

3D 프린팅 기술의 이해, 유해 인자 노출 평가와 제어

박지훈¹ · 전해준² · 오영석² · 박경호³ · 윤충식^{1,2*}

¹서울대학교 보건환경연구소, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과,
³한국건설생활환경시험연구원 건축유해성평가센터

Understanding Three-dimensional Printing Technology, Evaluation, and Control of Hazardous Exposure Agents

Jihoon Park¹ · Haejoon Jeon² · Youngseok Oh² · Kyungho Park³ · Chungsik Yoon^{1,2*}

¹Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University

²Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University

³The Center of Green Complex Technologies, Korea Conformity Laboratories

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to review the characteristics of three-dimensional printing technology focusing on printing types, materials, and health hazards. We discussed the methodologies for exposure assessment on hazardous substances emitted from 3D printing through article reviews.

Methods: Previous researches on 3D printing technology and exposure assessment were collected through a literature review of public reports and research articles reported up to July 2018. We mainly focused on introducing the technologies, printing materials, hazardous emissions during 3D printing, and the methodologies for evaluation.

Results: 3D printing technologies can be categorized by laminating type. Fused deposition modeling(FDM) is the most widely used, and most studies have conducted exposure assessment using this type. The printing materials involved were diverse, including plastic polymer, metal, resin, and more. In the FDM types, the most commonly used material was polymers, such as acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS) and polylactic acids(PLA). These materials are operated under high-temperature conditions, so high levels of ultrafine particles(mainly nanoparticle size) and chemical compounds such as organic compounds, aldehydes, and toxic gases were identified as being emitted during 3D printing.

Conclusions: Personal desktop 3D printers are widely used and expected to be constantly distributed in the future. In particular, hazardous emissions, including nano sized particles and various thermal byproducts, can be released under operation at high temperatures, so it is important to identify the health effects by emissions from 3D printing. Furthermore, appropriate control strategies should be also considered for 3D printing technology.

Key words: Additive manufacturing, 3D printing, filament, hazards, exposure

I 서 론


3D(three dimensional) 프린팅 기술이 발달함에 따라 3D 프린터의 사용 범위가 확대되고 있다. 과거에는 일부 산업에서 제한적인 용도로 사용된 것에 비해 최근에는 저가 및 보급형 3D 프린터가 출시됨으로써 학

교, 사무실, 일반 가정에서도 비교적 저렴한 비용으로 활용이 가능하게 되었다(Zhou et al., 2015; Vance et al., 2017). 2018년에 발표된 Wholers Report에 따르면 최근 2년(2016-2017)간 전세계에서 판매된 보급형 3D 프린터 대수는 약 53만 대로 연평균 성장률이 21%에 달하며, 2017년에는 금속 재료를 이용하는

*Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2729, E-mail: csyoon@snu.ac.kr

Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

Received: August 23, 2018, Revised: September 13, 2018, Accepted: September 17, 2018

 Jihoon Park <https://orcid.org/0000-0002-4829-5587>

 Chungsik Yoon <https://orcid.org/0000-0001-7822-0079>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

3D 프린터의 경우 전년 대비 80%를 넘는 성장률을 보였다(<https://wohlersassociates.com/>). 특히, 금속재료를 이용한 3D 프린터 시장의 성장은 과거 플라스틱 수지나 분말형태의 재료 중심으로 성장했던 3D 프린터 산업의 응용 범위가 확대되고 있는 것을 나타낸다. 3D 프린팅 기술의 활용은 제조업 분야를 포함하여 바이오, 의료, 항공우주, 건축, 각종 개인 생활용품 분야(소비재) 및 고고학 분야에서 완제품을 비롯한 특수 부품 제조, 개인 맞춤형 제품 생산에 이르기까지 지속적으로 범위가 확대되고 있다. 이러한 활용 범위의 확대 추세에 따라 세계 3D 프린팅 시장은 산업용, 개인용 3D 프린터 제조와 관련 서비스업종까지 포함하여 2021년에는 100억 달러 이상의 규모로 확장될 것으로 예상된다.

3D 프린팅 기술은 적층 가공(additive manufacturing)의 대표적 가공 방식이다. 적층 가공은 기존 제조업에서의 절삭 가공(subtractive manufacturing)과는 대비되는 방식으로, 실제 3D 프린팅 기술을 포함한 여러 기술을 포함하는 용어로 사용되었으나 최근 3D 프린팅 기술이 각광을 받으면서 3D 프린팅 기술이 적층 가공을 대표하는 용어로 사용되고 있다. 3D 프린터는 물체의 3차원 형상을 제작함으로써 정밀한 구현이 가능하며 설계 단계부터 시제품 생산, 테스트 단계에 이르기까지 신속한 진행(rapid prototyping)이 가능하여 (Figure 1) 비용경제적인 측면에서 강점을 가진다 (Noorani, 2006; Wang et al., 2017). 현재 기술로는 절삭 가공에 비해 제품의 내구성 및 완성도가 떨어지는 단점이 있으나 향후 기술 보완을 통해 충분히 극복할 수 있을 것으로 예상되며, 디자인 변경의 용이성, 제조 단계의 단축을 통한 제조업 분야의 효율성 향상에

크게 기여할 것으로 기대된다. 또한, 기존 절삭 가공 기술과 주조, 금형, 소성 가공 등 뿌리 기술의 대체 기술로 적용되기도 하며, 기존 기술과의 상호 보완성을 통해 시너지 효과도 거둘 수 있는 기술로도 평가되고 있다(Cho & Lee, 2014).

다른 신기술 산업과 마찬가지로 3D 프린팅의 경우에도 제조 혁신의 아이콘으로 각광받고 있으나 신기술 이면의 단점도 필연적으로 제기되고 있다. 대표적 3D 프린팅의 기술인 수지 압출 적층 조형 기술(fused deposition modeling, FDM)의 특허가 만료되면서 저가형 3D 프린터의 보급이 일상생활 속으로 확대됨과 동시에 프린팅 재료나 또는 인쇄 과정에서 발생하는 유해인자에 대한 연구결과도 최근 몇 년 간 꾸준히 발표되고 있다. 특히, 보급형 3D 프린터에 채택되는 프린팅 방식은 대부분 고열이 소재에 가해지는 과정이 필연적이므로 인쇄 과정에서 발생하는 입자상 및 가스상 유해 인자의 발생원이 된다. 3D 프린팅 기술의 확장과 보급형 프린터 시장의 확대에 의해 3D 프린팅에 대한 관심이 커지고 있는 점을 고려했을 때, 보건학적 관점에서의 환경 노출 평가를 위해 선행되어야 할 과제로써 신기술의 특성에 대한 이해와 사용자 측면에서의 유해 인자에 대한 이해 내지는 노출 가능성 전반에 대한 이해가 선행될 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 최근 제조 혁신 분야로 떠오르고 있는 3D 프린팅의 주요 원리와 가용 소재 특성을 폭넓게 정리하였으며, 특히 프린팅 과정에서 발생 가능한 유해 인자를 다룬 기존 연구 결과들을 비교하여 사용자 노출 위험 측면에서 3D 프린팅 과정에서 발생하는 유해 인자의 평가와 제어 방안들에 대해 논하고자 한다.

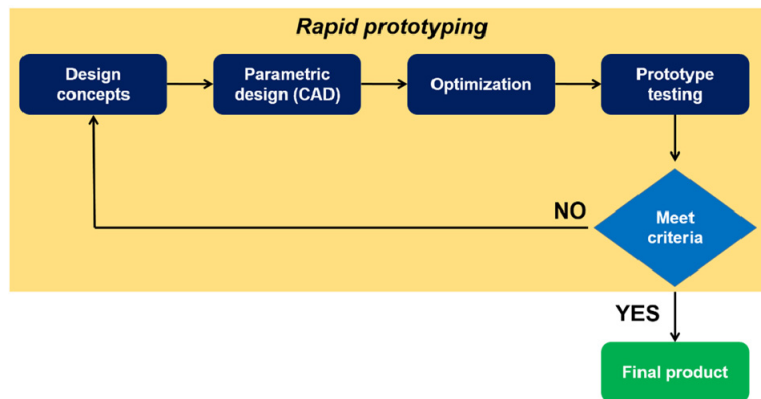


Figure 1. An outline of initial manufacturing process using 3D printing technology(Noorani, 2006; Wong & Hernandez, 2012)

II. 대상 및 방법

현재 상용화된 3D 프린팅 기술과 관련하여 관련보고서와 3D 프린팅 재료와 가동 중 발생 가능한 유해인자에 대한 노출 평가 관련 국내외 연구결과를 정리하였다. 연구보고서의 경우 국가정책연구포털(<https://www.nkis.re.kr>)에 등록된 국책연구기관의 연구 성과물 중 2018년 7월 기준으로 현재까지 발간된 3D 프린팅 관련 보고서를 리뷰하였다. 3D 프린팅 관련 국내외 연구 결과는 2013년부터 2018년 7월까지 Scopus와 Google 학술 검색 웹 상에서 등록된 연구 논문을 대상으로 하였으며, 검색어는 “3D printing material”, “exposure”, “hazardous agents”, “ultrafine particle”, “chemical emissions”등을 조합하여 검색하였다. 문헌 고찰은 기술 및 공학 분야의 기술적 연구 결과는 배제하고 3D 프린팅 과정에서 발생 가능한 유해 인자와 노출 평가 등 보건학 분야에서 수행된 연구 논문을 대상으로 하였다. 본 연구에서 다룬 주제는 현재 상용화되어 있는 주요 3D 프린팅 기술과 프린팅 재료 및 건강상 유해인자에 대한 개요와 기존 연구에서 사용한 유해 인자 평가 방법론과 제시된 제어 방안에 대해 중점을 두고 각 내용을 정리하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 3D 프린팅 원리

기존의 전통적 제조공정은 재료를 절삭하여 가공하는 방식(top-down)에 근간을 두고 있으나 3D 프린팅은 재료를 층으로 올려 물체를 인쇄하는 적층 가공 방식(bottom-up)을 이용한다(Wong & Hernandez, 2012; Huang et al., 2013; Kim & Shim, 2016). 3D 프린팅은 먼저 실제 프린팅 모델 구현을 위한 프로그래밍 작업을 거쳐 초기 디자인 모델(prototyping)을 구현하는 것에서부터 시작한다. 다음 단계로 프로그램으로부터 전달받은 설계 디자인을 프린터의 원재료를 이용하여 입체감 있는 실물로 구현하는데, 이 때 해당 디자인의 복잡성에 따라 짧게는 수 십 분에서 길게는 수 시간이 소요될 수 있다(Wang et al., 2017). 3D 프린터는 입체적으로 그려진 물건을 아주 얇은 층 형태를 쌓아 실물을 제작하는데, 이 때 레이어가 얇을수록 더욱 정교한 물건이 완성된다. 이로부터 완성된 시제품이 최종 모델의 기준에 적합할 경우 최종 제품 제작 과정에 들어가게 되며, 기준에 부합하지 않을 경우 디자인 수정 후 동일한 절차를 반복한다. 이처럼 최종제품 개발을 위한 시제품 구현 단계가 매우 빠른 것이 3D 프

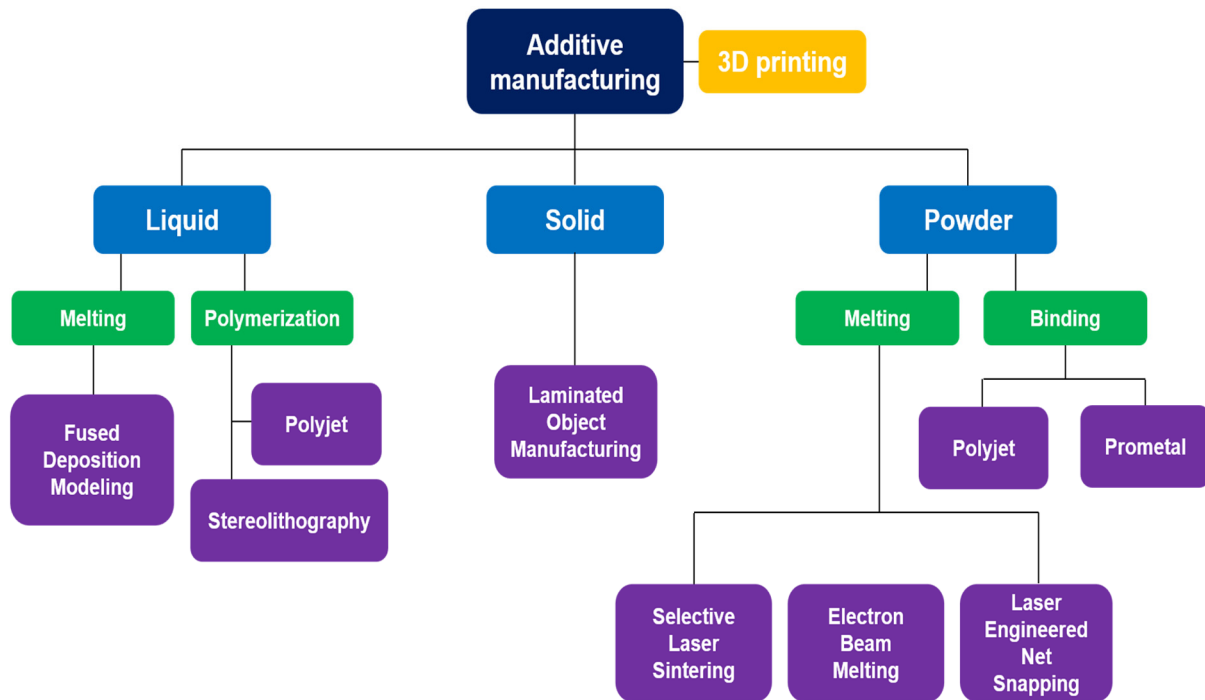


Figure 2. Categorization of 3D printing types(Kruth, 1991; Kim & Shim, 2016)

린팅 기술의 최대 장점이라 할 수 있다. 반면, 3D 프린팅 기술의 적용은 생산성 측면에서는 기존 전통적인 제조방식에서는 생산량이 증가할수록 고정비가 감소함으로써 단위 당 제조원가가 낮아지는데 반해, 대량 생산 체제일 경우 원가 경쟁에서 떨어지는 것이 단점이다. 또한 현재 기술력으로는 완성도 측면에서 기존 제조 방식에 비해 상대적으로 품질이 떨어지며, 여러 소재를 동시에 사용하여 제작하거나 제품의 크기에 있어서도 제한이 따르는 단점이 있다(Berman, 2012; Lee et al., 2016).

현재 상용화되어 있는 3D 프린팅 기술은 소재의 물성(액체, 고체, 분말형)에 따라 크게 구분할 수 있다(Figure 2). 이러한 소재들을 이용하여 출력하는 방식으로 압출형, 분말형, 접합형 및 광조형으로 구분할 수 있는데, 명명은 수지 압출 적층 조형(FDM)을 비롯하여 선택적 레이저 소결 조형(selective laser sintering, SLS), 광경화성 수지 적층 조형(stereolithography apparatus,

SLA), 폴리젯(polyjet) 조형 등 세부 구분이 가능하다.

Figure 2에 구분한 3D 프린팅 방법 중 산업용, 개인용(보급형) 프린터에 널리 사용되는 인쇄 방식은 FDM과 SLA, SLS 등 세 가지로 압축할 수 있으며, 이를 비롯한 주요 인쇄 방식의 특성을 요약하면 Table 1과 같다. 미국재료시험협회(American Society for Testing and Materials, ASTM)에서는 압출(extrusion), 재료 분사(material jetting), 접착 분사(binder jetting), 표면 접합(sheet lamination), 광조형(vat photopolymerization), 소결(powder bed fusion or sintering), 에너지 증착(direct energy deposition) 등 7가지 방법으로 구분하고 있으며(ASM, 2012), 사용되는 소재도 플라스틱 폴리머를 비롯하여 레진, 금속, 세라믹 등으로 다양하다(Wang et al., 2017; Ngo et al., 2018). 따라서 다양한 가공 방식 또는 사용되는 소재의 특성에 따라 인쇄 중에서 발생 가능한 유해 인자의 특성 및 이에 대한 사용자의 노출 양상도 달라질 것으로 예상된다.

Table 1. Summary of 3D printing technologies according to applied laminating types and materials

Printing type	Laminating type	Printing materials	Key properties*				Mechanisms	
			Durability	Resolution	Surface finish	Application		
FDM(FFF [†])	Material extrusion	Polymer, metal	Upper middle	Lower middle	Rough	Functional parts	Polymer filament is extruded through a heated nozzle to create cross-sectional layers of a part	
SLA	Liquid light polymerization	Polymer	Low	High	Smooth	Prototypes	Ultraviolet radiation is used to activate a photopolymer and different system configurations produce different resolutions and challenges	
SLS	Solid granular sintering	Polymer, metal	High	Low	Rough	Functional parts	Materials in powder form is sintered or bound in layers using lasers to form a model	
LOM	Sheet lamination	Paper film	Upper middle	Low	Rough	Functional parts	Each sheet forms a layer of the part and each part formed through cutting part profile from individual material sheet	
Others	Polyjet	Material jetting	Polymer	Lower middle	Upper middle	Smooth	Prototypes	Fine print head nozzles to deposit droplets of photo-curable liquid material onto a build tray in layers to form detailed 3D parts.
	3DP	Material binding jetting	Powder (metal, ceramic, composites)	Middle	Middle	Middle	Prototypes Functional parts	An inkjet print head moves across a powder bed depositing a liquid binder. A thin layer of powder is spread across the section and the process is repeated with each layer and forms model.
	EBM	Solid granular sintering	Powder (metal)	High	Low	Rough	Functional parts	A thin layer of materials is selectively melted by an electron beam. Model is formed by built up layer by layer the in the bed.
	LENS	Direct energy deposition	Powder (metal)	High	High	Rough	Functional parts	A high-powered density laser beam is focused on a continuous stream of materials which is deposited onto substrate.

Abbreviations: FDM, fused deposition modeling; SLA, stereolithography apparatus; SLS, selective laser sintering; LOM, laminated object manufacturing; 3DP, three dimensional printing; EBM, electron beam melting; LENS, laser engineered net shaping.

* Data from 'Overview over 3D printing technologies' available at <https://www.additively.com/>

[†] FFF(fused filament fabrication): An another name of FDM focusing on the personal desktop 3D printer. The term of FDM is more appropriate for industrial 3D printer strictly.

1) 수지 압출 적층 조형(Fused Deposition Modeling, FDM)

FDM 방식은 미국 Stratsys 사에서 상표 등록한 용어로서, 현재 특허가 만료되어 3D 프린팅 시장에서 각 경쟁사에 의해 광범위하게 응용되고 있는 방식이다. FDM 방식은 컴퓨터 시스템에 의해 제어되는 헤드에 의해 고체 상 재료(filament)를 고온에서 압출시킴으로써 반 액상 재료를 표면에 증착시키는 원리이며(Figure 3), 주로 사용되는 재료는 acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS), polylactic acid(PLA), polycarbonate 등 중합체이며, 경우에 따라 금속 재료도 사용된다(Wong & Hernandez, 2012; Vance et al., 2017). FDM 방식은 증착 이후 상온에서 물체가 자연적으로 경화되기 때문에 인쇄 후 경화를 위한 별도의 후 공정(post process)이 필요 없으며, 다른 방식을 채택하는 프린터에 비해 경제적이다. 반면, 한 개의 제품을 인쇄하는데 오랜 시간이 소요되며, 각 적층 간 마감으로 인한 표면처리가 매끄럽지 못해 정밀성과 품질 저하가 일어날 수 있어 완제품 보다는 부분품 제작에 주로 사용된다(Morvan et al., 2005; Cheves, 2014; Groth et al., 2014; Chohan et al., 2017).

2) 광경화성 수지 적층 조형(Stereolithography Apparatus, SLA)

SLA 방식은 최초로 개발된 3D 프린팅 기술로서 자외선 빔이 액상 플라스틱 수지에 조사될 때 포토 폴리머의 경화가 동시에 이루어지는 액상 소재 기반의 광조형 가공 방식이다(Cooper, 2001; Noorani, 2006; Pham & Ji, 2000). 액체 형태의 광경화성 수지가 담긴 용기 안에 레이저 빔을 투사하여 각층을 지지판 위에 적층하며, 각 층이 쌓일 때마다 지지판이 액상 위로 이동하면서 제품이 만들어지는 과정을 거친다(Figure 3). SLA 프린터의 주 원료는 액상 형태의 폴리머이며, FDM 프린팅 방식에 비해 정밀도가 높은 제품 구현이 가능하여 시제품(prototype) 제작 용으로 사용된다. 또한 표면 처리가 매끄러워 별도의 후 가공 과정을 필요로 하지 않으나 강도가 떨어지는 단점이 있다(Stansbury & Idacavage, 2016; Wong & Hernandez, 2012). SLA 가공에 사용된 재료는 액상이므로 한 공정이 완료되면 재사용이 가능하다.

3) 선택적 레이저 소결 방식(Selective Laser Sintering, SLS)

SLS 방식은 분말형태의 재료에 고온의 레이저 빔을

가함으로써 고열에 의해 녹는 재료 부분을 적층하여 제품을 제작한다. 즉, 분말형 재료에 압력을 가하여 경화 시킨 후 녹는점에 가까운 온도로 가열함으로써 재료의 접합면에서 접합과 증착이 일어난다(Stansbury & Idacavage, 2016). 소재는 분말형태의 폴리머와 금속이 사용되며 롤러(roller)를 이용하여 적층, 이후 레이저 빔이 적당 각도로 반사해 선택적으로 제품을 형성한다(Figure 3). SLS 방식은 플랫폼이 내려가기 전에 레이저가 단면 형상을 추적한다는 점에서 큰 틀에서는 SLA 방식과 유사하나, 가공 과정에서 분말 형태의 재료가 해당 물체를 지지한다. 다른 인쇄 방식에 비해 강도가 우수하나, 정밀도가 떨어지며 인쇄 시간이 많이 소요된다(Kruth et al., 2005; Ko et al., 2007; Drummer et al., 2014; Shirazi et al., 2015).

4) 개체 접합 조형(Laminated Object Manufacturing, LOM)

LOM 방식은 이산화탄소를 이용한 레이저 빔을 이용하여 3차원 물체의 단면을 절단, 개별 절단면을 적층하여 제품을 인쇄하는 방식이며, 절단 과정을 거치므로 절삭 가공 방식도 일부 채택한다. 프린팅 소재는 종이, 금속, 플라스틱 재질의 시트(sheet)를 이용하며, 각 시트를 지지판에 위치시킨 후 가열 롤러의 압력을 이용하여 접착시키는 과정을 반복함으로써 최종 제품을 형성한다(Lee et al., 2017). LOM 방식은 인쇄 후 별도의 가공 처리를 필요로 하지 않으며, 가공 중 제품의 변형 없이 대량 인쇄가 가능하나, 대상 물체 내부에 복잡한 구조의 기공이 존재하거나 고도의 정밀을 요하는 제품의 가공에는 부적합하다(Klosterman et al., 1998; Mueller, 2012).

5) 기타 프린팅 방식

앞서 기술한 인쇄 방식 외 전자빔 용해 조형(Electron Beam Melting, EBM), 에너지 증착 조형(Direct Energy Deposition, DED), Polyjet 등 소재의 종류와 공급 방식에 따른 여러 기술들이 개발되어 있는 상태이며, 현재에도 기본 메커니즘을 바탕으로 지속적으로 개발, 보완되고 있다. EBM 방식은 SLS 방식과 유사하며 차이점은 분말을 용융하는 방식이며, 분말 형태의 금속 분말을 용융시켜 반복 적층시키는 분말 소결 방식과 분말이 아닌 고체 형태의 금속을 용융시켜 적층하는 방식으로 구분이 가능하다. 이 방식은 금속의 특성상 산화작

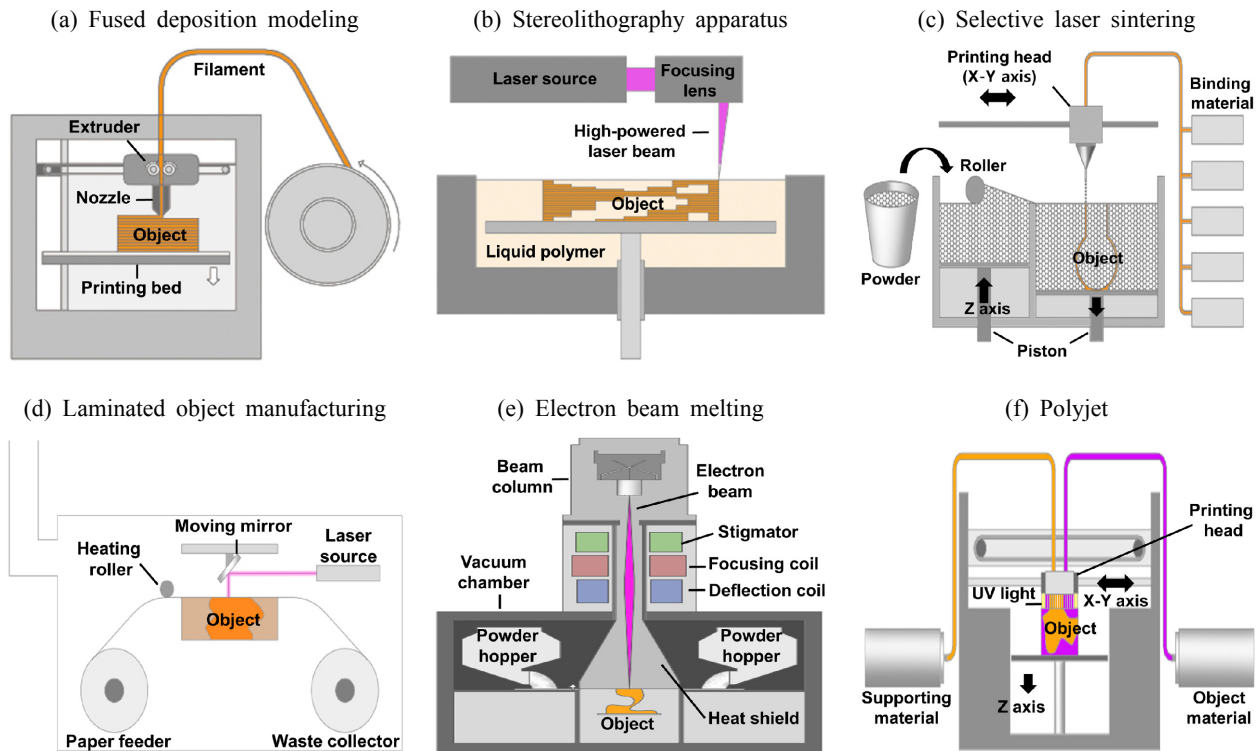


Figure 3. Mechanisms of widely used 3D printing types

용이 일어나는 것을 방지하기 위해 높은 진공상태에서 이루어지므로 시스템 구성이 복잡하다(Edgar & Tint, 2015; Ngo et al., 2018). PolyJet 방식은 광경화와 잉크젯 방식이 결합된 혼합 방식으로 프린터 헤드의 미세 노즐에서 재료를 분사하고 자외선 빔에 의한 경화 과정이 동시에 일어나 제품을 인쇄한다(Figure 3). 이 방식은 적층이 매우 얇게 형성이 되므로 정밀도와 표면처리가 우수하고, 장력 조절로 인한 다양한 형태의 제품을 출력할 수 있으나 지지판 재료를 제거해야 하거나 다른 방식에 비해 강도가 떨어지는 단점이 있다(Elliott et al., 2012).

2. 3D 프린팅 소재

현재 시중에 보급형 및 산업용으로 출시된 3D 프린터에 사용되는 원재료는 플라스틱 폴리머, 천연재료(PLA의 주 성분), 세라믹 금속, 콘크리트 재질 등 다양하나, 대부분이 플라스틱 중합체를 기반으로 하는 필라멘트를 프린팅 재료로 이용한다(Cheves, 2014; Cimino et al., 2018; Ngo et al., 2018). 필라멘트는 고분자성 폴리머(polymer)를 기반으로 플라스틱 가소제, 내연제, 안정제 등 첨가물이 함유되어 있으며, 이들이

프린팅 과정에서 열분해 되어 배출하는 유해 인자는 사용자의 안전과 건강에 영향을 줄 수 있다(Cheves, 2014; Stabile et al., 2017; Cimino et al., 2018). 플라스틱 중합체는 원유 성분을 원재료로 하는 단량체 형태로 제조되며, 단량체 형태로는 화학반응이 완전하지 않으나 중합체 내에서 안정된 결합을 한다. 이처럼 고유의 불안정한 특성은 중합체가 열에 의해 분해되는 과정에서 잔류 단량체, 가소제, 난연제, 용매 등의 첨가제를 방출시킨다(Unwin et al., 2012; Cheves, 2014). Lithner et al. (2011)은 55개 플라스틱 중합체를 대상으로 각 재료의 단량체의 독성에 기초하여 위험도를 분류하였는데, 폴리우레탄, 폴리아크릴로니트릴, 폴리염화 비닐, 에폭시 수지, 스티렌 공중합체(styrenic copolymer)가 가장 위험한 중합체로 분류되었다. 이 중합체들은 일부 발암성 물질 또는 생식세포 변이원성 물질의 단량체로 제조되는 물질이다(Lithner et al., 2011). 특히, 필라멘트 제조사는 시중에 판매하는 제품의 화학적 구성에 대한 정보를 명확히 밝히지 않고, 주로 기계적 특성에 관한 정보만을 제공하려는 경향이 있다. 그러나 보건학적 측면에서 고려했을 때 이러한 기계적 성질에 관한 정보 보다는 재료의 성분, 녹

는점 또는 열분해산물에 대한 정보가 매우 중요하다. 따라서, 다음 내용은 다수의 3D 프린팅의 원재료로 중합체 성질의 필라멘트라는 점을 고려하여, 이에 초점을 맞추어 그 특성과 유해 요인에 대해 요약하였다.

1) Acrylonitrile butadiene styrene(ABS)

ABS는 acrylonitrile, 1,3-butadiene, styrene을 중합하여 얻어지는 중합체로 전자제품 및 자동차의 부품소재로 많이 사용하며, 보급형 3D 프린터의 재료 중에서 일반적으로 가장 많이 사용되는 소재이다. 일반 플라스틱과 유사한 강도를 보이지만 성형성, 내구성, 내열성, 전기적 성질 등이 우수한 것으로 평가된다(Tiganis et al., 2002). 내구성은 매우 뛰어나지만 녹은 뒤 굳는 데까지 소요되는 시간이 짧아 완성 후에 갈라지거나 바닥에 달라붙는 현상이 발생할 수도 있다 (Cheves, 2014; Wang et al., 2017). 일반적으로 약 105℃에서 녹으며, 일관적인 압출을 위해서는 약 230-260℃의 고온을 필요로 한다. 특히, 상태의 열 분해 과정에서 ABS를 구성하고 있는 단량체를 포함하여 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 일산화탄소, 시안화 수소 등 유해 물질을 배출할 수 있기 때문에 밀폐된 공간에서 사용할 때에는 유의해야 한다(Rutkowski & Levin, 1986; Mansour, 1992).

2) Polylactic acid(PLA)

ABS가 가공과정에서 발암물질을 포함하는 유해물질이 발생하는데 반해 PLA는 옥수수 전분에서 추출한 원료로 만든 생분해성(biodegradable) 수지이므로 일반 수지가 열을 받았을 때 발생하는 환경호르몬, 중금속 물질 등 유해 성분이 검출되지 않아 상대적으로 안전한 재료로 평가된다. 사용 중에는 일반 플라스틱과 동일한 특성을 가지나 폐기 시 미생물에 의해 생분해되는 장점을 가진다(Jamshidian et al., 2010; Wojtyła et al., 2017). ABS와 더불어 3D 프린터 원료로 가장 많이 사용되는 원료로써 ABS가 가지는 단점을 상당 부분 해소할 수 있는 재료이며, ABS보다 다소 낮은 150-210℃의 온도를 필요로 한다. PLA는 프린팅 과정에 있어 시간이 오래 걸리기 때문에 수축이 거의 일어나지 않아 ABS처럼 갈라짐이나 바닥에 붙는 현상이 거의 발생하지 않으나 ABS에 비해 상대적으로 내열성과 강도, 내구성이 떨어진다(Kuo et al., 2016; Singh et al., 2017). 또한 열분해 과정에서 메탄, 메틸 케텐, 알데히드류 등

유해물질이 발생하는 것으로 밝혀졌으나, 다른 소재에 비해 상대적으로 배출 수준이 낮아 현재로서는 사용자 노출과 환경영향 측면을 고려했을 때 가장 적합한 것으로 판단된다.

3) Polypropylene(PP)

폴리프로필렌(PP)는 상온에서 지방, 유기용제 등 화학물질에 대한 내화학성을 가지며, 일반 생활 제품에서 쉽게 접할 수 있는 플라스틱의 일종이다. 재활용이 가능하여 비용 대비 매우 효율적인 장점이 있어 3D 프린팅의 재료로도 많이 사용되고 있으며, 에틸렌과 공중합화시켜 강도를 높일 수 있어 산업용 재료로도 많이 사용된다. 반면, 고온에서 가공될 때 쉽게 변형되는 성질이 있으며, 우수한 전기 절연적 특성이 있어 정전기력에 의해 표면에 먼지를 비롯한 이물질이 붙는 단점이 있다. PP의 가열 온도는 230-260℃이며, 고온에 의해 열분해될 때 알데하이드류와 유기 화합물, 알켄류 등 유해 물질이 배출될 수 있다(<https://3dprinting.com/materials/>).

4) Nylon

나일론은 가볍고 층간 결합이 강하여 강도가 높으며 내구성이 좋은 소재이다. 순수한 열가소성 수지이므로 재활용이 가능하며, 강한 산을 제외한 보통의 유기용제 또는 알칼리에 대한 강한 내화학성을 가진다(Srivatsan & Sudarshan, 2015). ABS와 PLA와 같이 공기 중 습기를 흡수하려는 성질이 가지고 있기 때문에 습도가 높은 환경에서는 인쇄 품질에 상당한 영향을 받을 수 있다. 습도가 높은 조건일 경우 나일론은 눈에 띄는 냄새가 없지만 가스는 녹거나 화상을 일으켜 방출됩니다. 나일론으로부터 발생 가능한 유해물질은 이전 연구 결과에 의하면 열분해 과정에서 카프로 락탐(caprolactam) 단량체가 발생할 수 있고, 니트릴, 케톤류 및 방향족 유기화합물, 암모니아, 시안화 수소를 배출하는 것으로 알려져 사용 중 노출에 유의해야 한다(<https://3dprinting.com/materials/>).

5) Polycarbonate(PC)

폴리카보네이트(PC)는 가볍고 투명한 형태의 열가소성 수지로, 응용 범위가 매우 넓다. 고온에서 열 변형이 쉽게 일어나며 유연성이 뛰어나 변형이 생겼을 때 원래 모양으로 돌아가려는 성질을 가지고 있다. PLA와 ABS보다 높은 밀도와 인장 강도를 가지고 있

Table 2. Type of materials used in 3D printing and hazardous substances which can be emitted during operation

Materials	Monomer	Normal operating temperature	Possible hazardous emissions*	Pros and cons.
ABS	- Acrylonitrile - 1,3-butadiene - Styrene	210-250℃	- Ultrafine particles - Aromatic VOCs including ABS copolymers - Carbon monoxide - Hydrogen cyanide	- Most used materials filaments in desktop 3D printer over the world - Mechanically strong - Non biodegradable material which can release toxic substances at high temperature
PLA	- Lactide	180-220℃	- Ultrafine particles - Aldehydes - Carbon monoxide/dioxide - Methane - Methylketene	- Flexible and easy to print - Not toxic material - Difficult to post-process and can be deformed by heat
Polypropylene	- Propylene	230-260℃	- Ultrafine particles - Aldehydes - Pentane, propane, butane - Dimethylheptane - Methylpentane - Alkenes	- Resistant to chemicals and bacterial growth - Strong and recyclable - Difficult to print and expensive, vulnerable to UV
Nylon	- Lactams - Acid/amines (mixtures of diamines and diacids)	240℃ <	- Ultrafine particles - Caprolactam - Nitriles, aromatic VOCs - Ammonia - Hydrogen cyanide	- Flexible and highly durable - Resistant to UV or chemicals - Vulnerable to moisture
Polycarbonate	- Bisphenol A - Phosgene	250-320℃	- Ultrafine particles - Bisphenol A - Peroxides - Aldehydes - Ketones - Hydrocarbons - Phenols	- Flexible and highly durable - Standard melting temperature - Transparent - Heating bed for avoiding warping is needed - Varying levels of quality depending on price
Resin	- Methyl methacrylate	20-35℃	- Ultrafine particles - Methyl methacrylate - Methanol	- Applicable to many cases - Wide spectrum of strength and flexibility - Expensive - Vulnerable to heat - Limited expired period

Abbreviations: ABS, acrylonitrile-butadiene-styrene; PLA, poly lactic acid; VOCs, Volatile organic compounds

* Data from (Rutkowski & Levin, 1986; Forrest et al., 1995; Cheng et al., 2004; Jang & Wilkie, 2005; Unwin et al., 2012; Steinle, 2016; Wang et al., 2017; Ngo et al., 2018)

어 높은 강도와 유연성을 가진 투명 제품을 가공할 때 이상적인 재료이다. PC는 보통 260-300℃에서 녹으며, 일반적으로 300℃에 가까울수록 인쇄 품질은 높아지나 가격에 따른 제품별 품질 차이도 있다. PC의 단량체는 비스페놀 A와 포스겐으로 구성되어 있어 고온에서 열분해가 이루어질 때 비스페놀 A를 비롯하여 알데하이드류, 유기화합물, 페놀류 등이 배출될 수 있다(<https://3dprinting.com/materials/>).

3. 3D 프린팅 유해 인자 평가 방법

1) 프린팅 환경

다수의 연구에서 보급형 FDM 방식의 프린터를 이용하였으며, 일부 연구에서는 SLA 프린터, 잉크젯 3D

프린터를 이용하였다. FDM 방식의 프린터는 ABS 또는 PLA 재질의 필라멘트를 주로 사용하며 프린팅 온도 조건은 180-250℃ 범위의 고온에서 가동된다. **Table 3**에 요약한 바와 같이 이전 연구 중에서 다수가 FDM 프린터에서 ABS, PLA를 이용하여 유해 인자에 대한 평가를 실시하였으며, 일부 연구에서는 이 외 Copolyester, Nylon, Laywood, PVA(polyvinyl alcohol), PET(polyethylene terephthalate), HIPS(high impact polystyrene) 등 다양한 재료를 이용하여 각 재료별 권장 온도 조건에서 평가하였다(Azimi et al., 2016; Kwon et al., 2017; Stabile et al., 2017; Wojtyła et al., 2017).

기존 연구에서 3D 프린팅 실험을 위한 조건은 제한된 크기의 챔버나 일반 사무실, 실험실 등 별도의

환경 제어를 하지 않은 실내 공간이었으며, 일부 연구에서는 외부 환경으로부터의 방해를 최소화하기 위해 환경 제어가 가능한 클린룸을 이용하였다. 챔버는 제한적인 공간 내에서 프린터로부터 발생하는 유해 인자의 거동을 파악하기에 용이한 측면이 있으나 실제 사용환경에서의 사용자 노출을 반영하지 못하는 단점이 있다. 또한 일부 연구에서 수행한 클린룸 실험도 공간 외부 요인에 의해 방해를 받지 않고 순수 프린터로부터 발생하는 유해 인자를 비교적 정확히 파악할 수 있다는 점에서 장점을 가진다. 그러나 챔버와 클린룸은 실제 사용환경에서의 노출을 정확히 반영할 수 없기 때문에 일부 연구에서는 실제 사용환경에서 평가하였다.

챔버를 이용한 연구는 0.5-3.6 m³ 규모의 크기에서 진행되었으며, 재질은 일반 아크릴과 정전기력을 제거한 무정전 아크릴, 스테인레스 재질의 챔버를 이용하였다(Kim et al., 2015; Choi, 2016; Steinle, 2016; Yi et al., 2016; Kwon et al., 2017; Stefaniak et al., 2017; Vance et al., 2017). 그러나 일반 재질의 경우 프린팅 과정에서 발생하는 초미세 입자가 정전기력에 의한 영향을 받을 수 있으므로 무정전 재질 또는 스테인레스 재질의 챔버를 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 또한 챔버는 실험 후 내부에 잔재하는 유해 물질을 제거하는 장치도 중요하다. 따라서 대부분 연구에서는 HEPA 필터와 환기 또는 불활성 기체를 이용하여 내부 잔재물을 제거할 수 있는 챔버를 이용하였다. 실제 프린터 환경을 평가한 연구에서는 실험실 또는 일반 사무실 내에서 3D프린터를 가동하는 환경에서 발생하는 유해 인자를 측정, 평가하였다(Stephens et al., 2013; Afshar-Mohajer et al., 2015; Ryan & Hubbard, 2016; Steinle, 2016; Yi et al., 2016; Stabile et al., 2017; Vance et al., 2017; Du Preez et al., 2018; Yang & Li, 2018). 이러한 환경에서의 측정, 평가 방법은 프린팅 과정에서의 노출 수준을 실제 상황에서 평가할 수 있는 장점이 있으나, 해당 공간 내 프린터로부터 발생하는 유해 인자 외 타 요인의 영향을 받을 수 있기 때문에, 전체 노출량을 프린터에 의한 것으로 판단하기에 무리가 있다. 따라서 일부 연구에서는 이러한 외부 요인에 의한 방해 요인을 최소화 하기 위해 실내 환경 제어가 가능한 클린룸을 이용하여 프린팅 과정에서 발생하는 유해 인자에 대한 노출을 좀 더 정확히 평가하였다. 다만, 이전 연구에서 수행한 클린룸은 모두

Class 1,000 수준에서 입자상 물질 제거가 가능하도록 설계 되어 있어 공기 중 가스 상의 유해물질 제어는 제한적이다(Zhou et al., 2015; Deng et al., 2016).

2) 평가 방법

앞서 언급한 프린팅 환경 조건에서 입자상 물질과 가스상 유해 성분에 대한 평가는 실시간 측정기기를 이용하거나 전통적 평가 방법인 여재(media)와 유량 펌프를 이용한 시료채취법을 이용하고 있다. 실시간 측정방법은 주로 입자상 물질을 측정하거나 가스 상 물질의 경우 개별 성분을 모두 파악하기에 제한이 있으므로 총 휘발성유기화합물(total VOCs, TVOCs)을 측정하는데 활용되고 있다. 측정은 크게 프린터 가동 전 배경 농도(background) 측정, 가동 중, 가동 후로 구분하여 평가한다.

프린팅 가동 중 발생하는 입자상 물질은 대체로 나노 크기의 매우 작은 입자가 발생하므로 기존의 여과지 무게 측정을 통한 중량법 보다는 입자의 크기 분포와 수 농도 측정이 가능한 실시간 측정기기를 이용하고 있다. 이전 연구에서 주로 사용되고 있는 입자상 물질에 대한 실시간 측정장비로는 SMPS(scanning mobility particle sizer)와 CPC(condensation particle counter), OPC(optical particle counter)이 단독 또는 병행하여 활용되었다. 따라서 실시간 기기를 이용한 측정을 통해 프린팅 과정에서 발생하는 입자 크기 별 수 농도(particles/cm³)를 제시하거나 시간당 발생량(particles/min) 또는 사용 단위 당 발생량(particles/g)으로 제시하고 있다. 공기 중 가스상 물질의 측정은 보통 광 이온화(photoionization) 원리가 적용되는 실시간 측정기기를 이용하여 TVOCs를 제시함으로써 전반적인 휘발성 가스 상 물질의 농도 수준을 제시하거나 능동식 시료채취방법(offline sampling)을 통한 개별 가스 상 성분을 분석 기기로 정성·정량하여 결과값을 제시하고 있다.

3) 주요 유해 인자의 발생 특성

3D 프린팅 과정에서 발생할 수 있는 유해 인자의 종류는 다양하다. 대부분 고온에서 인쇄가 이루어지는 경우가 많으므로 특히 열분해과정에서 발생하는 초 미세 입자, 화학적 부산물이 사용자 노출 관점에서 매우 중요한 유해 인자로 꼽을 수 있다. Table 2에서 주요 프린팅 재료별로 발생 가능한 유해 인자를 나타

내었으나 이 외에도 열분해 과정에서 발생할 수 있는 미지의 유해 인자가 존재할 것으로 판단된다. 현재까지 밝혀진 프린팅 과정 중 발생하는 유해 성분으로 초 미세 입자와 VOCs, 알데하이드류, 일산화 탄소, 시안화 수소 등의 유독 가스 등이 보고되고 있다. 특히, 초 미세입자의 경우 발생하는 입자의 대부분이 100 nm 이하의 나노 입자 크기부터 수 백 나노 미터에 이르기까지의 초미세입자인 것으로 보고되고 있다 (Afshar-Mohajer et al., 2015; Kim et al., 2015; Zhou et al., 2015; Choi, 2016; Yi et al., 2016; Kwon et al., 2017; Stabile et al., 2017; Vance et al., 2017).

Table 3은 현재까지 수행된 연구를 바탕으로 3D 프린터에서 발생하는 유해 인자 관련 연구의 목적과 평가 방법, 주요 결과를 요약한 것이다. FDM의 프린터가 보급형의 주된 방식이므로 대부분의 연구에서 FDM을 이용하여 평가 하였으며, FDM 외 SLA와 Binder jetting 방식의 프린터를 이용하여 수행한 연구는 각 1건씩 보고되었다. 3D 프린터로부터의 유해 인자 평가를 한 이전 연구들은 대부분 초미세입자와 VOCs를 포함한 공기 중 유해 화학 물질을 대상으로 하고 있다. Stephens et al.(2013)은 3D 프린팅 중 발생하는 초미세입자의 크기 별 농도와 발생량에 대한 연구 결과를 처음 발표하였다. 이 연구에서 FDM 방식의 프린터에 ABS와 PLA 재질의 필라멘트를 이용하여 인쇄를 진행하였는데, ABS(2.1×10^9 particles/min)를 이용할 때 PLA(2.0×10^8 particles/min)을 이용할 때보다 약 10배 많은 입자를 발생시키는 것으로 밝혀졌다. 개별 연구에서의 프린팅 조건에 따라 다소의 차이

는 있으나 ABS가 PLA보다 약 10-10,000배 많은 초미세입자를 배출하는 것으로 보고되고 있어, 보급형 3D 프린터 재료 중 가장 많이 사용되는 ABS를 이용한다는 점을 감안할 때 사용자 측면에서 노출 위험이 상대적으로 크다고 할 수 있다. Figure 4는 이전 연구에서 평가한 ABS와 PLA를 이용할 때 발생하는 입자 발생량의 분포를 나타낸 것이다 (일부 연구에서 발생량을 공기 중 농도, 즉 particles/cm³로 표시한 값은 제외함). 그림에서 보는 바와 같이 모든 연구에서 ABS가 PLA보다 많은 유해 인자를 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 각 연구에서 제시하는 입자상 물질에 대한 평가결과는 단순히 공기 중 농도를 제시하는 것보다 시간 당 발생량(particles/min)을 제시하고 있다. 이는 각 프린팅 과정에서 사용되는 재질의 양과 시간, 측정 장소의 부피에 따라 공기 중 농도의 차이를 보일 수 있기 때문에, 시간 당 발생량을 제시하는 것이 실제 입자의 발생 수준을 비교, 평가하는데 있어 더 타당할 것으로 판단된다.

재료에 따른 프린팅 조건은 유해 인자의 발생에 직접적으로 영향을 미친다. 고온 조건에서 가동되는 프린팅 재료들은 급격한 열 분해과정으로 인해 프린팅 가동 직후 약 10-20분 내에 발생량이 가장 많은 것으로 보고되고 있는데(Kim et al., 2015; Azimi et al., 2016; Yi et al., 2016; Kwon et al., 2017; Vance et al., 2017), Deng et al.(2016)은 ABS 재료를 이용한 실험을 통해 가동 전 예열(pre-heating)로 초미세입자를 약 75%까지 감소시키는 것을 밝혔다. 한편, 동일한 종류의 필라멘트를 사용하더라도, 내부에 어떤 성분이 함

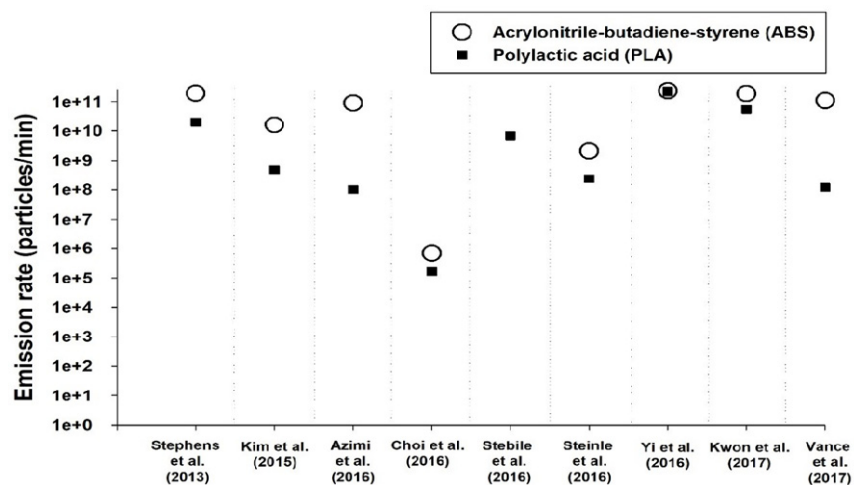


Figure 4. Emission rates(Y-axis: log-transformed) from FDM 3D printing using ABS and PLA filaments in previous studies

유되었는지, 그리고 색상에 따라서도 유해 인자의 발생 양상이 달라 질 수 있다. Stabile et al.(2017)은 나무 재질, 구리 분말, 대나무 섬유 등 재질은 동일하더라도 내부 충전 된 물질에 따른 다양한 종류의 PLA를 이용하여 프린팅 실험을 진행하였는데, 초미세입자의 발생량이 최대 10배까지 차이가 났다. Yi et al.(2016)은 각 4가지 색상의 ABS와 PLA를 이용하여 동일 물체를 인쇄한 결과 입자의 발생량이 색상에 따라 약 0.5-2배의 차이를 보였으며, 발생하는 입자의 크기도 차이가 있는 것으로 보고하였다.

입자상 물질과 더불어 공기 중 가스상물질에 대해 측정, 평가하고 있는데, 유해 물질의 범위가 매우 넓어 일부 특히 유해한 물질만을 대상으로 하거나, TVOCs

의 농도로 제시하고 있다. Afshar-Mohajer et al.(2015)의 연구에서는 프린팅 가동 중 발생하는 TVOC 농도가 노출 기준 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 것으로 보고하였으며, Kim et al.(2015)의 연구에서도 프린팅 과정 중 유기화합물과 알데하이드류를 배출되는 것으로 보고하였다. ABS 필라멘트를 이용하여 FDM 방식의 프린터로 인쇄하는 과정에서 약 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 TVOC가 발생하였으나, TVOCs는 검출되지 않았다. 또한 ABS의 경우 약 70 ppb의 포름알데히드가 배출된 반면, PLA를 이용했을 때는 약 160 ppb로 ABS보다 높은 농도를 배출하는 것으로 보고하였다. Azimi et al.(2016)은 필라멘트 종류에 따른 공기 중 개별 성분을 정량 하였는데, 종류에 따라 차이는 있으나 최대 $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 카프

Table 3. Summary of key methodologies and results on exposure assessment during 3D printing in previous studies

Reference	Country	Objectives	Targets	Methodologies	Key results
Stephens et al. (2013)	United States	- To measure size-resolved and total UFP concentrations during 3D printing in a small office space - To estimate individual size-resolved and total UFP emission rates	Ultrafine particles(UFPs)	- Room test(45 m^3) - Real time monitoring for UFP - Used materials: ABS, PLA - Printer type: FDM - Operating condition: N/A	- Emission rates of total UFP were approximately an order of magnitude higher for 3D printers utilizing ABS relative to PLA(high emitter) - Emission rates: up to 1.9×10^{11} particles/min for ABS and up to 2.0×10^{10} particles/min for PLA
Afshar-Mohajer et al. (2015)	United States	To determine particulate matter and VOC emission rates during binder jetting 3D printer	UFPs VOCs	- Laboratory room test(157 m^3) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: dry powder, binder solution and color bond - Printer type: Binder jetting - Operating condition: N/A	- Most emitted particle size range: 205-407 nm - Higher particle number concentration was up to 4.4×10^4 particles/min in a range from 352 to 407 nm - Generation of UFPs were 10^4 - 10^5 times lower than FDM printing using ABS and PLA filaments - Emission rate of TVOC exceeded PEL value ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Kim et al. (2015)	South Korea	To evaluate the emission of particulate matter and gaseous materials during FDM 3D printing	UFPs VOCs Aldehydes	- Chamber test(1 m^3) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS, PLA 1,2 - Printer type: FDM - Operating condition: 250°C or extruders for ABS and 210 - 220°C for two PLA filaments	- Concentrations of particulate and gaseous materials were influenced depending on the filament type and manufacturer - High concentrations of nanosized particles were emitted regardless of filament type - Several aldehydes including formaldehyde, phthalate and VOCs were emitted during printing - ABS emitted higher level of particles than PLA filament - Emission rates: 7.2×10^7 - 3.2×10^{10} (GM: 1.6×10^{10}) for ABS, 2.8×10^7 - 1.9×10^9 (GM: 4.9×10^8) for PLA 1 and 2.3×10^7 ~ 4.4×10^9 (GM: 4.3×10^8) for PLA 2
Zhou et al. (2015)	China	To investigate emission rates of UFP generated from the thermoplastic feedstock of desktop 3D printers	UFPs	- Clean room test(class 1,000; 60 m^3) - Real time monitoring - Used materials: ABS 1, 2 - Printer type: 2 FDM printers - Operating condition: N/A	- Major size of particles produced by 3D printer was PM_{10} - Higher particle concentrations in a range from 0.25 to $0.28 \mu\text{m}$ - Maximum particle concentrations : 2.4×10^4 particles/L for single printer operation, 4.0×10^4 particles/L for two printers operation
Azimi et al. (2016)	United States	To evaluate emission rates of particles and a broad range of specific VOCs during 3D printing	UFPs VOCs	- Chamber test(3.6 m^3) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS, PLA, HIPS, Nylon, Laybrick, Laywood, Polycarbonate, PCTPE, T-Glase - Printer type: 5 FDM printers - Operating condition: 190 - 240°C or extruders for each filament (bed: room temperature - 110°C)	- Particle emissions rapidly increased just after printing began and persisted for the first 10-20 min - UFP concentration: $58,000$ particles/ cm^3 (about 10 times higher than in indoor air) - Highest UFP emission rates from ABS filaments in a range 2.0×10^{10} - 9.0×10^{10} particles/min - Individual VOCs emitted in the largest quantities included caprolactam from nylon-based and imitation wood and brick filaments(ranging from ~ 2 to $\sim 180 \mu\text{g}/\text{min}$), styrene from ABS and HIPS filaments(ranging from ~ 10 to $\sim 110 \mu\text{g}/\text{min}$), and lactide from PLA filaments(ranging from ~ 4 to $\sim 5 \mu\text{g}/\text{min}$)

Reference	Country	Objectives	Targets	Methodologies	Key results
Choi (2016)	South Korea	To evaluate particle emissions according to the parameters such as extruder temperature, printing time, filaments	UFPs	<ul style="list-style-type: none"> - Chamber test(1 m³) - Real time monitoring - Used materials: ABS, PLA - Printer type:FDM - Operating condition: 230-25 0°C of extruder 	<ul style="list-style-type: none"> - Extruder temperature was the most crucial factor influencing the particle emission - ABS emitted higher level of particles than PLA - Highest concentration was emitted below 100 nm - Emission rates:1.1x10⁵ - 7.0x10⁵for ABS and 2.0x10⁴ - 1.7x10⁵for PLA
Deng et al. (2016)	United States	<ul style="list-style-type: none"> - To advance acurrent knowledge by focusing on correlations of particle emissions during 3D printing - To propose strategies to reduce particle emissions under the constraint of product quality 	UFPs	<ul style="list-style-type: none"> - Clean room test(8 m³) - Real time monitoring - Used materials: ABS, PLA - Printer type: FDM - Operating condition: 200-24 0°C or extruders(bed: 110°C) for ABS and 180-220°C for PLA(bed: 60°C) 	<ul style="list-style-type: none"> - ABS emitted higher level of particles than PLA - Higher nozzle temperature triggered substantially higher particle emission - Particle emissions: up to 10⁵ particles/cm³ at maximum nozzle temperature and decreased to 10,000 - 20,000 particles/cm³ for ABS and 20,000 - 40,000 particles/cm³ above 200°C for PLA - Pre-heating reduced particle emissions by 75% for ABS filament
Ryan & Hubbard (2016)	United States	To evaluate the process and chemicals associated with a commercial grade photo polymerization 3D printer	UFPs VOCs	<ul style="list-style-type: none"> - Room test(volume: N/A) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: N/A - Printer type: N/A - Operating condition: N/A 	<ul style="list-style-type: none"> - Air within the 3D printer enclosure yielded low but detectable concentrations of seven compounds; acetone, n-butane, 2-butanone, 1,4-dioxane, ethanol, IPA, toluene - All particulate measurements were very low, with none exceeding 0.025 mg/m³
Steinle (2016)	Switzerland	To identify a broad range of substances while printing a standard object with both ABS and PLA	UFPs VOCs PAHs	<ul style="list-style-type: none"> - Chamber(0.85 m³) and two rooms(180 and 30 m³) test - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS, PLA - Printer type: FDM - Operating condition: N/A 	<ul style="list-style-type: none"> - UFP emissions consist mainly of volatile droplets and seem to depend strongly on the type and state of the printer, the printing material and the printed object - Styrene, ethylbenzene, cyclohexanone can be considered as a VOC marker substance for printing with ABS, and methyl-methacrylate, n-butanol and cyclohexanone as a marker for printing with PLA - Emission rates are relatively low, so that 3D printing with a desktop FDM printer does not lead to a traceable pollution of a large, well-ventilated room;whereas UFA and, particularly VOC concentrations, can be elevated during and after printing in small, unventilated rooms - Emission rates:2.1x10⁹ particles/min for PLA and2.4x10⁸ particles/min for ABS
Yi et al. (2016)	United States	<ul style="list-style-type: none"> - To examine the effects of various factors on 3D printer particle emissions - To provide information for users to prevent or limit exposure 	UFPs	<ul style="list-style-type: none"> - Chamber(0.5 m³) and room test(32.7 m³) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS(2 colors), PLA(2 colors) - Printer type: FDM - Operating condition: 230°C (bed 110°C) for ABS, 215°C for PLA(bed temp turned off) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nanoparticles increased rapidly to peak of 3x10¹¹ particles/cm³ for a few minutes after printing - Effects of filaments on particle emissions: color / filament type - Emission rates of UFPs: 6.6x10¹⁰ - 2.3x10¹¹ particles/min for ABS and3.6x10¹⁰ - 2.2x10¹¹ particles/min for PLA - Higher concentration of particles were emitted during malfunction of printer than normal state
Azimi et al. (2017)	United States	<ul style="list-style-type: none"> - To predict the magnitudes of human exposures to airborne pollutants using previous published data - To model the impacts of several control strategies for reducing occupational exposures 	UFPs VOCs	<ul style="list-style-type: none"> - Modeling study using emission scenarios - Area section: adjacent zone, near distance zone, far zone 	<ul style="list-style-type: none"> - Modeled UFP and VOC concentrations within close or moderate proximity to 3D printers can exceed recommended exposure levels(as high as 80,000 particles/cm³) - Most effective strategies for reducing Both UFP and VOCs in order of impact 1) Installing a high flow spot ventilation system, 2) Operating printers in a sealed enclosure with filtration, 3) Installing a moderate flow spot ventilation system, 4) Operating stand-alone air cleaner proximity to 3D printer
Kwon et al. (2017)	South Korea	<ul style="list-style-type: none"> - To evaluate particle emission characteristics of various types of filaments - To develop and effective control method to reduce particle emissions during 3D printing 	UFPs	<ul style="list-style-type: none"> - Chamber test(2.5 m³) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS 1, 2, PLA, HIPS, Nylon, PVA, Laywood - Printer type: FDM - Operating condition: 190-26 5°C(bed 60-120°C) for each filament - Control method: enclosure, filtration 	<ul style="list-style-type: none"> - Particles emitted during 3D printing were primarily nanosized particles - Emission rate: 1x10⁷ - 1x10¹² particles/min for each filament at several temperature conditions - The most particles were emitted during the early period of 3D printing process - Extruder temperature was a critical factor in particle emission - The use of an enclosure with a HEPA filter can decrease the particle concentrations emitted during 3D printing

Reference	Country	Objectives	Targets	Methodologies	Key results
Stefaniak et al. (2017)	United States	<ul style="list-style-type: none"> - To identify factors that influence generation of airborne chemical contaminants from a desktop FDM 3D printer - To investigate printer- and consumable-related factors to address existing knowledge gaps 	VOCs Gas phase carbonyls Chemical compositions in particulate matters	<ul style="list-style-type: none"> - Chamber test(0.5 m³) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS(4 colors), PLA(4 colors) - Printer type: FDM - Operating condition: 230°C (bed 110°C) for ABS, 215°C for PLA (bed temp turned off) 	<ul style="list-style-type: none"> - TVOC emission rates from this 3D printer were influenced by a printer malfunction, filament type, and to a lesser extent, by filament color - 14 different VOCs were identified during 3D printing that were not present during laser printing - Carbonyl reaction products were likely formed from emissions of the 3D printer including 4-oxopentanal - Ultrafine particles generated by the 3-D printer using ABS and a laser printer contained chromium, a known toxicant
Stabile et al. (2017)	Italy	To evaluate particle emission and the main influencing parameters from a low-cost 3D printer	UFPs	<ul style="list-style-type: none"> - Room test(40 m³) - Real time monitoring - Used materials: 7 PLA filaments, 2 copolyesters, nylon, polyurethane - Printer type: FDM - Operating condition: 180-255°C for each filament 	<ul style="list-style-type: none"> - Most of the materials and temperatures tested during the printing processes were recognized to emit submicron particles - Mode of freshly emitted particles 10-30 nm - Emission rate: 1x10¹¹ - 3x10¹² particles/min for each filament - Particle emission was found to increase as a function of the printing temperature
Vance et al. (2017)	United States	<ul style="list-style-type: none"> - To measure the time- and size-resolved emissions of sub-micrometer aerosols during FDM 3D printing - To gain insight into the chemical composition of the emitted aerosols - To determine the aerosol concentrations under real-use conditions 	UFPs	<ul style="list-style-type: none"> - Chamber(0.52 m³) and room test (size N/A) - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: 2 ABS, 3PLA filaments - Printer type: FDM - Operating condition: 210-270°C for each filament 	<ul style="list-style-type: none"> - ABS filament released higher concentration of particles: mean size, 51-52 nm - PLA filament released smaller particles than ABS: mean size: 20-30 nm - Peak particle emissions occurred for initial printing time within 10 min - Emission rate: 1.3x10¹⁰ - 1.1x10¹¹ particles/min for ABS and 1.1x10⁸ - 1.6x10⁸ particles/min for PLA filaments - TVOCs: 0.53±0.01 ppm from ABS filaments
Wojtyła et al. (2017)	Italy	<ul style="list-style-type: none"> - To analyze the thermal degradation of polymer filaments used for 3D printers - To determine VOCs emission resulting from the operation of a commercially available thermoplastic filaments 	VOCs	<ul style="list-style-type: none"> - Tested area: N/A - Direct analysis of materials - Used materials: ABS, PLA, Polyethylene terephthalate, Nylon - Printer type: FDM - Operating condition: N/A 	<ul style="list-style-type: none"> - Filaments commonly used for 3D printing(ABS, PLA, nylon) can be a source of VOCs including styrene, butanol, cyclohexanone, ethylbenzene, and others - Heating ABS at temperature typical for 3D printing results in higher VOC emission than other filaments - VOC emission rate: 0.50 µmol/h - Styrene has accounted for more than 30% of total VOC emitted from ABS, while for PLA, methyl methacrylate has been detected as the predominant compound(44% of total VOCs emission)
Du Preez et al. (2018)	South Africa	<ul style="list-style-type: none"> - To identify printing-related activities and post-processing tasks associated with elevated concentrations of particles and organic chemicals - To measure personal exposures in a real-world manufacturing workplace 	UFPs VOCs	<ul style="list-style-type: none"> - Two rooms test - Printing room: 66 m³ - Office & prototyping room: 40 m³ - Real-time monitoring and offline sampling - Used materials: ABS, Polycarbonate - Printer type: FDM - Operating condition: N/A - Post processing: vapor polishing using acetone and chloroform 	<ul style="list-style-type: none"> - High levels of submicrometer-scaled particles increased during opening printer door, removing covers after printing and vapor polishing(up to 3.5x10⁵ particles/cm³) - Personal exposure to quantifiable levels of metals in particles <300 nm were 0.02 mg/m³ for aluminum, chromium, copper, iron and titanium during FDM printing - Personal exposures were 0.38 to 6.47 mg/m³ for acetone during acetone vapor polishing and 0.18 mg/m³ for chloroform during chloroform vapor polishing
Yang & Li (2018)	United States	To propose an emission evaluation methodology to theoretically estimate the TVOC emission for indoor environments equipped with SLA machines	VOCs	<ul style="list-style-type: none"> - Room test(123 m³) - Emission rate modeling - Real time monitoring and offline sampling - Used materials: Methyl methacrylate-based liquid resin - Printer type: SLA - Operating condition: N/A 	<ul style="list-style-type: none"> - The emission model showed to have less than 14 prediction error - TVOC emission levels are significantly higher than the reported value in literature and the recommended value proposed by environmental agencies - Two proposed emission control strategies have been implemented and lead to 44.1% and 71.1% reductions in the average TVOC concentration and 62.7% and 68.5% in the TVOC caused by AM production activities

Abbreviations: FDM, fused deposition modeling; SLA, stereolithography apparatus; ABS, acrylonitrile-butadiene-styrene; PLA, poly lactic acid; HIPS, high impact polystyrene; PVA, polyvinyl alcohol; PCTPE, plasticized copolyamide thermoplastic elastomer; UFPs, ultrafine particles; VOCs, Volatile organic compounds; TVOCs, Total VOCs; PAHs, polyaromatic hydrocarbons; IPA, isopropyl alcohol; FDM, fused deposition modeling; SLA, stereolithography apparatus; N/A, not available; PEL, permissible exposure limit.

로락탐(caprolactam)과 스티렌(styrene)이 검출되었고, PLA 필라멘트는 약 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 락티드(lactide, PLA의 주 성분)가 검출된 것으로 보고하였다. ABS와 PLA로부터 발생하는 VOCs의 개별 성분을 평가한 연구에서는 ABS의 지표 물질로 스티렌, 에틸벤젠(ethylbenzene), 사이클로헥사논(cyclohexanone), 메틸메타크릴레이트(methyl-methacrylate)와 노말부탄올(n-butanol), 사이클로헥사논을 PLA에서 발생하는 지표 물질로 지목하였다(Steinle, 2016). 그러나 재료에 따라 고온에 의한 열분해 과정에서 발생할 수 있는 물질이 다른 연구에서도 밝혀졌듯이, 알데하이드류, 카르보닐류(carbonyls) 등 여러 유해 인자가 발생할 수 있기 때문에 입자상 물질 외 공기 중 화학적 유해 물질에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

한편, 3D프린팅에 의해 발생하는 유해 인자를 효율적으로 저감하기 위한 여러 제어 방법들도 일부 연구에서 실험을 통해 제시되고 있다. Kwon et al.(2017)은 ABS와 PLA를 비롯해 HIPS, Nylon, PVA, Laywood를 이용하여 FDM 프린터로 인쇄하는 과정에서 발생하는 입자를 평가하였는데, 특히 제어 방법에 대한 평가도 동시에 수행하였다. 본 연구에서 헤파필터를 이용하여 발생원 부분을 밀폐 형태로 했을 때 입자의 제거효율이 가장 높은 것으로 보고하였다. 실제 프린팅 환경을 측정할 방법 외에 모델을 이용한 노출량 추정을 수행한 연구도 수행되었다. Azimi et al.(2017)의 연구에서는 기존 연구결과들을 모델화하여 노출량을 제시하였고, 이에 따라 직업적 노출을 최소화하기 위한 여러 제어 방법들에 대한 평가를 동시에 수행하였다. 이 연구에서 수행한 모델 결과 중 발생원에서 고성능 국소 배기 장치를 이용한 제거 방법, 필터를 이용한 밀폐형 장치의 이용, 프린터 주위 공기 정화기 설치 순으로 유해 인자 제거에 효과적인 것으로 나타났다. 최근에 발표된 Yang & Li(2018)의 연구에서는 SLA 프린팅 과정에서 TVOCs 발생을 평가하기 위한 기존의 이론적 모델들을 검증함으로써 발생량을 효율적으로 제어할 수 있는 두 개의 제어 방법을 제시하였다. 즉 이산화티타늄을 이용한 산화촉매 방법, 활성탄을 이용한 흡착법으로 개별 실험을 수행한 결과, 각 44%, 71%의 TVOCs 발생량이 감소하는 것을 확인하였으나, 실제 SLA 프린팅 과정에서는 각 63%, 68%가 감소된 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 현재까지 개발된 주요 3D 프린팅 기술과 재료, 그리고 노출 가능한 유해 인자 평가와 관련된 연구를 종합적으로 정리하였다. 앞으로도 개인용 3D 프린터의 보급이 지속적으로 이루어질 것으로 예상됨에 따라 과거 일부 산업용에 국한하여 다루어졌던 기술이 일반 대중에게까지 확대될 것은 분명하다. 신기술로 평가 받는 3D 프린팅 기술의 이면을 현 시점에서 명확히 인지하고 유해 인자 저감을 위한 노력이 필요하다. 지금까지 보고된 제어 기술은 3D 프린터의 밀폐와 헤파필터의 부착, 흡착제나 이산화티타늄 광촉매의 이용, 국소배기의 설치, 프린터 주변 공기 정화기의 설치 등이 제안되었으나 종합적인 연구는 부족하다. 현재 사용되는 프린팅 재료의 대부분이 폴리머 재질인 점, 그리고 보급형 프린터의 대부분이 200°C 이상의 고온에서 재료를 가공한다는 점, 어떤 재료를 가공하더라도 고열 조건에서 발생할 수 있는 물질이 현재까지 명확히 밝혀지지 않은 점을 종합적으로 고려했을 때, 프린팅 과정에서 발생하는 유해 물질에 대한 규명은 물론 이를 어떻게 제어할 것인가에 대한 기술적 노력이 병행될 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술정보통신부의 정보통신·방송연구개발사업(2017-0-01987)과 한국연구재단의 BK 21 플러스 사업(No. 5280-20180100)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- Afshar-Mohajer N, Wu CY, Ladun T, Rajon DA, Huang Y. Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *Build Environ* 2015;93:293-301.
- American Society for Testing and Materials(ASTM) International. Subcommittee F42. 91 on Terminology. Standard terminology for additive manufacturing technologies. 2012.
- Azimi P, Fazli T, Stephens B. Predicting concentrations of ultrafine particles and volatile organic compounds resulting from desktop 3D printer operation and the

- impact of potential control strategies. *J Ind Ecol* 2017; 21(S1):S107-S119.
- Azimi P, Zhao D, Pouzet C, Crain NE, Stephens B. Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. *Environ Sci Technol* 2016;50(3):1260-1268.
- Berman B. 3D printing: The new industrial revolution. *Bus Horizons* 2012;55(2):155-162.
- Cheng SF, Chen ML, Hung PC, Chen CJ, Mao IF. Olfactory loss in poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) plastic injection-moulding workers. *Occup Med* 2004;54(7):469-474.
- Cheves S. A pilot study to evaluate VOCs outgassed in polymer filaments used in 3D printing. 2014:1-26.
- Cho E, Lee H. Initiative of manufacturing innovation. *KiET Report Issue No.* 2014-344. 2014.
- Chohan JS, Singh R, Boparai KS, Penna R, Fraternali F. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications. *Compos Part B-Eng* 2017;117:138-149.
- Choi C. Characteristics of particle emissions according to parameter setting. Dissertation of Graduate School of Hanyang University, Seoul, Republic of Korea. 2016.
- Cimino D, Rollo G, Zanetti M, Bracco P. 3d printing technologies: are their materials safe for conservation treatments? *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. IOP Publishing, 012029.
- Cooper KG. *Rapid prototyping technology*, New York: Marcel Dekker Inc.; 2001.
- Deng Y, Cao SJ, Chen A, Guo Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. *Build Environ* 2016;104:311-319.
- Drummer D, Wudy K, Drexler M. Influence of energy input on degradation behavior of plastic components manufactured by selective laser melting. *Physics Pro* 2014;56:176-183.
- Du Preez S, Johnson A, LeBouf RF, Linde SJ, Stefaniak AB, et al. Exposures during industrial 3-D printing and post-processing tasks. *Rapid Prototyping J* 2018:1-8.
- Edgar J, Tint S. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. *Johnson Matthey Tech* 2015;59(3):193-198.
- Elliott A, Ivanova O, Williams C, Campbell T. An investigation of the effects of quantum dot nanoparticles on photopolymer resin for use in polyjet direct 3D printing. *Proceedings of the 2012 SFF Symposium*. 2012.
- Forrest M, Jolly A, Holding S, Richards S. Emissions from processing thermoplastics. *AnnOccup Hyg* 1995;39(1): 35-53.
- Groth C, Kravitz ND, Jones PE, Graham JW, Redmond WR. Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod* 2014;48(8):475-85.
- Huang SH, Liu P, Mokasdar A, Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *Int J Adv Manuf Tech* 2013;67(5-8):1191-1203.
- Jamshidian M, Tehrany EA, Imran M, Jacquot M, Desobry S. Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. *Compr Rev Food Sci F* 2010;9(5): 552-571.
- Jang BN, Wilkie CA. The thermal degradation of bisphenol A polycarbonate in air. *Thermochimica Acta* 2005;426 (1-2):73-84.
- Kim S, Shim W. Manufacturing innovation and material industry focusing on advanced materials and 3D printing. *KiET Report Issue No.* 2016-401. 2016.
- Kim Y, Yoon C, Ham S, Park J, Kim S, et al. Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation. *Environ Sci Technol* 2015;49(20):12044-12053.
- Klosterman D, Chartoff R, Graves G, Osborne N, Priore B. Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing. *Compos Part A-Appl S* 1998;29(9-10):1165-1174.
- Ko SH, Pan H, Grigoropoulos CP, Luscombe CK, Fréchet JM, et al. All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles. *Nanotechnology* 2007;18(34):345202.
- Kruth JP. Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP Ann-Manuf Technol* 1991;40(2): 603-614.
- Kruth JP, Vandenbroucke B, Van Vaerenbergh J, Naert I. Rapid manufacturing of dental prostheses by means of selective laser sintering/melting. *Proc AFPR S.* 2005; 4:176-186.
- Kuo CC, Liu LC, Teng WF, Chang HY, Chien FM, et al. Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers(ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Compos Part B-Eng* 2016;86:36-39.
- Kwon O, Yoon C, Ham S, Park J, Lee J, et al. Characterization and control of nanoparticle emission during 3D printing. *Environ Sci Technol* 2017;51(18):10357-10368.
- Lee JY, An J, Chua CK. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl Mater Today* 2017; 7:120-133.
- Lee K, Lee Y, Lee J, Lee J, Kim Y, et al. The impact of 3D printing on industries and countermeasures. *KiET Report Issue No.* 2016-817. 2016.

- Lithner D, Larsson Å, Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Sci Total Environ* 2011; 409(18):3309-3324.
- Mansour OY. Thermal degradation of some thermoplastic polymers in presence of lignin. *Polym-Plast Technol* 1992;31(9-10):747-758.
- Morvan S, Hochsmann R, Sakamoto M. ProMetal RCT(TM) process for fabrication of complex sand molds and sand cores. *Rapid Prototyping* 2005;11(2):1-7.
- Mueller B. Additive manufacturing technologies-Rapid prototyping to direct digital manufacturing. *Assembly Autom* 2012;32(2).
- Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D. Additive manufacturing(3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B-Eng* 2018;143(15):172-196.
- Noorani R. Rapid prototyping: principles and applications. New York: John Wiley and Sons Inc.; 2006.
- Pham D, Ji C. Design for stereolithography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J Mech Eng Sci* 2000;214(5):635-640.
- Rutkowski JV, Levin BC. Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers(ABS): Pyrolysis and combustion products and their toxicity-a review of the literature. *Fire Mater* 1986;10(3-4):93-105.
- Ryan T, Hubbard D. 3-D printing hazards: Literature review & preliminary hazard assessment. *Prof Saf* 2016;61(6): 56-62.
- Shirazi SFS, Gharekhani S, Mehrali M, Yarmand H, Metselaar HSC, et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Sci Technol Adv Mat* 2015;16(3):033502.
- Singh S, Ramakrishna S, Singh R. Material issues in additive manufacturing: A review. *J Manuf Process* 2017;25: 185-200.
- Srivatsan T, Sudarshan T. Additive manufacturing: innovations, advances, and applications, Boca Ranton: CRC Press Inc; 2015.
- Stabile L, Scungio M, Buonanno G, Arpino F, Ficco G. Airborne particle emission of a commercial 3D printer: The effect of filament material and printing temperature. *Indoor Air* 2017;27(2):398-408.
- Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent Mater* 2016;32(1):54-64.
- Stefaniak AB, LeBouf RF, Yi J, Ham J, Nurkewicz T, et al. Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer. *J Occup Env Hyg* 2017;14(7):540-550.
- Steinle P. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. *J Occup Env Hyg* 2016;13(2):121-132.
- Stephens B, Azimi P, El Orch Z, Ramos T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmos Environ* 2013;79:334-339.
- Tiganis B, Burn L, Davis P, Hill A. Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS) blends. *Polym Degrad Stabil* 2002;76(3):425-434.
- Unwin J, Coldwell MR, Keen C, McAlinden JJ. Airborne emissions of carcinogens and respiratory sensitizers during thermal processing of plastics. *Ann Occup Hyg* 2012;57(3):399-406.
- Vance ME, Pegues V, Van Montfrans S, Leng W, Marr LC. Aerosol emissions from fuse-deposition modeling 3D printers in a chamber and in real indoor environments. *Environ Sci Technol* 2017;51(17):9516-9523.
- Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Compos Part B-Eng* 2017;110:442-458.
- Wojtyła S, Klama P, Baran T. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *J Occup Env Hyg* 2017;14(6):D80-D85.
- Wong KV, Hernandez A. A review of additive manufacturing. *ISRN MechaEng* 2012:1-10.
- Yang Y, Li L. Total volatile organic compound emission evaluation and control for stereolithography additive manufacturing process. *J Clean Prod* 2018;170:1268-1278.
- Yi J, LeBouf RF, Duling MG, Nurkewicz T, Chen BT, et al. Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional(3D) printer. *J Toxic Env Health Part A* 2016;79(11):453-465.
- Zhou Y, Kong X, Chen A, Cao S. Investigation of ultrafine particle emissions of desktop 3D printers in the clean room. *Procedia Engineer* 2015;121:506-512.