

# 3D프린팅 산업 및 금속소재 사용시 유해인자 노출 연구 현황

박해동\* · 허이준\*\*

\*산업안전보건연구원 직업환경연구실

\*\*고려대학교 보건정책관리학부

## The Status of 3D Printing Industry and Researches on Exposure to Hazards When Using Metal Materials

Hae Dong Park\* · Leejun HUH\*\*

\*Work Environment Research Bureau, Occupational Safety and Health Research Institute

\*\*Division of Health Policy and Management, Korea University

### Abstract

We attempted to provide an overview of the laws and current state of the 3D printing industry in South Korea and around the world, using the annual industry surveys and the Wohler report. Additionally, we reviewed articles relating to the potential exposure to hazards associated with 3D printing using metal materials.

In South Korea, there were 406 3D printing-related businesses, employing 2,365 workers, and the market size was estimated at 455.9 billion won in 2021. Globally, the average growth rate of the 3D printing industry market over the past 10 years was 27.4%, and the market size was estimated at \$11.8 billion in 2019. The United States had the highest cumulative installation ratio of industrial 3D printers, followed by China, Japan, Germany, and South Korea. A total of 6,168 patents related to 3D printing were registered in the US between 2010 and 2019.

Harmful factors during metal 3D printing was mainly evaluated in the powder bed fusion and direct energy deposition printing types, and there is a case of material extrusion type with metal additive filaments. The number, mass, size distribution, and chemical composition of particles were mainly evaluated. Particle concentration increases during the opening of the chamber or post-processing. However, operating the 3D printer in a ventilated chamber can reduce particle concentration to the background level.

In order to have a safe and healthy environment for 3D printing, it is necessary to accumulate and apply knowledge through various studies.

**Keywords :** 3D Printing, Additive Manufacturing, Industry Status, Exposure, Hazard, Metal Material

### 1. 서론

3D프린팅(적층제조(AM, Additive manufacturing))은 4차 산업혁명을 이끄는 새로운 주요기술 중 하나로 주목받고 있으며, 적용범위를 빠르게 넓혀 나가고 있다. 사용되는

소재는 열가소성 플라스틱, 금속, 고분자화합물, 세라믹 등으로 확대되고 있고, 자동차, 항공, 기계, 의료산업 등의 다양한 분야에서 활용하기 위하여 시도되고 있다[1]. 미국 시험재료학회(ASTM) 및 국제표준(ISO)에서는 3D프린팅 방식을 7종으로 분류하고 있다: 재료압출(Material

<sup>†</sup>본 내용은 산업안전보건연구원의 자체수행 연구결과의 일부와 추가 자료를 이용하여 작성하였음.

<sup>†</sup>Corresponding Author : Hae Dong Park, Work environment research bureau, Occupational Safety and Health Research Institute. 400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, E-mail: workenv@kosha.or.kr

Received January 16, 2023; Revision March 14, 2023; Accepted March 22, 2023

extrusion), 광중합(Vat photo polymerization), 재료분사(Material jetting), 접착제분사(Binder jetting), 분말용융(Powder bed fusion), 직접용사(Direct energy deposition), 판재적층(Sheet lamination) [2]. 그러나 새로운 기술방식이 지속적으로 개발되고 있어서 전기화학방식 등과 같이 위의 분류체계로 분류가 어려운 방식도 존재한다.

최근 3D프린터(주로 열가소성 플라스틱재료를 재료압출방식에 의해서 사용)를 다루는 교사들에서 육중압 등 희귀압이 발생하여 사회적으로 이슈가 된바 있다. 이는 새로운 산업 또는 기술의 도입에 따라 새로운 형태의 유해인자 노출 가능성을 추정하게 한다. 사용자의 안전보건측면에서 3D프린팅과 관련된 연구는 최근에 일부 진행되고 있으나 자료가 많지 않다. 여러 가지 프린팅 방식 중 일반적으로 쉽게 구매하여 사용할 수 있는 재료압출방식의 프린터기에서 발생할 수 있는 입자상물질 및 휘발성유기화합물 등에 대한 실험실내 연구들이 일부 이루어져 왔다 [3] [4]. 또한, 3D프린팅작업의 건강영향을 평가하기 위하여 인과모델방법 또는 생애주기분석법 등이 제안되기도 하였으나, 다양한 프린팅방식 및 소재에 의한 건강영향에 대한 자료는 아직 미흡한 실정이다[5] [6].

사용하는 소재(폴리머, 금속, 레진, 생물학적 재료)의 종류, 프린팅 방식 및 전/후처리 방법 등에 따라 다양한 잠재적 유해인자의 노출이 가능하다. [7]. 3D프린팅에서 미세한 입자상물질(나노입자)은 소재에 첨가되거나 프린팅과정에서 부산물로 발생되어 흡입 또는 피부를 통해서 사람에게 노출될 수 있다[8]. 산업현장에서는 물리적 특성을 고려한 금속소재의 사용이 필요하며, 주로 분말용융 및 직접용사방식의 프린터기가 개발되어 보급되고 있다. 이러한 방식에서는 금속분말(일반적으로 직경 20~100  $\mu\text{m}$ ) 또는 와이어 형태의 금속이 사용된다. 미세한 금속분말의 사용에서는 화재폭발의 위험이 있으며, 용융 후 발생하는 금속나노입자는 흡입에 의한 건강영향이 발생할 수 있다. 나노입자의 건강영향에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않았으나, 동일한 성분의 입자라 하더라도 입자의 크기에 따라서 건강영향이 달라질 것으로 예측되고 있다 [9]. 따라서, 프린팅과정에서 발생하는 금속 나노입자의 노출에 의한 건강영향에 대해서는 보수적인 추정을 할 필요가 있다. 또한 Filon 등에 의하면, 직경이 4  $\mu\text{m}$ 미만인 입자는 피부를 통과할 수 있고, 4~20  $\mu\text{m}$ 의 입자는 손상된 피부를 통과할 수 있다. 피부에 접촉된 금속 나노입자는 피부반응, 면역반응 및 시스템적 영향을 미칠 수 있으나, 구체적인 건강영향에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다 [10]. 3D프린팅과정에서 발생할 수 있는 나노입자 등 유해인자의 노출기준은 이산화티타늄(미국 국립산업안전보건연구원, 0.3  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 및 벤치마크기준(유럽, 입자수기준, 입자 밀도에 따라서 20,000  $\#/\text{cm}^3$  또는 40,000  $\#/\text{cm}^3$ ) 등

이 일부 제안되어 있으나, 매우 제한적이며 건강영향을 반영한 법적인 노출기준은 없는 상태이다[11].

본 논문에서는 새롭게 성장하고 있는 국내외 3D프린팅 산업의 현황에 대해서 살펴보고, 특히 산업현장에서 중요하게 사용될 금속소재를 활용한 프린팅작업에서 유해인자의 노출수준 및 건강영향에 대한 연구결과를 검토하고자 하였다.

## 2. 연구대상 및 방법

### 2.1 3D프린팅 산업현황

국내의 3D프린팅 관련법령 중 안전보건관련 주요내용을 정리하였으며[12] [13] [14], 국가 및 민간자격정보현황을 살펴보았다[15] [16].

국내 산업현황은 과학기술정보통신부에서 매년 실시하고 있는 “3D프린팅 산업 실태조사”(이하, 실태조사) 자료 중 2016년부터 2021년까지 시행한 결과 중 주요내용을 정리하였다[17]. 실태조사는 공급사와 수요사로 나누며, 공급사는 장비, 소재, 소프트웨어, 유통 서비스 등의 업체 전수를 대상으로 하며, 수요사는 장비도입기업 및 출력서비스 활용기업 등을 할당표본추출법으로 추출하여 조사하였다.

국외 산업현황은 Wohlers Associates Inc. 에서 매년 조사하여 발표하는 Wohlers report (2018, 2020)의 자료를 참조하여 주요내용을 정리하였다[18] [19]. 동 리포트는 전 세계적으로 129개의 서비스 제공자, 114개의 산업용 프린터장비 제조사 및 전문가(79명) 등으로부터 수집된 정보를 이용하여 만들어진 자료이다(2020년). 3D프린팅의 역사, 주요산업의 특성, 소재 및 프린팅방식, 산업성장, 생산품 특성 등을 기술하고 있다. 또한 조사에 참여한 각 나라의 현황을 제공하고 있으며, 연구 및 개발분야의 흐름과 향후 산업예측을 포함하고 있고, 제조사별 장비보급현황 및 주요장비의 규격 등도 보여주고 있다.

### 2.2 금속 3D프린팅 유해인자 연구현황

산업용 3D프린팅에서 금속소재의 이용이 점차 중요해지고 있으며, 확대보급되고 있다. 이에 금속 3D프린팅관련 문헌을 한국산업보건학회지 및 국내학술논문검색(kiss. kstudy.com)에서 금속분말, 금속 3D, 나노입자, 노출 등을 조합하여 검색하였다. 그러나, 소재의 물성 및 프린팅방식 등에 대한 연구만 있었으며, 사용자의 유해인자 노출 등에 대한 국내 자료는 없었다.

국외학술자료는 구글학술검색, Elsevier, ProQuest 논문

검색에서 metal 3D, additive manufacturing, nanoparticle, exposure, assessment를 조합하여 검색한 후, 금속소재를 사용한 3D 프린팅에서 유해인자 또는 건강영향에 대한 연구자료를 선별하여 정리하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 3D프린팅 산업현황

##### 3.1.1 국내 관계법령 등

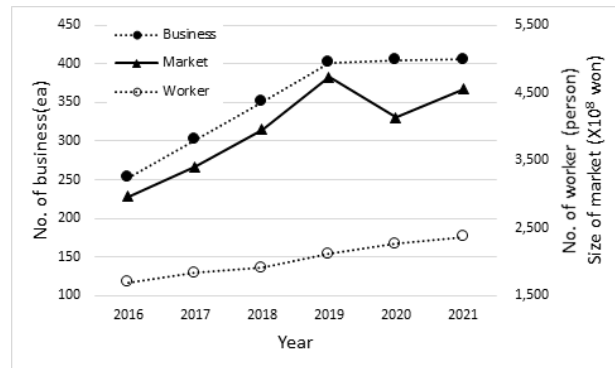
2015년 12월 제정되어 2016년 12월 시행된 「삼차원프린팅산업 진흥법」은 하위 시행령과 시행규칙 및 3개의 관련 고시를 갖추고 있다. 삼차원프린팅산업의 기반조성을 위해서 전문인력양성, 기술개발촉진, 표준화, 품질인증, 시범사업, 국제협력, 종합지원센터 운영 및 산업활성화에 대해서 규정하고 있다. 또한, 삼차원프린팅 산업의 이용자 보호를 위해서, 서비스사업은 신고(자본금 1억 이하 또는 근로자 수 5인 이하인 경우 면제)하도록 하고 있으며, 제조물책임 및 이용자보호에 대한 조문도 갖추고 있다. 안전교육은 서비스사업의 대표자는 신규 8시간과 보수 6시간(2년마다)이고, 종업원은 신규 16시간과 보수 6시간(매년)으로 규정되어 있으며, 관련협회에서 교육을 주관하고 있다. 안전교육의 주요내용은 법령, 프린터 종류/특성/안전작업방법, 소재 유해성, 보호구, 작업환경관리, 비상대응 등이다. 정부는 3년마다 산업진흥을 위한 기본계획을 수립·시행하고 있다(2차:2020~2022) [12] [13] [14].

3D프린팅 관련 국가기술자격은 2종이며, '21년말 기준으로 3D프린터운용기능사 자격취득자는 6,874명이며, 3D프린터개발산업기사 자격취득자는 69명 이었다[15]. 민간자격정보서비스(pgi.or.kr)에서 3D프린팅관련으로 등록된 자격은 총 101종 이었으며, 현황을 제공하는 15종의 자격에서 총 4,493명의 취득자가 있었다(21.4.7. 기준) [16].

##### 3.1.2 국내 현황

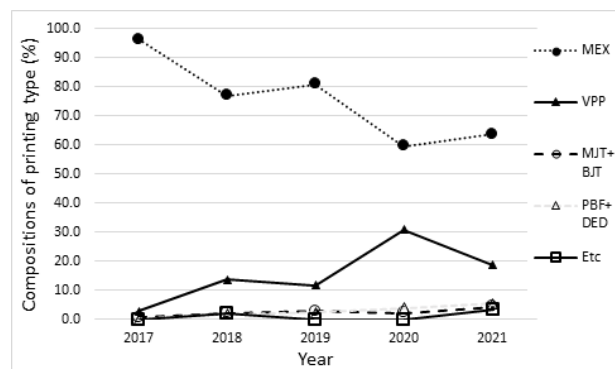
국내 3D프린팅 산업현황의 실태조사결과, 사업체 수, 종사자 수 및 시장의 규모는 아래의 [Figure 1]과 같았다. 사업체 수는 꾸준히 증가하였으며, 2016년 253개소에서 2019년 402개소로 증가속도가 빨랐으나, 이후에는 증가속도가 느려져 2021년 406개소로 조사되었다. 분야별 사업체 수는 장비 65개소, 소재 16개소, 소프트웨어 14개

소, 서비스 178개소, 유통 133개소였다(2021년 기준). 종사자 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보였으며, 2016년 1,701명에서 2021년 2,365명으로 증가하였다. 시장의 규모는 2019년에 최대(4,730억원)를 보였다가 이후 작아져서 2021년 추정규모는 4,559억원이었다.



[Figure 1] Domestic 3D printing industry

방식별 프린터의 도입현황은 아래 [Figure 2]와 같았다. 재료압출방식(MEX)은 2017년 96%로 대다수를 차지하였으나 점차 비율이 감소하여 2021년에는 64% 수준이었다. 광중합방식(VPP)의 프린터는 2021년 19% 수준으로 증가하였다. 분사방식(재료분사(MJT), 접착제분사(BJT)과 주로 금속소재에 많이 사용되는 방식(분말융용방식(PBF), 직접용사(DED))은 연평균 약 2~3% 수준이었으나, 증가하는 경향이 있었다.

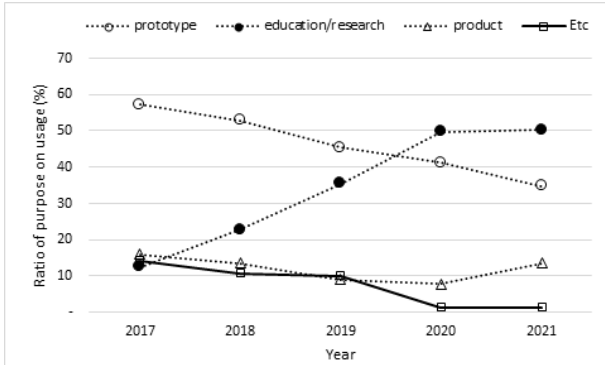


[Figure 2] Ratio of equipment by printing type

(MEX: material extrusion, VPP: vat photo polymerization, MJT: material jetting, BJT: binder jetting, PBF: powder bed fusion, DED: Direct energy deposition)

장비도입기업들의 활용목적은 아래 [Figure 3]과 같았다. 시제품제작을 목적으로 한 비율은 2017년 가장 높았으나(57%) 점차 줄어들어 35% 수준(2021년)이 되었다. 이에 반해, 교육/연구를 목적으로 한 비율은 13%에서 50%로 증가하였다. 완제품생산을 목적으로 한 경우는 평

균 12% 수준이었으며, 기타의 목적으로 조사된 비율은 2020년부터 1% 수준으로 감소하였다.



[Figure 3] Purpose of 3D printing

### 3.1.3 국외 현황

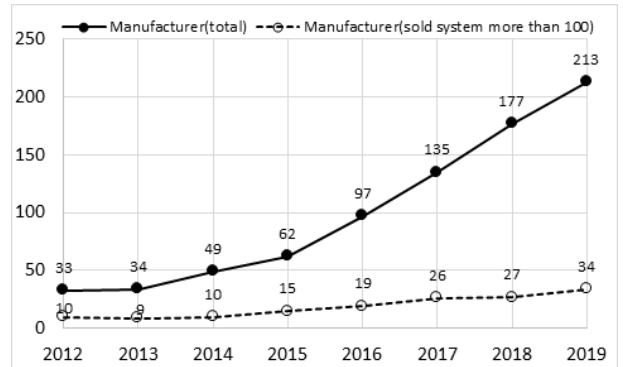
최근 10년간(2010~2019) 3D프린팅 산업의 성장률은 평균 27.4%(표준편차 6.3)였다. 2019년 3D 프린팅 산업 시장의 추정치는 118억 달러에 달하며, 이는 2018년에 비해서 21.2% 증가한 것이다. 시장의 규모추정에는 프린터(산업용&데스크탑), 재료, 소프트웨어, 유지보수 계약, 교육, 세미나, 전시회, 광고, 출판, 컨설팅 등은 포함하였으며, 개별 기업내에서 3D 프린팅개발로 소비된 비용, 투자사의 10억 달러 이상의 투자 등은 제외되었다.

주요 국가별 산업용 3D프린팅장비(가격 5,000달러 이상)의 누적 설치비율은 아래 <Table 1>과 같았다. 미국의 비율이 약 35%로 가장 높으며, 중국, 일본, 독일이 8~11%의 비율을 보였고, 대한민국, 영국, 이탈리아, 프랑스가 3~4%의 비율이었다. 2018년 대비 2020년 프린팅 장비 누적 설치비율은 미국에서 감소하였으며(-1.5%), 기타(+1.2%), 대한민국(+0.3%), 중국(+0.2%) 등에서는 증가하였다. 2019년 산업용 3D프린팅장비의 판매대수는 22,115대로 추정되었으며, 데스크탑장비(가격 5,000달러 미만)는 약 705,694대로 추정되었다.

산업용 3D프린팅장비의 제조업체현황은 [Figure 4]와 같았다. 2012년부터 지속적으로 증가하여 2019년 213개였으며, 미국(47), 중국(32), 독일(25), 일본(12) 등의 순으로 많으며, 대한민국에는 4개가 있었다. 매년 100대 이상의 장비를 판매한 업체의 수도 2010년 10개에서 2019년 34개로 증가하였다.

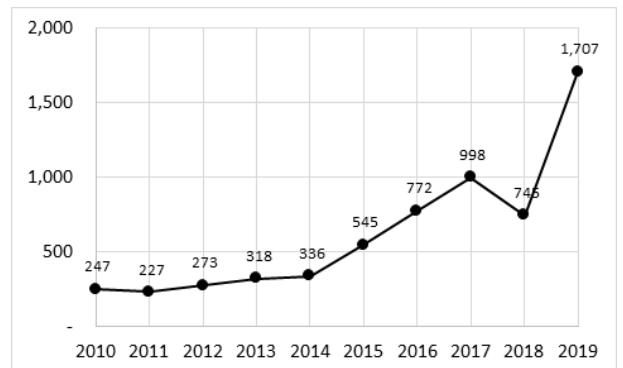
<Table 1> Installations by country (unit:%)

Country	2018	2020
US	35.9	34.4
China	10.6	10.8
Japan	9.3	9.3
Germany	8.4	8.2
Korea	3.7	4.0
UK	4.1	3.9
Italy	3.3	3.5
France	3.1	3.0
Canada	1.8	1.7
Russia	1.4	1.6
Taiwan	1.5	1.4
Turkey	1.3	1.4
Spain	1.2	1.3
Sweden	1.1	1.0
other	13.3	14.5



[Figure 4] Industrial 3D printing system manufacturers(Wohlers report 2020)

미국에서 3D프린팅관련으로 최근 10년간 등록된 특허는 총 6,168건이었으며, 2015년 이후로 특허의 증가폭이 커졌다.[Figure 5]



[Figure 5] Issued patents in US (Wohlers report 2020)

분야별 특허의 연간 비율은 <Table 2>와 같았으며, 의료/치과(17.6%), 항공(12.9%), 소비재/전자(12.7%), 산업기계(11.3%), 자동차(9.9%)의 비율이 높았다. 최근 비율이 증가하는 분야는 하드웨어/방법, 재료 및 소비재/전자였으며, 비율이 감소하는 분야는 건축, 의료/치과 및 자동차였다.

<Table 2> Categorized patents by sector(unit:%)

Sector	'11~13	'14~16	'17~19
hardware/methods	2.3	4.3	13.3
materials	3.0	3.0	6.7
software	7.3	5.0	6.7
academic institutions	2.7	2.7	2.7
aerospace	13.7	12.7	12.3
architectural	10.3	10.7	7.0
consumer products /electronics	10.0	13.3	14.7
government/military	0.7	0.7	1.3
industrial/business machines	12.3	10.3	11.3
medical/dental	20.3	20.3	12.3
motor vehicles	12.3	11.3	6.0
other	5.7	5.7	6.0

### 3.2 금속 3D프린팅 유해인자 연구현황

금속소재를 사용하는 3D프린팅과 관련하여 유해인자의 노출 또는 생물학적 노출지표 등 건강영향에 대한 연구

자료는 총 7건이었으며, 주요내용은 <Table 3>과 같았다.

분말용융방식의 프린팅 룸에서 5회 반복하여 평가한 흡입성분진의 평균 중량농도는 프린터기 내부에서 2.37 mg/m<sup>3</sup>였고, 언팩킹 및 클리닝을 하는 동안 작업자의 노출수준은 1.73 mg/m<sup>3</sup> 이었으며, 프린터기 가동동안 지역에서 농도는 1.28 mg/m<sup>3</sup>이었고, 언팩킹 및 클리닝 동안은 0.77 mg/m<sup>3</sup>이었다. 입자수의 배경농도는 10<sup>4</sup> #/cm<sup>3</sup> 이하였으며, 프린터기 가동 중 프린터기 내부에서 입자수 농도는 배경농도보다 2~10배 높았다. 사용된 소재(AlSi10Mg)의 주요 성분 중 알루미늄과 마그네슘이 사용빈도에 따라서 함량이 감소하는 반면 실리카는 높아졌는데, 이는 용융온도가 실리카의 증발온도에 도달하지 않기 때문이라고 설명하였다[20].

용융압출방식의 프린터기를 챔버(0.5 m<sup>3</sup>)에서 실험하여 입자상물질의 배출을 평가하였다. 배출되는 입자의 평균농도는 ABS-W(텅스텐을 포함한 ABS 필라멘트, 3.05×10<sup>8</sup> #/min), PLA-Cu(구리를 포함한 PLA 필라멘트, 4.43×10<sup>7</sup> #/min), ABS(2.06×10<sup>7</sup> #/min), PLA(1.64×10<sup>6</sup> #/min)순이었다. ABS 필라멘트가 PLA 필라멘트 보다 입자상물질의 배출량이 많았으며, 금속이 첨가된 필라멘트가 미첨가 필라멘트보다 배출량이 많았다. 프린팅 온도(ABS 240°C, PLA 220°C)가 입자상물질 배출량에 영향을 주는 것으로 판단하였다. 프린팅노즐의 워업 시간동안 발생하는 입자(입자수중위직경: 14.1~20.0 nm)가 프린팅작업동안 발생하는 입자(입자수중위직경: 22.7~57.2 nm)에 비해서 직경이 더 작았다[21].

스테인레스스틸을 사용하는 3가지 방식(PBF, DED,

<Table 3> Articles related to exposure at metal additive manufacturing

Author (year)	Printing type & Materials	Main contents
Azzougagh et al. ( '21) [20]	PBF, aluminum alloy	number, mass, and shape, size distribution and chemical compositions of inhalable particle
Alberts et al. ( '21) [21]	MEX, ABS, PLA, and metal additive (ABS-W, PLA-Cu)	number, size distribution, emission rate, surface area, median diameter(number, surface area, mass) of particles
Noskov et al. ( '20) [22]	PBF, DED, laser cladding, stainless steel material.	primary particle size distribution and chemical composition
Jensen et al. ( '20) [23]	PBF, titanium powder(Ti6Al4V)	number, mass, size distribution, lung deposit surface area, chemical composition of particles
Bau et al. ( '19) [24]	DED, stainless steel(316L), Inconel 625	particle emission from source, number, mass, and size distribution, chemical composition of particles
Ljunggren et al. ( '19) [25]	PBF & Welding, Nickel alloy	airborne particle concentration(mass and number counting), dermal exposure, metals in urine
Ljunggren et al. ( '21) [26]	PBF & Welding, Nickel alloy	work environment questionnaire survey, metals in blood and urine, clinical test(lung, hepatic, cardiovascular, and renal function)

PBF: powder bed fusion, MEX: material extrusion, ABS: acrylonitrile butadiene styrene, PLA: polylactic acid, DED: direct energy deposition

Lazer Cladding(LC))의 프린팅에서 발생하는 입자의 특성에 대하여 평가하였다. 공기 중 금속성분의 농도는 PBF(Fe 0.98, Cr 0.24 mg/m<sup>3</sup>), DED(Fe 0.60, Cr 0.27 mg/m<sup>3</sup>), LC(Fe 0.13, Cr 0.02 mg/m<sup>3</sup>)의 순으로 높았으며, 1차입자에서 등가투영면적직경이 4~16 nm인 경우가 대다수였으며, 중위수 직경은 8.0~11.2 nm였다. 프린터 내부의 공기유동을 수치적 모델링으로 해석하여 입자의 형성특성을 관찰하였다[22].

분말용융방식에서 5개 작업별(프린팅챔버비우기, 분말 제거(폐쇄), 분말제거(열린공간), 오븐에서 가열, 그라인딩) 입자상물질의 발생특성을 평가하였다. 작업자 호흡영역에서 평가한 입자수 농도는 그라인딩( $3.6 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>)과 프린팅챔버비우기( $4.2 \times 10^3$  #/cm<sup>3</sup>)에서 높았으며, 200 nm 이하의 입자가 대부분이었다. 프린터기 주변에서 평가한 호흡성분진농도는 50.4  $\mu$ g/m<sup>3</sup>(8시간 시간가중평균 농도 0.02 mg/m<sup>3</sup>)였다[23].

환기설비(환기량: 330 m<sup>3</sup>/h)를 갖춘 챔버(12 m<sup>3</sup>)내에 설치된 직접용사방식의 3D프린팅 작업에서 입자상물질의 발생특성을 평가하였다. 발생원(챔버 내)에서 입자 수가 증가하였으나, 외부에서는 증가하지 않았으며, 소재의 종류에 따라서 발생 입자수는 유의한 차이가 있었다(Inconel 625 > 316L). 노즐의 직경에 따라서, 직경이 작은 경우(1 mm, 소재사용량 ~5 g/min)가 큰 경우(2.4 mm, 소재사용량 ~17 g/min)보다 발생하는 입자수가 많았으며, 최빈 직경은 작았고(50 nm, 80 nm), 분진의 중량도 적었다. 발생분진입자수의 95% 이상이 250 nm미만이었으며, 분진 중 호흡성분진의 중량비율은 59~83%였다. 챔버의 문을 개방하는 순간 작업자의 노출농도가 높아졌으며, 프린팅작업 종료 직후 입자수 농도에 비해서 8분간 환기시스템을 가동한 후 농도는 10% 수준으로 낮아졌다[24].

분말용융방식 3D프린팅과 용접작업을 2년간 평가하였고, 중간에 노출감소를 위한 대책을 적용하여 비교하였다. 프린팅작업자는 용접작업자에 비해서 코발트와 니켈의 노출은 높고, 망간의 노출은 적었다. 용접작업이 프린팅작업보다 발생입자 수가 많았으며, 프린팅작업에서는 제품에서 분말을 제거하거나, 적층판에서 떼어낼 때 높은 농도를 보였다. 소변 중 금속의 농도는 프린팅작업자가 대조군에 비해서 크롬, 코발트 및 니켈에서 높았으며, 코발트 및 니켈은 2년차의 농도가 1년차의 농도보다 낮았다. 일부 프린팅작업자의 손에서 금속성분이 검출되었다[25].

설문조사에서 프린팅작업자는 대조군에 비해서 작업환경 중 공기흐름과 소음에 대한 불편함을 더 많이 경험하였고, 피부증상은 약 4배 더 많았다. 혈액 및 소변 중 코발트의 농도는 유의한 상관관계를 보였다. 다변량모델을 이용하여 노출과 의학적지표간의 관계를 분석한 결과, 8개의 의학적지표에서 프린팅작업자가 대조군에 비해서 높은 값

을 보여 향후 생물학적지표로서의 가능성을 보였다. 개선된 개인보호구 착용 및 작업 가이드 시행에 의해서 일부 금속의 혈중 농도가 감소한 것으로 판단되었다[26].

## 4. 결론

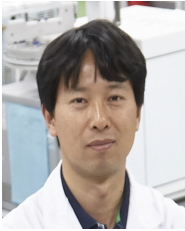
일반적으로 새로운 기술의 도입은 가격이나 품질 경쟁력 측면에서 우선적으로 고려되나, 사용자의 안전과 건강 측면의 고려는 미흡하다. 3D프린팅 기술의 발전과 산업규모의 증가는 지속될 것으로 예상된다. 국내에서도 3D프린팅 산업육성을 위한 정부의 정책적 지원들이 있다. 특히, 3D프린팅의 안전하고 건강한 사용환경 조성을 위해서 가이드(재료압출방식 중심)를 개발하여 보급하고 있다[27]. 향후, 다양한 프린팅방식에 따른 유해인자와 건강 영향 등 안전보건연구의 수행과 안전보건 가이드의 개발 보급이 필요할 것으로 생각된다.

## 5. References

- [1] J. H. Park, H. J. Jeon, Y. S. Oh, K. H. Park, C. S. Yoon(2018), "Understanding three-dimensional printing technology, evaluation, and control of hazardous exposure agents." J. Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 28(3): 241-256.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM) (2012), "International. Subcommittee F42. 91 on Terminology." Standard terminology for additive manufacturing technologies.
- [3] A. B. Stefaniak, A. R. Johnson, S. D. Preez, D. R. Hammond, J. R. Wells, J. E. Ham, R. F. LeBouf, K. W. Menchaca, S. B. Martin, M. G. Duling, L. N. Bowers, A. K. Knepp, F. C. Su, D. J. Beer, J. L. Plessis(2019), "Evaluation of emissions and exposures at workplaces using desktop 3-dimensional printers." J. Chemical Health & Safety, March/April:19-30.
- [4] A. B. Stefaniak, S. D. Preez, J. L. Plessis(2021), "Additive manufacturing for occupational hygiene: A comprehensive review of processes, emissions, & exposures." J. Toxicol Environ Health B Crit Rev., 1-50.
- [5] H. P. N. Nagarajan, S. Panicker, H. Mokhtarian, E. Coatanea, K. R. Haapala(2020), "Improving worker

- health and safety in wire arc additive manufacturing: A graph-based approach." *Procedia CIRP*, 90:461-466.
- [6] J. I. Arrizubieta, O. Ukar, M. Ostolaza, A. Mugica (2020), "Study of the environmental implications of using metal powder in additive manufacturing and its handling." *Metals*, 10:261.
- [7] G. A. Roth, C. L. Geraci, A. Stefaniak, V. Murashov, J. Howard(2019), "Potential occupational hazards of additive manufacturing." *J Occup Env Hyg*, 16(5):321-328.
- [8] M. Sousa, P. Arezes, F. Silva(2019), "Nanomaterials exposure as an occupational risk in metal additive manufacturing." *J Physics: Conf. Series*, 1323:012013.
- [9] R. Chen, H. Yin, I. S. Cole, S. Shen, X. Zhou, Y. Wang, S. Tang(2020), "Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review." *Chemosphere*, 259:127-452.
- [10] F. L. Filon, M. Mauro, G. Adami, M. Bovenzi, M. Crosera(2015), "Nanoparticles skin absorption: New aspects for a safety profile evaluation." *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 72(2):310-322.
- [11] A. A. Taylor, E. L. Freeman, M. J. C. Ploeg(2021), "Regulatory developments and their impacts to the nano-industry: A case study for nano-additives in 3D printing." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207:111458.
- [12] Ministry of Science and ICT(2017a), Three-dimensional printing industry promotion act.
- [13] Ministry of Science and ICT(2019), Enforcement decree of the three-dimensional printing industry promotion act.
- [14] Ministry of Science and ICT(2017b), Implementing rules of the three-dimensional printing industry promotion act.
- [15] Human Resources Development Service of Korea, Available from: <http://q-net.or.kr/man001.do?&gSite=Q&gld>
- [16] Private Qualifications Information, Available from: <http://pgi.or.kr/indexMain.do>
- [17] Ministry of Science and ICT, National IT Industry Promotion Agency(2016-2021), Survey on 3D printing industry.
- [18] Wohlers Associates(2018), Wohlers report 3D printing and additive manufacturing state of the industry Annual worldwide progress report.
- [19] Wohlers Associates(2020), Wohlers report 3D printing and additive manufacturing global state of the industry.
- [20] M. N. Azzougagh, F. X. Keller, E. Cabrol, M. Cici J. Pourchez(2021), "Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powder bed fusion of aluminum alloy." *J Occup Env Hyg*, 74:1-14.
- [21] E. Alberts, M. Ballentine, E. Barnes, A. Kennedy(2021), "Impact of metal additives on particle emission profiles from a fused filament fabrication 3D printer." *Atmospheric Environment*, 244:1-10.
- [22] A. Noskov, T. K. Ervik, I. Tsvil'skiy, A. Gilmudinov, Y. Thomassen(2020), "Characterization of ultrafine particles emitted during laser-based additive manufacturing of metal parts." *Scientific Reports*, 10:20989.
- [23] A. C. O. Jensen, H. Harboe, A. Brostrom, K. A. Jensen, A. S. Fonseca(2020), "Nanoparticle exposure and workplace measurements during processes related to 3D printing of a metal object." *Frontiers in Public Health*, 8:608718.
- [24] S. Bau, D. Rousset, R. Payet, F. X. Keller(2019), "Characterizing particle emissions from a direct energy deposition additive manufacturing process and associated occupational exposure to airborne particles." *J Occup Env Hyg*, 17:59-72.
- [25] S. A. Ljunggren, H. Karlsson, B. Stahlbom, B. Krapic, L. Fornander, L. E. Karlsson, B. Bergstrom, E. Nordenberg, T. K. Ervik, P. Graff(2019), "Biomonitoring of metal exposure during additive manufacturing(3D printing)." *Safety and Health at Work*, 10:518-526.
- [26] S. A. Ljunggren, L. J. Ward, P. Graff, A. Persson, M. L. Lind, H. Karlsson(2021), "Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects." *Plos One*, 16(3):e0218601.
- [27] Ministry of Science and ICT(2022), Safety usage guideline for 3D printer. Available from: <http://msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&bbsSeqNo=96&nttSeqNo=3179581>

## 저자 소개



### 박 해 동

울산대학교 안전보건학과 공학박사, 현재 산업 안전보건연구원의 연구위원으로 근무 중  
관심분야 : 산업안전보건, 작업환경평가, 나노 입자 유해성, 3D 프린팅 등



### 허 이 준

고려대학교 보건정책관리학부 보건학사, 경제학사 취득  
관심분야 : 보건경제, 보건법, 보건정책