

3D프린팅 공정에서 발생된 건강영향, 독성 평가 및 관리방안에 대한 미니리뷰 - 재료압출, 액조광경화, 분말베드융해 중심으로

김지연 · 김성호*

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

A Mini Review of Health Effects, Toxicological Assessments, and Management Strategies in 3D Printing Processes: Focus on Material Extrusion, Vat Photopolymerization, and Powder Bed Fusion

Jiyeon Kim · Sungho Kim*

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: This mini review aimed to summarize the hazardous agents emitted from 3D printing technologies, specifically material extrusion (MEX), vat photopolymerization (VPP), and powder bed fusion (PBF). It also sought to evaluate the associated human health effects based on currently available toxicological, epidemiological, and field investigation evidence.

Methods: The mini review used a structured literature search and selection process to improve transparency, but it was not conducted as a formal systematic review and no study quality appraisal or risk-of-bias assessment was performed. Seven additive manufacturing processes defined by ASTM F42 were initially screened. Domestic and international databases (PubMed, Google Scholar, RISS, KISS, KCI) were searched using keywords related to 3D printing emissions, health impacts, nanoparticles, VOCs, and metal exposure. Included studies comprised toxicological studies, field measurements, biomonitoring studies, surveys, and case reports reporting hazardous emissions and/or adverse health outcomes in 3D printing environments. Extracted information was categorized by printing technology, emitted agents, measurement method, exposure scenario, and health effect indicators.


Results: Distinct exposure characteristics and health implications were identified across the three major technologies. MEX/FDM systems frequently emitted ultrafine particles (UFPs) and volatile organic compounds (VOCs), including styrene, formaldehyde, and acetaldehyde, particularly from ABS filaments. These emissions were linked to respiratory symptoms, asthma, oxidative stress, endothelial dysfunction, and cytotoxicity in cellular and animal studies. VPP systems generated exposure to acrylate-based photopolymer resins and alcohols used in post-processing, with documented cases of occupational allergic contact dermatitis. PBF systems included both polymer-powder and metal-powder processes. A case of hypersensitivity pneumonitis was reported in nylon powder-based SLS work, while metal PBF studies reported exposure to Ni, Cr, and Co and changes in biomonitoring and clinical markers. Across all technologies, insufficient ventilation, enclosed indoor spaces, and repeated long-term exposure were identified as key factors increasing health risks. Case reports from educational settings highlighted potential associations between long-term exposure in poorly ventilated educational settings and rare cancers, although causal inference remains limited.


Conclusions: Current evidence indicates that 3D printing emissions, nanoparticles, VOCs, photopolymer constituents, and metal particulates pose measurable respiratory, dermatologic, cardiovascular, and systemic health risks. While definitive causal links to chronic diseases such as cancer require further investigation, these findings support the need for improved exposure control strategies, enhanced ventilation, safer material selection, and, where appropriate, biomonitoring in metal powder handling environments.

Key words: 3D printing, material extrusion, vat photopolymerization, powder bed fusion, health effects, toxicological assessment, occupational exposure, nanoparticles, VOCs

*Corresponding author: Sungho Kim, Tel: 052-703-0881, E-mail: sungho.kim@kosha.or.kr
Work Environment Research Bureau, Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44429

Received: February 4, 2026 Revised: March 27, 2026, Accepted: March 29, 2026

 Jiyeon Kim <http://orcid.org/0009-0007-9945-6532>

 Sungho Kim <https://orcid.org/0000-0002-0158-1244>

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.

I. 서론

3D프린팅은 디지털 설계 데이터를 기반으로 재료를 층층이 적층하여 3차원 형상을 제작하는 적층제조 기술이며, 제조, 의료, 교육 등 다양한 분야로 활용 범위가 확대되고 있다(ISO/ASTM 52900, 2021). 정부는 2014년 3D프린팅 산업 진흥을 목적으로 국가 차원에서 3D프린팅 산업에 대한 전략적 육성책에 나섰고, 2016년 삼차원프린팅 산업 진흥법이 시행(2016.12.23.)되면서 본격적으로 3D프린팅 산업이 시작되었다. 이후 재료압출 방식 중 FDM(fused deposition modeling) 3D프린터의 특허 만료, 장비 가격 하락, 대량생산 설계의 확산 등으로 데스크톱 3D프린터의 접근성이 높아지면서, 학교·가정·도서관·실험실 등 비산업 공간으로의 활용도 확대되었다(Ngo et al., 2018).

정보통신산업진흥원(National IT Industry Promotion Agency, NIPA)에서 조사한 2024년 3D프린팅 산업 실태조사에 따르면, 국내 공급사 기업체 수는 2023년 352개로 2022년 대비 10% 증가하였고, 3D프린팅 근로자 수는 1,900명 이상으로 추산되었다. 3D프린팅 시장규모도 2023년 6,125억원으로 2022년도에 비해 2.1% 증가하였으며, 수요 기관으로는 학교(18.1%), 공공기관(16.2%), 의료/치과(13.4%), 자동차(11.5%) 분야에서 높은 매출 비중을 보였다. 3D프린팅 기술방식별 매출 비중은 재료압출 방식이 37.6%로 가장 높았고, 분말베드용해 방식이 28.5%, 액조광경화 방식이 19.7% 순으로 나타났다(NIPA, 2024a).

‘A과학교 교사들 잇단 희귀암 육종’ 보도가 나오면서, 3D프린팅 작업환경에서의 유해인자와 건강영향 문제가 사회적 이슈로 부각되었고(Ohmynews, 2020), 이에 따라 3D프린팅 사용자 안전이용 가이드라인의 개정 작업이 이루어졌다(NIPA, 2024b). 필라멘트 기반 재료압출은 열가소성 필라멘트(acrylonitrile butadiene styrene, ABS; polylactic acid, PLA)를 고온에서 용융·적층하는 과정에서 비의도적 나노입자를 방출하며, 방출 입자의 화학조성과 독성 반응이 보고된 바 있다(Zhang et al., 2019). 노출 챔버 연구에서 온도를 185-290°C 범위에서 단계적으로 상승시켰을 때 모든 필라멘트에서 온도 증가에 따라 입자상 물질 배출률이 증가했으며, 최고 온도에서의 배출률은 최저 온도 대비 100-10,000 배까지 높게 보고되었다(Jeon et al., 2020). 이러한 온도 의존성이 확인되는 가운데, 소재에 따른 배출 차이

도 뚜렷하게 보고된다. 노출 챔버 기반 측정에서는 ABS 사용 시 PLA 대비 입자 농도가 33-38배 높았고, 배출 입자의 대부분이 나노 크기(<100 nm; 96%)로 확인되어 재료압출 공정에서의 흡입 노출 우려가 제기된다. 또한 TVOC는 ABS 사용 시에만 관찰되었으며(기하평균 155 ppb), PLA에서는 검출되지 않아 소재 선택에 따라 배출 특성과 잠재적 노출 수준이 크게 달라질 수 있음을 시사한다(Kim et al., 2015). 액조광경화는 액상 포토폴리머 레진을 광원으로 선택적으로 경화하는 공정으로, 챔버 기반 평가에서 출력·세척·후경화 단계에서 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)이 배출되며, 특히 이소프로판올은 세척 단계에서 고농도로 검출되었고, 메타크릴레이트 계열 성분과 포름알데히드는 낮은 수준으로 검출되었다(Zhang & Black, 2021). 또한 분말베드용해는 미세 금속 분말에 레이저 등 에너지를 가해 용융·적층하는 공정으로, 분말 취급 및 장비 청소 과정에서 크롬, 니켈 등 금속 성분에 노출될 수 있다는 보고가 있다(Graff et al., 2017).

이 중에서도 사용 범위가 넓은 재료압출 방식 3D프린팅 기술은 필라멘트 소재와 운전 조건에 따라 VOCs와 나노입자가 동시에 발생할 수 있어, 배출 특성과 건강영향에 대한 연구가 비교적 많이 축적되어 왔다. 다양한 필라멘트 소재를 사용한 재료압출 방식 FDM 3D프린팅 작업에서 검출된 VOCs로는 벤젠, 톨루엔, 페놀, 스티렌, 아세트알데히드, 아세톤, 4-옥소펜탄알 등이 있으며, 나노입자 노출과 관련된 건강영향 가능성도 함께 제시되었다(Stefaniak et al., 2017; Wojtyła et al., 2017; Ferraz et al., 2018; Gümperlein et al., 2018; Karwasz & Osiński, 2020; Stefaniak et al., 2021; García-González & López-Pola, 2022). 특히 ABS 필라멘트에서 방출되는 스티렌과 4-OPA는 호흡기 및 피부 자극, 알레르기 반응과의 관련성이 보고된 바 있으며(Stefaniak et al., 2017; Stefaniak et al., 2021), 4-옥소펜탄알은 자극성 및 감작성 물질로서 피부 및 폐를 통한 염증성 및 알레르기성 반응을 유발할 수 있다는 독성학적 근거도 제시되어 있다(Anderson et al., 2012). PLA의 경우 ABS에 비해 배출 농도는 상대적으로 낮은 경향이 있으나, 락타이드와 아세트알데히드 등 자극성 물질이 방출될 수 있으며, 단시간 노출 실험에서 ABS 노출 후 FeNO 증가와 주관적 불편감/냄새 불쾌감 증가가 관찰되었고 환기가 불충분한 환경에서 이러한 증상이 더 뚜렷하게 나타났다(Gümperlein

et al., 2018).

또한 FDM 3D프린팅 작업에서 발생한 나노입자의 성분 분석에서 크롬 성분이 보고된 바 있다(Stefaniak et al., 2017). 나노입자는 크기 특성상 하기도 및 폐포 영역까지 침착될 가능성이 있으며, 단시간 노출에서도 산화스트레스 등 생물학적 반응이 관찰될 수 있다는 점이 지적되었다(Gümperlein et al., 2018). 특히 ABS에서 배출된 나노입자는 15 nm 이하 수준까지 보고된 바 있다(García-González & López-Pola, 2022). 금속 기반 적층제조 공정에서도 노출은 생체지표 수준에서 관찰된다. Ljunggren et al.(2019)은 금속 적층제조 작업자를 대상으로 한 생체모니터링에서 소변 중 금속 농도의 증가 경향과 피부 코발트 오염을 보고하였으며, 예방조치 이후 이러한 노출 지표가 감소하는 양상을 제시하였다. 연구진은 공기 중 미세입자 노출과 피부 오염 가능성을 함께 제시하며, 관련 노출지표의 설정과 생체모니터링의 필요성을 강조하였다.

본 연구의 목적은 지금까지 보고된 3D프린팅 공정과 관련된 건강영향 및 독성평가 문헌을 검토 및 정리하고, 3D프린팅 산업 근로자의 건강장해 예방을 위한 기초자료로 활용하는 데 있다.

II. 연구 방법

본 연구는 3D프린팅 기술별로 방출되는 유해인자와 이로 인한 건강영향을 파악하기 위해 미니 리뷰로 수행되었다. 문헌 선정의 투명성을 높이기 위해 체계적 문

헌고찰의 절차를 참고하여 문헌 검색 및 선정 기준을 적용하였으며, 다만 미니 리뷰의 성격상 개별 연구에 대한 질 평가나 편향 위험 평가는 수행하지 않았다. 연구 설계 단계에서 우선 국제 표준인 미국 재료 시험 협회 F42 위원회에 따르면 3D프린팅 기술을 7가지 기술(재료압출, 분말베드용해, 액조광경화, 접착제분사, 에너지제어용착, 재료분사, 판재적층 기술)에 대한 문헌을 선정하였다(Table 1). 이후 단계에서는 3D프린팅 공정과 관련된 건강영향 연구 및 독성평가 연구에 대한 문헌을 선별하기 위해서 키워드 검색을 실시하였다.

문헌 검색은 국내외 주요 데이터베이스를 활용하여 수행하였다. 국외 문헌은 PubMed와 Google Scholar를, 국내 문헌은 RISS, KISS, KCI를 이용하였다. 검색 기간은 3D프린팅이 산업 및 교육현장에서 본격적으로 활용되기 시작한 시점을 고려하여, 3D프린팅 공정의 건강영향 및 독성 평가와 관련된 문헌은 최근 10년간 발표된 논문을 대상으로 하였다. 검색 키워드는 영어와 한국어를 병행하여 구성하였으며, “3D printing”, “3D printer”를 기본 검색어로 하고 “3D printer emissions”, “additive manufacturing”, “health effects”, “nanoparticles”, “ultrafine particles”, “VOCs”, “metal exposure”, “photopolymer”, “FDM”, “SLA”, “SLS” 등을 조합하는 방식으로 하였다. 한국어 키워드 검색도 영문과 동일하게 실시하였으며, 키워드는 “3D프린터”, “3D프린팅”, “유해인자”, “건강영향”, “나노입자”, “휘발성유기화합물”, “금속 노출”, “액조광경화”, “재료압출”, “분말베드” 등을 사용하였다.

Table 1. Seven 3D printing technologies and their characteristics

3D printing process	Description
Material extrusion (MEX) (<i>FDM, FFF, etc.</i>)	A process in which a heated material is extruded through a nozzle and deposited while the nozzle moves to form an object.
Binder jetting (BJT) (<i>3DP, CJP, etc.</i>)	A process in which a liquid binder is jetted onto a powder bed to bond the material.
Vat photopolymerization (VPP) (<i>SLA, DLP, LCD, etc.</i>)	A process in which light exposure initiates polymerization of a photopolymer resin, selectively solidifying the material.
Powder bed fusion (PBF) (<i>SLS, SLM, EBM, DMLS, etc.</i>)	A process in which a high-energy beam (e.g., laser or electron beam) is scanned over a powder bed to selectively fuse the material.
Directed energy deposition (DED) (<i>DMT, LMD, etc.</i>)	A process in which a high-energy source (e.g., laser or electron beam) melts feedstock material and deposits it onto a surface.
Material jetting (MJT) (<i>MJM, PolyJet, MJP, etc.</i>)	A process in which liquid material is jetted and then cured (e.g., using UV light).
Sheet lamination (SHL) (<i>LOM, UAM, etc.</i>)	A process in which thin sheets/films of material are bonded layer-by-layer using heat, adhesives, etc.

검색을 통해 확보된 문헌에 대해 두 단계의 선정 절차를 거쳤다. 1차 단계에서는 제목과 초록을 검토하여 3D프린팅과 명백히 무관한 연구, 순수 재료공학, 기계공학 연구, 장비 성능이나 공정 최적화만을 다루고 건강영향 또는 유해인자 배출과 관련된 결과를 보고하지 않은 논문을 제외하였다. 2차 단계에서는 원문 전체를 확인하여 최종 포함 여부를 결정하였다. 포함 기준은 다음과 같다. 첫째, 연구 대상이 3D프린팅 공정 또는 3D프린터 사용 환경이고, 둘째, 적어도 하나 이상의 유해인자(나노입자, 미세입자, 휘발성유기화합물, 금속, 레진 단량체 등) 또는 건강영향 지표(세포독성, 동물실험 결과, 인체 생체지표, 자각증상, 천식 등 질병발생)를 보고하고, 셋째, 3D프린팅 공정 방식이 명시되어 있고, 넷째, 학술지 논문 또는 학술적 보고서 형태로 되어 있는 문헌을 선정하였다. 반대로, 학술성이 불분명한 자료는 연구자의 판단에 따라서 제외하였다. 데이터베이스 검색을 통해 도출된 전체 문헌 수를 집계한 뒤, 중복된 논문을 제거하였다. 중복 제거 후 잔여 문헌에 대해 제목 및 초록을 검토하여 명백한 비관련 문헌을 1차로 배제하였다. 이후 남은 문헌에 대해 원문을 확보하여 포함 및 제외 기준을 다시 한 번 적용하였다. 최종적으로 포함된 문헌은 재료압출, 액조광경화, 분말베드용해 각각 7, 3, 4건으로 선정되었다. 나머지 3D프린팅 방식(접착제분사, 에너지제어용착, 재료분사, 판재적층)을 대상으로 건강영향 및 독성평가한 연구는 상대적으로

제한적이었다. 반면, 7가지 공정 중 접착제분사, 재료분사, 에너지제어용착, 판재적층 공정은 본 고찰의 검색 범위에서 건강영향 또는 유해인자 배출을 직접 다룬 문헌이 상대적으로 제한적이었다. 이는 해당 공정들이 주로 산업용 설비에서 운영되고, 분말, 바인더 또는 용제, 고에너지 열원, 후처리 과정 등 노출원이 공정별로 이질적이어서 표준화된 비교 연구가 쉽지 않기 때문인 것으로 사료된다. 다만 관련 문헌이 부족하다는 사실이 곧 위해성이 낮다는 것을 의미하지는 않으며, 향후 각 공정의 특성을 반영한 노출평가와 독성 및 역학 연구가 추가로 필요하다.

추가로 본 연구에 새롭게 포함된 3D프린팅 공정의 유해인자 관리방안 관련 내용은 건강영향 및 독성평가 문헌 검색과는 별도로 정리하였다. 해당 부분은 체계적 문헌고찰 방식에 따라 별도의 검색 및 선정 절차를 수행한 것이 아닌, 관련 문헌 검토 과정에서 확인된 자료와 추가 검색을 통해 확보한 문헌을 바탕으로 기술하였다. 따라서 관리방안 부분은 체계적 근거 통합보다는 공정별 유해인자 특성을 고려한 실무적 관리방안을 제시하는 방향으로 구성하였다.

자료 분석은 기술적 분석에 초점을 두었으며, 각 3D프린팅 공정에 따른 건강영향 및 독성평가 연구내용을 분석하여 정리하였다(Figure 1).

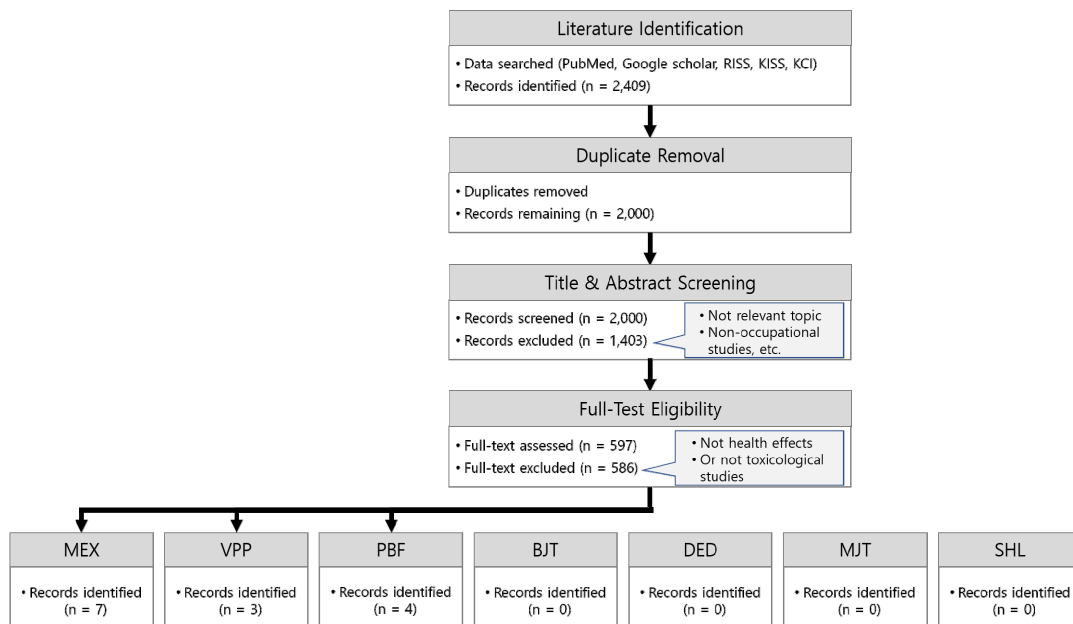


Figure 1. Flow chart of the literature search and selection process for this mini review

III. 결과 및 고찰

1. 재료압출 방식 3D프린팅 공정

재료압출 방식 3D프린팅 공정에 대한 건강 및 독성 평가 연구문헌을 종합적으로 검토한 결과, 호흡기 증상 및 호흡기 자극과 관련된 연구가 공통적으로 있었다. House et al.(2017)은 ABS 필라멘트를 사용하는 FDM 3D프린터 10대를 소규모 작업공간에서 동시 가동한 이후 흉부 답답함, 호흡곤란, 기침이 발생하였고, 작업 시 악화되고, 휴무 시 호전되는 전형적인 작업관련성 양상을 보인 증례를 보고하였다. 특히 노출 저감 조치 이후 증상이 완화되고, 메타콜린 유발검사상 비특이적 기도 과민성이 정상 범위로 회복되었다는 점은 노출과 기도 반응 간 시간적 연관성을 시사한다. Chan et al.(2018)의 사업장 설문조사에서도 근로자의 59%가 주 1회 이상 호흡기 증상을 경험하였고, 주당 40시간 초과 사용군에서 천식 또는 알레르기 비염 진단과 유의한 관련성이 나타났다. 국내 교육기관을 대상으로 한 Choi et al.(2022) 조사에서도 3D프린터 사용과 관련된 신체 영향 중 호흡기 자극이 가장 높은 비율로 보고되었으며, 환기장치 부재, 장비 대수 및 사용 강도와 관련성이 확인되었다. 특히 출력 품질이 외기 유입(바람)과 실내 온도 변화에 민감하다는 이유로 창문·문을 닫은 채 장비를 운영하는 사례가 보고되어, 의도치 않게 환기 부족 상황이 지속될 수 있다. 따라서 학교 환경에서는 설비 유무뿐 아니라 실제 운용 방식(밀폐 운용, 가동 대수·시간)이 노출 수준을 좌우하는 핵심 요인으로 고려되어야 한다. 실제 메이커스페이스에서 다수의 FDM 프린터를 대상으로 한 분석에서도 환기 확보, 가동 대수 조절, 작업 거리 확보가 호흡기 침착모델 기반 잠재 위험을 낮추는 것으로 제시되어(Yeom et al., 2022), 교육환경에서도 환기·운영 방식이 노출 관리의 핵심임을 뒷받침한다. 이러한 연구들은 작업장의 특성은 다르지만, FDM 3D프린팅 공정 노출과 호흡기 증상 간의 연관 가능성을 시사한다.

이와 같은 호흡기 증상은 3D프린팅 공정에서 배출되는 입자상 물질과 휘발성유기화합물의 배출 특성과 관련이 있다. Kim et al.(2015)은 ABS 필라멘트 사용 시 PLA 대비 나노입자 및 휘발성유기화합물 농도가 더 높게 나타남을 보고하였고, Wojtyła et al.(2017)은 ABS 필라멘트 예열 단계에서 스티렌이 주요 성분으로 방출됨을 제시하였다. Stefaniak et al.(2017a) 역시

FDM 3D프린팅 공정에서 휘발성유기화합물, 카보닐계 부산물 및 오존이 검출되며, 출력물 자체에서도 스티렌이 지속적으로 방출될 수 있음을 보고하였다. 즉, 재료압출 방식 3D프린팅 공정은 입자와 가스상 물질이 동시에 존재하는 혼합 노출 환경을 형성하며, 이는 상기도 및 하기도 자극 증상과 관련될 가능성을 시사한다.

이를 뒷받침하는 세포 및 동물 수준의 독성 연구도 있었다. Zhang et al.(2019)은 FDM 3D프린팅 공정에서 방출된 입자를 폐 상피세포 및 폐포 대식세포에 노출한 결과, 산화잠재력이 유의하게 증가하고 세포 생존율 감소가 관찰됨을 보고하였다. Farcas et al.(2019)은 ABS 및 PC(polycarbonate) 필라멘트 배출물이 인간 소기도 상피세포에서 농도 의존적 세포독성, 활성산소종 증가, 항산화능 감소, 염증성 매개물 증가 및 세포사멸을 유도함을 확인하였다. 이는 기도 상피세포 수준에서 산화스트레스와 염증 반응이 유도될 수 있음을 의미하며, 반복 노출 시 기도 염증 또는 자극 증상으로 이어질 가능성을 뒷받침한다. 또한 Stefaniak et al.(2017b)의 동물 흡입 노출 연구에서는 단기 노출 후 혈압 상승과 내피 기능 변화가 관찰되어, 급성 생리적 반응이 가능함을 제시하였다. 임상 및 설문조사에서 보고된 호흡기 증상은 독성학적 연구에서 관찰된 산화스트레스 및 염증 반응과 방향성이 일치한다는 점에서 상호 보완적이다.

한편, 국내에서 사회적 이슈가 되었던 육종 사례 보고(Joo et al., 2022)는 FDM 3D프린팅 공정과 장기종양 발생 가능성을 문제 제기하였다. 이들 사례는 환기 불량 환경에서 장기간 3D프린터를 사용한 교사에게 육종이 진단되었다는 공통점을 갖지만, 모두 정량적 노출자료가 부재하고 역학적 근거가 충분하지 않다는 점을 명확히 언급하고 있다. 즉, 사례보고는 위험 가능성을 환기시키는 수준이며, 인과관계를 확정하지는 못하였다. 산업안전보건연구원에서 발암 가능성을 평가하기 위해 수행된 독성 연구로는 Lim & Seo(2024)가 있다. 해당 연구에서는 ABS 및 PLA 필라멘트 유래 입자를 세포에 노출하여 유전독성, 세포 변형 및 유전자 발현 변화를 분석하였다. ABS는 농도 의존적 세포독성을 보였으나, Comet assay에서 명확한 DNA 손상은 확인되지 않았고, 세포 변형 시험에서도 발암성을 확정할 수준의 변화는 관찰되지 않았다. 일부 분자 및 대사 수준 변화는 보고되었으나, 이는 탐색적 소견으로 해석되며 발암성을 단정할 근거로 보기에는 제한적이다. Zhang

et al.(2019) 역시 산화잠재력 증가를 보고하였으나, 이를 직접적인 발암성으로 연결짓는 근거는 제시하지 않았다. 따라서 현재 제시된 독성 연구들은 산화스트레스 및 세포 반응은 확인되지만, 종양 발생을 직접적으로 지지하는 증거는 부족한 상태로 해석된다.

최근 FDM 3D프린팅 필라멘트 중 사용이 증가한 PETG(polyethylene terephthalate glycol), TPU (thermoplastic polyurethane) 및 탄소계(carbon nanotube, CNT) 복합 필라멘트와 관련하여, Chýlek et al.(2021) 연구에서는 ABS, PLA, PETG, TPU의 입자 배출을 비교한 결과, PLA, PETG, TPU는 권장 최저 출력 온도에서 배출이 가장 낮았고, TPU는 노즐 직경이 클수록 배출이 낮아지는 경향을 보고하였다. 또한 노즐의 온도 조건에 따라 나노입자수 농도가 최대 10⁸ 배까지 증가할 수 있어, 소재 선택과 운전 조건이 노출 수준을 좌우할 수 있음을 시사하였다. 한편 Potter et al.(2019)도 ABS-CNT와 일반 ABS 비교에서 CNT 첨가가 VOC 배출의 조성을 변화시킬 수 있으며, 총 VOC가 낮아지더라도 α -methylstyrene, benzaldehyde 등 일부 유해 VOC의 상대적 배출이 증가할 수 있음을 보고하였다. 다만 PETG, TPU, CNT 복합 필라멘트 등은 ABS 및 PLA에 비해 건강영향 연구가 상대적으로 제한적이었으며, 향후 다양한 필라멘트 소재의 독성 연구가 필요해 보인다.

종합하면, 재료압출 방식 3D프린팅과 관련된 문헌에서 가장 일관되게 확인되는 건강영향은 호흡기 자극 및 기도 반응과 관련된 증상이다. 이는 임상 증례, 사업장 및 교육기관 조사, 배출 특성 연구, 세포 및 동물 독성 연구에서 방향성 있게 반복된다. 국내에서 보고된 교사 육종 사례는 3D프린팅 안전성에 대한 논의를 촉발하였으나, 현재까지는 사례보고 수준의 문제 제기에 머물러 있어 인과관계를 단정하기 어렵다. 해외 독성학 연구에서 보고된 산화스트레스, 염증 반응 및 일부 유전자 발현 변화는 생물학적 반응 가능성을 시사하지만, 이를 육종 등 발암성과 직접 연결할 근거는 아직 충분하지 않다(Farcas et al., 2019; Zhang et al., 2019). 따라서 현 단계에서의 합리적 해석은, 재료압출 공정은 조건에 따라 호흡기 증상을 유발할 가능성이 있어 예방적 관리가 비교적 명확히 요구되지만, 발암성과의 인과적 연관성은 아직 밝혀진 바 없으며 추가적인 정량 노출평가와 장기 역학 연구가 필요하다는 것이다.

2. 액조광경화 방식 3D프린팅 공정

액조광경화 방식 3D프린팅에 대한 건강 및 독성평가 관련 문헌을 분석한 결과, 3D프린팅 공정에서 사용하는 화학물질의 모노머, 첨가제 등의 성분과 후처리 공정에서 사용하는 세척제 성분에 직접 노출됨에 따라 건강영향이 발생할 수 있다. 재료압출 방식 3D프린팅 공정에서 주로 호흡기 노출 중심의 문제를 제기하였다면, 액조광경화 방식 3D프린팅 공정에서는 액상 레진 및 세척 공정에서 사용하는 화학물질의 피부 접촉 및 화학적 인자의 노출이 보다 직접적이라는 특징을 가진다.

Creytens et al.(2017)의 사례보고에서는 후처리 작업으로 3D프린팅 출력물을 이소프로판올로 세척하는 과정에서 니트릴 장갑과 보호구를 착용했음에도 불구하고, 두 작업자 모두 중증 알레르기 접촉피부염이 발생하였다. 병변은 국소 부위에 국한되지 않고 전완, 액와, 복부, 얼굴 등으로 확산되었으며, 패치 테스트에서 비스페놀 A 디글리시딜 에테르 계열 에폭시 레진 및 환경화제 및 희석제에 양성 반응이 확인되었다. 특히 한 사례에서는 패치 테스트 이후 직업적 재노출이 없음에도 전신성 악화가 관찰되어, 단순 접촉을 넘어 공기매개 또는 전신성 반응 가능성까지 시사되었다. 이는 액상 레진 성분이 강한 피부 감작성 물질로 작용할 수 있으며, 보호구 착용만으로 충분히 차단되지 않을 수 있음을 보여준다.

한편 Ferraz et al.(2018)은 액조광경화 방식 3D프린팅 재료에서 배지로 용출되는 성분을 분석하고, 조건화 배지를 이용한 생물학적 시험에서 초기 배아 발달 저해와 에스트로겐 수용체 전사활성 증가를 보고하였다. 일부 재료는 용매 세척과 추가 광경화(post-curing) 이후에도 생물학적 활성이 관찰되었으며, 가스스크로마토그래피 질량분석에서 폴리에틸렌글리콜 계열 물질과 디에틸 프탈레이트가 검출되었다. 이는 경화가 완료된 제품이라 하더라도 잔류 모노머나 첨가제가 완전히 제거되지 않을 수 있으며, 후처리 공정이 위해 가능성을 완전히 차단하지 못할 수 있음을 의미한다.

Walpitagama et al.(2019)은 SLA 출력물 용출액의 제브라피쉬 노출시험에서 발달독성 및 신경행동학적 영향을 보고하였다. 출력물로부터 미중합 광개시제 등 저분자 성분의 수중 이행이 확인되었고, 용출액/성분 노출군에서 사망 또는 기형이 관찰되었다. 또한 산화스트레스 증가와 세포사멸 유도가 동반되었으며, 배아 및 유생 단계에서 운동성 및 광자극 반응의 변화가 나타났다. 이

는 경화 후에도 레진 기반 출력물에서 잔류 성분이 용출되어 생물학적 영향을 유발할 수 있음을 의미한다.

이들 연구는 서로 다른 건강영향 지표를 다루지만, 레진 기반 3D프린팅 재료에서 반응성 화학물질이 경화 이후에도 잔존하거나 외부 매질로 이동할 수 있으며, 그 결과가 측정 가능한 생물학적 영향으로 연결될 수 있음을 공통적으로 지적하였다. Creytens et al.(2017)은 임상적 피부 과민반응이라는 명확한 인체 사례를 제시하였고, Ferraz et al.(2018)와 Walpitagama et al.(2019)은 레진 재료 및 출력물로부터 용출되는 성분의 생물학적 활성을 실험적으로 보여주었다. 즉, 전자 는 실제 직업적 노출에서 관찰된 건강영향을 보여주고, 후자들은 물질 자체의 잠재적 위해성을 실험적으로 뒷받침한 연구라는 점에서 상호 보완적이다.

종합하면, 액조광경화 3D프린팅은 출력, 세척, 후경화 등 전 정과정에서 반응성 레진 성분에 대한 노출 가능성이 존재하며, 이는 피부 감작성 및 생물학적 활성 유발 가능성과의 상관관계가 있음을 보여준다. 특히 에폭시 계열 성분과 같은 강한 피부 감작성 물질은 공기매개 노출이나 보호구 미세누출을 통해서도 직업성 알레르기 접촉피부염을 유발할 수 있다. 다만, 발달 독성이나 내분비 영향에 대해서는 실험적 근거가 제시된 수준이며, 실제 작업 환경에서의 건강영향으로 일반화하기 위해서는 추가적인 노출 평가와 역학적 연구가 필요해 보인다. 액조광경화 공정에서는 단순한 출력 단계뿐 아니라 세척, 폐기 등 전 단계까지 포함한 전주기 관리가 중요하며, 적절한 보호구 착용, 밀폐 환기설비 확보, 저감성 레진 개발 및 선택 등의 예방적 접근이 요구된다. 동시에, 현재까지의 근거는 피부 과민반응에 대해서는 비교적 명확한 신호가 존재하지만, 내분비 교란이나 발달 독성과 같은 전신적 영향에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3. 분말베드용해 방식 3D프린팅 공정

분말베드용해 방식 3D프린팅 공정과 관련된 건강 및 독성평가 연구문헌을 검토한 결과, 미세 금속 분말에 대한 흡입 노출과 이에 따른 호흡기 및 전신 생리반응 가능성 연구가 있었다. 분말베드용해 방식 3D프린팅 공정은 금속 또는 고분자 미세 분말의 취급 과정에서 발생하는 입자 노출이 주요 위험 요인으로 제시되었다.

분말베드용해 방식 3D프린터를 취급하는 근로자를 대상으로 실제 건강지표 변화를 평가한 Ljunggren et

al.(2021)의 연구는 미세 금속분말의 노출과 생체반응 간의 연관 가능성을 종합적으로 보여준다. 이 연구는 양산 사업장의 근로자를 대상으로 2개 연도에 걸쳐 혈액 및 소변 중 금속 농도와 폐기능, 염증 및 항산화 지표, 간 및 신장 기능 지표를 통합적으로 분석하였다. 분석 결과, 연도 간 혈중 니켈 농도 감소와 일부 폐기능 지표 개선이 관찰되어, 예방조치 강화가 노출 저감 및 건강지표 개선으로 이어질 수 있음을 시사하였다. 또한 혈중 코발트와 니켈 농도는 이전 연구에서 보고된 소변 농도와 상관관계를 보여, 생체모니터링 지표 간 연계 가능성을 시사하였다(Ljunggren et al., 2019; Ljunggren et al., 2021). 그러나 혈중 코발트와 염증/항산화 지표, 간 기능 지표는 근로자에서 상대적으로 두드러져, 금속 노출이 산화스트레스와 전신 생리반응과 연관될 가능성이 제기되었다. 특히 염증 및 항산화 균형 지표의 변화는 금속 입자 노출이 단순한 국소 호흡기 자극을 넘어 전신적 생물학적 반응으로 확장될 수 있음을 보여준다.

이와 같은 생체반응의 가능성은 분말 취급 과정에서 노출 특성 연구에서 기전적으로 설명될 수 있다. Graff et al.(2017)은 분말베드용해 3D프린팅 작업에서 공정 자체보다 분말 회수, 체질, 보충, 청소 등 취급 단계에서 초미세 및 나노입자 농도가 증가함을 보고하였다. 특히 300nm 이하 입자가 분말 취급 시점에 집중적으로 관찰되었고, 재활용 분말은 신규 분말보다 더 작은 입자 분포로 이동하는 경향을 보였다. 이러한 입자는 호흡기 깊은 부위까지 침착 가능성이 높으며, 크롬, 니켈, 코발트 등 금속 성분을 포함할 수 있어 산화스트레스 유발과 조직 반응 가능성을 내포한다. 즉, 분말베드용해 방식 3D프린팅 공정에서의 건강위해는 단순한 총 질량 농도보다 입자 크기 분포와 금속 성분 특성을 함께 고려해야 함을 보여준다.

실제 임상적 수준의 중증 호흡기 질환 사례도 보고된 바 있다. Johannes et al.(2016)은 분말베드용해 3D프린팅 공정에서 나일론 분말에 유의하게 노출된 후 만성 과민성 폐렴이 발생한 사례를 보고하였다. 환자는 폐기능 저하, 영상학적 간질성 변화, 병리학적 림프구성 세기관지염 및 육아종 소견을 보였으며, 노출 중단 후 일시적 호전에도 불구하고 질환이 진행되어 결국 폐이식에 이르렀다. 다른 명확한 노출원이 확인되지 않았다는 점에서, 호흡성 분말 노출이 면역매개성 폐질환으로 이어질 가능성이 제기되었다. 이는 분말 기반 3D프린

팅 공정에서 단순 자극 증상을 넘어, 면역학적 기전을 통한 만성 간질성 폐질환까지 발생할 수 있음을 시사하는 사례로 해석된다.

이들 연구를 종합하면, 분말베드용해 방식 3D프린팅 공정은 금속 또는 고분자 분말의 취급 과정에서 건강영향이 발생할 가능성이 있으며, 주요 요인은 다음과 같다. 첫째, 프린팅 공정 자체보다 분말 회수, 체질, 보충,

청소 등 분말 취급 및 후처리 단계에서 노출될 가능성이 크다. 둘째, 특히 금속 분말은 호흡기 깊은 부위까지 침착되어 산화스트레스 및 염증 반응을 유발할 잠재성을 가진다. 셋째, 일부 작업자에서는 폐기능 변화, 염증 및 항산화 지표 변화, 면역대개성 폐질환과 같은 임상적 결과가 보고되었으며, 고분자 분말에서도 나일론 분말 노출 후 만성 과민성 폐렴 사례가 확인되었다. 따라

Table 2. Summary of health effects associated with different 3D printing technologies

No.	Category	Participants	Process	Material(s)	Workplace characteristics	Health effects / main finding	Evidence	Model	Reference
1	Case report	28-year-old male user	FDM	ABS (later switched to PLA as intervention)	Long-term use of multiple printers	Occupational asthma associated with VOC and UFP exposure	Confirmed (mild asthma)	Ⓜ	House et al., 2017
2	Survey + field evaluation	46 workers	FDM	ABS, PLA, etc.	Repeated use in training/office spaces	Increased respiratory symptoms; increased diagnoses of asthma/allergy	Potential (Self-reported symptoms)	Ⓜ	Chan et al., 2018
3	Use survey + environmental measurement	Teachers/students (5,742 schools)	FDM	PLA, ABS	Continuous use in classrooms with inadequate ventilation	Low-level formaldehyde; increased UFP; irritation symptoms	Potential (Self-reported symptoms)	Ⓜ	Choi et al., 2022
4	Chamber study (toxicity)	Cells/animals	FFF	ABS, PLA, Nylon	Simulated real printing conditions in a chamber	Inflammation, oxidative stress, cytotoxicity; report of higher toxicity with PLA	Potential (toxic responses)	Ⓜ,ⓐ,ⓒ	Zhang et al., 2019
5	Inhalation toxicology study (animal)	Sprague-Dawley rats	FDM	ABS	Chamber-generated emissions from a desktop FDM printer; nose-only exposure	Increased mean arterial pressure; increased resting arteriolar tone; impaired endothelium-dependent vasodilation	Potential (animal cardiovascular toxicity)	Ⓜ	Stefaniak et al., 2017b
6	Chamber study (toxicity)	Human airway epithelial cells	FFF	ABS, PC	Exposure to collected particles from chamber	Increased ROS; apoptosis; inflammatory responses	Potential (cell-based toxicity)	ⓒ (human-derived)	Farcas et al., 2019
7	Carcinogenicity assessment (in vitro)	3T3 cells	FDM	ABS, PLA	Exposure after collecting particles generated at high temperature	No clear DNA damage in comet assay; limited cell transformation signal; changes in carcinogenesis-related gene expression and metabolic activity	Potential (carcinogenicity/genotoxicity in cell study)	ⓒ	Lim & Seo, 2024

Table 2. Summary of health effects associated with different 3D printing technologies (Continued)

No.	Category	Participants	Process	Material(s)	Workplace characteristics	Health effects / main finding	Evidence	Model	Reference
8	Case report	Two female workers at same workplace (44 and 46 years)	SLA (vat photopolymerization)	Epoxy resin (Bisphenol A/F-based), acrylate	Photocuring; IPA washing; post-curing	Severe allergic contact dermatitis; systemic hypersensitivity; positive patch test to epoxy resins	Confirmed (occupational ACD)	Ⓜ	Creytens et al., 2017
9	Toxicity study (in vitro + embryo assay)	Bovine embryos, reproductive cells, cell lines	SLA (photocuring)	PIC100, E-Shell 200/300, PDMS, PS	Post-print washing/post-curing; leachate analysis	Inhibited embryo development; increased estrogenic activity; leaching of phthalate (DEP) and PEG oligomers → potential endocrine disruption	Potential (animal/embryo toxicity)	Ⓜ, Ⓢ	Ferraz et al., 2018
10	Toxicity study	Zebrafish embryos/larvae	SLA (vat photopolymerization)	SLA-printed plastics; photoinitiator or 1-HCHPK	Leachate generated in aqueous media	Developmental toxicity (mortality, malformations) and neurobehavioral impairment	Potential (animal-based toxicity)	Ⓜ	Walpitagamma et al., 2019
11	Case report	46-year-old male (new worker)	SLS (powder bed) → nylon powder-based	Nylon powder	Handling nylon powder; cleaning printer chamber	Hypersensitivity pneumonitis (HP); lymphocytic eosinophilic pneumonia; respiratory symptoms; progression to chronic lung disease	Confirmed (chronic HP diagnosis)	Ⓜ	Johannes et al., 2016
12	Field study + measurement	Metal 3D printing workers	SLM (Selective Laser Melting)	Ni-Cr-Co alloy metal powder (IN939)	Powder charging/cleaning; straightening; reuse of powder	High exposure to metal particles (300 nm–10 μm); increased Co-Ni-Cr; smaller particles present in reused powder; confirmed risk of metal exposure	Potential (pulmonary deposition)	Ⓜ	Graff et al., 2017
13	Field study + biomonitoring	AM operators, office personnel, welders	Metal AM (PBF-LB/SLM)	Ni-Cr-Fe-Mo-Co alloy powder	Powder handling in a serial production facility; 2-year follow-up with preventive actions	Urinary metals increased trend; dermal cobalt detected; transient airborne particle peaks; exposure reduced after preventive actions	Potential (exposure biomonitoring)	Ⓜ	Ljunggren et al., 2019
14	Field study + clinical monitoring	AM operators, office workers, welders	Metal AM (PBF-LB/SLM)	Ni-Cr-Fe-Mo-Co alloy powder	Same facility; 2-year follow-up after preventive measures	Blood Ni decreased and lung function improved; blood Co higher; inflammatory/oxidative and hepatic markers elevated vs controls	Potential (clinical markers of exposure-related effects)	Ⓜ	Ljunggren et al., 2021

※ Abbreviations: Ⓜ = human study/case, Ⓜ = animal study, Ⓢ = cell-based (in vitro) study.

서 분말베드용해 방식 3D프린팅 공정은 호흡성 분말 노출을 통해 호흡기 기능 변화와 전신 생리반응을 유발할 가능성이 있으며, 특히 분말 취급 단계의 노출 관리가 핵심적인 예방 지점으로 판단된다. 다만 현재까지의 근거는 제한된 사업장 연구 및 사례보고에 기반하고 있으므로, 향후 역학연구 및 정량적 개인노출평가 등 추가 연구가 필요하다.

4. 3D프린팅 공정에 대한 유해인자 관리방안

3D프린팅 작업 중에 방출되는 유해인자인 나노입자, VOCs에 대한 건강영향 우려가 제기되고 있어 관리방안 마련이 필요해 보인다. 최근 3D프린팅 관련 노출평가 문헌을 중심으로 주요 관리방안을 정리하였다.

3D프린팅 문헌상 가장 일관되게 권고되는 저감 전략은 공학적 제어이다. 다수의 노출평가 연구에서 3D프린터를 운영할 때 개방형 3D프린터보다는 밀폐형을 사용하는 것을 권장하고 있으며, VOCs를 제거할 수 있는 필터가 장착된 3D프린터를 사용하면 VOCs의 농도를 낮출 수 있다고 보고하고 있다(Afshar-Mohajer et al., 2015; Kim et al., 2015; Yi et al., 2016; Kwon et al., 2017; Mendes et al., 2017; Stabile et al., 2017; NIPA, 2024b). 하지만 Azimi et al.(2016) 연구에서는 밀폐형 3D프린터를 사용하더라도 3D프린터 사용 중 근로자에 노출될 수 있기 때문에 국소배기장치의 설치 등 적절한 환기는 필요하다(Stephens et al., 2013; Zhou et al., 2015; Steinle, 2016; Yi et al., 2016; Azimi et al., 2017; Kwon et al., 2017; Mendes et al., 2017; Stabile et al., 2017; Vance et al., 2017; Väisänen et al., 2019; NIPA, 2024b). 그 밖에도 Azimi et al.(2017) 연구에서는 이동형 공기청정기 도입(Mendes et al., 2017) 및 건물 중앙 공조시스템 개선에 대한 제안도 있었다. 결론적으로 3D프린팅 작업은 충분한 환기 수준을 갖춘 상태에서 이루어져야 한다.

재료압출 방식 3D프린터의 필라멘트를 사용할 때는 유해물질 방출량이 적은 소재의 사용을 권장하고 있다(Kim et al., 2015; Yi et al., 2016; Mendes et al., 2017; Zhang et al., 2017). ABS 필라멘트는 부산물로 관리대상 유해물질인 스티렌이 방출되기 때문에 PLA 필라멘트 사용을 권장한다. 또한 국내에서는 소재 안전강화를 위해 공공조달규격을 마련하여 조달청 등록 소재를 구매할 수 있도록 하고 있다(NIPA, 2024B). 재

료압출 방식 3D프린터는 노즐의 온도도 유해인자의 배출량을 증가시키는 중요한 요인이기 때문에 각 필라멘트 제조사에서 권장하는 온도 범위에서 가능한 낮은 범위의 온도조건에서 작업할 것을 권고하고 있다(Davis et al., 2016; Mendes et al., 2017; Stabile et al., 2017; Zhang et al., 2017; Gu et al., 2019). Deng et al.(2016) 연구에서는 노즐 예열 단계에서 나노입자 발생량이 증가하기 때문에 필라멘트 삽입 전에 노즐을 가열할 것을 제안하였다. 또한 노즐이 막히는 경우 입자수 농도가 급격하게 증가하기 때문에 이럴 때는 프린터를 즉시 정지시키고, 충분한 환기를 실시한 후 장비 덮개를 개방하도록 하고 있다(Yi et al., 2016).

액조광경화 공정에서는 출력 단계보다 세척·후경화·폐기 등 후처리 과정에서 미경화 레진과 세척 용제에 직접 노출될 가능성이 커, 호흡기보다 피부 노출 예방을 우선으로 한 관리가 필요하다. 또한 사례보고에서 보호구(니트릴 장갑) 착용에도 종종 알레르기 접촉피부염이 보고된 점을 고려하면, 보호구 착용뿐만 아니라 세척 공정의 밀폐·국소배기 등 공학적 제어와 함께 화학적합성 장갑 선택과 같은 보호구의 적절성 및 취급 절차 표준화를 병행하는 접근이 요구된다.

분말베드용해 공정은 출력 자체보다 분말 취급 및 후처리 단계에서 노출이 크게 증가하는 경향이 보고되며, 관리 우선순위는 분말 취급 단계에 두어야 한다. 공학적 제어로는 취급 공정의 밀폐화와 국소배기 적용을 우선하고, 청소는 비산을 최소화할 수 있도록 HEPA 필터가 적용된 장비 사용 등 표준 절차를 마련하는 것이 바람직하다. 또한 취급자는 호흡보호구와 보호복 착용을 기본으로 하되, 필요시 혈액/소변 금속과 같은 생체지표를 결합해 꾸준히 저감 조치 효과를 추적·점검하는 접근을 고려할 수 있다.

그 밖에도 근로자에 대한 유해인자 노출수준 감소를 위해서 작업실과 사무실을 분리하거나 근로자의 위치를 3D프린터와 최대한 멀리하여 운영할 것을 권장하였다(Afshar-Mohajer et al., 2015; Azimi et al., 2016; Steinle, 2016; Yi et al., 2016; NIPA, 2024b). 교육기관의 경우, 산업 현장과 달리 전문 보건관리자와 공학적 제어설비가 상시 확보하기 어려운 경우가 많고, 교실 및 컴퓨터실 등 체류 인원이 많은 공간에서 장비가 함께 운용될 수 있어 운영 기준 중심의 관리가 요구된다. 가능한 경우 실습 공간을 분리하고, 출력 중 출력 후 창문 개방 등 환기를 기본으로 하며, 동시 가동 대수

와 가동시간을 제한하는 최소 운영 기준을 마련할 필요가 있다.

IV. 결 론

본 연구는 3D프린팅 산업에서 널리 활용되는 재료압출, 액조광경화, 분말베드용해 공정에서 발생된 건강영향과 독성평가 연구 결과를 정리하였다. 재료압출 3D프린팅 공정에서는 건강영향으로 호흡기 증상, 천식 사례가 보고되었고, 독성평가에서는 기도 상피세포 수준의 산화스트레스 및 세포독성 반응, 동물 흡입노출에서의 급성 심혈관 기능 변화 등과 연관 가능성이 보고되었다. 이는 3D프린팅 공정 및 ABS 필라멘트 등 소재에 따라 작업 중 방출되는 유해인자 노출과 관련된 건강영향으로 해석된다. 액조광경화 3D프린팅 공정에서의 건강영향으로는 알레르기 접촉피부염이 보고되었고, 이는 아크릴레이트 및 에폭시계 액체 레진과 세척 용제 노출로 발생한 것으로 보인다. 분말베드용해 3D프린팅 공정에서의 건강영향으로는 미세 금속 분말의 흡입 노출에 따른 호흡기 기능 변화와 염증 반응, 그리고 일부 사례에서 면역매개성 폐질환 발생 가능성이 있었다. 그리고 독성영향은 금속 성분을 포함한 나노입자의 호흡기 침착에 따른 산화스트레스 및 전신 생리반응 유발 가능성이 보였다.

또한 3D프린팅 공정에서 발생하는 나노입자, VOCs, 레진 단량체 및 금속 분말 등 다양한 유해인자가 작업 환경 조건에 따라 노출될 수 있으며, 환기 부족, 밀폐된 실내 환경, 장시간 반복 노출 등이 건강위해를 증가시키는 주요 요인이 된다. 따라서 3D프린팅 작업장에서는 작업 공간 분리, 국소배기장치 및 환기 설비 확보, 저위험 소재 선택, 장비 밀폐 등의 공학적 관리 대책을 적용하여 노출을 최소화할 필요가 있다.

따라서 현재까지의 연구 결과는 3D프린팅 공정에서 발생하는 유해인자가 호흡기, 피부, 심혈관 및 전신 생리 반응과 관련된 건강영향을 유발할 수 있음을 시사한다. 다만 발암성과 같은 장기적 건강영향에 대해서는 인과관계를 확정할 수준의 역학적 근거가 아직 제한적이므로, 향후 정량적 노출평가와 장기 추적 역학연구가 필요할 것으로 판단된다.

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. *Building Environ* 2015;93:293-301
- 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
- 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-S117
- Anderson SE, Franko J, Jackson LG, Wells JR, Ham JE et al. Irritancy and allergic responses induced by exposure to the indoor air chemical 4-oxopentanal. *Toxicol Sci* 2012;127(2):371-381
- Chan FL, House R, Kudla I, Lipszyc JC, Rajaram N et al. Health survey of employees regularly using 3D printers. *Occup Med (Lond)* 2018;68(3):211-214
- Creytens K, Gilissen L, Huygens S, Goossens A. A new application for epoxy resins resulting in occupational allergic contact dermatitis: the three-dimensional printing industry. *Contact Dermatitis* 2017;77(5):349-351
- Choi JH, Lee KE, Choi YH, Park DJ. Survey on 3D printer use and health effects: focused on educational institutions. Ulsan (Korea): Occupational Safety and Health Research Institute; 2022. p. 1-348
- Chýlek R, Kudela L, Pospíšil J, Šnajdárek L. Parameters influencing the emission of ultrafine particles during 3D printing. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(21):11670
- Davis A, Black M, Zhang Q, Wong JPS, Weber R. Fine particulate and chemical emissions from consumer 3D printers. *Indoor Air* 2016;26(6):970-978
- 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
- Farcas MT, Stefaniak AB, Knepp AK, Bowers L, Mandler WK et al. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polycarbonate (PC) filaments three-dimensional (3-D) printer emissions-induced cell toxicity. *Toxicol Lett* 2019;317:1-12
- Ferraz MAMM, Henning HHW, Ferreira da Costa P, Malda

- J, Le Gac S et al. Potential Health and Environmental Risks of Three-Dimensional Engineered Polymers. *Environ Sci Technol Lett* 2018;5(2):80-85
- García-González H, López-Pola T. Health and safety in 3D printing. *Int J Occup Environ Saf* 2022;6(1):14-25
- Graff P, Ståhlbom B, Nordenberg E, Graichen A, Johansson P, Karlsson H. Evaluating measuring techniques for occupational exposure during additive manufacturing of metals: a pilot study. *J Ind Ecol*. 2017;21(S1):S120-S129.
- Gu J, Wensing M, Uhde E, Salthammer T. Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. *Environ Int* 2019;123:476-485
- Gümperlein I, Fischer E, Dietrich-Gümperlein G, Karrasch S, Nowak D et al. Acute health effects of desktop 3D printing (fused deposition modeling) using acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid materials: an experimental exposure study in human volunteers. *Indoor Air* 2018;28(4):611-623
- House R, Rajaram N, Kudla I, Lipszyc JC, Tarlo SM. Asthma associated with exposure to 3D printing. *Occup Med (Lond)* 2017;67(8):652-654
- International Organization for Standardization (ISO), ASTM International. Additive manufacturing — general principles — fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021) [Internet]. Geneva: ISO; 2021 Nov [Accessed 2026 Mar 6]. Available from: URL:<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- Jeon H, Park J, Kim S, Park K, Yoon C. Effect of nozzle temperature on the emission rate of ultrafine particles during 3D printing. *Indoor Air* 2020;30(2):306-314
- Johannes J, Rezayat T, Wallace WD, Lynch JP. Chronic hypersensitivity pneumonitis associated with inhaled exposure to nylon powder for 3-D printing: a variant of nylon flock worker's lung disease? *Am J Respir Crit Care Med* 2016;193:A7071
- Joo MW, Lee YS, Chung YG, Lee HK. Sarcomas in teachers using three-dimensional printers: a report of three patients and literature review. *Clin Orthop Surg* 2022;14:310-317
- 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;49:12044-12053
- Kwon O, Yoon C, Ham S, Park J, Lee J, Yoo D, Kim Y. Characterization and control of nanoparticle emission during 3D printing. *Environ Sci Technol* 2017;51:10357-10368
- Ljunggren SA, Karlsson H, Ståhlbom B, Krapf B, Fornander L, Karlsson LE et al. Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing (3D Printing). *Saf Health Work*. 2019;10:518-526.
- Ljunggren SA, Ward LJ, Graff P, Persson A, Lind ML, Karlsson H. Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects. *PLoS One*. 2021;16(3):e0248601.
- Lim CH, Seo DS. Assessment of the carcinogenic potential of particulate matter generated from 3D printing devices in Balb/c 3T3-1-1 cells. *Sci Rep* 2024;14:23981
- Mendes L, Kangas A, Kukko K, Mølgaard B, Saamanen A et al. Characterization of emissions from a desktop 3D printer. *J Ind Ecol* 2017;21(S1):S94-S106
- Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng* 2018;143:172-196
- NIPA, National IT Industry Promotion Agency. 2024 Survey on the status of the 3D printing industry. NIPA. 2024a
- NIPA, National IT Industry Promotion Agency. 3D printer safety guideline. NIPA. 2024b
- Ohmynews. Rare sarcomas reported among teachers at a science high school. Ohmynews. 2020. (https://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002663757&CMPT_CD=P0010&utm_source=naver&utm_medium=newssearch&utm_campaign=naver_news)
- Potter PM, Al-Abed SR, Lay D, Lomnicki SM. VOC emissions and formation mechanisms from carbon nanotube composites during 3D printing. *Environ Sci Technol* 2019;53(8):4364-4370
- 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
- Stefaniak AB, LeBouf RF, Yi J, Ham J, Nurkiewicz T et al. Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3D printer. *J Occup Environ Hyg* 2017a;14(7):540-550
- Stefaniak AB, LeBouf RF, Duling MG, Yi J, Abukabda AB et al. Inhalation exposure to three-dimensional printer emissions stimulates acute hypertension and microvascular dysfunction. *Toxicol Appl Pharmacol* 2017b;335:1-5
- Stefaniak AB, Bowers LN, Martin SB Jr, Hammond DR, Ham JE et al. Large-format additive manufacturing

- and machining using high-melt-temperature polymers. Part II: characterization of particles and gases. *J Chem Health Saf* 2021;28(4):268-278
- Steinle P. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2016;13(2):121-132
- Stephens B, Azimi P, El Orch Z, Ramos T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment* 2013;79:334-339
- Väisänen AJK, Hyttinen M, Ylönen S, Alonen L. Occupational exposure to gaseous and particulate contaminants originating from additive manufacturing of liquid, powdered, and filament plastic materials and related post-processes. *J Occup Environ Hyg* 2019;16(3):258-271
- 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;51:9516-9523
- Walpitagama M, Carve M, Douek AM, Trestrail C, Bai Y et al. Additives migrating from 3D-printed plastic induce developmental toxicity and neuro-behavioural alterations in early life zebrafish (*Danio rerio*). *Aquat Toxicol* 2019;213:105227
- Wojtyła S, Klama P, Baran T. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *J Occup Environ Hyg*. 2017;14(6):D80-D85
- Yeom S, Kim H, Hong T, Jeong K. Analysis of ways to reduce potential health risk from ultrafine and fine particles emitted from 3D printers in the makerspace. *Indoor Air* 2022;32(5):e13053
- Yi J, LeBouf RF, Duling MG, Nurkiewicz TR, Chen BT, Schwegler-Berry D, Virji MA, Stefaniak AB. Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. *J Toxicol Environ Health A*. 2016;79(11):453-465
- Zhang Q, Pardo M, Rudich Y, Kaplan-Ashiri I, Wong JPS et al. Chemical composition and toxicity of particles emitted from a consumer-level 3D printer using various materials. *Environ Sci Technol* 2019;53(19):12054-12061
- Zhang Q, Wong JPS, Davis AY, Black MS, Weber RJ. Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers. *Aerosol Sci Technol* 2017;51(11):1275-1286
- Zhou Y, Kong X, Chen A, Cao S. Investigation of ultrafine particle emissions of desktop 3D printers in the clean room. *Procedia Eng* 2015;121:506-512

<저자정보>

김지연(연구원), 김성호(연구위원)