 넣고 (이소프로필)알코올로 훈증하는 방식이라고 응답하였다.

〈중학교〉

“매일 돌린다기보다 한 번 큰 거를 만든다고 하면은 거의 24시간으로 돌아갈 때도 있고 간단하게 아이들이 명찰 같은 거 만들었을 때는 1시간 30분에서 1시간 정도씩이면 하나씩 완성이 되고..하루 6시간에서 12시간 정도 돌리면 보통 한번 돌리면요. 후처리는 이 학교에서 안하고 제가 다른 학교에서 뭘 강의를 한다든 다 그럴때는 간단한 사포질 아니면 인두로 살짝만 그 정도만 했던 거 같아요. 훈증은 안 해봤습니다.”(A1학교)

“조그만 거 해도 3시간 넘어가는 건 우스워요. 그래서 보통 앞에서 지켜보고 있지는 않아요. 돌려놓고 다른 일을 하는 거죠. 그러다 보면 또 중간에 에러가 발생을 하면 고가의 3D 프린터들은 에러가 발생하면 그때부터 다시 작업을 해요. 에러가 발생한 시점부터.. 근데 재 같은 모델은 저가형 모델이거든요. 메이커실(A1)에 있는 건 좀 비싼 애예요. 개는 중간에 에러가 발생을 하면 그 시점부터 다시 시작을 하더라고요. 저는 뭐 적게 사용해서 그런지 모르겠지만 많이 사용하는 분은 3D 프린터를 몇 개를 동시에 돌려놓고 그러시는데.. 그래도 보통은 있는 시간은 그렇게 많지 않을 것 같은데.. 불행한 사고를 당하신 분은 정말 열심히 하셔서 그 안에 있는 시간이 길었던 것 같아요. (저는) 학생들 수업 없을 때 작업을 했죠.”(A2학교)

“보통 4시간에서 8시간 사이 정도 가동시켜 놓고 다 집에 갔다가 다음 날 와서 출력물 뽑고 환기시키고 이렇게 하고 있었어요. 후처리는 따로 안 하고요. 그냥 니퍼로 다듬거나 필요할 때 사포질 하는 그 정도만..”(B학교)

“출력시간이 3~4일 걸리죠. 재가 그렇게 비싼 게 아니라서 속도가 느리고.. (밤에도) 계속 유지가 돼서 돌리는 거죠. 재는 정확히 3~4일짜리를 하려면 한 달이 넘게 걸려요. 왜냐하면 중간에 가다가 날씨가 추워지거나 날씨 변화가 생기면 안 녹아요. (중략) 그래서 굳어버리면 그때부터 공중에다가 그냥 뿌리는 거예요. 재는 붙여가면서 하는 거거든요. 약간 1mm라도 떨어지면 애가 공중에다 프린트 하기 때문에 처음부터 다시 해요. 서른 세 대를 돌리다 보니까 하루에 한두 개는

또 고장이 나요. 당연히.. 그래서 여분으로 바꾸긴 하는데 여분이 다 안 될 때는 다 고쳐야 돼요. (막힌 거는) 바늘로 이렇게 뚫어가지고.. 물론 분해도 배우긴 했는데 한 번 분해하면 그거는 고치기가 힘들어서 잘못 건드리면.. (3D 프린터를 밤새 돌리고 출근해서 환기 안 하고 제품 먼저 확인하는지 여부에 대해) 네. (제품 확인)하고 또 내 수업을 들어가기 때문에 창문 열고 닫는 데 시간이 걸리기 때문에..”(C학교)

〈일반고〉

“학생들이 작업을 한다고 하면 그때 처음에 와서 애들이 불편하지 않게 작업 시작을 잘못 했다가 도움을 청하면 도와주고 그 다음에 중간에 애들한테 여기 와서 확인해라 하고 저도 중간에 와서 한 시간 후나 잠깐씩 들여다보고 그 다음에 끝날 때 애들이 언제쯤 끝날 것 같습니다 하면 그때 보고.. 그런 정도로 관리를 했죠. 하루에 작업하는 날에 (상주시간이) 30분 내외인 거 같습니다. 일주일에 세 번 이상도 썼었죠. 학생들이 축제 때 쓸거 나눠 즐려고 프린트하고 그랬거든요. 가로 10cm, 세로 20cm 이런 거 하기에는 거의 8시간 걸리는 것들이 있거든요. 그건 수업 끝나고 걸어놓고 그 다음날 찾으러 오죠. 장갑을 끼고 다듬는 작업을 하죠. 다듬을 때 그냥 사포 같은 걸로만 하고 글라인더(연마기)나 이런 거 하지 않고요.”(D학교)

“ (출력) 걸고 애들은 보고 싶어 해요. 그전에는 같이 봤죠. (상주시간 질문에) 그 당시에는 많이 있었다고 봐야죠. 애들이 이렇게 해 놓으면 우리가 진로시간 이런 거 있잖아요. 그 시간이 있으면 3D 프린팅을 가르치고 그때 걸어놓고 다른 애들 또 걸어 놓고 막 이래서 많이 돌아갔어요. 이거(볼펜 정도 크기) 만들려면 한 3~4시간 걸리죠. 제일 길게 걸린 게 한 40시간까지 정도 걸린 게 있었어요. 힘들게 (후처리) 뭐 하러 해요. 후처리하면 가루잖아요. 그럼 먼지 나오잖아요. 먼지가 나와서 여기 쌓여 있을 텐데..어떻게 합니까. (연수 과정에서) 제가 후처리 하는 것을 본 게 같아서 (아크릴 물감으로) 색칠하는 것만 봤어요.”(E학교)

“애들이 들어가면 고장이 나가지고.. (중략) 엉망진창이 되더라고요. 그래서 애들한테 알려주기는 하는데..(중략) 실질적으로 이렇게 출력을 할 때는 제가 하는 거죠. (상주시간) 저거 떼고 하는 시간 하면 5분에서 10분 정도.. 과정이 세팅

쭉 하고 필라멘트 갈아끼고 또 그거 눌러 주고 그 다음에 다 돌아가고 나서 그거 떼고.. 중간에 한 번 들어가죠. 그래서 잘 되고 있나 들어가고 뭐 까먹을 때도 있고요. (출력 걸어 놓고 다음날 가져가는 지 여부에 대해) 그런 적도 있죠. (그때 환기는) 냄새 나면 창문 좀 열고.. (냄새가 안 나면 그냥 꺼내는지 여부에 대해) 네. 그런 미세(먼지)는 안 보이니까.. 딱 갔는데 하나만 멈춰 있고 나머지는 다 출력이 끝나 있으면 그때는 다 끝나고 수리하는 거고.. 저는 수리까지 다 했으니깐요. 그리고 예를 들어 중간에 왔는데 그러면 중간에 그거 빼가지고 정리하고 그거는 딱 정해진 건 없는 것 같아요. 워낙에 케이스 바이 케이스니까.. 후처리 안해요. 왜냐하면 3D 프린터 자체가 퀄리티가 좋아서 할 필요가 없어요. 깔끔하게 나와요.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“고장 자주 있어요. 많이 쓰다 보면 또 그러거든요. 그래서 솔직히 몇 시간마다 와서 확인은 해야 됩니다. 잘 돌아가고 있나 왜냐하면 제가 밀려버리면 다른 다음 팀한테도 이게 계속 밀리니까 아무튼 그런 거 관리하느라 조금 자주 들리긴 합니다. 저희는 후처리 안 합니다. 그냥 해봤자.. 그냥 사포로 표면 정도 미는 정도.. 글라인더로는 아주 가끔.. 네. 연마기로는 아주 가끔. 1년에 한두 작품 정도.. (연마는) 그 즉시 갈아버리는 상황이라서 (후처리) 장소를 저희가 딱히 정하지 않아요.”(G학교)

“이거를 많이 쓰는 시즌이 있어요. 많이 쓰게 될 때는 하루 종일 돌리죠. 저게 멈추지는 않죠. (저는) 계속 있었죠. 유해물질 때문에 화학적인 후처리는 하지 않는 방향으로 했어요. 지금 있는 후처리는 후가공이라고 하는 게 좀 더 적합할 수 있고요. 단순히 물리적으로 제거하는 형태라고 보시면 될 것 같아요. 다듬는 것도 거의 없고요. 떼어낸다. 잘라낸다. 그 정도.. 사포는 아예 비치를 안 해요. 물론 큰 거스러미를 제거할 수 있는 줄은 있어요.”(H학교)

〈대학교〉

“장비 사용 건수를 봤을 때 1년에 한 7,000~8,000건 이용을 했거든요. 중복되는 인원이 있겠지만 한 번 횃수당 한 사람이라고 치면은 7~8천 명이 왔다 갔다 하는 거라고 생각을 할 수 있거든요. 대학생 아니 학교 구성원은 상관없이 다

쓸 수 있는 거예요. 제가 제일 많이 가요. 왜냐하면 고장이 나면 또 가야 되고 수시로 왔다 갔다 하고 있어요. 그럴 경우에는 멈춘 부분부터 재료를 교체하고 멈춘 부분부터 다시 시작을 할 수가 있고 아니면 이제 물리적으로 고장이 났다. 그러면은 아예 처음부터 다시 시작해야 되는 경우가 그때그때마다 상황마다 달라요. (중략) 그게 심한 고장일 수도 있고 간단한 고장일 수도 있지만 고장 건수로만 본다면 자주 일어난다고 볼 수 있죠. 안전을 위한 후처리는 안하고 출력물의 완성도를 위한 후처리라고..FDM 같은 경우에는 상관이 없는데 (SLA 방식) 레진 같은 경우에는 완성이 되고 그 겉에도 레진이 묻어서 끈적끈적하거든요. 그거를 (이소프로필)알코올로 소독하는 그런 후처리라고 보시면 됩니다. 기계(3D 프린터 출력물 후가공장비)에 넣으면 처리해서 꺼내고 근데 그 약품은 안 좋은 거니까.. 어쨌든 훈증을 해서 녹이는 거잖아요.”(I학교)

나) 과거 3D 프린팅 작업실 환경(분리공간, 환기시설)

과거에 F학교와 I학교를 제외한 대다수 교사들은 3D 프린터실을 별도로 만들지 않고 교실에서 3D 프린터를 설치하고 사용했던 것으로 응답하였다. H학교를 제외하고 학교에서 환기 방식은 자연환기를 한다고 응답하였다. 특히 겨울철 환기의 어려움을 말한 교사가 있었으며, 환기 여부를 냄새로 판단하여 환기시켰다고 응답한 교사도 있었다. 3D 프린터의 원활한 작동을 위해 난방기를 사용했다고 응답한 교사도 있었다. 3D 프린터기와는 달리 레이저 커팅기의 경우는 별도로 환풍기를 설치하거나 밀폐형으로 설치한 것으로 응답하였다.

〈중학교〉

“원래 처음에 와서 학교에서 사용을 할 때는 저렇게 따로 (3D 프린터)실이 있다기 보다는 그냥 교실에 같이 학생들이 옆에 있고 했었는데.. 3D 프린터는 일단 자연 환기로만 주로 하고요. 레이저 커팅기 같은 경우에는 환풍기를 달아놨어요.”(A1학교)

“(과학실에서) 계속 썼어요.”(A2학교)

“아침에 출근하면 출력물 제거하고 창문 열어서 자연 환기시키고..”(B학교)

“창문 열고 자연 환기를 하고 마스크 같은 건 안 쓰고 당연히 코로나 전이었기

때문에.. 물론 코로나 이후에는 마스크를 쓰긴 했지만.. 그리고 애들이 냄새 난다고 하면 문 열고.(중략) 수업하는 애들만 좀 한두 명 예민한 애들이 얘기를 하죠. 근데 한 반에 한 명, 두 명 정도 밖에 안돼서.. 너는 예민한 아이구나 이렇게만 생각했지.. 위험하다라고는 생각을 안 했어요. 그래서 밖에 나가서 물 좀 먹고 와라 내가 창문 열어 놓을게 이 정도 했지 그걸 의심하거나 그러지는 않았죠.”(C학교)

〈일반고〉

“(강의실 내 3D 컴퓨터) 같이 있었습니다. (바깥쪽 창문과 복도방향 창문 모두 여는지에 대한 질문에) 다 열죠. 애들이 겨울 이럴 때는 보니까 또 문을 닫더라고 요. 가까이 보면요. 환기를 해라 했는데..”(D학교)

“겨울철에 일부러 환기하거나 그러진 않았죠. 그냥 애들 들락달락하면서 환기가 되지 않았을까요. 수업하면서도 여기서 (3D 프린터) 쓰니까 수업할 때 그냥 놓고.. 이게 편한 게 뭐냐면 여기서 돌아가다 고장 나면 수업 하다가 알잖아요. 아니면 다음 한 시간 쉬는 시간 그 다음 시간이나 하루에 2~3번은 들어와야 되니까..그래서 관리하기는 참 좋았죠. 청소도 잘 되고.. 그래서 여기서 썼는데..”(E학교)

“항상 분리가 되어 있었어요. 다행히... (환기는) 자연환기죠. 창문도 그때는 전혀 무지했죠. 할 때만 시즌만 하는 거니까 냄새가 좀 난다 심하게 나면 열고 환기시키고 이 정도 한 거죠. (중략) 여기 베드나 노즐이 있으니까 계속 열어 놓지 않고 만약에 문 닫아 놓고 해서 여기 난방기 틀어놔요. 그때는 틀어놔었고 난방기 틀어놔서 따뜻하게 한 다음에 가동을 해야 출력물이 잘 나오더라고요. 그 다음에 꺼내러 갈 때는 냄새가 나면 창문을 연 적도 있고 안 연 적도 있고.. 냄새가 막 인상 찌푸려지는 그런 굉장히 싫은 냄새는 아니잖아요. 예를 들어 지하 주차장 냄새라든지 이런 냄새 거의 그 정도 냄새니까 (중략) 만약에 숙지가 됐으면 문을 열었겠죠. 출입은 그때도 (도어락이) 있었어요. 그때도 저만 들어갔죠.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“저희가 일반 무한상상실만 봐도 아무런 세팅 안 되고 그냥 3D 프린터만 이렇게 깔려 있고 보통 그렇게 많이 했거든요. 그 당시에.. 그래서 저희도 그냥 저렇게만 하면 되는구나라고 생각을 하지.. 왜냐면 그건 이미 국가에서 시행하는 무한상상실인데 그렇게 하는데 저희 학교에서는 특별히 더 할 이유는 없을 것 같고

그랬던 것 같습니다.

창문은 있었는데 3D 프린터가 온도에 또 민감하거든요. 그래서 창문을 열거나 이러지는 보통 않고 진짜 저희 같은 경우는 옆의 프린터실 만한 사이즈의 밀폐된 공간에서 거의 사용을 했었거든요. 모델링을 다른 데서도 할 수 있지만 컴퓨터 사양이 그래도 좀 어느 정도 받쳐줘야 되는 거라서 고사양 컴퓨터를 그냥 그쪽에 같이 넣고 세팅을 하다 보니까 그쪽에서 많이 모델링하고 프린트하고 모든게 다 그쪽에서 하는.. 예전에는 그냥 선생님들이 시도때도 없이 왔다가 인쇄되는 거 보고 아니면 여기 옆에서 따로 연구를 하고 이렇게 공간 분리를 안 시켜냈는데...그 당시에는 (보호장구) 아무것도 없었죠. 또 그때 당시에는 코로나 상황도 아니라서 마스크도 없는 상황이었고..”(G학교)

“맨 최초에는 아무 설비가 없었고요. 창문만 있었고..제가 사용을 하면서 이대로는 어려워니 환풍기라도 달아줘라 해서 화장실용 환풍기를 3대를 달았었어요. 그래서 3대를 달았는데 너무 성능이 떨어지기 때문에 강제 배기 팬이 있거든요. 이동형 2개를 구입해서 그걸로 1시간에 한번씩 강제 배기를 시켰어요. 그러면서 사용을 했었어요. 문은 항상 열어놔었고 그렇게 활용을 했어요. 겨울에는 온풍기를 틀어도 다 열기가 빠지기 때문에 당시에 환기를 하면서 추웠어요. 저도 불편했고 학생들 좀 불편했지만 어쩔 수 없다. 그래서 잠깐 따뜻하게 했다가도 환기 때문에 어쩔 수 없이 다 열고 했었어야 했어요.(중략) (이전에) 그 옆의 실(3D 프린터실)에 있는 모든 설비(3D 프린터)가 강의실 안에 다 있었어요. 그대로 같이 있었어요. 강의실 테두리 벽에 쪽 둘러서 있었어요. ㄴ자로...”(H학교)

〈대학교〉

“국소 배기 있는 레이저 커팅기에만 밀폐형으로 해서..”(I학교)

다) 보도 이후 3D 프린팅 작업 환경 개선

교사 6명은 사건 이후 자연환기에서 기계식 환기로 교체했다고 응답하였다. 자연 환기를 하는 학교의 경우 더 자주 환기하고 공기청정기를 사용한다고 응답하였다. 교사 3명은 3D 프린터실을 별도 공간으로 분리했다고 응답하였다. 3D 프린터실에 머무는 시간을 최소화하려고 한다고 응답한 교사가 4명 있었다.

이전에 없었던 보호장구, MSDS(물질안전보건자료), 출입대장을 비치했다고 답한 교사들도 있었다.

이외에 학생 노출을 줄이기 위해 방과후 따로 작업한다고 응답한 교사도 있었다. 3D 프린터실에 실내공기질 측정기를 설치했다는 교사가 있었으며, 3D 프린터 업체에 3D 프린터에 환기장치를 연결할 수 있는 방안을 직접 제안한 적도 있다고 말한 교사도 있었다.

〈중학교〉

“그(사진) 이후로는 따로 공간 안에 분리해서 두는 식으로 많이들 학교도 설치를 하시더라고요. 그래서 저도 이 실을 만들 때 따로 분리된 공간으로 만들어야겠다 싶어서 분리된 공간으로 작업을 해놨습니다. 제가 예산을 받아 가지고 기계식 환풍기 있잖아요. 기계식 환기로 바꾸려고 덕트랑 해서 연결을 해야 되나 해서 지금 알아보고 있습니다. 올해 겨울쯤에 아마 설치가 될 것 같아요.”(A1학교)
 “(보도가 나간 이후) 일단 환기의 중요성은 선생님들이 인식을 많이 하시는 것 같아요. (인식이) 없지는 않았지만 좀 더 심각하게 받아들여지게 되는 거죠. 원래 과학실에 환풍기가 기본적으로 두 개인가 세 개가 있어야 되는데 몇 개 더 설치를 했어요.”(A2학교)

“(출력은) 일부러 방과후에 하고 있어요.”(B학교)

“환풍기가 6개가 달렸고요. 그 다음에 마스크를 다 구매를 했고요. 학교 예산으로.. 그 다음에 또 장갑.. 면장갑이지만 장갑도 구비가 됐고.. 이거는 이제 필요하실 것 같은데 이런 성분 분석표하고 그 다음에 분석표도 공개하게 되어 있어요. 또 옛날 출입대장 같은 게 없었는데 그것도 이제 구비를 하게 되었죠. 그리고 아이들한테 공지를 하게 되어 있고 부모님한테도 공지를 하게 되어 있고 이렇게까지 하고 있습니다. 지금 (방진마스크는) 저만 쓰지..애들 쓰라고 해주면 나 없을 땐 다 벗어버려요. (상주시간 관련) 둘러보지도 않죠. 동아리 애들이 8명 있지만 와서 하긴 하지만..”(C학교)

〈일반고〉

“(출력)할 때는 창문을 더 열어 놓죠. 평소에 한 두 개 열어 놓고.. (레이저 커팅기) 환풍기도 돌리고 이렇게 하거든요. 저런 공기청정기도 하고..”(D학교)

“(업체에서) 거기(3D 프린터기)에 (필터가) 포함되어 있는데요. 기사 이후에 저거 (3D 프린터실)을 만들어서 저기로 옮겨 놔습니다. 많이 안 들어가잖아요. 별실 (3D 프린터실)도 마련해 놔고 그래서 저희가 들어가 있을 시간이 많지 않기 때문에 사실은 들어가면 이거 다(보호장구) 쓰고 하라고 하잖아요. 근데 거기서 제가 지켜보는 것도 아니고 가면 바로 나오기 때문에 애가 돌아가도 유해 환경 물질이 많이 나오지 않을 거다라고 큰 영향은 없을 거다라고 생각하는 거죠.(중략) 레이저 커팅기 때문에 그 공간(3D 프린터실)이 생기고 옮겨간 거고요. 그게 냄새가 많이 나잖아요. 분진도 많이 나오고.. 사용할 수 있는 사람이 없어서.. 고장도 많이 나고.. 계속 보고 있어야 돼요.

지금 조건에서 안전은 어느 정도 확보가 된 게 아닌가 싶어요. 왜냐 별실에 잘 안 들어가니까. (3D 프린터실에 실내 공기질 간이 측정기 설치된 이유에 대해) 그것도 마찬가지로 우리 학교 조사 나온다 그러더라고요. 그래서 ○○○○에 가서 물어봤더니 이런 걸 해놨다고 얘기하더라고요. 그래서 저희도 이 정도는 사 놓아도 되겠다고 보고..(구입해서 설치)”(E학교)

“지금 저런 룸(3D 프린터실)을 만들어서 원래부터 저쪽에서 사용했었거든요. 그런데 아예 환기 장치하고 필터 사용해서 하니까 잠깐 잠깐 쓰는 거죠. 환기를 장마다 하나씩 달았어요. 개별 장치예요. 그러니까 하나 틀면 다 이렇게 되는 게 아니라 장마다 하나씩 개별로 해서 후드가 나갈 수 있고 그 앞쪽에는 필터여서 바깥쪽으로 배출할 수 있게끔.. (중략) 교장선생님도 오케이 해가지고 제가 그때 아파 가지고 그거 빨리 해라 해서 바로 해주시더라고요.”(F학교)

“장갑, 보안경, 방진 마스크. 그거 비치해놓으라고 해서 비치해놨어요. 그때는 전혀 개념이 없었잖아요. 그때 그런 거라도 알고 있었으면 그렇게 안 했겠죠. MSDS 갖다 놓으라고 하면서 다 세팅했어요. 써야죠. 그런 안전에 대해서 간과할 수 없어요. 제가 병에 걸렸었기 때문에..”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“보도 이후 진짜 작업환경을 저희 좀 신경써서 많이 한 것 같거든요. 그래서 아예 (3D 프린터실)을 이쪽으로 옮기고 배기 장치 다하고 그리고 저희 선생님들 물리 선생님들끼리 좀 고안해서 저쪽 3D 프린터실 자체를 음압으로 만들어서

차라리 외부로 나오지 않게끔 일부러 세팅을 하게끔 저렇게 다 환기 장치를 만들어 놓은 거거든요. 공간에서 오래 머물지 않고 그냥 인쇄만 딱 돌려 놓고 자리 비워두고 이런 게 이제는 좀 생활화가 된 것 같고.. (중략) 공간 분리를 확실하게 시키는 건 맞는 것 같아요. 이전에도 이렇게 잠겨 있었는데 그래도 선생님들이 위험성을 모르니까 그냥 애들 연구하겠다는 거고 하면 열어주고 연구를 해라 이렇게 좀 오픈식으로 했었다면.. 지금은 아예 선생님들이 같이 와야 쓸 수 있게끔 이렇게 돼 있어요. 방진마스크는 장기간 있을 때는 쓰는데.. 대부분은 그냥 일단은 잠깐 인쇄하고 들어갈 때는 보통 KF 마스크만 보통 하더라고요. 저게(방진마스크)는 너무 번거로워서.. (이전) 교장 선생님도 시설 교체를 원하셨고 새로 오시는 교장 선생님도 교체를 원하셔서 교체된 거고요. (시설 교체 비용은) 교육청에서 다 지원받았습니다.”(G학교)

“3D 프린터실 공사를 작년 겨울에 한 거예요. 예산이 확보가 돼서.. 그 전년도에는 아마 예산이 좀 적었는지 그냥 일반적인 안전용품만 구매를 했었고 작년에는 그 예산을 가지고서 공사를 했었죠. (상주시간 관련) 잠깐 처음에 세팅할 때랑.. 세팅할 때가 시간이 좀 꽤 걸리고요. 그리고 출력이 정상 출력이 되면 이제 나오니까요. 나오고 중간에 이상이 있는지 한 번씩 보고 상주해 있을 필요는 없죠. 이제는 (분리된 공간이) 유리로 되어 있기 때문에...(중략) 3D 프린터 회사에 건의를 했어요. 제안을 하고 스케치도 봤어요. 국소배기장치를 위해서 아답트를 만들어 달라 필터 부분에 그걸 장착해서 3D 프린터마다 국소 배기를 하는게 가장 안전할 것 같다 이걸 만들어달라고 했는데.. 결국엔 안 만들어지더라고요.”(H학교)

〈대학교〉

“3D 프린터실 만들면서 필요하다는 판단이 돼서 다시 저희가 (환기시설 설치) 공사를 따로 했어요. 작업 특성이 굳이 여기서 오래 머물지 않아도 되는 작업이라고 생각하거든요. 최소한으로 저는 여기(강의실)에 머물려고 해요. 저도 그렇고 학생들한테도 필요하면 어쩔 수 없지만, 필요 없이 마냥 끝날 때까지 기다릴 필요는 없다고 해요. 갔다가 다시 와라. 이런 식으로... 머무는 시간을 줄이려고 해요.”(I학교)

라) 작업환경 관련 문제점 및 개선시 저해 요인

대다수 교사들이 MSDS(물질안전보건자료)에 대해 부정적인 반응을 보였다. 구체적인 이유로는 어려운 내용으로 이해가 어렵다가 가장 많았고, 실제 현장에 실제로 도움이 안된다는 점, 강압적인 상부 지시라고 답했다. 대부분 교사들은 MSDS의 필요성을 느끼지 못하고 수동적으로 3D 프린터실에 비치했으며, 이를 두고 탁상행정 또는 요식행위라고 지적하였다.

작업 환경 개선시 저해 요인으로는 환기설치에 대한 예산 부족 문제가 많았으며, 학교 특성상 과밀학급 문제로 3D 프린터실 별도 설치의 현실적 어려움을 말하는 교사도 있었다.

교육부에서 정기적으로 실시하는 실내 공기질 측정 관련해서는 일반 교실 대상으로만 진행되는 것으로 나타났다. 또한 앞서 3D 프린터 안전에 필터가 장착된 3D 프린터기를 언급한 교사들이 있었으나, 막상 현장에서는 필터 교체 주기에 대해서는 인지하지 못하는 것으로 나타났다. 이외에 학생 통제의 어려움을 호소한 교사도 있었다.

〈중학교〉

“환기 쪽은 그렇게 마무리(설치 예정)가 될 것 같고요. 레이저 커팅기에 에어 컴프레셔를 하나 달아서 내부에서 바람이 잘 빠져 나올 수 있게끔 하는 게 낫지 않나 생각을 하고 있습니다.”(A1학교)

“(MSDS 관련) 보통 위에서 내려오는 문서들이 뭐 제대로 된 내용도 아니고 그쪽도 뭐 짜집기를 해가지고 내려보내는 거고 그리고 이번에도 뭐 물질안전자료를 확보하라고 하라고 그러는데 그게 무슨 의미가 있겠어요. 그게 어떤 물질이 유해성이 있다고 해서 3D 프린팅을 안 할 게 아니라면 어차피 나오는 걸 테고.. 그걸 안다는 것과 그걸 알면서 피할 수 있는 게 아닌 거잖아요. 주의를 기울일 수 있는 것도 아니고.. 예를 들어 과학실에 있는 화학 물질에 대한 안전보건자료라면 이 물질을 다룰 때는 어떤 거를 좀 조심해야 되겠구나 그렇게 되는데.. 3D 프린팅 같은 경우에는 뭐 어떻게 할 수 있는 방법이 아무것도 없는 거잖아요. 그러니까 이런 거 말도 안 되는 거잖아요? 눈에 들어갔을 때, 피부에 접촉했을

때 전혀 관계없는 거잖아요. 3D 프린터하고는.. 거기는 당연히 없죠. 기체 상태로 흡입하는 게 문제가 되는 거잖아요.

일단 저 개인적으로 이 정도면 충분하다고 생각을 하고요. 뭐가 문제인지를 알아야지 거기에 대처를 하는 거지 그냥 사건이 발생했다 원인도 모르고 그런 상황이니까 빨리 규명을..”(A2학교)

“(MSDS 관련) 과학 실험할 때도 유해물질 아니면 뭐라고 있는데 제대로 본 적도 없어요. (보도 이후로 작업 환경 변화 여부 질문에) 아니요. 건의를 할 수가 없어요. 지금 교실이 없어서 학생들이 지낼 공간도 없어서.. 이 학교가 학교 특성상 과밀 학급이고, 교실수도 부족하고 특별실 수도 부족하고 해서.. (분리) 공간 자체가 없어요. 운동장에 건물 하나 새로 짓지 않는 이상은..”(B학교)

“(MSDS 관련) 보시면 알겠지만 다 영어고 화학기호인데 이거 알 수 있나요. (도움이) 안돼요. 이것도 몰랐다가 노동부에서 와 가지고 실사를 나와서 컨설팅 하겠냐고 해서 신청을 해 가지고 와서 컨설팅을 했을 때 이거 보관하고 있어야 된다. 공개하게 되어 있다. 그래서 그때 업체한테 얘기를 해서 받은 거예요. (이전에는) 예산 안에 최대한 많은 개수를 사야 되기 때문에.. (밀폐정보다 상대적으로 저렴한 개방형 3D 프린터기 구매 선택).. 한 대는 아무런 의미가 없어요. 아이들한테 보여주기만 한 거지..아이들이 할 수 있는 교육을 해야지..그래서 아이들이 한 명이 다 실습을 할 수 있게끔 꾸민거죠. 내가 어떤 사업을 하거나 교육 목적으로 할 때는 학교에서 어떤 계획을 세울 수 없어요. 정해진 시설이라든가 이런 거에 다 정해져 있어요. 여기서 뭘 지원 받아서 한다 그러면 뭐 몇 십만원이 정도밖에 안되는 것이지.. 학교에서 돈을 쓸 때는 내가 스스로 시청이나 교육청이나 교육부나 창의재단이나 이런데서 따와서.. (중략) 환풍기 이렇게 통으로 나오는 불고기집에서 나오는 거 있죠. 그걸 해줄 수 없다고 해서..”(C학교)

(MSDS가 무엇인지에 대해) 그때 들어는 봤는데 잘 모르겠어요.”(D학교)

〈일반고〉

“필터가 들어 있으면 갈아야 하잖아요. 교체에 대한 얘기는 한 번도 들어본 적이 없어요. 굳이 그렇게까지 할 만한 예산도 없고 해서요. (업체의 내장 필터 설명 관련) 처음부터 없었구요. 나중에 수리를 하러 오시다가 얘기하는 가운데 그

이야기가 나와서 알게 되었어요. (학교 내 정기적인 실내 공기질 측정 관련) 학교 공기질 측정은 교실 한 두 개랑 바깥에서..”(E학교)

“(MSDS 관련) 봐도 몰라요. 사실.. 저희가 대학에서도 MSDS를 보고 그거에 대해서 인식하거나 이런 교육은 받은 적이 없어요. (MSDS 확인)하게 되어 있는데.. 그걸 가지고 이걸 어떻게 확인하고 어떤 거다 이런 것도 해본 적도 없고, 화학약품 같은 거 저희가 사면 MSDS를 받아라는 얘기를 최근에 시작을 했어요. 전에는 MSDS를 어디서 뽑아 가지고 출력해서 이만큼을 갖다가 그냥 비치해 놔어요. 비치하라니까.. 보지는 않구요.

(설비는) 더 확충은 안 할 것 같아요. 규정이 정해지면 그거에 따라서 운영을 할 거 같긴 하지만 학교에서 더 확충되는 거 별로 좋아하지 않을 거예요. 비용도 많이 들어요.

(학교 내 정기적인 실내 공기질 측정 관련) 저쪽(3D 프린터실)에서는 안하고 그냥 일반 교실이요.”(E학교)

“(MSDS 관련) 이거 꼭 비치하래요. 그래서 내가 저기 업체에다가 지금 사용하는 PLA(Polylactic acid) 뭐냐 해서 거기서 받아서 출력해가지고 갖다 놔는데 내가 지금 뭐 하고 있는 건지 모르겠어요. 정작 중요한 거는 안 하고 쓸데없는 거에 집중하고 아예 그런 일이 발생하지 않도록 사전에 좋은 재료로 만들라고 그 업체나 이런 데다가 법적인 가이드라인을 걸어놓고 해야지.. 우리한테 조심해라. 그거는 말도 안 되는 거죠. 그리고 염산이나 이런 것도 아니잖아요. 염산이 묻었을 때 이렇게 하지 마라. 이런 거는 당연히 알아야 되는 건데.. 저는 이해가 안 돼요. 현실이 전혀 없는 사람이 그 안에 매뉴얼을 짰 거예요. 그거 알지도 못하고 처음 들어보는 건데 비치 하래요. (비치 안하면) 큰일 난답니다. 그래서 비치를 했는데 이게 뭘 소용이 있어.. 의미 없는 거.. 뭐 무슨 일을 나면 그거 읽어보래요. 나한테.. (추가 개선 방안에 대해) 저는 저 정도 수준이면 괜찮을 거 같아요. 지금 환기 장치가 미세니까 환기하면 쪽 올라갈 작은 거니까 그런데 뭐 검사 결과가 나와봐야 그렇지 제가 생각한대로 결과는 나오면 좋겠지만 그렇지 않은 결과가 나오면 거기에 맞게 학교에서 대응을 해야죠.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“(MSDS 관련) 저번에 예전에 (조사원이) 왔을 때 그 얘기하시던데 성분 뭐 이런 거.. MSDS를 꼭 확인을 하시라 이런 얘기를 들은 적이 있어 가지고.. (실제로 MSDS 확인했는지에 대해) 아니요. 왜냐하면 이거는 저희가 이제 거의 믿고 맡긴 거라서요. 업체에서 그런 증명서를 일단 저희한테 한번 보내줬어요. MSDS 자체를.. 그래서 국산이고 이런 거고.. 그거 하에 저희가 이렇게 납품을 받는 거라서요.

저희 같은 경우에는 (중략) 교육청에서 지원을 받은 것 같긴 한데.. 일반 학교는 부담이 되지 않을까요. 그리고 저희는 양이 많아서 3D 프린터가 한 8대 정도 되니까 이렇게 세팅(음압 국소배기장치)를 해도 되는데.. 1~2대 가지고 또 저런 세팅을 하기에는 또 그렇고.. 그런 문제가 좀 있는 것 같긴 합니다. 그리고 또 저런 장비도 막상 없더라고요. 그래서 저희가 이렇게 그래도 수소문해서 한 건데.. 요것(3D 프린터)도 있긴 있었을 건데.. 근데 필터가 요만해가지고 될 수 있을 것 같진 않을 것 같은데.. 필터가 큰 거에는 있었던 것 같긴 한데.. 근데 갈아본 적은 없는 것 같고..”(G학교)

“당연히 그 소재가 좋지 않기 때문에 유해성이 있기 때문에 MSDS를 먼저 받았고 그래서 저는 PLA(Polylactic acid)만 사용을 했어요. 그래도 혹시 몰라서 MSDS (물질안전보건자료) 받았고 거기에 특별하게 유해할 만한 그런 게 판단할 정도는 제가 안 되지만 그렇게 준비해서 PLA(Polylactic acid)만 사용하게 됐어요. 저희가 원산지를 골라서 할 수 있다는 여건이 된다고 하면 당연히 저도 편견일 수 있겠지만 일단은 국산을 사용해 보려고 할 것 같아요. 국산 또는 안전성이 어느 정도 확보되는 국가에서 생산된 거를 사용하고 싶을 것 같아요. 지금은 선택권이 없다. 원산지도 제가 알기로는 유통되는 상당수가 거의 대부분이 중국산으로 알고 있거든요.”(H학교)

〈대학교〉

“유해성이 판단이 되지는 않지만 그래도 어려운 말은 이렇게 몇 개 있지 않아 가지고 이해는 되는데 이게 뭐 뭘로 만들어졌고 어디서 만들어졌고 어느 업체에서 만들어졌고 그런 게 있으니까..

여기(분리된 강의실) 와서 해도 될 것 같은데.. 근데 아무래도 기계 바로 옆이니까 학생 입장에서는 금방 끝나니까 빨리하고 가야지라는 생각이 더 큰 것 같아서 그래서 저희도 강제적인 것도 할 수는 없으니까 판데 가서 하고 와라 이렇게 얘기하는 정도지 내보내거나 강제로 할 수도 없고 하지도 않고... 기본적으로 연구실 같은 경우에는 외부에 위험 관련 사항 같은 거 표시를 붙여 놓는다든가 그런 거 있잖아요. 근데 아직 그런 건 없어서 좀 부착을 해 놔야 될 것 같고, 붙여 놓으면 학생들도 경각심을 좀 갖지 않을까요. 그런 경고문구나.. 좀 더 구체적인 어떤 유해물질이 있을 수 있고 연구실 같은 건 기본적으로 다 해놓는다면서요. 어떤 유해물질 쓰고 있다 이런식으로.. 환기 이거 하는데 제일 크고.. 그거 이후로는 시설에 할 수 있는 예산이 그렇게 많지는 않아서 자체적으로 할 수 있는 그런게... (3D 프린터 내장 필터) 교체는 한 번 했어요. 한 번 저번에 업체에서 와서 한번 싹 해줬거든요. 주기적으로 하면 좋기는 한데 그렇게는 하지 못하고 있고.. (학교 내 정기적인 실내 공기질 측정 관련) 정기적으로는 안 하고요. 환기 공사하면서 한 번 했었어요.”(I학교)

(4) 주제4: 3D프린팅 작업 후 신체 영향

가) 신체 이상 증상

3D 프린터기가 아닌 레이저 커팅기에서 나오는 냄새나 분진으로 인한 신체 이상 증상인 것 같다고 호소한 교사가 2명 있었으며, 신체 이상 증상이 없다고 답한 교사는 3명인 것으로 나타났다. 신체 이상 증상 및 진단 치료 받고 있는 교사들은 C학교(자율신경계 이상), D학교(본인(눈 피로)/학생(눈 자극, 피부 자극, 두통 증상)), F학교(갑상선암), G학교(본인(육종암)/동료교사(유방암과 간유리음영)/학생(혈액암)), H학교(눈·피부 알레르기 반응, 호흡곤란 증상)이 있는 것으로 응답하였다. 교사 1명은 학교 내부에서 갈등 초래를 원치 않기 때문에 신체 이상 증상 문제를 적극적으로 대처하기 어렵다고 응답하였다.

〈중학교〉

“레이저 커팅기 오래 쓰면 냄새.. 냄새 맡으면 기침이 나고.. 뭐 그 정도..” (A1학교)

“즉각적으로 그렇게 반응이 있는 적은 없었어요. 근데 그렇게 즉각적으로 반응이 있는 거면 되게 위험한 거죠. 모르는 사이에 계속 누적이 되는 거죠.”(A2학교)
 “전혀 없었어요.”(B학교)

“꼬리뼈 쪽이 문제가 있고, 그 다음에 대소변이 힘들고 등등.. 여러 가지.. 어지러움 증이 있고.. 3D 프린터 때문에 원인으로 얘기를 안 했고 자율신경계 이상으로.. 이 사례가 되게 나서기 싫어해요. 왜냐하면 학교 교장, 교감 선생님도 있고 이게 승급의 문제일 수도 있고.. 한 번 지적이 되면.. 선생님들도 본인 때문에 선생님들이 피해가 가기를 원치 않기 때문에 웬만하면..”(C학교)

〈일반고〉

“처음에 필라멘트 가열되면서 나오는 그런 것들이 있잖아요. 그런 것들을 가까이서 계속 지켜보면 눈이 약간 좀 피곤하거나 뭐 그런 증상이예요. 근데 환기하고 하면 그런 증세는 없구요. 4~5년 전에 많이 쓸 때 학생들이 그런 증상(눈자극, 피부자극, 두통)이 좀 있었던 거고요. 4년 전에 그때 초기에 막 도입해서 많이 쓸 때 그때 증세입니다.”(D학교)

“이상은 별로 없었던 것 같아요. 제가 원래 호흡기 쪽으로 별로 안 좋아서 계절이 바뀌면 감기도 걸리고 이래서 그거랑 혼동할 수도 있는데 그 때는 이것 때문에 그렇다라는 거는 크게 못 느꼈던 것 같아요.”(E학교)

“갑상선 암으로 한 2년 됐어요. 지금은 괜찮아요. 수술한 부위 깨끗하고 괜찮은 데..”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“허리가 아파서 디스크인 줄 알고 병원 갔더니 좀 큰 병원 가야 될 것 같더라고 해서.. (육종암 진단).. 그냥 계속 치료받고 있습니다. (호흡기 질환이라든가 피부나 눈 자극이나 이런 다른 증상은) 이전에 딱히 없었습니다. 저희 이전 실험 보조원 선생님은 갑상선 암이신가 유방암(확인 결과 유방암)이신가 받으셨더라고 요. 제가 (이곳에) 오기 전에.. 그전부터 3D 프린터를 저희가 사용하고 있었기 때문에.. 저희 실험 보조 선생님이라서 관리하시고 청소하시고 이렇게 하셨던 분이였어서.. 그리고 또 다른 선생님은 아직 암으로 판정은 아니지만은 간유리 음영이라고 해서.. 암으로 가기 전 단계 이렇게 해서 폐에 그런 게 있다고 하시더라

고요. 3D 프린터실에서 뭔가 연구를 애들하고 많이 했던... 3D 프린터 활용은 제가 더 많이 했겠지만.. 아무튼 그 실에서 그래도 애들하고 뭔가 많이 하셨던 분이거든요. 그러니까 연구를 연구실 자체를 아예 그쪽으로 놓고 하셨던 분이어서.. 그리고 이걸 또 그런 건 아니지만 저희 학생들 한 명 중에서도 혈액암 판정 받은 애가 한 명 있거든요. 그 실에서 뭔가 활동을 했던 애들이라서 그래서 혹시나 해서...그 학생은 알고 있어요. 근데 학생이 건강 상태가 그렇게 좋지 않은 상태인 것 같아서 일단은 치료에 전념하신다고 하시고..아무튼 부모들도 다 상황은 알고 계시고 근데 그걸 이 상황으로 또 엮으시는 것 같지는 않으시고...교육청도 알고 있습니다. 그런데 교육청 입장에서든 이게 인과관계가 없는 거라서...이거는 국가 차원에서도 똑같지 않습니까. 인과관계가 없기 때문에 아직 뭐를 할 수도 없다 이렇게 얘기는 하시는 것 같고.. 국가에서 뭔가 했으면 교육청에서도 뭔가 움직일 텐데..”(G학교)

“저거를 계속하고 하면 전반적으로 좀 뭐랄까. 좀 알레르기 반응 같은 것도 있고 피부 알레르기부터해서 이제 눈도 생기게 되고 그런 것들이 점점 생겼어요. 어쨌든 어떤 게 이유가 되든 실습실에서 계속 뭘 하게 되면 조금씩 불편한 것들이 생겼던 것 같아요. 처음에는 알레르기 피부가 있었고 눈도 1년에 병원을 좀 몇 주 다닐 정도. 근데 그게 조금씩 심해졌던 것 같긴 해요. (호흡기 쪽은) 호흡이 좀 부족한 느낌. 그래서 정기적으로 검진을 받고 있어요. 비상약으로 벤톨린(기관지 확장제)도 가지고 있고 뭐 그렇게 하고 있어요. (증상을 호소하는 학생 있는지에 대해) 그렇지 않았어요. 저는 좀 오래 있고 학생들은 사실 몇 시간 있고 안 하기 때문에 영향이 좀 덜 했을 수도...”(H학교)

〈대학교〉

“레이저 커팅기 같은 경우는 연기라든가 눈에 보이는 게 있어서 좀 그런데.. 증상이 있었겠지만 저것(3D 프린터기) 때문이라고 생각된 적은 없어요.”(I학교)

(5) 주제5: 학교 및 정부 대상 제안

가) 정책 건의 사항

환기나 시설 확충에 대한 학교나 정부의 예산 지원이 다수의 건의 사항이었다. 이외에 3D 프린터 인증이나 소재 개발이 필요하는 의견이 있었다. 문제 해결을 위해 원인 규명이 시급하며, 3D 프린터를 포함하여 신기술 도입시 관리 환경 조성 및 전문 지식 확충 이후 도입이 필요함을 지적하였다. 실효성을 높이기 위해 3D 프린팅 온라인 교육 대신 교사 직무 연수과정 내 안전 연수에 3D 프린팅 안전 교육을 넣는 방안을 제안하였다. 또한 학교 내 3D 프린터 작업환경조사에 전문가 투입이 필요하다는 의견도 있었다. 교육자 관점에서 중학생 대상 3D 프린팅 교육 필요성에 대해 문제를 제기한 교사도 있었다. 3D 프린터의 유해성 관련 산업안전보건법이나 산업법을 적용하려는 정부 움직임과 출입관리대장 성격의 어플 개발 도입에 부정적인 견해를 보였다. 학교 이외에 또 다른 관리 사각지대인 개인 사설 3D 프린팅 학원에 대한 정부의 관리가 필요하다고 제안하였다.

〈중학교〉

“이상한 어플을 만든다고 하더라고요. 사용할 때마다 일시랑 종료 일시랑 사용자 등록할 수 있는 어플을 만든다는 얘기가 있는데..제발 그런 것 좀 안 했으면 좋겠어요. 그거 하기 전에도 관리대장을 썼거든요. 차라리 환풍기를 일괄적으로 설치할 수 있는 돈을 학교에다 뿌려줬으면 좋겠어요.”(A1학교)

“저는 3D 프린터의 필요성에 대해서 그렇게 느끼지를 못하고 있어요. 보통 학생들은 모델링을 할 수가 없어요. 그 정도를 교육시킬 수 있는 시간도 없고 학생들의 능력도 안되고..공간 개념이 좀 있어야지 모델링을 하는데 전혀 없다고 봐요. 동아리 같은 데서 계속적으로 교육이 된다면 어느 정도는 할 수 있겠지만, 일반 학생들을 대상으로 진행한다는 거는 교육적으로 의미가 있다고 생각하지 않아요. 뭐가 문제인지를 알아야지 거기에 대처를 하는 거지 그냥 사건이 발생했다 원인도 모르고 그런 상황이니깐 빨리 규명을...”(A2학교)

“3D 프린터도 그렇고 다른 거 도입할 때 무조건 구매부터 하지 말고 환경 조성되고

전문적인 이런 지식도 좀 갖춰진 다음에 제품 구매가 되었으면 좋겠어요.”(B학교)

〈일반고〉

“환기 시설이 필요하다면 그런 것들을 지원해 주고 그런 것들을 도와주면 좋겠다는 생각을 합니다.”(D학교)

“온라인 연수는 의미가 없어요. 안 듣거든요. 온라인 연수는 컴퓨터가 스스로 공부하죠. 그렇기 때문에 오프라인 연수 같은 걸 통해서 길지 않게 필요한 것들만 집중적으로 설명을 해 주시거나 아니면 설치 가이드라인 이런 것들이 있고 필수 장비들 있어야 된다는 것들이 있으면 아무래도 그거에 맞춰서 저희가 운영을 할 것 같아요. 근데 그런 건 지금 없으니까 그냥 대충 아무데나 설치해 놓고 교실에도 설치해 놓고 그랬던 거죠.”(E학교)

“만약에 그런 것들(환기시설)을 하려고 하면 예산을 우선해서 이렇게 하라는 정책이 있어야 되지 않을까.. 학교는 학교에 전부 다 목적 사업비로 나오잖아요. 그러니까 이쪽에 있는 건 이렇게 끌어다 쓸 수 없잖아요. 그러니 최소한의 안전 장비 밖에 할 수가 없다는 거죠. 그리고 프린터에 관해서 인증된 프린터나 이런 것들이 있는지 잘 모르겠어요. 기본적으로 그런 게 없는 것 같으니 저희도 그냥 대충 아무거나 구입하고 사실 전문 지식 없거든요.(중략) 학교에서 자발적으로 이렇게 해도 되겠다고 할 만한 거는 없고요. 교육청에서 이렇게 해야 됩니까라고 나오면 저희가 그렇게 해요.”(E학교)

“사람들이 와 가지고 안전 진단 검사해서 저한테 싸인 받아가고 그 사람들은 어디서 나왔는지.. 내가 걸린 암하고 연관성을 입증해 줄 수 있냐 했더니 그 사람들은 아무것도 모르더라고요. 조사하러 오면 전문가들이 와야 할 거 아니에요. 비전문가들이 와 가지고 말도 안되는 질문하고 있고.. 국가 예산 낭비하는 것 같다는 생각이 들더라고요. 예를 들어, 오려면 기본적인 3D 프린터의 어떤 작동원리라든가 어떻게 청소하고 거기를 빗자루로 쓰냐 이런 얘기를 하더라고요. 그래서 이 사람들한테는 그냥 뭐 희망을 갖지 말아야 되겠다. 그냥 잊자 이런 생각을 좀 했어요.”(F학교)

“연수는 자료를 만들어서 직무 연수로 이렇게 올리면 과학 선생님들이나 기술 선생님들이나 안전 연수로 인정될 수 있도록 하면 지금 연수도 대부분 그런

것들이니까.. 올리면 선생님들 당연히 들을 것 같은데요. 안전 연수가 15시간이예요. 15시간 안에 몇 개 챕터로 들어가면 3D 프린터 언젠가 나도 사용할 수 있겠지 하고서 그걸 보겠죠. 안전 연수가 있어요. 공무원이 해마다 필수 연수가 있어요. 그 안에다 이렇게 집어 넣어 주세요. 이번에 제안을..”(F학교)

“소재 때문에 나오는 문제잖아요. 그 기계여서 이 소재를 사용했기 때문에 이렇게 나온다. 그러니까 나노 입자가 나오지 않는 그런 재료가 나오면 좋겠다. 근원을 해결해야죠.”(F학교)

〈특목고/특성화고〉

“저런(환기) 세팅은 꼭 필요한 거 같고요. 저런 환기구나 이런 장치 이제야 의무적으로 저렇게 하라 했는데.. 그래도 조금 뭔가 좀 더 교육 쪽이라서 조금 더 타이트하게 기준(국소 배기 장치, 음압장치)를 잡아야 되는 게 아닌가 싶어서.. 이미 저희 화학실에 이미 다 덕트들은.. 학교 같은 경우에는 실험실에 덕트 세팅들은 다 돼 있거든요. 왜냐하면 화학 약품이니까.. 약품들이 있는 곳에 덕트가 다 돼 있는 상태인데 저것도 좀 그런 급으로 해서 조금 더 해야 되지 않아요.”(G학교)

“3D 프린터의 유해성과 관련해서 산업안전보건법이나 산업법을 적용하고 있거나 적용하려는 걸로 알고 있어요. 근데 생각해 보시면 교육의 현장에서도 안전 규정을 준수해야 할 의무와 그런 책임이 있겠지만 실제 산업 현장과 교육 현장과는 많이 다르거든요. (중략) 근데 그대로 교육기관에 똑같이 적용을 한다라고 한다면 말이 안 되죠. 그러면 누가 사장의 역할이고 산업안전관리자가 될 거고 누가 책임자가 될 거고 그러면 실제 교사가 완전 관리 책임과 의무를 가지고 수업을 해야 된다고 한다면 그거를 어떻게 수업을 할 수가 있을까요.”(H학교)

“학교에서 자체적으로 하라는 거는 좀 말이 안되는 게 그러면 기준도 다 각기 각색이 될 거고요. 뭘 사야 되는지는 선생님들이 사실 전문적인 분들이 아니기 때문에 모르고 도대체 어떻게 관리를 해야 되냐는 거죠. (중략) 교육 현장에 맞는 규정 그리고 장치들 이렇게 설치되면 좋다. 그리고 거기에 맞는 예산 또는 어떤 물품이 지급된다거나 규제만 할 생각을 하지 말고 이걸 지켜나갈 수 있게 현실적인 지원이 있어야 한다고 저는 봐요. 현실적으로 저는 책자 하나 안 내려와서 황당해요. 아무것도 없고 그런 부분이 저희가 아쉽죠. 그걸 찾아서 할 수가

없어요. 저희가 이게 개정된지도 모르고 그런 걸 일괄적으로 (책자를) 주시게 되면.. 최소한 어떤 주의 표시 의무라고 해서..”(H학교)

“학교가 이 정도면요. 사실 학원이나 이런 데는 더 심각할 거예요. 교육기관, 연구기관이 입장에서 말을 하지만 3D 프린터를 사용하고 있는 일반 개인 사설 학원도 상당히 많을 것이다. 거기는 사각지대일 것이다. 개인적인 용도가 아니라면 규제를 거기는 피해갈 수 있는 기준이 아마 많을 거예요. 거기가 하여튼 몇 대 이상은 해야 되지 않나 저는 그런 생각이 들어요. (중략) 진짜 전문적이지도 않고 주부분들도 그냥 가서 학생들 방과 후 가르치고 하시는 거예요. 지금 근데 과연 지금 잘 이런 걸 하고 있느냐. 가보시면 놀라실걸요. 확실히 이게 문제구나.”(H학교)

〈대학교〉

“시설 같은 게 기본적으로 되어 있어야지 안전이 되잖아요. 그래서 시설 부분에 대해서 좀 확충이 되면 좋지 않을까 이거 만약에 저희가 좀 부족한 시설이 있으면 그런 부분을 좀 지원해 줄 수 있으면 좋을 것 같아요. 시설이라는게 소액으로 되는 건 아니잖아요. 큰 돈이 투자가 되니까 한 번에 구축을 해놓는 게 좋다고 생각이 드는데 시설이라는 게 좀 부족해서 안 되면 계속 장기간 못하게 되거든요.”(I학교)

3. 작업환경 평가 세부결과

1) A학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특징

표 63. A학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징	
학교급	중학교	
학교 위치	서울시	
측정 날짜	6월 23일	7월 6일
학교내 측정장소	1층 과학실	3층 메이크실
교실 크기	7.5m×11.0m×2.4m	4.1m×2.9m×2.4m
천정 에어컨	비가동	약가동
창문	닫혀 있음	일부 열려 있음
창문 환풍기	4개 가동	2개 가동
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	없음	실내 페인트
날씨	비움	보통
온도	-	26.8% ~ 28.0%
습도	-	61.8% - 65.0%

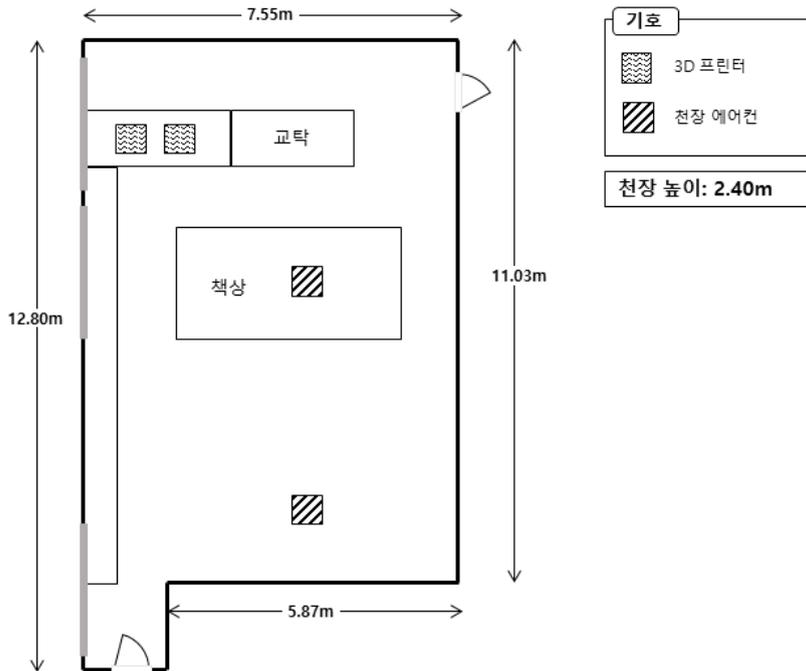


그림 7. A학교 1층 3D 프린실(과학실) 도면

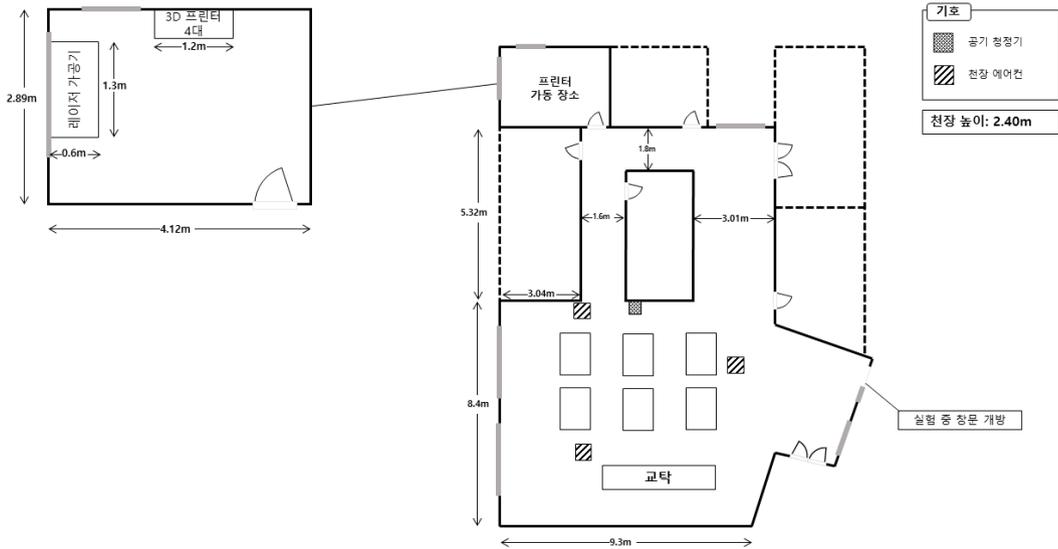


그림 8. A학교 3층 3D 프린실(메이크실) 및 메이크실 앞 교실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 64. A학교 3D 프린터 정보

항목	1F 과학실*		3F 메이크실
모델	XYZ printing		3DWOX
프린팅 기술	FFF		FFF
보유 3D 프린터 수량	과거	2	4
	현재	2	4
사용빈도	과거	월 1회	주당 2~3일
	현재	거의 사용 안함	주당 2~3일
측정당시 가동수량	1		2
3D 프린터 크기	42cm×43cm×38cm		-
최대 제작 크기	15cm×15cm×15cm		21cm×20cm×19.5cm
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃		1.75mm, 0.4mm, 200℃
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid), 네츄럴 화이트		PLA(Polylactic acid), 네츄럴 화이트
헤파필터	무		무
인케이스	유		유
프린터 제조국	한국		한국
필제조국	한국(일부 중국)		한국(일부 중국)
가동시간	4시간 32분		1시간
필라멘트 소모량(m)	17.615m		-
3D프린팅 제조품	프로펠러 모형		보석 모형

*3D 프린터와 창문사이 거리 1미터, 3D 프린터와 교탁사이 거리 2.3m

(3) 작업환경측정 사진



(a) 1층 과학실 교실



(b) 1층 과학실 3D 프린터



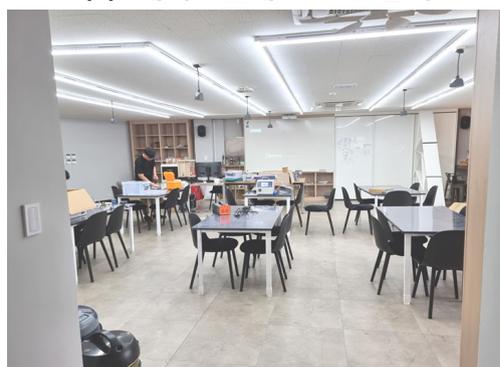
(c) 3층 메이크실



(d) 메이크실내 3D 프린터



(e) 메이크실내 레이저가공기와
MDF목재



(f) 메이크실 앞 교실
(메이크실에서 밖을 바로본 모습)

그림 9. A학교 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

가) 1층 과학실

A학교 포름알데히드 농도는 3D 프린터 인근(3D 프린터에서 2.4m 떨어진 교사 테이블 위)에서 10.3 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1/30의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 1/10 수준으로 낮았다. 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도도 모두 노출기준의 1/100 미만으로 매우 낮았다. 과학실내 3D 프린터에서 약 9m 위치에서는 포름알데히드는 검출되지 않았고, 3D 프린터 인근에 비해 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌은 다소 낮았고, 벤젠은 다소 높았다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

중금속 농도는 카드뮴, 코발트, 납, 니켈은 모든 시료에서 검출한계 미만 이었고, 크롬만 약 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고용노동부 노출기준인 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 1/1000 수준으로 매우 낮게 나타났다.

3D 프린터 가동전 초미세입자의 평균 수농도는 $6,794 \text{ 개}/\text{cm}^3$, 미세입자의 평균 수농도는 $1,515 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 $6,076 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $1,202 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 3D 프린터에 가동에 따른 초미세입자 및 미세입자의 수농도 증가는 관찰되지 않았고, 오히려 다소 감소하는 경향을 보였는데, 측정을 하고 있는 동일한 시간대의 A학교 인근의 대기측정망 미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 유사한 경향을 보여 외기 미세먼지(실내 외기유입) 농도가 실내 초미세먼지와 미세농도 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

표 65. A학교 과학실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치		
		3D 프린터 옆 (2.4m 위치)	3D 프린터에서 9m 떨어진 위치	외기
포름알데히드	3	10.3	<LOD	<LOD
벤젠	3	0.25	0.28	0.21
톨루엔		3.62	2.95	2.10
에틸벤젠		0.35	0.30	0.22
자일렌		0.52	0.51	0.30
스티렌		<LOD	<LOD	<LOD
비닐클로라이드	3	<LOD	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	3	<LOD	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 66. A학교 1층 과학실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

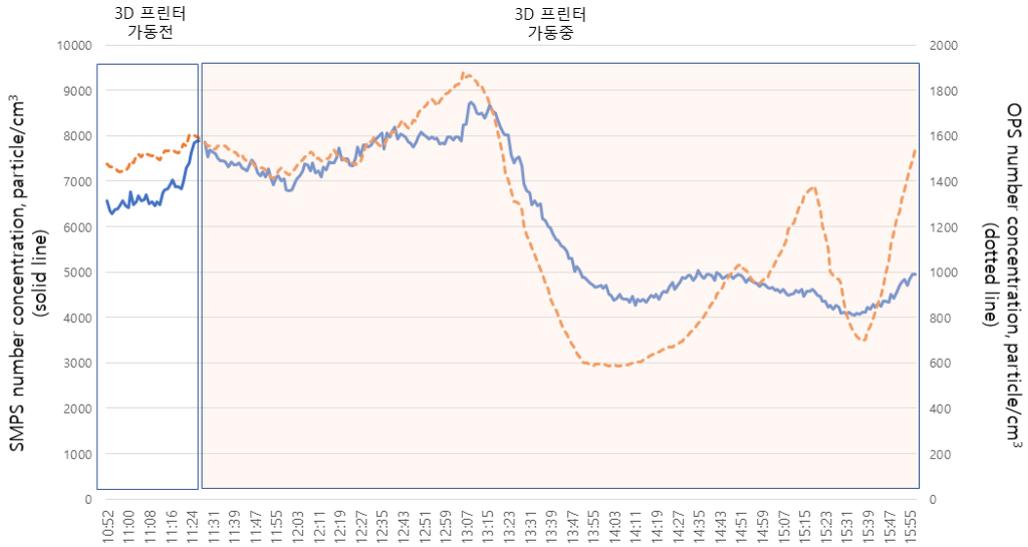
항목	N	측정위치		
		3D 프린터 옆 (2.4m 위치)	3D 프린터에서 9m 떨어진 위치	외기
카드뮴	3	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD
크롬		0.474	0.065	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

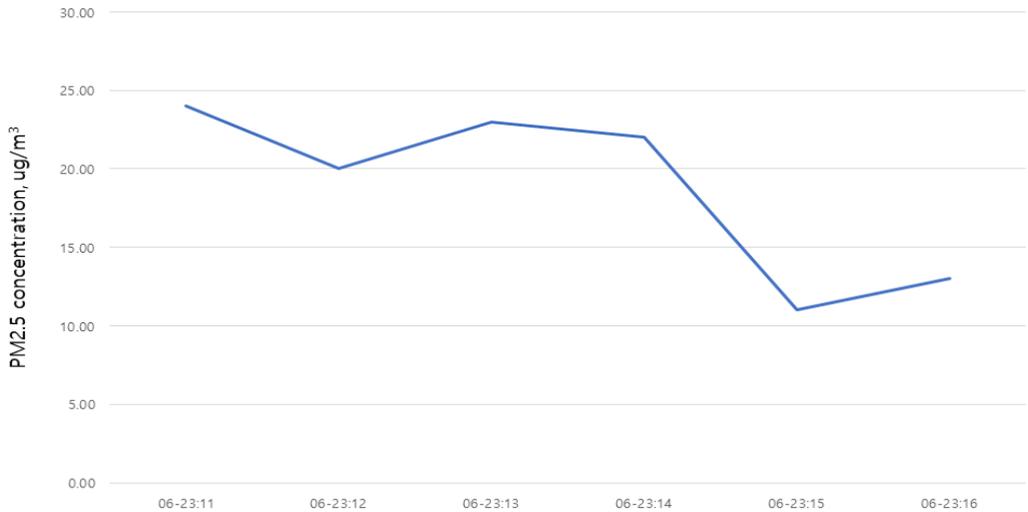
표 67. A학교 3D 프린터 1층 과학실 초미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

위치	측정 시간대	시료 수	기기	산술평균 ± 표준편 차	기하평균 (기하표준편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	36	SMPS	6,794 ±441	6,782 (1.06)	6,287-7,878
			OPS	1,515 ±47	1,515 (1.03)	1,442-1,605
	3D 프린터 가동중	270	SMPS	6,076 ±1,538	5,883 (1.12)	4,057-8,736
			OPS	1,202 ±398	1,128 (1.44)	585-1,879



(a)



(b)

그림 10. (a) 6월 23일 A학교 과학실 미세입자 측정결과, (a) 과학실내 3D 프린터 인근 SMPS와 OPS에 의한 시간대별 초미세입자 농도 (b) A중학교 측정시간대 인근 대기측정망(2.4km 떨어진 거리)의 PM2.5 농도

나) 3층 메이크실

A학교 3층의 메이크실 내 포름알데히드 농도는 3D 프린터 옆 선반에서 24.04 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1/12의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 1/4 수준으로 낮았다. 그러나 메이크실내 다른 위치에서 포름알데히드 농도는 130.3 ppb로 고용노동부 노출기준의 약 1/2 수준이면서 ACGIH TLV인 100 ppb를 초과하는 것으로 나타났는데 그 이유는 측정위치 옆에 레이저 가공기에 사용하는 MDF 목재판이 있어 MDF 목재에서 발생하는 포름알데히드 때문인 것으로 추정된다(측정당일 레이저 가공기는 사용하지 않았음). 한편 메이크업실과 연결되어 있는 교실 중앙에서의 포름알데히드 농도는 149.6 ppb로 메이크실 보다 더 높았는데, 이는 교실 인테리어 공사가 완료된 지 비교적 오래되지 않아(2020년에 인테리어 공사해 2021년부터 수업), 실내 자재에서 발생하는 것으로 추정된다. 또한 교실의 구조도 창문이 부족하고 환기상태가 양호하지 못한 형태로 판단되었다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았고, 톨루엔은 앞서 1층 과학실에 측정된 농도 보다는 높게 나타났는데 포름알데히드와 마찬가지로 실내 건축자재 및 DMF 목재에 기인한 것으로 판단된다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

중금속 농도는 카드뮴, 코발트, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었으며, 납만 $0.051 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고용노동부 노출기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 1/1000 수준으로 매우 낮게 나타났다.

3D 프린터 가동전 배경농도의 초미세입자의 평균 수농도는 $2,327 \text{ 개}/\text{cm}^3$, 미세입자의 평균 수농도는 $948 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 $2,142 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $910 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 다소 감소하였다가, 3D 프린터 사용이 끝난 후의 배경농도는 다시 각각 $3,668 \text{ 개}/\text{cm}^3$,

1,349 개/cm³으로 다소 증가한 것으로 나타났다. 한편, 위와 같은 초미세입자와 미세입자의 농도 변화는 3D 프린터 측정을 하고 있는 동일한 시간대의 A중학교 인근의 대기측정망 미세먼지(PM2.5) 농도와 유사한 경향을 보였는데, 이는 3D 프린터에 가동에 의해 발생하는 초미세입자와 미세입자 농도 보다 외기 미세먼지(실내 외기유입)의 농도변화가 실내 초미세먼지와 미세농도 농도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 해석된다.

표 68. A학교 3층 메이크실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치			
		메이크실 3D 프린터 옆 선반	메이크실 레이저가공기 옆	교육실 중앙	외기
포름알데히드	4	24.04	130.3	149.6	<LOD
벤젠	4	0.06	<LOD	0.02	<LOD
톨루엔		49.88	26.32	34.12	<LOD
에틸벤젠		7.51	11.49	11.67	<LOD
자일렌		11.98	18.17	18.7	<LOD
스티렌		1.79	4.39	4.46	<LOD
비닐 클로라이드		4	<LOD	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

레이저가공기는 미가동

표 69. A학교 3층 메이크실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

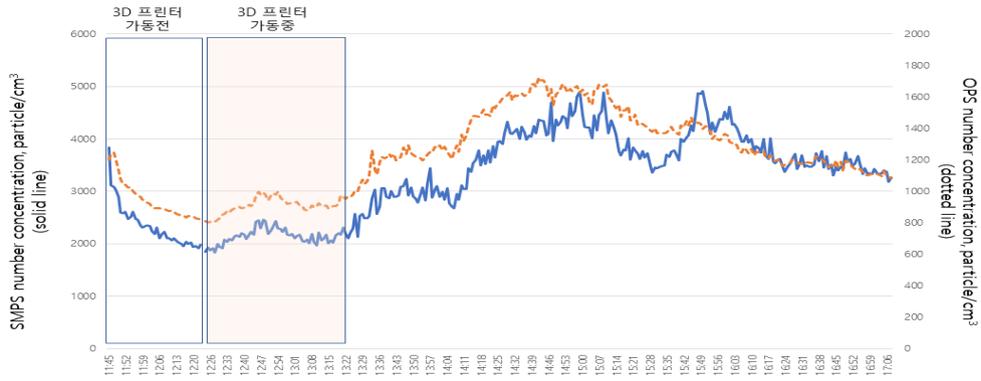
항목	N	측정위치			
		메이크실 3D 프린터 옆 선반	메이크업 레이저가공기 옆	교육실 중앙	외기
카드뮴	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	0.051	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만
레이저가공기는 미가동

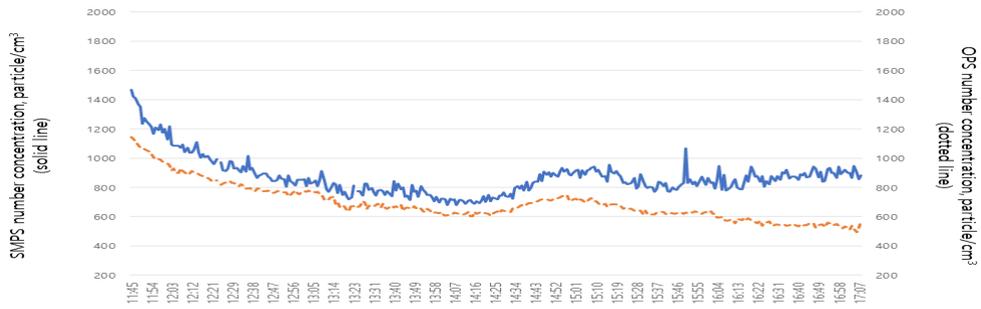
표 70. A학교 메이크업실 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

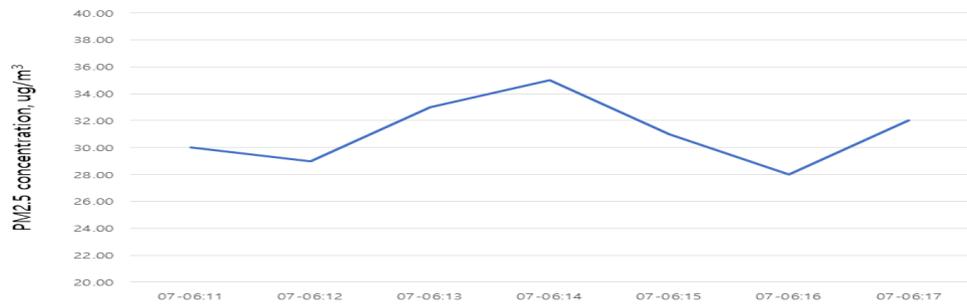
위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ± 표준편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	39	SMPS	2,347 ±407	2,317 (1.17)	1,923-3,843
			OPS	948 ±122	942 (1.13)	818-1,249
	3D 프린터 가동중	60	SMPS	2,142 ±146	2,138 (1.07)	1,833-2,456
			OPS	910 ±51	909 (1.06)	804-997
	3D 프린터 가동후	225	SMPS	3,668 ±575	3,622 (1.18)	2,134-4,915
			OPS	1,349 ±190	133 (1.15)	964-1,722
교육실 중앙	NA	322	SMPS	869 ±130	861 (1.15)	679-1,468
			OPS	691 ±126	681 (1.19)	495-1,146



(a)



(b)



(c)

그림 11. (a) A학교 미세먼지 측정결과, (a) 메이크실 3D 프린터 인근 SMPS와 OPS에 의한 시간대별 초미세입자 농도 (b) 메이크실 앞 교실내 시간대별 초미세입자 농도 (c) A학교 측정시간대 인근 대기측정망의 PM2.5 농도

2) B학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 71. B학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	중학교
측정 날짜	6월 29일~30일
학교 위치	서울 도심지
장소	1층 컴퓨터실
교실 크기	10.8m × 7.5m × 2.7m
천정 에어컨	비가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	없음
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	없음
날씨	비옴
온도	-
습도	-

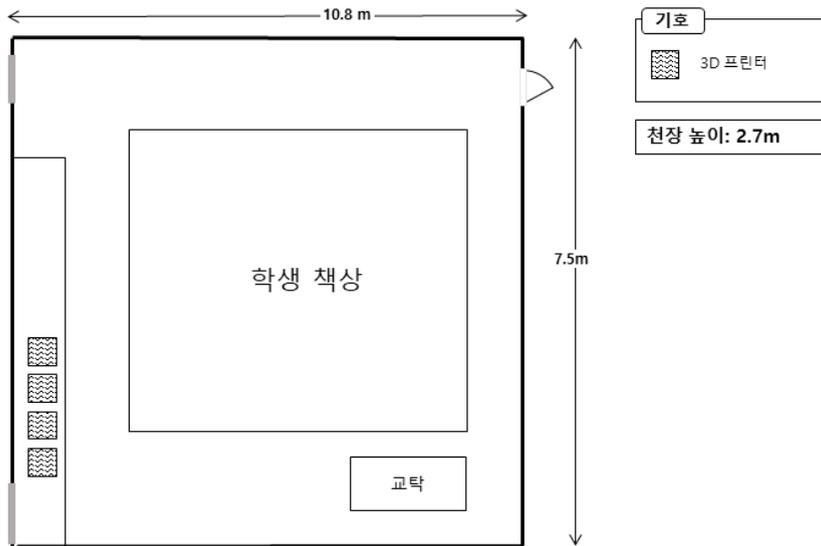


그림 12. B학교 3D 프린터 교실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 72. B학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	3DWOX(ECO)	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	4
	현재	4
사용 빈도	과거	모름
	현재	분기에 1회
측정당시 가동수량	1	
3D 프린터 크기	42cm × 43cm × 44cm	
최대 제작 크기	15cm × 15cm × 18cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid), 초록색	
헤파필터	무	
인케이스	유	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국(일부 중국)	
가동시간	약 3시간 (12시간26분 중 도중에 플트)	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	인형 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터 교실



(b) 3D 프린터 앞 측정모습



(c) 3D 제품 생산 중



(d) 3D 프린터에서 9m 떨어진 교실내
반대편 측정모습

그림 13. B학교 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

B학교 3D 프린터 교실의 포름알데히드 농도는 3D 프린터 앞 1m 위치에서 34.3 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1/9의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 1/3 수준으로 낮았다. 그리고 과학실내 3D 프린터에서 9m 떨어진 위치에서는 23.0 ppb로 3D 프린터 주변에 비해 조금더 낮은 농도를 보였다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았고, 3D 프린터에서 1m 떨어진 위치와 9m 떨어진 위치 간에도 차이를 보이지는 않았다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 1m 앞에서 측정한 배경농도의 초미세입자의 평균 수농도는 6,002 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 509 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 2,827 개/cm³, 346 개/cm³으로 약 절반 정도 감소한 것으로 나타났다. 또한 3D 프린터에서 9m 떨어진 위치에서 측정한 배경농도의 초미세입자의 평균 수농도는 3,218 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 238 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 1,601 개/cm³, 326 개/cm³으로 마찬가지로 초미세입자의 농도는 3D 프린터 가동 중에 약 절반 정도 감소한 것으로 나타났다. 이와 같은 초미세입자와 미세입자의 농도 감소는 3D 프린터 측정을 하고 있는 동일한 시간대의 B중학교 인근의 대기측정망 미세먼지(PM2.5) 농도변화와 같은 경향을 보였는데, 이는 3D 프린터에 가동에 의해 발생하는 초미세입자와 미세입자 농도 보다 외기 미세먼지(실내 외기유입)의 농도변화가 실내 초미세입자와 미세입자 농도에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 해석된다.

표 73. B학교 3D 프린터 교실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 앞 1m	3D 프린터에서 9m
포름알데히드	2	34.3	23.0
벤젠	2	<LOD	0.07
톨루엔		14.55	13.69
에틸벤젠		0.35	0.37
자일렌		0.51	0.62
스티렌		0.18	0.22
비닐클로라이드	2	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	2	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 74. 6월 29일 B학교 1층 과학실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

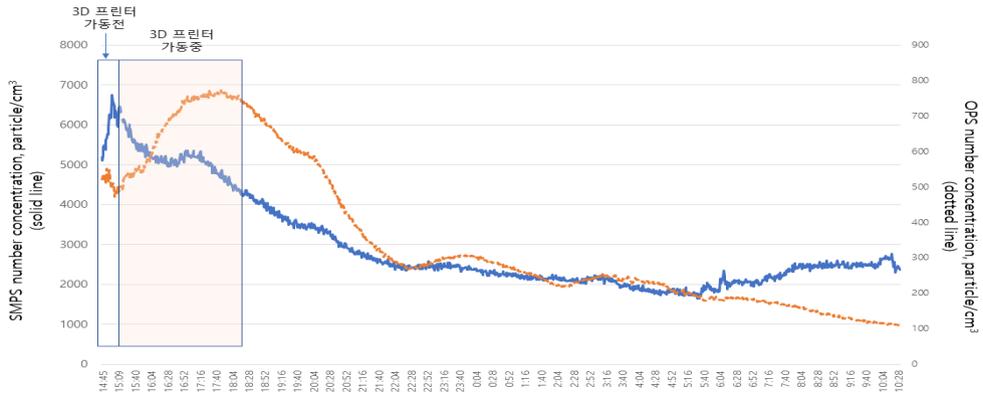
항목	N	측정위치	
		교실 3D 프린터 1m	교실 3D 프린터 9m
카드뮴	2	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

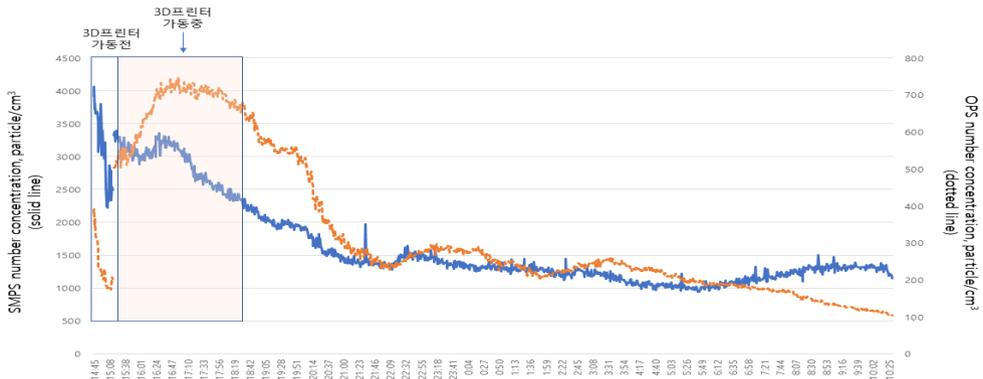
표 75. B학교 1층 과학실 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준 편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	30	SMPS	6,002 ±478	5,984 (1.08)	5,096-6,756
			OPS	509 ±21	509 (1.04)	471-551
	3D 프린터 가동중	1152	SMPS	2,872 ±1,102	2,704 (1.40)	1,638-6,145
			OPS	346 ±205	295 (1.76)	108-774
3D 프린터 에서 9m	3D 프린터 가동전	33	SMPS	3,218 ±554	3,057 (1.20)	2,225-4,065
			OPS	238 ±67	230 (1.29)	173-391
	3D 프린터 가동중	1150	SMPS	1,601 ±641	1,502 (1.40)	939-3,401
			OPS	326 ±190	280 (1.71)	103-747



(a)



(b)



(c)

그림 14. (a) B학교 3D 프린터실 프린터 앞 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (b) 3D 프린터실 프린터에서 9m 떨어진 위치에서 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (c) B학교 측정시간대 인근 대기측정망의 PM_{2.5} 농도

3) C학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 76. C학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징	
학교급	중학교	
측정 날짜	7월 4일	7월 15일
학교 위치	경기도 도심지	
장소	4층 컴퓨터실	
교실 크기	8.2m × 12.6m × 2.4m	
천정 에어컨	비가동	가동
창문	닫혀 있음	열려 있음
창문 환풍기	미가동	4개 가동
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	없음	없음
날씨	낮에 비 잠시 내림	흐림
온도	30.1℃ ~ 31.3℃	25.8℃ ~ 26.6℃
습도	63.8% ~ 67.8%	64% ~ 65%

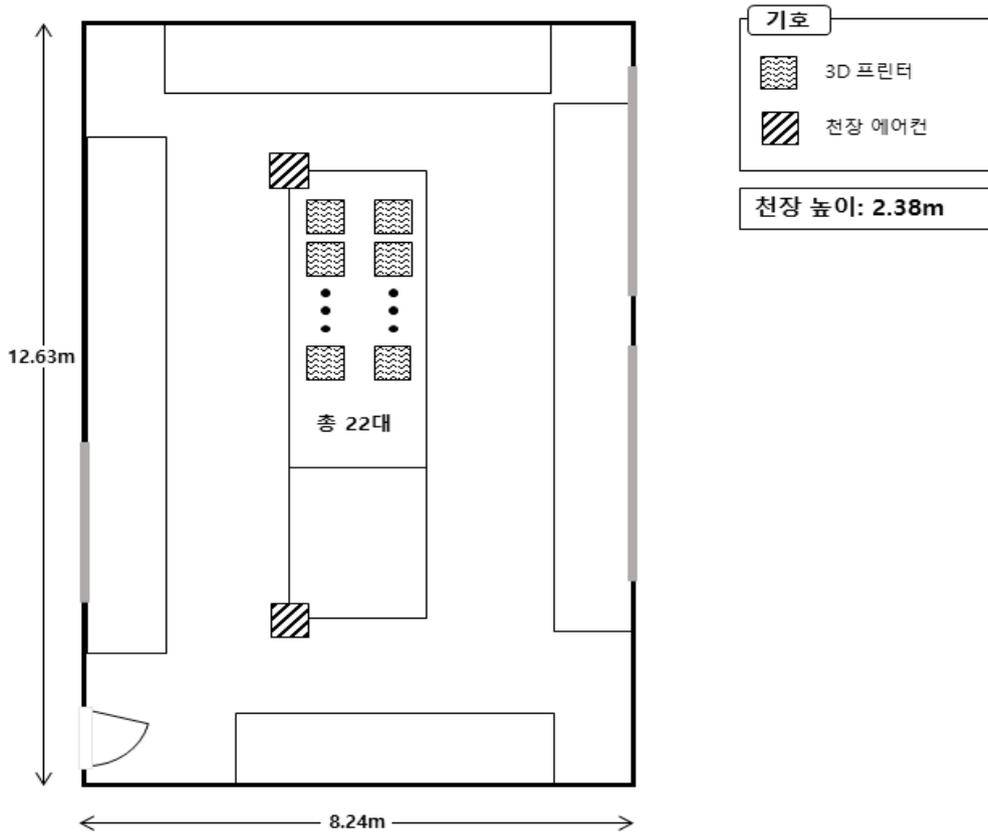


그림 15. C학교 3D 프린터 교실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 77. C학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	SMART 3D	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	40
	현재	38
사용 빈도	과거	1년에 2개월 이상
	현재	1년에 1개월
측정당시 가동수량	22	
3D 프린터 크기	19cm × 19cm × 20cm	
최대 제작 크기	9cm × 11cm × 11cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid), 다양한색상	
헤파필터	무	
인케이스	무	
프린터 제조국	중국	
필라멘트 제조국	한국/중국	
가동시간	약 5시간 30분	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	탑 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터 교실



(b) 3D 프린터 조작 및 가동



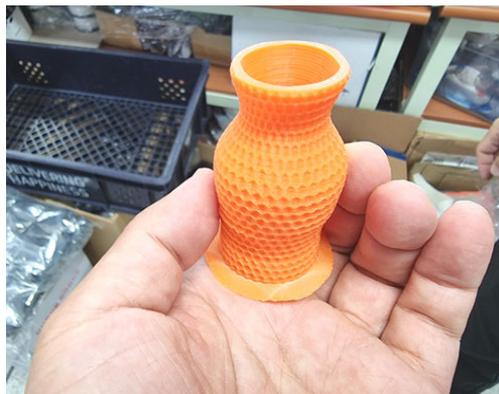
(c) 3D 모형 제작 중



(d) 3D 프린터에서 앞에서 측정



(e) 교실내 교사테이블과 측정 모습



(f) 제작된 제품

그림 16. C학교 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

가) 실내 환기가 불량할 때(창문 닫고 창문 환풍기도 끈 상태에서 측정)

C학교 4층의 컴퓨터실 내 포름알데히드 농도는 3D 프린터들이 나열되어 있는 테이블 앞쪽 30 cm에서 17 ppb, 테이블 뒤쪽 30 cm에서 24.8 ppb이었고, 3D 프린터 테이블 중앙에서 약 7m 떨어진 교사 테이블에서는 27.5 ppb로 나타나 모두 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1/10 이하로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 약 1/4 수준으로 낮았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았고, 톨루엔은 3D 프린터 뒤쪽 30 cm 위치에서는 14.92 ppb로 다른 위치에 비해 높았지만 노출기준의 1/100 미만으로 낮은 수준이며, 옥외에서 측정한 외기의 농도가 27.93 ppb임을 감안할 때 검출된 톨루엔이 3D 프린터에 의한 것으로 해석하기에는 모호하다고 판단된다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

중금속인 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 앞 30 cm에서 측정한 배경농도의 초미세입자의 평균 수농도는 7,841 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 1,224 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 10,174 개/cm³, 1,729 개/cm³로 증가하였고, 3D 프린터 가동이 종료된 이후의 배경농도는 각각 13,793 개/cm³, 2,449 개/cm³로 3D 프린터가 가동하는 동안의 농도에 비해 더 증가한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 3D 프린터에서 7m 떨어진 교사 테이블에서 측정한 초미세입자와 미세입자의 농도에서 동일하게 나타났다. 그 이유는 3D 프린터 측정을 하고 있는 동일한 시간대의 C학교 인근의 대기측정망 미세먼지(PM2.5) 농도변화와 같은 경향을 보였는데, 이는 3D 프린터에 가동에 의해 발생하는 초미세입자와 미세입

자 농도 보다 외기 미세먼지(실내 외기유입)의 농도변화가 실내 초미세입자와 미세입자 농도에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 해석된다.

한편 그림에도 불구하고 3D 프린터가 가동되고 시작하고 초기 30분 동안에는 초미세입자와 미세입자의 수농도 급격히 상승하는 것이 관찰되었고, 이때의 초미세입자 최고 수농도는 $28,690$ 개/ cm^3 으로 3D 프린터 가동 전 평균 배경농도에 비해 약 4배 높았다. 3D 프린터에서 7 m 떨어진 교사 테이블에서도 3D 프린터가 가동되고 초미세입자의 농도가 즉시 증가하는 것이 관찰되었지만, 최고농도는 배경농도에 비해 2배 이하로 나타났다.

이를 종합해 볼 때, C학교에서는 3D 프린터 사용 초기에 초미세입자 및 미세입자가 비교적 고농도로 발생하고, 특히 사용자는 3D 프린터 사용 초기에 3D 프린터에 밀접해 기기를 작동하고 유지보수하는 일을 하기 때문에 3D 프린터에서 발생하는 초미세입자에 직접적으로 노출된다고 할 수 있다.

표 78. C학교 4층 컴퓨터실내 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치			
		컴퓨터실 3D 프린터 앞(30cm)	컴퓨터실 3D 프린터 뒤(30cm)	교사 테이블	외기
포름알데히드	4	17.0	24.8	27.5	<LOD
벤젠	4	0.85	<LOD	<LOD	<LOD
톨루엔		1.01	14.92	3.82	27.93
에틸벤젠		0.06	4.29	3.57	0.82
자일렌		<LOD	1.1	0.87	0.96
스티렌		<LOD	0.37	0.29	0.25
비닐클로라이드	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 79 .C학교 4층 컴퓨터실내 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치			
		컴퓨터실 3D 프린터 앞(30cm)	컴퓨터실 3D 프린터 뒤(30cm)	교사 테이블 (7m)	외기
카드뮴	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 80. C학교 4층 컴퓨터실내 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ± 표준편차	기하평균 (기하표준편 차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	40	SMPS	7,841 ±505	7,826 (1.07)	7,259-8,851
			OPS	1,224 ±200	1,209 (1.17)	1,015-1,506
	3D 프린터 가동중	332	SMPS	10,174 ±3,351	9,706 (1.35)	6,397-28,690
			OPS	1,729 ±562	1,640 (1.39)	1,042-2,697
	3D 프린터 가동후	34	SMPS	13,793 ±237	13,791 (1.02)	13,418-14,476
			OPS	2,449 ±97	2,448 (1.04)	2,276-2,632
3D 프린터 에서 7m	3D 프린터 가동전	40	SMPS	4,014 ±91	4,014 (1.02)	3,832-4,268
			OPS	1,032 ±42	1,032 (1.04)	966-1,104
	3D 프린터 가동중	332	SMPS	5,068 ±1,524	4,856 (1.34)	3,314-7,649
			OPS	1,618 ±547	1,527 (1.41)	983-2,570
	3D 프린터 가동후	34	SMPS	7,348 ±117	7,347 (1.02)	7,160-7,590
			OPS	2,245 ±99	2,244 (1.05)	2,064-2,426

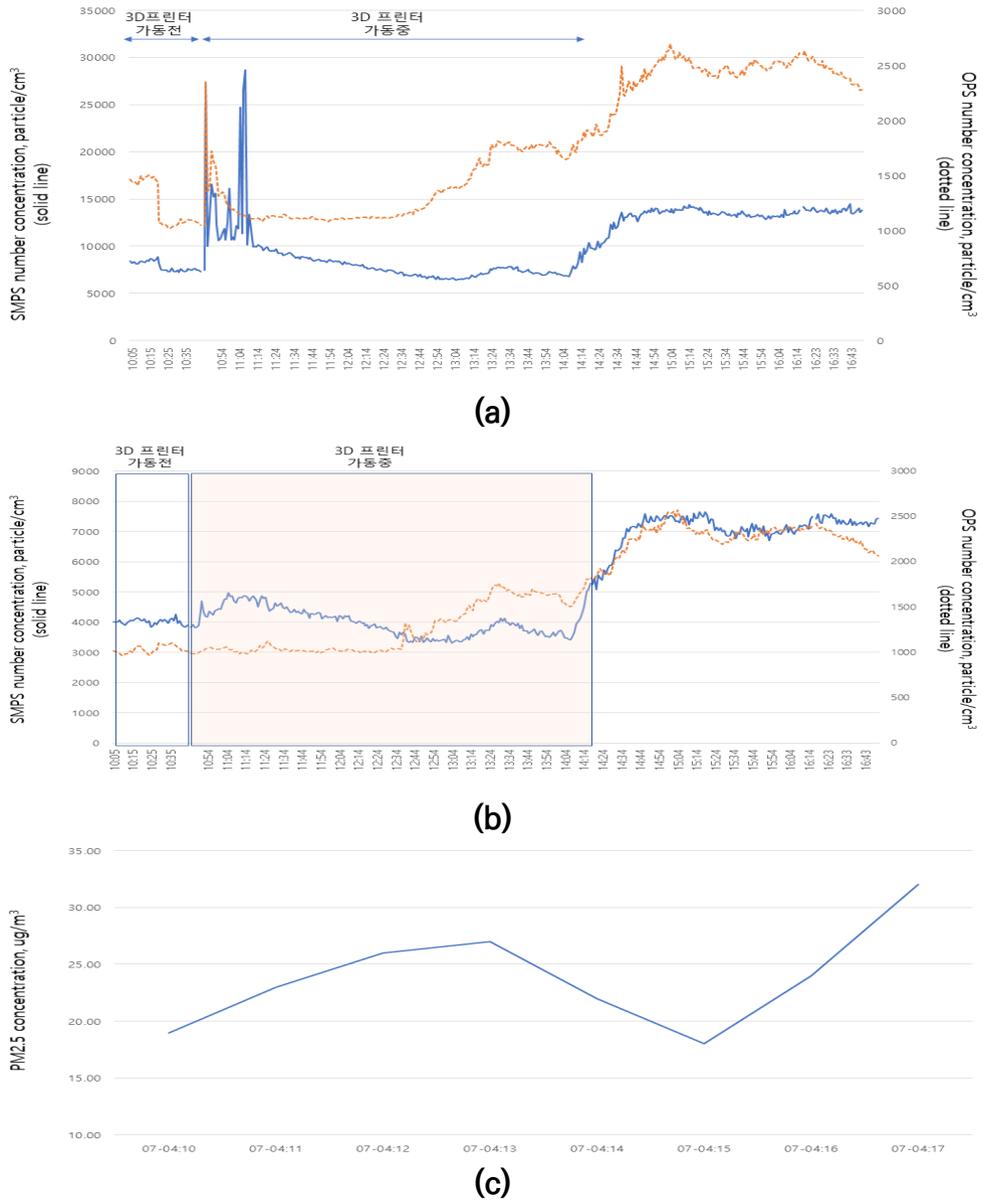


그림 17. 교실 창문이 닫혀 있을 때 C학교 3D 프린터실 SMPS와 OPS에 의한 실시간 미세먼지 농도, (a) 3D 프린터 앞, (b) 교사 테이블(3D 프린터에서 7m 떨어진 위치), (c) C학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

나) 실내 환기가 양호할 때(창문을 개방하고 창문 환풍기도 가동한 상태)

C학교 4층의 컴퓨터실 내 포름알데히드 농도는 3D 프린터들이 나열되어 있는 테이블 앞쪽 30 cm에서 12.5 ppb, 테이블 뒤쪽 30 cm에서 12.2 ppb이었고, 3D 프린터 테이블 중앙에서 약 7m 떨어진 교사 테이블에서는 11.0 ppb로 나타나 모두 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1/10 이하로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 약 1/10 수준으로 낮았으며 실내 환기상태가 불량할 때 측정했을 때의 농도에 비해 약 절반 수준으로 낮았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았고, 톨루엔은 3D 프린터 앞쪽과 뒤쪽 30 cm 위치에서 각각 21.98 ppb, 11.05 ppb, 7m 떨어진 교사 테이블에서 13.92 ppb로 나타나 모두 옥외에서 측정한 외기 농도(4.11 ppb)에 비해 높았지만 노출기준의 1/100 미만으로 낮았다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

중금속인 카드뮴, 코발트, 납, 니켈은 모든 시료에서 검출한계 미만이었 고, 크롬은 교사 테이블에서만 0.1361 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났는데 노출기준에 비해 1/1000 미만으로 미비한 수준이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 앞 30 cm에서 측정한 배경농도의 초미세 입자의 평균 수농도는 3,975 개/ cm^3 , 미세입자의 평균 수농도는 763 개/ cm^3 이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 8,558 개/ cm^3 , 1,325 개/ cm^3 로 증가하였고, 3D 프린터 가동이 종료된 이후의 배경농도는 각각 15,384 개/ cm^3 , 1,120 개/ cm^3 로 3D 프린터가 가동하는 동안의 농도에 비해 초미세입자 농도는 더 증가한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 3D 프린터에서 7m 떨어진 교사 테이블에서 측정한 초미세입자와 미세 입자의 농도에서 동일하게 나타났다. 그 이유는 3D 프린터 측정을 하고 있는 동일한 시간대의 C학교 인근의 대기측정망 미세먼지(PM2.5) 농도변

화와 같은 경향을 보였는데, 이는 3D 프린터에 가동에 의해 발생하는 초미세입자와 미세입자 농도 보다 외기 미세먼지(실내 외기유입)의 농도변화가 실내 초미세입자와 미세입자 농도에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 해석된다.

한편 모든 창문이 닫혀 있고 환풍기도 가동되지 않는 환기가 불량한 상태인 상태에서 측정한 결과와 마찬가지로 3D 프린터가 가동되고 초기 30분 동안에는 초미세입자와 미세입자의 수농도 상승하는 것이 관찰되었다. 그러나 농도 증가폭은 배경농도에 비해 최대 약 2배 정도로 나타나 실내 창문 개방과 환풍기 가동이 3D 프린터 발생물질 노출수준을 저감하는데 도움이 되는 것으로 확인되었다.

표 81. C학교 4층 컴퓨터실내 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치			
		컴퓨터실 3D 프린터 앞(30cm)	컴퓨터실 3D 프린터 뒤(30cm)	교사 테이블 (7m 위치)	외기
포름알데히드	4	12.5	12.2	11.0	<LOD
벤젠	4	0.04	0.22	0.31	<LOD
톨루엔		21.98	11.05	13.92	4.11
에틸벤젠		0.90	0.47	0.44	0.22
자일렌		0.58	0.34	0.34	0.13
스티렌		0.22	0.12	0.12	0.06
비닐클로라이드	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 82. C학교 4층 컴퓨터실내 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치			
		컴퓨터실 3D 프린터 앞(30cm)	컴퓨터실 3D 프린터 뒤(30cm)	교사 테이블 (7m)	외기
카드뮴	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	0.136	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 83. C학교 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ± 표준편 차	기하평균 (기하표준편 차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	40	SMPS	3,975 ±984	3,902 (1.19)	3,528-8,705
			OPS	763 ±79	760 (1.09)	710-1,136
	3D 프린터 가동중	248	SMPS	8,558 ±5,004	7,585 (1.57)	4,582-20,332
			OPS	1,325 ±244	1,303 (1.21)	930-1,825
	3D 프린터 가동후	45	SMPS	15,384 ±1,410	15,316 (1.10)	11,547-17,434
			OPS	1,120 ±139	1,111 (1.13)	863-1,331
3D 프린터 에서 7m	3D 프린터 가동전	40	SMPS	2,320 ±189	2,314 (1.08)	2,154-3,041
			OPS	756 ±18	756 (1.02)	725-791
	3D 프린터 가동중	248	SMPS	4,838 ±2,979	4,240 (1.60)	2,449-11,945
			OPS	1,173 ±221	1,153 (1.21)	816-1,609
	3D 프린터 가동후	45	SMPS	8,973 ±805	8,935 (1.10)	6,702-10,383
			OPS	947 ±111	941 (1.13)	737-1,118

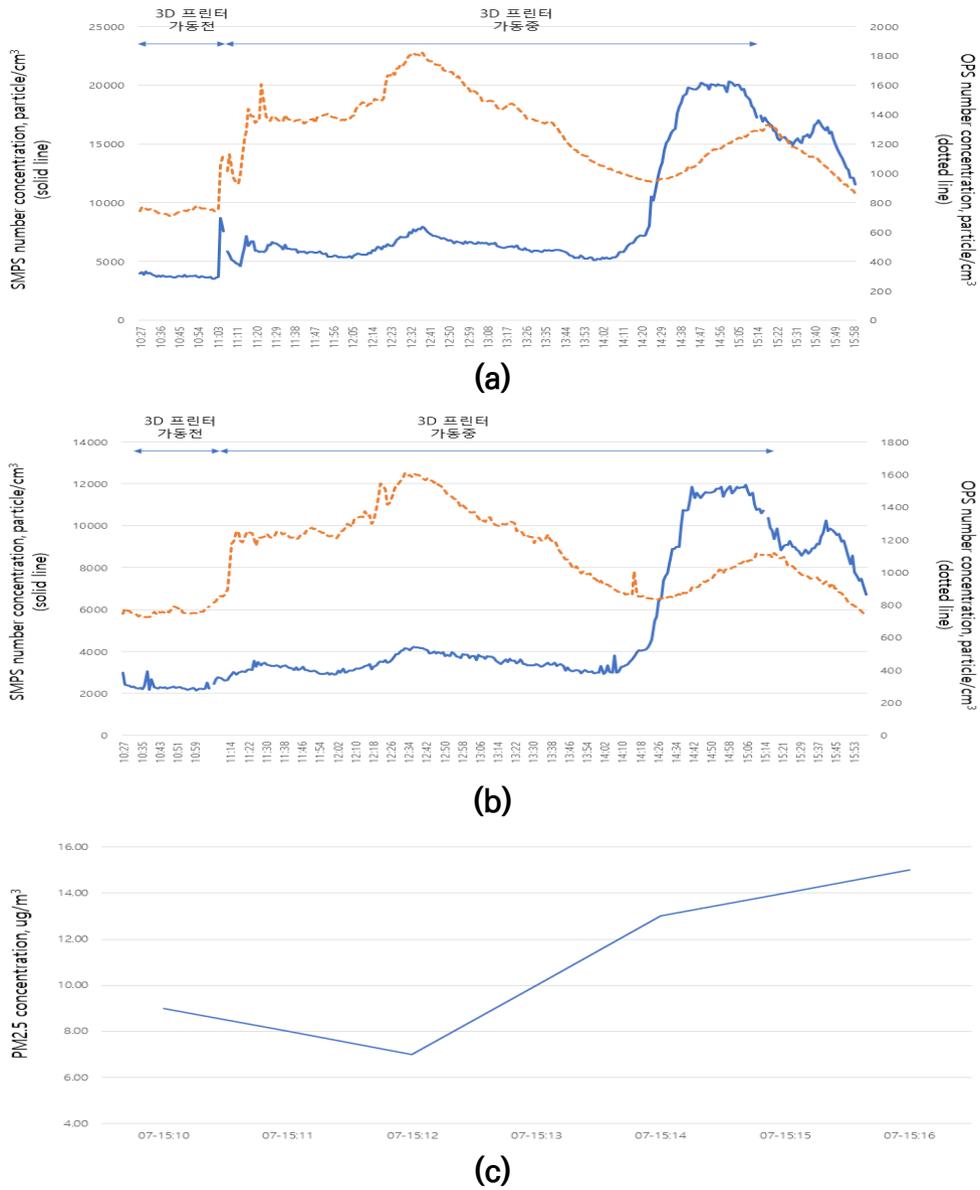


그림 18. 교실 창문이 열려 있을 때, C학교 3D 프린터실 SMPS와 OPS에 의한 실시간 미세먼지 농도, (a) 3D 프린터 앞, (b) 교사 테이블(3D 프린터에서 7m 떨어진 위치), (c) C학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

4) D학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 84. D학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	대학교
측정 날짜	8월 8일~9일
학교 위치	서울
장소	지하1층
교실 크기	12.6m × 7.2m × 3.7m
천정 에어컨	가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	없음
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	레이저가공기 사용이 있었음 (15시 ~ 17시 15분)
날씨	비움
평균 온도	22.1℃
평균 습도	71.3%
기타	3D 프린터실과 복도는 여닫이 문으로 연결되어 있으며, 출입시 외에는 닫혀 있음

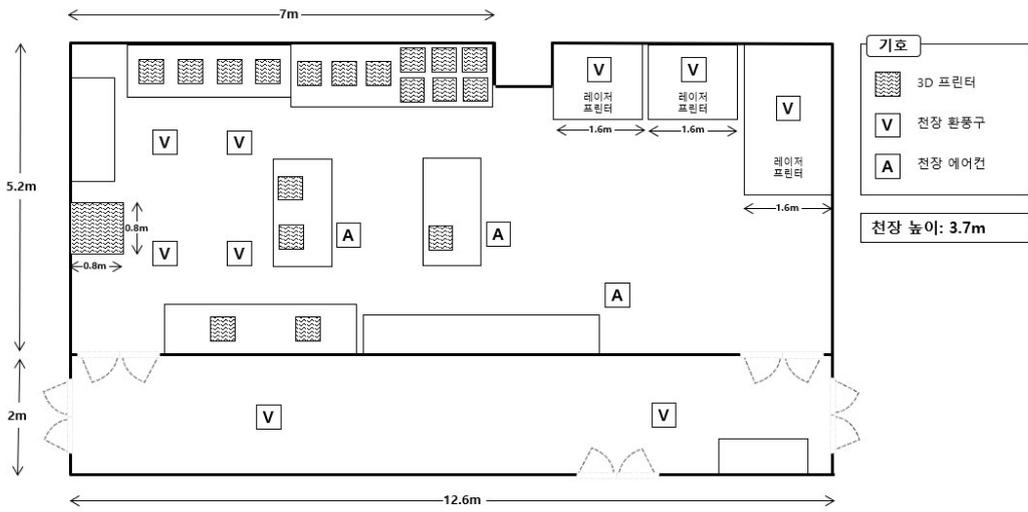


그림 19. D학교 3D 프린터실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 85. D학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	3DWOX(7X)	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	19
	현재	19
사용 빈도	과거	모름
	현재	주당 2~3회
측정당시 가동수량	6	
3D 프린터 크기	42cm × 43cm × 44cm	
최대 제작 크기	15cm × 15cm × 18cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	유	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국(일부 중국)	
가동시간	약 9시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	반구 모형	

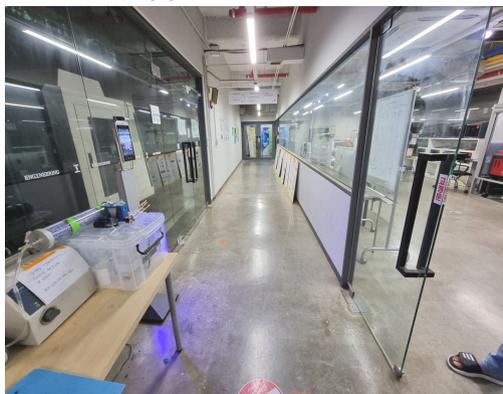
(3) 작업환경측정 사진



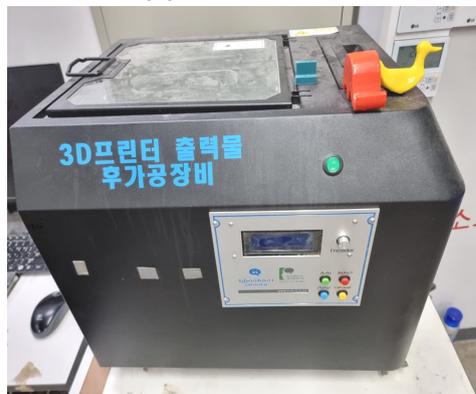
(a) 3D 프린터실



(b) 3D 프린터



(c) 복도(우측 3D 프린터실)



(d) 후가공 장비(미가동)



(e) 레이저 가공기(3D 프린터와 별도 작업)

그림 20. D학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

D학교 **3D 프린터 교실**의 포름알데히드 농도는 3D 프린터 옆에서 12.8 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 4% 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 13% 수준으로 낮았다. 3D 프린터에서 3m 떨어진 위치에서는 11.6 ppm으로 3D 프린터 옆 보다 다소 낮았으며 3D 프린터실 밖 복도에서 측정한 시료는 13.2 ppm으로 **3D 프린터 옆 보다 다소 높았다. 그러나 시료 3개 모두 농도가 낮으면서 유사하여 검출된 포름알데히드가 3D 프린터에 기인한 것인지 불명확하였다.**

3D 프린터 주변과 복도에서 측정된 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았지만, 다른 학교들과 비교해서는 다소 높았는데 그 이유는 3D 프린터 인근의 레이저 가공기가 15시부터 17시까지 가동되었는데 레이저 가공에서 발생하는 연소물질 때문으로 판단된다(MDF 목재를 커팅 가동하였음). 이는 레이저 가공기 앞에서 측정한 시료의 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도가 가장 높아 이를 뒷받침한다. D학교 레이저 가공기는 부스(전면개방형) 내부에 있었고, 레이저 가공기 자체가 밀폐형 구조임에도 일부 VOCs가 실내공간으로 방출되는 것으로 보이는데, 부스 없이 레이저 가공기를 사용하는 학교도 많아 향후 레이저 가공기 사용시 주의가 필요할 것으로 생각된다.

비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 옆에서 측정한 배경농도의 초미세입자의 평균 수농도는 1,454 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 581 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 1,494 개/cm³, 400 개/cm³으로 큰 차이를 보이지 않았고, D학교 인근의 대기측정망 미세먼지(PM2.5) 농도 변화와 유사한 경향을 보이기도 하여 외기 미세먼지(실내 외기유입)의 농도 변화도 실내 미세입자 농도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 86. D학교 3D 프린터실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치			
		3D 프린터 옆	3D 프린터 인근(3m)	3D 프린터실 밖 복도	레이저커팅기 앞*
포름알데히드	4	12.80	11.6	13.20	NA
벤젠	4	3.84	3.60	8.13	6.7
톨루엔		26.77	25.6	22.8	86.0
에틸벤젠		8.39	7.10	5.50	23.2
자일렌		8.84	8.00	7.80	25.5
스티렌		0.96	0.92	0.87	3.8
비닐클로라이드	4	<LOD	<LOD	<LOD	NA
1,3 부타디엔	4	<LOD	<LOD	<LOD	NA

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

*레이저커팅기 중 30분 동안만 측정한 결과

표 87. D학교 3D 프린터실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치		
		3D 프린터 옆	3D 프린터 인근(3m)	3D 프린터실 밖 복도
카드뮴	3	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 88. D학교 3D 프린터실 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ± 표준편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 옆	3D 프린터 가동전	1,077	SMPS	1,454 ±581	1,350 (1.46)	695-2,750
			OPS	155 ±87	134 (1.70)	59-404
	3D 프린터 가동중	646	SMPS	1,494 ±400	1,436 (1.34)	793-2,610
			OPS	187 ±51	141 (1.07)	68-222
	3D 프린터 가동후	93	SMPS	1,217 ±84	1,215 (1.06)	1,101-1,798
			OPS	71 ±2	71 (1.05)	66-77
3D 프린터 실 밖 복도	3D 프린터 가동전	1,077	SMPS	1,306 ±58	1,295 (1.05)	757-3,180
			OPS	189 ±6	114 (1.05)	99-864
	3D 프린터 가동중	646	SMPS	1,007 ±152	997 (1.16)	739-1,589
			OPS	145 ±25	136 (1.17)	102-244
	3D 프린터 가동후	93	SMPS	1,295 ±58	1,295 (0.02)	1,172-1,398
			OPS	114 ±6	114 (1.05)	101-124

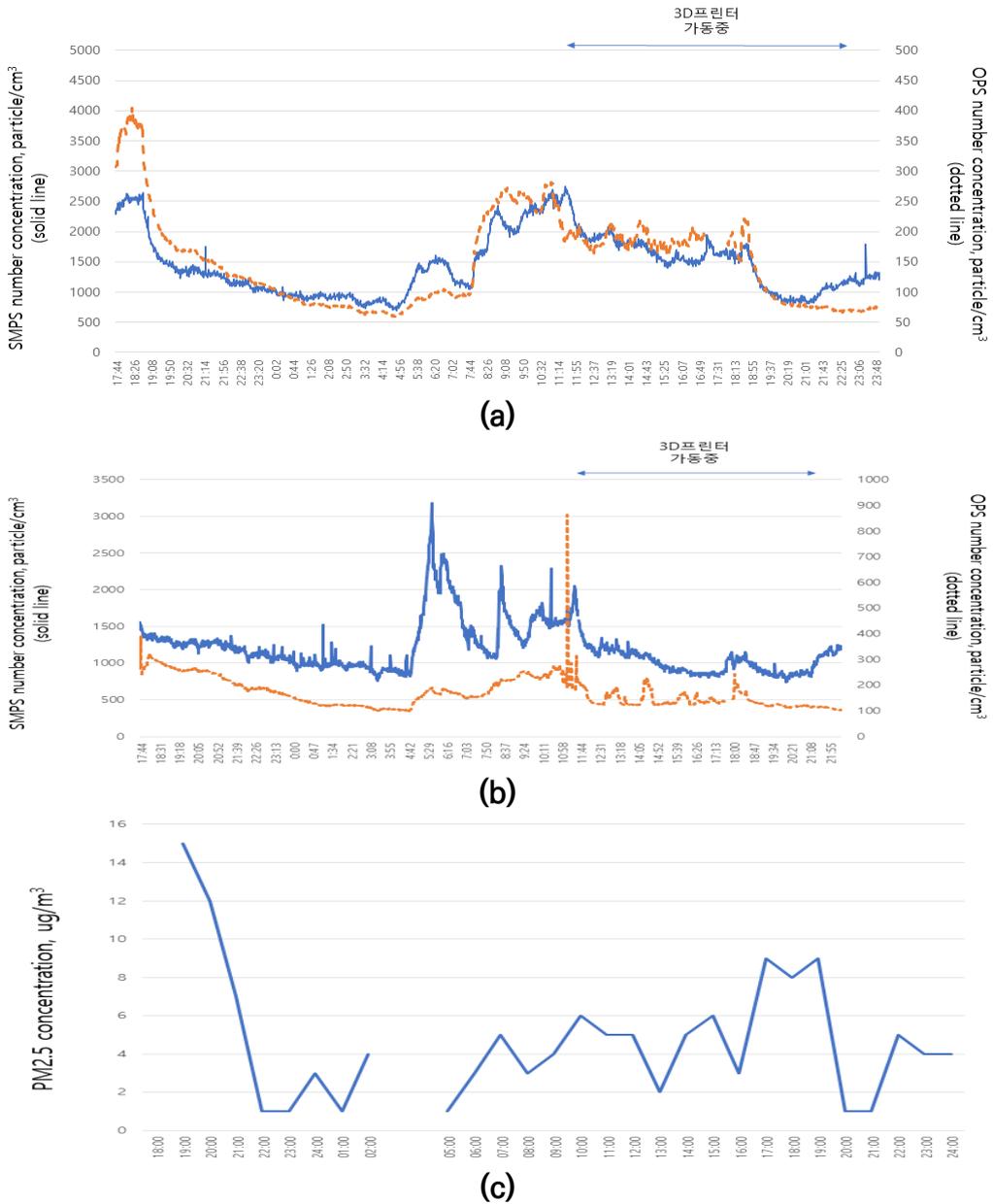


그림 21. D학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 외부 복도, (c) D학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

5) E학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 89. E학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	중학교
측정 날짜	9월 1일~9월 2일
학교 위치	서울
장소	3층
교실 크기	5.5m × 3.1m × 2.6m
천정 에어컨	미가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	미가동
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	없음
날씨	맑음
평균 온도	27.0℃
평균 습도	51.0%
기타	3D 프린터실과 앞 교실은 여닫이 문으로 연결되어 있으며, 출입시 외에는 닫혀 있음

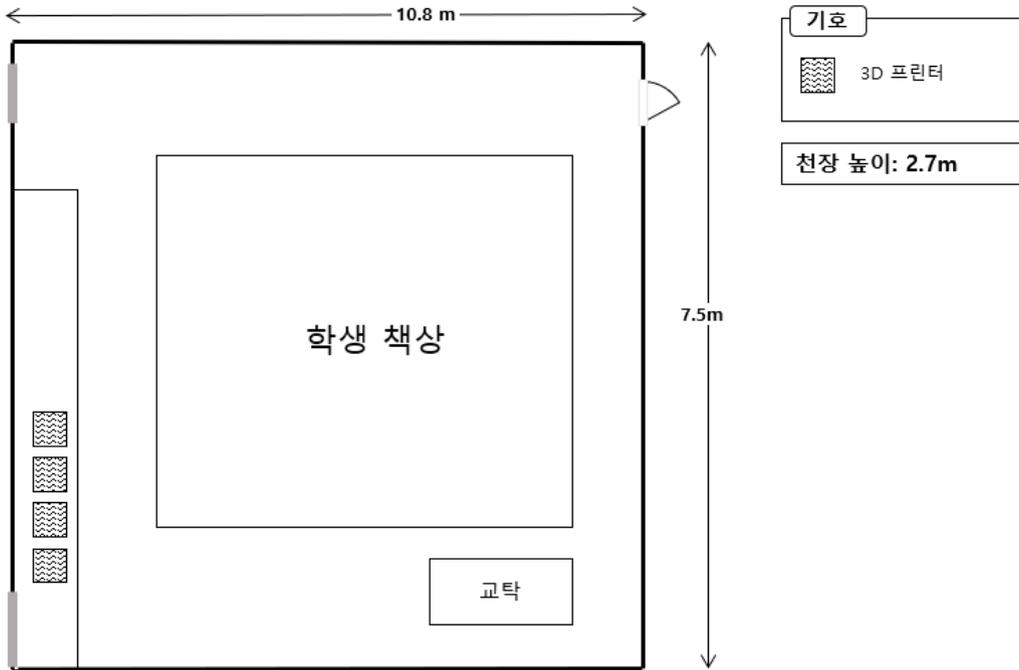


그림 22. E학교 3D 프린터 교실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 90. E학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	신도리코 3DWOX DP200	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	6
	현재	6
사용 빈도	과거	모름
	현재	최근 2년내 미사용
측정당시 가동수량	4	
3D 프린터 크기	42cm × 43cm × 44cm	
최대 제작 크기	20cm × 20cm × 18cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	유	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국	
가동시간	약 10시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	그물 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터실



(b) 3D 프린터 앞 교실에서 바라본 3D 프린터실



(c) 3D 프린터 앞 교실

그림 23. E학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

E학교 3D 프린터 교실의 포름알데히드 농도는 3D 프린터 앞에서 47.4 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1/6의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 1/2 수준으로 낮았다. 그리고 3D 프린터 앞 교실에서는 36.9 ppb로 3D 프린터 앞에 비해 다소 낮았고, 외기 시료에서는 검출한계 미만이었다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았고, 3D 프린터에서 1m 떨어진 위치와 9m 떨어진 위치 간에도 차이를 보이지 않았다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 앞에서 측정한 배경농도의 초미세입자 평균 수농도는 9,675 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 302 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 5,531 개/cm³, 252 개/cm³으로 오히려 더 낮았고, 시간이 갈수록 농도가 점차 낮아지는 경향을 보였는데, 이는 외기 미세입자 농도 변화에 영향을 받은 것으로 보인다.

3D 프린터에서 발생하는 미세입자의 농도가 미미하기 때문에 옥외에서 교실로 유입되는 미세입자의 영향이 크게 보이는 것으로 해석된다.

표 91. E학교 3D 프린터실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치		
		3D 프린터 앞	3D 프린터실 앞 교실	외기
포름알데히드	3	47.4	36.9	<LOD
벤젠	3	0.16	0.15	0.16
톨루엔		5.36	5.42	2.27
에틸벤젠		0.94	0.86	0.45
자일렌		1.61	1.49	0.39
스티렌		0.50	0.37	<LOD
비닐클로라이드		3	<LOD	<LOD
1,3 부타디엔	3	<LOD	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 92. E학교 3D 프린터실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치		
		3D 프린터 앞	3D 프린터 인근(3m)	3D 프린터실 밖 복도
카드뮴	3	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 93. E학교 3D 프린터실 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	54	SMPS	9,675 ±1,957	9,496 (1.21)	7,342-15,178
			OPS	302 ±36	300 (1.12)	257-417
	3D 프린터 가동중	180	SMPS	5,531 ±1,570	5,316 (1.33)	3,502-8,523
		322	OPS	252 ±9	252 (1.04)	239-280
3D 프린터 실 앞 교실	3D 프린터 가동전	54	SMPS	10,078 ±1,160	10,012 (1.12)	8,053-11,983
			OPS	417 ±45	415 (1.11)	357-503
	3D 프린터 가동중	180	SMPS	6,844 ±1,242	6,734 (1.20)	4,898-10,536
		180	OPS	354 ±8	354 (1.02)	338-375

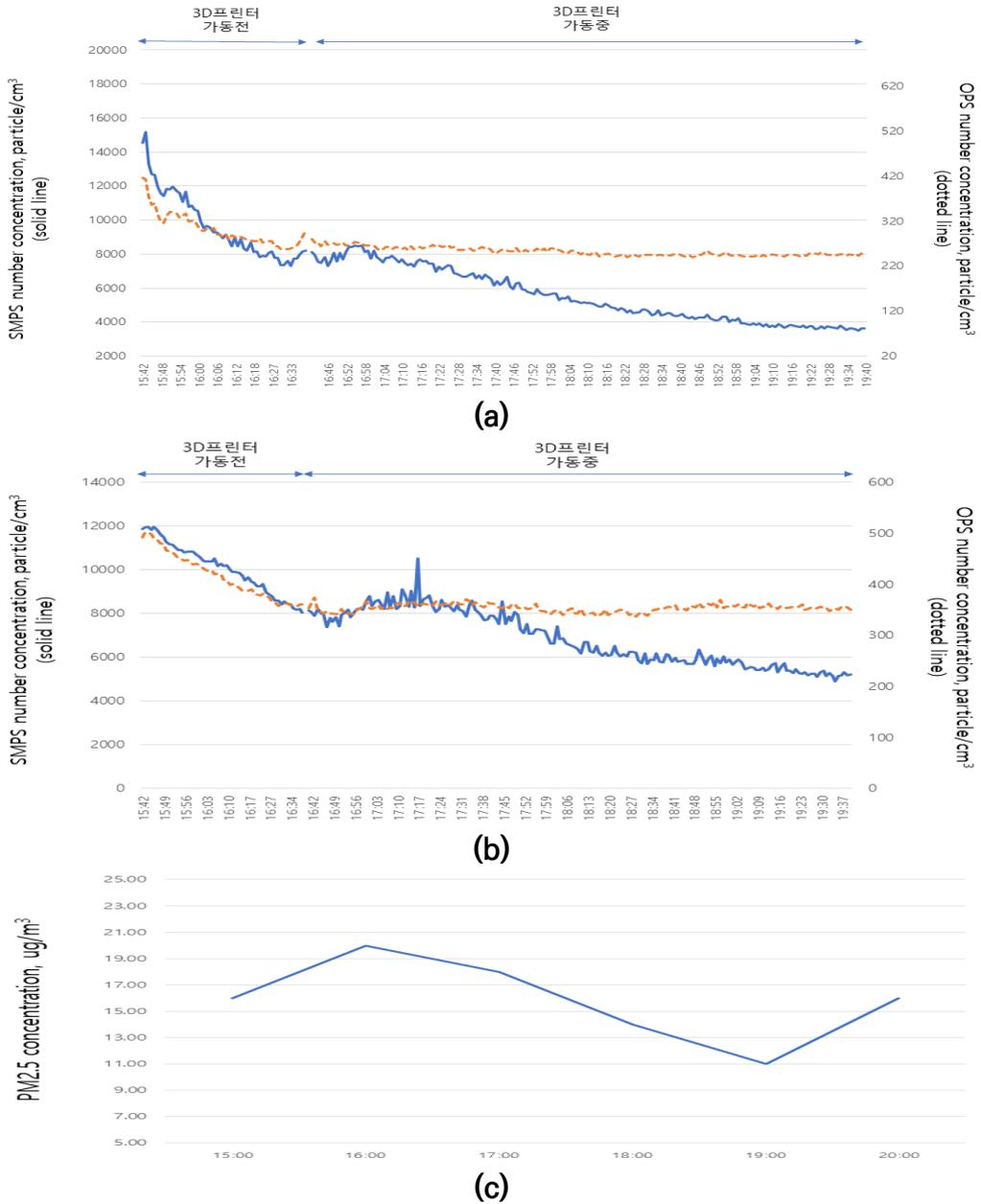


그림 24. E학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 전 교실, (c) E학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

6) F학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 94. F학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	고등학교
측정 날짜	9월 15일
학교 위치	경상남도
장소	3층
교실 크기	3.5m × 6.9m × 2.5m
천정 에어컨	미가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	없음 (국소배기 부스 사용)
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	없음
날씨	맑음
평균 온도	28.4℃
평균 습도	59.2%
기타	3D 프린터실과 앞 교실은 여닫이 문으로 연결되어 있으며, 출입시 외에는 닫혀 있음

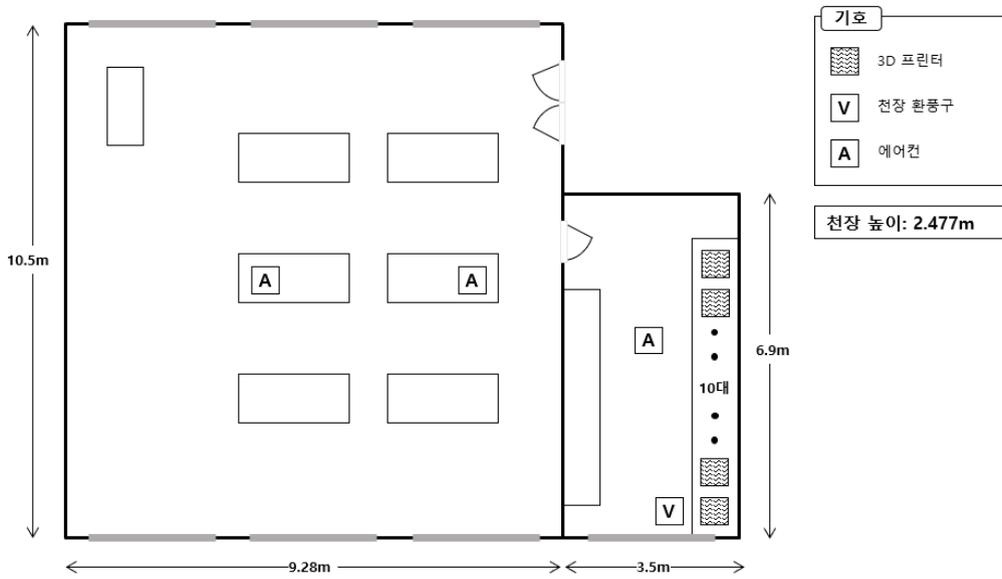


그림 25. F학교 3D 프린터실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 95. F학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	Moment: 6대, Moment2: 6대	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	10
	현재	10
사용 빈도	과거	주당 3회 8시간/회
	현재	최근 2-3년내 미사용
측정당시 가동수량	8	
3D 프린터 크기	35cm × 39cm × 50cm	
최대 제작 크기	16cm × 16cm × 16cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	유	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국	
가동시간	약 5.5시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	사각형 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터실과 전용 부스



(b) 3D 프린터실 앞 교실



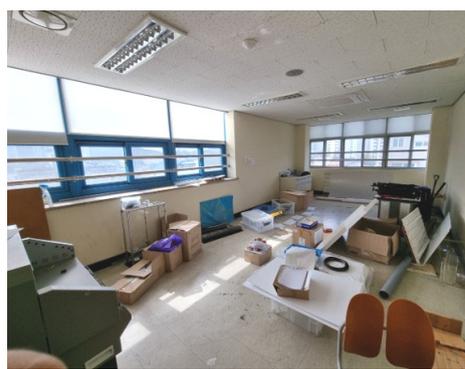
(c) 3D 프린터 부스내 배기장치



(d) 3D 프린터 부스 개방 후 측정



(e) 3D 프린터 제품



(f) 과거 3D 프린터 실 모습

그림 26. F학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

○ 국소배기 장치가 가동 중인 부스 안에서 3D 프린터가 가동될 때

F학교 3D 프린터 교실의 포름알데히드 농도는 3D 프린터 앞에서 20.4 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 7%의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 1/5 수준으로 낮았다. 그리고 3D 프린터 앞 교실에서는 32.6 ppb로 3D 프린터 교실에 비해 오히려 다소 높았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았고, 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 앞에서 측정한 배경농도의 초미세입자 평균 수농도는 3,685 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 490 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 6,099 개/cm³, 401 개/cm³으로 초미세입자 농도는 다소 증가하고, 미세입자 농도는 다소 감소하였다. 3D 프린터 앞 교실에서도 같은 경향을 보여, 3D 프린터 가동이 영향을 미쳤다고 보기에는 한계가 있었다. 측정당일 외기의 PM2.5 농도는 시간에 따른 농도 변화가 비교적 적었고, 3D 프린터 교실에 천정 환기가 없고, 창문에도 환풍기가 없는 구조였던 것을 감안하면 F학교 3D 프린터 교실은 외기의 영향은 거의 없었을 것으로 판단된다.

○ 국소배기 하지 않고 부스 도어를 개방한 상태로 3D 프린터 가동할 때 3D 프린터 앞의 포름알데히드 농도는 23.3 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 8%의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 23% 수준으로 낮았다. 그리고 3D 프린터 앞 교실에서는 71.1 ppb로 3D 프린터 교실에 비해 오히려 약 3배 높았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮고, 3D 프린터가 가동되는 교실 보다 앞 교실에서의 농도가 더 높아 3D 프린터에서 발생된 VOCs가 교실로 확산되는지는 알 수 없었다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈은 모든 시료에서 검출한계 미만이었고, 크롬은 3D 프린터 앞에서만 $0.020 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 0.004%로 매우 낮았다.

프린터 가동전 3D 프린터 앞에서 측정한 배경농도의 초미세입자 평균 수농도는 $7,480 \text{ 개}/\text{cm}^3$, 미세입자의 평균 수농도는 $386 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 $15,969 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $380 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 미세입자 농도는 변화가 거의 없었지만 초미세입자 농도는 2배 이상 증가하였다. 그러나 3D 프린터 앞 교실에서는 3D 프린터 가동 전후 농도 변화가 거의 없어 3D 프린터 가동이 3D 프린터실 초미세입자 농도 증가가 직접적인 영향을 미쳤다고 해석된다. 그림에서도 부스 도어를 개방한 상태에서 3D 프린터를 가동하자 초미세입자 농도가 급격히 증가하는 것이 관찰되고 시간이 갈수록 점차 감소하는 것을 보여준다.

표 96. F학교 3D 프린터실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치			
		3D 프린터가 환기부스 내에 있을때		환기부스 도어 개방하고 환기장치 off	
		3D 프린터 앞	3D 프린터실 앞 교실	3D 프린터 앞	3D 프린터실 앞 교실
포름알데히드	4	20.4	32.6	23.3	71.1
벤젠	4	0.09	0.06	0.11	0.22
톨루엔		6.34	4.74	9.03	17.99
에틸벤젠		0.65	0.49	0.82	1.93
자일렌		0.53	0.42	0.89	2.29
스티렌		0.90	<LOD	0.17	0.97
비닐클로라이드	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 97. F학교 3D 프린터실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치			
		3D 프린터가 환기부스 내에 있을때		환기부스 도어 개방하고 환기장치 off	
		3D 프린터 앞	3D 프린터실 앞 교실	3D 프린터 앞	3D 프린터실 앞 교실
카드뮴	4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	0.020	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

가) 국소배기 장치가 가동 중인 부스 안에서 3D 프린터가 가동될 때

표 98. F학교 3D 프린터실 초미세입자 및 미세입자 농도(부스안에서 3D 프린터 가동)

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준편차	기하평균 (기하표준편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	29	SMPS	3,685 ±162	3,682 (1.04)	3,392- 4,042
			OPS	490 ±8	490 (1.02)	479-507
	3D 프린터 가동중	331	SMPS	6,099 ±2,185	5,685 (1.47)	3,180-9,332
			OPS	401 ±32	400 (1.08)	348-478
3D 프린터 실 앞 교실	3D 프린터 가동전	24	SMPS	1,520 ±84	1,519 (1.06)	1,388-1,765
			OPS	460 ±40	459 (1.08)	442-645
	3D 프린터 가동중	331	SMPS	2,289 ±670	2,193 (1.34)	1,426-3,334
			OPS	392 ±30	391 (1.08)	337-452

가) 부스 도어를 개방하고 3D 프린터 가동(국소배기 장치 미가동)

표 99. F학교 3D 프린터실 초미세입자 및 미세입자 농도(국소배기 장치 미가동)

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	30	SMPS	7,480 ±317	7,474 (1.04)	6,962-8,167
			OPS	386 ±4	386 (1.01)	381-395
	3D 프린터 가동중	331	SMPS	15,969 ±4949	15,333 (1.32)	6,845-34,208
			OPS	380 ±21	380 (1.05)	364-659
3D 프린터 실 앞 교실	3D 프린터 가동전 (개방)	30	SMPS	3,166 ±76	3,166 (1.02)	2,976-3,346
			OPS	370 ±5	370 (1.01)	360-380
	3D 프린터 가동중	331	SMPS	3,016 ±405	2,988 (1.15)	2,242-3,673
			OPS	367 ±9	367 (1.02)	351-392

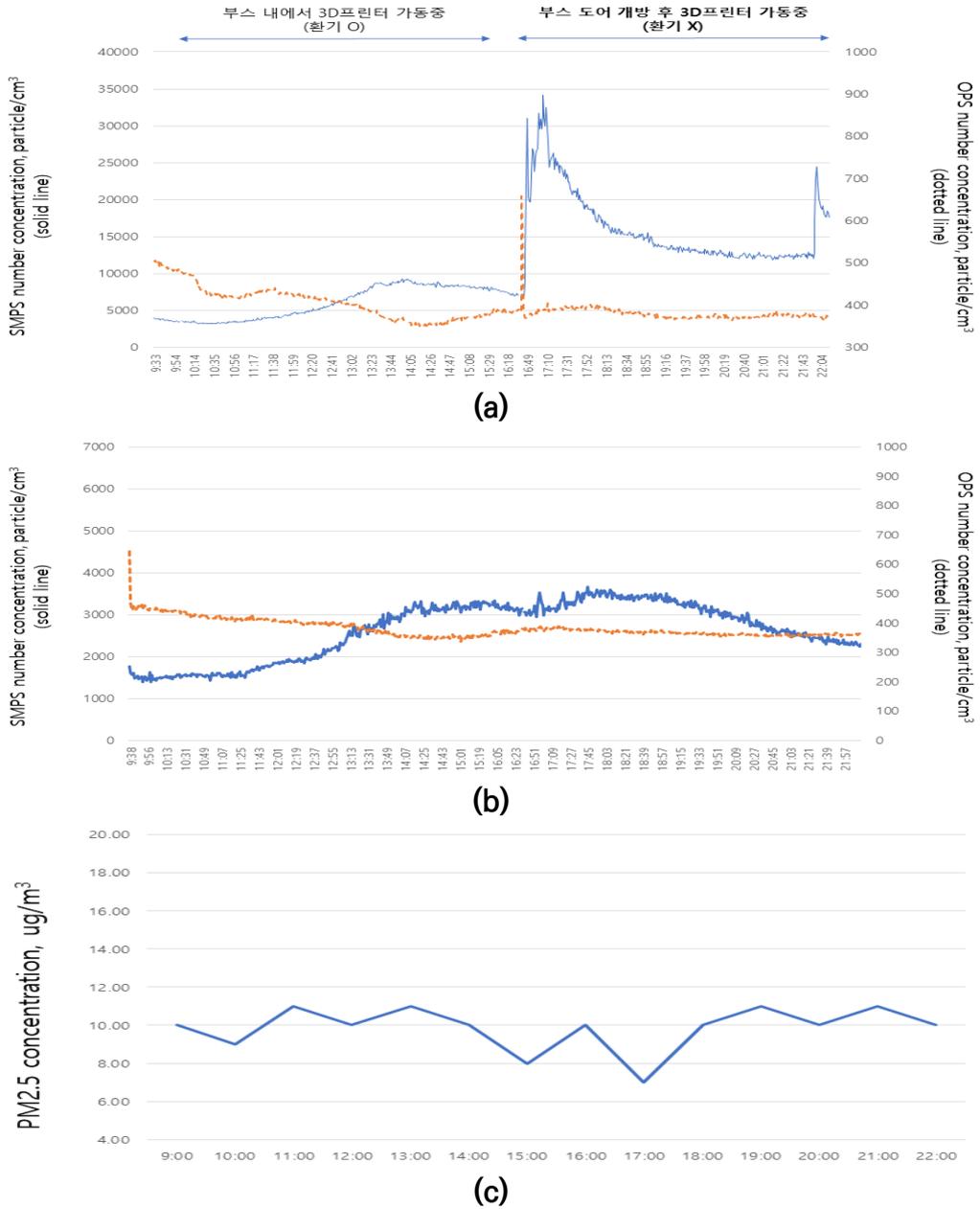


그림 27. F학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 전 교실, (c) F학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

7) G학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 100. G학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	고등학교
측정 날짜	9월 21일
학교 위치	충청남도
장소	1층
교실 크기	11.4m × 2.1m × 3.0m
스탠드 에어컨	가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	없음 (캐노피 후드 가동)
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	없음
날씨	맑음
평균 온도	25.4℃
평균 습도	42.9%
기타	3D 프린터실과 앞 교실은 여닫이 문으로 연결되어 있으며, 출입시 외에는 닫혀 있음

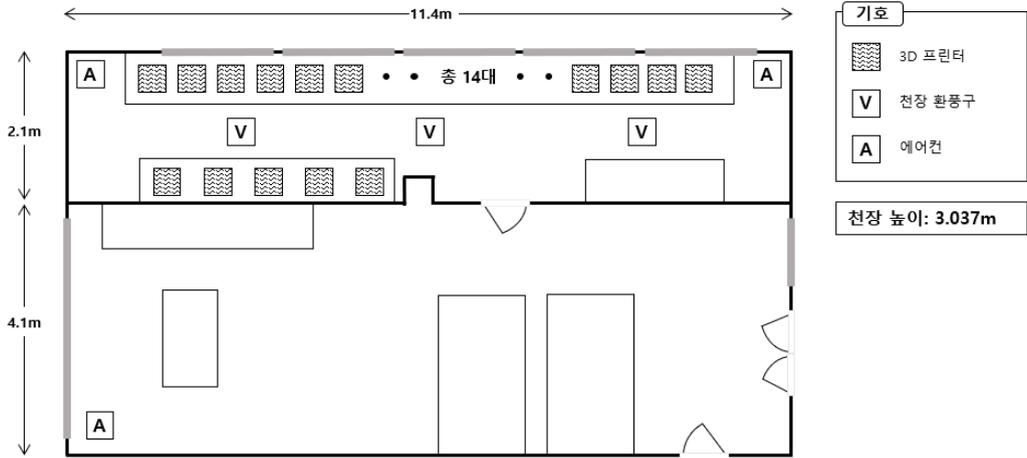


그림 28. G학교 3D 프린터실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 101. G학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	3DWOX 1	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	18
	현재	18
사용 빈도	과거	학기 8개월 중 5달 사용
	현재	상동
측정당시 가동수량	13	
3D 프린터 크기	42cm × 43cm × 44cm	
최대 제작 크기	20cm × 20cm × 18cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	유	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국	
가동시간	약 5시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	다양한 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터실



(b) 3D 프린터실 앞 교실



(c) 학생들의 3D 프린터 사용



(d) 후처리 도구들(작업 없었음)



(e) 캐노피 후드 면속도 측정

그림 29. G학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

3D 프린터 옆의 포름알데히드 농도는 4.4 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 1%의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 4% 수준으로 낮았다. 그리고 3D 프린터 앞 교실에서는 7.4 ppb로 3D 프린터실 보다 오히려 더 높았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮고, 3D 프린터실과 3D 프린터실 앞 교실 간에 차이도 거의 없었다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 옆에서 측정한 배경농도의 초미세입자 평균 수농도는 4,240 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 178 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동하는 동안의 평균 수농도는 각각 5,184 개/cm³, 137 개/cm³, 3D 프린터 가동이 종료된 이후의 농도는 각각 5,802 개/cm³, 140 개/cm³으로 다수의 3D 프린터가 가동되었음에도 불구하고 3D 프린터 가동에 따른 농도 증가는 거의 없는 것으로 판단된다. 그 이유는 3D 프린터실가 모두 밀폐형이며, 3D 프린터실 상부(천정)에 캐노피 후드가 전체적으로 설치되어 있기 때문으로 판단된다. 또한 다른 학교들과 다르게 대기 중 PM2.5 농도 변화와 3D 프린터실의 미세입자 농도변화는 관련성이 없는 것으로 보이는 그 이유는 마찬가지로 캐노피 후드가 가동되는 환경이었기 때문으로 해석된다.

표 102. G학교 3D 프린터실내 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 옆	3D 프린터실 앞 교실
포름알데히드	2	4.4	7.4
벤젠	2	0.18	0.07
톨루엔		4.58	3.86
에틸벤젠		1.68	2.45
자일렌		1.40	1.55
스티렌		1.06	0.29
비닐클로라이드	2	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	2	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 103. G학교 3D 프린터실내 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 옆	3D 프린터 앞 교실
카드뮴	2	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 104. G학교 3D 프린터실내 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준편차	기하평균 (기하표준편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	61	SMPS	4,240 ±395	4,223 (1.10)	3,500-5,055
		52	OPS	178 ±7	178 (1.04)	160-187
	3D 프린터 가동중	297	SMPS	5,184 ±950	5,094 (1.21)	3,751-7,093
			OPS	137 ±9	137 (1.07)	120-160
	3D 프린터 가동후	31	SMPS	5,802 ±328	5,794 (1.06)	5,159-6,385
			OPS	140 ±2	140 (1.02)	135-144
3D 프린터 실 앞 교실	3D 프린터 가동전	52	SMPS	2,150 ±309	2,132 (1.14)	1,858-3,285
		61	OPS	158 ±9	158 (1.05)	151-222
	3D 프린터 가동중	297	SMPS	1,800 ±493	1,725 (1.34)	1,092-2,636
			OPS	135 ±69	131 (1.21)	105-1,296
	3D 프린터 가동후	31	SMPS	2,002 ±84	2,000 (1.04)	1,813-2,140
			OPS	124 ±8	124 (1.06)	116-150

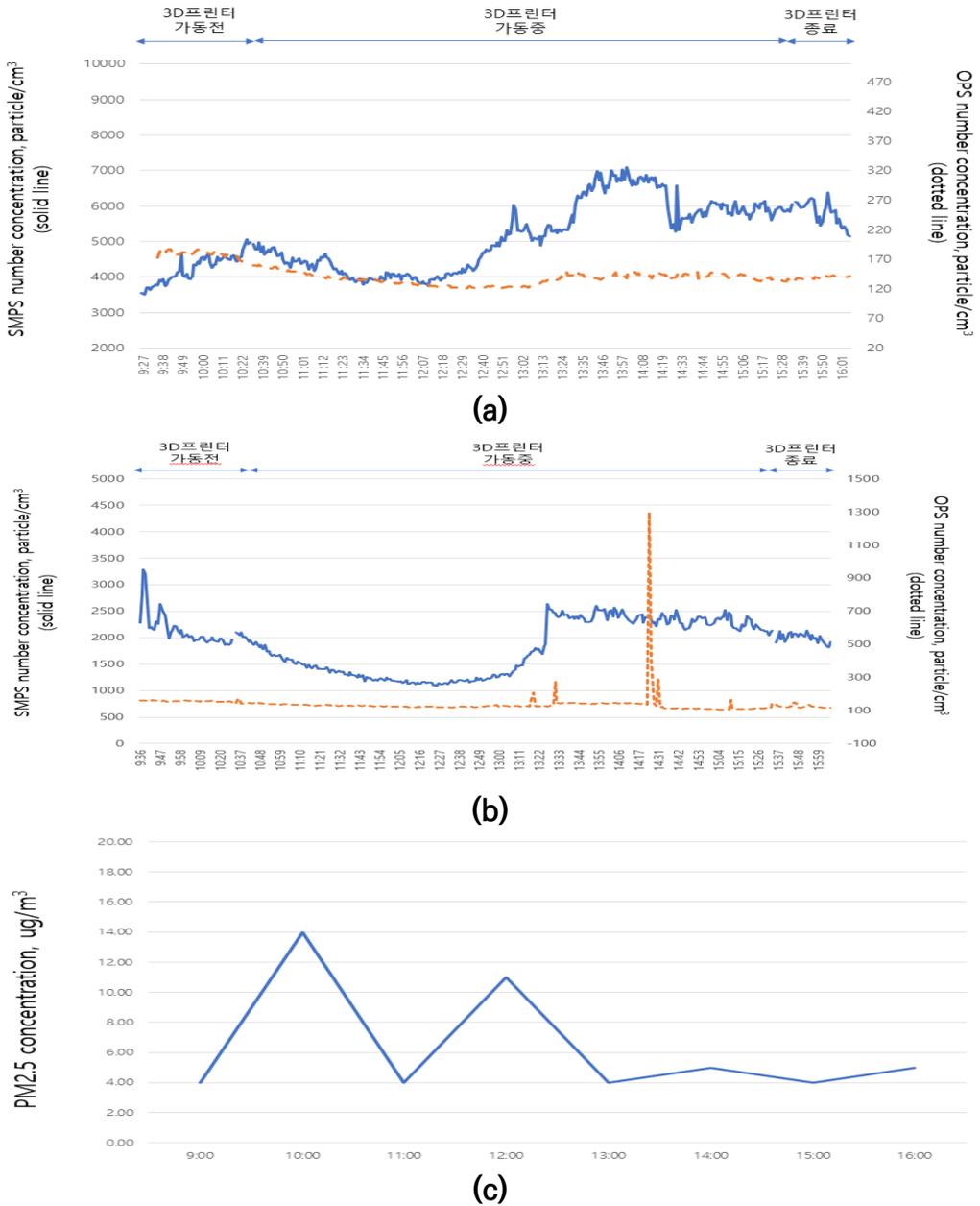


그림 30. G학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 전 교실, (c) G학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

8) H학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 105. H학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	고등학교
측정 날짜	9월 22일
학교 위치	서울
장소	2층
교실 크기	8.8m × 7.3m × 2.7m
천정 에어컨	미가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	없음
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	레이저가공기 1대 있지만 미가동
날씨	맑음
평균 온도	25.4℃
평균 습도	50.0%
기타	3D 프린터실과 복도는 여닫이 문으로 연결되어 있으며, 출입시 외에는 닫혀 있음

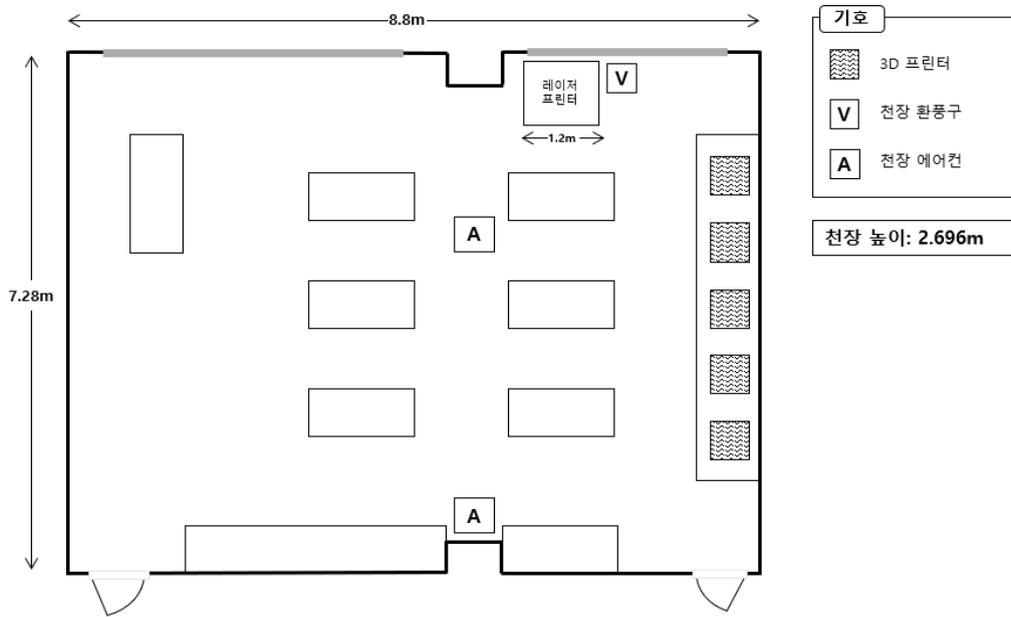


그림 31. H학교 3D 프린터실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 106. H학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	daVinci nano	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	5
	현재	5
사용 빈도	과거	5년전 입고 첫해 주당 2~3일, 이후 연간 2~3회
	현재	미사용
측정당시 가동수량	4	
3D 프린터 크기	41cm × 34cm × 39cm	
최대 제작 크기	정보없음	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	유	
프린터 제조국	태국	
필라멘트 제조국	한국, 중국	
가동시간	약 5시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	원형 컵	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터실



(b) 3D 프린터



(c) 3D 프린터
(밀폐되지 않는 형태의 프린터)



(d) 3D 프린터실 앞 복도

그림 32. H학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

3D 프린터 앞의 포름알데히드 농도는 12.6 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 4%의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 13% 수준으로 낮았다. 그리고 3D 프린터실 앞 복도에서는 12.0 ppb로 3D 프린터실과 유사하였다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았다. 측정 위치별 VOCs 농도를 볼 때 3D 프린터실 앞 복도에 비해 3D 프린터 앞에서의 농도가 다소 높은 경향을 보였지만, 농도 수준은 매우 낮아 그 원인이 3D 프린터 가동에 기인하는지, 교실 실내 건축자재에 기인하는지는 알 수 없었다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동 중 3D 프린터 앞에서 측정한 초미세입자 평균 수농도는 6516 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 261 개/cm³이었는데, 3D 프린터가 가동이 종료된 후 배경농도의 평균 수농도는 각각 9671 개/cm³, 557 개/cm³으로 오히려 프린터 가동이 종료 후의 농도가 더 높았다. 이러한 경향은 3D 프린터실 앞 복도에서도 같았는데, 그 이유는 대기 중 PM2.5 농도가 12시부터 서서히 증가하고 있었고 3D 프린터 가동이 종료된 후에도 계속 증가하고 있었기 때문에 대기 중 미세입자가 학교 복도와 3D 프린터 교실에 영향을 미치기 때문으로 해석된다.

그럼에도 불구하고 오전 10시 30분경 3D 프린터를 최초 가동할 때에 3D 프린터 내부에 잔류하던 필라멘트가 녹으면서 냄새가 났고, 이때 미세입자(OPS로 측정한)와는 다르게 초미세입자(SMPS로 측정한) 농도는 급격히 증가하였고, 필라멘트가 안정적으로 배출되기 시작하면서 부터는 냄새가 나지 않았고, 초미세입자 농도도 낮아지는 것이 관찰되었다. 본 H학교의 3D 프린터는 준개방형(프린터 케이스에 구멍이 많이 뚫려 있음) 프린터였기 때문으로 판단된다.

표 107. H학교 3D 프린터실 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 앞	3D 프린터실 앞 복도
포름알데히드	2	12.6	12.0
벤젠	2	0.13	0.10
톨루엔		8.00	3.71
에틸벤젠		0.77	0.59
자일렌		0.92	0.59
스티렌		0.37	0.10
비닐클로라이드	2	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	2	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 108. H학교 3D 프린터실 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치		
		3D 프린터 옆	3D 프린터 인근(3m)	3D 프린터실 밖 복도
카드뮴	3	<LOD	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 109. H학교 3D 프린터실 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동중	291	SMPS	6,516 ±922	6,448 (1.16)	3,994-10,508
			OPS	261 ±113	237 (1.58)	106-588
	3D 프린터 종료후	30	SMPS	9,671 ±826	9,634 (1.07)	7,577-10,519
			OPS	557 ±41	556 (1.04)	427-617
3D 프린터 실 앞 복도	3D 프린터 가동중	291	SMPS	3,556 ±896	3,442 (1.30)	2,163-5,445
			OPS	283 ±213	237 (1.82)	64-2,845
	3D 프린터 종료후	30	SMPS	5,092 ±329	5,082 (1.07)	4,581-5,691
			OPS	507 ±18	507 (1.04)	476-535

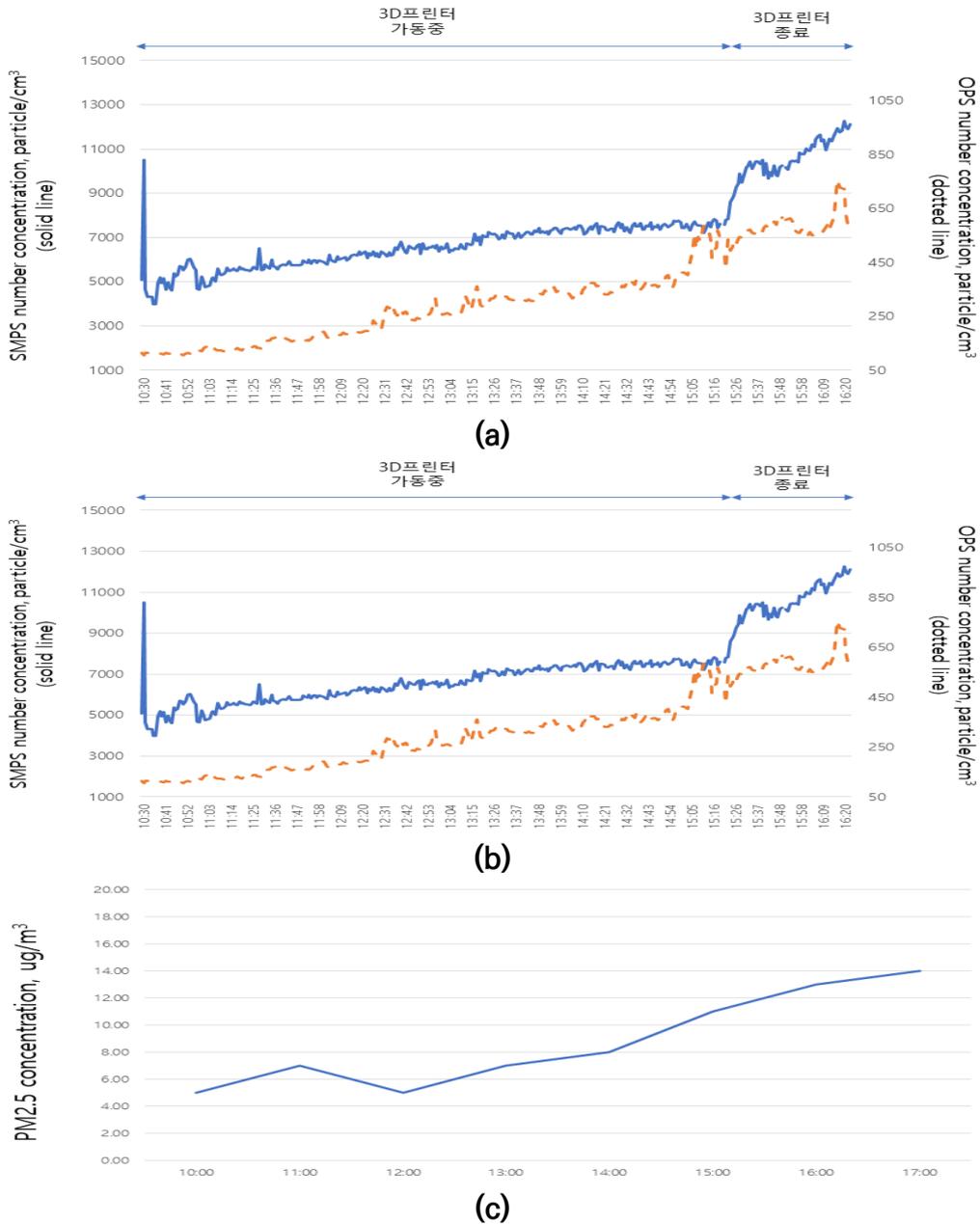


그림 33. H학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 외부 복도, (c) H학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

9) I학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 110. I학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	고등학교
측정 날짜	10월 19일
학교 위치	인천
장소	1층
교실 크기	7.1m × 4.4m × 2.5m
스텐드 에어컨	미가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	미가동
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	레이저가공기 1대 있지만 미가동
날씨	맑음
평균 온도	20.2℃
평균 습도	31.1%
기타	3D 프린터실과 복도는 여담이 문으로 연결되어 있으며, 출입시 외에는 닫혀 있음

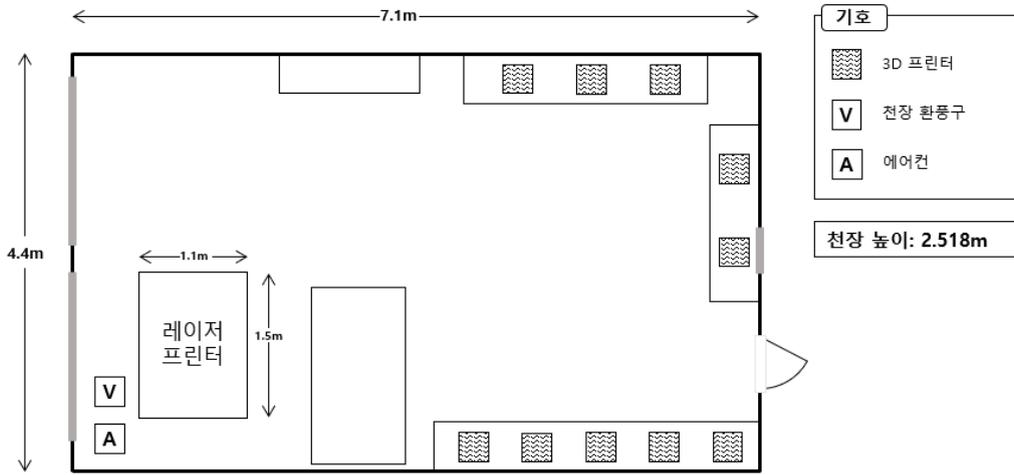


그림 34. I학교 3D 프린터실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 111. I학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	3DWOX	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	3DWOX 8개, 오픈형 3개
	현재	상동
사용 빈도	과거	코로나 시기 이전에 주당 3회 8시간
	현재	주당 1회 8시간
측정당시 가동수량	3DWOX 5개	
3D 프린터 크기	42cm × 43cm × 44cm	
최대 제작 크기	20cm × 20cm × 18cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	유, 무(오픈형)	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국	
가동시간	약 5시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	각종 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터실



(b) 3D 프린터 측정



(c) 3D 프린터 입자 누설 테스트
(입자의 외부 누설 없음)



(d) 3D 프린터실 앞 복도 측정

그림 35. I학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

3D 프린터 앞의 포름알데히드 농도는 9.5 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 3%의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 10% 수준으로 낮았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았다. 측정 위치별 VOCs 농도를 볼 때 3D 프린터실 앞 복도에 비해 3D 프린터 앞에서의 농도가 다소 높은 경향을 보였지만 농도 수준이 매우 낮아 그 원인이 3D 프린터 가동에 기인하는지, 교실 실내 건축자재에 기인하는지는 알 수 없었다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었으며, 니켈은 3D 프린터 앞에서 $0.027 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고용노동부 노출기준의 3% 수준으로 매우 낮았다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 앞에서 측정한 배경농도의 초미세입자 평균 수농도는 $24,616 \text{ 개}/\text{cm}^3$, 미세입자의 평균 수농도는 $1,398 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이었는데, 3D 프린터가 가동 중에는 각각 $12,435 \text{ 개}/\text{cm}^3$, $681 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 으로 오히려 프린터 가동 중 농도가 더 낮았다. 이는 I학교의 3D 프린터는 밀폐형이면서 3D 프린터실 앞 복도에서도 같게 나타나 대기 중 미세입자 농도 변화에 영향을 받은 것으로 판단된다. 한편 I학교의 초미세입자 및 미세입자 농도는 다른 학교들보다 높는데 그 이유는 측정당일 대기 PM2.5 농도가 높았고, PM2.5는 초미세입자와 미세입자를 포함하기 때문이다.

표 112. I학교 3D 프린터실내 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 앞	복도
포름알데히드	2	9.5	<LOD
벤젠	2	0.47	0.19
톨루엔		6.96	1.49
에틸벤젠		1.25	0.38
자일렌		1.71	0.46
스티렌		0.21	<LOD
비닐클로라이드	2	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	2	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 113. I학교 3D 프린터실내 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 앞	복도
카드뮴	2	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD
니켈		0.027	<LOD
크롬		<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

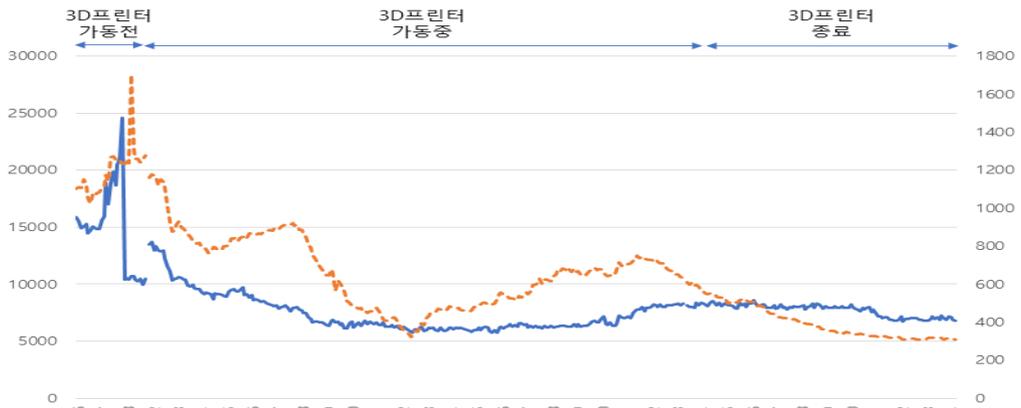
표 114. I학교 3D 프린터실내 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ± 표준편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	31	SMPS	24,616 ±2,297	24,513 (1.10)	21,077-28,668
			OPS	1,398 ±85	1,396 (1.06)	1,273-1,529
	3D 프린터 가동중	236	SMPS	12,435 ±4,247	11,811 (1.37)	7,525-23,869
			OPS	681 ±250	645 (1.38)	456-1,473
	3D 프린터 가동후	119	SMPS	8,440 ±505	8,425 (1.06)	7,448-9,675
			OPS	407 ±34	406 (1.09)	363-491
복도	3D 프린터 가동전	31	SMPS	14,870 ±3,838	14,403 (1.29)	9,987-24,640
			OPS	1,196 ±125	1,191 (1.10)	1,024-1,701
	3D 프린터 가동중	236	SMPS	7,460 ±1,673	7,302 (1.22)	5,746-13,726
			OPS	665 ±186	640 (1.33)	325-1,178
	3D 프린터 가동후	119	SMPS	7,749 ±539	7,730 (1.07)	6,712-8,599
			OPS	405 ±93	396 (1.24)	308-612



(a)



(b)



(c)

그림 36. I학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 외부 복도, (c) I학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

10) J학교

(1) 3D 프린터 특징 및 교실의 특성

표 115. J학교 3D 프린터 교실 특징

항목	교실 특징
학교급	고등학교
측정 날짜	10월 20일
학교 위치	경기도
장소	3층
교실 크기	8.0m × 9.7m × 2.5m
천정 에어컨	미가동
창문	닫혀 있음
창문 환풍기	미가동
3D 프린터 외 입자 및 VOC 발생원	에어프라이기 이용
날씨	맑음
평균 온도	21.0℃
평균 습도	36.2%

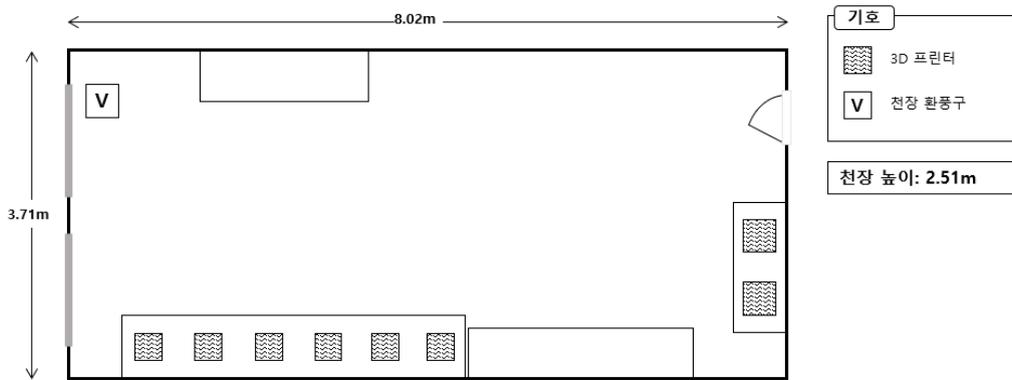


그림 37 J학교 3D 프린터실 도면

(2) 3D 프린터 정보

표 116. J학교 3D 프린터 정보

항목	3D 프린터 정보	
모델	LUGO	
프린팅 기술	FFF	
보유 3D 프린터 수량	과거	7
	현재	6
사용 빈도	과거	2학기때 2주간 3~4시간
	현재	거의 미사용
측정당시 가동수량	7개	
3D 프린터 크기	25cm × 23cm × 33cm	
최대 제작 크기	10cm × 11cm × 11cm	
필라멘트와 노즐의 직경 및 온도	1.75mm, 0.4mm, 200℃	
측정시 필라멘트 종류	PLA(Polylactic acid)	
헤파필터	무	
인케이스	무(오픈형)	
프린터 제조국	한국	
필라멘트 제조국	한국	
가동시간	약 4시간	
필라멘트 출력량(m)	-	
3D프린팅 제조품	각종 모형	

(3) 작업환경측정 사진



(a) 3D 프린터실



(b) 3D 프린터 가동 셋업



(c) 3D 프린터 측정



(d) 3D 프린터실 앞 옥외



(e) 3D 프린터실내 에어프라이기

그림 38. J학교 3D 프린터실 작업환경측정 모습

(4) 작업환경측정 결과

3D 프린터 앞의 포름알데히드 농도는 9.1 ppb로 고용노동부 노출기준인 300 ppb의 3%의 수준으로 낮았고, ACGIH TLV인 100 ppb와 비교해서도 10% 수준으로 낮았다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도는 모두 노출기준에 비해 매우 낮았다. 측정 위치별 VOCs 농도를 볼 때 3D 프린터실 앞 복도에 비해 3D 프린터 앞에서의 농도가 다소 높은 경향을 보였지만 농도 수준이 매우 낮아 그 원인이 3D 프린터 가동에 기인하는지, 교실 실내 건축자재에 기인하는지는 알 수 없었다. 비닐클로라이드와 1,3 부타디엔 및 카드뮴, 코발트, 납, 니켈, 크롬은 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

3D 프린터 가동전 3D 프린터 앞에서 측정한 배경농도의 초미세입자 평균 수농도는 13,510 개/cm³, 미세입자의 평균 수농도는 971 개/cm³이었고, 3D 프린터가 가동 중에는 각각 10852 개/cm³, 491 개/cm³으로 오히려 프린터 가동 중 농도가 더 낮았다. 그 이유는 3D 프린터실 내부의 시간대별 미세입자 농도 변화와 옥외에서의 시간대별 농도변화가 거의 유사한 것을 볼 때, 대기 중 미세입자가 학교 복도와 3D 프린터 교실에 영향을 미쳤기 때문으로 해석된다.

표 117. J학교 3D 프린터실내 휘발성유기화합물 측정결과

(단위: ppb)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 앞	복도
포름알데히드	2	9.1	<LOD
벤젠	2	0.34	0.34
톨루엔		5.61	3.37
에틸벤젠		1.50	0.91
자일렌		2.37	0.91
스티렌		0.15	<LOD
비닐클로라이드	2	<LOD	<LOD
1,3-부타디엔	2	<LOD	<LOD

시료의 수는 위치별 1개임

<LOD: 검출한계 미만

고용노동부 노출기준(ppm): 포름알데히드: 0.3, 벤젠: 0.5, 톨루엔: 50, 에틸벤젠: 100, 자일렌: 100, 스티렌: 20

표 118. J학교 3D 프린터실내 중금속 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	N	측정위치	
		3D 프린터 앞	복도
카드뮴	2	<LOD	<LOD
코발트		<LOD	<LOD
납		<LOD	<LOD
니켈		<LOD	<LOD
크롬		<LOD	<LOD

<LOD: 검출한계 미만

표 119. J학교 3D 프린터실내 초미세입자 및 미세입자 농도

(단위 :개/cm³)

측정 위치	측정 시간대	N	기기	산술평균 ±표준 편차	기하평균 (기하표준 편차)	범위
3D 프린터 앞	3D 프린터 가동전	32	SMPS	13,510 ±482	13,503 (1.04)	12,840-15,064
			OPS	971 ±79	968 (1.08)	872-1,104
	3D 프린터 가동중	238	SMPS	10,852 ±22,236	6,299 (2.10)	3,550-14,6457
			OPS	491 ±176	469 (1.33)	324-1,199
	3D 프린터 가동후	35	SMPS	4,338 ±544	4,308 (1.13)	3,664-5,871
			OPS	475 ±87	469 (1.18)	387-733
복도	3D 프린터 가동전	32	SMPS	7,634 ±320	7,628 (1.04)	7,110-8,514
			OPS	776 ±75	772 (1.10)	665-865
	3D 프린터 가동중	238	SMPS	5,590 ±1071	5,508 (1.18)	4,320-12,264
			OPS	981 ±100	976 (1.11)	692-1,378
	3D 프린터 가동후	35	SMPS	5,013 ±168	5,011 (1.03)	4,768-5,425
			OPS	1,107 ±52	1,107 (1.05)	988-1,178

*12시 10~20분 3D 프린터 인근에서 에어프라이기 사용으로 인한 일시적 농도 증가

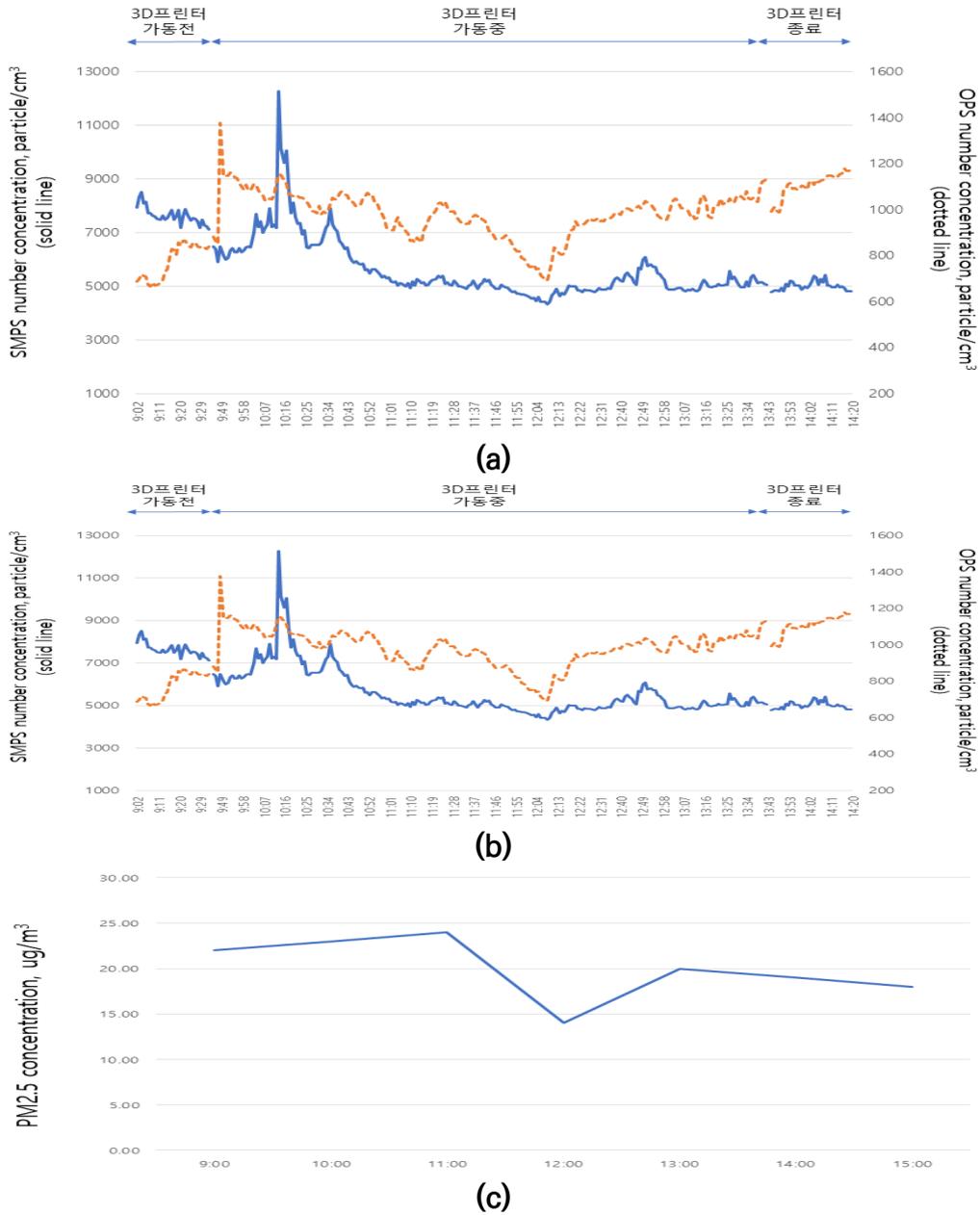


그림 39. J학교 SMPS와 OPS를 이용한 미세입자 측정결과 (a) 3D 프린터 앞, (b) 3D 프린터실 앞 복도, (c) J학교 인근의 실시간 PM2.5 농도(대기측정망 자료)

<환기상태에 따른 (초)미세입자 흐름 및 입자 크기>

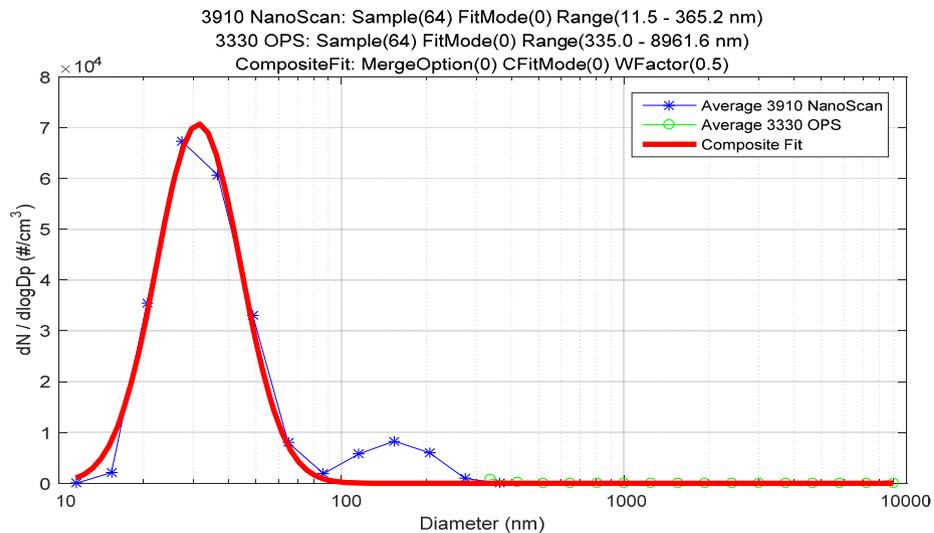
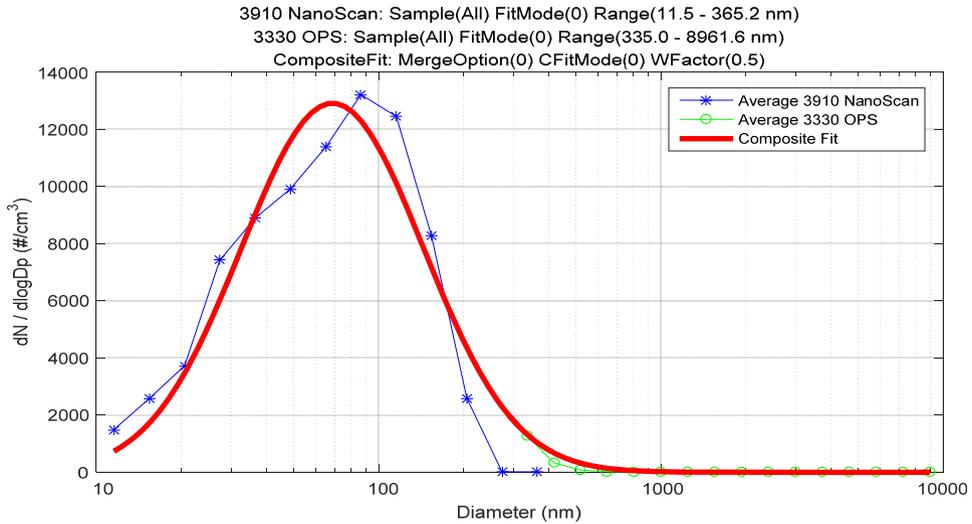
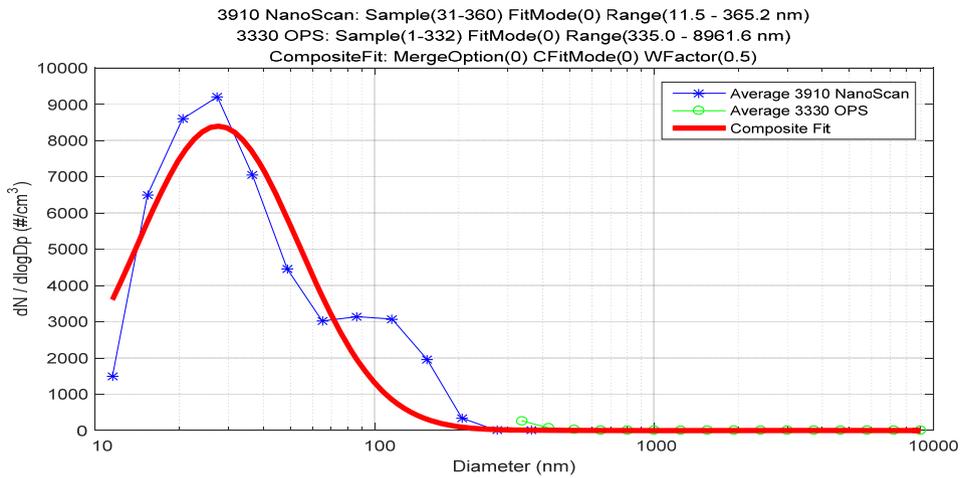
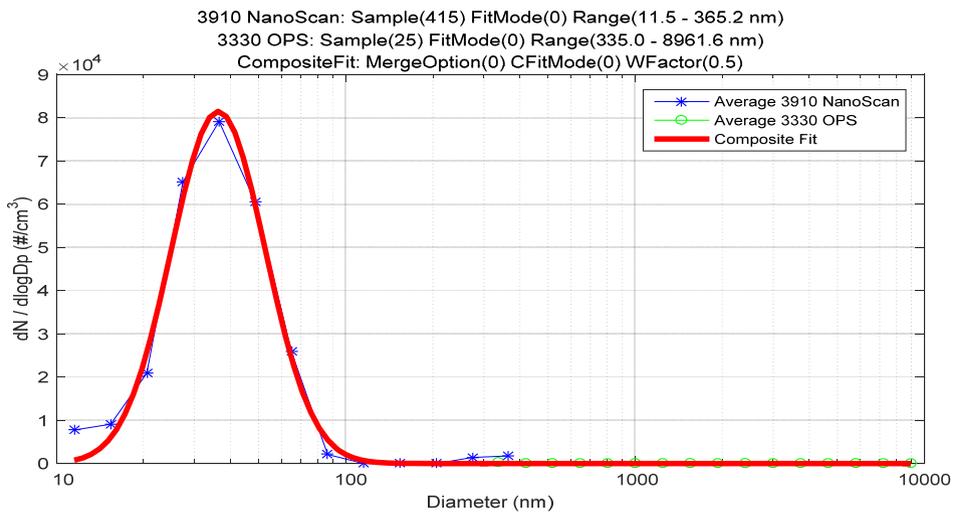


그림 40. (a) C학교 3D 프린터 앞에서 평균 입경분포, (b) 3D 프린터 가동시 입자 수농도가 가장 높을 때의 입경분포(11시 8분)



(a)



(b)

그림 41. (a) F학교 부스 내에서 3D 프린터가 가동 중일 때 실내 평균 입경분포, (b) F학교 부스 도어 개방시(환기 미실시) 3D 프린터 가동시 입자 수농도가 가장 높을 때의 입경분포(17시8분)

연구진

연구기관 : **산업안전보건연구원**

〈자체연구원〉

연구책임자 : 최지형 (과장, 직업건강연구실)

공동연구원 : 이경은 (연구위원, 직업건강연구실)

공동연구원 : 최영화 (대리, 직업건강연구실)

공동연구원 : 박동준 (전공의, 직업건강연구실)

〈위탁연구원〉

연구책임자 : 윤충식 (교수, 보건학박사, 서울대학교)

공동연구원 : 김부욱 (교수, 보건학박사, 서울대학교)

공동연구원 : 고도현 (소장, 보건학박사, 시민과학 연구소)

연구기간

2022. 01. 01. ~ 2022. 12. 31.

본 조사에서 (3D 프린터 사용 노출실태 및 작업환경조사)는
위탁조사로 수행되었습니다.

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

산업안전보건연구원장

**3D 프린터 사용실태 및 건강영향조사
(2022-산업안전보건연구원-808)**

발행일 : 2022년 12월 31일
발행인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아
연구책임자 : 산업안전보건연구원 역학조사부 최지형
발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
주소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400
전화 : 052-703-0873
팩스 : 052-703-0336
Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
I S B N : 979 - 11 - 92782 - 43 - 0