

연구보고서

3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성 연구

정은교 · 김성호

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요 약 문

연구기간

2019년 1월 ~ 2019년 11월

핵심단어

3D 프린터, 소재, 성분분석, 유해인자

연구과제명

3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성 연구

1. 연구배경

- 4차 산업혁명으로 3D 프린팅 기술을 바탕으로 한 산업이 발달함에 따라 그 사용자에게 대한 건강상의 관심도 증가하고 있고
- 2018년 연구에서 3D 프린팅 사업장에 대한 평가를 실시하였고, 높은 수준은 아니지만 유기화합물과 금속에 노출될 수 있음을 확인하였고
- 하지만 3D 프린팅 소재의 MSDS 미 보유 및 보유한 경우에도 MSDS 상에 화학물질의 명칭을 구체적으로 명시하고 있지 않아 3D 프린팅 작업으로 인한 원인물질이 무엇인지 파악하기 곤란함.
- 따라서, 주요 3D 프린팅 소재를 바탕으로 소재의 화학물질 성분을 분석하여 노출가능인자를 파악할 필요가 있음.

2. 주요 연구내용

- 3D 프린터 기술 산업현황 및 소재의 종류
 - 세계 및 국내 3D 프린팅 시장 : 2017년 3D프린팅 세계시장 규모는 전년 대비 21% 증가한 73.4억 달러로서 2023년까지 273억 달러로 고도 성장할 것으로 전망됨.
 - 3D 프린팅 소재 시장 : 장비구매 기업의 소재활용 현황을 보면, 재료압

출(material extrusion, ME) 방식에서 많이 활용되는 열가소성 플라스틱 필라멘트 소재가 69.1%로 가장 많이 활용되고 있고 광경화성 플라스틱 수지(20.1%), 열가소성 플라스틱 분말(3.4%) 순으로 나타남. 금속 소재는 약 3%정도인 것으로 나타나 전반적으로 플라스틱 계열의 소재가 주로 사용되는 것으로 나타남.

- 3D 프린팅 관련업체 현황 : 한국표준산업분류를 기준으로 3D 프린터 관련업체는 2018년 3D프린팅 산업실태조사(통계청), 3D프린팅연구조합(과기부 산하), 3D융합산업협회(산자부 산하), (사)3D프린팅산업협회(산자부 산하), (사)한국3D프린팅협회(과기부 산하) 등 회원사 등을 조사하여 중복된 업체를 제외하고 공급업체는 351개소, 수요업체는 1,324개소로 추정됨.

○ 3D 프린터의 소재로 사용되는 수지 등의 성분 분석

- 3D 프린터 취급업체 및 관련 단체 등과 간담회 개최 : 3D 프린팅 소재 시장 수요조사결과, 소재 구입처는 국내 수요의 70~80%를 중국업체 등으로부터 구매하여 사용하는 것으로 알려짐.
- 3D 프린팅 소재의 성분분석 : 플라스틱에 대한 성분분석은 PLA 및 ABS 수지 등 20여종을 구매하여 GC-MS를 이용하여 분석하였고 금속에 대한 성분분석은 가열관에서 180~200℃로 4~6시간 이상 가열한후 유도 결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES)로 분석하였음.

○ 3D 프린터 사용으로 인한 노출가능 유해인자 파악

- 3D 프린팅 소재중 PLA 소재의 경우, 관리대상물질은 5~7종, 고분자물질은 20~25종이 검출되었고 ABS 소재의 경우에는 관리대상물질은 5~6종, 고분자물질은 15~23종이 검출되었으며 기타 소재에서는 관리대상

물질로 2~8종, 고분자물질로는 15~30종이 검출되었음. 그리고 금속 소재의 경우에는 관리대상물질 3종이 검출되었음.

3. 연구 활용방안

- 3D 프린팅 사업장의 물질안전보건자료 작성을 위한 기초자료 제공
- 3D 프린터 취급 근로자의 건강보호

4. 연락처

- 산업안전보건연구원 직업환경연구실 정은교
- ☎ 052) 703. 0881
- E-mail jungек60@kosha.or.kr

본문 차례

I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
II. 연구방법	3
1. 3D 프린팅 기술산업 현황	3
2. 3D 프린팅 소재 분석	4
III. 연구결과	8
1. 3D 프린팅 기술산업 현황 및 소재의 종류	8
2. 3D 프린팅 관련업체 현황	25
3. 방출가능 유해물질	26
4. 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과	40
5. 3D 프린팅 작업환경관리	54
IV. 고찰 및 결론	74
V. 참고문헌	79
Abstract	87

표 차 례

〈표 II-1〉 3D 프린팅 제조업체 관련 한국표준산업분류	4
〈표 II-2〉 분석대상 소재의 종류	5
〈표 III-1〉 국내 3D 프린팅 시장 규모 및 성장 전망	10
〈표 III-2〉 소재형태에 따른 3D 프린팅 기술 방식	19
〈표 III-3〉 주요 고분자 소재	20
〈표 III-4〉 주요 금속 소재	21
〈표 III-5〉 인터넷에서 판매되고 있는 다양한 형태의 3D 프린팅 소재 종류	23
〈표 III-6〉 3D 프린팅 공급업체수	25
〈표 III-7〉 3D 프린팅 수요업체수	25
〈표 III-8〉 3D 프린팅소재의 기술방식에 따른 응용분야	27
〈표 III-9〉 열가소성 고분자를 이용한 공정 설명	31
〈표 III-10〉 각 두샘플링 위치에서 채취된 공기채취 및 분석방법 요약	34
〈표 III-11〉 모든 측정장소에서 발견된 발암성물질 요약	36
〈표 III-12〉 3D 프린팅 관련 노출평가 및 건강영향 선행연구 분석 요약	39
〈표 III-13〉 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과 (PLA)	43
〈표 III-14〉 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과 (ABS)	47
〈표 III-15〉 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과 (기타)	50
〈표 III-16〉 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과 (금속)	53
〈표 III-17〉 각 국가 및 기관의 어린이 제품 관련 표준 규격	73

그림 차례

[그림 III-1] 3D 프린팅 소재시 세계시장 전망	8
[그림 III-2] 국가별 3D 프린팅 시장 점유율	9
[그림 III-3] 국내 3D 프린팅 부문별 시장 동향	11
[그림 III-4] 국내 3D 프린팅 기업 및 종사자수 현황	12
[그림 III-5] 세계적인 3D 프린팅 소재 시장, 유형, MT	13
[그림 III-6] 3D 프린팅 소재시장의 분할	17
[그림 III-7] 국내 3D 프린팅 소재별 분포 및 수요 현황	18

I. 서론

1. 연구배경

미국 컨설팅기업 월러스 어소시에이츠(Wohlers Associates)에 따르면, 세계 3D 프린팅 시장은 2014년 40.6억 달러에서 2020년 210억 달러 규모의 시장으로 고속 성장할 것으로 전망하고 있다. 3D 프린팅 기술은 제조업, 의료, IT분야 등 다양한 분야에서 기술패러다임을 바꾸며 산업혁신을 이끌 것으로 기대하고 있다. 또한, 3D 프린터의 가격이 낮아져서 대중화되고 저변확대되면서 제조업과 정보통신기술(ICT)의 융합 등 새로운 산업형태가 창출되고 누구나 설계와 디자인, 서비스를 활용해 개인 맞춤형 생산 및 거래가 확산됨으로써, 디지털 데이터를 중심으로 한 제품 설계, 시제품 제작, 제조·생산·유통 등이 통합되는 디지털 시대의 개막을 알리고 있다.

특히 데스크톱 3D 프린터는 가정, 사무실, 교실 및 실험실에서 급속도로 사용이 확대되고 있지만 최근 연구에 따르면 많은 사람들이 녹은 플라스틱을 사용하여 모양을 형성하기 때문에 실내 환경에 오염물질을 방출하거나 많은 양의 초미세입자를 방출하는 것으로 나타났다. 이러한 미세입자에 대한 노출은 폐 깊숙이 침투하여 호흡기 자극, 천식 증상의 악화 또는 심혈관질환을 유발할 수 있으므로 인체 건강에 문제가 될 수 있다(Carosino et al., 2015 ; Chang et al., 2015 ; Lee et al., 2014, Nurkiewicz et al., 2008 ; Oberdorster, 2001). 또한, 휘발성 유기화합물 (VOC) 등과 같은 유해화학물질의 배출도 흔히 보고되고 있고 이러한 배출되는 오염물질의 양과 종류도 현재 많이 알려져 있는 편이다.

가정과 공공장소에서 사용되는 대부분의 데스크탑 3D 프린터에는 환기장치나 밀폐구조로 설치되어 있지 않다. 그렇다고 사용자가 적절한 개인용 보호장비(호흡용 보호구)를 사용하지도 않는다. 그러나, 산업용 3D 프린터는 대부분

밀폐구조이거나 환기장치가 설치되어 있다. 그래서인지 선행연구에서 보면 노출수준이 낮은 편이다. 그러므로 비 산업환경에서 이 기술을 채택할 때에는 가급적 조기에 노출 가능성 및 위험을 줄이기 위해 3D 프린팅 작업의 유해물질 배출의 물리·화학적 성질을 특성화하는 것이 중요하다.

3D 프린터의 소재는 플라스틱, 금속류, 고분자인 아크릴로니트릴 부타디엔 스티렌(Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS), 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP) 수지 등 다양하다. 특히 ABS소재는 PLA(PolyLactic Acid)소재보다 안정적이고 튼튼한 재질로 구성되어 있어 용융적층 조형(Fused Deposition Modeling, FDM)방식의 3D 프린터의 주재료로 사용되고 있다. 2018년도 연구에서는 3D 프린팅 작업자를 대상으로 노출평가를 실시한 바 있으나 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheets, MSDS)가 전혀 구비되어 있지 않아 소재의 구성성분 등을 알수 없었으며 이와 같은 다양한 소재에 대해 국내에서 체계적으로 구성성분 등을 조사한 사례도 부족한 실정이다. 이에 시중에서 유통되고 있는 대표적인 소재를 종류별로 분류하여 노출가능 인자 및 노출규모를 파악함으로써 3D 프린터 취급근로자의 건강보호에 기여하고자 한다.

2. 연구목적

본 연구는 3D 프린팅 작업을 할 때 사용되는 소재의 성분을 분석하여 실제 노동자들이 어떤 유해물질에 노출될 수 있는지를 알아보고 3D 프린팅과 관련한 산업에서 이러한 유해물질에 노출될 수 있는 사업장 규모가 얼마나 되는지 관련 문헌 및 조사를 통해 그 현황을 파악하는데 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 3D 프린팅 기술 산업현황

1) 문헌조사

본 연구에서 문헌조사는 3D 프린팅 기술 산업현황 및 소재의 종류에 대한 일반적인 정보와 3D 프린팅의 유해성과 건강영향, 국내외 3D 프린팅과 관련된 시장 규모 등 관련자료를 조사하였다.

‘3D 프린팅’과 ‘건강영향’ 관련 문헌을 검색하기 위하여 Pubmed, Google Scholar 등의 사이트를 이용하였다. 키워드(Keyword)로는 3D 프린팅(3D printing), 3D 프린팅 소재(3D printing material), 건강영향(health effects), 노출(exposure), 위해성(risk), 관리(controls) 등으로 하였고, 그 내용을 고찰하였다. 3D 프린팅 소재는 PE, PVC 및 ABS 등 일반 플라스틱 제품 제조업 등에서 사용하므로 이들 제조업체에서의 작업상황을 파악하여 노출가능한 유해물질을 업데이트하였다.

그 밖에, 3D 프린팅 작업으로 인한 안전보건 관리내용에 대해서는 각 국가 및 대학에서 공개하는 웹사이트 및 발간된 가이드 등을 이용하여 작성하였다. 키워드(Keyword)는 3D 프린팅 가이드(3D printing guide) 및 안전(safety)으로 하였다.

2) 3D 프린팅 관련업체 현황

국내 3D 프린터 관련 보고서 및 실태조사 자료를 참고로 하여 3D 프린팅 작업자에 대한 관련업체 현황을 파악하였다.

3D프린팅 관련업체의 규모를 파악하기 위해 3D 프린팅 기술의 공급 및 수

요측면에서 한국표준산업분류를 기준으로 3D 프린터 관련 제조업종으로 새롭게 분류된 ‘29222 디지털 적층 성형기계 제조업1)(표준산업분류 속에 3D프린터 분류(2017, 10차개정)’에 속한 업체를 공급업체로 정하였다(표 II-1).

<표 II-1> 3D 프린팅 제조업체 관련 한국표준산업분류

대분류	중분류	소분류	세분류	세세분류
C 제조업 (10-34)	29 기타 기계 및 장비 제조업	292 특수 목적 용 기계 제조업	2922 가공공작기 계 제조업	29222 디 지 털 적층 성형기계 제 조업

※ ①캐속 조형장비 제조, ②적층 제조장비 제조, ③삼차원(3D) 조형기 제조, ④삼차원 프린터 제조, ⑤디지털 제어 적층 조형기 제조 등

2. 3D 프린팅 소재 분석

1) 분석 대상

미국재료학회(ASTM: American Society for Testing and Materials) F42 위원회에서 3D 프린터 기술 표준을 정립하였고, 재료압출, 재료분사, 접착제분사, 판재적층, 광중합, 분말소결, 직접용사 방식으로 7가지로 나눌 수 있다. 이 중 압출방식 3D 프린터는 학교 등의 교육의 목적 및 시제품 생산의 목적으로 많이 활용되고 있다. 본 연구는 재료압출 방식에 사용되는 소재를 중심으로 유기 화합물 및 금속 성분을 분석하고자 하였다. 소재구성은 ABS, PLA 소재를 중심으로 다양한 복합 소재를 분석하였다(표 II-2). PLA 및 ABS 소재는 3D 프린팅에서 우리나라 뿐만아니라 세계적으로 가장 많이 사용되는 플라스틱 필

1) 산업정의는 “3차원 디지털 설계도에 따라 금속, 플라스틱제 등의 액체, 가루 분말, 필라멘트사, 박판 등을 재료로 한층 씩 쌓아올리는 적층방식의 성형기계(3D 프린터)를 제조하는 산업활동을 말한다” 라고 규정

라멘트 소재이다. ABS 및 PLA 필라멘트를 조사하여 필라멘트 유형 및 색상이 배출물질 및 농도에 미치는 영향이 있는지 알아보기 위해 다양하게 선정하였다. 대부분 3D 프린터의 경우, 필라멘트 직경은 1.75 mm이고 압출기 노즐 직경은 0.4 mm이며 압출된 플라스틱의 층 높이는 0.1~0.3 mm이다. ABS의 경우 압출기 온도는 230°C 및 바닥판 온도는 110°C이었다. PLA의 경우 압출기 온도는 215°C 정도이다. 이와같은 온도조건은 분석기기의 인큐베이터(Incubator) 온도를 설정하는데 참고하였다.

<표 II-2> 분석대상 소재의 종류

3D 소재명	색상	Print Temp (°C)	Density (g/cm ³)
Polylactic acid(PLA)	파란색, 흰색, 빨강색, 검정색, 녹색	205~225	1.24
Acrylonitrile butadiene styrene(ABS)	파란색, 빨강색, 녹색, 핑크색, 검정색	220~260	1.06
Polyethylene terephthalate(PETG)	검정색	230~250	1.23
eAl-fill	Natural	200~220	1.48
Poly vinyl alcohol(PVA)	Natural	180~210	1.25
eCopper	Natural	200~220	2.46
Polyamide-Carbon fiber filled nylon filament(ePA-CF)	Natural	240~260	1.24
Polycarbonate(ePC)	Natural	235~260	1.12
Colour Change by UV(CCU)	보라색, 빨강색	190~220	1.24
eSteel	Natural	200~220	2.46
eMarble	Natural	180~210	1.24

2) 분석 방법

각각의 3D 프린팅 소재를 30 cm(700~900 mg) 간격으로 자른 후, 저울

(XP2U, Mettler Toledo, Switzerland)로 무게를 칭량하였고 3D 프린팅 소재 하나당 3개의 시료로 나누어 각각 무게를 칭량하였다.

유기화합물은 20 mL Headspace 분석용 바이알(에질런트)에 담은 후 Headspace GC(7890A, Agilent, USA) - TOFMS(PEGASUS 4D, LECO, USA)로 분석하였다.

금속은 50 mL 바이알에 질산 3 mL을 넣고 가열판(HP-LP, DAIHAN Scientific, Korea)에서 180~200°C로 4~6시간 이상 가열하고, 실린지필터로 거른 후 20 mL 용량 플라스크에 옮겨 담은 후 유도결합플라즈마 분광광도계(iCAP 7000 SERIES, Thermo, USA)로 분석하였다.

3) 분석조건

가) 유기화합물 분석

(1) Auto Sampler (AS) 방법

Auto Sampler는 Rail System(CTC, Gerstel, LEAP)을 사용하였고, Cycle은 Headspace를 사용하였다. 2.5 mL 실린지를 사용하였고, 1 mL 분취하여 주입구에 넣도록 설정하였다. Incubator의 온도는 200°C(최고 온도)로 설정하였고, 20 분 동안 500 rpm의 속도로 흔드는 조건으로 소재의 일부를 증기화 시켰다. 실린지의 온도는 80°C로 분취하는 속도는 100 uL/sec이었으며, 주입구에 넣는 속도도 이와 동일하게 설정하였다.

(2) Gas Chromatograph (GC) 방법

Rtx-5MS(RESTEK, USA) 컬럼을 사용하였고, 컬럼의 유량(flow rate)는 1.00 mL/min으로 설정하였고, Front inlet의 온도는 250°C로 설정하였다. 승온 조건은 40°C에서 5분간 머무르고, 10°C/min으로 100°C까지 올린 후 다시 5분간 머무르고, 10°C/min으로 220°C까지 올린 후 10분간 머무르는 조건으로 총 분석 시간은 38분이었다. Transfer line의 온도는 180°C로 설정하였고, Split ratio는

50:1로 설정하였다.

(3) Mass Spectrometer (MS) 방법

Acquisition delay 시간을 30초로 설정하여 Solvent Peak가 나오는 시간 뒤를 설정하여 Filament를 그 시간 때는 꺼주었다. 분석하려는 질량의 범위는 30~300 u로 설정하였고, Electron Energy는 -70 Volts, Ion Source는 200°C로 설정하였다.

(4) Data Processing (DP) 방법

자료 분석은 Baseline, Peak Find, Library Search, Calculate Area를 선택하였고, 미지의 시료를 찾기 위해서 unknown Peak을 100개로 설정하였고, S/N비를 50으로 선택하여, 최대한 의미 없는 값을 제거하고자 하였다. 선택한 Library 소스는 mainlib, rist_msms, rist_msms2를 선택하였고, Similarity는 700으로 설정하였다. DP 후, Similarity, Reverse, Probability를 고려하여 물질을 선정하였고 Cas 번호가 없는 시료는 목록에서 제거하였다.

나) 금속 분석

금속을 분석하기 위하여 유도결합플라즈마 분광광도계(iCAP 7000 SERIES, Thermo, USA)를 사용하였다. 분석한 물질은 은, 알루미늄, 칼슘, 카드뮴, 코발트, 크롬, 구리, 철, 인듐, 칼륨, 마그네슘, 망간, 몰리브덴, 나트륨, 니켈, 납, 주석, 안티몬, 티타늄, 아연, 지르코늄 등 20종이었다. 각 시료당 3회 분석한 후 그 평균값을 사용하였다.

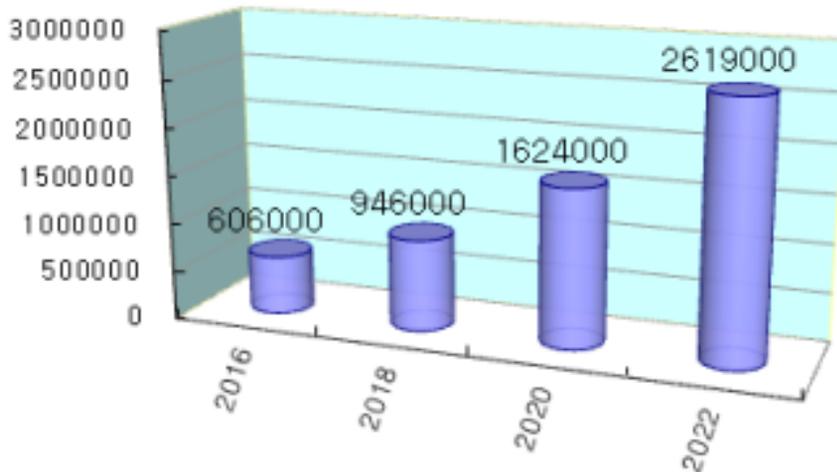
Ⅲ. 연구결과

1. 3D 프린팅 기술 산업현황 및 소재의 종류

1) 세계 3D 프린팅 시장 규모

월러스 어소시에이츠(Wohlers Associates)가 2017년 발표한 자료에 따르면 세계 3D프린팅 시장 규모가 2016년 60억 6천만달러에서 2022년 약 26조원에 이를 것으로 전망하고 있다(그림 Ⅲ-1). 3D프린팅 소재와 장비 시장이 전체 시장의 3분의 2를 차지할 것으로 보인다. 지역별로 시장 규모가 큰 곳은 미국과 서유럽, 중국 순이다.

[단위: 만달러]



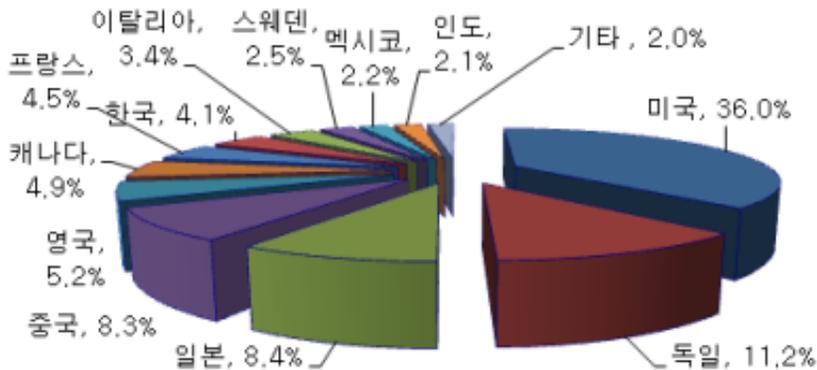
(출처 : Wohlers Associates)

[그림 Ⅲ-1] 3D 프린팅 세계시장 전망(2017)

글로벌 시장조사기관인 인터내셔널 데이터 코퍼레이션(International Data Corporation, IDC)에서도 3D프린팅 시장 규모는 오는 2019년 140억 달러(약 15조 7천 360억원)에서 2022년 230억 달러(약 25조 8천 520억원)에 이를 전망이라고 보고하였다. 2017년부터 오는 2022년까지 5년간 연평균 성장률은 18.4%로 예상하였다.

분야별 시장 규모를 보면 3D 프린터와 소재 시장 규모는 2022년 각각 78억 달러(약 8조 7천 672억원)와 80억 달러(약 8조 9천 920억원)로 전체 시장의 대부분을 차지할 것으로 전망하고 있다. 맞춤형(on-demand) 출력 서비스와 3D프린팅 시스템 통합 서비스가 주도하는 서비스 시장규모는 같은 시기 48억 달러(약 5조 3천 952억원)에 이를 것이란 분석이다. 소프트웨어 시장 규모는 24억 달러(약 2조 6천 993억원)로 예상되고 있다.

국가별 시장 점유율은 3D프린터 제조 및 활용 기업과 신기술 등을 많이 보유한 미국이 1위(36.0%), 독일 2위(11.2%), 한국은 8위(4.1%) 수준이었다(그림 III-2).



(출처 : Markets & markets)

[그림 III-2] 국가별 3D 프린팅 시장 점유율(2018)

3D프린팅 기술의 주 활용 목적은 시제품 제작과 애프터마켓 부품, 신제품 부

품 제작으로 꼽혔다. 해당 시장 규모는 오는 2020년 시장 규모의 45%를 차지할 전망이다.

부문별 3D 프린팅 시장은 3D프린팅 기술 활용 부품생산, 컨설팅, 교육 등의 ‘서비스’ 시장 비중이 57.3%(42억 달러)를 차지하고 성장률(23.8%)도 높은 편으로 소재 및 보급형 3D 프린터의 매출 증가 등으로 3D프린팅 장비와 소재 등의 ‘제품’ 시장은 31.3억 달러로 전년대비 17.4% 증가한 것으로 나타났다.

산업 활용분야는 기계(20.0%) 부문 비중이 가장 높고 항공·우주(18.9%), 자동차(16.0%), 소비재·가전(11.7%), 의료·치과(11.3%) 순으로 활용도가 높은 것으로 파악되었고 사용 용도는 부품제작, 조립·설치, 교육 및 연구개발 순이었다.

2) 국내 3D 프린팅 시장 규모

정보통신산업진흥원(National IT Industry Promotion Agency, NIPA)의 조사에 따르면, 국내시장 규모는 2018년 국내 3D 프린팅 시장은 전년대비 16.3% 증가한 3,958억원으로 ‘23년까지 1조원 규모로 지속적으로 성장할 것으로 전망되고 있다(표 III-1).

<표 III-1> 국내 3D 프린팅 시장 규모 및 성장 전망

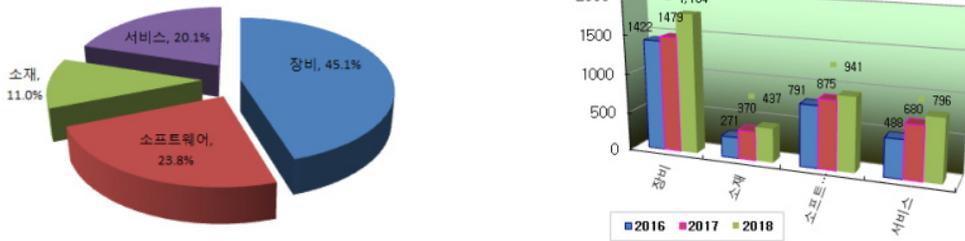
(단위 : 억원)

'14년	'15년	'16년	'17년	'18년	'19년	'20년	'21년	'22년	'23년
1,815	2,230	2,971	3,404	3,958	4,810	5,845	7,103	8,631	10,489

(출처 : 정보통신산업진흥원, 2018)

2018년부터 SW코딩 교육 의무화 등에 따라 학교 교육 등에 적합한 보급형 3D 프린터 수요가 증가하면서 국내 시장 성장을 주도하고 있다. 2017년 보급형 3D 프린터 시장은 419억원이었으나 2018년 575억원으로 37.2% 증가하였다. 국

내 부문별 시장현황은 3D 프린팅 장비(1,784억)·소재(437억)·SW(941억)의 제품 시장이 79.9%를 점유하고 있어 서비스 시장(20.1%)에 비해 다수를 차지하는 것으로 나타났다(그림 Ⅲ-3).



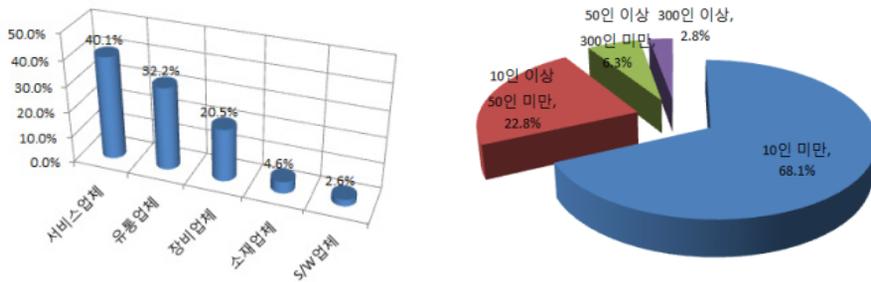
(a) 국내 3D 프린팅 부문별 시장현황 (b) 국내 3D 프린팅 부문별 시장 연도별 추이

[그림 Ⅲ-3] 국내 3D 프린팅 부문별 시장동향(정보통신산업진흥원, 2018)

공공부문에 국산 보급형 3D 프린터 공급을 확대(377억원, 38.9%↑)하여 장비 제조시장이 성장(443억원, 25.2%↑)하고, 국산 보급률도 27%에서 45.8%로 향상되었다. 그로인해 보급형 장비에 사용되는 필라멘트 등 소재 시장도 동반성장하는 결과(32.3%↑)를 가져왔다. 소재별 소비량을 보면, 필라멘트가 60.7%로 가장 많고, 그 다음이 레진(32.3%), 금속(2.4%), 분말(0.3%) 등 순이었다. 서비스분야는 3D 프린팅 교육이 46.3%이상 증가하였고 모델링 서비스 증가 20.7%, 장비·유통기업의 서비스 사업 진출은 12.7% 증가 등으로 시장규모 성장은 17.0%이상 증가하였다. 각 분야별 현황을 보면, 컨설팅이 30.7%, 3D모델링 30.5%, 출력서비스 25.6%, 교육 8.4% 등의 순이었다. 또한, 산업 활용분야 및 용도분야에서는 산업활용분야에서 주로 교육(20.5%), 공공(17.1%), 자동차(14.5%) 등에서 활용되었고 용도에서 시제품 및 완제품 제작, 교육/연구 등으로 이용되었다. 기업현황은 2018년 3D프린팅 기업은 351개로 전년대비 16.2% 증가한 것으로 나타났고 분야별로 나누면, 장비(20.5%, 72개), 소재(4.6%, 16개), SW(2.6%, 9개), 서비스(40.1%, 141개), 유통(32.2%, 113개) 분야로 분류되었다

(그림 III-4).

그리고 종사자수는 10인 미만이 239개소(68.1%)로 가장 많았고 10인 이상 50인 미만이 80개소(22.8%), 50인 이상 299인 미만이 22개소(6.3%), 300인 이상이 10개소(2.8%) 순이었다. 연매출 10억원 미만인 사업장이 289개소(82.3%)로 소기업이 다수를 차지하는 것으로 나타났다.



(a) 국내 3D 프린팅 부문별 기업현황 (b) 국내 3D 프린팅 기업별 종사자수 현황

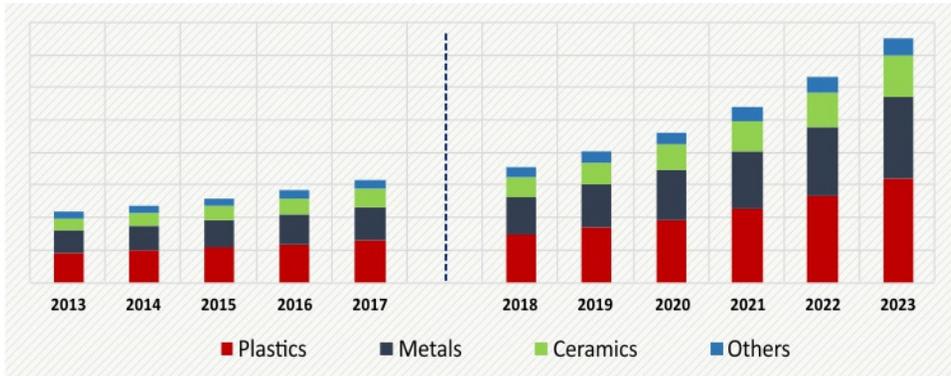
[그림 III-4] 국내 3D 프린팅 기업 및 종사자수 현황(정보통신산업진흥원, 2018)

기술 수준은 최고 기술국인 미국의 78.3% 수준이며, 3.3년의 기술 격차가 나는 것으로 파악되었고 미국, 유럽 등 기술 선진국에 비해 국내 3D 프린팅 관련 기술 수준(장비 및 설비 84.1%, 소재 및 가공 79.7%, 소프트웨어 69.2%)은 낮은 편이었다.

3) 세계 3D 프린팅 소재 시장

전세계 3D 프린팅 소재 시장은 2017년에 5억 5,440만 달러로 평가되었으며, 2018~2023년 동안 연평균 16.7%를 기록하는 2023년에는 13억 6,560만 달러에 이를 것으로 예상된다(그림 III-5). 3D 프린팅 소재에 대한 수요가 높아지고 있는 것은 북미 및 유럽 지역의 첨가제 제조를 조기 채택한 데 기인한다. 이 외

에도 시장은 견고한 항공우주 산업의 발전과 구조물 제조를 위한 프린팅 소재를 사용하는 자동차 산업의 급속한 확장에 의해 주도되고 있다.



(출처 : Frost & Sullivan, 2017)

[그림 Ⅲ-5] 세계적인 3D 프린팅 소재 시장, 유형, MT (2013-2023 년)

유형에 따라 3D 프린팅 소재 시장은 플라스틱, 금속, 세라믹 및 기타로 분류된다. 다른 범주에는 나무와 돌, 모래, 대리석, 왁스 및 식용 재료가 포함된다.

규모면에서 보면 2017년 시장 점유율이 40.0% 이상인 플라스틱 부문이 가장 큰 비중을 차지하였는데, 이것은 플라스틱이 3D 프린팅 소재로 비교적 저렴하고 쉽게 녹아 최종 제품을 만드는데 용이하기 때문이다.

3D 프린팅 소재 시장은 형태를 기반으로 분말, 필라멘트 및 액체로 구분되는데, 필라멘트 부문은 2017년 판매량의 50.0% 이상을 차지하는 시장에서 가장 큰 비중을 차지했으며 아크릴로 니트릴 부타디엔 스티렌 (ABS)과 폴리 락트산 (PLA)은 3D 프린팅에서 가장 널리 사용되는 플라스틱 필라멘트 소재이다. 이들은 우수한 층 밀착성, 감소된 수축률, 고밀도 및 비틀림 저항성과 같은 우수한 특성을 가지고 있다.

또, 3D 프린팅 소재 시장은 응용 분야에 따라 우주 항공 및 국방, 의료 및 치과, 자동차, 소비재 및 기타 분야로 분류되며 다른 카테고리에는 패션, 전자

제품, 미술과 조각, 보석, 음식 및 건축물이 포함된다. 항공 우주 및 방위 부문은 2017년 시장에서 35.0% 이상의 매출을 기록했다. 티타늄은 우주 항공 및 국방 분야에서 주로 사용되는 3D 프린팅 분야에서 가장 비싼 재료 중 하나로서 이용되고 있다.

3D 프린팅 소재 전망은?

3D 프린팅은 첨가제 제조에서 인기를 얻고 있다. 첨가제의 제조는 감산 공정(subtractive process)에 의존하며, 생산 과정에서 낭비되는 원료가 반복적으로 재사용된다. 3D 프린팅은 절단을 필요로 하지 않는 3D 프린팅 원자재가 포함되어 있어 남은 재료가 거의 없거나 전혀 없으므로 첨가제 제조의 혁신적인 기술이다. 광범위한 제조 공정에서 3D 프린팅의 인기가 높아짐에 따라 3D 프린팅 소재 시장은 상당한 속도로 상승할 것이다.

산업 전반에 걸쳐 다양한 제품을 제조하기 위해 대규모 사용자에게 대한 정의가 필요하다. 3D 프린팅을 사용하면 초기 제조 비용이 들지 않고 대량 생산이 가능하다. 경험을 창출하고 제품에 가치를 추가하는 것과 같은 대규모 사용자에게 다양한 이점이 있다. 건설 부문에서는 3D 프린팅 기술을 사용하여 어려운 구조물을 건축할 수 있으므로 기존의 건설 관행의 한계를 극복할 수 있다. 3D 프린팅에 대한 커스터마이징 범위가 넓어짐에 따라 3D 프린팅 소재 시장은 향후 성장할 것으로 예상된다. 중국, 인도, 인도네시아와 같은 국가들은 개인의 구매력이 급속하게 증가하고 있음이 관찰되고 있다. 성장하는 구매력으로 인해 이들 국가의 자동차 판매가 증가했다. 예를 들어, 2017년에 중국과 인도는 차량 판매가 각각 2,912만대, 420만대에 도달하면서 세계에서 4번째로 큰 자동차 시장이 되었다. 3D 프린팅은 자동차 부품 설계에 있어 자동차 산업에서 널리 보급되고 있다. 자동차 산업에서 3D 프린팅의 채택이 증가함에 따라 3D 프린팅 소재 시장 또한 예측 기간(2018~2023년) 동안 상승할 것으로 예상된다.

세계 3D 프린팅 소재 시장에서 활동하는 주요 업체는 Stratasys Ltd., 3D

Systems Corporation, Arcam AB, Arkema SA, Royal DSM NV, ExOne Company, CRP Group, Envisiontec GmbH, EOS GmbH Electro Optical Systems, Koninklijke DSM NV, Arkema Group, CRP Technology Srl, EnvisionTEC GmbH, LPW Technology Ltd., Solidscape Inc., Formlabs Inc., Advanc3d Materials, Advanced Powders and Coatings, Cookson Precious Metals, Exceltec, Toner Plastic, TLC Korea, Taulman 3D, Maker Juice, Legor Group 등이 있다.

3D 프린팅 소재의 제한점은?

3D 프린팅 소재 시장에서 관찰된 주요 제한사항 중 하나는 높은 장비 비용이다. 기계 설비가 고비용이어서 3D 프린팅 설비를 설치하는 데 필요한 전체 자본 투자가 증가한다. 이와 함께 시간 소모적인 프로세스이며 시간은 인쇄해야 하는 레이어 수 및 프린터 속도와 같은 다양한 요인에 따라 개체를 인쇄하는 데 걸리므로 시장 성장에 부정적인 영향을 미친다. 또 3D 프린팅의 기술적 지식과 전문성 부족은 3D 프린팅 소재 시장에서 목격된 주요 제한사항 중 하나이다. 즉 프로세스의 기술적 전문성이 부족하고 가끔 잘못 해석하는 경향이 있다. 3D 프린팅 기술의 개념을 이해하려면 더 나은 교육 프로그램이 필요하므로 전문 기술을 통해 이 기술을 발전시킬 수 있어야 한다.

3D 프린팅 소재란?

3D 프린팅 플라스틱 소재에서 사출 성형은 다양한 대상을 만들기 위해 널리 사용되는 기술이다. 초기 진흙, 금속 등은 도구와 도구를 만들고 매우 기본적인 기술을 사용하기 위해 성형된 재료이었다. 그러나, 3D 프린팅이라는 용어와 같은 이 기술은 플라스틱, 생체 적합 물질, 고분자 등과 같은 재료를 성형하는 데 사용되는 현대 기술의 개입을 유도했다. 프린팅 소재는 필라멘트, 파우더 및 액체의 3가지 형태로 존재하며 용융 증착 모델링, 스테레오 리소그래피, 선택적

레이저 소결 (SLS), 폴리제트/잉크젯 3D 프린팅, 바인더 분사 등과 같은 프린팅 기술이 다양한 모델링에 적용된다.

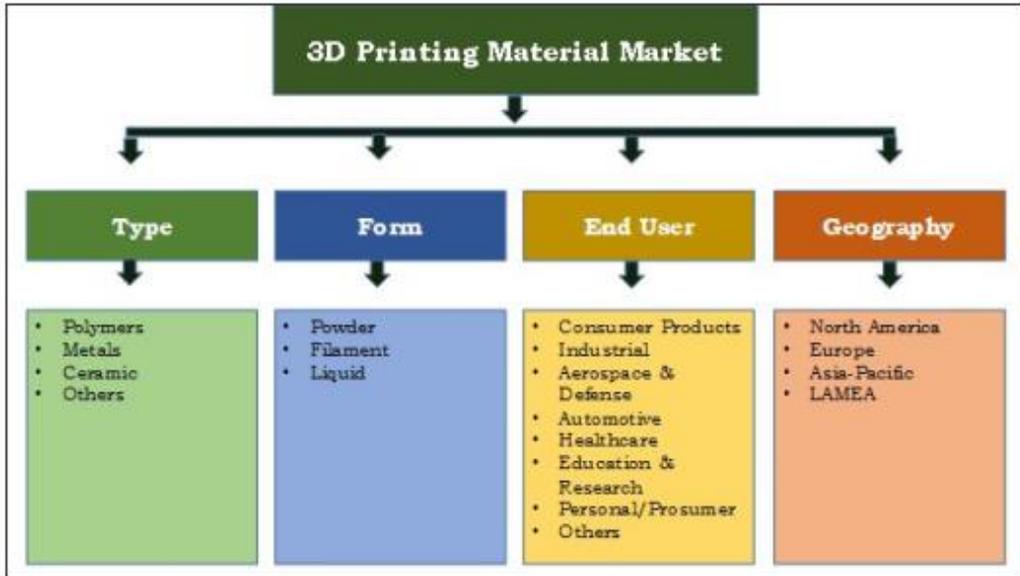
3D 프린팅 소재는 분말, 필라멘트 및 액체의 3가지 형태로 사용되며, 액체 형태는 대규모로 사용된다. 폴리머 (플라스틱), 금속, 세라믹 등이 현재 사용되는 3D 프린팅 소재중 일부이다. 그 중에서도 폴리머는 가장 보편적으로 사용되는 프린팅 소재이며 예측 기간 동안 주요 소재 수요를 지속적으로 충족할 것으로 예상된다. 폴리머 및 금속은 가장 널리 사용되는 3D 프린팅 소재이다. 업계 전반에 걸쳐 하이엔드 애플리케이션의 사양을 충족하기 위해 새로운 소재를 상용화하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 3D 프린팅 소재 시장의 폴리머 수요는 데스크톱 프린팅 수요의 급격한 증가로 인해 크게 증가하고 있는 반면, 자동차 및 항공우주 산업의 구조 부품과 같은 하이엔드 애플리케이션의 보급이 증가함에 따라 금속 수요는 날로 증가하고 있다.

또한, LOM (Laminated Object Manufacturing) 및 EBM (Electron Beam Melting)은 3D 프린팅 소재를 처리하는 데 사용되는 기술이다.

3D 프린팅 소재의 주요 용도는?

3D 프린팅 소재의 주요 응용은 프로젝트 모델링이다. 원하는 형태로 성형된 소재는 전체 컬러 기능 모델 및 비주얼 프로젝트를 준비하는 데 사용된다. 소프트웨어의 시뮬레이션된 디자인은 실제로 인쇄되며 3D 프린터는 재료 유형에 따라 시장에서 판매된다. 자재 유형별 3D 프린팅 응용 프로그램은 다양한 용도로 다양한 최종 사용자에게 또는 산업에서 모두 사용된다. 그들은 의료 산업에서 도구를 만들기 위해 사용되고 심지어 현대 기술은 인체 조직에서 장기를 복제할 수 있는 프린팅 기술을 이끌어 냈다. 그들은 항공 우주 및 자동차 기계 부품을 제조하고 건설 업계에서 모델을 만들기 위해 더 많이 사용되며 학생들이 육안으로 볼 수 있고 검사할 수 있는 교육용 시각적 모델을 만드는데 사용된다. 또한 음식 보관 및 요리 도구를 만들기 위해 사용되며 성장하는 IT 분야

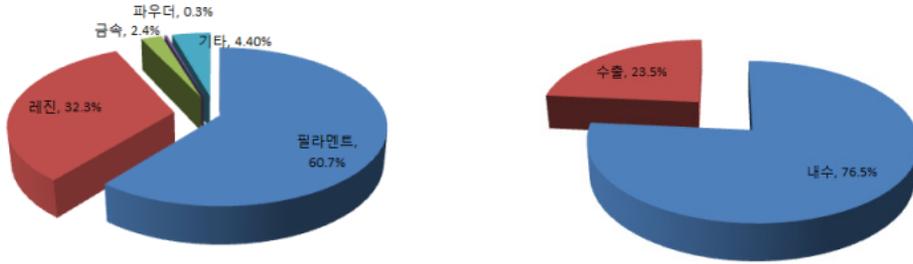
의 인프라 및 설비 구축을 위해 광범위하게 사용될 응용 분야를 지속적으로 찾아가고 있다(그림 III-6).



[그림 III-6] 3D 프린팅 소재 시장의 분할(출처 : Frost & Sullivan, 2017)

4) 국내 3D 프린팅 소재 시장

2018년 국내 3D프린팅 소재 제조 시장은 개인용 데스크탑의 판매가 증가하며 47.2억원을 기록했다. 제품별로는 플라스틱 계열이 전체 소재제조 시장의 93%를 상회하고 있는 가운데, 세부적으로는 필라멘트 60.7%, 레진 32.3%, 금속 2.4% 매출비중을 보이고 있다. 전체적으로 개인용 데스크탑에서 주로 저가의 필라멘트 소재가 사용되는 가운데, 정교한 출력물을 요구하는 산업용 장비에서는 액체 상태의 레진 소재 이용이 증가하고 있다. 한편, 금속소재는 기업의 수요가 줄어들어 제한적인 수준에 머물고 있다(그림 III-7).



(a) 국내 3D 프린팅 소재별 분포현황 (b) 국내 3D 프린팅 지역별 수요현황

[그림 III-7] 국내 3D 프린팅 소재별 분포 및 수요 현황(정보통신산업진흥원, 2018)

5) 소재별 3D 프린팅 기술

3D 프린터에 사용되는 소재는 폴리머(ABS, PLA, HOPE, 폴리스티렌, 나일론, 레진 등), 금속(티타늄, 알루미늄, 코발트 등), 필름, 기타(종이, 목재, 식재료 등) 등 매우 다양하며 액체, 분말, 고체 등 사용되는 소재의 형태에 따라 조형성, 견고함 등의 특성이 상이하다. 액체형 소재는 주로 액체상태의 폴리머 합성수지와 그 외의 합성수지를 이용하여 한층씩 적층 후 광경화시키는 과정을 거친다. 분말형은 분말형태의 합성수지를 녹이거나 레이저 소결하여 사용한다. 고체형은 얇은 필름원료를 쌓고 형태를 깎아내는 과정을 거치는 적층물 저표방식과 필라멘트 형태의 플라스틱이나 왁스원료를 녹여 노즐분사를 통해 한층씩 쌓는 압출적층조형방식이 있다(표 III-2).

<표 III - 2> 소재형태에 따른 3D 프린팅 기술 방식

소재형태	소재종류	프린팅 방식	특징 및 대표적 회사
액체형	액체상태	<ul style="list-style-type: none"> • Stereolithography (SLA) • Jetted Photopolymer • Ink Jet Printing 	<ul style="list-style-type: none"> • 액체형태의 광경화서 수지 등의 재료 사용 • 뛰어난 표면과 미세형상 구현이 가능하나 내구성이 다소 떨어짐 • 미국 3D Systems Corp.의 SLA시스템
분말형	미세 플라스틱 분말, 모래, 금속성분의 가루 등	<ul style="list-style-type: none"> • Selective Laser Sintering(SLS) • Direct Metal Laser Sintering(DMLS) • Three Dimensional Printing(3DP) 	<ul style="list-style-type: none"> • 나일론, 폴리스티렌, 폴리카보네이트, 모래, 금속 등의 재료 사용 • 다양한 재료의 선택이 가능하며 높은 정밀도, 견고함 등의 장점을 보유 • 미국 3D Systems Corp.의 SLS시스템, 독일EDS의 SLS 시스템
고체형	와이어 또는 필라멘트형, 왁스 성질을 가진 펠릿형, 얇은 플라스틱 시트나 필름형	<ul style="list-style-type: none"> • Fused Deposition Modeling(FDM) • Laminated Object Manufacturing(LOM) 	<ul style="list-style-type: none"> • 필라멘트형태의 수지, 왁스 성질을 가진 패럿, 얇은 플라스틱, 종이필름형태의 재료사용 • 제조단가 낮고 내습성과 다양한 복합재료 사용 가능 • 미국 Stratasys Ltd.의 FDM 시스템, 이스라엘 Object사의 Polyjet 시스템, 미국 Helisys 사의 LOM시스템

[출처 : 신산업혁명을 주도할 3D프린팅(프린터,소재)관련비즈니스 전모, 2016, IRS Global]

6) 3D 프린팅 소재의 종류

(1) 합성수지

현재 3D 프린팅에 가장 많이 사용되고 있는 대표적 합성수지 소재는 PLA (Polylactic acid)와 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)이다. PLA는 옥수수 및 감자의 전분 등과 같은 100% 재생 가능한 자원으로부터 얻어진 단량체를 이용하여 합성된 열가소성 고분자 소재이다. ABS는 경량 아크릴로니트릴 부타디엔 스티렌을 의미하여 3D프린터로 제품제조시 가장 폭넓게 사용되는 열가소

성 플라스틱이다. 현재 사용되고 있는 고분자 소재로는 PLA, ABS, Nylon, Urethane, PLA/ABS, Alloy, PC, PEI, UV Resin 및 Photo-polymer 등이 있다 (표 III-3). 이와 같은 폴리머 소재들은 강도가 약하고 가공시 냄새가 나는 문제점이 있어 유리섬유, 탄소섬유 및 그래핀 등과 같은 소재를 개발 중에 있다.

플라스틱 소재는 3D 프린팅 과정에서 충분히 압력을 가할 수 없어 정밀한 인쇄물을 얻기에 한계가 있고 금속소재에 비하여 여러 가지 물성이 요구된다. 또한, 3D 프린팅에 사용되는 플라스틱 소재는 사출성형에 쓰이는 플라스틱에 비해 ~1,000배 정도 비싸다.

<표 III-3> 주요 고분자 소재

소재형태	3D 프린팅소재	특성
열가소성 플라스틱	PLA	<ul style="list-style-type: none"> • 국내에서 FDM용으로 가장 많이 사용하는 재료 • 용융시 프린터를 끈적하게 하여 작업이 어렵고 자연분해되는 친환경 소재이나 재순환이 어려운 소재 • 흡습성이 높아 재료보관시 주의
	ABS	<ul style="list-style-type: none"> • 세계적으로 가장 많이 사용하는 소재 • 용융시 냄새 문제 심각
	PVA, HIPS	<ul style="list-style-type: none"> • 출력후 물과 오일에 녹여내는 서포터로 주로 사용
	Polycarbonate, Nylon, Polyphenylsulfone	<ul style="list-style-type: none"> • 열변형온도(HDT)가 100~150℃인 기능성고분자로 열수축 주의필요
	ULTEM, PEEK, PAEK 등 엔지니어링 플라스틱	<ul style="list-style-type: none"> • 열변형온도 150℃ 이상인 고강도 엔지니어링 재료. Utem 상용화
분말	Polyamide	<ul style="list-style-type: none"> • 나일론 12가 많이 사용되는 소재
	Multi-color	<ul style="list-style-type: none"> • 미세 그래놀 분말로 제조
액체	고정밀 UV 레진	<ul style="list-style-type: none"> • Photo-polymer 액체
	페인트형 레진	<ul style="list-style-type: none"> • 매끈한 표면과 미관 형성
	투명 레진	<ul style="list-style-type: none"> • 경화 가능한 액체

[출처 : 신산업혁명을 주도할 3D프린팅(프린터,소재)관련비즈니스 전모, 2016, IRS Global]

(2) 금속

3D 프린팅에 사용되는 금속소재도 다양해지고 있지만 여전히 제한이 많다.

분말 제조기술의 난이도가 높고 합금마다 조건이 다르기 때문이다. 특히 알루미늄이나 텅스텐의 경우 열전도성이 높아 열을 받으면 주변의 금속분말을 함께 녹여버리기 때문에 제어가 어렵다. 현재 많이 사용되는 금속소재로는 티타늄합금(Titanium alloys), 니켈(Nickel), 인코넬(Inconel), 스테인레스강(Stainless steel), 알루미늄, 코발트 크롬(Cobalt chrome), 구리, 금, 은 등이 있다(표 III-4).

<표 III-4> 주요 금속 소재

소재명	소재 형태	특성
티타늄 Ti64	Ti6Al4V, TiAl6V4 ELI	• Functional prototypes and series parts; Aerospace, mptor sport etc.
알루미늄	AlSi10Mg, AlSi12	• Functional prototypes and series parts; Engineering, automotive etc.
특수강 MS1	18 Mar 300/1.2709	• Injection moliding series tooling; Engineering parts
스테인레스강 GP1	스 테 인 레 스 강 17-4/1.4542	• Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
스테인레스강 PH1	경화성 스테인레스 15-5/1.4540	• Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
니켈합금 IN718	Inconel 718, UNS N07718, AMS5662, W.Nr 2.4668 etc	• Functional prototypes and series parts; High temperature turbine parts etc.
Nickel alloy IN625	Inconel 625, UNS N06625, AMS5666F, W.Nr 2.4856 etc	• Functional prototypes and series parts; High temperature turbine parts etc.
코발트 크롬 MP1	CoCrMo superalloy, UNS R31538, ASTM F75 etc.	• Functional prototypes and series parts; Engineering, medical, dental
Cobalt chrome SP2	CoCrMo superalloy	• Dental restorations
ETC	CL 80CU(Bronze), Yellow gold(18 carat), Silver alloy(930 sterling)	• Art and Jewelry

[출처 : 신산업혁명을 주도할 3D프린팅(프린터,소재)관련비즈니스 전모, 2016, IRS Global]

금속소재는 특성상 높은 가격, 가공방법, 소결온도 및 폭발위험성 등으로 인해 산업용으로 주로 사용되며 개인 용도의 확산은 상대적으로 제한적일 것으로 예상된다.

장비구매 기업의 소재활용 현황을 보면, 재료압출(material extrusion, ME) 방식에서 많이 활용되는 열가소성 플라스틱 필라멘트 소재가 69.1%로 가장 많이 활용되고 있고 광경화성 플라스틱 수지(20.1%), 열가소성 플라스틱 분말(3.4%) 순으로 나타났다. 금속 소재는 약 3%정도인 것으로 나타나 전반적으로 플라스틱 계열의 소재가 주로 사용되는 것으로 나타났다. 3D 프린팅 소재시장 수요조사결과, 소재 구입처는 국내 수요의 70~80%를 중국업체(웹사이트 : www.esun3d.net)를 통해 구매하여 사용하는 것으로 알려졌다(표 III-5).

업종별로는 열가소성 플라스틱 필라멘트의 사용이 높은 가운데 높은 표면조도를 낼 수 있는 광경화성 수지는 의료 및 치과 산업에서 많이 사용되고 있는 것으로 나타났다. 3D 프린팅 장비구매 기업의 소재조달 방식을 보면, 3D 프린터 제조업체가 제공하는 소재를 사용하는 경우가 전체 응답기업 중 75.4%를 차지하는 것으로 나타났으며 소재 전문업체에서 구매를 하는 경우도 26.1%인 것으로 나타났다.

<표 III -5> 인터넷에서 판매되고 있는 다양한 형태의 3D 프린팅 소재 종류

소재	특성	적용사례
<p>나일론 (폴리 아미드)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 흰색이라고도 하며 강하고 유연한 / 내구성 있는 플라스틱 / 흰색 플라스틱 • 강력하고 유연한 플라스틱 • 최소 벽 두께 1 mm • 자연적으로 흰색이지만 색상을 얻을 수 있음 • 1 mm 당 약 10 개의 층 • 분말로 만든 • Alumide = 폴리 아미드 + 알루미늄 • 연동 가능, 움직이는 부분 가능 (체인) 	
<p>ABS (가정용 프린터)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 레고처럼 강한 플라스틱 • 필라멘트 같은 스프라이트로 만든 • 다양한 색상 옵션 • 1 mm 당 약 3 개의 층 • 최소 벽 두께 1 mm 	
<p>수지 (여러 옵션)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 화이트, 블랙, 투명한 디테일 / 화이트 디테일 레진 / 하이 디테일 -, 투명 -, 페인트 가능 수지 • 엄밀하고 조금 섬세한 • 자외선으로 경화 된 액체 포토 폴리머 • 백색, 까만 & 투명한 가장 전형적인 색깔 • 1 mm 당 약 10 개의 층 • 최소 벽 두께 1 mm 	
<p>스테인레스 강</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 아주 강한 재료 • 여러 단계 또는 분말로 직접 제조 • 금 및 청동 도금과 같은 착색 옵션 • 1 mm 당 약 6 개의 층 • 최소 벽 두께 3 mm 	

[출처: <https://blog.tinkercad.com/materialsguide/>]

<표 III -5> 인터넷에서 판매되고 있는 다양한 형태의 3D 프린팅 소재 종류_계속

소재	특성	적용사례
<p>금은</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 강력한 재료 ● 왁스로 만든 후 주조 ● 1mm 당 약 10 개의 층 ● 최소 벽 두께 0.5mm 	
<p>티타늄</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 가장 강한 소재 ● 직접 금속 레이저 소결 ● 1 mm 당 약 30 개의 층 ● 최소 벽 두께 0.2 mm 	
<p>세라믹</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 엄밀하고 섬세한 ● 첫번째 세라믹이 인쇄된 후 표면이 유리 ● 세라믹 백색, 유약은 전형적으로 백색 ● 1 mm 당 약 6 개의 층 ● 최소 벽 두께 3 mm 	
<p>석고</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 사암 / 레인보우 도자기 / 다색 ● 엄밀하고 섬세한 분말로 만든 제품 ● 자연적으로 흰색, 색상으로 얻을 수 있음 ● 1 mm 당 약 10 개의 층 ● 최소 벽 두께 2 mm 	

[출처: <https://blog.tinkercad.com/materialsguide/>]

2. 3D 프린팅 관련업체 현황

3D 프린팅 관련업체 현황 파악은 한국표준산업분류를 참고하였고 여기에 통계청자료인 “2018년 3D프린팅 산업실태조사” 결과를 기본으로 하여 3D프린팅 연구조합(과기부 산하), 3D융합산업협회(산자부 산하), (사)3D프린팅산업협회(산자부 산하), (사)한국3D프린팅협회(과기부 산하) 등 회원사 등을 조사하여 중복된 업체를 제외하였다. 그리고 다음 <표 III-6>과 같이 3D프린팅과 관련된 소재, 소프트웨어, 서비스, 유통 등 업체를 분류하여 공급업체로 351개소를 산출하였다.

<표 III-6> 3D 프린팅 공급업체수

계	장비	소재	S/W	서비스	유통
351	72	16	9	141	113

[출처 : 과학기술정보통신부 정보통신산업진흥원, 2018 3D프린팅 산업 실태조사, 2019]

수요업체는 3D프린팅이 잘 응용되고 있는 분야, 즉 자동차, 조선, 항공, 가전, 정보통신, 의료, 건축, 철도, 교육, 완구, 의류, 공공 등 한국표준산업분류상 등록업체를 추출하여 통계청 자료를 근거로 총 1,324개소를 산정하였다(표 III-7).

<표 III-7> 3D 프린팅 수요업체수

계	자동차	조선/항공	가전/정보통신	의료/병·의원	건축	의류/패션	완구	교육/연구	공공	기타
1,324	123	13	179	163	74	57	133	164	205	213

[출처 : 과학기술정보통신부 정보통신산업진흥원, 2018 3D프린팅 산업 실태조사, 2019]

3. 방출가능 유해물질

대부분의 데스크탑 3D 프린터는 현재 아크릴로 니트릴 부타디엔 스티렌 또는 폴리 락트산을 열가소성 원료로 사용한다(Ragan, 2013). ABS 및 PLA 기반 프린터 간의 주요 차이점은 작동 중에 원재료 원점과 노즐 및 바닥판(Base plates) 온도이다. PLA는 약 180°C의 노즐 온도와 상온 근처의 바닥판 온도에서 인쇄하는 생분해성 옥수수 기반 플라스틱이다. ABS는 대부분 상업적으로 사용 가능한 장치에서 220°C 전후의 노즐 온도와 80°C 전후의 바닥판 온도에서 인쇄되는 더 강한 열가소성 수지이다(Weinhoffer, 2012). 다른 열가소성 원료 공급원은 시판용 장치(Ragan, 2013)에서 널리 사용되지는 않지만 폴리 비닐 알콜 (PVA), 폴리 카보네이트 (PC) 및 고밀도 폴리에틸렌 (HDPE) 등이 사용되고 있다.

대규모 산업용 압출장비에서 열가소성 수지의 비교적 고온(예 : 170~240°C 노즐 온도) 열처리에 대한 연구에서 운전 중에 가스와 입자가 방출된다는 것을 보여주었다(Contos et al., 1995; Unwin et al., 2012). 고온에서 ABS 열분해의 일차 기상 생성물은 일산화탄소와 시안화수소 뿐만 아니라 다양한 휘발성 유기 화합물을 포함하는 것으로 나타났다(Rutkowski and Levin, 1986). ABS의 열분해 산물에 노출되면 쥐에서 독성영향을 받는 것으로 나타났다(Zitting and Savolainen, 1980; Schaper et al., 1994).

3D 프린팅 소재별 기술방식과 응용분야를 파악하므로써 소재의 특성을 보다 깊이 이해할 수 있다(표 III-8).

<표 III - 8> 3D 프린팅 소재의 기술방식에 따른 응용분야

소재	기술 방식	응용
ABS	FDM, SLA, 바인더 분사	DIY 프로젝트, 개념 모델, 기능 모델, 일반 제조
Alumide	SLS	DIY 프로젝트, 기능 모델, 일반 제조
Conductive	FDM	DIY 프로젝트, 기능 모델
HIPS	FDM, SLA	DIY 프로젝트, 일반 제조, 보조재료
“Metal”-Filament	FDM	DIY 프로젝트, 시각예술(visual arts)
Nylon	FDM, SLS	개념 모델, 시각예술, 기능 모델, 의료 제조, 공구
PEEK	FDM, SLA	의료 제조, 일반 제조, 자동차 및 항공 제조
PET	FDM	DIY 프로젝트, 기능 모델, 일반 제조
PETG	FDM	DIY 프로젝트, 개념 모델, 기능 모델, 일반 제조
PLA	FDM, SLS, SLA	DIY 프로젝트, 개념 모델, 기능 모델, 일반 제조
PVA	FDM	보조 재료
ULTEM	FDM, SLA	의료 제조, 일반 제조, 자동차 및 항공 제조
Wood	FDM	DIY 프로젝트, 개념 모델, 시각 예술
Aluminum	DMLS, 바인더 분사	기능 모델, 자동차 및 항공 우주 제조
Bronze	DMLS, 분말 베드 융합, 분실된 왁스 주조	시각 예술, 일반 제조
Cobalt Chromium	SLS, DMLS	자동차 및 항공 제조
Copper	DMLS, 분말 베드 융합, 분실된 왁스 주조	시각 예술, 일반 제조
Inconel	DMLS,	자동차 및 항공 제조
Nickel	DMLS, 분말베드 융합	의료 제조, 자동차 및 항공 제조
Precious Metals	바인더 분사, 분말 베드 융합, 분실된 왁스 주조	기능 모델, 의료 제조, 보석
Stainless Steel	DMLS, 바인더 분사	기능 모델, 공구 설비, 일반 제조
Titanium	DMLS, 바인더 분사, 분말 베드 융합	기능 모델, 공구 설비, 자동차 및 항공 우주 제조
Ceramics	FDM, SLA, 바인더 분사, 분말베드 융합, 수지	시각 예술, 의료 제조, 일반 제조
Wax	FDM, SLA, 수지	의료 제조, 보석
Paper	SDL	개념 모델, 시각 예술
Sandstone	바인더 분사, 분말 베드 융합	개념 모델, 시각 예술
SLA Resins	수지	개념 모델, 시각 예술, 기능 모델, 주얼리, 공구
PolyJet Resins	수지	개념 모델, 시각 예술, 의료 제조, 보석, 공구

- * FDM(Fused Deposition Modeling):
- * SLA(Stereolithography)
- * SLS(Selective Laser Sintering)
- * DMLS(Direct Metal Laser Sintering) : 직접 금속 레이저 소결
- * SDL(Selective Deposition Lamination)
- ** DI(Do it yourself)

영국 보건안전청(Health and Safety Executive, HSE)는 미래 활동의 우선 순위를 정하는데 도움이 되는 증거를 제공하고 직장에서 발암물질에 대한 노출 제어를 개선하며 개입 전략을 평가하기 위한 기준을 제공하기 위해 연구를 시작했다. HSE는 직업성 발암물질의 사용 그룹과 미래 발암 수준을 비교하기 위한 기준선 노출로 결정된 그룹의 노출 프로파일을 특성화하였다(HSE, 2006). 이 연구는 열가소성 가공 및 마감 산업에서 발암물질에 노출될 가능성을 확인했다. 그러나, 처리해야 할 소성공정에서 흙의 노출수준으로 발표된 자료가 부족하다는 사실이 관찰되었다. 1980년대 직업 집단에 의한 국가 사망률 데이터를 분석한 결과, 이 기간 동안 플라스틱 제품 제조사에서의 남성 방광암 사망의 초과위험과 플라스틱 취급근로자 중 여성의 폐암 등록 건수가 과도한 것으로 나타났다. 직업 분류의 한계로 인해 이 직업군에 대한 사망률 및 암 등록 빈도에 대한 최신 평가는 이루어지지 않았다. 그러나 1991~2000년 동안의 최근 사망자 분석에서 이 직업군에서 이 두 가지 암에 대한 과도한 사망은 관찰되지 않았다(Office for National Statistics, 2009)

열가소성 플라스틱은 일반적으로 펠렛, 과립 또는 분말로서 처리되며 때로는 충전제, 안료, 난연제 및 안정제와 같은 많은 첨가제를 포함한다. 플라스틱을 가열할 때 생성되는 흙의 조성은 복잡하며 플라스틱의 종류, 제제 및 가공 조건에 따라 달라진다. 열처리가 제대로 제어되지 않고 온도 및 체류 시간과 같은 처리 매개 변수를 초과하면 고분자 분해가 일어나 눈, 코 및 폐에 자극을 줄 수 있는 대기 오염물질이 방출 될 수 있다(HSE, 2002). 고온 가스 용접 및 레이저 절단과 같은 공정에서 고분자의 가열 또는 기화를 포함하는 실험실 연

구에서 일반적으로 가공된 플라스틱에서 발암물질 및 호흡기 자극제를 비롯한 다양한 대기 오염물질이 생성될 수 있음을 보여주었다(Sims et al., 1993). 실제 작업장 처리조건 하에서 이러한 배출물을 생성할 수 있는 가능성은 거의 없으며 소성공정의 작업장 상황에서 발생하는 흙의 조성에 대한 연구는 매우 제한적이다. 그러한 연구 중 하나는 다수의 플라스틱 및 공정이 관련되어 있으며 특정 조건에서 매우 낮은 수준이지만 아크릴로 니트릴 부타디엔 스티렌(ABS) 공정에서 아크릴로 니트릴이 검출되고 나일론을 가공 할 때는 벤젠과 발암성은 아니지만 호흡기 과민성 물질 또는 자극 물질들이 검출된다(Forrest et al., 1995). 그러나 이 연구를 위한 측정 프로토콜이 제한되어 있어, 예를 들면 폴리사이클릭 방향족 탄화수소(PAHs)와 같은 반휘발성 화합물(semi-volatile compounds)이나 휘발성 알데히드와 케톤과 같은 특정 호흡성 자극제와 같이 특정 부류의 물질은 검출되지 않았다. 보다 최근의 연구는 제한된 범위의 중합체 유형에 초점을 맞추어 공정 흙에서 생성된 광범위한 물질을 발견했다(Meijster et al., 2004).

데스크톱 FDM 방식 3D 프린팅 작업에서 얼마나 많은 초미세먼지를 방출하는지 실험하였다(Brent Stephens et al., 2013). 초미세먼지(PM0.1)는 지름이 100 nm(나노미터. 1 nm는 10억분의 1 m) 이하인 먼지로, 기도와 꽤뿐만 아니라 폐포 깊숙한 곳까지 침투해 뇌졸중, 천식, 동맥 경화 등을 일으킨다. 일반 사무실에서 FDM 프린터를 가동시키면서 1분 간격으로 공기 중 입자 개수를 측정했다. 그 결과, 분당 최고 1,900억개의 초미세먼지가 검출되었다. 이는 가정에서 가스레인지로 요리를 하거나 향초를 태울 때, 레이저 프린터를 작동시킬 때 또는 담배 한 개비를 태울 때 나오는 초미세먼지의 농도와 비슷한 수치다.

요리를 할 때와 비슷한 수준이라고 하면 크게 위험하지 않은 것처럼 보이지만, 사실은 그렇지 않다. FDM 프린터에서 나오는 먼지와 가스의 성분을 분석한 결과, 벤젠, 톨루엔, 포름알데히드, 프탈레이트 등 발암물질과 내분비 교란물질(환경호르몬)이 검출됐다(Yoon et al., 2015). 플라스틱 자체는 안전하지만,

200°C가 넘는 열로 녹이면 몸에 유해한 ‘열분해 산물’이 나오기 때문이다.

대규모 산업의 열가소성 공정에서 작동 중에 가스와 입자가 방출된다는 것을 확인하였고(Contos et al., 1995; Unwin et al., 2013) ABS 열처리 공정에서 분해산물인 아크릴로나이트릴, 스티렌 및 1,3-부타디엔의 쥐와 생쥐에 대한 노출 실험에서 독성 영향을 미치는 것으로 나타났다(Zitting and Savolainen, 1980; Schaper et al., 1994). 또한, PTFE(Polytetrafluoroethylene)소재의 플라스틱 열분해로 인해 흡에 노출되면 포유동물에 급성독성을 유발하는 것으로 나타났고(Oberdörster et al., 2005) 3D 프린팅 작업에서 발생하는 초미세입자가 가스보다 독성이 강하다는 것을 확인하였다(Johnston et al., 2000).

<표 III-9>에 조사된 10개의 작업공정과 사용중인 공학적 대책을 요약하였다. 조사된 공정에 대한 간략한 설명은 다음과 같다. 이 조사는 잠재적으로 위험한 물질의 방출을 감시하기 위한 것으로, 예를 들어 압출기, 오븐, 커터 또는 용접기와 관련된 가열 구역 근처에서 흡 수준이 최대화되는 위치에 모니터링 장비를 설치하였다. 수집된 배출 수준은 일반적으로 가열 구역 부근의 작업장에서 작업을 수행한 근로자는 개인 노출을 초과할 가능성을 경험할 수 있다. 이 모니터링 전략은 개인 모니터링(personal monitoring)을 실시하기에 용이치 않아 일반 또는 특정대상 매체를 가진 샘플러를 배열하여 측정할 수 밖에 없었다. 개인용 모니터링에서는 실현 가능성이 없었다. 필요하다면 증가된 방출량을 파악하는데 개인 모니터링 또는 임무별 연구를 통해서 더 조사할 수 있을 것이다.

<표 III-9> 열가소성 고분자를 이용한 공정 설명

공장	고분자	공정온도 (°C)	공정설명 및 생산제품	공학적 대책
1	Polyvinylchloride	180	펠렛과 혼합 및 압출 / 성형된 펠렛제품	적층 가공부에 LEV 및 강제 기계적 일반환기
2	Polyethylene & polypropylene	180~200	압출, 취입 필름 제작 / 음식 포장	강제 기계적 일반환기
3	Polyethylene & recycled polyethylene	180	압출, 취입 필름 제작 및 자루용접 / 자루 제조	강제 기계적 일반환기
4	Recycled polyethylene polypropylene, & polystyrene	180	파쇄, 펠렛으로 압출 / 재사용을 위해 펠렛으로 재활용	LEV 및 지붕 팬
5	Polyethylene terephthalate	280	압출, 블로우 사출 성형 / 병 제조	지붕 팬 및 송풍기
6	Acrylonitrile-butadiene-styrene	160~180	시트의 진공 성형 / 캐러반 패널 및 루프 박스 제조	일반환기
7	Polyvinylchloride	180~200	압출 / 수도관 제조	음압 압출 및 밀폐
8	Expanded polystyrene	200	블로우 성형 및 열선 절단 / 단열재 제조	강제 기계적 회석환기
9	PVC/chlorinated PVC alloy	180	진공 열성형 / 좌석 구성요소 제조	강제 기계적 회석환기
10	Polyvinylchloride	245	용접 / 창틀 제조	일반환기

* LEV : local exhaust ventilation

** PVC : poly vinyl chloride

<표 III-9>에서 공장 1은 최종 사용자를 위해 다양한 PVC(Poly vinyl chloride) 등급을 생산하기 위해 PVC 수지에 다양한 첨가제를 첨가하여 펠릿화 시킨 플라스틱 화합물을 제조하는 화합물 합성(compounding) 공장이고 공장 2는 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 또는 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)을 식품 포장에 사용하기 적합하도록 박막으로 압출하는 최대 9개의 공정으로 구성

되며 모니터링 당일에 이들 중 1개 공정은 PP를 실행하고 4개 공정은 PE를 실행하였다. 공장 3은 공장 2와 유사하게 운영되었으며 취입 필름 압출 공정을 사용하여 PE 백을 제조했다. 압출구는 12개의 압출기로 구성되었으며, 9개의 압출기는 수성잉크로 텍스트를 인쇄할 수 있다. 공장 4는 플라스틱 재활용 공장이었다. 펠렛으로 압출되기 전에 플라스틱을 분류, 청소 및 파쇄하는 작업이 있었다. 그러나 6개의 압출공정에 초점을 맞추었고 5개 공정은 고충격 폴리스티렌, PP(3) 및 고밀도 폴리에틸렌(High-density polyethylene, HDPE)중 하나만 가동하고 있었다. 공장 5는 PP 및 폴리에틸렌 테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate, PET)의 음료 병 및 항아리와 같은 다양한 중소형 플라스틱 품목을 제조하고 있었다. 소량의 고밀도 폴리에틸렌과 저밀도 폴리에틸렌도 가공되었지만, 관심 대상은 PET 제조지역이었다. 공장 6은 캐러밴 패널 및 카 루프 박스와 같은 다양한 제품을 제조하기 위해 플라스틱 시트의 자동 진공성형을 활용하고 있었다. 사용된 주요 소재는 ABS, 코팅된 아크릴캡 ABS와 HDPE이었다. 공장 7은 물을 운송하는데 사용하기 위해 PVC 파이프의 압출을 수행하고 있었으며 외부 사일로에 저장된 벌크 PVC 펠릿을 압출구 외부의 혼합 영역에 배관을 연결하여 첨가제(안료 등)를 혼입시키고 있었다. 공장 8은 건설 산업을 위한 PS 절연제품을 제조하는 곳이었다. 공장 9에서는 반자동 진공 열성형 공정을 사용하여 PVC 합금 시트에서 다양한 플라스틱 제품을 제조하고 있었고 PVC 합금의 단일 시트는 열성형기(thermoforming machine)에 손으로 올려 놓은 다음 $\sim 180^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 후 진공상태에서 성형하였다. 공장 10은 플라스틱화된 PVC 문틀을 제조하고 플라스틱 용접절차에 따라 PVC 프로파일된 부품을 수동으로 용접기에 넣고 용접을 자동으로 수행하였다. 공장 9와 10에서만 근로자가 상당시간 동안 가열된 구역(heated zones)에 아주 가까이 있을 가능성이 있었다. 국소배기 환기(LEV)보다는 일반 및 강제 기계적 희석환기를 사용하여 흡이 넓은 지역에 분산되고 예비조사를 위한 고정 소수점 샘플링이 가능하도록 하였다. 일반 또는 강제 기계적 희석환기는 나머지 8개 공장에서

일반적이었고 작업자는 다양한 작업을 수행하는 동안 드물게 가열구역을 가까이에 접근할 수 있었다.

작업자 노출은 광범위한 플라스틱 분해제품 또는 사용중인 소재의 첨가제에서 발생할 수 있다. 그러므로 유해물질 노출을 어떻게 평가할 것인지에 대한 샘플링 전략은 중요하다. 지역 샘플링은 다양한 샘플러 유형을 활용하는 최상의 옵션이었다. 두 샘플링 위치의 각각에서 12개의 샘플러를 배열하였다. 개인 시료 채취가 이용되었다면 분석물질의 범위는 현저하게 감소되었을 것이다. 일반 및 강제 기계환기의 유비쿼터스 사용은 공기 오염물질 수준을 모니터링하는데 용이하였다. 두 샘플링 위치에서 채택된 공기 채취 및 분석 방법을 요약하였다(표 III-10).

시료채취장치의 동일한 세트는 2개의 편리한 위치, 일반적으로 가열된 구역에 가까운 공정의 반대 측면에 배치하였다. 샘플러는 가능한 경우 가열된 구역에서 2~3 m 이내에 배치하여 흡의 포집을 극대화하였다. 포인트 소스의 부재, 제조공정의 자동화 및 일반적인 환기장치의 공통 사용은 지역 샘플러가 스크리닝 목적에 적합하다는 것을 의미했다. 일련의 저유량 시료채취기와 고유량 시료채취기는 실험실 확인을 위해 광범위한 미립자, 반 휘발성 및 휘발성 유기화합물을 포집하는 데 사용되었다. 저유량 시료채취기는 고유량 시료 채취기와 적당한 거리를 두어 머리 또는 가슴 높이로 배치하여 고유량 시료채취기의 입구와 출구가 저유량 시료채취기의 흡입을 방해하지 않도록 했다.

<표 III -10> 각 두 샘플링 위치에서 채취된 공기 채취 및 분석 방법 요약

분석대상	채취매체	공칭유량 (ℓ)	분석방법	기타 정보
Aldehyde screen	37-mm GF/A filter, treated with 2,4-DNPH	1	HPLC/UV	MDHS 93
Aldehyde screen	DNPH-treated silica gel tube	0.05	HPLC/UV	MDHS 93
Hydrogen chloride	Sodium carbonate-treated 25-mm filter	2	Ion chromatography	IM-OP411
Azodicarbonamide/ inhalable dust	25-mm GF/A filter, preconditioned	2	Inhalable dust-gravimetric. Azodicarbonamide-HPLC/UV	MDHS 14/3 & MDHS 92
Metal screen	25-mm GLA 5000 membrane filter	2	XRF	MDHS 91
Volatile organic compounds (VOC) screen (Tube 1)	ATD tube containing Tenax sorbent	0.05	GC/MS	OMS-001
VOC screen (Tube 2)	ATD tube containing Chromosorb 106 sorbent	0.05	GC/MS	OMS-001
Butadiene	ATD tube containing Carbopack X sorbent	0.05	GC/FID	OMS-001
VCM and low-molecular weight hydrocarbons	ATD tube containing Carbograph/Carboxen 1000 sorbents	0.05	GC/MS	OMS-001
VCM (Tube 2)	ATD tube containing Air Toxics sorbent	0.05	GC/MS	OMS-001
Acrylonitrile	ATD tube containing Tenax/ Sphero carb sorbents	0.05	GC/FID	OMS-001
Semi-volatile screen with polycyclic aromatic hydrocarbons	100-mm quartz filter backed up with 50g XAD sorbent in between 25-mm polyurethane foam plugs	200	GC/MS	High-volume polyurethane foam sampler

* DNPH : dinitrophenylhydrazine;

* GF/A : glass fiber filters with 1.6 micron particle retention rating;

- * FID : flame ionization detector;
- * ATD : automated thermal desorption;
- * VCM : vinyl chloride monomer;
- * VOC : volatile organic compounds;
- * HPLC/UV : high-performance liquid chromatography with ultraviolet detection.
- * GC/MS : gas chromatography - mass spectroscopy;
- * XRF : X-ray fluorescence

지역 샘플링에 의해 측정된 10개의 공장으로 부터의 배출농도는 매우 낮았다 (Unwin et al., 2008). 대부분의 경우에 측정된 흡입가능한 분진수준은 1.15 mg/m³ 보다 훨씬 낮았다. 미량 수준의 포름알데히드가 가장 흔하게 검출되었지만 농도는 0.01 mg/m³ 을 초과하지 않았다. 염화비닐 모노머는 PVC를 제조하는 한 공장에서 0.02 ppm 검출되었다. 어떤 측정장소에서도 호흡기 과민성물질이 검출되지는 않았다.

고유량의 공기 샘플에서는 휘발성 유기화합물(VOCs)의 미량 수준이 확인되었지만 모든 농도는 작업장 노출기준(Workplace Exposure Limit, WEL)의 5 % 보다 낮았다(HSE, 2005). 작업공정의 흠에서 확인된 발암물질의 요약은 <표 III-11>에 나와 있으며, 비교를 위해 발견된 흡입가능한 분진농도도 포함하였다.

모든 공장에서 발견된 PAH 수준은 전형적인 배경농도 수준이었다(DEFRA, 2012). 나프탈렌(IARC 2B, 인체 발암가능성)은 잘 알려진 다환방향족 탄화수소이다. 이러한 화합물의 농도가 낮기 때문에 대부분의 경우 고려중인 공정이 전체 작업장 농도에 직접적으로 기여했는지 여부는 불확실하다. 검출된 공기 오염물질중 일부는 다른 고분자 또는 다른 관련없는 활동으로 인접한 열 성형공정에서 비롯되었을 수도 있다.

<표 III - 11> 모든 장소에서 발견된 발암성 물질 요약 (흡입성 분진농도 포함)

포집 장소	고분자	검출된 발암물질의 최대농도	흡입성분진 농도(mg/m ³)
1	PVC	Vinyl chloride monomer: 0.020 ppm, naphthalene: <1 ng/m ³ , other PAHs: <1 ng/m ³	0.64
2	PE & PP	Formaldehyde: 3.4 µg/m ³ , naphthalene: <1 ng/m ³ , other PAHs: <1 ng/m ³	0.43
3	PE	Formaldehyde: 1.7 µg/m ³ , naphthalene: <1 ng/m ³ , other PAHs: <1 ng/m ³	0.15
4	PE, PP, & PS	Formaldehyde: 7.2 µg/m ³ , naphthalene: <1 ng/m ³ , other PAHs: <1 ng/m ³	1.03
5	PET	Naphthalene: <1 ng/m ³ , other PAHs: <1 ng/m ³	0.32
6	ABS	Naphthalene: <1 ng/m ³ , other PAHs: <1 ng/m ³	0.11
7	PVC	Naphthalene: <100 ng/m ³ , other PAHs: <10 ng/m ³	1.15
8	EPS	Formaldehyde: 9 µg/m ³ , naphthalene: <50 ng/m ³ , other PAHs: <10 ng/m ³	0.21
9	PVC alloy	Formaldehyde: 2 µg/m ³ , naphthalene: <20 ng/m ³ , other PAHs: <20 ng/m ³	0.10
10	PVC	Naphthalene: <60 ng/m ³ , other PAHs: < 20 ng/m ³	0.17

모든 공장에서 가공온도와 체류시간이 최적화되어 열성형이 최대효율로 작동할 수 있었다. 가시적인 흙 및 악취는 대부분의 현장에서, 심지어 열성형 바로 인접한 지역에서도 최소화되었다. 장비 고장과 같은 플라스틱의 심한 과열을 유발하는 이벤트 중에 더 높은 노출 가능성이 있을 수 있다. 열성형 공정은 대개 크고 개방된 작업실에서 수행되었다. 강제적인 기계적 희석환기가 5곳에서 시행되었다. 모든 공장의 열성형 공정은 고도로 자동화되었으며 정상적인 작동 조건에서 수동 작업자 개입이 거의 필요하지 않았다. 일반적으로 작업자는 열성형 공정에 인접한 지역에서 거의 시간을 보내지 않았다.

조사대상 폴리머중 하나인 PMMA(Poly methyl methacrylate)는 발견되지 않았다. 이 고분자는 과도한 온도에서 처리될 때 메틸 메타크릴레이트 단량체로 열적으로 분해되는 것으로 알려져 있다(Gao et al., 2004). 그러나 이 고분자 물질로부터 발암 물질이나 호흡기 과민성 물질이 고온 처리를 통해 방출된다는 증거는 부족하였다. PMMA의 레이저 절단 결과는 열분해산물이 낮은 독성을 갖는다는 것을 암시한다(Sims et al., 1993). 레이저 절단은 중합체의 고온 증발을 수반하며 열성형공정보다 특히 PVC 공정에서 유해물질을 생성할 가능성이 더 크다(Sims et al., 1993). 플라스틱의 레이저 절단은 벤젠과 염화수소와 같은 유해물질을 방출할 가능성이 가장 높기 때문에 주의가 요구된다. 주요 흡 발생원에 인접하여 연구된 플라스틱의 열 성형으로 인한 유해물질 방출은 극히 낮으며 미량 수준 이상의 개별 발암물질이나 호흡기 과민성 물질을 함유하지 않음을 입증하였다.

작업공정의 고장으로 플라스틱의 심한 과열이 발생하는 상황이라면 명확한 증거가 없는 경우 노출관리에 사전예방원칙을 적용하여 적절한 호흡보호장비를 착용해야하며 문제가 해결되고 대기상태가 정상으로 돌아올 때까지 해당 지역에서 중요하지 않은 인력은 필수인력과 분리시켜 사용하는 유지보수 운영자가 필요하다.

선행 연구자료를 고찰해 보면, 연구자마다 다양한 현장 및 조건에서 측정 및 실험을 통하여 유해물질과 방출량을 제시하고 있는 것으로 나타났다(표 III-12). 하지만 유해물질과 방출량은 약간 차이를 보이고 있다. 전체적으로 고려할 때, 가스상 물질로는 포름알데히드(formaldehyde, HCHO), 아세트알데하이드(acetaldehyde, C₂H₄O), 스티렌(styrene, C₈H₈), 카프로락탐 (caprolactam, C₆H₁₁NO), 디에틸렌 글리콜 모노부틸 에테르(2,2-butoxyethoxy ethanol, C₈H₁₈O₃), 메타크릴산 메틸(methyl methacrylate, C₅H₈O₂), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, C₂HC₃), 톨루엔(toluene, C₇H₈), 에틸벤젠(ethyl benzene, C₈H₁₀), 카프로락탐, 락티드, 사이클로헥사논, 메틸메타크릴레이트, 노말부탄올,

총 휘발성 유기화합물(TVOCs), 1,3-부타디엔(1,3-butadiene), 비닐클로라이드 모노머(vinyl chloride monomer), naphthalene, 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 와 입자상 물질은 미세 또는 초미세먼지(fine or ultrafine particle), 그리고 중금속은 크롬(chromium, Cr), 비소(arsenic, As), 카드뮴(cadmium, Cd), 구리(copper, Cu), 안티몬(antimony, Sb) 등이 3D 프린터 사용으로 인한 노출가능 유해물질로 파악되고 있다.

<표 III - 12> 3D 프린팅 관련 노출평가 및 건강영향 선행연구 분석 요약

연번	제목	연구자	저널	연구결과
1	Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers	Brent Stephens et al.	Atmospheric Environment (2013)	<ul style="list-style-type: none"> - FDM 3D 프린터의 입자수 농도는 PLA 보다 ABS에서 30배 이상 높았음 - ABS 소재의 경우 TVOCs 최대 농도가 453.3 ppb
2	Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room	Yu Zhou et al.	Procedia Engineering (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - 입자 크기의 대부분은 10 μm (PM₁₀) 미만이었음 - 입자 크기가 작을수록 높은 입자 농도 발생 (0.25 μm ~ 0.28 μm크기에서 가장 높은 농도 측정)
3	Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer	NimaAfshar-Mohajer et al.	Building and Environment (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - FDM 3D 프린터에서 초미세입자 방출은 ABS 소재가 PLA 소재보다 높았음
4	Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation	Yoon CS et al.	Environmental Science & Technology (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - 3D 프린터에서 TVOCs와 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)의 농도가 미국 EPA 기준을 초과하였음
5	Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer	Jinghai Yi et al.	Journal of Toxicology and Environmental Health (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - 3D프린팅에 사용되는 소재와 색상에 따라 미세입자 방출량 값이 상이하였으며, 발생원의 개폐상태에 따라 방출량 결과 값에 영향을 주었음 - ABS 소재가 PLA 소재에 비하여 더 큰 입자를 방출하였음 - 필라멘트 색상에 따라서 입자크기, 총 입자수 및 질량 값이 차이가 있었음

<표 III - 12> 3D 프린팅 관련 노출평가 및 건강영향 선행연구 분석 요약_계속

연번	제목	연구자	저널	연구결과
6	Assessing and Reducing the Toxicity of 3D-Printed Parts	Shirin Mesbah Oskui et al.	Environmental Science & Technology (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - FDM(폴리머 필라멘트 소재 사용) 3D프린터 및 STL (광경화성 액상레진 소재 사용) 3D프린터를 사용하여 출력물을 제브라피쉬(zebrafish)의 배아(embryo)에 노출시켰을때배아에 유독성을 나타냄. STL 프린터 출력물에서 더 높은 유독성 확인
7	Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings	Steinle P	Occupational Environmental Hygiene (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - 초미세 에어로졸(UFA) : ABS보다 PLA에서 더 높았음 - 총휘발성유기화합물: 주요 방출 VOC는 ABS의 경우 스티렌(49 %), PLA의 경우 메타크릴산메틸(37 %)로 확인됨 - 환기 불기한 작은 사무실 : 초미세 에어로졸 및 농도가 크게 증가하였음(UFA: 970 → 2,100/cm³, TVOC: 50 → 216 µg/m³)
8	3D 프린팅(ME방식-FDM) 작업환경의 유해물질 배출 현황조사	한국건설 생활환경 시험연구원	(사)한국진자정보통신산업진흥회 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - 원재료의 함량보다 출력물에서 VOCs 방출량이 높음 - 소재(ABS, PLA)에서 styrene와 poly(lactic acid) 검출 유해 중금속은 검출한계 이하 - 현장평가에서 TVOCs와 HCHO 실내공기질 관리기준 초과
9	Risk assessment of 3D printers and 3D printed products	Eva Jacobsen et al.	EPA, Denmark (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - FDM 3D 프린팅에서 발생하는 입자상물질(분진)과 휘발성물질 배출에 따른 건강위해성 평가 - 휘발성물질로 lactide(PLA), styrene(ABS), caprolactam (nylon)으로 제시하며 호흡기 및 눈 자극의 영향을 제시
10	An exposure assessment of desktop 3D printing	Tracy L. Zontek et al.	Journal of Chemical Health & Safety (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - 3D 프린팅 작업 2곳 (환기상태 고려)에서 초미세 먼지(ultrafine)가 ~10³ particles/cm³ 발생 - 초미세먼지(ultrafine)의 폐 및 심혈관 영향을 고려할 때, 제어방법이 필요함을 제시

4. 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과

1) 플라스틱

3D 프린팅 소재중 플라스틱 소재인 PLA 대한 성분분석 결과, 관리대상물질은 아크로레인, 초산, 노말부틸알콜, 메틸메타크릴레이트, 톨루엔, 스티렌 등이 검출되었으며 고분자물질은 L-Lactide; 2,3-Pentanedione; Silane, trimethyl- ; Benzoic acid, 2- ; 2-Propenoic acid, tridecyl ester 및 20여종의 기타물질이 검출되었다. 구성비는 관리대상물질에서는 메틸메타크릴레이트가 1% 정도로 관리대상물질중 가장 높았고 고분자물질에서는 L-Lactide가 가장 높은 전체의 60%이상을 차지하였다. CCU-purple 및 CCU-red에서는 고분자물질만 검출되었다(표 III-13).

3D 프린팅 소재중 플라스틱 소재인 ABS 대한 성분분석 결과, 관리대상물질은 아크로레인, 톨루엔, 에틸 벤젠, 크실렌(모든 이성체), 스티렌, 페놀 등이 검출되었고 고분자물질은 1,3,5-Cycloheptatriene, 7,7-dimethyl-; Benzene, propyl- 등이 검출되었다. 구성비는 관리대상물질인 스티렌과 에틸벤젠이 각각 50% 이상, 20%이상을 차지하였고 고분자물질 각각은 최대 10%를 넘지 않았다(표 III-14).

기타 소재에서는 PETG-black인 경우 관리대상물질로 에틸벤젠, 크실렌, 스티렌이 검출되었고 고분자물질로는 Dodecanal ; n-Hexadecanoic acid ; Phenol, 2,4-bis (1,1-dimethylethyl)- 등이 검출되었다. PVA-natural에서는 관리대상물질로 아세트알데히드, 아세톤, 초산, 크로톤알데히드, 벤젠이 검출되었고 고분자물질로는 1,2,3-Propanetriol, 1-acetate 등이 검출되었다.

eCopper-natural에서는 관리대상물질로 아세트알데히드, 초산, 노말-부틸알콜, 메틸메타크릴레이트, 에탄올아민, 에틸 벤젠, 스티렌이 검출되었고 고분자물질로는 L-Lactide 등이 검출되었다. eAl-fill-natural에서도 아세톤, 노말-부틸

알코올, 메틸메타크릴레이트, 톨루엔, 메틸노말-부틸케톤, 에틸 벤젠이 검출되었고 고분자물질로는 L-Lactide 등이 검출되었다. 또, ePA-CF-natural에서는 노말-부틸알코올, 노말-발레알데히드, 에틸 벤젠, 톨루엔, 스티렌, 카프로락탐(중기), 부탄(이성체)가 검출되었고 Cyclopentanone ; 1-Iodo-2-methylundecane ; 2H-Pyran-2-one, tetrahydro- 등과 같은 고분자물질이 20여종 이상 검출되었다. eMarble-natural 에서는 아세트알데히드, 아세톤, 초산, 메틸 에틸 케톤, 테트라하이드로퓨란, 메틸노말-부틸케톤, 메틸노말-아밀케톤 등과 같은 관리대상 물질이 검출되었고 고분자물질로는 L-Lactide 등이 검출되었다(표 III-15). 그리고 eSteel-natural 에서는 고분자물질만 검출되었다.

2) 금속

3D 프린팅 소재중 금속에 대한 성분분석 결과, 금속이 포함된 것으로 판단되는 eCopper-natural, eAl-fill-natural, eSteel-natural 시료에서는 관리대상물질이 3종, 즉 구리, 알루미늄, 철 등 금속소재별 각각 1종씩 검출되었다(표 III-16).

덴마크의 환경부 자료에 따르면, 3D 프린팅 소재중 검출한계를 초과하는 양의 카드뮴 또는 수은을 함유한 시료는 없었으며, 납의 함량은 0.1~0.7 mg/kg 이었다. 몇몇 시료는 크롬 및 주석을 함유하고 있는데 이것은 각각 6가 크롬 및 유기 주석의 함량을 나타낼 수 있으므로 주의가 필요하다고 보고하였고 PLA_black 시료 중에는 크롬함량이 가장 높은 52 mg/kg 까지 검출되었다고 보고하였다(Denmark, 2017).

<표 III - 13> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(PLA)

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
1	PLA-blue	3	관리대상 물질	아크로레인 초산 노말부틸알콜 메틸메타크릴레이트 스티렌	107-02-8	0.20~2.80	0.1	0.3	Skin - - - 발암성2, 생식독성2, Skin
					64-19-7	0.20~0.30	10	15	
					71-36-3	0.69~1.34	20	-	
				80-62-6	0.28~1.13	50	100		
				100-42-5	0.77~1.00	20	40		
			고분자 물질	L-Lactide 2,3-Pentanedione Silane, trimethyl- Others(20여종)	4511-42-6	24.46~67.82	-	-	-
					600-14-6	6.46~11.66	-	-	
					128889-54-3	3.18~13.64	-	-	
				-	<30	-	-		
			관리대상 물질	아크로레인 초산 노말부틸알콜 메틸메타크릴레이트 톨루엔 스티렌	107-02-8	0.21~0.44	0.1	0.3	Skin - - - 생식독성2 발암성2, 생식독성2, Skin
					64-19-7	0.14~0.48	10	15	
					71-36-3	0.76~1.02	20	-	
				80-62-6	0.40~1.47	50	100		
				108-88-3	0.16	50	150		
				100-42-5	0.63~1.37	20	40		
2	PLA-white	3	고분자 물질	L-Lactide 2,3-Pentanedione Silane, trimethyl- 1,4-Dioxane-2,5-dione, 3,6-dimethyl- 2-Propenoic acid tricycl ester Others(20여종)	4511-42-6	65.86~67.27	-	-	-
					600-14-6	3.47~8.78	-	-	
					128889-54-3	3.43~4.53	-	-	
				4511-42-6	4.18~5.47	-	-		
				3076-04-08	4.73~5.64	-	-		
				-	<20	-	-		

<표 III-13> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(PLA)_계속

연 번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고	
							TWA	STEL		
3	PLA-red	3	관리대상 물질	아크로레인	107-02-8	0.15~1.81	0.1	0.3	Skin	
				초산	64-19-7	0.39~0.52	10	15		-
				노말부틸알콜	71-36-3	0.46~2.65	20	-		-
3	PLA-red	3	고분자 물질	메틸메타크릴레이트	80-62-6	0.26~3.25	50	100	생식독성2 발암성, 생식독성2, Skin	
				톨루엔	108-88-3	0.12~0.46	50	150		
				스티렌	100-42-5	1.03~1.43	20	40		
				L-Lactide	4511-42-6	60.83~66.31	-	-		
				2,3-Pentanedione	600-14-6	1.40~2.08	-	-		
4	PLA-black	3	관리대상 물질	Silane, trimethyl-	128889-54-3	3.19~3.45	-	-	-	
				1,4-Dioxane-2,5-dione, 3,6-dimethyl-	4511-42-6	3.46~3.51	-	-		
				2-Propenoic acid, triethyl ester	3076-04-08	9.42~11.82	-	-		
4	PLA-black	3	관리대상 물질	Others(20여종)	-	<20	-	-	Skin	
				아크로레인	107-02-8	0.23~2.41	0.1	0.3		
				초산	64-19-7	0.11~0.82	10	15		
4	PLA-black	3	고분자 물질	노말부틸알콜	71-36-3	0.20~1.40	20	-	발암성2, 생식독성2, Skin	
				메틸메타크릴레이트	80-62-6	1.53~3.50	50	100		
				스티렌	100-42-5	0.88~1.61	20	40		
				L-Lactide	4511-42-6	32.72~47.66	-	-		
				2,3-Pentanedione	600-14-6	17.04~20.90	-	-		
4	PLA-black	3	고분자 물질	Silane, trimethyl-	128889-54-3	4.24~4.87	-	-	-	
				Benzoic acid, 2-	3789-85-3	4.13~4.61	-	-		
				2-Propenoic acid, triethyl ester	3076-04-08	9.68~13.34	-	-		
4	PLA-black	3	고분자 물질	Others(20여종)	-	<30	-	-	-	

<표 III-13> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(PLA)_계속

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
5	PLA-green	3	고분자 물질	아크로레인 초산 노말부틸알콜 메틸메타크릴레이트 톨루엔 스티렌	107-02-8	0.25~1.09	0.1	0.3	Skin - - - 생식독성 발암성, 생식독성, Skin
					64-19-7	2.2	10	15	
					71-36-3	0.40~4.04	20	-	
					80-62-6	2.20~4.61	50	100	
					108-88-3	0.16~0.29	50	150	
					100-42-5	0.40~1.60	20	40	
					4511-42-6	27.79~46.1	-	-	
					600-14-6	3.0~25.21	-	-	
					128889-54-3	7.54~10.4	-	-	
					3789-85-3	2.3~8.69	-	-	
3076-04-08	7.17~8.3	-	-						
				Others(20여종)	-	<30	-	-	
6	CCU-purple	3	고분자 물질	Naphthalene, 1,2,3-trimethyl-4-propyl, ①- L-Lactide 1,1'-Biphenyl, 2,2',5,5'-tetramethyl- Others(5여종)	26137-53-1	63.76~74.10	-	-	-
					4511-42-6	10.79~31.39	-	-	
					3075-84-1	10.68	-	-	
					-	<10	-	-	

<표 III-13> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(PLA)_계속

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
7	CCU-red	3	고분자 물질	L-Lactide	4511-42-6	30.58~75.38	-	-	-
				Naphthalene, 1,2,3-trimethyl-4-propenyl-, (E)-	26137-53-1	11.66~34.42	-	-	
				2,3-Pentanedione	600-14-6	2.81~24.21	-	-	
				1,1'-Biphenyl, 2,2',5,5'-tetramethyl-Others(3여종)	3075-84-1	17.07	-	-	
8	eMarble-natural	3	관리대상 물질	아세트알데히드	75-07-0	5.86	50	150	발암성1B
				아세톤	67-64-1	0.18~0.37	500	750	-
				초산	64-19-7	4.29~6.66	10	15	-
				메틸 에틸 케톤	78-93-3	0.57	200	300	-
				테트라하이드로퓨란	109-99-9	0.08~0.29	50	100	발암성2, Skin
				메틸노말-부틸케톤	591-78-6	0.12, ~0.88	5	-	생식독성2, skin
				메틸노말-아밀케톤	110-43-0	0.27~0.50	50	-	-
				L-Lactide	4511-42-6	85.79~92.71	-	-	-
				Others(5여종)	-	<10	-	-	-

<표 III-14> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(ABS)

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
1	ABS-blue	3	관리대상 물질	아크로레인	107-02-8	0.04~0.23	0.1	0.3	Skin
				톨루엔	108-88-3	0.21~0.39	50	150	생식독성2
				에틸 벤젠	100-41-4	18.26~18.75	100	125	발암성2
				크실렌(모든 이성체)	108-38-3	2.02~5.69	100	150	-
				스티렌	100-42-5	57.17~59.08	20	40	발암성, 생식독성2, Skin
				페놀	108-95-2	0.66~1.15	5	-	생식세포 변이원성2, Skin
				Benzene, propyl-	103-65-1	3.12~3.21	-	-	-
				1,3,5-Cycloheptatriene	7557-11-01	3.05~3.09	-	-	-
				2,2,7,7-Tetramethyloctane	1071-31-4	2.70~2.96	-	-	-
				Others(10~20여종)	-	<10	-	-	-
2	ABS-red	3	관리대상 물질	아크로레인	107-02-8	0.05~0.19	0.1	0.3	Skin
				에틸 벤젠	100-41-4	28.30~28.56	100	125	발암성2
				크실렌(모든 이성체)	108-38-3	1.84~1.86	100	150	-
				스티렌	100-42-5	50.10~50.51	20	40	발암성, 생식독성2, Skin
				페놀	108-95-2	0.71~0.73	5	-	생식세포 변이원성2, Skin
				Benzene, propyl-	103-65-1	3.13~3.18	-	-	-
				1,3,5-Cycloheptatriene	7557-11-01	3.42~3.09	-	-	-
				2,2,7,7-Tetramethyloctane	1071-31-4	3.25~3.35	-	-	-
				Others(10~20여종)	-	<10	-	-	-

<표 III -14> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(ABS)_계속

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
5	ABS-black	3	관리대상 물질	아크로레인	107-02-8	0.34~3.57	0.1	0.3	Skin
				톨루엔	108-88-3	0.12~0.13	50	150	생식독성2
				에틸 벤젠	100-41-4	19.20~20.08	100	125	발암성2
				크실렌(모든 이성체)	108-38-3	0.89~0.94	100	150	-
				스티렌	100-42-5	55.30~57.98	20	40	발암성2, 생식독성2, Skin
				페놀	108-95-2	1.01~1.56	5	-	생식세포 변이원성2, Skin
				1,3,5-Cycloheptatriene, 7,7-dimethyl-	7557-11-01	4.08~4.27	-	-	-
				Benzene, propyl-	103-65-1	3.60~3.78	-	-	-
				2,2,7,7-Tetramethyloctane	1071-31-4	2.49~2.58	-	-	-
				Others(10~15여종)	-	<20	-	-	-

<표 III - 15> 3D 프린팅 소재별 소제별 성분분석 결과(기타)

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고			
							TWA	STEL				
1	PETG-black	3	관리대상 물질	에틸 벤젠	100-41-4	0.64~1.61	100	125	발암성2			
					108-38-3	18.60~19.24	100	150		-		
					100-42-5	2.49~10.41	20	40		발암성2, 생식독성2, Skin		
				고분자 물질	Dodecanal	112-54-9	30.56~32.98	-	-	-	-	-
					Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	96-76-4	14.45~15.39	-	-	-	-	-
					n-Hexadecanoic acid	1957-10-03	15.98~18.0	-	-	-	-	-
					Others(10여종)	-	<20	-	-	-	-	-
					아세트알데히드	75-07-0	0.10~65.36	50	150	발암성1B		
					아세톤	67-64-1	0.14~0.35	500	750	-		
					초산	64-19-7	14.23~66.08	10	15	-		
관리대상 물질	크로톤알데히드	4170-30-3	5.24~26.78	2	-	발암성2, 생식세포변이원성2, Skin						
	벤젠	71-43-2	0.28~0.69	0.5	2.5	발암성1A, 생식세포변이원성1B, Skin						
	1,2,3-Propanetriol, 1-acetate	106-61-6	2.08~23.80	-	-	-						
2	PVA-natural	3	고분자 물질	Silane, trimethyl-	128889-54-3	2.67~4.57	-	-	-			
				2-Dodecanone	6175-49-1	0.44~5.04	-	-	-			
				Others(20여종)	-	<20	-	-	-			

<표 III -15> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(기타)_계속

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
3	eCopper-natural 1	3	관리대상 물질	아세트알데히드	75-07-0	0.02~0.88	50	150	발암성1B
				초산	64-19-7	1.92~13.67	10	15	-
				노말-부틸알코올	71-36-3	0.86~1.66	20	-	-
3	eCopper-natural 3	3	관리대상 물질	메틸메타크릴레이트	80-62-6	0.39~0.47	50	100	-
				에틸올아민	141-43-5	0.14~0.19	3	6	-
				에틸 벤젠	100-41-4	0.27~0.37	100	125	발암성2
				스티렌	106-63-8	0.20~0.26	20	40	발암성2,생식독성2,skin
				L-Lactide	4511-42-6	70.27~80.20	-	-	-
				2,5-Furandione, 3-methyl-	616-02-4	4.60~5.39	-	-	-
4	eAl-fill-natural	3	관리대상 물질	Others(15여종)	-	<20	-	-	-
				아세톤	67-64-1	0.23~0.90	500	750	-
				노말-부틸알코올	71-36-3	22.34~30.11	20	-	-
				메틸메타크릴레이트	80-62-6	11.62~37.11	50	100	-
				톨루엔	108-88-3	0.18~0.51	50	150	생식독성2
				메틸노말-부틸케톤	591-78-6	0.72~0.99	5	-	생식독성2,skin
4	eAl-fill-natural	3	고분자 물질	에틸 벤젠	100-41-4	0.45~0.68	100	125	발암성2
				L-Lactide	4511-42-6	4.55~26.82	-	-	-
				1-Chloroundecane	2473-03-02	4.54~6.76	-	-	-
				Others(20여종)	-	<20	-	-	-

<표 III - 15> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(기타)_계속

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(ppm)		비고
							TWA	STEL	
5	ePA-CF-natural (Nylon)	3	관리대상 물질	노말-부틸알코올	71-36-3	0.65~1.73	20	-	-
				노말-말레알데히드	110-62-3	7.39~11.41	50	-	-
				에틸 벤젠	100-41-4	0.19~1.20	100	125	발암성2
				톨루엔	108-88-3	0.11	50	150	생식독성2
				스티렌	100-42-5	0.36~0.80	20	40	발암성2, 생식독성2, Skin
				카프로락탐(중기)	105-60-2	18.48~24.08	20	40	-
				부탄(이성체)	106-97-8	1.31	800	-	발암성 1A, 생식세포 변이원성 1B
				프로판	74-98-6	0.50~12.23	-	-	산소결핍
				Cyclopentanone	120-92-3	6.12~18.28	-	-	-
				2H-Pyran-2-one, tetrahydro-	542-28-9	6.41~13.26	-	-	-
6	ePC-natural	3	관리대상 물질	1-Iodo-2-methylundecane	73105-67-6	13.74~17.54	-	-	-
				Others(20여종)	-	<20	-	-	-
				아세톤	67-64-1	0.68~3.26	500	750	-
				페놀	108-95-2	5.36~9.98	5	-	생식세포 변이원성2, Skin
				3-Pentanone, 2,4-dimethyl-	565-80-0	40.40~41.80	-	-	-
				3-Penten-1-ol, 2,2,4-trimethyl-	5842-53-5	12.28~12.48	-	-	-
				1,3-Hexadiene, 2,5-dimethyl	29253-64-3	9.70~10.02	-	-	-
				Others(10여종)	-	<20	-	-	-

<표 III -16> 3D 프린팅 소재별 성분분석 결과(금속)

연번	소재명	시료수	규제대상	검출물질명	CAS No.	구성비(%)	노출기준(mg/m ³)		비고	
							TWA	STEL		
1	eCopper-natural	3	관리대상 물질	구리	7440-50-8	29.57	0.1	-	흡의 경우	
2	eAl-fill-natural	3	관리대상 물질	알루미늄	7429-90-5	23.7	5 mg/m ³	-	흡의 경우	
3	eSteel-natural	3	관리대상 물질	철	7439-89-6	0.51	1 mg/m ³	-	가용성	
				Dodecane	112-40-3	20.11 ~ 22.29	-	-	-	-
				Pentadecane Ala-Gly Others(25여종)	629-62-9 687-69-4 -	27.56 ~ 30.15 16.95 <30	- - -	- - -	- - -	-

5. 3D 프린팅 작업환경관리

1) 미국

지금 소개하는 지침은 미국 펜실베이니아주에서 실시하고 있는 3D 프린팅 안전 보건 가이드이다. 주정부에서는 3D 프린팅에 대한 개괄적인 소개만 하고 실행은 각 기관 및 사업장에서 실정에 맞게 운영하고 있다. 실행지침은 펜실베이니아주 피츠버그에 있는 카네기 멜런 대학교(Carnegie Mellon University)에서 수행하고 있는 지침을 소개한다.

3D 프린팅이란?

3-차원(3D) 프린팅은 구성이 다를 수 있는 재료 층을 연속적으로 쌓아서 삼차원 물체를 생성하는 기술이다. 초기에 가상 설계는 3D 모델링 소프트웨어가 있는 CAD (Computer-Aided Design) 및/또는 3D 스캐너/장치를 사용하여 작성 및 저장된다. 디자인 모델 (파일)이 생성되면 3D 프린터/프린팅 응용 프로그램은 결정적이고 신중한 층들을 쌓아 이미지를 인쇄하여 층별로 개체를 만든다. 이미지는 한 가지 유형의 재료로 단순하거나 다른 통합된 재료로 매우 복잡할 수 있다.

3D 스캐너는 "사물거리 측정기술(TOF)", "구조화된/변조된 빛" 및 체적 스캐닝과 같은 보다 일반적인 기술과 함께 여러 기술 중 하나를 적용한다.

3D 프린팅 응용

의료/보철, 바이오 프린팅, 항공 우주 및 항공기 산업, 식품 및 자동차와 같은 다양한 산업에서 사용하기 위해 3D 프린팅 응용 프로그램이 개발되고 있다.

3D 프린팅은 빠른 프로토타이핑 및 빠른 후속 제조가 필요한 모든 산업에서 유용할 수 있다. 개인용 3D 프린터는 이제 가정용 및 애호가들이 쉽게 사용할

수 있게 되었다.

3D 프린팅이 중요한 관심을 받는 이유는 무엇입니까?

3D 프린팅 기술은 학습기술, 시각예술, 재료과학, 생명과학 및 다양한 공학 분야와 같은 분야에서 학술 및 연구 응용 프로그램을 통해 적용될 수 있다. 최근 응용의 한 예는 생물/생명 과학 및 의학 분야에서 사용하기 위한 복합재료 개발과 관련이 있다.

3D 프린팅과 관련된 주요 위험 요소는 무엇입니까?

3D 프린팅과 관련된 위험은 적용된 프로세스 및 기술과 관련이 있다. 전기/충격, 전기 기계력, 용융 물질로 인한 화상, 자외선(UV)/레이저 빔과 관련된 위험과 초미세 및/또는 독성 연기, 흠 및 먼지 흡입과 관련된 건강 위험에 이르기까지 다양하다. 3D 프린터를 설치할 때는 각 유형 기술/응용 프로그램 및 설치된 특정 작업환경에 대해 다양한 위험을 고려해야 한다.

3D 공정 및 기술

다양한 기술과 공정은 3D 프린팅 객체로 층을 생성하는데 사용된다. 미국 시험재료학회(American Society for Testing and Materials, ASTM)위원회 F42는 "적층 Additive Manufacturing" (3D 프린팅을 설명하는 광범위한 용어)의 표준을 정의하기 위해 설립되었다. 위원회에서는 적층 제조공정을 다음과 같이 7 가지 범주로 분류하였다.

- 광중합 - 컨테이너 형 광중합 수지는 자외선 광원을 사용하여 경화된다. 특정 하위 범주에는 SLA (Stereolithography), CLIP (Continuous Interface Production), 필름 전송 영상 및 고체 바닥 경화가 포함된다.

- 재료 분사 - 재료 방울은 층별로 제외하고 작은 직경의 노즐 (잉크젯 프린팅과 유사)을 통해 적용되고 UV 광선에 의해 경화된다.
- 바인더 분사 - 분말 재료 및 액체 바인더 (접착제)가 "챔버 구축"에 적용된다. 남은 분말을 제거하고 재사용 할 수 있다.
- 재료 압출 - 가장 일반적으로 플라스틱 필라멘트 또는 금속 와이어를 가열된 노즐에 전달한다. 이 노즐은 컴퓨터 지원 제조 소프트웨어를 통해 다중 평면 방식으로 움직이면서 재료층을 증착한다. 필라멘트 재료는 종종 아크릴로 니트릴 부타디엔 스티렌 (ABS) 수지 또는 폴리 락트산 (PLA) 수지를 포함하지만, 다양한 다른 재료가 사용될 수 있다.
- 분말 베드 용해(Powder Bed Fusion) - 이 공정에서 가장 일반적으로 사용되는 기술은 고성능 레이저를 사용하여 소량의 플라스틱, 금속, 세라믹 또는 유리 분말을 용해하여 3 차원 형상을 형성하는 "선택적 레이저 소결"이다. 레이저는 대상물이 완성될 때까지 분말재료를 단면적으로 층별로 선택적으로 용해한다. 공정에서 손길이 닿지 않은 분말은 지지 구조로 사용된다.
- 시트 적층 - 시트 재료는 외력과 함께 묶인다. 금속 시트는 초음파 용접으로 용접된 다음, CNC (Computer Numerical Controlled) 장치를 통해 형상으로 밀링된다. 종이 시트는 접착제 층과 함께 사용할 수 있으며 정밀한 칼날로 절단할 수 있다.
- 직접 에너지 증착 - 첨단 금속 산업 및 빠른 제조 응용 분야에서 주로 사용된다. 전자빔 또는 플라즈마 아크 용접과 유사하게, 3D 프린팅 장치는 금속 분말 또는 와이어를 표면에 증착하고 이어서 단단한 물체를 형성하기

위해 에너지원 (전자빔, 레이저, 플라즈마 아크)에 의해 용융되는 노즐로 다축 로봇 팔에 부착된다.

<실행지침>

배경

적층 제조 기술인 3D 프린팅은 빠른 프로토타이핑 및 소규모 제조를 보다 쉽고 접근하기 쉽게 만들었다. 그러나 이 혁신적인 공정은 위험이 없는 것이 아니다. 일부 3D 프린팅 공정에서는 열가소성 물질을 가열하고 노즐을 통해 압출한 다음 표면에 증착하여 물체를 만든다. 공정의 부산물로서, 나노 입자 (1/10,000 mm 미만의 초미립자)가 방출된다. 저온 폴리 락트산 (PLA)을 공급재료로 사용하는 3D 프린터의 경우 분당 200억개의 입자가 방출될 수 있으며 고온의 아크릴로 니트릴 부타디엔 스티렌 (ABS) 공급재료는 2천억개의 입자가 방출될 수 있다.

나노 입자는 매우 작고 표면적이 넓으며 피부, 폐, 신경 및 뇌를 포함한 신체 시스템과 상호 작용할 수 있기 때문에 우려된다. 고농도의 나노 입자에 대한 노출은 전체 및 심호흡 사망률, 뇌졸중 및 천식 증상을 포함하여 건강에 악영향을 미친다. PLA 공급재료는 생체에 적합하도록 설계되었지만 ABS 공급재료의 열분해산물은 실험실 설치류에 독성 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대부분의 3D 프린터에는 배기장치 또는 여과시설이 없으므로 프린터 배치와 인쇄 재료 선택을 모두 신중하게 고려해야 한다.

나노 입자 안전에 대한 자세한 내용은 아래 사이트를 참조하세요 :

<http://www.cmu.edu/ehs/fact-sheets/nanoparticle-safety.pdf>

모델링 및 프린팅 소재

각 3D 프린터는 특정 유형의 소재를 사용하도록 설계되었다. 이러한 물질은 고유한 위험이 있으며 3D 프린팅 프로세스를 받거나 부주의하게 발화될 때 더

위험할 수 있다. 제품별 정보는 안전 데이터 시트를 참조하도록 하고 제조업체 웹 사이트 또는 CMU의 MSDS Online 서비스를 통해 안전보건 데이터 시트를 찾아보세요. <http://www.cmu.edu/ehs/msds/index.html>

열가소성 수지 및 광 중합체

열가소성 물질은 가연성이며 자극 및 피부 민감성을 유발할 수 있다. 일부는 소량의 독성 성분을 함유할 수 있다. 광 중합체는 인쇄공정 동안 UV 광선에 노출되어 경화된다. 이들은 종종 아크릴레이트와 같은 위험한 단량체를 포함한다. 또한 자외선은 방사선 노출위험으로 시력과 피부에 손상을 줄 수 있다.

보조 재료

3D 프린팅 공정은 종종 성형설계에서 빈 공간을 생성할 수 있도록 보조재료를 사용한다. 보조재료는 종종 열가소성 아크릴 중합체에 혼입되어 페닐 포스 페이트와 같은 유해화학물질을 함유하므로 사용 및 폐기 중에 위험하다.

금속 재료

반응성이 높고 가연성이 높은 분말 금속이 3D 프린팅된 금속 합금 공구 및 부품 제작에 사용된다. 티타늄 및 알루미늄과 같이 미세하게 분할된 금속 분말은 자연 발화하여 화재 (발화)를 일으킬 수 있다. 잠재적인 발화원을 제거하고 폭발 위험있는 근처에 분말 물질을 보관하지 말고 D급 금속 소화기가 필요하다. 제조업체의 지침을 명시적으로 준수하고 전기 장비 및 배선이 작업에 적합한지 확인한다. 이 공정은 매우 높은 열을 사용하여 사용자가 분말을 흡입할 뿐만 아니라 고열로 인해 상해를 입을 수 있다. 이 유형의 3D 프린터를 작동하려면 표준운전절차 (Standard Operating Procedures, SOP)가 필요하다. 공정 위험평가에 대해서는 EH&S(환경안전팀)에 문의한다.

생물학적 물질

3D 프린팅은 제조된 조직 생성을 위한 세포와 같은 생물학적 물질의 프린팅을 포함하도록 확장되었다. 에어로졸 노출로 인한 잠재적 오염과 적절한 공정 관리를 고려해야 한다. 위험평가에 대해서는 EH&S 생물안전(BioSafety)에 문의한다.

교육 요구사항(Training Requirements)

3D 프린팅에 사용되는 유해 화학물질을 사용하는 사람은 미국 OSHA가 요구하는 작업 환경에 따라 두 가지 안전보건교육 과정중 하나를 이수해야 한다. 즉 실험실내 작업환경이나 아니면 실험실 밖의 위험환경인지에 대해서 선택이 필요하다. 3D 프린터를 작동하기 전에 EH&S에 문의하여 올바른 교육을 받았는지 확인한다. 생체재료를 사용하는 경우 생물학적 안전 교육이 추가로 필요하다.

3D 프린터 설치 및 유지 보수

- 소비자급 3D 프린터
 - 제조업체의 지침에 따라 설치 및 유지 보수해야 한다.
- 산업용 3D 프린팅(인쇄) 시스템
 - 제조업체가 설치해야 한다.
 - 제조업체가 훈련한 전문가가 운영해야 한다.
 - 제조업체 또는 제조업체가 훈련한 직원으로부터 서비스를 받아야 한다.

3D 프린팅 과정에서의 일반 안전

- 항상 제조업체 지침을 따를 것
- 3D 인쇄 장비의 개조 또는 신규 사용을 고려할 때 EH&S에 잠재 위험평가를 요청할 것

- 일상적이지 않고 위험한 작업을 시작하기 전에 동료에게 알릴 것
- 호흡기 자극을 방지하기 위해 모델 및 보조재료가 사용되는 곳을 환기 시킬 것. 환기량은 최소 시간당 4회 이상 교체해야 하고 필요한 경우 시설관리 서비스부서에 컨설팅을 요청할 것
- 인쇄 작업이 시작되면 덮개를 열거나 인터록 장치를 해제하거나 무효화 하지 말것.
- 인터록 안전장치에 장애가 발생하면 프린터를 사용하지 말것
- 인쇄 후 프린터의 스테이지 영역(stage area)에 접근할 때는 불침투성 장갑과 방진 마스크 (P100)를 착용할 것
- 경화되지 않은 인쇄재료는 위험하므로 취급시 네오프렌 또는 니트릴 장갑을 착용할 것
- 재료가 튀면 보안경 또는 안전 고글을 착용할 것
- 인쇄 재료 카트리지가 누출되거나 쏟아질 경우, 모델 및 보조 재료 유출용 용제 흡수 패드를 사용할 것. 청소한 재료는 유해 폐기물로 처리할 것
- 음식과 음료가 저장, 준비 또는 소비되는 장소에서 모델 및 보조 재료를 멀리할 것

다른 3D 프린팅 위험

- 뜨거운 표면 : 프린트 헤드 블록 및 UV 램프
- 고전압 : UV 램프 커넥터, 전기 콘센트 안전 인증 및 접지선
- 자외선 : UV 램프. 램프를 똑바로 보지 말것. UV 스크린이 손상되지 않았는지 확인할 것
- 움직이는 부품 : 프린팅 어셈블리

2) 호주

본 지침은 호주 뉴잉글랜드대학교 (University of New England)에서 실시하고 있는 3D 프린터 구매 전 고려 사항 및 안전한 사용방법에 대해 소개한다.

<목적과 범위>

3D 프린팅 기술은 새로운 디자인, 재료 및 실습방법 등이 매주 시장에 출시되면서 빠른 속도로 발전하고 있다. 이 가이드 라인은 작업장에서 3D 프린터를 구매하기 전에 고려해야 할 몇 가지 안전보건문제를 간략하게 설명한 것이다.

선택할 수 있는 다양한 유형의 3D 프린팅 기술과 공급재료가 있으며, 각각 고유한 안전성에 영향을 미친다. 주요 예방대책으로는 적절한 개인보호장비의 사용과 3D 프린터가 적절한 장소에서 3D 프린터를 통해 자신과 주변에서 일하는 다른 사람에게 흡, 화학물질 및 소음 노출을 최소화하는 것이다.

3D 프린팅을 위한 일반적인 기술 중 일부는 다음과 같다.

- 스테레오 리소그래피 (Stereolithography, SLA)
- 융합 증착 모델링 (Fused deposition modelling, FDM)
- 선택적 레이저 소결 (Selective Laser Sintering, SLS)
- 선택적 레이저 용해 (Selective laser melting, SLM)
- 전자빔 용해 (Electronic Beam Melting, EBM)
- 적층체 제조 (Laminated object manufacturing, LOM)

3D 프린터는 안전기능이 거의 없는 저렴한 기본 품질의 애호가용 기기부터 인터록 및 흡 필터로 완전히 둘러싸인 고품질의 전문가용 기기까지 다양하다.

3D 프린팅 공정의 일부작업으로 인쇄된 지지 구조물을 제거하거나 3D 인쇄재료를 경화시키기 위한 화학 반응조와 고압 세척기를 포함할 수 있다.

3D 인쇄영역을 설정할 때 모든 사후처리 고려사항을 해결해야 한다. 여기에는

샌딩, 솔벤트를 사용하여 인쇄 및 페인팅을 부드럽게 하는 것이 포함될 수 있다.

<식별된 위험 및 관리>

초미세입자

특히 인기있는 FDM 프린터 기기에서 "공급재료"의 강렬한 가열은 초미세입자를 함유하는 흡을 생성한다. 일부 연구에 따르면 고농도로 이러한 입자에 장기간 노출되면 건강에 해로울 수 있으며 가열시 설정온도에 따라 다양한 브랜드의 공급재료는 생성된 흡의 양에 영향을 받을수 있다고 말하고 있다.

공급재료의 유형에 따라 가스의 화학성분이 결정된다. 사용하기 전에 제조업체 안내서를 읽고 공급재료의 물질안전보건자료(MSDS)를 참조하는 것이 좋다.

후처리 과정에서 3D 부품을 연마하여 표면을 매끄럽게 만든다. 사용된 3D 인쇄재료에 따라 입자가 위험할 수 있다. 사용자가 3D 프린터에서 생성된 연기 및 입자에 노출되거나 후처리 과정에서 노출되는 것을 제한하기 위해 다음과 같은 모든 합리적인 조치를 취해야 한다.

- a. 프린터는 통풍이 잘되는 실내에 설치해야 한다. 환기 요구사항은 프린터 수, 프린터 유형, 공급 재료 및 사용 빈도에 따라 고려해야 한다. 확실하지 않은 경우 시설관리부서나 환경안전팀에 문의한다.
- b. 보다 정교한 프린터에는 HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터가 내장되어있어 정기적으로 필터를 교체하기 위해 유지보수 프로그램이 필요하다.
- c. 장시간 작동할 3D 프린터는 별도의 실내 또는 적절한 환기장치가 있는 장소에 설치하여야 한다.
- d. 한 개의 실에 여러 대의 프린터를 설치하고 동시에 작동시키면 공간에서 발생하는 흡의 양이 증가하며, 이 경우 국소배기장치를 고려해야 한다.
- e. 사후처리 중에 샌딩하거나 솔벤트를 사용할때는 적절한 방진(방독)마스크를

착용해야 한다. 샌딩 및 용매에 대한 적절한 국소배기장치가 필요할 수도 있다.

열

일부 프린터는 공정에서 열을 사용한다 (예 : FDM 프린터). 최종 재료 또는 3D 프린팅 된 물체는 인쇄 중 또는 인쇄 직후 접촉하면 화상을 입을 수 있다.

3D 프린터로 인한 화재는 프린터를 수정하거나 유지 보수를 제대로 하지 못하거나 설계가 잘못되어 결함이 발생하지 않는 한 거의 발생하지 않는다. 프린터를 무인 상태로 실행하려면 열 분산을 고려해야 한다. 다음과 같은 관리가 필요하다.

- a. 표준작업 절차서(Standard Operating Procedure, SOP)를 개발해야 한다.
- b. 3D 프린터를 올바르게 사용하도록 최종 사용자를 교육하면 사고를 예방할 수 있다.
- c. 3D 프린터에는 사용자가 노즐이나 제품이 식을 때까지 제품에 닿지 않도록 하는 보호 시스템이 있어야 한다.
- d. 전문가가 아닌 경우 3D 프린터를 수리하지 않도록 한다.

함정과 영킹

3D 프린터에는 빠르게 움직이는 부품이 있을 수 있다. 프린터가 작동하는 동안 사용자가 밀폐된 영역에 접근하는 경우 가이드가 없으면 갇히거나 영킹 위험이 있다. 일부 애호가들의 프린터는 인쇄 플랫폼에서 부품을 들어 올리거나 움직이는 부품에 얽힐 문제가 있을 수 있으므로 사용 중 모니터링을 해야 한다. 다음과 같은 대책을 권고한다.

- a. 프린터의 움직이는 부품 주위에 적절한 밀폐 시스템이 있는지 확인한다.
- b. 프린터 사용시 표준작업절차서를 개발하고 최종 사용자가 프린터를 올바르게 사용하도록 교육한다.

- c. 예를 들어, 인쇄 도중 부품이 빌드 플랫폼에서 들어올려질 때와 같이 필요한 경우 개별 프린터에서 발생할 수 있는 문제와 인쇄 중지시기를 사용자에게 알린다.
- d. 모든 사용자가 개별 프린터에 필요한 감독기준을 알고 있어야 한다.

화학물질

일부 프린터는 3D 프린팅 중에 경화된 액체 공급재료를 사용한다. 3D 프린팅 공정의 일부는 또한 보조재료를 분리하거나 표본재료(model material)을 경화시키기 위해 사용되는 화학 반응조를 포함할 수 있다. 이들은 일반적으로 프린터와 별개이지만 여전히 전체 시스템의 일부이다. 다음과 같은 대책을 권고한다.

- a. 화학물질과 관련하여 물질안전보건자료 (Material Safety Data Sheet, MSDS)에서 언급한 적절한 장갑을 착용해야 한다.
- b. 모든 화학공정 중에는 보안경을 착용해야 한다.
- c. MSDS에서 언급한 적절한 개인보호구(Personal Protective Equipment, PPE)를 착용해야 한다.
- d. 모든 유출물질을 적절히 관리할 수 있는 규정이 있는지 확인한다.
- e. 모든 화학 폐기물은 적절히 폐기해야 한다.

전기사용

작업자가 프린터를 유지 보수하거나 수정하지 않으면 감전의 위험이 없다. 이러한 유지보수는 항상 자격이 있는 전문가가 수행해야 한다. 다음과 같은 대책이 필요하다.

- a. 프린터를 정기적으로 검사 및/또는 테스트하고 태그를 지정한다.
- b. 자격을 가진 전문가가 모든 유지 보수 또는 수정을 수행해야 한다.

전문성

일반적인 가정은 3D 프린터가 데스크탑 잉크젯 프린터와 유사하다는 것이다. 사용자에게 친숙해 지지만 안전한 운영 절차를 준수하려면 역량이 필수적이다. 의심스러운 경우 전문가에게 조언을 구한다. 다음과 같은 대책을 권고한다.

- a. 모든 사용자는 작동하기 전에 전문가로 부터 교육을 받아야 한다. 여기서 전문가란 판매회사의 기술 담당자 또는 이와 동등한 전문가를 말한다.
- b. 모든 사용자는 개별 프린터에서 발생할 수 있는 문제와 필요한 경우 인쇄를 중지할 때 (예 : 인쇄 중 빌드 플랫폼에서 들어올려지는 부품)에 대해 알고 있어야 한다.
- c. 모든 프린터에는 일정 수준의 감독이 필요하다. 모든 사용자가 개별 프린터에 필요한 감독기준을 알고 있어야 한다.
- d. 사용된 모든 공급재료에는 MSDS가 필요하다.
- e. 새로운 공정 또는 새로운 공급재료가 개발중인 경우, 자격을 갖춘 전문가가 평가하기 전에 이를 평가해야 한다.
- f. 전문가가 모든 유지 보수 또는 수정을 수행해야 한다.
- g. 이 프린터의 작동에 대해 상당한 지식과 기술을 보유한 대학교수 또는 자격을 가진 전문가에게 조언을 구한다.

구매

프린터가 목적에 맞는지 확인한다. 저렴한 프린터 기기는 안전 기능이 적고 인쇄 품질이 떨어질 수 있다. 고품질 프린터를 몇 대 구입하는 것이 수십 대의 저렴한 프린터를 구입하는 것보다 비용 효과적일 수 있다.

구매하기 전에 항상 관련 제조업체의 설명서를 참조하고 자격을 갖춘 숙련된 근로자(WHS 컨설턴트의 조언 포함)와 상담한다. 구매하기 전에 다음 단계를 준수해야 한다.

- a. 구매 승인 계획에서 유지 보수, 소모품, 설치, 위치, 환기 및 기술 지원 비용

- 을 고려할 때 플랜트 및 장비구매 전 점검표(WHS79)를 작성한다. 이러한 문제를 해결하는 데 소요되는 추가 비용과 시간은 장비의 수명에 중요하다.
- b. 3D 프린터에 대한 플랜트 및 장비 위험성 평가(WHS41)를 완료하여 사용과 관련된 위험을 적절히 제어해야 한다.

다음에는 대학내 또는 회사내에 귀하의 요구사항을 충족시킬 수 있는 기존 프린터가 있는지 확인한다. 이러한 경우 추가 3D 프린터를 구입하지 않아도 된다. 프로그램과 학교 간 액세스를 공유하면 프린터를 최대한 활용할 수 있다.

3) UL 표준

UL은 1894년 설립된 이래 120년 동안 세계 최고 수준의 안전 기술을 통해 안전 규격을 개발하고 관련 인증 서비스를 제공하는 안전 과학 전문기업이다.

이 규격은 제조업체가 3D 프린터를 포함하여 적층 제조와 관련된 장비에 대한 적절한 안전보건 표준 및 관련 규정을 식별하도록 지원하기 위한 가이드이다. 이 정보 문서에는 3D 프린터를 포함하여 적층 제조와 관련된 장비에 대한 적절한 안전 표준 및 규정을 식별하기 위한 지침이 포함되어 있다.

이 가이드의 활용은 상업용, 산업, 소비자, 식품 가공 및 의료 장비로의 사용을 포함하여 다양한 현재 용도에 대한 기존의 안전 표준과 적층 제조 기술 및 장비를 연결하는 것이다. 또한 3D 프린터 제조업체가 인식해야 할 규제 사항에 대한 교육과정으로 부터 시작된다.

3D 프린팅 (보다 광범위하게 적층 제조라고 함)은 특수장비를 사용하여 3차원 디지털 모델로부터 물리적 대상을 구축하는 프로세스이다. 일반적으로 폴리머 또는 기타 재료와 같은 소재의 연속적인 여러 얇은 층을 적층한다.

적층 제조 기술은 모델링(modeling), 원형(prototyping), 압형(tooling) 및 단기 생산 응용에 가장 일반적으로 사용된다. 이 유형의 장비는 일반적으로 통제된 환경에서 사용되며 장비 사용자에게는 일반적으로 생산 라인/제조 환경에서 장

비를 사용하는 방법이 설명되어 있다.

보다 최근에, 이 기술은 자작자, 애호가 및 댐장이들에 의해 일반적으로 사용되었다. 또한 일부 제조업체는 가정의 소비자와 학교의 다양한 연령대의 학생들이 사용할 장비를 도입하고 있다.

제조업체는 종종 제품이 전 세계에 판매되기 때문에 이러한 유형의 장비를 국제 표준에 따라 조사하도록 요청했다.

<범위>

이 규격에 대한 안내서는 3D 프린터를 포함한 다양한 적층 제조 응용 분야와 관련된 장비에 적용할 수 있는 기존 안전 표준의 사용에 대한 배경과 지침을 제공한다.

이 안내서는 새로운 요구 사항을 소개하지는 않지만 대부분의 경우 이러한 유형의 장비의 안전을 적절하게 다루어야 하는 적절한 기존 표준을 참조한다. 필요한 경우 적절한 보충 고려사항이 제공된다.

또한, 이 안내서에는 3D 프린터 제조업체가 알아야 할 규정 및 고려 사항과 3D 프린터가 다양한 설치 환경에서 사용되므로 중요한 설치 및 사용 고려 사항이 될 수 있으며 3D 프린터가 사용하는 관련 기술이 확장되어 있다.

이 가이드는 적층 제조 공정을 사용하여 생산될 수 있는 부품, 구성 요소 또는 최종 제품에 적용되는 표준에 대한 지침을 제공하지는 않는다.

<정의>

첨가제 제조

3D 모델 데이터에서 물체를 만들기 위해 소재 또는 재료를 결합하는 프로세스로, 감산 제조 방법론과 달리 일반적으로 층별로 적층한다.

3D 프린터

3D 프린팅을 위해 사용되는 기기

3D 프린팅

프린트 헤드, 노즐 또는 다른 프린터 기술을 사용한 재료의 증착을 통한 물체의 성형제조

<가이드 라인>

일반

적층 제조와 관련된 3D 프린터에 적용되는 표준 및 규정의 식별은 일반적으로 다음과 같은 여러 요인에 따라 달라진다.

- a) 가정, 사무실, 공장, 의료 시설, 빵집, 학교 등과 같은 의도된 운영 환경;
- b) 장비의 의도된 유형의 사용자/운영자, 예를 들어 일반인 (사용자 또는 운영자), 숙련된 사람 (서비스 인력) 또는 지시된 사람 (훈련이 제한된 사람);
- c) 장비에 필수적인 특정 기술 및 에너지원, 예를 들어 레이저, 저항 가열, UV 등;
- d) 인쇄에 포함된 특정 원료 및 사용 중 이러한 물질의 사용과 관련되거나 물질 폐기물, 먼지 등의 부산물 생산으로 인해 발생할 수 있는 관련 위험;
- e) 특정 응용분야에 대한 특정 요구사항 및/또는 표준을 지정하는 지역 또는 지역 규제 요구 사항

표준

표준 선택

일반적으로 유사한 운영 환경에서 사용되는 유사한 유형의 장비를 포괄하는 기존 표준이 적층 제조와 관련된 장비에 사용될 수 있다. 이러한 표준은 적층 제조와 관련된 기술의 적용이 비교적 새로운 것이기는 하지만 장비에 사용되는 기본 하드웨어 및 기술이 기존 장비 표준에서 다루는 다른 형태의 하드웨어 및 기술과 유사하기 때문에 적합한 것으로 간주된다.

일반적으로 식별된 표준에는 다음과 관련된 요구사항이 포함된다.

- a. 부상 또는 화재가 발생할 수 있는 에너지원의 식별 및 분류 (예 : 위험 전압);
- b. 필요한 안전장치 사양 (예 : 단열재 및 인클로저);
- c. 그러한 필수 안전조치의 준수 여부 결정 (예 : 규정 간격 요구 사항 또는 성능 테스트를 통한 수락) 과
- d. 구성 요소, 표시 및 지침, 관련 고려 사항과 같은 해당 장비에 적합한 기타 일반적인 측면

기계류 안전에 대한 제조업체의 전체 비즈니스 위험 관리에 고려해야하는 방법에 대해서는 유럽 연합(EU)의 기계류 지침과 관련된 정보를 참조한다.

구체적으로 다루지 않은 구성

장비가 선택된 표준에 의해 구체적으로 다루지 않은 기술, 재료 또는 구성 방법을 포함하는 경우, 장비는 적용 가능한 표준과 위험기반 안전공학 원칙에 의해 일반적으로 제공되는 것 이상의 보호 장치를 제공해야 한다.

국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)는 IEC 62368-1에서 정보통신기기에 대한 위험기반 원칙을 포함하는 표준으로 다른 표준에서 구체적으로 다루지 않은 구조에 대한 적절한 참조 문서로 사용될 수 있을 것이다. 표준의 원리에 대한 개요와 위험기반 안전공학에 대한 소개는 표준의 조항들을 참조한다.

규정

일반적으로 적층 제조와 관련된 장비에 영향을 미치는 규정은 설치 환경 (예 : 작업장 또는 학교), 사용, 취급 및 저장되는 원료 (분말 금속 등) 및 제조 공정과 관련이 있을 수 있는 먼지와 같은 기타 부산물과 같은 것들에 따라 달라진다. 관련된 특정 장비 및 기술에 따라 다른 고려사항도 유효할 수 있다.

학교에서 사용하기 위한 3D 프린터의 잠재적 규정에 대한 설명은 “학교 어린이들이 사용하기 위한 3D 프린터” 내용을 참조한다.

다음에 3D 프린터에 적용가능한 표준 및 규정을 식별하는 데 도움이 되는 질문을 열거하였다.

1. 제조업체는 3D 프린터를 어디 설치 및/또는 어떤 운영환경에서 사용하려고 합니까?
 - a. 상업 (예 : 사무실 또는 비즈니스)?
 - b. 산업 / 공장?
 - c. 집?
 - d. 빵집?
 - e. 의료 시설?
 - f. 학교 (예 : 초등학교, 중학교, 중학교 또는 고등학교)?
 - g. 위험한 장소 (예 : 가연성 가스의 존재 또는 근처)?
 - h. 어떤 다른 곳?
2. 3D 프린터와의 인터페이스는 누구입니까?
 - a. 평범한 사람 (사용자)?
 - b. 교육받은 사람 (일반적인 훈련을 받은 사람)?
 - c. 숙련된 사람 (서비스 직원)?
 - d. 의도되거나 배제된 연령그룹을 포함한 어린이 (학생)?
3. 제조업체는 특정 국가 또는 국가들을 포괄하는 제품 표준을 원합니까, 아니면 3D 프린터가 여러 국가/ 지역에서 승인을 받아야 하는 글로벌 제품입니까?
4. 참조 또는 해석으로 3D 프린터를 명시적으로 다루는 현지 또는 지역 규정이 있습니까?

5. 소매점을 포함하여 3D 프린터를 구매하는 제조업체의 고객이 판매 조건으로 충족해야하는 최소 요구사항, 표준 및/또는 규정을 지정합니까?
6. 3D 프린터에는 주로 접근 가능한 기계식 (이동 부품) 또는 열 에너지원 (뜨거운 표면)이 주요 잠재적 위험요소 (작업자 보호 수단으로 제공된 인클로저 또는 가드가 있는 다른 전체 또는 부분적으로 밀폐된 장치와 비교) 인 장비와 같이 주로 기계로 간주될 수 있는 기능이 있습니까?
7. 3D 프린터는 먼지 또는 기타 공기중 배출물 등의 프린터 부산물로 인해 설치 또는 작업장 규정이 점점 더 중요하게 고려될 수 있는 어떤 특성 (예 : 높은 가연성 또는 분말 형태)을 가질 수 있는 모든 원료를 사용합니까?

<학교 어린이들이 사용하기 위한 3D 프린터>

일반적으로 어린이가 주로 사용하는 제품은 성인이 사용하는 제품보다 더 엄격한 규제를 받는다.

예를 들어, 미국에서 아동용 제품에는 “아동용 제품 안전규칙”이라고 하는 일련의 연방 안전규칙이 적용된다. 미국 법률은 “어린이 제품”을 12세 이하의 사람들을 위해 주로 설계 또는 의도된 소비자 제품으로 정의한다.

따라서, 12세 이상의 사람들이 사용하도록 설계된 3D 프린터의 경우 미국 연방 규정은 일반적으로 성인보다 더 제한적이지 않다. 학교에서 사용하기 위한 대부분의 3D 프린터는 성인의 감독하에 12세 이상의 어린이가 사용할 수 있을 것으로 예상되지만, 교실 환경에서 3D 프린터가 널리 보급됨에 따라 이러한 기대치는 더 변경될 수 있다.

그러나 제조업체가 12세 이하 어린이의 기계 사용을 목표로 하는 경우 추가적인 규제 고려사항이 있다. 미국 연방규정 코드의 일부는 주로 Title 16, II 장, Subchapter C, Part 1505, 전기 완구 또는 어린이가 사용하도록 의도된 기타

전기 구동 아크 요건에 적용할 수 있다.

이러한 적용을 위해 소비자 제품 안전위원회 (The United States Consumer Product Safety Commission, CPSC)는 어떤 유형의 제품이 '어린이 제품'으로 간주되고 어떤 유형이 아닌지에 대한 지침을 제공하고 있다. 3D 프린터는 현재 어떤 지침 정보에도 구체적으로 언급되어 있지 않지만 주로 12세 이하의 어린이를 대상으로 하는 과학 키트 및 관련 제품에 대한 지침이 있다. 이 지침은 참조 목적으로 여기에 논술하였다.

12세 이하의 어린이를 대상으로 설계된 과학키트 또는 기타 "키트"는 어떻습니까? "어린이 제품"으로 간주됩니까?

- (a) 제조업체가 의도한 용도,
- (b) 포장, 광고 및 일반 마케팅,
- (c) 소비자가 제품을 12세 이상의 어린이 제품으로 일반적으로 인정하는지 또는 더 젊은
- (d) CPSC 연령 결정 지침

"키트"가 12 세 이하의 어린이를 위해 설계되고 주로 고안된 것으로 결정되면, 키트에 포함된 모든 요소는 "어린이 제품"으로 간주되며 표준을 준수해야 한다. 예를 들어, "자석 키트"에 포함된 종이 클립, 보통 일반적인 용도 품목은 키트의 일부인 어린이 제품으로 간주된다. 제조업체가 어린이용이 아닌 구성 부품 또는 재료를 사용하고 해당 부품 또는 재료를 어린이 제품의 구성 요소로 용도 변경하는 경우 해당 제조업체는 어린이 제품 안전 표준을 준수해야 할 책임이 있다.

유럽의 경우 어린이용으로 제작된 일부 제품에는 장난감 안전에 관한 지침 2009/48/EC (Toy Directive)가 적용되지만 학교용 3D 프린터는 현재 지침의 어느 부분에도 언급되어 있지 않다(표 III-17).

<표 III-17> 각 국가 및 기관의 어린이 제품 관련 표준 규격

규격	IEC 표준	IEC TC	EU 지침	UL 표준	의견
Commercial	IEC 60950-1, Safety of ITE IEC 62368-1, Safety of AV & ICT Equipment	IEC TC108	Low Voltage (LV), 2009/95/EC, 2014/35/EU Electromagnetic Compatibility (EMC), 2004/108/EC, 2014/30/EU Restriction of the use of certain hazardous substances (RoHS), 2011/65/EU	UL 60950-1, Safety of ITE UL 62368-1, Safety of AV & ICT Equipment	For US only applications, there may be other options available, such as UL 775, Graphic Arts Equipment For US only applications, see US OSHA Occupational Safety and Health Standards, 29 CFR 1910
manufacturing / factory floor	ISO 12100, Safety of Machinery IEC 60204-1, Safety of Machinery	ISO TC199 IEC TC44	Machinery (MD), 2006/42/EC Electromagnetic Compatibility (EMC), 2004/108/EC, 2014/30/EU	UL Su 2011, Factory Automation Equipment	For US only applications, there may be other options available, such as UL 775, Graphic Arts Equipment
Food Preparation - Household	IEC 60335-2-14, Safety of Commercial Electric Kitchen Machines	IEC TC61	Low Voltage (LV), 2009/95/EC, 2014/35/EU Electromagnetic Compatibility (EMC), 2004/108/EC, 2014/30/EU	UL 982, Motor-Operate d Household Food Preparing Machines	Example: 3D Food Printers for household use
Food Preparation - Commercial	IEC 60335-2-64, Kitchen Machines IEC 60335-2-75, Safety of Commercial Dispensing Appliances and Vending Machines	IEC TC61	Low Voltage (LV), 2009/95/EC, 2014/35/EU Machinery (MD), 2006/42/EC Electromagnetic Compatibility (EMC), 2004/108/EC, 2014/30/EU	UL 763, Motor-Operate d Commercial Food Preparing Machines	Example: 3D Food Printers used in bakeries and other facilities associated with the food industry
Medical	IEC 60601 -1, Medical Electrical Equipment	IEC TC62	Medical Devices (MDD), 93/42 EEC; Electromagnetic Compatibility (EMC), 2004/108/EC, 2014/30/EU	ANSI/AAMI 60601-1, Medical Electrical Equipment	

* EU 기계류 지침 (2006 / 42 / EC)에 대한 정보는 부록 C를 참조

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 3D 프린팅 소재중 PLA 소재의 경우, 총 8개 시료중 고분자물질만 검출된 2개 시료를 제외한 6개 시료에서 관리대상물질은 5~7종, 고분자물질은 20~25종이 검출되었다. ABS 소재의 경우에는 5개 시료 전부에서 관리대상물질은 5~6종, 고분자물질은 15~23종이 검출되었다. 기타 소재에서는 관리대상물질로 2~8종, 고분자물질로는 15~30종이 검출되었다. 그리고 금속 소재의 경우에는 관리대상물질인 구리, 철, 알루미늄 등 3종이 검출되었다.

22개의 3D 프린팅 소재에 대해 GC-TOFMS에 의해 휘발성 유기화합물의 함량에 대해 분석하였다. 이중 어린이용 색상 안료로 사용되는 Pioly-Pig-yellow 및 Pioly-Pig-red 시료는 3D 프린팅 소재라 볼수 없어 평가에서 제외하였다.

소재중 PLA 베이스의 CCU-purple, CCU-red 시료와 금속성분이 들어간 것으로 판단되는 eSteel-natural 시료를 제외한 모든 시료에서 많은 다른 휘발성물질이 검출되었다. 오히려 eSteel-natural 시료의 경우 PLA 베이스임에도 불구하고 PLA의 주성분인 “L-Lactide”의 함유량이 2% 수준인 것이 의외이었다. 금속소재중 eCopper-natural 및 eAl-fill-natural 시료에서도 PLA를 기본 베이스로 한 것이어서 휘발성 유기화합물이 검출되었다. 특히 PLA 및 ABS 시료에서 많은 휘발성 유기화합물이 검출되었다. ABS 시료의 경우, 특히 스티렌, 에틸벤젠 및 크실렌 등 알려진 가능한 물질에 대한 분석이 수행되었다. ABS 시료에서 스티렌이 검출되었지만 PAH 또는 프탈레이트는 검출되지 않았다. 분석된 3D 프린팅 소재에서 PAH는 감지되지 않았다.

선행 연구자료를 고찰해 보면, 연구자마다 다양한 현장 및 조건에서 측정 및 실험을 통하여 유해물질과 방출량을 제시하고 있는데, 가스상 물질로는 포름알데히드 등 19종, 입자상물질은 초미세먼지 등 2종, 중금속은 크롬 등 5종이 검출되는 것으로 보고하고 있다.

연구대상 일부 소재에서 발암성 및 생식독성 등을 나타내는 물질이 검출되었는데 선행연구에서 발표된 사례와 일치하는 경우도 많았고 전혀 새로운 물질이 검출된 경우도 있었다.

일반적으로 선행연구에서 가장 빈번하게 나타나는 금속은 구리와 아연이다. 5개 시료중 3개 시료에서 0.2~110 mg/kg의 함량으로 구리가 검출되었고, 아연은 24개 시료중 22개에서 0.6~25 mg/kg의 함량으로 검출되었다. 구리 함량이 가장 높은 것은 청색으로 된 3개의 3D 프린팅 소재에서 나타났으며, 여기서 함량은 연한 파란색 3D 프린팅 소재에서 가장 낮은 함량으로 15~110 mg/kg이었다. 그렇지만, 검출된 금속과 소재의 색 사이에 명확한 경향은 없었다(Denmark EPA, 2017; Samantha Hall et al., 2019). 본 연구에서는 구리시료(eCopper-natural)에서 구리가 29.6%의 함량으로 구리가 검출되었고, 철시료(eSteel-natural)에서 철이 23.7%의 함량으로 검출되었으며 알루미늄시료(eAl-fill-natural)에서는 알루미늄 0.51%의 함량으로 검출되었다. 금속소재는 순수 물질이라기 보다는 PLA 소재가 혼합된 형태이었다.

공기 중의 초미세입자(나노 입자)의 수 농도에 대한 허용 가능한 노출수준을 정하는 것은 불가능했다. 대략 4시간 동안 평균 130,500 #/cm³ 및 최대 3.4 x 10⁶ #/cm³의 단기간 최고농도가 3D 프린팅 중 추정 노출수준이 건강과 관련하여 어떤 영향을 주는지 여부를 평가할 수는 없었다(Aika Davis, 2016; Samantha Hall et al., 2019). 나노 입자에 대한 질량기반 노출의 경우, 4시간 동안 허용 가능한 노출수준은 최고 15 µg/m³으로 추정되며, 평균 7.1 µg/m³으로 평가된다.

따라서, 평균 노출로 인해 걱정할 필요가 없었다. 그러나, 단기간 최대 142 µg/m³의 누적 노출에 실질적으로 건강에 영향을 미칠수 있으므로 이러한 높은 수준에서의 노출은 피해야 한다.

본 연구의 제한점은 첫째, 3D 프린팅 작업온도 조건은 대체적으로 180~200℃에서 이루어지며, 소재에 따라서는 200℃ 이상에서도 사용하기도 한다. 이번 연구의 유기화합물의 성분 분석은 Headspace를 사용하였고, 인큐베이터의 최대온

도 설정은 200℃ 이었고, 인큐베이터내에서 전량이 휘발되지 않았기 때문에 검출된 물질에 대한 구성비로만 나타났다. 그러나 금속의 경우는 필라멘트를 산으로 전량 회화시킬 수 있어서 성분비로 나타낼 수 있었다.

둘째, 3D 프린팅 소재는 지속적으로 개발되고 항상 새로운 유형의 재료가 판매되므로 이 연구보고서의 성분 및 함량 평가는 여기에 조사된 3D 프린팅 소재와 사용 가능한 시료로 제한한다. 또한, 다소 제한된 양의 자료와 가장 많은 양으로 방출되는 물질의 독성학적 스크리닝을 기반으로 한 자료들을 참고하였다. 3D 프린팅 영역이 지속적으로 발전함에 따라 이 평가는 예비적인 것으로 간주되어야 할 것이다.

보다 정확한 평가를 위해서는 개별 3D 프린터와 개별 3D 프린팅 소재의 방출 및 작업자 노출에 관한 보다 체계적인 지식과 실제적인 현장평가가 중요하다.

본 연구 및 선행연구를 통해 FDM방식의 3D 프린팅과 관련하여, 휘발성 유기화합물 성분뿐만 아니라 중금속 성분과 미세입자 (직경 100 nm 미만의 입자인 초미세입자 포함)의 방출이 발생하는 것으로 나타났다.

선행연구자료는 FDM 3D 프린터의 유형이 입자 방출의 크기에 영향을 줄 수 있음을 나타냈다. 또한, ABS 소재를 사용한 프린팅은 특히 초미세입자의 방출과 관련하여 PLA 소재를 사용한 프린팅보다 더 큰 입자 방출을 초래한다고 보고하고 있다. 문헌에 따르면, 특히 프린팅 과정에 인접하여 초미세입자 수의 실질적인 증가된 수준을 보이는 것으로 평가되었다. 그러나, 건강에 미칠 수 있는 영향을 명확히 하는 자료는 없었다.

락티드, 스티렌 및 카프로락탐은 중합체에서 각각의 단량체이다. 그리고 본연구의 일부 PLA소재에서 노말부틸알콜, 메틸 메타크릴레이트가 소량 검출되었다. 벤젠은 PVA-natural 시료에서 극히 낮은 수준으로 검출되었지만 실제 공기중 노출량이 얼마나 유의할지는 알수 없기 때문에 추가적인 연구가 필요하다.

3D 프린팅에서 방출되는 유해물질에 대한 노출 수준을 추정하고 이러한 물질

의 위험과 선량-효과 관계를 고려할 때, 물질의 호흡기 및 눈 자극 특성은 방출의 가장 중요한 영향으로 간주된다. 분석 및 평가에 기초하여 PLA, ABS 및 나일론 필라멘트로 3D 프린팅을 할 때 프린팅 공정에서 휘발성 유기물질 및 입자의 방출로 인한 호흡기 및 눈 자극으로 인한 위험이 있을 수 있다고 결론 지을 수 있다. 특히 불충분한 환기 또는 공기교환이 좋지 않은 작은 방에서 장시간 프린팅 작업하는 경우에 이와같은 위험이 나타날 수 있다. ABS 수지 등으로 프린팅하는 동안 스티렌 등이 방출될 때 위험이 가장 크다고 할 수 있다. PLA 및 ABS 수지로 인쇄할 때 에틸벤젠 방출은 호흡기 및 눈 자극의 위험을 증가시킬 수 있다. 비록 2018년 연구에서 작업장에서의 개인 노출농도는 낮은 수준이지만 3D 프린팅 소재시료의 성분분석 결과에서 다양한 종류의 발암성 및 생식독성 등을 가진 물질들이 검출되고 일반적으로 사용되는 3D 프린터는 상방이 개방형이 많으므로 사전주의원칙을 적용하여 노출을 관리할 필요가 있다.

일반적으로 유해물질 또는 유해인자에 대한 관리방안으로는 공학적 대책으로 대체(substitution), 격리(isolation), 환기(ventilation) 등이 있고 행정적 대책으로 보호구 착용, 교육 등이 있으며, 3D 프린팅 작업도 동일한 작업환경 관리방안을 적용할 수 있을 것이다.

먼저, 3D 프린팅시 유해물질이 적게 배출되는 것을 사용하는 것이다. 현재 상태에서는 PLA 수지가 유해물질 배출이 적은 것으로 보고되고 있다. 하지만 현재 상태에서 3D 프린팅이 지속적으로 사용이 증가한다면, 연구개발을 통하여 유해물질을 적게 배출시키는 수지로 대체할 필요가 있다. 격리는 유해물질 발생원과 작업자간 격리를 통해 노출을 최소한으로 줄이는 방법으로 밀폐, 차폐벽, 별도장소 보관 등의 예로 들 수 있다. 다음은 환기로 국소환기와 전체환기가 있으며 유해물질 발생원에 국소배기장치를 설치하여 발생하는 유해가스, 증기 및 미세먼지를 공학적으로 작업장 밖으로 내보내는 방법이 있다. 현재로서는 이 방법이 가장 현실적이고 적절한 대책이라 할 수 있다. 행정적 대책으로는 노출

가능한 화학물질의 유해성에 대한 교육, 작업방법 교육, 개인보호구 착용 및 유지관리에 대한 내용 등이 있다. 기타 정리정돈을 통한 쾌적한 작업장 운영, 휴식시간 조정 및 작업전환 등이 있다.

또한, 3D 프린팅 소재를 제조하거나 유통시키는 업체는 보다 정확한 MSDS 정보를 제공하고 사업주는 취급 화학물질에 대한 정확하고 신뢰성있는 MSDS를 확보하여 사용하는 노동자에게 안전보건 정보를 제공하고 그에 대한 교육을 실시함으로써 취급 화학물질로 인한 직업병, 화재 또는 폭발 등의 각종 사고 및 재해로부터 노동자들을 보호하여야 할 것이다.

V. 참고문헌

고용노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준. 고용노동부고시 제2016-41호, 2016.

아이알에스글로벌(IRS Global). 신산업혁명을 주도할 3D프린팅(프린터, 소재) 관련 비즈니스 전모, 2016.

이용, 함완식, 이민지 et al. 2018 3D프린팅 산업 실태조사. 정보통신산업진흥원, 2019.

Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymers (ABS): Pyrolysis and Combustion Products and their Toxicity - A Review of the Literature, Rutkowski and Levin, Fire and Materials, 1986

Afshar-Mohajer, N., Wu, C., Ladun, T., Rajon, D.A., Huang, Y. Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. Building and Environment, 93, 293-301, 2015.

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

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

Aleksandr B. Stefaniak, Ryan F. LeBouf, Jinghai Yi, et al. Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition

modeling 3-dimensional Printer. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2017, VOL. 14, NO. 7, 540-550

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold limit values (TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices (BEIs). ACGIH, Cincinnati (OH); 2019.

ASTM F2792 - 12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies

Azimi, P., Zhao, D., Pouzet, C., Crain, N.E., Stephens, B. Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. Environmental Science & Technology, 50, 1260-1268, 2016.

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

Carnegie-Mellon University 3D Printing Safety. 2019. Available from : <http://www.cmu.edu/ehs>

Deng, Y., Cao, S., Chen, A., Guo, Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. Building and Environment, 104, 311-319, 2016.

Denmark, Environmental Protection Agency. Risk assessment of 3D printers and 3D printed products. Ministry of Environment and Food of Denmark,

2017.

Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments, Azimi et. al., ES&T, 2016

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

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

IEC 60204-1, Safety of Machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements

IEC 60335-2-64, Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-64: Particular requirements for commercial electric kitchen machines

IEC 60335-2-14, Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-14: Particular requirements for kitchen machines

IEC 60335-2-75, Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-75: Particular requirements for commercial dispensing appliances and vending machines

IEC 60601-1, Medical Electrical Equipment - Part 1: General requirements for basic safety and essential performance

IEC 60950-1, Information Technology Equipment - Safety - Part 1: General requirements

IEC 62368-1, Audio/video and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements

ISO 12100, Safety of Machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction

ISO/CD 17296-1, Additive manufacturing -- General principles -- Part 1: Terminology

Jilcha, K., Kitaw, D. Industrial occupational safety and health innovation for sustainable development. *Engineering Science and Technology*, 20, 372-380, 2017

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

Kim, Y., Yoon, C., Ham, S., Park, J., Kim, S., Kwon, O., Tsai, P. Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation. *Environmental Science & Technology*, 12044 - 12053, 2015.

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

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 Afshar-Mohajer, Chang-Yu Wu, Thomas Ladun, et al. Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *Building and Environment* 2015, 93, 293-301
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). NIOSH manual of analytical methods 4th Edition2. NIOSH, 2003. Available from : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/default.html>
- Ohhun Kwon, Chungsik Yoon, Seunghon Ham, et al. Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D Printing. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 10357-10368
- OSHA Regional News Release, USDOL Region 1 - 3D Printing Firm Cited, May 20, 2014
- Oskui, S.M, Diamante, G., Liao, C., Shi, W., Gan, J., Schlenk, D., Grover, W.H. Assessing and reducing the toxicity of 3D-printed parts. *Environmental Science & Technology Letter*, 3, 1-6, 2016.
- 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, *Environmental Science and Technology*, 2016, 50, 1260-1268
- Parham Azimi, Torkan Fazli, Brent Stephens. Prediction Concentrations of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds Resulting from Desktop 3D Printer Operation and the Impact of Potential Control

- Strategies. *Journal of Industrial Ecology* 2017, VOL 21, NO. S1
- 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, *Environmental Science and Technology*, 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
- 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
- Samuel Hartikainen, Markus Johansson, Marko Hyttinen, et al. VOC and particle emissions from home and hobby 3D printers. *Indoor air conference* 2016
- Short, D.B., Badger, SP., Artieri, B. Environmental, health, and safety issues in rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 21, 105 - 110, 2015.
- 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
- Steinle, P. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13, 121-132, 2016.

Stephens, B., Azimi, P., Orch, Z.E., Ramos, T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment*, 79, 334-339, 2013.

Ultrafine particles emitted by commercial desktop 3D printers. European Commission, Science for Environment Policy, Thematic Issue 48, February 2015. Available from : http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/commercial_desktop_3D_printers_emit_ultra_fine_particles_48si9_en.pdf

Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. Stephens et al., *Atmospheric Environment*, 79 (2013) 334-339.

Unwin J, Coldwell MR, Keen C, McAlinden JJ.. Airborne emissions of carcinogens and respiratory sensitizers during thermal processing of plastics. *Ann. Occup. Hyg.*, 2013, Vol. 57, No. 3, pp. 399-406

US Consumer Products Safety Commission. Children's Products. 2017. Available from : <http://www.cpsc.gov/Business-Manufacturing/Business-Education/childrens-products/FAQs-Childrens-Products/>.

Verne L. Rhodes. George Kriek , Nelson Lazear , Jean Kasakevich , MarieMartinko , R.P. Heggs , M.W. Holdren , A.S. Wisbith , G.W. Keigley , J.D.Williams , J.C. Chuang & J.R. Satola. Development of Emission Factors for Polycarbonate Processing. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2011. 52:781-788

Wang, S., Wan, J., Zhang, C. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1-10, 2016.

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

Yi, J., LeBouf, R.F., Duling, M.G., Nurkiewicz, T., Chen, B.T., Schwegler-Berry, D., Abbas Virji, M.A., Stefaniak, A.B. Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 79, 453 - 465, 2016.

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

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

Zhou, Y., Kong, X., Chen, A., Cao, S. Investigation of ultrafine particle emissions of desktop 3D printers in the clean room. *Procedia Engineering*, 121, 506-512, 2015.

Abstract

Title

Study on the types of materials and the characteristics of hazardous agents used in 3D printers

Objectives

Materials of 3D printer are various plastics such as PLA, ABS and metals, powder, paper, wood, etc. In the 2018 study, an on-site exposure assessment were conducted for 3D printing works, but the MSDS was not provided and the composition of the materials could not be known. Also, it is rare to study the various ingredients such as these systematically in Korea.

Purchase 3D printing materials that are widely used in the market, and find out the types of harmful substances that can be exposed through the component analysis of the materials. By investigating the status of 3D printing-related companies to identify the exposure scale and suggesting the necessity of exposure management, we want to contribute to the health protection of 3D printing-handled workers.

Methods

- To identify the status of 3D printing related companies, we used domestic 3D printer-related reports and survey data.
 - Based on Korean Standard Industry Classification

※ Classification: 29222 Digital Lamination Machine Manufacturing

○ A meeting was held with the 3D Printing Research Association to investigate the material market.

- Demand survey shows that Chinese (web: eSUN) accounted for 70 ~ 80%. Materials purchase were 22 kinds in 3 types.

○ In order to understand the market size of domestic and foreign 3D printing, 3D printing technology industry status and materials were surveyed. We searched sites such as 'Pubmed, Google Scholar' to identify the possible exposure factors for 3D printing.

※ Keywords: 3D printing, 3D printing material, Health effects, exposure, risk, 3D printing guide, etc.

○ Plastic component analysis was carried out by cutting the ABS, PLA filament at intervals of 30 cm, repeated three times and analyzed by GC-Mass. The incubator temperature of the auto sampler was 200°C (Max). The analysis of the metal component was performed by heating at 180~200°C for more than 4-6 hours in a hot plate, and analyzed by ICP-OES.

Results

○ The global market for 3D printing in 2017 was \$ 73.4 billion, up 21% from 2016. It is expected to grow \$ 273 billion by 2023.

In 2018, the domestic 3D printing market was 3,958 billion won, an increase of 16.3% compared to 2017. It is expected to grow to 1 trillion won by 2023. 3D printing materials currently account for 60.7% of filament, 32.3% of resin, and 2.4% of metal in Korea.

○ The number of workplaces related to 3D printing work was 351 suppliers

and 1,324 demand companies by NIPA(National IT Industry Promotion Agency).

- Volatile organic compounds (VOC) of the 3D printing materials in the PLA materials, 5~7 control substances were detected in six samples out of a total of eight samples, 20~25 kinds were detected in the polymer material. In case of ABS materials, 5~6 kinds of controlled substances and 15~23 kinds of polymer substances are detected in total 5 samples. In other materials, 2~8 types are detected as controlled substances, and 15~30 types are detected in polymer materials. In the metal samples, three kinds of substances such as copper, iron, and aluminum were detected as controlled substances.

Conclusions

The risk is greatest when styrene is released while printing with ABS filaments. Ethylbenzene release can increase the risk of respiratory and eye irritation when printing with PLA and ABS resins. As a result of component analysis of 3D printed material samples, substances with various types of carcinogenicity and reproductive toxicity are detected, and 3D printers used for general use are open to the top, so it is necessary to apply the precautionary principle to control exposure.

Key words : 3D printing materials, Hazard agents

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 정은교 (선임연구위원, 직업환경연구실)

공동연구자 : 김성호 (연 구 원, 직업환경연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2019. 1. 1 ~ 2019. 11. 30

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

산업안전보건연구원장

2019-연구원-1486

3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성 연구

발 행 일 : 2019년 11월 30일
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 고재철
연구 책임자 : 직업환경연구실 선임연구위원 정은교
발 행 처 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400
전 화 : (052) 7030-881
F A X : (052) 7030-337
Home page : <http://oshri.kosha.or.kr>
