3D 프린터 사용실태 및 건강영향조사

연 구 기 간 2022년 1월 ~ 2022년 12월

핵 심 단 어

3D 프린터, FDM, 발암물질, 나노입자, 건강영향

Highlights

| 육종암이라는 희귀암에 3D 프린터를 사용한 교사 2명이 한 학교에서 발생되어 관 면성 연구를 수행하였으나, 현재까지는 암 발생률에서 유의한 차이가 확인되지 않 았다. 또한 환기가 잘 되는 조건하에서는 발암물질 및 나노입자 영향이 낮은 것으 로 확인되었으나 환기가 부족할 경우 포름알데히드 미량 증가와 나노입자가 상승하 는 것으로 나타나 3D 프린터는 필터가 있는 밀폐형을 사용토록 하고 환기시설 등 을 갖춘 상태에서 사용하기를 제언한다.

연구배경

- 3D 프린터 위험성에 대한 언론보도
 - 같은 학교 교사 2명 및 타 학교 교사 총 7명에게 육종암, 폐암 등이 발생하였다는 언론 보도 이후 이슈화 되었다. 또 3D 프린터는 교육현장에서 2014년부터 본격적으로 사용 되기 시작하였으나 3D 프린터와 관련된 안전 및 보건에 대한 지식 없이 사용하였고 인사혁신처에서는 2020년 암이 발생한 교사 3명에 대한 개별역학조사를 이례적으로 연구원으로 의뢰하였다. 하지만 교육기관에서의 3D 프린터 노출실태 및 건강영향에 대 한 연구는 부족하여 집단역학조사를 수행하였다.

주요연구내용

● 연구결과

- 3D 프린터 사용실태조사
 - 2020년 3D 프린터 실태조사에 대한 교육부 자료를 재분석한 결과, 조사대상 학교 전 체 10.816개교 중 53.2%(5,742개교)에서 23,553대의 3D 프린터를 보유하고 있었다. 또 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 재료압출방식 (ME, Material Extrusion)의 하나인 FDM(Fused deposition modeling)방식이 5.083개교(88.5%)에서 사용 중이었다. 사용소재는 PLA(Polvlactic acid)가 90.4%(5,192개교), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene) 15.1%(868개교) 순으로 많이 사용하였고 신체이상을 경험한 자가 소속된 교육기관은 4.8%(274개교)로 분포하

였다. 3D 프린터를 사용하는 교육기관에서 환기형태는 별도의 자체정화장치나 국소배 기장치 없이 창문 등 전체 환기만 있는 경우가 79.8%(4,580개교)이었고 창문을 포함한 환기장치가 아예 없는 경우가 0.9%(51개교)로 나타났다

- 교육현장과 유사한 실험 환경과 실제 교육현장에서의 작업환경측정
 - ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)와 PLA(Polylactic acid) 필라멘트를 이용한 3D 프린터의 출력물이 바람과 온도 등에 매우 예민하여 3D 프린터와 발암 관련성이 언론보도로 이슈화되기 전까지는 창문이나 문을 모두 닫은 상태에서 3D 프린터를 교육 현장에서 사용하였다. 따라서 사무실 형식의 실험실 내에서 창문 및 문을 닫고 측정하였는데 ABS와 PLA 소재에서 노출가능한 발암물질인 아크릴로니트릴, 스티렌, 1,3-부타디엔, 포름알데히드, 에틸벤젠, 염화비닐을 측정한 결과 포름알데히드가 검출한계미만이나 0.002ppm, 0.003ppm 수준으로 매우 낮게 측정되었고 나머지 물질은 모두 검출한계 미만으로 확인되었다. 나노입자(10~420nm)는 ABS와 PLA 각 소재별 3회씩을 측정한 결과 같은 소재임에도 측정 시 마다 입자 수 농도에 차이가 있었으나 3D 프린터 작동 전에 비해 작동 중에서 모두 일관적이게 증가하였다. 또한 모든 측정결과에서 100nm(0.1㎜)미만의 나노입자에서 농도가 높은 것을 확인하였다.
 - 실제교육현장에서는 현재의 환경에서 발암성 노출 확인을 위해 측정하였다. 현재는 3D 프리터가 이슈화 된 이후 국소배기장치 및 후드를 설치한 곳도 있었으며 공기정화장치 도입, 환기팬 설치, 창문개방 등의 환기를 실시하고 있었다. 또한 방문한 10개 학교 모 두에서 상대적으로 덜 유해하다고 알려진 PLA(Polylactic acid)만을 사용하고 있어 과 거에 비해 현재는 환경이 많이 개선된 것으로 확인되었다. 발암물질인 유기화합물의 경 우 10개 학교에서 3D 프린터를 사용하는 곳을 중심으로 측정하였고 대조군으로 3개교 는 외기에서도 측정하였다. 염화비닐과 1,3-부타디엔은 모든 학교에서 검출한계 미만 으로 확인되었고 학교의 3D 프린터 근접에서 측정한 인자별 평균값(산술)은 포름알데 히드 0.0191 ppm(노출기준 : 0.3 ppm), 벤젠 0.0002 ppm(노출기준 : 0.5 ppm), 에틸벤젠 0.001 ppm(노출기준 : 100 ppm), 스티렌 0.0003 ppm(노출기준 : 20 ppm)이었다. 벤젠, 에틸벤젠, 스티렌은 고용노동부 노출기준에 비해 0.01% 수준으로 노출 정도가 낮았고, 포름알데히드는 노출기준에 비해 6.37% 정도로 낮았다. 하지만 대조군으로 외기를 측정한 학교에서 3D 프린터실 내에서 측정한 결과에 비해 벤젠, 에 틸벤젠, 스티렌의 경우 워낙 미량이라 외기와의 차이가 뚜렷하지 않았으나 포름알데히 드는 미량 증가하는 경향을 보여 환기는 필요한 것으로 확인되었다. 중금속의 경우 대 부분의 시료에서 검출한계 미만으로 나타났고, 일부 시료에서만 납, 니켈 및 크롬이 검 출되었는데 노출기준의 0.001% 이하의 수준으로 노출정도가 매우 낮았다. 나노입자의 경우 창문을 통한 외기의 영향이 큰 것으로 확인되었고 일부에서 사용 환경이나 가동조

건, 환기부족에 따라 농도가 상승하는 학교도 있었다.

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

○ 신체영향 경험 유무에 따른 사용실태 특성 분석

- 교육부의 "3D 프린팅 안전문제 관련 실태조사" DB 분석을 통해 3D 프린터 개방여부와 사용소재, 환기 형태와 신체영향 경험의 유의성을 확인하였다. 신체영향 경험 증상에서 는 3D 프린터를 보유한 전체 5,724개교 중 274개교(4.8%)에서 신체영향을 경험한 것으로 응답하였다. 소속된 인원에서 가장 많은 증상을 호소하는 것은 두통 603명, 호흡기자극 219명, 눈자극 198명 순으로 나타났다. 신체영향 경험 여부에 따른 사용실태 특성을 통계 분석한 결과에서 FDM형식, 소재, 환기형태(p<.001), 보유대수, 사용량, 가동시간, 상주시간(p<.0001), 공간구분여부(p=0.007)에서 모두 통계적으로 유의하였다.

○ 3D 프린터 건강영향사례 조사 및 암 발생률

- 3D 프린터는 최근 보급되어 급격히 사용량이 증가된 새로운 직업적 유해요인이다. 하 지만 사회적 관심에 비하여 암 발생률을 포함한 건강 영향(암 발생)에 대한 조사는 부족 한 상태로, 국내·외 문헌의 결과를 종합하여 이에 관련된 종합적 최신의 근거를 제공하 고자 체계적 문헌고찰을 수행하였다. 최종적으로 3D 프린터와 암 발병과 관련 있는 논 문은 한국에서 3명의 교사에게 발병한 의학 사례보고 1건이었으며 이 사례는 3D 프린 터를 사용한 3명의 교사에게 각각 발생한 육종인 Ewing's sarcoma, Well-differentiated liposarcoma, Malignant peripheral nerve sheath tumor(MPNST)로 앞의 두 케이스가 한 학교에서 잇달아 발생하여 이에 대한 의구심을 제기한 연구였다. 또한 화학물질의 노출과 암 발생 사이에는 일반적으로 용량반응관계 가 있으며. 반응의 최소값을 역치(threshold. 임계 값)라고 지칭한다. 한 분자의 발암물 질에 의해서 세포내에 종양발생변화가 생긴다고 가정하더라도, 특정 용량 이하의 노출 에서는 그 발암물질 분자가 표적세포에 도달할 가능성이 매우 낮다(김수근, 2014). 하 지만, 2014년부터 3D 프린터를 사용하는 교사집단에서 이미 암이 발생하였고 특히 육 종암 같은 희귀암이 한 학교에서 2명이 발생하여 3D 프린터와의 연관성에 의구심이 있어, 3D 프린터를 사용한 교사들이 포함된 집단과 포함되지 않은 집단 간의 암 발생 률을 확인하였다. 또 개별역학조사를 통해 확인된 교사 3명 모두 2014년부터 2016년 까지 3D 프린터를 사용하였으며 2020년에 암이 발생하였다. 따라서 이 시기에 3D 프 린터를 사용하는 교육기관에 소속된 집단과 소속되지 않은 집단의 암 발생률을 확인할 필요가 있어. 표준화별병비(Standardized Incidence Ratio)와 오즈비(Odds Ratio) 를 확인하였으나 두 집단 간 모든 암에서 통계적으로 유의미한 차이는 없었다. 하지만 나노입자의 경우 불충분한(창문 및 문 닫힘) 환기 조건에서 3D 프린터 가동 시 일관적 이게 발생이 된다. 이는 과거 교육기관에 3D 프린터가 처음 도입될 당시 좁은 환경에 서 바람, 온도 등에 예민한 출력물의 상태를 위해 환기가 불충분한(창문 및 문 닫힘) 곳에서 사용하는 교육기관이 대다수였으므로 3D 프린터와 암 발생과 관련된 건강영향 은 고형암의 잠재기가 10년 이상(Fraser, 2011)인 걸 감안하여 그 이후에 한 번 더 확 인이 필요하다. 또한 나노입자보다 큰 미세먼지(PM10, 10㎜이하)는 세계보건기구 (WHO)산하 국제암연구소(IARC)에서 1급 발암물질로 분류(Group1. 2016)되어 있고, 나노입자 중 100nm 이하에 해당하는 초미세입자(Ultra-fine particle)는 작은 크기의 입자들이 심폐영역이나 폐포의 심부영역까지 쉽게 이동할 수 있어 더욱 강한 독성을 나타낸다는 연구 결과(Brent Stephens et al., 2013)가 있었으나 현재까지는 암 발병 비에서 유의하지 않았다. 따라서 이러한 상황들을 전반적으로 종합하면'3D 프린터 사 용에 따른 암 발생'은 그 연관성에 대한 의심이 제기된 상태이나 그 연관성의 근거가 아직은 부족한 상태로 확인된다. 이는 근본적으로 노출 실태조사에서처럼 3D 프린터 사용에 따라 노출되는 위험인자의 노출 농도가 매우 낮기 때문일 수도 있으며, 그보다 근본적으로 3D 프린터가 비교적 최근에 도입된 직업적 요인으로서, 암 발생 수준을 연 구하기 위해 보다 충분한 시간과 인구 조건이 추가적으로 필요하기 때문일 수 있다.

₩ 시사점

- 3D 프린터 사용 시 환기 부족 상태에서는 포름알데히드가 미량 증가하거나 나노입자가 급격히 상승하고 환기가 충분할 경우 유기화합물 및 나노입자는 외기의 농도와 유사해지는 것을 본 연구를 통해 확인하였다.
- 고형암의 잠재기는 10년 이상(Fraser, 2011)이지만 2014년부터 3D 프린터를 사용한 교사집단에서 2020년에 이미 암이 발생하였고, 특히 한 학교에서 2명의 교사에게 육종암이라는 희귀암이 발생하여 3D 프린터 사용과 암 발생과의 관련성 확인이 필요하였으나 현재까지는 암과 3D 프린터 사용 간의 관련성이 확인되지 않았다. 하지만 3D 프린터 가동시 비의도적인 나노입자가 발생하고 있고 교육기관에 3D 프린터 도입 시기인 2014년경에는 현재와 달리 온도 및 바람 등에 예민한 출력물 상태를 위해 창문 및 문을 모두 닫고사용하였다. 따라서 나노입자와 암과의 관련성에 대해 도입 초기시기로부터 10년 더 이후의 시점에서 암 발병에 대한 후속 연구는 필요하다.

3 연구활용방안

₩ 제언

○ 3D 프린터 사용 시에는 필터가 장착된 밀폐형을 사용토록 하고, 호흡용보호구를 착용한다. 또 창문개방 및 환기팬 가동 등의 기본적인 환기 실시와 후드 및 배기장치를 필수로설치한 후 3D 프린터를 사용하기를 제언한다.

₩ 활용방안

○ 본 연구에서 3D 프린터 사용 시 환기 여부에 따른 노출수준 파악을 통해 환기필요성에 대한 근거와 역학조사의 참고자료로 활용할 수 있다.

⊠ 연락처

• 연구책임자: 산업안전보건연구원 직업건강연구실 역학조사부 최지형

서울대학교 윤충식 교수

• 연락처: 052-703-0873

• e-mail: yayajju@kosha.or.kr