

연구보고서

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

박해동·김성호·이유진

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2021년 2월 ~ 2021년 11월
- 핵심 단어 3D프린팅, 분말소결방식, 금속분말, 나노입자, 노출평가
- 연구과제명 금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

1. 연구배경

적층제조라고도 명명되는 3D 프린팅 기술은 새로운 산업을 이끌 기술로 주목 받으며, 이를 활용한 기술들이 다양하게 시도되고 있다. 새로운 기술의 큰 장점과 함께 새로운 유해인자의 노출에 대한 염려도 있다. 선행연구들은 주로 플라스틱 소재를 사용하는 프린터에 대한 챔버내 실험이 대부분이었고, 산업에서 사용되는 대규모 3D 프린터에 대한 연구는 미흡하다. 이에 금속소재를 사용하는 3D 프린팅 사업장에서 나노입자와 주요 유해인자를 평가하고자 하였다.

2. 주요 연구내용

○ 문헌고찰

• 과학기술정보통신부에서 관련산업 진흥을 위한 법이 제정되어 시행되고 있으며, 안전교육, 삼차원프린팅서비스사업 신고 등의 규정이 있다. 약 100여종의 민간자격이 등록되어 있으나, 취득현황을 제공하는 자격은 17종이었다. 4개의 관련협회와 1개의 안전교육기관이 있으며, 매년 실태조사를 하여 공표하고 있다.

• 독일 등 유럽에서 입자상 나노물질(100nm 이하)에 대해서 비중에 따라 20,000 개/cm³ (또는 40,000 개/cm³)로 참조값을 제안하였으며, 영국표준협회는 벤치마크레벨이라는 이름으로 나노물질의 성분에 따라서 기존 노출기준의 0.066~0.5배에 해당하는 값을 참조값으로 제안하였다.

• 금속 3D 프린팅 관련 연구논문은 최근 몇 년 사이에 발표되고 있으며, 생물학적지표검사, 나노 입자수, 공기 중 금속 농도 등에 대한 평가가 일부 이루어졌다.

○ 입자상물질 평가

• 분말소결(PBF, powder bed fusion) 방식의 4개 사업장과 전기화학방식 1개 사업장에서 입자 수, 입경 및 표면적 등을 직독식 장비로 측정하고, 공기 중 금속을 포집하여 성분 및 형상 등을 분석하였다.

• 입자 수 농도는 사업장별 중위수로 4,367~10,033 개/cm³ 로 평가되었으며, 사업장별, 시간대별 차이가 있었다. 중위수 농도를 기준으로 근무시간동안의 농도가 근무의 시간에 비해서 높은 사업장도 있었으나, 낮은 사업장도 있었다. 질량농도에서는 근무시간 중 작업형태에 따라서 농도변화가 심하게 나타나는 것을 관찰할 수 있었으나, 수 농도에서는 큰 변화가 없었는데, 이는 작업에 따라 작은 입자의 발생보다 큰 입자의 발생으로 인한 영향으로 판단된다.

• 근무시간 중 작업장내의 100 nm 이하 크기의 입자는 전체 입자 수의 44.9~83.5%에 해당하여 대부분을 구성하였다.

• 동일 장소에서 측정한 입자 수 측정장비들과 폐침착 표면적 측정장비들에서 높은 상관관계를 보였다. 그러나 장비별 측정값은 서로 일정한 비율로 차이를 보였는데, 이는 장비별 측정범위가 다른 점에 의한 것으로 생각된다.

• 소재 벌크시료와 공기 중 채취된 입자를 전자현미경 및 에너지분산 분광분석기로 분석하였을 때, 공기 중에서 소재성분과 유사한 입자를 일부 관찰할 수 있었다. 유도결합플라즈마로 분석한 공기 중 채취 시료에서는 사용소재와 관련된 알루미늄, 니켈, 마그네슘, 티타늄이 검출되었으나, 그 농도수준은 노출기준에 비해서 매우 낮은 수준이었다.

○ 생물학적 노출지표 및 표면오염도 평가 등

- 생물학적노출지표 검사에서 니켈의 경우 최대값이 20 $\mu\text{g/L}$ 수준으로 기준값(주말, 80 $\mu\text{g/L}$)에 비해서 낮았으며, 대부분의 값은 일반인의 참고값(5 $\mu\text{g/L}$)보다 낮은 값이었다.

- 표면오염도 조사에서 사업장 및 지점별로 차이가 컸으나, 니켈(643 $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)과 알루미늄(414 $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)이 상대적으로 높은 값을 보였다. 손의 오염도 조사에서는 다양한 금속이 소량 검출되었으나 1개 사업장 보호장갑을 착용하지 않고 작업한 작업자에서 티타늄(22,036 μg)과 알루미늄(2,192 μg)이 상대적으로 매우 높게 검출되었다.

- 사무직 15명과 작업자 17명을 대상으로 설문한 결과, 건강증상 경험을 응답한 비율은 작업자가 사무직보다 높았다($p=0.005$). 작업자 중에는 사용하는 소재의 유해성에 대해서 보통 이상으로 인식하는 비율이 83%였고, 물질안전보건자료와 인터넷정보를 활용하는 것으로 나타났다.

3. 연구 활용방안

- 금속 3D 프린팅 작업시 노출 유해인자에 대한 기초자료 제공
- 관련 산업 근로자의 건강보호 및 후속연구에 활용

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 박해동
 - ☎ 052) 7030. 885
 - E-mail : workenv@kosha.or.kr

I. 서론 1

1. 연구배경 3

2. 연구목적 4

II. 연구방법 5

1. 관련자료분석 7

1) 관련법령 및 관련기관 현황 7

2) 실태조사 등 7

3) 관련논문 7

2. 평가대상 및 시기 8

3. 입자상물질 평가 20

1) 나노입자 평가 20

2) 나노입자 구성성분 30

3) 공기 중 금속 33

4. 기타 인자 34

1) 생물학적 노출지표 평가 34

목 차

2) 표면오염 및 피부노출 평가	34
3) 설문조사	35
4) 통계처리	36
Ⅲ. 연구결과	37
1. 관련자료분석	39
1) 관련법령 및 관련기관 현황	39
2) 실태조사 등	43
3) 관련연구, 논문 등	47
2. 입자상물질 평가	70
1) 온습도 환경	70
2) 나노입자 수 평가	75
3) 입자 성분분석	148
4) 공기 중 금속	196
3. 기타 인자	199
1) 생물학적 노출지표 평가	199
2) 표면오염 및 피부노출 평가	201
3) 설문조사	212

Ⅳ. 결론	217
참고문헌	222
Abstract	226
부 록	228
1. 실태조사 설문지	228

<표 II-1> 평가대상 사업장 현황 8
 <표 II-2> Partector 2의 측정범위 및 정확도 24
 <표 II-3> 장비별 측정범위 및 주요원리 28
 <표 III-1> 자격증 현황을제공하는 자격종류별 취득자 현황 41
 <표 III-2> 표준산업분류 내 3D 프린팅업종 분류 43
 <표 III-3> 2020년 3D프린팅 공급사 현황 44
 <표 III-4> 2020 3D프린팅 수요사 현황 44
 <표 III-5> 2020년 3D프린팅 종사자 수 44
 <표 III-6> 금속 3D프린팅 미활용 이유(중복응답) 45
 <표 III-7> 2020 금속 3D프린터 장비 도입 현황 45
 <표 III-8> 평가대상 사업장별 운습도 현황 74
 <표 III-9> 사업장별 입자 수 농도 (전체 값, by CPC) 79
 <표 III-10> 작업시간동안 사업장별 입자 수 농도 80
 <표 III-11> 밤 시간동안 사업장별 입자 수 농도 81
 <표 III-12> 점심시간동안 사업장별 입자 수 농도 82
 <표 III-13> 평가대상 사업장별 입자 수 농도 89
 <표 III-14> 평가대상 사업장별 입자 수 농도 90
 <표 III-15> 평가대상 사업장별 입자 수 농도와 질량농도 비교 101
 <표 III-16> A 사업장 공정내 입자수 농도 (by Partector2) 103
 <표 III-17> A 사업장 폐침착표면적 농도 (by Partector2) 103
 <표 III-18> B 사업장 공정내 입자수 농도 (by Partector2) 105
 <표 III-19> B 사업장 폐침착표면적 농도 (by Partector2) 106
 <표 III-20> C 사업장 공정내 입자수 농도 (by Partector2) 108

<표 III-21> C 사업장 폐침착표면적 농도 (by Partector2) 108
 <표 III-22> D 사업장 공정내 입자수 농도 (by Partector2) 110
 <표 III-23> D 사업장 폐침착표면적 농도 (by Partector2) 110
 <표 III-24> E 사업장 공정내 입자수 농도 (by Partector2) 112
 <표 III-25> E 사업장 폐침착표면적 농도 (by Partector2) 112
 <표 III-26> 평가대상 사업장별 입자 수 농도와 LDSA 비교 113
 <표 III-27> 사업장별 폐침착 표면적 농도 비교 (by NSAM) 115
 <표 III-28> 사업장별 폐침착 표면적 노출량 (by NSAM) 116
 <표 III-29> A 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS) 118
 <표 III-30> B 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS) 119
 <표 III-31> C 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS) 120
 <표 III-32> D 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS) 121
 <표 III-33> E 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS) 122
 <표 III-34> A 사업장 측정장비간의 상관관계 133
 <표 III-35> B 사업장 측정장비간의 상관관계 134
 <표 III-36> C 사업장 측정장비간의 상관관계 135
 <표 III-37> D 사업장 측정장비간의 상관관계 136
 <표 III-38> E 사업장 측정장비간의 상관관계 137
 <표 III-39> 입자 수 측정장비간의 비교 138
 <표 III-40> OPS 장비별 입자 수 농도 측정값의 비교 142
 <표 III-41> 폐침착 표면적 측정장비의 농도값 비교 (단위 : $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$) 147
 <표 III-42> 사업장 A의 시료채취지점 및 시간 165
 <표 III-43> 사업장 B의 시료채취지점 및 시간 172

표

<표 III-44> 사업장 C의 시료채취지점 및 시간	177	<표 III-67> 구리의 작업자 손 오염량	210
<표 III-45> 사업장 D의 시료채취지점 및 시간	185	<표 III-68> 주석의 작업자 손 오염량	211
<표 III-46> 사업장 E의 시료채취지점 및 시간	191	<표 III-69> 알루미늄의 작업자 손 오염량	211
<표 III-47> 사업장 금속시료분석결과	196	<표 III-70> 설문조사 인적사항 및 건강증상조사 결과	213
<표 III-48> 금속성분별 농도수준	198		
<표 III-49> 금속의 물리적특성	198		
<표 III-50> 소변 중 금속성분 분석결과	199		
<표 III-51> 표면 오염물질 평균량	201		
<표 III-52> 마그네슘의 사업장별 표면 오염량	202		
<표 III-53> 크롬의 사업장별 표면 오염량	203		
<표 III-54> 니켈의 사업장별 표면 오염량	203		
<표 III-55> 몰리브데늄의 사업장별 표면 오염량	204		
<표 III-56> 티타늄의 사업장별 표면 오염량	204		
<표 III-57> 구리의 사업장별 표면 오염량	205		
<표 III-58> 납의 사업장별 표면 오염량	205		
<표 III-59> 주석의 사업장별 표면 오염량	206		
<표 III-60> 알루미늄의 사업장별 표면 오염량	206		
<표 III-61> 사업장별 작업자 손 오염물질 평균량	207		
<표 III-62> 마그네슘의 작업자 손 오염량	208		
<표 III-63> 크롬의 작업자 손 오염량	208		
<표 III-64> 니켈의 작업자 손 오염량	209		
<표 III-65> 몰리브데늄의 작업자 손 오염량	209		
<표 III-66> 티타늄의 작업자 손 오염량	210		

그림목 차

[그림 II-1] 보호구를 착용한 작업자 9

[그림 II-2] A 사업장 배치도 및 주 측정위치 10

[그림 II-3] B 사업장 배치도 및 주 측정위치 13

[그림 II-4] C 사업장의 배치도 및 주 측정위치 15

[그림 II-5] D 사업장의 배치도 및 주 측정위치 17

[그림 II-6] E 사업장의 배치도 및 주 측정위치 19

[그림 II-7] CPC의 나노입자 측정원리 21

[그림 II-8] 입자수 농도 측정기기의 측정원리 22

[그림 II-9] 표면적농도 측정기(NSAM)의 측정원리 23

[그림 II-10] Partector2 의 사진 24

[그림 II-11] Deposition as function of particle size 25

[그림 II-12] Scheme of partector 26

[그림 II-13] The ratios of LDSA by particle size 26

[그림 II-14] Particle size distribution measured by an SMPS 27

[그림 II-15] 장비별 측정입자의 범위 29

[그림 III-1] A 사업장 온습도 환경 70

[그림 III-2] B 사업장 온습도 환경 71

[그림 III-3] C 사업장 온습도 환경 71

[그림 III-4] D 사업장 온습도 환경 72

[그림 III-5] E 사업장 온습도 환경 73

[그림 III-6] A 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC) 75

[그림 III-7] B 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC) 76

[그림 III-8] C 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC) 76

[그림 III-9] D 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC) 77

[그림 III-10] E 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC) 77

[그림 III-11] 사업장별 입자 수 농도 변화 (CPC) 78

[그림 III-12] 사업장별 입자 수 농도 79

[그림 III-13] 작업시간동안 사업장별 입자 수 농도 80

[그림 III-14] 밤 시간동안 사업장별 입자 수 농도 81

[그림 III-15] 점심시간동안 사업장별 입자 수 농도 82

[그림 III-16] 시간구분에 따른 입자 수 농도 비교 83

[그림 III-17] A 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC) 85

[그림 III-18] B 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC) 86

[그림 III-19] C 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC) 87

[그림 III-20] D 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC) 87

[그림 III-21] E 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC) 88

[그림 III-22] A 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS) 91

[그림 III-23] B 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS) 92

[그림 III-24] C 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS) 92

[그림 III-25] D 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS) 93

[그림 III-26] E 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS) 94

[그림 III-27] A 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS) 96

[그림 III-28] A 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS) 96

[그림 III-29] B 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS) 97

[그림 III-30] B 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS) 97

[그림 III-31] C 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS) 98

그림목 차

[그림 III-32] C 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS) 98
 [그림 III-33] D 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS) 99
 [그림 III-34] D 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS) 99
 [그림 III-35] E 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS) 100
 [그림 III-36] E 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS) 100
 [그림 III-37] A 사업장 주작업자 102
 [그림 III-38] A 사업장 지역+작업자 102
 [그림 III-39] B 사업장 공정내 지역평가(나노장비) 104
 [그림 III-40] B 사업장 주작업자 105
 [그림 III-41] B 사업장 후처리작업자 105
 [그림 III-42] C 사업장 공정내 지역평가(나노장비) 106
 [그림 III-43] C 사업장 3D 프린팅 주작업자 107
 [그림 III-44] C 사업장 실리콘렌즈 작업자 107
 [그림 III-45] D 사업장 공정내 지역평가(나노장비) 109
 [그림 III-46] D 사업장 3D 프린팅 주작업자(B1) 및 지역(B2) 109
 [그림 III-47] D 사업장 지역 및 작업자 109
 [그림 III-48] E 사업장 공정내 지역평가(나노장비) 111
 [그림 III-49] E 사업장 3D 프린팅 작업자1 111
 [그림 III-50] E 사업장 3D 프린팅 작업자2 112
 [그림 III-51] 사업장별 폐침착 표면적농도 변화 (NSAM) 114
 [그림 III-52] A 사업장 입경별 누적분포 118
 [그림 III-53] B 사업장 입경별 누적분포 119
 [그림 III-54] C 사업장 입경별 누적분포 120

[그림 III-55] D 사업장 입경별 누적분포 121
 [그림 III-56] E 사업장 입경별 누적분포 122
 [그림 III-57] 사업장의 입경별 누적분포 123
 [그림 III-58] A 사업장의 입경분포 124
 [그림 III-59] B 사업장의 입경분포 125
 [그림 III-60] C 사업장의 입경분포 125
 [그림 III-61] D 사업장의 입경분포 126
 [그림 III-62] E 사업장의 입경분포 126
 [그림 III-63] A 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS) 127
 [그림 III-64] B 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS) 128
 [그림 III-65] C 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS) 129
 [그림 III-66] D 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS) 130
 [그림 III-67] E 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS) 131
 [그림 III-68] 입자 수 농도 측정장비 비교(A사업장 공정내) 133
 [그림 III-69] 입자 수 농도 측정장비 비교(B사업장 공정내) 134
 [그림 III-70] 입자 수 농도 측정장비 비교(C사업장 공정내) 135
 [그림 III-71] 입자 수 농도 측정장비 비교(D사업장 공정내) 136
 [그림 III-72] 입자 수 농도 측정장비 비교(E사업장 공정내) 137
 [그림 III-73] OPS 입자 수 농도 비교(A사업장 공정) 139
 [그림 III-74] OPS 입자 수 농도 비교(B사업장 공정) 140
 [그림 III-75] OPS 입자 수 농도 비교(C사업장 공정) 140
 [그림 III-76] OPS 입자 수 농도 비교(D사업장 공정) 141
 [그림 III-77] OPS 입자 수 농도 비교(E사업장 공정) 141

그림목 차

[그림 III-78] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(B사업장 공정) 144
 [그림 III-79] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(C사업장 공정) 145
 [그림 III-80] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(D사업장 공정) 145
 [그림 III-81] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(E사업장 공정) 146
 [그림 III-82] 금속분말재료 이미지 148
 [그림 III-83] A 사업장의 금속분말(시빙 전) 재료 이미지 149
 [그림 III-84] A 사업장의 금속분말(시빙 전) 구성성분 150
 [그림 III-85] A 사업장의 금속분말(시빙 후) 재료의 이미지 151
 [그림 III-86] A 사업장의 금속분말(시빙 후) 구성성분 152
 [그림 III-87] B 사업장의 금속분말(시빙 전) 재료의 이미지 153
 [그림 III-88] B 사업장의 금속분말(시빙 전) 구성성분 154
 [그림 III-89] B 사업장의 금속분말(시빙 후) 재료의 이미지 155
 [그림 III-90] B 사업장의 금속분말(시빙 후) 구성성분 156
 [그림 III-91] D 사업장의 금속분말(시빙 전) 재료의 이미지 157
 [그림 III-92] D 사업장의 금속분말(시빙 전) 구성성분 158
 [그림 III-93] D 사업장의 금속분말(시빙 후) 재료의 이미지 159
 [그림 III-94] D 사업장의 금속분말(시빙 후) 구성성분 160
 [그림 III-95] E 사업장의 금속분말(시빙 전) 재료의 이미지 161
 [그림 III-96] E 사업장의 금속분말(시빙 전) 재료의 구성성분 162
 [그림 III-97] E 사업장의 금속분말(시빙 후) 재료의 이미지 163
 [그림 III-98] E 사업장의 금속분말(시빙 후) 재료의 구성성분 164
 [그림 III-99] 공기 중 시료(1호기 앞) SEM 분석결과 165
 [그림 III-100] 공기 중 시료(1호기 앞) TEM 분석결과 166

[그림 III-101] 공기 중 시료(전실_신발장) SEM 분석결과 167
 [그림 III-102] 공기 중 시료(전실_신발장) TEM 분석결과 167
 [그림 III-103] 공기 중 시료(장입작업 중) SEM 분석결과 168
 [그림 III-104] 공기 중 시료(장입작업 중) TEM 분석결과 168
 [그림 III-105] 공기 중 시료(시빙_소재투입) SEM 분석결과 169
 [그림 III-106] 공기 중 시료(시빙_소재투입) SEM-EDS 분석결과 170
 [그림 III-107] 공기 중 시료(시빙_소재투입) TEM 분석결과(1) 170
 [그림 III-108] 공기 중 시료(시빙기 가동 중) SEM 분석결과 171
 [그림 III-109] 공기 중 시료(시빙기 가동 중) TEM 분석결과 171
 [그림 III-110] 공기 중 시료(나노장비 설치위치) SEM 분석결과 172
 [그림 III-111] 공기 중 시료(1층복도(외기)) SEM 분석결과 173
 [그림 III-112] 공기 중 시료(1층복도(외기)) TEM 분석결과 173
 [그림 III-113] 3호기 unpack 및 door open 시 SEM 분석결과 174
 [그림 III-114] 3호기 unpack 작업시 시료의 TEM 분석결과 175
 [그림 III-115] Door open 시 TEM 분석결과 175
 [그림 III-116] 시빙 작업시 채취된 시료의 SEM 분석결과 175
 [그림 III-117] 시빙 작업시 채취된 시료의 TEM 분석결과 176
 [그림 III-118] 작업장(배경) 시료의 SEM 분석결과 177
 [그림 III-119] 작업장(배경) 시료의 SEM-EDS 분석결과 178
 [그림 III-120] 작업장(배경) 시료의 TEM-EDS 분석결과 179
 [그림 III-121] 사무실(배경) 시료의 SEM 분석결과 180
 [그림 III-122] 사무실(배경) 시료의 TEM-EDS 분석결과 180
 [그림 III-123] BE006 작동중 시료의 SEM-EDS 분석결과 181

그림목 차

[그림 III-124] BE006 작동중 시료의 TEM 분석결과	181	[그림 III-147] 금속성분별 농도비교	197
[그림 III-125] BE006 작동중 시료의 TEM-EDS 분석결과	182	[그림 III-148] 사용재료의 유해성에 대한 자각적인 인식도	214
[그림 III-126] 작업장_나노 시료의 SEM-EDS 분석결과	183	[그림 III-149] 소재에 대한 유해성여부 판단 근거	214
[그림 III-127] 작업장_나노 시료의 SEM-EDS 분석결과	183	[그림 III-150] 소재의 건강영향 최소화 위해서 필요한 조치	215
[그림 III-128] 작업장_나노 시료의 SEM-EDS 분석결과	184	[그림 III-151] 프린팅 작업장 환기방식	216
[그림 III-129] 작업장_나노2 시료의 SEM 분석결과	184		
[그림 III-130] 나노장비_2일차 시료의 SEM 분석결과	185		
[그림 III-131] 나노장비_3일차 시료의 SEM 이미지	186		
[그림 III-132] 나노장비_3일차 시료의 TEM 이미지	186		
[그림 III-133] 장비세팅_지역 시료의 SEM 이미지	187		
[그림 III-134] 장비세팅_개인 시료의 SEM 이미지	187		
[그림 III-135] 장비세팅_지역 시료의 SEM-EDS 분석결과	188		
[그림 III-136] 장비세팅_개인 시료의 TEM-EDS 분석결과	188		
[그림 III-137] 사무실 시료의 TEM 이미지	189		
[그림 III-138] 사무실 시료의 TEM-EDS 분석결과	190		
[그림 III-139] 현장공시료(PC필터) SEM 이미지	190		
[그림 III-140] 청소작업 시료 TEM 이미지	191		
[그림 III-141] 청소작업 시료 TEM-EDS 분석결과	192		
[그림 III-142] 사무실 시료 TEM-EDS 분석결과	193		
[그림 III-143] 작업장_2일차 시료 SEM-EDS 분석결과	193		
[그림 III-144] 작업장_3일차 시료 SEM-EDS 분석결과	193		
[그림 III-145] 작업장_2일차 시료 TEM-EDS 분석결과	194		
[그림 III-146] 작업장_3일차 시료 TEM-EDS 분석결과	194		

I. 서론

.....

I. 서론

1. 연구배경

4차 산업혁명으로 불리는 급격한 변화가 사회전반에 영향을 미치고 있으며, 이에 가장 주목을 받고 있는 제조기술은 3D 프린팅 기술이다. 3D 프린팅 기술은 적층기술이라고도 부르며, 기존의 가공공정에서 재료를 깎아내서 원하는 제품을 만드는 것과 대비되는 기술로서, 원재료를 원하는 모양으로 쌓아올려서 제품을 제조하는 기술이다.

3D 프린팅의 시초는 1980년대 미국의 3D시스템즈가 플라스틱 액체를 굳혀 입체물품을 만든 것으로 알려져 있다. 3D 프린팅의 대표기술들이 2004년부터 2014년 사이에 특허가 만료되면서, 많은 기업에서 원 기술을 발전시켜 기술의 확장을 위한 연구가 이루어졌다. 현재는 다양한 기술이 적용된 장비가 개발되어 보급되고 있다.

주로 플라스틱을 소재로 사용하던 3D 프린팅 기술이 산업현장의 요구로 인하여, 금속을 활용한 기술의 개발 및 적용까지 이르렀다. 전 세계적으로 금속 3D 프린터가 티타늄을 사용한 의료기구부터 자동차, 항공우주 산업에 이르기까지 다양한 산업에서 적용되고 있다. 금속 3D 프린팅 소재는 스테인리스 스틸, 티타늄, 합금, 백금 등 매우 다양하며, 미세한 분말 소재를 사용한다. 이러한 분말소재의 투입, 완성품 취급, 청소 등의 작업에서 미세분진의 노출가능성이 있다. 또한 소재를 용융시켜 제품을 만드는데, 이때 금속흡이 발생할 수 있다.

3D 프린팅 작업에 대한 여러 선행연구가 있었으나, 주로 플라스틱 소재 위주의 프린터기가 대상이었으며, 챔버내의 실험이 대부분이었다. 금속 3D 프린터는 산업용으로 주로 사용되므로 장비의 규모와 운용측면에

서 개인적인 용도로 사용되는 3D 프린터와는 차이점이 많다.

새로운 기술이 도입되는 경우, 산업보건분야에서는 새로운 유해인자의 노출 가능성을 검토하고 대비해야 할 것이다.

2. 연구목적

금속소재를 사용하는 3D 프린팅 작업장에서 노출 될 수 있는 나노입자의 특성에 대한 평가를 하고자 하였다. 또한, 공기 중 금속의 농도와 생물학적노출지표 평가 및 손오염도 평가 등을 병행하여 향후 관리방안을 마련하는데 기여하고자 하였다.

II. 연구방법



II. 연구방법

1. 관련자료분석

1) 관련법령 및 관련기관 현황

법제처를 통하여 관련법령을 조사하였으며, 하위 고시 등을 확인하고 주요내용을 간단히 정리하였다. 또한 3D 프린팅 관련 자격증 현황을 국가공인 또는 민간으로 구분하여 살펴보았다. 관련기관은 공공기관 및 협회의 홈페이지를 통하여 자료를 수집하였고, 일부 협회는 방문하여 연구과제에 대하여 자문을 받았다.

2) 실태조사 등

과학기술정보통신부가 2020년 현황을 조사하여 2021년 발표한 실태조사 자료와, (사)3D프린팅산업협회가 조사하여 2020년 발표한 자료를 살펴보고 주요내용을 정리하였다.

3) 관련논문

국내논문 및 국외논문을 검색하여 관련정보를 요약하였다. 국내 논문은 한국산업보건학회지, 국내학술논문검색사이트(kiss.kstudy.com)를 통하여 검색하였으며, 검색어는 금속분말, 금속 3D, 나노입자, 노출 등을 조합하여 사용하였다. 국외 논문은 구글학술검색, Elsevier 논문, ProQuest 논문 검색(proquest.com)을 통하여 검색하였으며, 검색어는 metal 3D, additive manufacturing, nano particle, exposure, assessment 등을 조합하여 사용하였다.

2. 평가대상 및 시기

현장평가 대상 사업장은 아래와 같이 5개소였다. PBF 방식의 4개 사업장과 전기화학방식의 1개 사업장을 대상으로 하였다. PBF 방식 중 3개 사업장은 외국산 장비를 사용하였고, 1개 사업장은 국산 장비를 사용하고 있었고, 프린터 장비는 2~3대를 운영하고 있었다. 전기화학식 장비는 자체제작한 장비였으며 4대를 운영하고 있었다.

<표 II-1> 평가대상 사업장 현황

사업장	프린터방식 및 수량	평가일자	특징
A	*PBF(2대)	6/7~6/9	아파트형공장
B	PBF(3대)	6/21~6/23	단독공장
C	전기화학식(4대)	7/5~7/7	아파트형공장
D	PBF(2대)	8/24~8/26	단독공장
E	PBF(2대)	8/30~9/1	단독공장

*PBF : Powder bed fusion

▪ A 사업장

아파트형공장에 입주해 있으며, 주요장비로는 금속 3D 프린터 2대, 시빙기 2대를 운영하고 있다. 국방 및 자동차 관련 제품에 대하여 연구개발 및 검증작업을 하고 있다. 작업장은 사무공간과 다른 층에 위치하여 완벽히 분리되어 있었다. 공조시스템은 해당 작업장에 개별로 설치되어 운영되며, 용량은 150 CMH 였으며, 외기도입은 되나 양은 정확히 파악이 되지 않았다. 일부 창문을 개방하는 등 자연환기가 일부 이루어지고 있다. 후처리하는 자체적으로 수행하는 것은 없으며, 외주에 의해 처리되나, 외주

II. 연구방법

업체는 작업장과 샌드위치 판넬로 구분되어(상부의 약 1/3은 개방되어 있음) 실제적으로는 같은 공간에 있었다. 인접한 후처리업체는 폴리싱(바렐), 열처리, 절단, 연마 등의 작업을 위한 장비를 갖추고 있었다. 소재를 다루거나, 프린터를 개방하는 등 주요 위험작업에서 작업자는 보호의, 자급식송기마스크, 보호장갑을 착용하였다.



[그림 II-1] 보호구를 착용한 작업자(사업장 제공)

주로 사용되는 소재는 알루미늄, 티타늄, 스테인레스스틸 소재이며, 각각 월 50~60kg 사용하는 것으로 조사되었으나, 알루미늄 및 티타늄 소재를 주로 사용하며, SUS 소재는 향후 사용계획으로 있었다. 평가당시에는 알루미늄 소재만 사용하고 있었다.

알루미늄 : Al balance, Si 10%

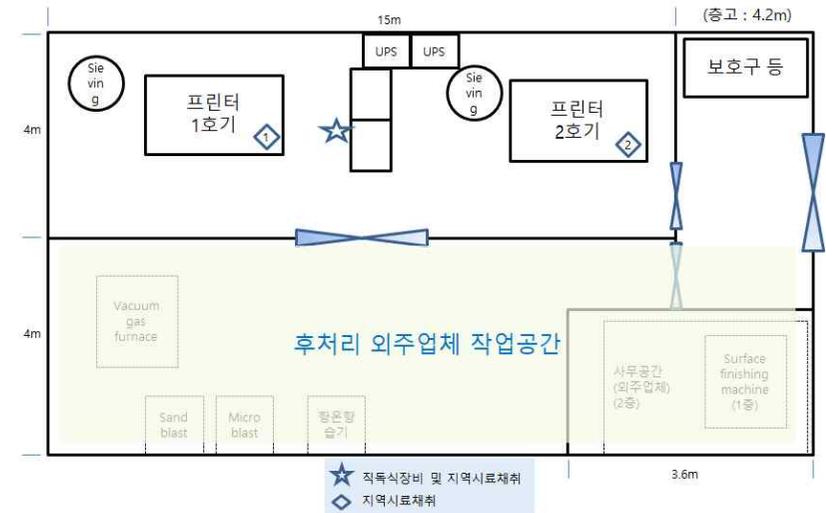
티타늄 : Ti balance, Al 6.3%, V 4%

SUS316L : Fe balance, Cr 17.7%, Ni 12.6%, Mo 2.3%, Mn 0.9%,
Si 0.7%

평가 첫날(월요일) 16시경부터 사용된 소재를 재사용하기 위하여 시

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

빙을 시작하였으며, 21시경 프린터에 소재를 장입하였고, 23시30분경부터 3D프린터 1호기를 작동하기 시작하였다. 해당 장비는 목요일 15:40분까지 가동예정이었다. 평가 둘째 날 오전에 공정근무 없이 사무실 근무만 있었으며, 오후에 장입작업과 재사용소재를 콜렉트 빈에 넣고, 시빙작업 등을 실시하였으며, 18시30분경에 작업이 완료되었다. 평가 셋째 날에는 오전에 시빙기 2대를 이용하여 시빙작업을 하였으며, 오후에는 14시30분경부터 시빙된 소재를 프린터 2호기에 장입하는 작업을 실시하였다.



[그림 II-2] A 사업장 배치도 및 주 측정위치

▪ B 사업장

경기도 산업단지내에 단독공장으로 운영되고 있다. 기존 철강관련 산업을 운영하던 업체가 3D 프린팅 사업으로 확장하고 있는 과정이며, 철강취급을 위한 본 공장 옆에 3D 프린팅 및 사무실 용도의 건물을 구비하

고 있다. 1층에 3D 프린터 3대, 시빙기 2대 등을 보유하고 운영하며, 2층과 3층은 사무실로 사용된다. 1층 작업장이 별도로 분리되어 있지 않아 2, 3층으로 출입시 1층 작업장의 측면을 통과하는 구조로 되어 있다. 금속 3D 프린팅 관련 근로자는 총 5명이며, 본 공장의 출입구 한켠에 마련된 장소에서 후처리를 실시하는 직원 1명을 포함한다.

주요사용소재는 알루미늄과 니켈을 주로 한 소재이나, 평가기간동안 사용한 소재는 알루미늄 베이스의 소재였다.

AlSi7Mg(Al balance, Si 6.8%, Mg 0.51%, Fe 0.06%, Ti 0.05%)

Inconel718(Ni 52.93%, Cr 19.02%, Nb 5.2%, Nb+Ta 5.2%, Mo 3.08%, Ti 0.91%, Al 0.53%)

작업장 내에 별도의 환기장치는 없으며, 프린터는 모두 밀폐형 이었다. 천정형 에어컨으로 실내온도를 23도로 유지하고 있으며, 제습기를 사용하며, 설정습도는 45%였다. 또한 공기청정기(사용면적 101.3 m²)를 상시가동하고 있었다. 작업장내의 개방된 2층 공간에서 PLA 소재를 사용하는 3D 프린터 1대가 평가기간동안 지속적으로 가동하고 있었다. 작업장내의 나노측정 장비로부터 약 7.7미터 떨어진 곳에 위치해 있었다.

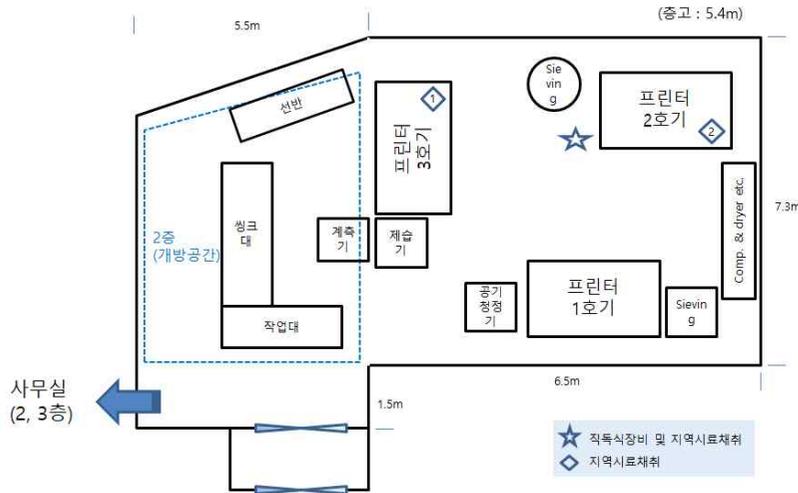
근무시간은 08:30~17:30 이며, 점심시간은 11:30~12:30 이었다.

평가 둘째 날 3호기 소재를 언팩(unpack)작업을 하였으며, 2호기는 정지되어 있었고, 1호기는 니켈 베이스의 소재를 사용한 프린팅 작업 중이었다. 3호기 언팩작업은 작업자 1명이 9시30분부터 시작하였으며, 언팩구역(unpack zone)은 글로브 박스 형태로 되어 있었다. 내부의 산소농도가 2%이하에서 작업하도록 되어 있고, 설정농도 이상인 경우 알람이 울리며 알곤가스가 자동으로 주입된다. 언팩은 프린터기에서 생산된 제품을 꺼내기 위하여 소재를 털어내는 작업이 주를 이루었다. 11시경 제품을 꺼내기 위하여 도어를 열고 약 6~10분간 작업하였다. 오후에는 언팩구역을 오픈하고 진공청소기를 이용하여 청소하였으며, 약 40분 동안 지속되었다. 13시45분부터 15시5분경까지는 프린터 장비회사의 엔지니어가 장

비점검을 수행하였으며, 소재취급 등은 없었고, 프로그램 등을 점검하였다. 15시 이후로 작업장내의 다른 작업은 없었다.

평가 셋째 날 오전 9시부터 10시10분까지 3호기의 process chamber를 청소하는 작업을 수행하였다. 장비사용에서 에러가 발생하여 청소하는 경우이며 렌즈 및 공간을 진공청소하였으며, 알콜 천(Lens wipe, IPA 50%, Water 50%)으로 닦았다. 장비하부공간에 들어가서 청소하기도 하였으며 이때 장비 좌측 패널을 열어두면 인터락에 의해서 장비가 가동되지 않는다고 하였다. 이후에 시빙작업을 수행하고(10:30~11:30), 오후에는 13시부터 시빙작업을 계속하였으며, 1시간가량은 작업장 내에서 시빙작업을 관찰하였고 이후부터는 2층 사무실에서 근무하였다.

후처리 작업자는 CNC 가공, 용접 등의 철강 취급작업을 하는 본 공장의 출입구 한켠에서, 서포터 제거(망치질 등), 디버링, 소형 그라인더를 이용한 연마, 커팅 등의 작업을 하며, 에어컨을 수차례 사용하였다. 열처리의 경우 가열로(Furnace)에서 1060℃, 90분간 처리하고 자연냉각(10시간)하는데, 평가기간동안 작업은 없었다. 주변에서 대형 CNC가 지속적으로 가동 중이었으며, 금속가공유 냄새가 났다. 또한 인근에서 용접작업이 이루어지기도 하였다. 후처리에 사용하는 장비 중 전자기연마기(Electro magnetic deburring & polishing machine, EMD-450, AMECH Co.)를 일부 사용하였다.



[그림 II-3] B 사업장 배치도 및 주 측정위치

▪ C 사업장

주형 시뮬레이션 프로그램과 조명용 렌즈를 주로 생산하는 기업에서 전기화학방식을 이용한 3D프린팅 사업에 착수하였으며, 금속 3D 프린팅 관련 근로자는 9명이었다. 프린터를 자체 제작하였으며, 전자제품의 접합체, 범프 등의 샘플을 제작하고 연구용으로 활용하고 있었다. 4대의 프린터를 보유하고 있으며 개방형 이었다. 소재는 분말형태의 황산구리이며, 이를 황산과 염산 등에 녹여서 액상으로 사용한다. 액상에서 황산구리와 황산의 농도는 0.7~1M이다. 프린터를 주로 사용하는 작업자는 3명이며, 1명은 같은 작업공간내에서 실리콘렌즈 관련 작업을 하고 있었다. 사무공간을 통과하여 작업장으로 출입할 수 있으며, 작업장과 사무공간은 유리벽으로 나누어져 있고 유리문 1개를 통하여 출입하고 있었다. 평가기간 중 작업장의 공기가 유리문의 틈으로 사무실로 흘러들어가는 것이 관찰되었다. 장비 도입 등을 위한 작업장의 주출입구는 복도로 연결되어 있었으나, 평소에는 사용하지 않았다. 작업장내에 흡후드실이 별도로 구획되어 있으며 여기에는 2대의 흡후드와 1대의 클린벤치(work through type)가 있었다.

작업장 내 상부 공조시스템이 가동 중이었으며, 출퇴근시(9시~18시) 조작을 한다고 한다. 공조시스템은 작업장과 사무실이 개별적으로 설치되어 있으며 온도를 설정할 수 있도록 되어 있다. 공기청정기 및 습도조절을 위한 장치는 별도로 없었다.

평가 둘째 날 11시경부터 약 3시간 정도 프린터(BE006)를 가동하였고, 또 다른 프린터(BE008)는 약 20분간 가동되었다. 그 외의 시간에는 프린터의 가동은 없고, 작업자들이 작업장내에서 소모품을 수리, 정비 등을 수행하거나, 사무실에서 컴퓨터 작업을 실시하였다. 평가기간동안 작업장내에 머무는 시간은 개략적으로 업무시간의 80%는 될 것으로 보였다. 소형 그래이너로 플라스틱을 갈아내거나 에어건으로 불어내고, 간

단한 납땜 작업도 잠시 있었다. 습식그래인더에서 알루미늄 페이스트를 이용하여 그래인딩하고 에어건으로 불어내는 작업도 있었으나, 작업시간은 10~20분 내외로 길지 않았다.

작업장 내 시약장에는 약 50여종의 시약이 있었으며, 작업장 중앙 테이블에는 시안화수소 직독식 측정기를 비치하고 있었다.



[그림 II-4] C 사업장의 배치도 및 주 측정위치

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

▪ D 사업장

자동차용 타이어의 주형을 제작하는 사업장이며, 기존의 공장내부에 유리로 구획하여 별도의 공간을 마련하여 3D 프린터를 설치 및 운영하고 있다. 2대의 프린터를 보유하고 있으며 각각이 분리되도록 공간을 구성하였으며, 용량이 큰 대형장비를 주로 사용하고 있었다.

사용 소재의 주요 성분 : Fe balance, Ni 18%, Co 10%, Mo 4.8%, Ti 0.7%, Al 0.1%

천장에 디퓨저가 각각 1개씩 설치되어 있었으나, 외부덕트 연결이 없는 것으로 확인되어 실제로는 전체환기 등은 없는 것으로 파악되었다. 향온습기 2대를 각 룸에 설치하여 운영하고 있었으며, 평가당일 향온습기의 온도는 22~23℃, 습도는 43% 수준이었다. 진공청소기는 습식이었으며, 세척용으로 에탄올을 소량 사용하고 있었다.

후처리 작업은 열처리와 바렐처리가 있다. 열처리는 400℃ 오븐에서 8시간 처리하며, 프린팅공간 밖에 위치하고 있었다. 바렐처리는 습식으로 수행되며 약 30분간 수행되는데, 별도의 공간에 별도의 작업자가 있었다. 열처리에서는 고열 이외의 별도의 유해인자는 없을 것으로 판단되었고, 바렐작업도 습식이며 별도의 공간과 작업자가 있어서 평가에서 제외하였다.

프린팅작업을 하는 작업자의 사무공간은 공장건물내부에 마련된 2층에 있었다. 공장내부에서는 CNC 가공 등이 이루어지고 있었으며, 이들 작업과 관련된 작업자도 동일한 사무공간에서 근무하고 있었다.



[그림 II-5] D 사업장의 배치도 및 주 측정위치

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

▪ E 사업장

방위산업용 샘플제작 및 연구용으로 2대의 3D 프린터를 사용하고 있다. 분석실을 거친 후 작업장으로 출입할 수 있는 구조이며, 작업장 내부에는 천정형 냉방기를 가동하고 있으며, 전체환기(건물내 공조)는 없었다. 제습기를 보유하고 있으며 필요시 가동하는 것으로 파악되었다. 금속 소재는 자체제작한 제품을 사용하고 있으며, 3종류를 주로 사용하고 있고 주요성분은 아래와 같았다. 평가 당일 사용한 분말소재 중 벌크시료로 확보한 것은 티타늄합금이었다.

스테인리스스틸 : (316L) Fe balance, Cr 18%, Ni 12%, Mo 2%

알루미늄합금 : Al balance, Si 10%, Mg 0.7%

티타늄합금 : Ti balance, Al 6%, V 4%

작업장 내부에 시빙기가 1대 있으나, 드물게 소량인 경우에만 작업장 내부의 시빙기를 사용하며, 대부분은 소재 제조팀에서 시빙을 한다. M200 장비는 주1회 필터를 교체한다고 한다. 주작업자는 1명이며 일반적으로 하루에 약 30분 정도 작업장내에서 업무를 수행하며, 설계담당자가 프린팅업무를 총괄하며 작업장 출입을 하였다.

후처리는 후가공실이라는 완전히 분리된 별도의 공간(건물이 다름)에 있으며, 열처리, 초음파 물세척 및 샌드 블라스트 처리를 할 수 있는 설비를 갖추고 있다. 실제 후처리 작업은 거의 이루어지고 있지 않아서 평가에서는 제외하였다.

사무공간은 작업장과 완전히 분리된 공간에 위치하고 있었다.



[그림 II-6] E 사업장의 배치도 및 주 측정위치

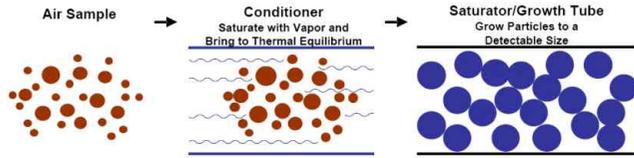
3. 입자상물질 평가

1) 나노입자 수 평가

전통적으로 분진(Dust)의 측정 방법은 펌프에 필터를 부착하여 측정하는 방식이지만, 초미세입자의 경우에는 직독식 측정기기를 주로 사용한다. 아래의 입자 수, 입경분포 및 폐포침착표면적 측정기(CPC, H-CPC, 나노스캔, OPS 2종(TSI 및 Grimm), NSAM 및 Partector2)를 작업장의 중앙부근에 설치하고, 각각 튜빙을 연결하여 흡입위치를 동일하게 하여 측정하였다. 또한, 일부장비(H-CPC, 나노스캔 및 OPS(TSI))는 비교군으로서 사무공간 등에 위치시켜 측정하였다.

- CPC(Condensation Particle Counter, 3752, TSI, USA)

공기 중 나노입자의 수를 측정하는 장비이다. 일반적인 광학적 검출기로 검출할 수 없는 공기 중의 작은 입자를 흡입하여, 일정한 온도에서 working fluid를 포화시킨 챔버에 도입하면, 작은 입자에 포화된 용액이 응축되어 입자가 커지게 되며, 이렇게 커진 입자가 레이저 빔의 측정 영역을 통과하면서 빛을 산란시키고, 산란된 빛의 양으로 입자의 수를 계수하는 원리이다. 최대 측정농도는 100,000 particles/cm³ 이며, 측정할 수 있는 입자크기의 범위는 4nm ~ 3um 이다. 부탄올이 작동유체(working fluid)로 사용되며, 공기흡입속도는 0.3 LPM 또는 1.5 LPM으로 설정이 가능하며, 여기에서는 1.5 LPM으로 설정하여 사용하였다.



[그림 II-7] CPC의 나노입자 측정원리

- H-CPC(Handheld Condensation Particle Counter, 3007, TSI, USA)

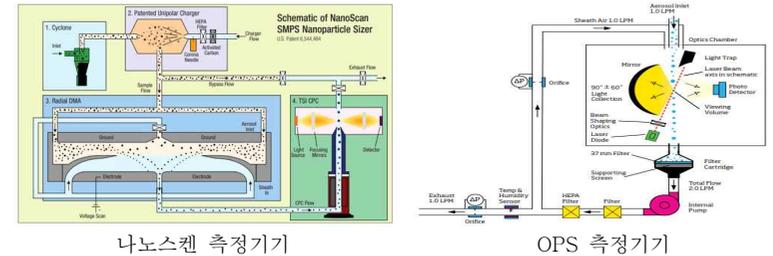
공기 중 나노입자의 수를 측정하는 장비이며, 측정원리는 위의 CPC와 동일하다. 최대 100,000 particles/cm³ 까지 측정할 수 있으며, 측정할 수 있는 입자크기의 범위는 10nm ~ 1.0 um 이다. 정확도는 ±20%이며, 이동식으로 사용가능한 장점이 있다. 총 공기흡입량은 0.7 LPM, 시료 흡입량은 0.1 LPM 이며, 작동유체로 이소프로필알콜을 사용한다.

- 나노스캔(Nanoscan nanoparticle sizer(TSI, Model 3910))

측정 입자의 범위는 10~420nm이며, 나노 크기 입자의 분포를 측정하기 위하여 입자에 하전되는 전하량을 전기적 이동도로 분석한다. 장비는 공기 흡입구에 사이클론을 장착하며, 입자 하전 장치 (Patented Unipolar Charger), 전기 이동도 분석장치 (RDMA; Radial Differential Mobility Analyzer), 응축형 입자계수장치 (CPC)로 구성된다. 입자가 장비의 흡입구를 통해 유입되면 먼저 사이클론을 통해 550 nm 이상의 입자가 걸러진다. 한편, HEPA Filter를 거친 깨끗한 공기는 코로나 방전장치(Corona Needle)를 거치며 양성의 단극 이온으로 변화한 후, 사이클론을 통과한 시료 중 입자들에 일정한 전하 상태를 부여하게 된다. RDMA 하단의 전극에서는 음전하를 띤 자기장을 형성하게 되며, 양성 단극을 띄고 있는 입자들은 전극의 자기장을 따라 이동한다. 이때 전기적 이동도를 스토크 법칙 (Stoke's law)에 의해 계산하게 된다. 이후 입자들은 CPC에서 계수

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

된다. 일반적으로 나노입자는 공기 중에서 반 데르 발스 힘 (van der Waals force)에 의해서 서로 붙어서 agglomerate, aggregate, coalescence를 형성하여 처음 발생한 입자보다 더 큰 입자가 될 수 있다.



[그림 II-8] 입자수 농도 측정기기의 측정원리

- OPS (Optical particle sizer spectrometer, 가) TSI, Model 3330

나노스캔이 측정할 수 있는 입자보다 큰 입자는 OPS를 사용하여 측정하였다. OPS의 측정범위는 300~10,000 nm의 입경이며, 입자가 검출기를 통과할 때 조사된 빛이 반사되는 각도에 따라서 입자 크기를 구분하여 계수하는 광산란 방식의 원리를 적용한 장비이다.

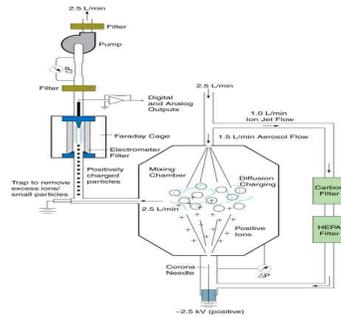
- 나) Grimm, Model 1.109

Grimm 사의 OPS 장비이며, 655nm 파장의 레이저 빔을 이용하여 광산란방식으로 입자의 크기를 구분하고 계수하는 장비이다. 측정 가능한 입자 범위는 300~20,000 nm이다. 공기흡입유량은 1.2 LPM 이다.

- 나노 표면적 측정기(Nanoparticle surface area monitor, TSI, Model 3550)

나노입자는 폐포에서 침착되어 건강영향을 나타낼 수 있기 때문에 폐

포에 침착되는 나노입자의 표면적을 측정하기 위하여 나노 표면적 측정기(NSAM)를 사용하였다. NSAM의 측정범위는 입경 10~10,000 nm이며, 폐의 기관지(TB) 또는 폐포(A)에 증착하는 입자의 표면적을 측정한다. 전위계를 사용하며 확산된 입자에 대전된 전하량을 측정하여 입자의 크기를 측정하는 원리이다.



[그림 II-9] 표면적농도 측정기(NSAM)의 측정원리

■ Partector2(Naneos, Switzerland)

폐에 침착되는 표면적(LDSA, Lung deposited surface area)과 입자수 농도 및 평균 입자직경을 측정하는 장비이다. 이를 이용하여 중량농도가 계산되며, 측정시간 간격은 1초이다. 약 420g 으로 개인이 착용하고 평가가 가능한 장비이다. 3대의 장비 중 1대는 다른 나노측정장비와 비교하기 위하여 지역에서 평가하였고, 나머지 2대는 작업자에 착용하도록 하고, 전도성 튜빙을 연결하여 호흡영역에서 개인노출량을 평가하였다.

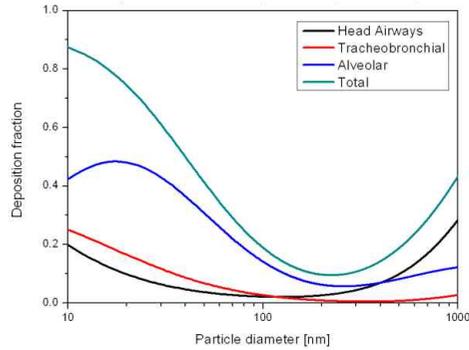
<표 II-2> Partector 2의 측정범위 및 정확도

측정인자	Range	Accuracy
LDSA	0~12,000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	$\pm 30\%$ or $\pm 3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Noise : $\sim 0.5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)
N	0~106 particles/ cm^3	$\pm 30\%$ or ± 1000 particles/ cm^3
d	10~300 nm	$\pm 30\%$ or ± 10 nm
S	0~50,000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	$\pm 30\%$ or $\pm 15 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$
PM0.3	0~1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 50\%$ or $\pm 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$



[그림 II-10] Partector2의 장비사진 (from Naneos homepage)

측정원리는 다음과 같다. 입자에 의한 건강영향을 논할 때 일반적으로 단위 공기부피내의 양은 큰 의미가 없다. 단지 인체에 축적되는 입자들이 건강영향을 미칠 수 있고, 이것이 측정의 대상이 되어야 한다. 입자의 크기에 따른 호흡기도 내의 침착부위 및 침착율에 대한 자료는 아래와 같다.



[그림 II-11] Deposition as function of particle size(ICRP model)

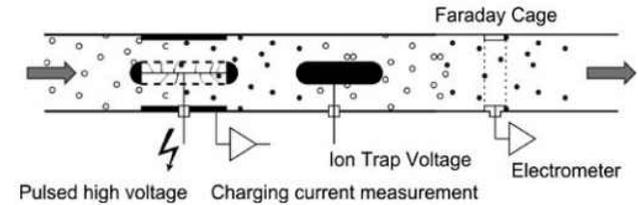
입자의 직경이 200~300nm인 입자들이 가장 낮은 약 10%의 침착율을 보이며, 40nm 인 경우 약 50%가 우리의 몸에 침착된다. 직경이 200nm 인 입자는 직경이 40nm인 입자보다 125배 더 무거우나, 인체의 침착율을 고려하면 20배의 영향이 있는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 단순히 공기 중의 농도가 아닌 인체에 직접 영향을 미치는 침착율을 고려한 평가가 중요하다.

여러 연구에서 동일한 중량의 농도에서 작은 입자가 큰 입자보다 큰 독성을 나타낸다고 하였다. 이는 작은 입자가 인체와 반응할 수 있는 표면적이 크기 때문으로 알려졌다. 입자는 표면에 독성물질을 흡착하여 전달할 수도 있고, 입자표면이 세포내에서 촉매로 작용하여 활성산소를 생성할 수도 있다. 입자의 표면적에 대한 독성영향은 수용성 입자가 아닌 인체에 잔존하는 입자(biopersistent)에 대해서 적용될 수 있다. LDSA(폐에 침착되는 표면적)는 전체 입자의 분포를 알고, 각 입자의 폐 침착율을 고려하여 계산될 수 있다. 그러나, 여기서는 확산 전하법(diffusion charger)에 의하면 입자에 전달되는 전하의 양은 입자크기에 비례하므로 아래의 식이 만들어 진다.

$$q(\text{전하량}) \cong \text{상수} \times d^{1.1}$$

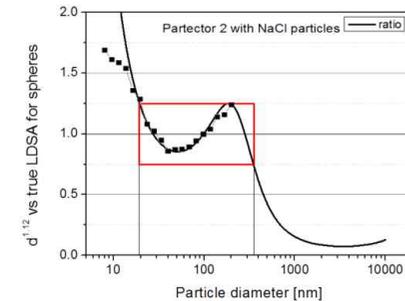
또한, 폐 침착 커브에 따르면, 20~300nm 사이의 입자에서는 침착율은 반비례하게 된다. 그러므로 LDSA는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\text{LDSA} = \text{표면적} \times \text{침착율} \cong d^2 \times d^{-1} = d^1 \approx q$$



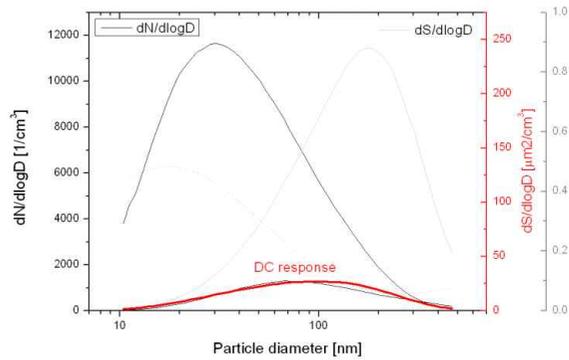
[그림 II-12] Scheme of partector(Fierz et al., 2014)

동 장비의 정확도에 대해서는 2가지 측면에서 생각해 볼 수 있는데, 입자크기에 따른 표면적계산이 얼마나 정확한지와 어떤 입자가 측정되는지이다. 입자크기에 따른 표면적 계산은 아래 그래프와 같은데, 20~350nm 사이의 입자에서는 25%이내의 정확도를 가지며, 더 작은 입자에서는 과대평가되고, 더 큰 입자범위에서는 과소평가 될 수 있다.



[그림 II-13] The ratios of LDSA by particle size

그러나, 아래 그래프와 같이 스위스의 도시지역에서 1년간 평가된 평균 입자의 분포에 대해서 계산된 표면적과 침착율을 고려하는 경우 DC 반응과 같은 곡선이 만들어지며, 이때 20nm 미만 또는 350nm 초과한 입경의 입자는 거의 영향이 없어서 LSDA 측정값은 정확하다. 이러한 패턴은 대부분의 도시지역 환경에서 비슷할 것으로 예상하고 있다.



[그림 II-14] Particle size distribution measured by an SMPS(Zurich)

다만, 작업환경에서 사용할 때는 입자의 크기에 따른 분포를 고려하여 측정된 값을 해석하여야 할 것이다.

폐침착 표면적 노출량(S_{dose})은 아래와 같이 계산하였다.

$$S_{dose} = S_{Alv.dep.} \times IR \times t$$

S_{dose} : 폐침착 표면적 노출량 (mm^2)

$S_{Alv.dep.}$: 폐침착 표면적 농도 ($\mu m^2/cm^3$)

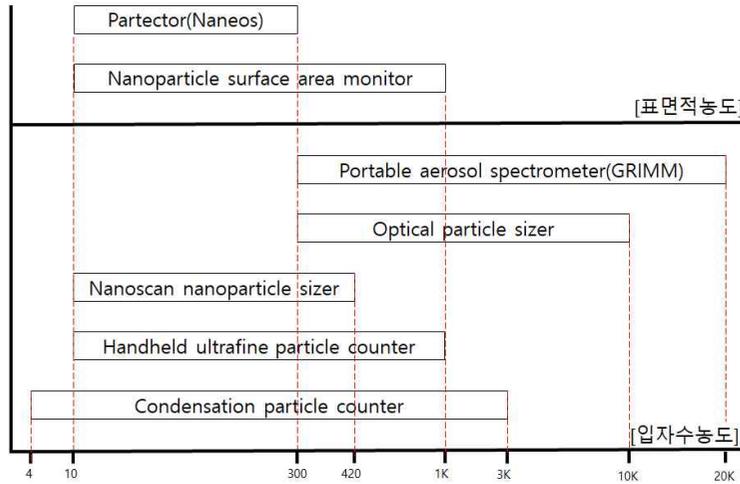
IR : 호흡량 (m^3/hr)

t : 작업시간 (hr)

측정기기의 측정 가능한 입자의 크기 범위와 주요 원리는 아래 표 및 그림과 같다.

<표 II-3> 장비별 측정범위 및 주요원리

장비명	제조사	모델명	입자범위 (nm)	주요원리
Condensation particle counter	TSI	3752	4-3K	응축 광산란방식으로 나노입자의 수 측정
Handheld ultrafine particle counter	TSI	3007	10-1K	응축 광산란방식으로 나노입자의 수 측정
Nanoscan nanoparticle sizer	TSI	3910	10-420	입자의 전하량을 이용하여 입자의 수 농도 측정
Optical particle sizer	TSI	3330	300-10K	광산란방식
Portable aerosol spectrometer	Grimm	1.108	300-20K	광산란방식
Nanoparticle surface area monitor	TSI	3550	10-1K	입자의 전하량을 이용하여 입자의 표면적농도 측정
Partector 2	Naneos	-	10-300	입자의 전하량 및 폐포침착율을 이용하여 폐포침착표면적 농도 측정



[그림 II-15] 장비별 측정입자의 범위

2) 나노입자의 형태 및 구성성분

- TEM-EDS(Transmission Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer, JEOL, Japan) (김성호, 2018)

투과전자현미경용시료는 구리코팅 된 Quantifoil형의 시편(TED PELLA. INC, 657-200-Cu, 200mesh, 직경 2um)을 사용하였다. 시료 채취기는 Mini particle sampler (MPS, INERIS, France) (이하 MPS)이며, 시편을 장착한 후 1.5 L/min의 포집 유량으로 작업 상황에 따라 5~30분간 측정하였다. 분석은 투과전자현미경 (TEM: , JEOL 2100) 에 부착 기기인 에너지분산분광기(EDS: Energy Dispersive Spectrometer) (이하 EDS)가 부착된 장비로 하였다.

TEM-EDS 분석은 시편에 고전압으로 가속된 전자빔을 집속하여 샘플에 투과시켜 영상 또는 회절패턴을 얻어 시료의 형태, 구조적인 정보를 얻고, EDS로 화학적인 구성을 얻는 것이다. TEM 분석 절차로는 분석 가능한 기준 진공까지 유지 후 고압(high voltage)을 인가한다. 그 후 광축에 나란한 빔정렬을 위한 조사계 alignment의 조건은 배율 40만배, spot1, alpha 3을 맞춘 다음 standard focus button을 눌러 빔정렬 작업을 진행한다. 이후 이미지 alignment의 lens deflector pivot point 조정을 위한 balance (tile&shift, HT Wobbler) 조정 후 적절한 이미지 대비(contrast)를 향상시키기 위해 OL Aperture 넣은 후 이미지 촬영을 하게 된다. 이 때 적절한 배율로 최소 4 field를 분석하여 멍쳐진 입자의 이미지를 관찰하였고, 최대 10 field를 분석하여도 멍쳐진 이미지가 없을 경우에는 검출되지 않은 것으로 판단하였다.

EDS 분석은 먼저 TEM에서 보고자 하는 이미지를 형광관 중심으로 이동한다. 그 후 CL & OL aperture를 개방하여 camera length 20cm, 또는 40cm와 BF Detector를 개방한다. 관찰배율은 1~2만배 이상으로 하고 배율이 너무 낮으면 이미지를 관찰 할 수 없다. 그 다음 CL & OL aperture를 조절 후 Detector를 넣은 후, 이미지를 스캐닝한다. 이 때 적

당한 시료 위치, 배율 선택 후 초점을 맞춘다. 스캔 된 이미지는 EDS 분석으로 넘어오는데, 사용하는 소프트웨어는 INCA(Ver 1.1, OXFORD Instrument)이다. 먼저 EDS 검출기를 넣은 후 quant optimization으로 input rate와 output rate가 나오는데 2-3 kcps 정도가 되게 probe current나 spot size를 조정한다. acquire spectra에서 process time 5, spectrum range 20 keV, number of channels 2k으로 설정하고 분석시간은 Live time으로 100초로 설정한다. 그 다음 site of interest에서 스캔된 이미지를 가지고 오고, 분석할 부분을 범위 또는 점으로 설정하여 그 부분의 성분을 분석한다. 분석은 시료당 3곳의 성분을 분석하였고, 3 곳의 지점에서 모두 검출된 원소만으로 성분을 구성하여 평균 성분비를 구성하였다. 이 때 1.0% 미만인 원소는 <1.0%로 표기하였다.

▪ SEM-EDS(Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer, JEOL, Japan)

주사전자현미경(SEM)의 분석원리는 분석하고자 하는 시료에 미세한 전자빔을 투과시켜 3차원 이미지를 얻을 수 있는 현미경이며, 부속 기기인 분광기(EDS)를 부착하여 시료의 구성성분을 분석할 수 있다. 주사전자현미경의 장점은 시료의 전처리가 간단하며, 투과전자현미경처럼 얇게 시료를 만들 필요가 없다는 것이다. 하지만, 해독도(resolution) 측면에서는 투과전자현미경(30만배 이상)이 월등히 좋다. 따라서 이번 연구에서는 주사전자현미경과 투과전자현미경을 함께 사용하면서, 이러한 현미경의 서로의 단점을 보완하고자 하였다.

시료의 분석은 사업장에서 가져온 금속 분말의 벌크시료와 공기 중에서 채취한 필터 시료로 구분된다. 시료는 원형의 둥근 알루미늄 마운트에 카본 테이프를 부착하여 시료를 고정하였다. 그 다음 코팅기(sputter coater, Cressington, UK)에 넣은 후 진공을 걸어서 금(Au) 도금을 하여 분석하고자 하는 시료의 표면의 전도성이 있도록 하였다. 이 때 전자빔은

카본 테이프 아래의 알루미늄 성분을 분석하지 못하는 것을 확인하였으며, 전처리에 사용하였던 금(Au), 카본(C) 성분은 최종 EDS 분석 결과 처리 시에 제거하였다.

알루미늄 마운트의 크기가 30 mm인 점을 고려하여, 공기 중 시료 채취는 25 mm 직경의 PC 필터(직경: 25 mm, 공극: 0.8 um, polycarbonate membrane filter, SKC, USA)를 25 mm 3단 카세트에 장착한 후, 1.5 L/min의 유량으로 포집하였다. 단위 공정이 짧은 작업의 경우, 포집된 공기량이 작아서 입자 덩어리를 관찰하는데 어려움이 있었다.

3) 공기 중 금속 측정 및 분석

금속 시료채취는 막여과지(직경: 37 mm, 공극: 0.8 μm , mixed cellulose ester membrane)와 패드(backup pad)가 장착된 3단 카세트를 사용하였다. 개인시료 및 지역시료의 시료채취용 펌프(Apex II, Casella, USA)의 포집유량은 2.5 L/min로 하였다. 또는, 특정작업에 대한 단시간 평가를 위하여 지역시료로서 작업시간동안 4.0 L/min으로 포집하였다. 펌프는 측정 전, 후에 유량보정기(Dry cal, Defender 520-M, MesaLabs, USA)로 각각 보정한 다음 평균유량을 사용하였다. 개인시료는 근로자의 호흡기위치에서 채취하였으며, 지역시료는 프린터의 상부 등 작업에 방해되지 않는 공간에 위치시키되 주 작업위치에 근접하게 하였다. 시료채취 후 카세트의 앞, 뒤를 마개로 막고, 현장 공시료도 1~2개 동일한 방법으로 마개를 막은 후, 분석 전까지 냉장고(5°C)에서 보관하였다.

3단 카세트를 분리하여 MCE 여과지를 꺼낸 후 50 mL 용기(Falcon tube)에 넣고, 진한질산 2 mL를 주입하였다. 상온에서 30분 둔 후, 핫블럭(Hot block)의 온도를 120°C로 설정하여 2시간 동안 회화시켰다. 상온에서 식힌 후, 탈이온수를 가하여 최종용량을 40 mL로 맞춘 후 분석에 사용하였다.

분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS) 또는 ICP-OES(Thermo fisher scientific, USA)를 사용하였다.

4. 기타 유해인자

1) 생물학적 노출지표 평가

금속의 생물학적 노출지표를 평가하기 위하여 3D 프린팅 작업자 및 사무직을 대상으로 시료를 채취하였다. 평가 첫날 또는 둘째 날 작업 시작 전에 소변을 채취하였으며, 평가 셋째 날 오후4시경 작업 후 소변을 채취하였다. 채취된 시료는 플라스틱 용기에 넣고 냉장보관으로 실험실로 이송하였으며, 분석전까지는 실험실에서 냉동보관하였다.

분석방법은 코샤 가이드 “H-142-2021”과 “생물학적 노출평가 기준 및 분석방법 연구3”의 소변 중 니켈-유도결합플라즈마 질량분석법을 참조하되, 일부 수정하여 사용하였다. 냉동된 시료를 상온에서 녹인 후, 교반기를 사용하여 거품이 발생하지 않도록 균질화 시켰다. 15mL 일외용 튜브에 1% 질산(Ultrapur-100, CN 28163-5B, Kanto chemical Co.) 2.7 mL를 넣고 소변시료 0.3 mL 를 넣어서 시료로 사용하였다. 검량선 작성을 위하여 표준용액(IV-ICPMS-71A 및 IV-ICPMS-71B, Inorganic ventures)을 1% 질산으로 희석하여 10 ppb에서 5 ppm까지 표준용액을 만들어서 사용하였다. 금속성분별 시료의 농도수준에 따라서 검량선의 농도범위를 선택하여 사용하였다. 분석용 표준용액은 1%질산 2.4 mL에 참고용 소변 0.3 mL 를 넣고 농도별로 준비된 표준용액을 0.3 mL 첨가하였다.

분석은 ICP-MS(iCAP Q, Thermo Scientific)를 사용하였다.

2) 표면오염 및 피부노출 평가

고스트 와이프(Ghost wipes, SKC, USA)를 이용하여 표면오염도조사 및 피부노출평가를 실시하였다. 미국 산업안전보건청(OSHA)의 측정분석방법 ID-125에 따라 시료를 채취하였다. 3D프린터의 마우스와 자판

등과 같은 비정형의 표면은 1장의 와이프로 전체 상부표면을 3회 반복하여 닦아서 채취하였으며, 템플릿(10cm×10cm)을 사용할 수 있는 시빙기, 작업대 위 등에서는 1장의 와이프로 해당면적을 3회 닦아서 채취하였다.

작업자의 피부노출을 평가하기 위하여, 작업 시작 전 양손의 손바닥을 3회 닦아서 시료를 채취하고, 작업장을 나올 때 다시 3회 닦아서 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 플라스틱용기(Falcon tube, 50mL)에 넣고 밀봉한 후 냉장상태로 실험실로 운반하였고, 분석 전까지 냉장보관하였다.

전처리는 OSHA ID-125 방법을 참조하였으며, 주요내용은 다음과 같다. 시료를 담고있는 플라스틱 용기에 1:1 황산 4 mL를 넣은 후 5분간 두었다. 이후 탈이온수 2 mL를 넣고, 진한질산 2 mL를 첨가한 후 15분간 두었다. 120도로 설정된 핫블럭에 시료를 두어 회화시켰다. 용액이 갈색 또는 검은색으로 변하면 과산화수소(H₂O₂)를 첨가하여 옅은 노란색을 띄게하였다. 이때, 시료별로 2~10 mL의 과산화수소가 소모되었다. 더 가열하여 진한 흰색의 SO₃ 흡을 확인한 후, 비이커를 식힌다. 식은 시료에 진한질산 4 mL를 첨가하였다. 다시 핫블럭(120℃)에서 가열하여 노란색 흡이 없어질 때까지 회화시켰다. 상온에서 식힌 후, 탈이온수를 가하여 40 mL로 희석하였다. 일회용 실린지(20 mL, KOVAX-syringe, Korea vaccine Co.)와 실린지필터(Titan 3, 30 mm 0.2 um PTFE, Hydrophilic, Thermo scientific)로 여과하여 15 mL 플라스틱 용기에 받은 후 분석용 시료로 사용하였다.

3) 설문조사

작업자를 대상으로 건강 및 안전보건인지를 조사하였으며, 동일건물에서 근무하는 사무직군을 비교군으로 설정하여 건강상태에 대한 조사를 하였다. 설문내용은 일반적인 인구학적 특성, 근무기간 및 건강증상 경험 유무에 대한 내용은 공통으로 실시하였으며, 작업자는 추가적으로 안전

보건 인지도와 관련된 설문내용을 사용하였다. 설문양식은 <부록>과 같았다.

4) 통계처리

입자 수 농도 및 폐침착 표면적 농도 등은 대부분 정규성을 만족하지 않아 비모수검정을 주로 사용하였으며, 모든 분석은 유의수준 0.05 로 하였다. PASW 24.0(SPSS, IBM)을 사용하여 기술통계값을 구하였으며, 피어슨 상관분석을 사용하였다. 금속 종류별 농도비교 등은 비모수검정인 Kruskal-Wallis 분석을 사용하였다. 공기 중 금속 등의 농도를 통계처리하기 위하여 불검출 값은 검출한계를 $\sqrt{2}$ 로 나눈 값으로 대체하여 분석하였다. 작업자 손 오염량의 작업 전후를 비교하기 위하여 변환(Ln)을 한 후 대응표본 t-검정을 실시하였다. 설문조사는 빈도분석 및 카이제곱 분석을 실시하였다.

Ⅲ. 연구결과

.....

III. 연구결과

1. 관련자료분석

1) 관련법령 및 관련기관 현황

- 관련법령 현황 등
 - 삼차원프린팅산업 진흥법/시행령/시행규칙
 - 삼차원프린팅서비스사업 안전교육 위탁 및 운영 등에 관한 규정
 - 삼차원프린팅서비스사업의 신고 등에 관한 규정
 - 삼차원프린팅제품의 안전한 이용을 위한 지침

과학기술정보통신부 관할인 “삼차원프린팅산업 진흥법”은 2015년 12월 22일 제정되었으며, 2016년 12월 23일부터 시행되었다. 하위 시행령과 시행규칙이 마련되었으며, 관련 고시는 3개를 갖추고 있다. 법의 조문은 총 23개이며, 1장 총칙, 2장 삼차원프린팅 산업의 기반조성, 3장 삼차원프린팅 산업의 이용자 보호, 4장 보칙으로 구성되어 있다.

산업 기반조성을 위하여 전문인력양성, 기술개발촉진, 표준화 추진, 품질인증, 시범사업 실시, 국제협력 및 진출, 종합지원센터 지정, 산업활성화 및 이용환경조성에 대하여 규정하고 있다. 삼차원프린팅 산업의 이용자 보호를 위해서 서비스사업의 신고, 준수 의무, 제조물 책임, 안전교육 및 이용자보호에 대한 조문을 갖추고 있다.

삼차원프린팅서비스사업 안전교육은 초기에 표준협회와 (사)한국안전보건협회에서 실시하다가 현재는 (사)한국안전보건협회에서 운영하고 있다. 안전교육의 대상은 서비스산업의 대표자 및 종업원이다. 대표자는 신규교육 8시간과 보수교육은 2년마다 6시간이며, 종업원은 신규교육 16

시간과 보수교육은 매년 6시간으로 규정되어 있다. 안전교육의 내용은 다음과 같다.

1. 삼차원프린팅산업 관련 법령 및 제도 등에 관한 사항
2. 삼차원프린터의 종류, 특성 및 제작공정상의위험성 및 안전한 작업 방법에 관한 사항
3. 소재 및 소재별 출력물의 유해성에 관한 사항
4. 유해위험유형에 따른 보호구 착용에 관한 사항
5. 근로자의 건강 및 작업환경관리에 관한 사항
6. 비상대응방법에 관한 사항
7. 그 밖에 삼차원프린팅서비스사업의 안전보건에 관한 사항

삼차원프린팅서비스사업의 신고에 대해서 자본금 1억 이하 또는 사업자를 포함한 근로자 수가 5인 이하인 경우 신고는 면제된다.

정부는 3년마다 삼차원프린팅산업 진흥을 위한 기본계획을 수립하도록 하고 있으며, 현재 2차 기본계획에 의거하여 산업을 진흥하기 위해 노력하고 있다.

1차 : 2017~2019, 2차 : 2020~2022

기본계획의 주요내용은 국내외 환경분석, 그간의 성과 및 한계, 비전 및 추진과제, 기대효과, 기술분야별 추진방향 및 부처별 지원분야로 구성되어 있다. 여기에서 고용노동부와 관련된 세부항목으로는 인력육성(학위과정 운영, 재직자 교육과정 운영 등)과 국가 자격증 체계 개편이다.

3D프린팅관련 국가기술자격은 3D프린터운용기능사 와 3D프린터개발산업기사가 있다. 3D프린터운용기능사 검정은 2018년부터 시작하여 2020년까지 시행되었으며, 필기와 실기 합격자는 각각 7,067명, 3,921명이다. 3D프린터개발산업기사는 2018년부터 시작하여 2020년까지 시행되었으며, 필기 및 실기 합격자는 각각 343명, 43명이다.

민간자격정보서비스(pgi.or.kr)에서 ‘프린팅’으로 검색했을 때 3D프린

팅관련으로 등록된 자격은 총 101종이었다(2021.4.7.기준). 2014년부터 등록이 이루어졌으며, 이 중 동 사이트에서 취득현황을 제공하는 자격증의 현황은 아래와 같았다.

<표 III-1> 자격증 현황을제공하는 자격종류별 취득자 현황

등록 연도	자격명	자격관리기관	총취득자 수	등급
2020	3D프린팅모델링자격	한국생산성본부	92	1,2급
	3D프린팅마스터	한국자격인증협회	9	1,2급
2019	3D프린팅메이커교육지도	(주)채움플러스	65명	1,2급
	3D펜프린팅지도사	한국교육시스템(주)	29	1,2급
2018	3D프린팅지도사	(주)틴커스페이스	63	단일
2017	3D프린팅운용관리사	(사)한국산업기술협회	2	단일
2016	쓰리디프린팅안전관리사	(사)쓰리다아이템즈	187	없음
	3D프린팅레이저지도사	3D프린팅벤처창업융합교육협회	1,482	일반수석
	3D프린팅디자인운용사	(사)한국능력평가협회	52	1,2급
2015	3D프린팅지도사	국제능력교육원(주)	171	1,2수석
	3D프린팅초급전문가	서울디지털대학교	31	없음
	3D프린팅전문강사	서울디지털대학교	3	없음
	3D프린팅모델링전문가	서울디지털대학교	5	없음
2014	3D프린팅전문교강사	(사)쓰리디프린팅산업협회	1,603	1,2급
	3D프린팅마스터	(사)쓰리디프린팅산업협회	699	1,2급

▪ 관련기관 현황

‘삼차원프린팅산업 진흥법’은 과학기술정보통신부 정보통신산업기반과에서 담당하고 있다. 정보통신산업진흥원(NIPA, 디지털제조혁신팀)은 공공기관으로서 3D프린팅 활용 및 확산, 전문교육 및 인식확산, 산업활성

화 등을 지원하고 있다.

4개의 관련협회(3D프린팅연구조합, 3D융합산업협회, (사)3D프린팅산업협회, (사)한국3D프린팅협회)와 1개의 안전교육기관((사)한국안전보건협회)이 있다.

3D프린팅연구조합은 2014년 설립되었다. 3D프린팅 기술개발(신기술 연구, 기술개발지원, KS표준 및 ISO 표준 제정활동 등), 기술보급 및 시장동향 및 교육사업(전문가 육성, 창업지원, 세미나 개최, 기술동향 조사, 전시회 개최 등)을 주요사업으로 운영하고 있다. 3D프린팅 장비를 운영하고 있으며, 기업의 시제품 제작 또는 모델링 등을 지원하고 있다.

3D융합산업협회는 3D프린팅과 가상현실 및 증강현실관련 업무를 하고 있다. 주요업무 중 3D프린팅 관련업무는 글로벌 3D기술포럼 심포지엄 운영, 3D프린팅 기술표준화 사업, 3D프린팅 기술개발 사전기획, 3D프린팅 산업 실태조사, 3D프린팅 민간자격 실태조사, 국내 3D프린팅 시장현황, 창조아카데미 운영, 3D프린팅 맞춤형 전문인력 양성사업 등이다. 3D프린팅 관련 국제표준의 제정에 깊이 관여하고 있다.

(사)3D프린팅산업협회는 2013년 설립되었으며, 3D프린팅 산업기술력 강화 및 국내외 협력강화, 발전기반 구축을 위하여 국내외 기술 및 시장동향 조사, 연구과제 개발, 정보교류, 공동마케팅, 전문인력양성, 기술세미나 지원 사업 등을 수행하고 있다. 산업자원부 소속이며 3년간 산업동향조사를 실시해 오고 있으며, 민간자격제도를 운영하고 있으며, 과학기술정보통신부의 인력양성사업 등을 수행하고 있다. 협회자료에 의하면 2014년부터 2019년까지 자격증을 취득한 인력은 조립전문가 214명, 마스터 1,176명, 교강사 1,825명으로 총 3,885명이다.

(사)한국3D프린팅협회는 2014년 설립되었으며, 주요사업은 3D프린팅 활용교육, 시장인프라구축(국민 참여 환경조성, 콘텐츠 유통시장 활성화), 비즈니스 활성화 지원 등이다.

(사)한국안전보건협회는 2011년 설립되었으며, 현재 유일한 3D프린

팅 안전교육기관이다. 협회의 주요사업은 건설업 기초안전보건교육, 안전보건직무교육, 안전진단(연구실험실, 제조, 건설, 서비스업), PSM/위험성평가/유해위험방지계획서 작성지도, 보건관리/건강진단/작업환경측정, 안전보건관리대행, 소방방재 재난안전 컨설팅 등이다. 3D프린팅 안전교육은 2016년 시범교육을 실시한 후 2017년부터 교육을 하고 있다.

2) 실태조사 등

- 2020년 3D 프린팅 산업 실태조사(과학기술정보통신부, 2021)

3D프린팅 기술은 절삭가공의 개념에서 적층방식으로 출력물을 제작하는 방식의 변화를 뜻한다. 현재 미국, 유럽연합(EU), 중국, 일본 등을 중심으로 3D프린팅 산업의 투자가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 미국은 국방, 항공, 우주 등 주요 산업내의 관련 기술융합을 확대실시하고 있었다. 국내에서는 2014년 삼차원 프린팅 발전전망을 수립하였고, 표준산업분류 내 “29222 디지털적층 성형기계 제조업”으로 3D프린팅 기술을 분류하여 3D프린팅 산업의 육성을 지원하고자 하였다.

<표 III-2> 표준산업분류 내 3D 프린팅업종 분류

구분	대분류	중분류	소분류	세분류	세세분류
분류No	C	29	292	2922	2922
분류명	제조업	기타 기계 및 장비제조업	특수목적용 기계제조업	가공 공작기계 제조업	디지털 적층 성형기계 제조업

출처: 통계청, 2020

2020년 국내 3D프린팅 시장규모는 3,927억 원(전년대비 17.0% 하락)이며, 3D프린팅 공급사(상시 종업원수 1인이상 사업체로 3D프린팅 사업을 수행하는 업체)는 405 개소였으며, 장비 및 소재 제조사 수는 각각 68 개소, 17 개소로 조사되었다.

<표 III-3> 2020년 3D프린팅 공급사 현황

(단위: 개소)

분류	장비	소재	S/W	서비스	유통	합계
공급사 수	68	17	15	180	125	405

출처: 2020 3D프린팅 산업 실태조사

3D프린팅 수요사(3D프린팅 관련 장비도입, 출력서비스를 수행하는 업체) 수는 1,635 개소로 조사되었으며, 이 중 학교 및 공공 부분의 활용이 각각 706 개소, 181 개소로 높은 비중을 차지하고 있었다.

<표 III-4> 2020 3D프린팅 수요사 현황

(단위: 개소)

분류	항공 우주 조선	자동차	방산	발전플랜트	가전정보통신	의료치과	건축건설	의료패션	생활소비재	기계	학교	공공	연구기관	기타	합계
수요사 수	39	85	75	25	90	140	35	28	47	89	706	181	36	59	1,635

출처: 2020 3D프린팅 산업 실태조사

3D프린팅 종사자 수는 2,262명으로 서비스 분야의 종사자 수가 830명으로 가장 많았다.

<표 III-5> 2020년 3D프린팅 종사자 수

(단위: 개소)

분류	장비제조	소재제조	S/W개발	서비스	유통	합계
종사자 수	562	63	116	830	691	2,262

출처: 2020 3D프린팅 산업 실태조사

금속 3D프린터는 고가인 점과 소재의 물성확보가 어려움 등의 한계로 인하여 국내 관련 장비의 도입률은 2.7% 수준으로 낮게 조사되었지만 자동차, 방산 분야에서 금속 3D프린팅 기술 활용이 기대되고 있다. 2020년 금속 3D프린터의 도입계획이 33.3%로 증가세를 보이고 있으나, 여전히 높은 초기 투자비용, 전문 인력 부족 등 아직까지도 진입 장벽은 높은 것으로 조사되었다.

<표 III-6> 금속 3D프린팅 미활용 이유(중복응답)

(단위: %)

높은초기 투자비용	금속 전문인력 부족	기업내 금속제품 없음	대량생산 어려움	출력품질 불확실성	후공정 어려움	금속 인증절차	출력물 대형화 어려움
63.4	24.7	17.1	6.3	5.6	5.6	4.9	3.1

출처: 2020 3D프린팅 산업 실태조사

3D프린팅 기술방식별 국내 시장비중은 ME(Material extrusion) 기술방식이 1위 점유율을 유지하고 있으나, PP(Vat Photopolymerization), PBF(powder bed fusing) 기술방식의 활용도가 2020년에 증가하였다. 금속 3D프린터의 기술방식은 PBF, MJ, BJ, DED가 있는데, 이 중 PBF 기술방식이 73.2%로 가장 많은 장비 도입현황을 보였고, DED(12.2%), BJ(12.2%), MJ(2.4%) 순으로 높았다.

<표 III-7> 2020 금속 3D프린터 장비 도입 현황

(단위: %)

분류*	PBF	DED	BJ	MJ
공급사 수	73.2	12.2	12.2	2.4

*: PBF: powder bed fusing, DED: directed energy deposition, BJ: binder jetting, MJ: material jetting

출처: 2020 3D프린팅 산업 실태조사

2020년 국내 3D프린팅 소재시장 규모는 330억 원이며, 금속 소재의 시장비중은 12.7%로 필라멘트(44.5%), 레진(40.3%)에 이어 세 번째 시장 규모를 가지고 있으나, 금속 소재의 활용확산에 따라 그 수요가 증가할 것으로 전망하고 있다. 국내 3D프린팅의 주요 용도는 시제품(53.0%), 완제품(15.7%), 교육(14.9%), 연구(9.4%), 피규어 등 기타(7.1%)이었다. 금속 소재의 활용은 2.2% 수준으로 플라스틱 소재(95.5%)에 비해 활용도가 낮았다.

▪ 3D 프린팅 산업 동향 및 현황조사(2020. (사)3D프린팅산업협회)

최근 2년 내 3D프린팅 박람회 참여기업 및 3D프린팅 사업을 계획하고 있는 기업 655개소를 대상으로 설문하였으며, 171개 기업(26.1%)이 응답하였다. 주요 조사내용은 기업일반현황, 3D프린팅 활용 제조업체 경영현황, 3D프린팅 도입여부, 3D프린팅 교육 선호도 조사, 기업지원 및 정부정책 제안사항이었다.

조사에 참여한 기업 중 대구경북권이 50.9%였으며 수도권이 30.4%였다. 사업분야는 기계(25.1%), 전기전자(24.6%), 의료기기(21.1%), 교육서비스(9.4%) 순이었다. 연구개발조직이 있는 기업이 63.2%였으며, 2019년 매출액은 10억 미만이 46.8%이었다. 종사자수는 10명 미만이 53.8%였으며, 평균 22.7명이고, 총 3,863명이었다(2017년 3,726명). 연구 인력은 2017년 487명에서 2019년 554명으로 증가하였다. 3D프린팅 관련 인프라의 필요성에 대한 조사에서는 장비, 소프트웨어, 후공정장비, 교육 등의 순으로 높게 나타났다. 교육 선호도 조사에서 인력채용 계획이 있는 51개사 중 자격증 보유 또는 교육훈련 이수자를 채용하겠다는 기업이 49개소였으며, 채용인원은 50개소에서 1~3명을 채용할 계획이었다. 산업육성을 위한 정부 지원 정책 중에서 기술분야는 소재개발(40.4%),

장비개발 지원(31.0%) 및 기술품질 인증(17.0%)에 대한 요구가 높았으며(중복응답), 비기술분야는 시제품제작지원(53.8%), 장비구입지원(27.5%), 세제지원(23.4%)등의 순으로 높았다.

3) 관련연구, 논문 등

- 3D 프린터 사용자에게 대한 초미세입자 노출평가(김성호 등, 2018, 연구보고서)

국내의 관련문헌을 고찰하였으며, 4개 사업장을 대상으로 현장평가를 실시하였다. 프린터의 종류는 FDM 방식이 5개, 금속, DLP, 잉크젯, SLA, Polyjet 이 각각 1개소 였다. 소재는 PLA 3개, ABS 4개, PP 1개, 알루미늄분말 1개, 석고분말 1개 였다. 나노입자를 SMPS, OPS, APS를 사용하여 입자수를 측정하였으며, NSAM 를 이용하여 표면적을 평가하였다. 또한 MPS를 이용하여 입자를 포집하여 TEM으로 형태를 관찰하고, EDS로 성분을 분석하였다. Tenax-TA 흡착관을 사용하여 유기화합물을 평가하였고, MCE 막여과지를 이용하여 분진을 포집한 후, ICP-MS를 이용하여 금속류를 분석하였다. 또한 직독식 측정기기를 이용하여, H₂S, NO, NO₂, SO₂, CO, CO₂, 온도, 습도를 측정하였다. 3D 프린팅에서 주로 발생하는 입자의 크기는 약 100 nm 보다 작았으며, FDM에서 PLA 소재를 사용하는 경우 가장 작았다. FDM 작업시 예열작업시 입자수 농도 및 표면적 농도가 증가하였다. 입자수농도와 표면적 농도는 높은 상관관계를 보였으며, 대부분 배경농도와 유의한 차이를 보이지는 않았다. TEM 분석에서 입자가 뭉쳐져 있음을 관찰하였고, 프린터 내부, 실내 및 실외 모두 유사하였으며, 성분도 탄소와 산소 중심이었다. 유기화합물과 금속은 미량 검출되었다.

- 3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성 연구(정은교, 김성호, 2019, 연구보고서)

국내외 3D 프린팅 시장현황을 조사하였으며, 특히 다양한 소재에 대하여 조사하였다. 3D 프린팅 산업실태조사에 의하면 2018년 공급업체는 351개(장비72, 소재16, SW9, 서비스141, 유통113)이며, 수요업체는 1,324개소였다. 관련문헌을 검토하여 소재별 방출가능 유해물질을 조사하고, 관련 선행연구를 분석하였다. 국내에서 사용되는 다양한 소재를 대상으로, 헤드스페이스와 질량분석기를 이용하여 유기화합물을 분석하였고, 질산으로 회화시킨 후 ICP로 분석하여 금속을 분석하였다. 3D 프린팅 작업환경관리와 관련하여 미국 카네기 멜런 대학교의 지침, 호주 뉴잉글랜드 대학교의 지침 및 UL(미국 안전전문 기업)의 표준을 소개하였다. 대부분의 PLA 및 ABS 소재에서 관리대상물질이 2~8종 검출되었으며, 고분자 물질이 다양하게 검출되었다. 금속에서는 구리, 철, 알루미늄이 검출되었다.

- FIOH Control approach Chemical safety of 3D printing at workplaces (FIOH, available from : ttl.fi/wp-content/uploads/2016/11/chemical-safety-in-3D-printing-at-workplaces.pdf)

핀란드에서 제작배포한 4페이지의 3D 프린터에 대한 정보이며, 3D 프린팅에서 각 작업단계별(작업준비-프린팅-후처리) 발생 가능한 유해인자에 대해서 설명하고 있으며, 주요 인자는 소재의 성분 및 작업상황에 따라 다르나, 유기화합물, 금속, 폭발, 분진 등이 있다. 위험성평가를 위하여 주목하여야 할 항목은 다음과 같다 : 프린터(프린팅방식, 밀폐, 환기), 소재의 유해인자(피부 및 호흡기 노출), 작업환경(환기, 위치, 다른 위험인자(레이저, 뜨거운 표면, 화재, 열적 방사선)), 작업단계(작업준비, 프린팅, 후처리, 유지보수). 나노입자에 대한 노출기준은 없으며, 산업적으로 발생하는 나노입자에 대해서 FIOH는 다음과 같은 8시간 노출에 대하여 목표수준을 정하였다. 20,000 particles/cm³(density > 6,000 kg/m³), 40,000 particles/cm³(density < 6,000 kg/m³). 또한, 작업장내 8시간 분진

농도 목표수준은 0.1 mg/m³ (플라스틱 에어로졸), 0.5 mg/m³(일반분진, 호흡성), 2 mg/m³(일반분진, 흡입성)으로 하고 있으며, 이 값들은 노출기준(OEL)이 정해지지 않은 분진에 적용될 수 있다.

3D 프린팅에서 위험관리를 위하여, 1) 위험한 화학물질의 대체 2) 오염물질의 전과 예방 3) 작업관리(노출시간과 횟수 감소, 작업장 청소, 교육 등) 4) 적절한 개인보호구 지급 및 착용을 하도록 기술하고 있다. 또한 작업자 및 사업주가 이용 가능한 체크리스트를 포함하고 있다.

- Exposure limits for nanoparticles: report of an international workshop on nano reference values (Broekhuizen et al., Ann. Occup. Hyg. 2012)

국제 워크숍에서 나노물질관련 참조값을 선정한 결과에 대해서 기술하였다. 2011년 네덜란드, 독일, 오스트리아, 프랑스, 영국, 미국 등에서 80명이 참여하여 논의하였으며, 나노물질의 건강영향에 근거한 노출기준 또는 무영향 값은 현재까지 아래 표와 같다.

Table 1. Proposals for OELs and DNELs for specific NPs

Substance		OEL or REL (mg m ⁻³)	DNEL (mg m ⁻³)	References
MWCNT (Baytubes)	8-h TWA	0.05		Pauluhn (2010)
MWCNT (10–20 nm/5–15 μm) Scenario NOAEC pulmonary effects	Short-term inhalation		201	Stone <i>et al.</i> (2010)
	Chronic inhalation		33.5	Stone <i>et al.</i> (2010)
MWCNT (10–20 nm/5–15 μm) Scenario LOAEC immune effects	Short-term inhalation		4	Stone <i>et al.</i> (2010)
	Chronic inhalation		0.67	Stone <i>et al.</i> (2010)
MWCNT (Nanocyl)	8-h TWA	0.0025		Nanocyl (2009)
CNT (SWCNT and MWCNT)	8-h TWA	0.007		NIOSH (2010)
Fullerenes	Short-term inhalation		44.4	Stone <i>et al.</i> (2010)
	Chronic inhalation		0.27	Stone <i>et al.</i> (2010)
Fullerene		~0.8		NEDO-2 (2009)
Ag (18–19 nm)	DNEL-lung scenario 1		0.33	Stone <i>et al.</i> (2010)
	DNEL-lung scenario 2		0.098	Stone <i>et al.</i> (2010)
	DNEL-liver		0.67	Stone <i>et al.</i> (2010)
TiO ₂ (21 nm)	Chronic inhalation		17	Stone <i>et al.</i> (2010)
TiO ₂ (10–100 nm; REL)	10 h day ⁻¹ , 40 h week ⁻¹	0.3		NIOSH (2011)
TiO ₂ P25 (primary size 21 nm)	TWA 8 h day ⁻¹ , 5 day week ⁻¹	1.2		NEDO-1 (2009)

SWCNT, single-wall CNT; MWCNT, multi-wall CNT; NOAEC, no-observed adverse effect concentration; LOAEC, lowest observed adverse effect concentration.

나노물질에 대한 정보가 충분하지 못하므로 현재 긴급하게 적용할 수 있는 방안으로 질적 컨트롤 밴딩 기법을 권장한다(NIOSH, UK). IFA 에서는 알갱이모양의 나노물질에 대하여 비중에 따라 20,000 particles/cm³ 또는 40,000 particles/cm³을 기준(benchmark level)으로 제정되어 있었으며, 탄소나노튜브의 경우 석면의 노출기준을 따르도록 하고 있고, 가용성이며 난분해성이 아닌 나노물질은 전통적인 노출기준을 적용한다고 하였다. 네덜란드에서 IFA의 값을 기준으로 파일럿 평가를 실시하였으며, 워크숍에서 아래 표의 나노물질 참조값을 받아들였다.

Table 3. NRVs for four classes of MNMs

Class	Description	Density	NRV (8-h TWA)	Examples
1	Rigid, biopersistent nanofibres for which effects similar to those of asbestos are not excluded	—	0.01 fibres cm ⁻³	SWCNT or MWCNT or metal oxide fibres for which asbestos-like effects are not excluded
2	Biopersistent granular nanomaterials in the range of 1–100 nm	>6000 kg m ⁻³	20 000 particles cm ⁻³	Ag, Au, CeO ₂ , CoO, Fe, Fe ₃ O ₄ , La, Pb, Sb ₂ O ₃ , SnO ₂
3	Biopersistent granular and fibre form nanomaterials in the range of 1–100 nm	<6000 kg m ⁻³	40 000 particles cm ⁻³	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiN, TiO ₂ , ZnO, nanoclay Carbon black, C ₆₀ , dendrimers, polystyrene Nanofibres with excluded asbestos-like effects
4	Non-biopersistent granular nanomaterials in the range of 1–100 nm	—	Applicable OEL	e.g. Fats, NaCl

SWCNT, single-wall CNT; MWCNT, multi-wall CNT.

$$NRV_{15min-TWA} = 2 \times NRV_{8hr-TWA} \text{ (단시간 피크노출)}$$

다만, 나노물질은 공정운영과정 및 환경에서도 발생하므로, 제조된 나노물질을 구분하기 위한 평가방법이 고려되어야 하며, 나노 참조값을 사용하는 절차는 아래 그림과 같다.

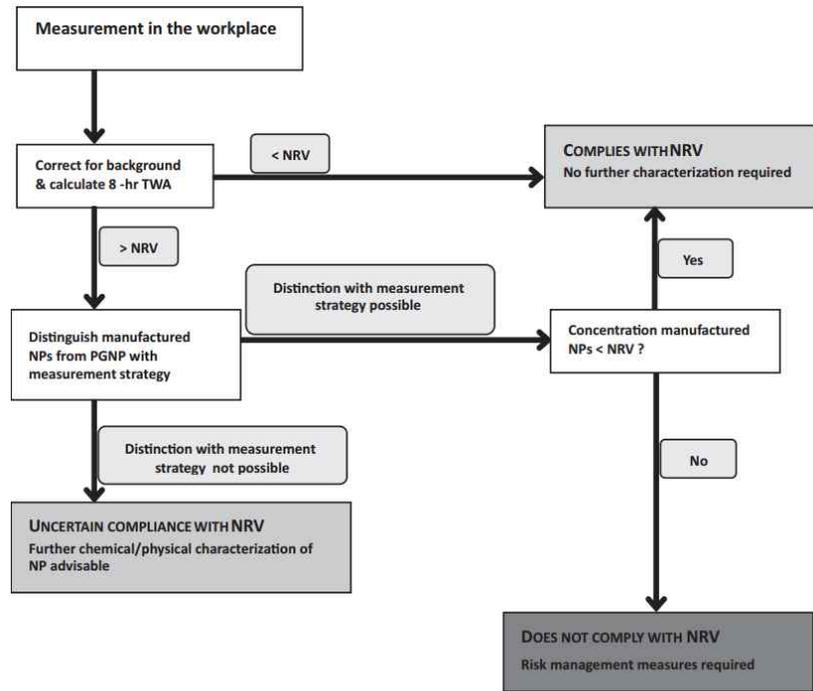


Fig. 1. Traffic light scheme for characterizing NPs and use of NRVs (in colour in the online edition).

예방원칙에 따라 나노물질의 정확한 건강영향은 모르더라도 노출을 최소화하는 방법을 모색하여야 하며, 노출수준 감소를 위한 방법은 기존에 알려져 있는 방법들로 가능할 것이다. 나노 참고값은 건강영향에 기반한 것이 아니며, 특성이 다양한 나노물질에 보편적으로 적용하기에 일부 무리가 있을 수 있으나, 모든 물질의 정확한 건강영향을 파악하고 관련 기준을 마련한다는 것은 불가능하므로, 이러한 참고값을 현장에서 사용하면서 보완해 갈 필요가 있다.

- Workplace exposure to nanoparticles (EU-OSHA, 2009)

공식적인 나노물질의 직업적 노출기준은 비결정형 유리규산에 대해서만 설정되어 있고(독일, 2007, TRGS 900, 흡 0.3 mg/m³(호흡성), 일반분진 4 mg/m³(흡입성)), 미국의 NIOSH 에서는 직업적 노출의 권고 기준값으로 나노입자의 이산화티타늄(fine 2.4 mg/m³, ultrafine 0.3 mg/m³)에 대해서 설정되어 있다. 영국표준협회는 “Benchmark levels(BL)” 개념을 도입하여, 나노물질을 4종류로 구분하여 긴급 기준을 설정하였다(2007).

- 1) BL=0.066×OEL (일반적인 불용성 나노물질)
- 2) BL=0.01개/ml (섬유상 나노물질, 석면제거작업기준UK)
- 3) BL=0.5×OEL (가용성 나노물질)
- 4) BL=0.1×OEL (발암성, 돌연변이성, 생식변이성, 천식성 나노물질)

- 3D 프린팅 기술의 이해, 유해인자 노출평가와 제어(박지훈 등, 한국 산업보건학회지, 2018)

국내 연구보고서와 학술논문을 검색하여 정리한 논문으로, 주요 프린팅의 원리와 소재의 특성에 대하여 기술하였다. 유해인자 평가방법과 관련하여 프린팅환경(챔버내, 실내, 실제환경)별 평가의 특성을 설명하고, 실시간 측정 또는 전통적 평가방법을 언급하였다. 직독식 장비의 측정결과는 입자크기별 농도, 시간당 발생량, 재료의 사용단위당 발생량으로 제시되고 있으며, 주요 유해인자의 발생특성은 기존 연구들이 FDM 방식에 대한 것이 대부분으로 이들에 대한 내용을 정리하였는데, 나노입자와 함께 다양한 유기화합물 및 가스상물질이 발생된다. 일부 논문에서는 유해인자 저감을 위한 방법으로 밀폐 또는 HEPA필터를 이용하거나 국소배기 등을 이용하여 테스트하였다.

- Inhalation exposure to hazardous substances during powder-bed processes (Walter et al., Procedia CIRP 74, 2018)

금속 3D 프린팅 기술의 보급이 확대되고 있으며, 다양한 기술방식으

로 발전하고 있다. 소재 또한 다양하게 사용되고 있으며, 분말적층용융방식에서는 나노입자가 발생하며, 이들은 화학적 조성과는 다른 특성을 지닌다. 일부 후처리과정에서는 노출기준을 초과하는 값이 보고되기도 하였다.

동 논문에서 평가는 3개의 PBF 장비(2개 레이저, 1개 전자빔)이며, 소재의 보충 및 출력물의 반출은 수작업으로 진행하며, 반출시 핸드카트를 사용하고 별도의 전용용기는 없었다. 레이저를 사용하는 경우 알곤가스로 내부를 치환하고 지속적으로 배기가 되며, 전자빔은 진공에서 작동되었다. 작동되는 동안은 밀폐되며, 소재의 보충 및 설정, 제품반출, 작동 오류, 유지보수일 경우에만 오픈된다.

개인 및 지역시료로 흡입성과 호흡성분진을 채취하고, DustTrak, PIMEX 등을 사용하였고, 전체 작업기간 동안을 대상으로 하였다. 작업자가 장비를 열거나 청소를 할 때 농도가 높아지는 것을 볼 수 있고, 소재의 성분은 흡입성(0.14 mg/m³ / 1.09 mg/m³)보다 호흡성(0.11 mg/m³ / 0.17 mg/m³)에서 더 높은 비율로 나타났다. 현재 적용되고 있는 예방정책들이 적절한 것으로 평가되었다.

▪ Tools for the management or nanomaterials in the workplace and prevention measures (EU-OSHA, E-Facts72)

작업장에서 적용 가능한 예방방법에 대한 기술과 위험성평가를 위한 틀을 소개한다. 일반적인 환경하에서 나노물질들은 서로 결합(agglomerate, aggregate)하여 큰 입자로 존재하며, 나노입자의 특성을 변화시킨다. 그러나, 약한 결합 뿐 아니라 강한 결합의 입자들로부터 나노물질이 재발생될 수 있으므로, 위험성평가에서 이러한 결합형태의 입자들도 고려되어야 한다. 체내로 들어온 나노물질은 흡수, 분배 및 대사에 의하여 내부노출 메카니즘을 거친다. 일부 나노물질들은 폐, 간, 신장, 심장, 생식기, 뇌, 뼈 등에서도 발견되었다. 나노물질의 생물농축과 세포

나 기관으로부터 제거하는 방법은 아직 알려지지 않았다. 나노물질의 주요한 영향은 폐에서 발견되며, 염증, 조직손상, 산화스트레스, 만성독성, 세포독성, 섬유화 및 암발생 등이 있다.

나노물질 노출의 주요 경로는 호흡, 소화(섭취) 및 피부이다. 호흡으로 노출된 나노입자는 호흡기 또는 폐에 침착되고 폐의 진피를 통과하여 혈액으로 들어가서 기관이나 조직에 도달하게 된다. 섭취에 의한 노출은 오염된 손이나 음식 등으로 인해서 비의도적으로 발생하게 된다. 일부 소화된 나노물질은 내장 진피를 통과하여 혈액으로 들어가서 기관이나 조직으로 이동하기도 한다. 나노물질의 피부통과에 대해서는 연구 중이며, 호흡에 대한 노출에 비하여 낮은 수준일 것으로 판단된다. 피부는 효율적인 장벽으로 생각되나, 손상된 피부는 그렇지 않을 수 있다. 피부접촉은 피해야 한다.

나노물질은 기존의 물질들과 같이 취급되며, 예방정책을 따라야 한다. 나노기술의 발전은 나노물질의 안전과 건강 측면의 지식보다 훨씬 빨리 발전하고 있다. 작업자의 건강과 안전에 대한 나노물질의 영향 및 위험성 평가방법에 대해서는 여전히 지식 격차가 있다.

나노물질의 위험성평가에는 아래와 같은 어려움이 있다.

- 1) 나노물질의 위해성에 대한 충분하지 못한 정보
- 2) 노출수준평가 및 발생원 조사를 위한 장비 및 표준화된 방법이 없음
- 3) 위험을 감소시키기 위한 방법의 효과성에 대한 제한된 정보
- 4) 나노물질 존재여부에 대한 정보부족
노출평가지 특별한 주의가 필요한 경우
 - 1) 독성, 난생분해성(섭유상, 비섭유상), 가용성 나노물질 취급
 - 2) 나노물질이 공기 중으로 비산되는 경우
 - 3) 기구의 청소 및 유지
 - 4) 나노합유물질의 개발
 - 5) 나노물질이 함유된 분말 취급 또는 혼합물의 스프레이

6) 나노물질 함유 물질의 기계적 또는 열적 처리

7) 나노물질 함유 폐기물 처리

전통적인 위험성 평가기법이 나노물질에 대해서도 항상 적용되지 않을 수도 있다. 대안으로서 컨트롤밴딩기법이 있다. 이 기법은 활동과 물질의 위험을 평가하는 간소화된 방법이다.

1) Stoffenmanager Nano

독일과 네덜란드에 의해서 개발되었고, 모든 종류의 불용성 제조 나노물질에 적합하다. 직경 100 nm 미만 또는 표면적이 60 m²/g 이상인 경우 적용가능하다. 위험성밴드와 노출밴드를 조합하여 위험우선순위를 결정한다. 위험성밴드는 나노물질의 특성, 독성자료를 참조한다. 노출밴드는 잠재적인 공기 중 비산가능성, 나노물질 취급 공정, 제어방법, 회석이나 분산의 잠재성, 표면 오염, 호흡기 보호구, 작업빈도, 작업기간 등을 고려한다. 위험성평가 후 노출저감을 위한 선택하여 적용한 후, 다시 한번 위험성 평가기법을 적용하여 효과성을 평가할 수 있다. 리포트의 생성과 출력력을 지원하며, 나노제품의 리스트/라이브러리의 작성이 가능하며, 교육용 프린터물과 좋은 사례의 예시도 제공된다.

2) CB Nanotool 2.0

미국의 연구소(Lawrence Livermore National Lab.)에서 개발되어 실험실의 연구자를 보호하고 위험성평가를 수행할 수 있도록 하기 위해서 개발되었다. 심각도(Severity)와 확률도(Probability)를 사용한다. 심각도는 나노물질의 특성(표면화학, 입자모양, 직경, 가용성, CMR, 피부독성, 천식유발특성)과 모물질의 특성(모물질의 노출기준에 기반한 독성, CMR 특성, 잠재적 피부유해성, 천식유발특성)을 고려하여 계산된다. 확률도는 나노물질 사용량, 물질의 분진성, 동일노출 근로자 수, 작업빈도와 기간을 고려하여 계산된다. 요구되는 정보가 없는 경우 최대값의 75%를 사용하도록 되어 있다. 이것은 작업자를 보호하면서 연구를 지속할 수 있도록 하기 위하여, 예방적 원칙과 수용가능한 과학적 추정사이에서 균형

을 맞춘 것이다. 4개의 위험수준으로 구분되며, 노출 감소 방법이 제안된다.

3) NanoSafer

덴마크에서 개발되었으며, 분말형태의 나노물질에만 적용된다. 첫 번째 단계는 나노물질, 물리적 특성(입자크기, 비중, 표면적), 노출기준, 분진성 지수 및 물질안전보건자료로부터의 독성정보를 결정한다. 두 번째 단계는 공정(취급, 사고성 노출 등), 사용량, 사용빈도 및 작업환경을 결정한다. 물질특성과 공정데이터를 합산한다. 위험수준은 급성노출(15 min)과 8시간노출을 평가한다. 발생원으로부터 근처 및 멀리 떨어진 작업자에 대한 평가를 수행한다. 각 위험수준에 따른 적절한 노출 저감방법을 권고하고, 교육 비디오를 제공한다.

4) ANSES Control Banding tool for nanomaterials

프랑스, 캐나다, 벨기에 및 스위스에 의해서 개발되었다. 이 기법은 작업장, 연구실, 파일럿 등에서 나노물질의 제조 및 사용하는 모든 작업환경에서 사용될 수 있다. 이 기법은 산업안전보건관리의 모든 시스템 안에서 통합적으로 다루어 져야한다. 이 기법의 제한점은 일상 작업에서 적용되어야 하며, 회석이 너무 많거나, 너무 큰 용량에는 적용되지 않으며, 건강 위해성에 대한 것이며 화재폭발과 같은 안전이나 환경에 대한 위험성을 평가하는 것은 아니라는 것이다.

위험도는 화학물질 표시/등록/분류 정보에 따르며, 독성정보가 부족한 경우 모물질 또는 유사구조 물질의 정보를 사용한다. 모물질 또는 유사구조 물질의 정보를 이용하는 경우 불확실성에 의한 계수를 산정하여 사용하며, 혼합물인 경우에는 가장 독성이 강한 것을 기준으로 한다. 나노물질의 독성을 정할 수 없으면 이 기법은 사용될 수 없다.

노출정도는 작업 중 발생 잠재성에 기반하며, 주요 요소는 나노물질의 물리적 상태이다(고체, 액체, 분말, 에어로졸). 5개의 위험수준으로 구분되며, 각 수준에 따라서 노출저감방법이 권장된다.

5) Guidance on working safely with nanomaterials and nonoproducts -guide for employers and employees

독일에서 만들어 졌으며, 나노물질 및 나노물질을 함유한 제품을 작업장에서 안전하게 사용하기 위하여 만들어 졌다. 8개 단계로 이루어졌다.

나노물질에 대한 목록 작성, 잠재적 건강 위해성 결정, 나노물질과 관련된 활동 목록 작성, 작업에 따른 노출가능성 점수화, 각 활동에 따른 노출저감방법 획득, 개선계획 작성, 나노물질 취급 작업자의 등록, 예방적 의학 조사가 가능한지를 조사하고 그에 따라서 활동한다. 이 기법은 간단하고 사용하기 쉽다. 위험관리방법을 권고한다. CMR 물질인 경우 적절한 등록절차를 거쳐야 한다. 디젤연소물이나 용접흄과 같은 비의도적으로 생성된 나노물질에는 적용되지 않는다.

6) Workplace Health and Safety Queensland : nanomaterial control banding tool worksheet

CB Nanotoll 2.0 과 유사하다. 나노물질의 가연성을 고려하나, 화재폭발 위험을 평가하기위한 전체 정보를 포괄하지는 않는다. 적은 양의 나노물질을 사용하는 연구시설에 적합하다. 나노물질 존재하는 모든 작업장에 사용될 수 있다.

7) GoodNanoGuide(GNG)

미국 대학(Rice Univ.)에서 만들어진 웹기반의 플랫폼이다.

기초분야에서는 나노물질과 기술, 안전에 대한 간단한 설명만이 제공된다.

중급분야는 기초분야를 이해하고 있다는 전제하에서 나노물질 취급작업시 필요한 가이드라인 및 프로토콜을 찾는 것을 기준으로 하고 있다. 사용자가 자신의 작업장에 적합한 방법을 선택한다. 첫 번째 방법은 간단한 컨트롤밴딩 기법이며, 나노물질의 위해성에 대한 지식수준을 근거로 접근한다. 노출기간 및 나노물질의 잠재적인 공기 중 비산을 방지하는 방법에 대한 가이드를 제공한다. 두 번째 방법은 영국표준협회(BSI)의 기법을 따르

는 것이다. 세 번째 방법은 나노물질의 화학적 구조(fullerenes, carbon nanotubes, metals, oxides 등)에 기반한 접근이며, 특정위험에 대한 정보와 안전취급방법이 제공된다.

고급분야는 나노물질 안전취급을 위한 환경, 건강 및 안전 프로토콜을 제공한다. 다양한 나노물질 형태에 대하여 적용된다. 먼저, 잠재적 위험성 규정에서 시작하며, 잠재적 위험성은 물리화학적, 독성학적 및 환경학적 특성(입자크기, 표면적, 표면화학, 반응성, 모양, 생분해성 등)을 고려한다. 영국표준협회의 분류절차를 따르는 것도 권장된다. 두 번째 단계로 노출 잠재성을 추정한다. 세 번째 단계는 적절한 제어방법을 선택하는 것이다.

- Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects (Ljunggren et al, 2021) (1)

니켈, 크롬, 철 등으로 구성된 합금 파우더를 가장 흔하게 사용하는 적층제조 공장의 근로자를 실험군으로 하였으며, 용접작업자와 사무직 근로자를 대조군으로 설정하여 2년 동안 평가하였다. 설문조사, 혈액 및 소변 중 금속분석, 폐기능검사, 의학적 인자 검사를 하였다. 설문에 따르면 금속 적층제조 근로자 및 용접작업자는 사무직에 비해 소음에서 불편함을 느꼈다. 혈중 코발트 비율, 항산화/염증 지표, 간 지표인 는 사무직 근로자에 비해 적층제조 근로자에게서 유의하게 높게 나타났다. 예방 정책이 시행된 2년차에서는 1년차에 비해 혈중 니켈량이 감소(10.8→6.2 nmol/L)하였으며, 폐기능은 향상(80%→92%)되었다. 혈중 중금속과 요중 중금속은 코발트와 니켈에서 상관관계를 보였으나, 크롬은 유의한 상관관계가 없었다. 동 논문은 노출평가(Graff P. 2017)와 생물학적지표(Ljunggren SA, 2019)관련 연구와 동시에 시행된 결과이다.

- Regulatory developments and their impacts to the nano-industry: A case study for nano-additives in 3D printing (Taylor et al, 2021) (2)

제조 나노입자의 건강영향에 대한 정보와 노출량, 평가방법 등은 아직 정립되지 않았다. 나노물질의 동물실험을 대체하기 위한 방법들이 만들어지고 있으며, 나노물질의 위험성평가기법에 대해서 연구되고 있다.

3D 프린팅 작업에서 소재의 종류에 따라 폴리머(플라스틱), 지지재료, 금속, 생물학적재료로 나누어 기존의 연구를 살펴보았으며, 주 노출경로는 프린팅방식과 관계없이 호흡에 의한 것이 가장 많고, 피부노출이 두 번째로 많았다.

호흡기 노출에서 나노입자 발생량과 관련된 연구가 많았으나, 작업자 노출수준에 대한 자료는 부족하며, 각 연구마다 발생량과 격리에 따른 효율 등이 다르게 평가되고 있어서 더 많은 연구가 필요해 보인다.

3D 프린팅에서 나노물질의 피부노출에 대한 구체적인 자료는 없어서, 일반적인 나노물질의 피부노출 특성을 정리하였다. 4nm 미만의 나노입자는 피부를 통과하고, 4~20nm 입자는 손상되거나 접촉된 피부를 통과할 잠재성이 있고, 21~45nm 입자는 손상된 피부만 통과할 수 있으며, 45nm 초과 입자는 피부를 통과할 수 없다. 일반적인 피부노출의 영향은 직접접촉에 의한 영향(피부염, 피부괴사 등), 면역관련 영향, 시스템적 영향(급성독성, 인체장기 독성, 발암성 등)이 있다. 피부노출에 대한 부분은 다양한 변수가 있고 이를 고려하여야 한다.

나노물질관련 규정은 전 세계적으로 17종정도 있으며, 대부분 금속산화물을 대상으로 하거나, 등록과 관련되어 있고, 잠재적 위험성을 평가하고 관리하는 것도 있다. 미국은 환경부에서 나노물질 등록과 관련된 규정이 있으며, OSHA 에서는 위험성평가와 유해성정보 제공과 관련된 규정이 있고, NIOSH에서는 탄소나노튜브(TWA 1mg/m³,) 및 이산화티타늄(nanoscale 0.3 mg/m³, fine 2.4 mg/m³)에 대한 기준이 있다. 캐나다에서는

화학물질의 일부로서 규제되며, 유럽에서도 화학물질 또는 살생물제로서 규제된다. 나노물질에 대한 규제는 점차 늘어날 것이며, 이에 따라 생산자는 제품관리를 위하여 보다 많은 정보를 확보하여야 한다.

- Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powder bed fusion of aluminum alloy (Azzougagh et al, 2021) (3)

알루미늄 합금 소재의 금속 파우더를 이용하여 레이저 파우더 용융(L-PBF) 방식으로 3D 프린팅을 하는 기계1대를 대상으로 하여 5번 반복하여 평가하였다. 준비부터 프린팅, 장입, 반출, 청소 등 전체 단계를 포괄하였으며, 장비내부에서 입자수 농도, 입경별 무게 및 구성성분을 분석하였고, 작업자 개인시료 채취 및 지역시료평가를 하였다. 3D 프린팅 기계 작동 중 작업자가 노출될 수 있는 거리의 에어로졸 입자 수 농도는 기계 미작동 시의 두 배였다. 알루미늄과 마그네슘 나노입자는 기계 안에서 농도가 기계 미작동시의 10배의 농도를 보였다. 입자상 물질은 포장과 청소 작업 중 가장 많이 배출되었다. 금속 3D 프린팅 공정은 공기 중 금속 나노입자의 노출 가능성이 높다. 소재분석에서는 원소재에 비해서 사용빈도가 증가하면서(2회) 평균입경이 작아지고 표면적이 증가하는 것을 관찰하였으며, 구성성분에서는 Al, Mg 성분은 감소하는 반면 Si 성분은 약간 증가하였다.

- Impact of metal additives on particle emission profiles from a fused filament fabrication 3D printer (Alberts et al, 2021) (4)
- 순수 폴리머인 ABS, PLA와 금속이 첨가된 PLA-Cu, ABS-W를 이용한 FFF 방식의 프린터에서 배출되는 물질을 측정하였다. 실험을 위해 제작한 챔버에서 FMPS를 이용하여 실험하였다. 평균적인 입자 발생량은 ABS(2.06×10^7 #/cm³)가 PLA(1.64×10^6 #/cm³) 보다 많았고, 금속 첨가

물이 포함된 PLA Cu(3.05×10^8 #/min) ABS W(4.43×10^5 #/min)가 순수폴리머 보다 약 10배 발생량이 많았다. 프린트 과정에서 입자의 지름의 중간값은 PLA (57.2 nm)와 ABS (29.7 nm) 가 PLA Cu (22.7 nm)와 ABS W (26.7 nm)보다 큰 것으로 평가되었다. 챔버 세팅 후 안정화 단계에서 약 10^3 개의 입자로 측정되었으나, 워밍업과정에서 $10^5 \sim 10^7$ 개로 급격히 증가하였으며, 프린터 후 식히는 과정에서 농도는 점차 감소하였다. 워밍업과정에서 최빈 입경은 프린팅시의 최빈 입경보다 작았으며, 표면적과 질량도 프린팅시에 증가하였다.

- Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review (Chen et al, 2020) (5)

리뷰논문이며, 구글학술검색과 ISI web of science에서 금속 AM 과 금속 PM으로 검색한 결과 4개의 연구논문과 1개의 리뷰논문을 찾았다. 동 리뷰에서는 이와 함께, 금속 입자상물질의 방출, 건강이슈, 노출평가, 위험성평가에 대하여 검토하였다. 금속 AM 방식은 SLM(selective laser melting), SLS(selective laser sintering), EBM(electron beam melting), DED(direct energy deposition), cold spraying, wire 또는 arc 방식, LMD(laser melt deposition) 등이 있다. 일부는 챔버내에서 이루어지고 일부는 외부에서 이루어진다. 건강이슈로는 전통적인 금속사용 산업에서 입자상물질 노출이 있어왔으며, 노출경로는 호흡기, 피부노출, 눈점막 노출 등이 있다. 호흡기와 눈점막 노출은 인정되고 있으나, 피부노출에 대해서는 연구자에 따라서 피부통과 가능성에 대해서는 이견이 있으며, 피부에 산화적 손상을 입히는 것은 인정되고 있다. 건강영향은 넓은 표면적의 산화작용에 의해 일어나며, 여러 가지 영향으로 나타난다. 입자의 독성에 영향을 미치는 인자는 입경, 모양, 표면적, 화학적조성, 표면화학 등이 있다. AM 공정에서 입자상물질의 노출평가 방법으로 CPC, TEOM (tapered element oscillating microbalance), NSAM

(nanoparticle surface area monitoring) 등의 직접채취기구와 입퓰터, APS (aerodynamic particle sizer), DMPS (differential mobility particle sizer) or SMPS (scanning mobility particle sizer) 등의 통합적 채취기구가 있다. 입자의 분석기술로는 BET, DLS, EDXRF, FTIR, IC, ICP, SEM/TEM, SIMS, UV, XRD, XRF 등 다양한 방식이 있다. 노출기준은 이산화티타늄 (2.4 or 0.3 mg/m³), 벤치마크 기준($20,000$ or $40,000$ particles/cm³) 등이 질량 또는 수농도 기준으로 설정되어 있다. 컨트롤벤딩은 유용한 질적 위험성평가 기법으로 활용가능하다. 인체노출량을 평가하기 위해 MPPD 모델과 CFD 모델을 활용하는 방법이 있고, 독성평가를 위하여 세포배양이나 QSARs를 이용하기도 하는데, 금속 3D프린팅과 관련한 많은 연구가 필요하다.

- Particle emission and respiratory exposure to platinum metal powders during additive manufacturing: A pilot study (Lambat 2020) (6)

미국 NWU 석사학위 논문이며, Platinum 파우더를 사용한 PBF SLS 방식의 프린터를 2회 운전하면서 연구하였다. 특정 크기의 입자를 측정할 수 있는 장비를 이용하여 PBF의 여러 과정의 공기 중 입자를 조사했으며 입자수 농도를 통해 AM 과정 중 발생하는 입자 배출율을 계산하였다. AM 과정에서 노출될 수 있는 금속을 알아내기 위해 근로자의 호흡기에 흡입될 수 있는 입자와 300nm 미만 크기의 입자를 유도 결합 플라즈마 질량 분석기로 측정하였다. 전처리, 프린팅작업, 후처리 세 과정 모두 0.01μm 이상 1.00μm 미만 크기의 입자가 배출되었으나 근로자의 개입이 가장 많은 전처리 과정에서 배출 농도가 가장 높았다. 근로자의 노출 샘플에서의 platinum은 검출되지 않았으나, 비소(0.035 mg/m³), 코발트(0.374 mg/m³), 구리(1.119 mg/m³), 납(0.019 mg/m³), 니켈(0.973 mg/m³) 같은 platinum 이외의 금속 노출의 위험이 있고 특히 구리와 니켈의 농도

는 작업장 노출 기준치(1 mg/m^3 및 0.5 mg/m^3)를 넘었다.

- Characterization of ultrafine particles emitted during laser-based additive manufacturing of metal parts (Noskov et al, 2020) (7)
성분비는 다르지만 스테인리스 파우더를 이용한 3개의 AM 장비(각각 SLM, DED, LC(laser cladding) 방식)를 평가하였다. 오픈 페이스 충전된 채취용 카세트를 이용(PVC filter)하여 입자를 포집하였고, 전자현미경으로 입자의 특성을 분석하고, ICP분석을 하였다. 세 기기 모두에서 $4\mu\text{m}$ 에서 $16\mu\text{m}$ 사이즈의 입자상 물질이 다량 배출되었고 원재료로 쓰인 스테인리스 파우더의 산화물을 성분으로 가지고 있었다. 작업조건에 따른 발생입자의 크기(median : 9.4, 11.2, 8.0 nm)를 분석하였고, CFD 시뮬레이션을 통하여 가스의 온도와 이동속도를 분석하였다.

- Nanoparticle exposure and workplace measurements during processes related to 3D printing of a metal object (Jensen et al, 2020) (8)

$\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 파우더를 이용한 SLM 방식의 3D 프린팅에서 프린팅 챔버 청소, 후처리(그라인딩) 과정 등 5개 과정에서 배출되는 입자를 측정하였다. NF(near field), FF(Far field) 및 개인시료채취를 하였으며, DiscMini, OPS, CPC, SMPS, ELPI, GK2.69 cyclone을 이용하였으며, SEM/EDS 분석을 하였다. 입자 농도는 챔버를 비우는 과정과 PRS(powder removal system) 청소 과정에서 각각 10^4 와 $5 \times 10^3 / \text{cm}^3$ 으로 증가하였고 그라인딩 과정에서는 $2.5 \times 10^5 / \text{cm}^3$ 로 증가하였다. 폐포침착 표면적은 그라인딩작업에서 가장 높았고($79.3 \mu\text{m}^2 / \text{cm}^2$), 프린팅챔버 비우기($7.6 \mu\text{m}^2 / \text{cm}^2$)로 높았으며, 입경은 대부분 지름 200nm이하였고 평균입경은 54nm에서 70nm 사이였다. 호흡성분진의 8시간 환산 질량농도는 0.02 mg/m^3 로 덴마크의 허용기준치인 5 mg/m^3 의 0.4% 이며, 초미세분진

이산화티타늄 노출기준(0.3 mg/m^3)의 6.67%에 해당한다. 필터채취 후 무게를 측정된 호흡성분진 농도($50.4 \mu\text{g/m}^3$)는 DustTrack의 호흡성분진 농도($58.4 \mu\text{g/m}^3$)와 유사하였다.

- Improving worker health and safety in wire arc additive manufacturing: A graph-based approach (Nagarajan et al, 2020) (9)

리뷰 논문으로서, WAAM(wire and arc additive manufacturing)과 관련된 문헌과 아크용접관련 논문을 참고하여 DACM(dimensional analysis conceptual modeling) 방법을 사용하여 건강영향에 대한 모델을 그래프로 표현하였다. 베이지안 네트워크기법을 접목하여 작업자의 건강보호를 위한 중요한 정보를 얻을 수 있다.

- Characterizing particle emissions from a direct energy deposition additive manufacturing process and associated occupational exposure to airborne particles (Bau et al, 2020) (10)

DED 방식의 금속 프린터에서 2 종류의 금속 파우더(SUS 316L, Inconel 625)와 2종의 노즐(10VX(노즐 폭 1.0 mm, 레이저파워 385W, 소재사용속도 ~5 g/min), 24VX(노즐 폭 2.4 mm, 레이저파워 1500W, 소재사용속도 ~17 g/min))를 사용하여 2반복으로 실험하였다. 프린터는 밀폐된 공간에 설치하고 환기를 위해 정화된 공기를 주입해주었다. 장비 내부에서 많은 양의 초미세먼지가 측정되었고($> 5 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$, 호흡성분진 $0.3 \sim 1.3 \text{ mg/m}^3$, 6가 크롬 $0.2 \sim 6 \mu\text{g/m}^3$), 입경분포는 90% 이상의 입자가 250 nm 보다 작은 입자였다. 작은 노즐(10VX)을 사용하는 경우가 큰 노즐(24VX)을 사용하는 경우보다 발생입자의 수가 많았다. 최빈 입경은 작은 노즐을 사용하는 경우 46nm 였으며, 큰 노즐을 사용하는 경우 76~80 nm 였다. 발생입자의 호흡성 비율은 59~83%였으며, 입경분포에

다른 무게농도는 다단입력으로 측정된 값과 유사한 경향성을 보였다. 작업자 위치에서 입자수는 $\sim 10^4$ #/cm³, 질량은 0.04 mg/m³ 이하였으며, 먼 위치(Far Field, 5.2m)에서도 10^4 #/cm³ 수준이었다. 작업 후 밀폐된 작업 공간을 열기 전 약 8분을 기다려야 프린터에서 배출되는 에어로졸에 노출되는 것을 막을 수 있었고, 환기 시스템과 보호 장비를 갖추는 것이 효과적임을 확인했다.

- Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling (Arrizubieta, 2021) (11)

시스템적 문헌고찰 방식(systemic literature review)을 이용하여 Scopus database 및 Science direct 에서 AM, LCA(life cycle analysis), Sustainability, Recycle, Reuse 등의 키워드를 조합하여 검색한 자료를 리뷰하였다. 금속을 이용한 AM은 크게 PBF와 DED 방식으로 구분한다.

Table 2. Overview of the metal AM processes [21].

AM Process Type	Brief Description	Technologies
Powder Bed Fusion (PBF)	Thermal energy selectively fuses regions of a powder bed	Electron Beam Melting (EBM) Selective Laser Sintering (SLS) Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Selective Laser Melting (SLM)
Directed Energy Deposition (DED)	Focused thermal energy is used to fuse material by melting as it is being deposited	Fused Metal Deposition Systems (FMD) Laser Metal Deposition (LMD) Selective Laser Cladding (SLC)

Table 3. Overview of the metal additive manufacturing processes.

AM Process Type	Powder Particle Size (µm)	Deposition Rate (g/min)	Dimensional Accuracy (µm)	Surface Roughness (µm)	References
Powder Bed Fusion (PBF)	45-150	2-3	±0.05	9-16	[55-58]
Direct Energy Deposition (DED)	10-30	5-30	±0.13	≈40	[55,56,59,60]

AM에 주로 사용되는 5종 파우더의 특성, 주용도, 구성성분과 위해성분류, 노출기준 등을 정리하였다. 생애주기분석(LCA)을 통하여 지속가능한 제조 공정으로서 AM의 특성을 살펴보았으나, 소재의 재사용, 폐기물의 감소 등이 필요하며 많은 연구가 필요하다. 작업장에서 위험예방을 위하

여 환기, 개인보호구, 기기 밀폐의 조치가 필요하다. 소재의 재사용에 따른 특성변화 등이 연구되고 있으며, 폐기물로서 처리하기 위해서 적정한 기준에 따라야 한다. AM은 환경친화적인 기술로 알려져 있으나, 폐기물 처리, 독성물질의 방출, 에너지의 효율적 사용 등에 더 노력하여야 한다.

- Respiratory exposure to hazardous chemical substances during additive manufacturing using nylon and alumide (Visagie 2019) (12)

SLS 방식의 프린터에서 나일론과 알루미늄 소재를 사용하였다. 입자의 분포를 분석했을 때, 새 제품과 사용된 제품 간의 차이는 없었으나, 물질자료에 표기된 크기(56~60 µm)와 실제 측정된 크기(63.8~65.3 µm)는 차이가 있었다. 재활용 소재는 크기와 형상에서 큰 차이점이 없었으나, 알루미늄의 함량은 51%로 새 제품(39%)과 차이가 있었다. 나일론과 알루미늄을 이용할 때 나오는 입자, 금속, 유기화합물을 분석하였다. 기기 청소, 파우더 믹싱, 머신 예열, 빌드 제거, 넘친 파우더 제거 등의 몇몇 과정에서 입자량이 특히 증가했다. 근로자가 나일론이나 알루미늄 먼지에 노출되는 과정은 전처리 과정 뿐이었으며, 모두 기준치보다 작았다. 알루미늄을 이용한 프린팅 과정에서는 알루미늄, 철, 티타늄, 아연이 방출되는 것이 확인되었고, 아세트, 펜테인, 클로로포름, 톨루엔, 나프타 같은 유기화합물은 나일론과 알루미늄 사용시 발생되었지만 기준치보다는 낮았다. 3D 프린팅과정에서 유해화학물질이 발생하는 것을 확인하였으며, 노출을 줄이기 위하여 환기, 장비격리, 청소절차, 개인위생 등의 방법이 요구된다.

- Potential occupational hazards of additive manufacturing (Roth et al, 2019) (13)

NIOSH에서 투고한 논문이며, 기술방식에 따른 유해요소에 대해서 기

술하고 있다.

Table 1. Related potential hazards by AM process category.

Category	Feedstock materials	Feedstock form	Binding/fusing	Most prominent potential hazards
Material extrusion	Thermoplastics (may include additives)	Spoiled filament, pellet, or granulate	Electrical heating element-induced melting/cooling	Inhalation exposure to VOCs, particulate, additives; burns
Powder bed fusion	Metal, ceramic, or plastic	Powder	High-powered laser or electron beam heating	Inhalation/dermal exposure to powder, fume; explosion; laser/radiation exposure
Vat photopolymerization	Photopolymer	Liquid resin	Ultraviolet-laser induced curing	Inhalation of VOCs; dermal exposure to resins and solvents, ultraviolet exposure
Material jetting	Photopolymer or wax	Liquid ink	Ultraviolet-light induced curing	Inhalation of VOCs; dermal exposure to resins and solvents, ultraviolet exposure
Binder jetting	Metal, ceramic, plastic, or sand	Powder	Adhesive	Inhalation/dermal exposure to powder; explosion; inhalation of VOCs, dermal exposure to binders
Sheet lamination	Metal, ceramic, or plastic	Rolled film or sheet	Adhesive or ultrasonic welding	Inhalation of fumes, VOCs; shock, laser/radiation exposure

또한, 작업환경, 이차적 노출위험(take-home exposures), 시스템자동화에 따른 위험요소, 피로와 정신적 스트레스, 바이오프린팅에 의한 요인도 있다. 위험관리를 위하여 유해성, 노출 및 위험의 확인이 필요하고 기술적인 방법에 의한 통제와 안전문화 도입이 필요하다. 혁신의 속도가 빠르므로 디자인 단계에서 안전을 고려해야하고, 공급체인과 제품의 분배 과정이 달라지므로 안전위생전문가의 활동방식이 달라 질 것이다. 향후 작은 기업에도 확산될 것이므로 여기에 대한 대비도 필요하다. AM과 관련된 연구는 많지 않으며 향후 많은 연구가 필요하다. 더불어 연구자, 산업디자이너 및 안전보건전문가가 AM 기술에 대한 이해를 넓혀가야 할 것이다.

- Nanomaterials exposure as an occupational risk in metal additive manufacturing (Sousa et al, 2019) (14)

6th NanoSAFE 컨퍼런스에서 발표된 리뷰논문이다. 나노물질의 직업적 노출에 대한 위험성평가 방법 중 정량적 방법으로 직독식 장비(CPC, SMPS, DC, ELPI 등)와 분석기법(ICP, LS, LIBS 등)을 기술하고 있다. 반정량적 및 질적 위험성평가 방법으로 컨트롤밴딩을 기술하고 있으며, 금속 3D 프린팅에서 노출평가를 실시한 2개의 논문을 비교분석하였다.

Table 1 – Outputs of the literature review on occupational risk management of exposure to nanomaterials during metal AM

	Graff et al. (2017)	Mellin et al. (2016)
Aim of the study	Study generated nano-sized by-products during production in metal 3D printing, composite manufacturing and fabric production	Use measuring techniques optimized for different particle sizes while analysing numbers, sizes, masses and identities of metal particle emissions
Metal material AM technique	Nickel-base Inconel 939 (both virgin and used powder) Selective laser melting (SLM)	Chromium, nickel and cobalt alloy (both virgin and used powder) Selective laser melting (SLM)
Methods performed	<ul style="list-style-type: none"> • Scanning electron microscopy (SEM); • Energy Dispersive Spectrometer (EDS). 	<ul style="list-style-type: none"> • Nanotracer (10 to 300 nm); • Lighthouse (300 nm to 10 µm); • Traditional filter-based particle mass estimation and inductively coupled plasma mass spectrometry.
Main results	<ul style="list-style-type: none"> • Nanosized particles were generated during metal AM; • Presence of nanosized particles in samples with recycled powder. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nanosized particles were generated during metal AM; • Operators were exposed mainly while handling powder; • Particle sizes tended to be smaller in recycled powder.
Control measures and other recommendations for risk management	<ul style="list-style-type: none"> • Powder handling in a confined space; • Personal protective equipment; • Good ventilation with HEPA filters; • Inclusion of information in the safety data sheet for powder intended to be used in metal 3D printing; • Educate workers. 	<ul style="list-style-type: none"> • Improve powder handling systems; • Measurement techniques for nanosized particles; • Work environment regulations; • Personal protective equipment; • Regular metal analyses of urine.

- Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing(3D Printing)(Ljunggren et al., 2019) (15)

스웨덴의 여러대의 금속 3D 프린터를 사용하여 제품을 생산하는 1개 공장을 대상으로하여 2년간 작업자, 사무직, 용접작업자를 대상으로 노출되는 금속의 중량분석 및 기기분석 하였다. 직독식장비를 이용하여 입경별 계수를 하였으며, 소재의 사용전 및 사용후의 상태를 SEM-EDX를 이용하여 분석하였으며, 피부노출은 3M 스카치 테이프 손에서 채취하고 이동식 XRF를 이용하여 정량하였다. 또한 소변을 작업전, 주말 작업종료 후에 채취하여 금속성분을 분석하였다. 총본진 및 흡입성분진 농도는 스웨덴의 기준미만이었으나, ICP-MS 분석결과 용접작업자에 비해서 3D

프린터 작업자의 코발트 노출이 유의하게 높았다. 공기 중 300nm 미만의 입자농도가 3D 프린팅작업에서 높은 피크치를 보였으나, 용접작업에 비해서는 낮았다. 재사용된 소재의 입자에는 파편과 응축된 매우 작은 입자들이 큰 입자에 부착되어 있었다. 소변 중 금속의 농도는 유의한 차이가 없었다. 코발트의 피부노출 및 소변 중 금속의 농도는 1년차와 2년차에서 다르게 나타났는데, 이는 2년차에 시행된 예방정책에 따른 것으로 생각된다.

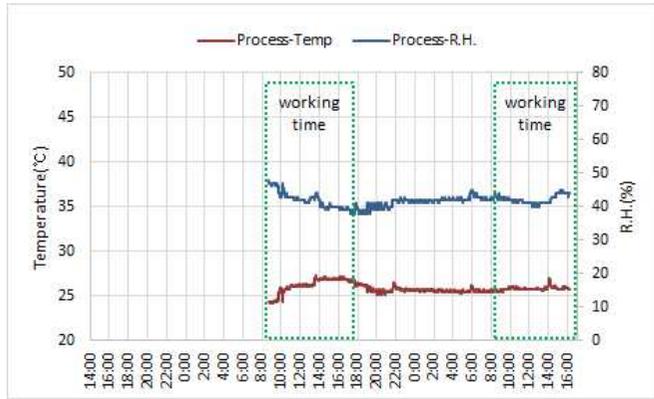
2. 입자상물질 평가

1) 사업장 온/습도 환경



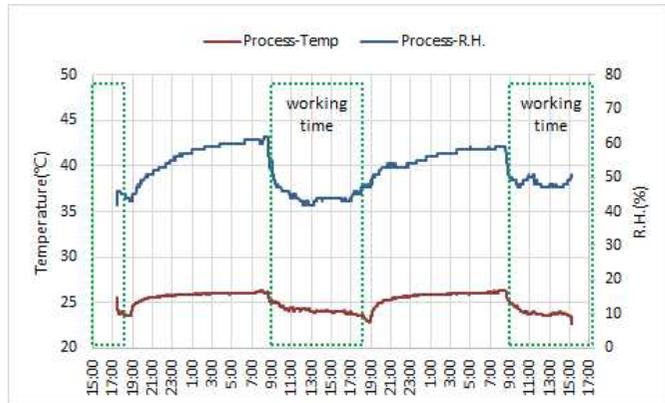
[그림 III-1] A 사업장 온습도 환경

A 사업장의 작업장내 온도와 습도는 평균 $23.1^{\circ}\text{C}(\pm 0.52)$, $43.4\%(\pm 1.01)$ 로 일정하게 유지되고 있었다. 반면, 사무실의 온도는 근무시간동안은 지속적으로 낮아졌다가 근무시간 종료 후에는 다소 높아졌다. 습도는 큰 변화는 없어 보였다. 사무실의 온도와 습도는 평균 $26.8^{\circ}\text{C}(\pm 1.29)$, $46.9\%(\pm 1.69)$ 였다.

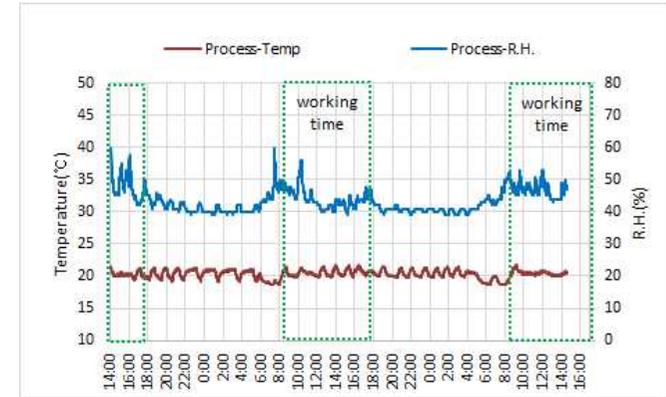


[그림 III-2] B 사업장 온습도 환경

B 사업장의 작업장 내 온도와 습도는 평균 $25.9^{\circ}\text{C}(\pm 0.54)$, $41.7\%(\pm 1.76)$ 로 일정하게 유지되고 있었다. 실내에서 온도조절장치(에어컨)과 제습기를 상시 가동하고 있었다.

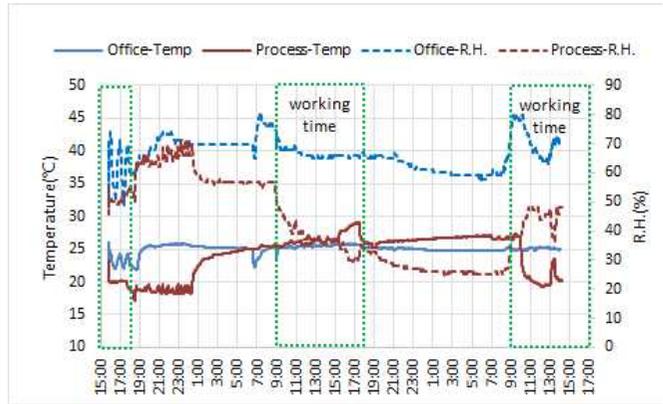


[그림 III-3] C 사업장 온습도 환경



[그림 III-4] D 사업장 온습도 환경

D 사업장은 작업장에 설치된 단독 냉난방기에 의하여 온도와 습도가 일정하게 온도가 유지되고 있었다. 주야간 모두 약 20도를 유지하였으며, 습도는 대부분 40~50%의 범위를 유지하였다.



[그림 III-5] E 사업장 온습도 환경

E 사업장은 평가 2일차에 작업장 내 에어컨의 고장으로 분석실의 에어컨 공기를 도입하는 등 임시조치를 시행하였고, 평가 3일차 10시경 에어컨 수리를 완료하여 가동하였다. 이로 인하여 온도 및 습도의 변화가 관찰되었다. 사무실내 온도는 25°C로 일정하게 유지되었고, 습도는 60~80%수준을 보였다.

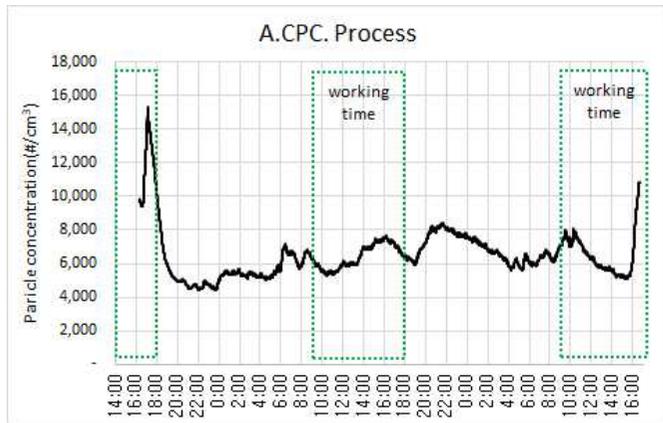
<표 III-8> 평가대상 사업장별 온습도 현황

Site	구분	Temp.(°C)	RH(%)
		(산술평균±표준편차)	(산술평균±표준편차)
A	Office	26.8 ± 1.29	46.9 ± 1.69
	Process	23.1 ± 0.52	43.4 ± 1.01
B	Office	-	-
	Process	25.9 ± 0.54	41.7 ± 1.76
C	Office	-	-
	Process	25.1 ± 0.96	52.2 ± 5.88
D	Office	-	-
	Process	20.2 ± 0.25	49.3 ± 3.38
E	Office	25.0 ± 0.71	66.5 ± 5.42
	Process	24.2 ± 3.16	42.8 ± 14.11

2) 나노입자 수 평가

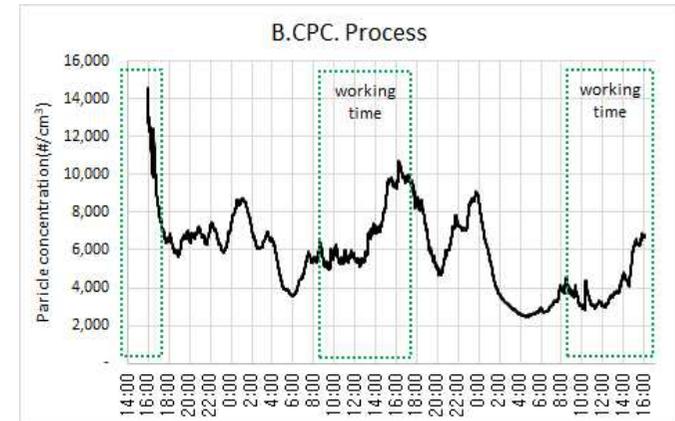
▪ CPC

사업장별 나노입자의 농도변화를 살펴보면 아래 그림과 같았다. A 사업장은 장비를 설치한 날 작업시간동안 농도가 높아졌으나, 밤시간대의 농도와 근무시간대의 농도사이 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다.



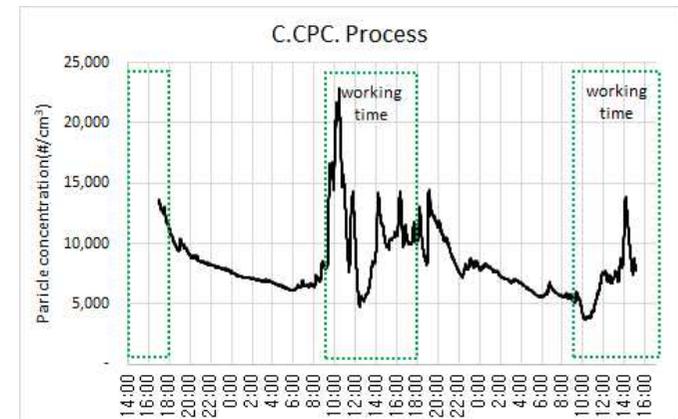
[그림 III-6] A 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC)

B 사업장은 측정을 시작한 날 및 다음날 농도수준이 밤사이의 농도에 비해 다소 높은 것으로 보였다. 작업시간 동안에는 오전보다 오후에 더 높은 농도수준을 보였다.



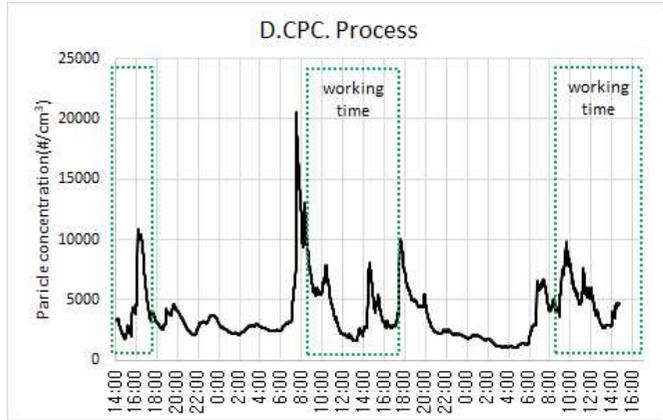
[그림 III-7] B 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC)

C 사업장은 근무시간대에 입자상물질의 농도가 높아지는 것을 관찰할 수 있었다.

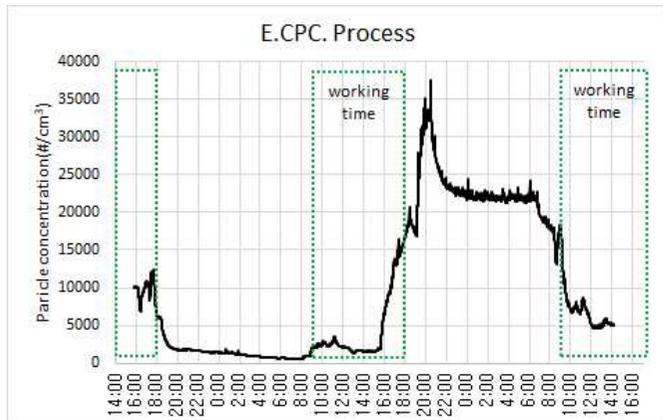


[그림 III-8] C 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC)

D 사업장은 작업시간 중 농도가 증가하는 것이 보였으며, 야간에는 낮아지는 경향이 있었으나, 오전 7시경부터 농도가 증가하였다.



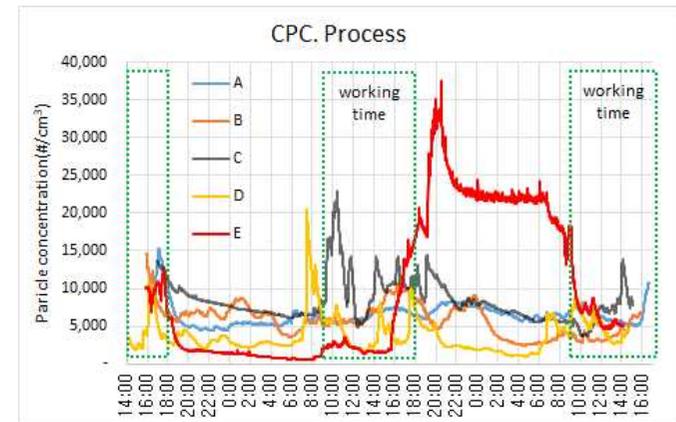
[그림 III-9] D 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC)



[그림 III-10] E 사업장 입자 수 농도 변화 (CPC)

E 사업장은 첫날 야간은 작업시간에 비해서 농도가 유의하게 낮아졌으나, 둘째 날 16시경부터 농도가 지속적으로 높아져서 야간에 높은 농도가 유지되었다가 9시부터 농도가 낮아졌다. 이러한 패턴은 둘째 날 프린팅 작업공간의 에어컨이 고장났고, 17시경부터 분석실의 에어컨 냉기를 비닐튜브를 이용하여 작업장으로 도입하였으며, 셋째 날 오전 10시경 에어컨 수리가 완료된 것과 관련이 있을 수 있다.

5개 사업장의 작업공간에서의 입자 수 농도변화는 아래 그림과 같았다.



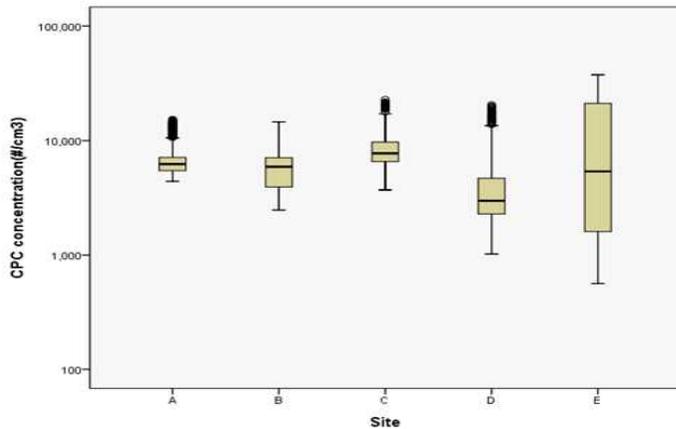
[그림 III-11] 사업장별 입자 수 농도 변화 (CPC)

최고농도는 E 사업장의 야간에 나타났으며, 가장 낮은 농도도 E 사업장의 야간에 나타나서, 농도의 편차가 컸다. 작업시간동안 농도변화를 보인 사업장은 C 사업장이었다.

사업장별 입자 수 농도의 전체값을 사용하여 비모수검정 (Kruskal-Wallis 검정)을 시행한 결과 사업장간에는 유의한 차이가 있는 것으로 평가되었다($p < 0.001$). 중위수를 기준으로 입자 수 농도는 C, A, B, E, D 순이었다.

<표 III-9> 사업장별 입자 수 농도 (전체 값, by CPC) (단위: #/cm³)

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값
A	2,901	6,493	1,485	6,234	4,408	15,323
B	2,891	5,837	2,098	5,908	2,482	14,582
C	2,768	8,374	2,764	7,740	3,707	22,877
D	2,913	3,821	2,408	2,987	1,024	20,577
E	2,782	9,816	9,459	5,387	565	37,494
합계	14,255	6,828	5,074	6,018	565	37,494

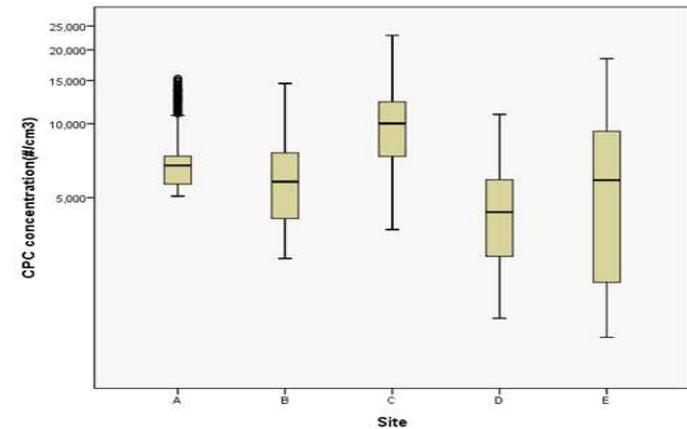


[그림 III-12] 사업장별 입자 수 농도

작업시간 동안의 입자 수 농도는 비모수검정에서 사업장별로 유의한 차이가 있었으며($p < 0.001$), 중위수를 기준으로 C, A, E, B, D의 순이었다.

<표 III-10> 작업시간동안 사업장별 입자 수 농도 (단위: #/cm³)

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값
A	981	7,070	1,978	6,766	5,074	15,323
B	971	6,280	2,440	5,806	2,826	14,582
C	848	9,987	3,907	10,033	3,707	22,877
D	993	4,727	2,119	4,367	1,615	10,914
E	862	6,339	4,262	5,891	1,350	18,404
합계	4,655	6,801	3,470	6,274	1,350	22,877

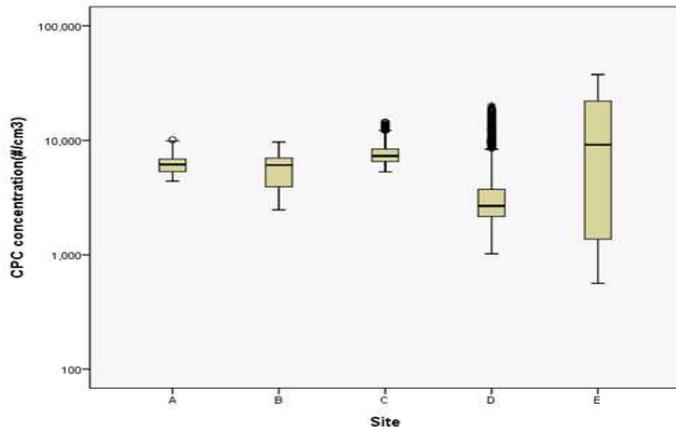


[그림 III-13] 작업시간동안 사업장별 입자 수 농도

밤 동안의 입자 수 농도수준도 유의한 차이가 있었으며($p < 0.001$), 중위수 농도 기준으로 E, C, A, B, D 순이었다.

<표 III-11> 밤 시간동안 사업장별 입자 수 농도 (단위:#/cm³)

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값
A	1,798	6,214	1,069	6,161	4,408	10,113
B	1,798	5,700	1,867	6,086	2,482	9,680
C	1,798	7,734	1,625	7,306	5,322	14,463
D	1,798	3,371	2,474	2,682	1,024	20,577
E	1,798	11,917	10,799	9,776	565	37,494
합계	8,990	6,987	5,833	6,099	565	37,494

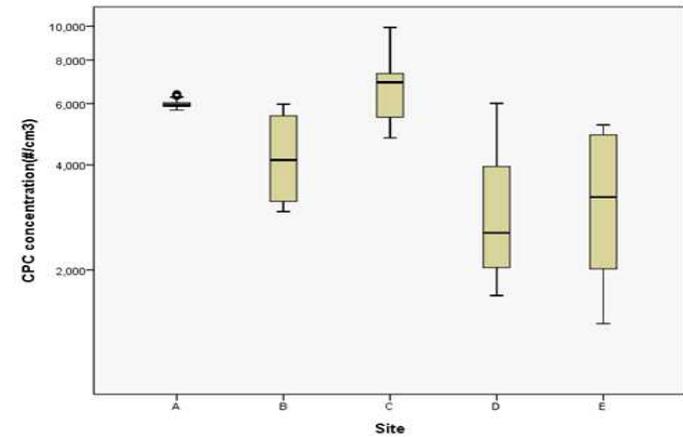


[그림 III-14] 밤 시간동안 사업장별 입자 수 농도

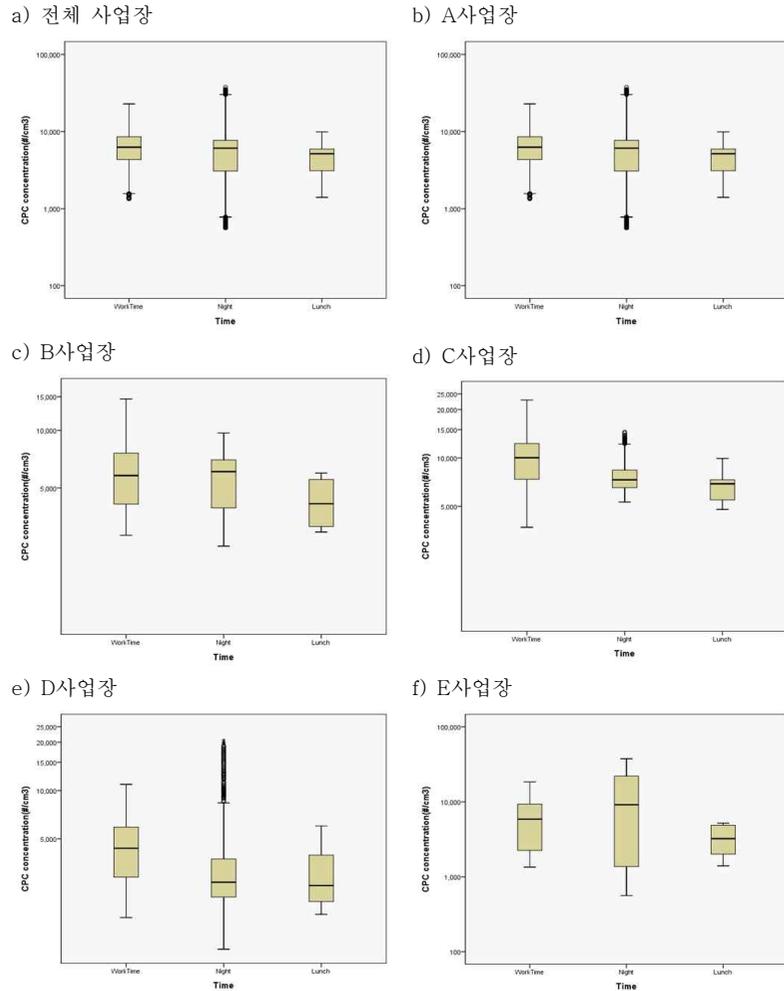
점심시간의 농도수준도 비모수검정에서 유의한 차이가 있었으며 ($p < 0.001$), 중위수 기준으로 C, A, B, E, D 순이었다.

<표 III-12> 점심시간동안 사업장별 입자 수 농도 (단위:#/cm³)

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값
A	122	5,983	152	5,949	5,747	6,405
B	122	4,338	1,215	4,234	2,939	5,978
C	122	6,592	1,093	6,905	4,783	9,915
D	122	3,063	1,213	2,581	1,689	6,010
E	122	3,411	1,491	3,448	1,404	5,212
합계	610	4,677	1,792	5,167	1,404	9,915



[그림 III-15] 점심시간동안 사업장별 입자 수 농도



[그림 III-16] 시간구분에 따른 입자 수 농도 비교

시간구분별 입자 수 농도수준은 비모수검정에서 유의한 차이가 있었으

며($p < 0.001$), 점심시간 동안의 농도가 낮은 것으로 판단되었다. 각 사업장별 시간구분에 따른 농도수준에서도 점심시간 동안의 농도가 대부분 낮은 수준으로 나타났다.

입자 수 농도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 온도, 습도, 사업장 및 시간대구분을 사용하여 입력방식의 다중회귀분석을 실시하였다. 사업장과 시간대 구분은 더미변환을 통하여 적용하였다. 독립변수간 공차한계는 0.176~0.609로 0.1 이상이었으며, 분산팽창요인(VIF)은 1.641~5.673으로 10미만으로 나타나 다중공선성은 없는 것으로 나타났다. 회귀모델식은 아래와 같았다.

$$\begin{aligned} \text{입자 수 농도} (\#/cm^3) = & 28,046 - 53T - 465RH - 3,086A - 4,602B \\ & + 2,916C - 5,938D + 2,583WT + 3,368N \end{aligned}$$

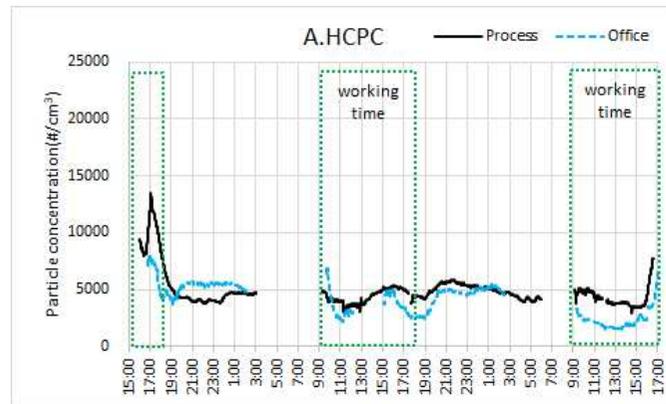
T:온도(°C), RH:상대습도(%), A,B,C,D : 사업장구분,
WT:근무시간, N:야간

회귀식의 설명력은 57.3% 였으며, 표준화 계수에 따른 각 변수의 상대적인 영향력은 상대습도(RH, $\beta = -0.726$), D사업장(D, $\beta = -0.470$), 야간(N, $\beta = 0.313$) 등의 순이었다. 이는 상대습도가 높을수록 입자 수 농도가 감소하며, 사업장에서는 D 사업장에서 농도영향이 컸으며, 시간대별로는 야간이 농도에 영향을 준 것으로 해석된다. 온도(T, $\beta = -0.025$)는 증가할수록 입자 수 농도가 감소하였으나, 영향력은 가장 낮은 것으로 분석되었다.

▪ H-CPC(Handheld Condensation Particle Counter)

이동식 CPC는 작업장과 사무실에 각각 장비를 두고 농도변화를 살펴 보았다. 작동유체의 용량 관계로 5시간 정도 운용 후에는 용액을 보충하여야 하는데, 야간 또는 용액이 소진된 뒤에는 농도값이 '0'으로 떨어지게 된다. 작동유체의 소진에 의해서 농도가 떨어지는 것으로 판단되는 부분은 데이터에서 제거한 후 결과를 살펴보았다.

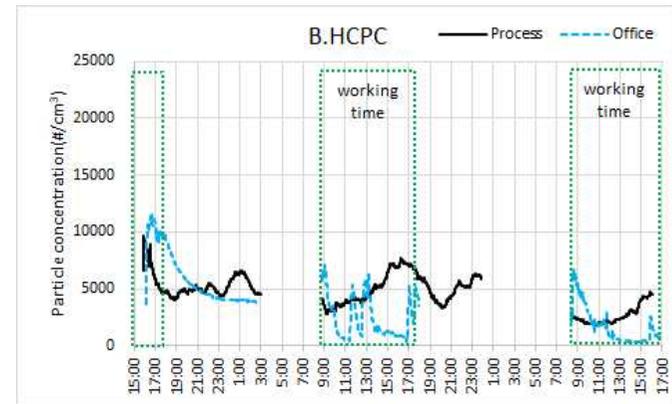
A 사업장은 작업장과 사무실의 패턴이 비슷하게 보이나, 작업장의 농도가 일부 높은 것으로 나타났다.



[그림 III-17] A 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC)

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

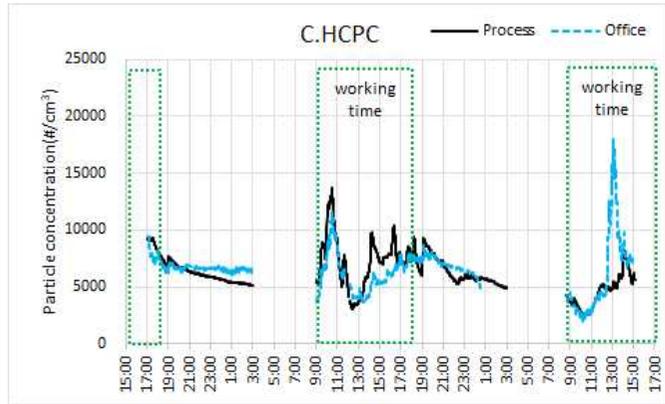
B 사업장은 사무실 측정값이 변이가 심하게 나타났으나, 작업장 농도에 비해서 낮은 것으로 판단된다. 평가한 사무공간이 좁아서 인접한 근로자의 움직임이나, 프린터 작동 등에 의한 영향일 것으로 추정된다.



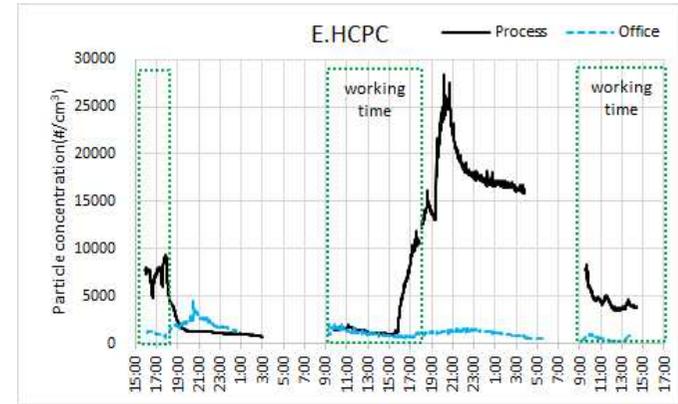
[그림 III-18] B 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC)

C 사업장은 작업장과 사무실이 비슷한 수준인 것으로 평가되었는데, 이는 서로 인접하여 유리문 하나를 사이에 두고 있었으며, 작업장의 공기가 사무실로 흘러가는 현상에 의한 영향으로 생각되었다.

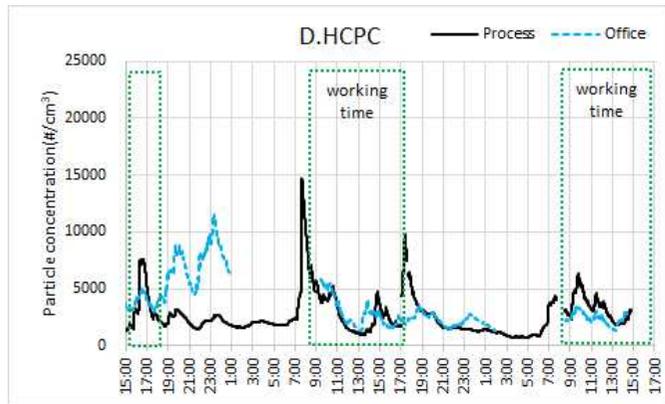
D 사업장은 평가첫날 저녁시간을 제외하고는 사무실과 작업장내 농도 변화가 비슷한 양상을 보였다. 작업장과 사무실이 모두 큰 공장동 내에 위치하고 있는 특성이 있었다.



[그림 III-19] C 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC)



[그림 III-21] E 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC)



[그림 III-20] D 사업장 입자 수 농도 변화 (H-CPC)

E 사업장은 사무실의 농도는 대체적으로 낮은 편이었으며, 작업장에서는 높은 농도를 보였으며, 2일차 오후부터 큰 농도변화가 있었다. 이는 평가당일 에어컨의 고장 및 실험실 에어컨의 냉기공급 등과 관련이 있는 것으로 보인다.

각 사업장별 작업장과 사무실의 농도를 비교해 보면 아래의 표와 같았다. 대응표본 비모수검정을 한 결과 4개 사업장은 유의한 차이가 있는 것으로 평가되었으나, C 사업장은 차이가 없었다. C 사업장의 경우 사무실과 작업장이 붙어있고, 하나의 문을 통하여 출입이 빈번하였기 때문으로 판단된다. 반면, 4개 사업장은 작업장과 사무실이 완벽하게 분리되어 있었다.

<표 III-13> 평가대상 사업장별 입자 수 농도 (단위:#/cm³)

Site	Place	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	p-value *
A	Process	2,314	4,850	1,465	4,595	2,963	13,476	p<0.001
	Office	1,878	4,094	1,495	4,572	1,514	7,909	
B	Process	2,012	4,609	1,526	4,652	1,853	9,646	p<0.001
	Office	1,688	3,501	2,715	3,713	309	11,521	
C	Process	2,056	6,275	1,801	5,927	2,470	13,729	p=0.167
	Office	1,858	6,481	1,998	6,618	2,048	17,972	
D	Process	2,866	2,593	1,716	2,074	696	14,742	p<0.001
	Office	1,965	3,574	2,168	2,763	1,285	11,491	
E	Process	2,016	7,396	7,287	4,078	757	28,387	p<0.001
	Office	1,948	1,233	600	1,156	196	4,730	
합계	Process	11,264	4,949	3,811	4,353	696	28,387	p<0.001
	Office	9,337	3,755	2,547	3,189	196	17,972	

*p-value : by Wilcoxon signed rank test, 대응표본에 대해서만 검증

▪ SMPS+OPS

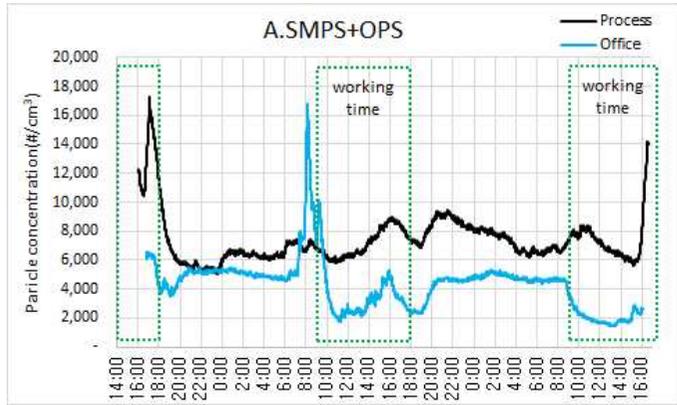
동일한 제조사의 SMPS와 OPS에서 측정된 입자 수 농도(dN)를 합산하여 살펴보았다. 각 사업장별 작업장과 사무실의 농도수준은 유의하게 차이가 있었다. 중위수를 기준으로 D 사업장은 작업장내의 입자 수 농도가 사무실 보다 낮았으나, 다른 사업장은 작업장의 입자 수 농도가 높았다.

<표 III-14> 평가대상 사업장별 입자 수 농도 (단위:#/cm³)

Site	Place	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	p-value *
A	Process	2,912	7,357	1,682	6,903	5,073	17,246	p<0.001
	Office	2,838	4,292	1,808	4,633	1,431	16,807	
B	Process	2,893	6,619	2,532	6,594	2,600	13,975	p<0.001
	Office	2,913	2,354	2,256	1,336	197	9,243	
C	Process	2,780	9,604	2,555	9,470	3,765	18,721	p<0.001
	Office	2,755	6,107	1,836	6,304	1,738	19,714	
D	Process	2,918	3,912	2,765	3,062	1,136	26,273	p<0.001
	Office	2,884	5,260	1,816	4,985	2,346	11,382	
E	Process	2,786	13,838	14,350	6,127	638	90,046	p<0.001
	Office	2,731	4,763	1,772	4,207	2,141	9,192	
합계	Process	14,289	8,205	7,472	6,687	638	90,046	p<0.001
	Office	14,121	4,522	2,286	4,585	197	19,714	

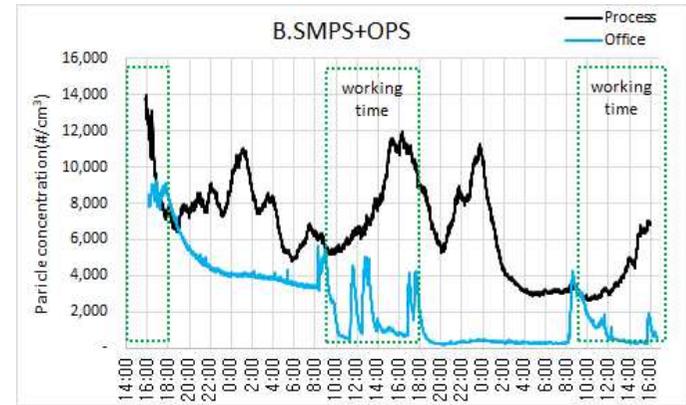
*p-value : by Wilcoxon signed rank test, 대응표본에 대해서만 검증

A 사업장은 사무실과 공정이 서로 다른 층에 위치하며, 별도의 환기시스템을 사용하고 있었다. 공정내의 농도가 사무실의 농도보다 대체적으로 높은 편이었으나, 사무실의 출근 전 농도가 높게 평가되기도 하였다.



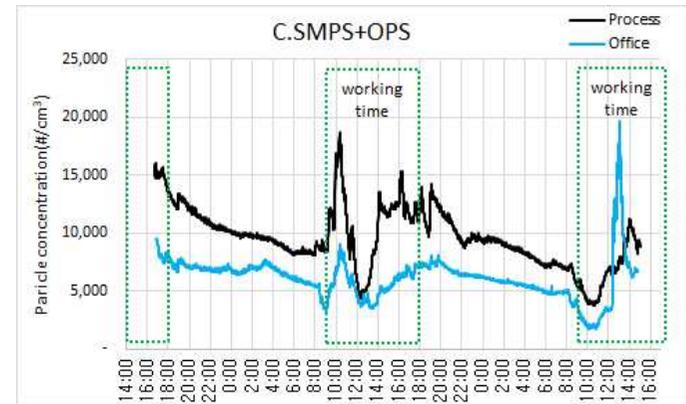
[그림 III-22] A 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS)

B 사업장은 공정내의 입자 수 농도가 사무실의 입자수 농도에 비해서 높았다. 사무실의 입자 수 농도는 근무 시간 중 유동성이 있는 것으로 보였으나, 야간에는 안정되며 낮은 수준의 농도로 평가되었다. 공정내에서는 오후에 농도가 증가하는 경향이 있는 것으로 보였으나, 야간에도 농도가 증가하는 현상이 관찰되었다.



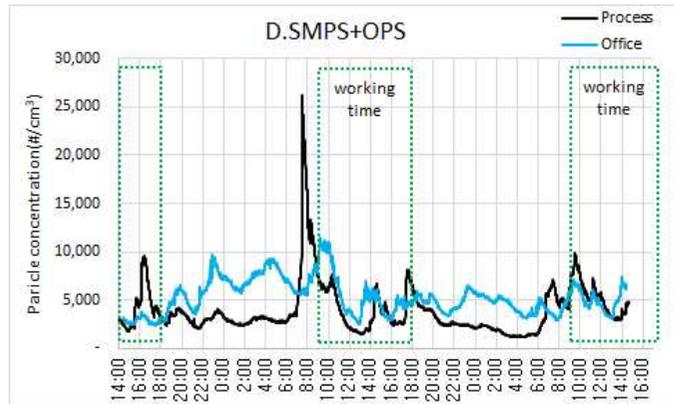
[그림 III-23] B 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS)

C 사업장의 공정 및 사무실의 농도는 서로 비슷한 패턴을 이루는 것이 관찰되었다. 이는 서로 인접하여 있음으로 인해서 영향을 받았을 것으로 판단된다.



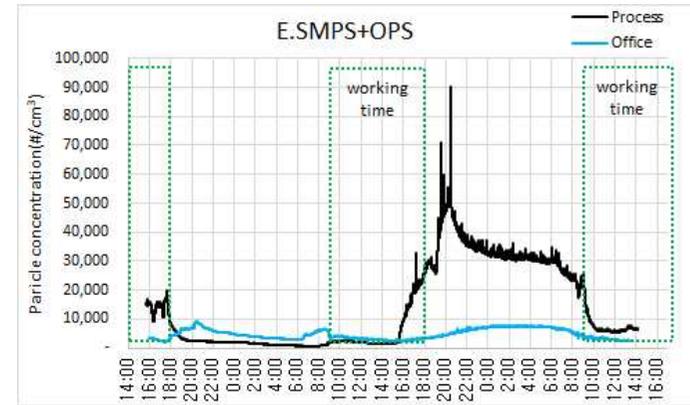
[그림 III-24] C 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS)

D 사업장은 사무실의 농도가 공정내 농도에 비해서 대부분의 시간동안 높은 수준이었으나, 공정내의 농도가 사무실에 비해서 높은 구간도 일부 관찰되었다. 이 시간은 주로 작업자의 출입 및 작업활동에 의한 것으로 생각된다.



[그림 III-25] D 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS)

E 사업장은 사무실의 농도는 변화가 거의 없었으나, 공정내의 농도는 2일차 오후에 증가하기 시작하여 야간에도 높은 농도로 유지되었다. 이후 3일차 오전부터 농도가 다시 낮아졌다. 이는 에어컨의 고장으로 인하여 실험실에 설치된 에어컨의 냉기를 도입하는 과정에서 발생하였을 것으로 생각된다.



[그림 III-26] E 사업장 입자 수 농도 변화 (SMPS+OPS)

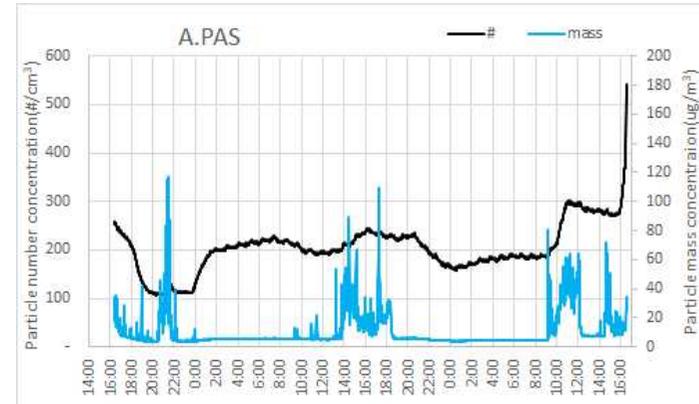
▪ PAS

Grimm 사의 OPS 장비에 의한 측정결과는 사업장별로 아래 표와 같았다.

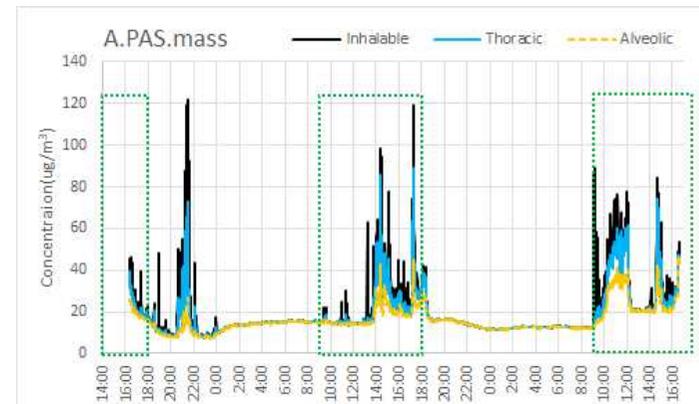
아래 그림과 같이 모든 사업장에서 입자 수 농도와 중량농도의 패턴에는 차이가 있는 것으로 관찰되었다. 호흡기 침착부위별 질량농도를 살펴보면, 적은 수의 큰 입자에 의해서 중량농도에는 변화가 크지만, 입자 수 농도에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 중량농도와 호흡기 침착부위별 질량분율 그래프는 근무시간 동안 증가하면서 변화가 심하고, 저녁시간에는 비교적 낮고 안정된 것으로 측정되었다.

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

A 사업장의 경우 평가첫날 23시30분까지 작업이 있었던 것으로 파악되었으며, 특히 21시 경에 장입을 시작하였다고 했는데, 질량농도 및 호흡기 침착부위별 질량농도 그래프에서 피크를 확인할 수 있었다.

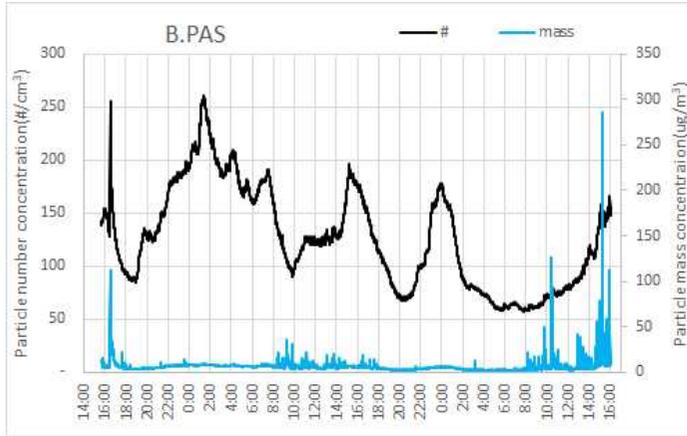


[그림 III-27] A 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS)

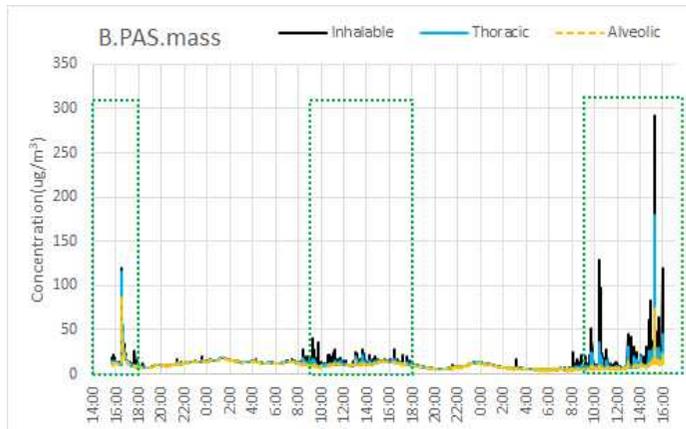


[그림 III-28] A 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS)

B 사업장은 8시30분부터 근무시간이며, 출근시 작업장과 연결된 복도를 지나가도록 되어 있어서 2일 및 3일차에 질량농도에서 8시경부터 피크를 확인할 수 있었다.

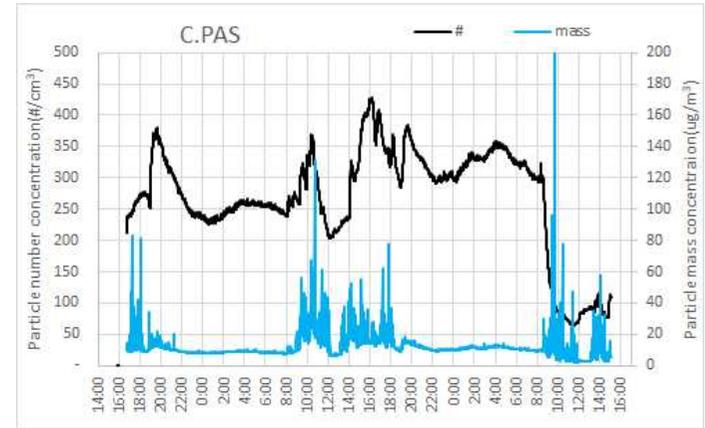


[그림 III-29] B 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS)

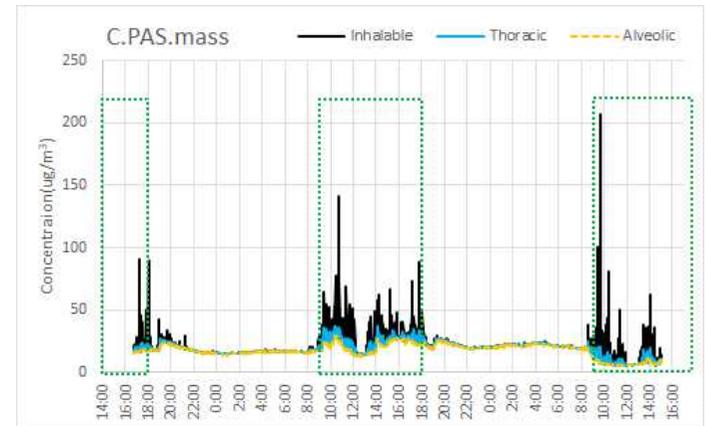


[그림 III-30] B 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS)

C 사업장에서도 근무시간동안 질량농도 및 호흡기 침착분율의 질량농도가 변화하는 것을 관찰할 수 있었고, 점심시간에는 낮은 수준을 보였다. 1일차와 2일차는 입자 수 농도와 질량농도변화에 비슷한 양상을 보였으나 3일차에는 차이가 있는 것으로 보였다.

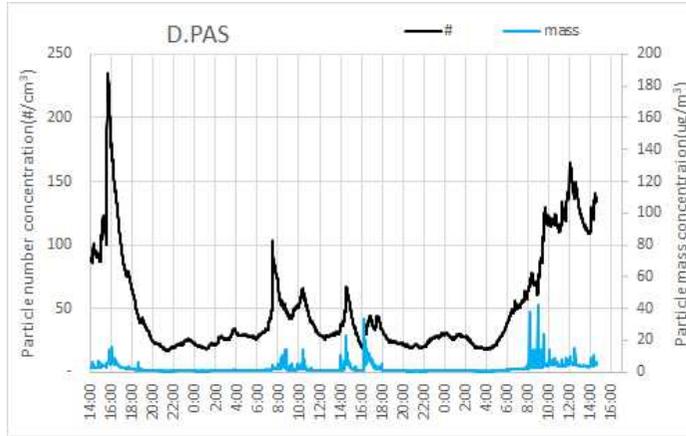


[그림 III-31] C 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS)

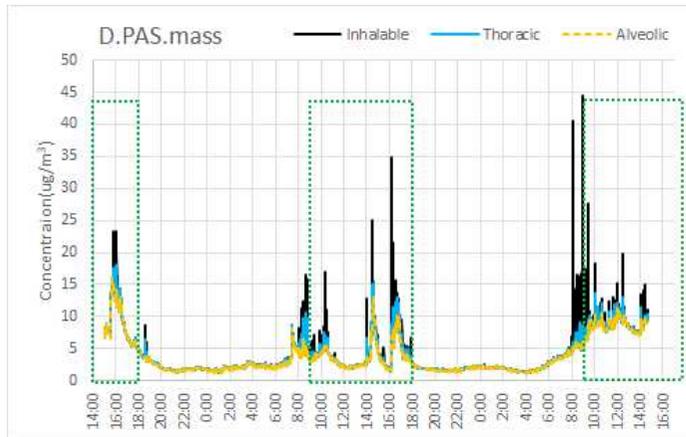


[그림 III-32] C 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS)

D 사업장은 정규 작업시간은 8시30분부터이나, 2일 및 3일차의 실제 작업은 약 8시경부터 시작되었으며, 질량농도변화에서도 나타났다. 입자 수 농도와 질량농도변화의 양상은 비슷한 것으로 보여졌다.

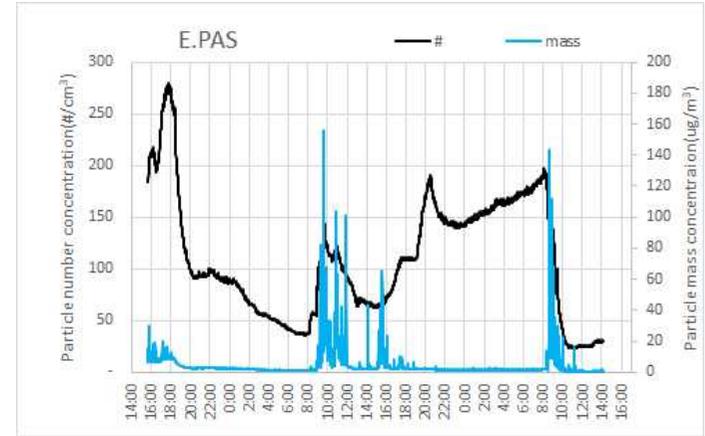


[그림 III-33] D 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS)

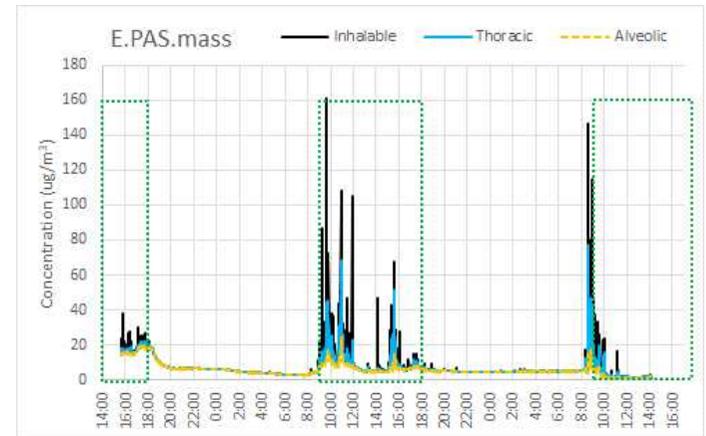


[그림 III-34] D 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS)

E 사업장에서도 근무시간동안 질량농도변화를 관찰할 수 있었으나, 입자 수 농도와는 다른 양상을 보였다.



[그림 III-35] E 사업장 입자 수 및 질량농도 변화 (PAS)



[그림 III-36] E 사업장 입경별 질량농도 변화 (PAS)

사업장별 입자 수 농도와 질량농도의 상관관계는 모두 유의성이 있었으나, 상관계수는 0.144~0.315로 낮은 상관관계가 대부분이었으며, D 사업장은 상관계수가 0.577로 다른 사업장에 비해서 상관성이 높게 나타났다. 중위수를 기준으로 하면, 입자 수 농도와 질량농도는 C, A, B, E, D 순으로 높았다. D 사업장은 입자 수 농도가 가장 낮았는데, 이것이 상관성이 높게 나온 이유일 것으로 생각된다. 즉, 질량농도에는 큰 영향을 미치지 않지만 입자 수 농도에는 영향이 적은 입경이 큰 입자들이 적었기 때문으로 판단된다.

사업장별 입자 수 농도 및 질량농도는 모두 유의하게 다른 것으로 평가되었다(독립표본 Kruskal-Wallis 검정, $p < 0.001$).

<표 III-15> 평가대상 사업장별 입자 수 농도와 질량농도 비교(PAS)

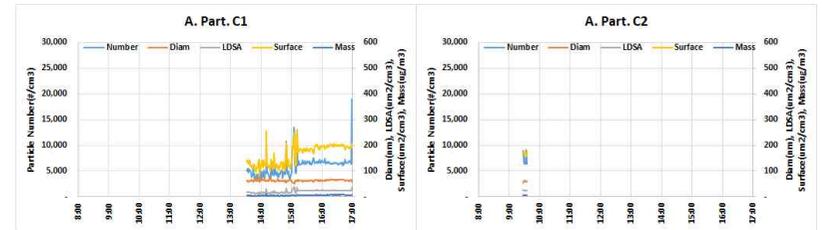
Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	상관계수 p-value *
A	#/cm ³	2,898	204.23	49.15	202.26	106.69	0.315
	ug/m ³	2,898	10.29	11.80	5.49	3.22	$p < 0.001$
B	#/cm ³	2,903	125.87	47.41	123.33	57.49	0.212
	ug/m ³	2,903	6.29	8.66	5.21	1.75	$p < 0.001$
C	#/cm ³	2,783	268.31	83.37	278.08	63.73	0.216
	ug/m ³	2,783	12.46	8.50	10.47	2.08	$p < 0.001$
D	#/cm ³	2,919	49.95	38.89	30.55	16.51	0.577
	ug/m ³	2,919	2.22	2.54	1.15	0.47	$p < 0.001$
E	#/cm ³	2,788	109.57	58.01	98.74	21.70	0.144
	ug/m ³	2,788	4.21	8.68	1.82	0.35	$p < 0.001$
합계	#/cm ³	14,291	150.48	95.23	141.30	16.51	0.443
	ug/m ³	14,291	7.06	9.37	4.70	0.35	$p < 0.001$

*p-value : 피어슨 상관분석

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

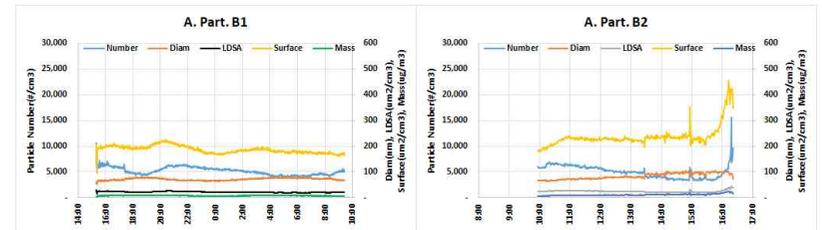
▪ Partector2

A 사업장에서 측정된 결과, 나노장비와 함께 지역시료로 측정된 자료는 에러에 의해서 손실이 있었으며, 주작업자가 착용한 장비의 측정결과는 아래 그림과 같다. 첫날은 평가하지 않았으며, 둘째 날 오후 공정에서 작업이 시작하는 시점부터 측정하였으며, 셋째 날은 오전에 작동하였으나, 버튼 눌림에 의하여 종료되어 데이터 수집이 원활하지 못했다.



[그림 III-37] A 사업장 주작업자

다른 1대는 아래와 같은 결과를 보였는데, 둘째 날은 작업장 중앙에 비치해두면서 작업상황에 따라 움직이면서 측정된 결과이고, 셋째 날은 작업장 중앙에 비치해 두었다가 14시경부터 작업자가 착용하였다. 동 작업자는 주로 외주업체의 사무공간에 머물면서 컴퓨팅 작업을 하며, 작업장 내 상황을 살피는 업무를 하였다.



[그림 III-38] A 사업장 지역+작업자

<표 III-16> A 사업장 공정내 입자수 농도(#/cm³) (by Partector2)

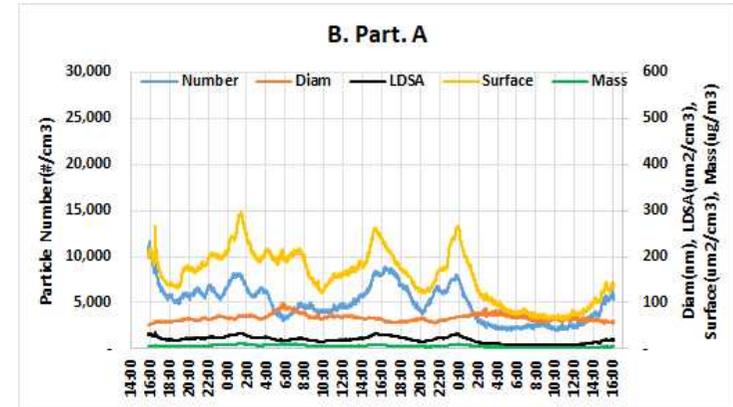
Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	-	-	-	-	-
주작업자	209	5,922	1,764	2,942	18,941
	8	7,224	1,158	6,320	9,136
지역+ 작업자	1,087	5,174	748	3,852	10,596
	385	4,998	1,262	3,266	15,662

<표 III-17> A 사업장 폐침착표면적 농도(μm²/cm³) (by Partector2)

Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	-	-	-	-	-
주작업자	209	21.4	5.1	10.4	39.1
	8	23.8	1.1	22.9	26.2
지역+ 작업자	1,087	21.9	2.0	14.4	31.2
	385	24.2	3.5	19.9	44.7

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

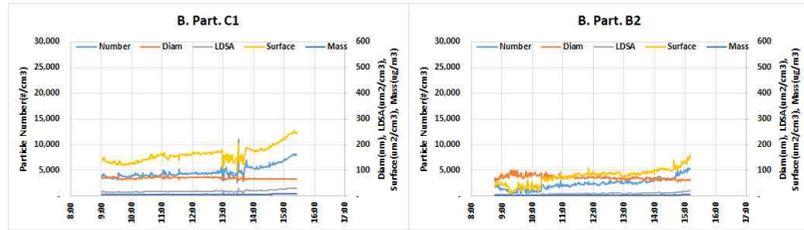
B 사업장에서는 작업장 중앙에 위치하여 다른 나노측정장비들과 함께 지역에서 평가한 결과는 아래 그림과 같았다. 약 48시간동안 측정되었으며, 오전 작업시간에는 농도가 증가하고 17시 이후로는 농도가 낮아지는 경향이 있었다.



[그림 III-39] B 사업장 공정내 지역평가(나노장비)

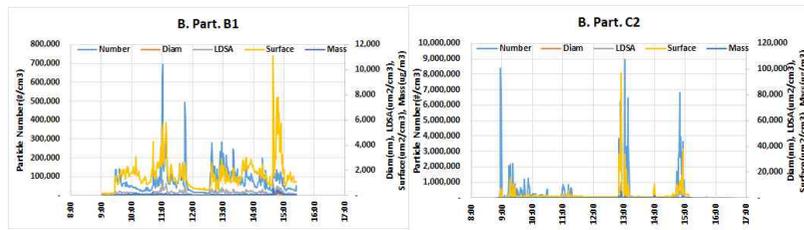
B 사업장의 작업장 내에서 3D 프린팅 주작업자의 이틀간 측정결과는 아래 그림과 같았다. 둘째 날 실제 작업은 오후 3시경까지 있었으며, 이후로는 3호기 뒤편 지역에서 모니터링 하였다. 셋째 날은 작업장 내에서 계속 작업하였고 개인 시료로서 모니터링 되었다. 이를 모두 시간이 경과됨에 따라 입자 수 농도가 증가하였다.

III. 연구결과



[그림 III-40] B 사업장 주작업자

B 사업장의 후처리 공정 근무자에 대한 측정결과는 아래 그림과 같다. 이를 대부분의 시간에 작업이 있었으며, 농도의 변화가 크고 매우 높게 평가되었다.



[그림 III-41] B 사업장 후처리작업자

<표 III-18> B 사업장 공정내 입자수 농도(#/cm³) (by Partector2)

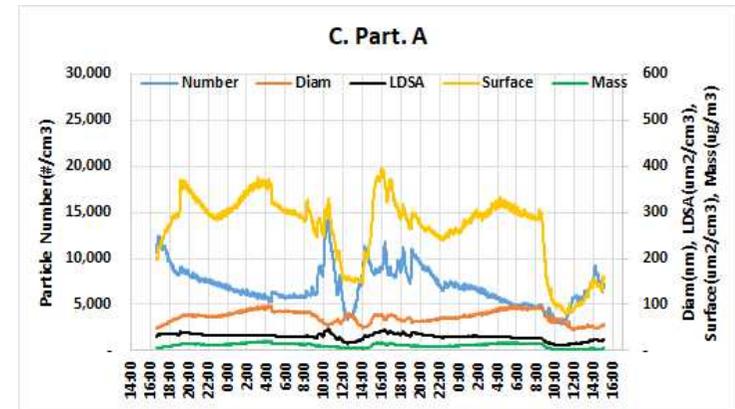
Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,900	4,998	1,920	2,003	11,644
주작업자	447	5,235	1,569	2,593	11,094
	471	2,914	1,469	399	8,269
후처리작업자	1,425	27,020	51,757	2,201	698,168
	467	314,280	1,005,887	245	8,981,629

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

<표 III-19> B 사업장 폐침착표면적 농도(µm²/cm²) (by Partector2)

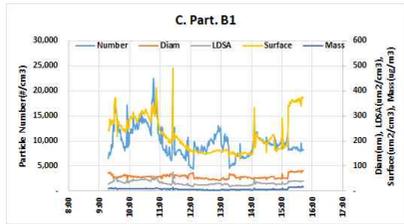
Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,900	19.5	6.8	8.3	35.9
주작업자	447	20.9	5.3	10.9	31.8
	471	11.0	5.0	1.2	23.9
후처리작업자	1,425	81.9	131.0	8.8	1,234.4
	467	414.2	1,145.4	1.3	11,951.3

C 사업장의 작업장 중앙지점에서 나노측정장비와 함께 지역으로 평가한 결과는 아래 그림과 같았다. 근무시간 이후에 입자 수 농도가 낮아지고, 근무시간에는 다시 농도가 높아지는 경향을 볼 수 있다.



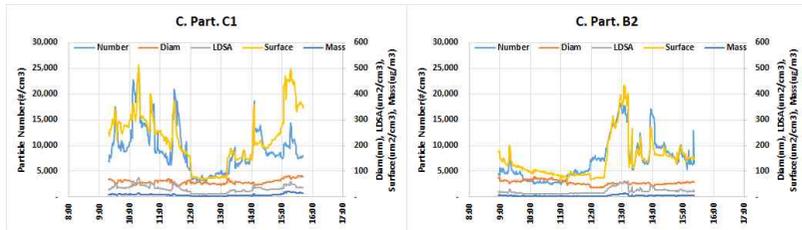
[그림 III-42] C 사업장 공정내 지역평가(나노장비)

3D 프린팅 주작업자의 노출수준은 아래의 그림과 같았다.



[그림 III-43] C 사업장 3D 프린팅 주작업자

3D 프린팅을 하지는 않지만 동일한 작업공간 안에서 다른 작업을 수행하는 작업자의 개인노출수준 변화는 아래의 그림과 같았다. 둘째 날 패턴은 3D 프린팅 주작업자와 유사한 양상을 보였으며, 셋째 날에는 오전보다 오후에 노출수준이 높게 나타났다.



[그림 III-44] C 사업장 실리콘렌즈 작업자

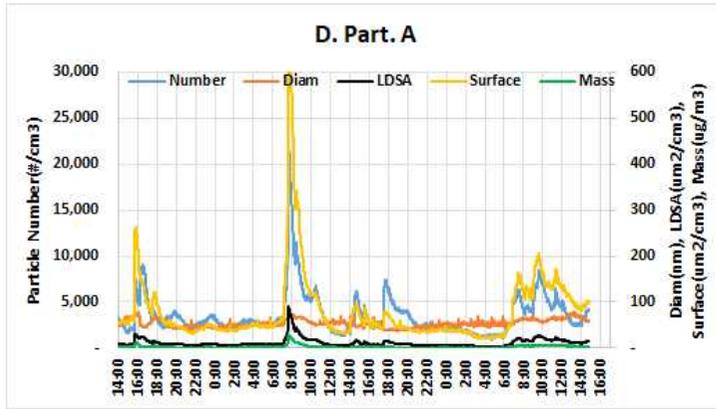
<표 III-20> C 사업장 공정내 입자수 농도(#/cm³) (by Partector2)

Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,786	6,994	1,997	2,829	15,113
주작업자	464	10,008	2,867	4,419	24,334
렌즈작업자	1,424	9,334	4,176	2,849	23,547
	389	7,069	3,943	2,380	18,206

<표 III-21> C 사업장 폐침착표면적 농도(µm²/cm³) (by Partector2)

Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,786	30.0	7.1	11.2	48.3
주작업자	464	33.5	9.0	18.4	74.9
렌즈작업자	1,424	31.2	8.0	9.7	81.3
	389	21.8	11.5	8.2	61.2

D 사업장의 공정내 나노장비와 함께 두고 평가한 결과는 아래와 같았다. 측정장비의 설치후 높은 값을 보였으며, 아침 8시경부터 실제 작업이 있었던 시간동안 높은 농도를 보였다.



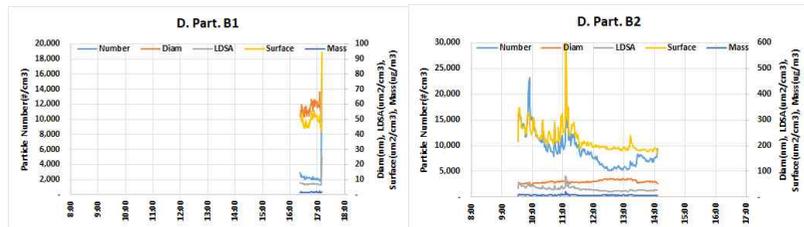
[그림 III-45] D 사업장 공정내 지역평가(나노장비)

<표 III-22> D 사업장 공정내 입자수 농도(#/cm³) (by Partector2)

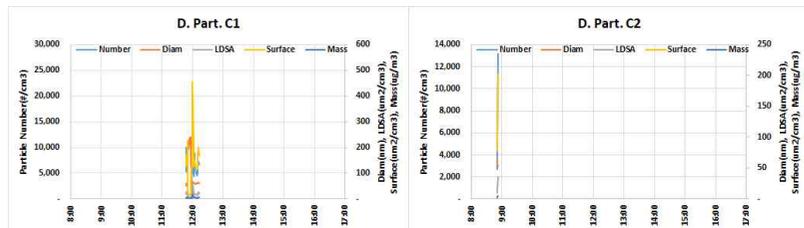
Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,900	3,550	2,426	920	24,359
주작업자/지역	48	2,543	2,378	1,861	18,623
	275	9,144	3,387	5,082	23,306
기타	27	5,444	3,923	56	14,157
	3	7,007	5,489	2,680	13,181

<표 III-23> D 사업장 폐침착표면적 농도(µm²/cm³) (by Partector2)

Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,946	11.3	9.6	3.2	92.2
주작업자/지역	48	7.5	2.6	6.5	25.3
	275	31.3	8.9	21.6	82.0
기타	27	18.2	13.5	0.5	56.3
	3	20.6	13.3	9.9	35.5

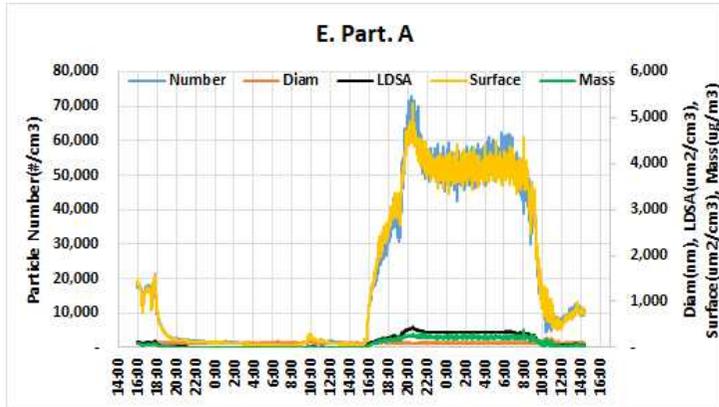


[그림 III-46] D 사업장 3D 프린팅 주작업자(B1) 및 지역(B2)



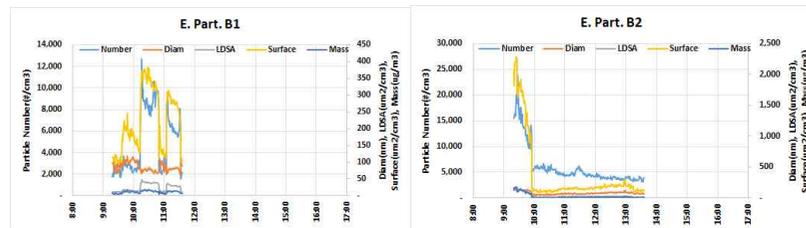
[그림 III-47] D 사업장 지역 및 작업자

E 사업장의 공정내에서 나노장비와 함께 두고 평가한 결과는 아래 그림과 같았다.



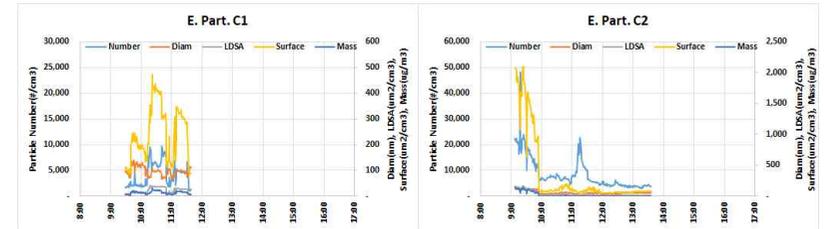
[그림 III-48] E 사업장 공정내 지역평가(나노장비)

작업자에게서 개인시료로서 평가한 결과는 아래와 같았다. 2명의 작업자가 첫날은 9:20~11:30까지 작업하였으며, 작업시간동안만 평가하였고, 둘째 날은 9:10~9:37까지 작업하였으며, 작업시간동안에는 개인평가하였고, 이후에는 작업장 내에 두면서 평가하였다. 작업시간동안 높은 농도를 보였으며, 작업종료 후에는 농도가 급격히 낮아졌다.



[그림 III-49] E 사업장 3D 프린팅 작업자1

급속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-50] E 사업장 3D 프린팅 작업자2

<표 III-24> E 사업장 공정내 입자수 농도(#/cm³) (by Partector2)

Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,784	20,764	22,897	497	73,012
주작업자	138	5,053	2,877	1,579	12,710
	257	5,987	3,877	3,202	24,318
렌즈작업자	130	4,193	2,323	1,058	9,676
	269	8,297	5,880	3,050	48,397

<표 III-25> E 사업장 폐침착표면적 농도(µm²/cm²) (by Partector2)

Site	n	산술평균	표준편차	최소값	최대값
공정내 지역	2,784	129.5	142.1	3.2	449.1
주작업자	138	23.4	11.4	9.8	47.8
	257	31.2	34.0	12.5	157.4
렌즈작업자	130	22.2	10.4	6.8	40.8
	269	32.8	41.4	8.8	160.1

측정된 입자 수 농도와 폐침착 표면적 농도를 비교해 보았다. 5개 사업장 모두에서 유의한 상관관계가 있는 것으로 평가되었으며, 상관계수가 0.745~0.995로 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

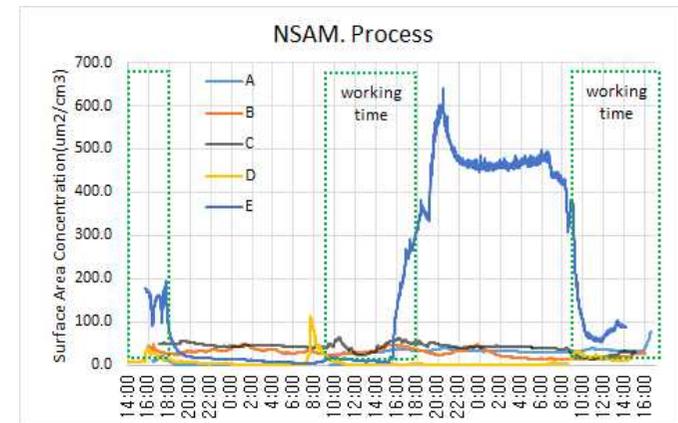
<표 III-26> 평가대상 사업장별 입자 수 농도와 LDSA 비교

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	상관계수 p-value*	
A	#/cm ³	1,689	5,236	1,097	5,113	2,942	18,941	0.745
	um ² /cm ³	1,689	22.4	3.1	21.9	10.4	44.7	p<0.001
B	#/cm ³	4,021	48,121	357,302	4,612	245	8,981,628	0.886
	um ² /cm ³	4,021	85.1	416.4	17.9	1.2	11951.3	p<0.001
C	#/cm ³	5,063	7,506	2,680	7,126	2,380	24,334	0.792
	um ² /cm ³	5,063	30.0	8.4	30.6	8.2	81.3	p<0.001
D	#/cm ³	3,296	4,017	2,962	2,954	56	24,359	0.969
	um ² /cm ³	3,296	13.0	11.0	8.6	0.5	92.2	p<0.001
E	#/cm ³	3,578	17,558	21,182	5,903	497	73,012	0.995
	um ² /cm ³	3,578	107.1	133.0	20.9	3.2	449.1	p<0.001
합계	#/cm ³	17,647	17,929	171,665	5,542	56	8,981,628	0.857
	um ² /cm ³	17,647	54.3	210.9	22.1	0.5	11,951.3	p<0.001

*p-value : 피어슨 상관분석

▪ NSAM

나노입자의 폐침착 표면적을 측정하는 NSAM 장비의 측정결과는 아래와 같았다. 대부분의 값이 100 um²/cm³ 미만이었으나, E 사업장은 1일차 및 2일차 오후4시경부터 높은 농도를 보였으며, 3일차 오전에 농도가 감소하였다.



[그림 III-51] 사업장별 폐침착 표면적농도 변화 (NSAM)

시간대에 따라서 근무시간 중과 퇴근 이후로 구분하여 농도를 비교해 보았다. 아래의 표와 같이 중위수를 기준으로 하여, A와 D 사업장은 밤보다 근무시간 중의 농도가 높았고(>1), 나머지 사업장은 근무시간 중에 오히려 농도가 낮았다. A 사업장을 기준으로 하였을 때, B 사업장은 유사한 수준이었고, C, E 사업장은 높은 중위수를 보였으며, D 사업장은 낮은 농도를 보였다.

<표 III-27> 사업장별 폐침착 표면적 농도($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) 비교 (by NSAM)

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	W/N*	Ratio
A	Work time	959	29.2	12.7	32.6	0.0	1.08	1.00
	Night	1,253	23.6	14.6	30.2	0.0		39.5
B	Work time	970	27.7	10.4	26.6	13.1	0.86	0.82
	Night	1,798	29.4	8.8	30.9	14.1		49.4
C	Work time	846	38.2	14.6	38.7	14.9	0.89	1.19
	Night	1,798	44.1	4.3	43.7	25.7		57.1
D**	Work time	774	14.4	10.5	11.1	0.0	3.89	0.34
	Night	899	8.0	18.2	2.9	0.0		115.1
E	Work time	864	92.9	87.3	69.4	8.2	0.36	2.13
	Night	1,798	236.8	226.4	192.2	4.3		640.7
합계	Work time	4,413	40.5	48.2	29.3	0	0.89	0.90
	Night	7,546	78.8	142.2	32.9	0		640.7

* W/N : work time 중위수 농도 / Night 중위수농도 농도

** 장비의 설정에서 흉곽성으로 설정되어 측정된 값 제외함

사업장별 폐침착 표면적 노출량의 계산을 위하여 평균 호흡율은 $1 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 가정하였다. 이는 걸기(국립환경과학원, 2018) 및 가벼운 행동(US-EPA, 1997)에서 평가된 평균 호흡율이다. 작업시간은 사업장별 평가시 관찰된 작업자별 시간을 일평균으로 산정하였다.

<표 III-28> 사업장별 폐침착 표면적 노출량(mm^2) (by NSAM)

Site	n	폐침착 표면적 농도 중위수($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)	호흡율 (m^3/hr)	작업시간 (hr)	폐침착 표면적 노출량 중위수(mm^2)
A	959	32.6	1	4.5	146.7
B	970	26.6	1	4	106.4
C	846	38.7	1	5	193.5
D	774	11.1	1	2	22.2
E	864	69.4	1	4	277.6
합계	4,413	29.3	1	3.9	114.3

Stabele 등(2016)의 연구에서, 재료압출방식의 3D 프린터에서 다양한 PLA 소재를 사용하여 일정공간에서 작업하는 경우 폐침착 표면적 노출량은 약 200 mm^2 까지 될 것으로 평가하였다. 동 연구에서는 대부분 이보다 낮은 수준이었으나, E 사업장은 277.6 mm^2 으로 이보다 높았다.

▪ 입경별 누적분포

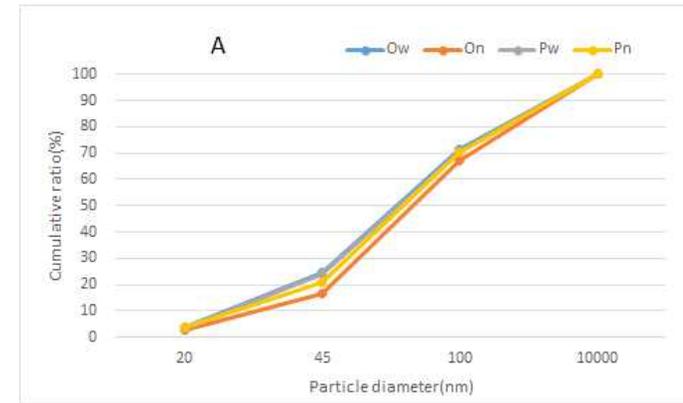
3일 동안 SMPS+OPS 측정기기로 측정된 입자 수 농도를 사용하여 입경별 분포를 평가하였다.

Taylor 등(2021)에 의하면, 4nm 미만의 나노입자는 피부를 통과하고, 4~20nm 입자는 손상되거나 접촉된 피부를 통과할 잠재성이 있고, 21~45nm 입자는 손상된 피부만 통과할 수 있으며, 45nm 초과 입자는 피부를 통과할 수 없다고 하였다. 이에 작업장에서 발생하는 입자의 수 농도를 위의 기준에 적용하기 위하여 정리하였다. SMPS의 13채널 중 2번째 채널(Dp=15.4)까지를 20nm 미만, 5번째 채널(Dp=36.5)까지를 45nm 미만, 8번째 채널(Dp=86.6)까지를 100nm 이하로 구분하였다. 또한 100nm 이하의 입자를 나노입자로 판단하여 분포율을 계산하였다.

20nm 미만의 입자의 분포율은 사업장 및 측정시간대에 따라서 평균 0.1~7.0% 수준이었다. 45nm 미만의 분포율은 평균 1.7~37.9% 였으며, 100nm 이하 나노입자의 분포율은 평균 35~84% 수준이었으며, 사업장별 차이가 있었다. 특히, D 사업장의 나노입자 분포율은 높은 편이었으며, E 사업장은 낮은 분포를 보였다.

<표 III-29> A 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS)

Site		<20nm #/cm³ (%)	<45nm #/cm³ (%)	≤100nm #/cm³ (%)	Total #/cm³ (%)
Office	Worktime	120 (3.7)	785 (24.3)	2,309 (71.4)	3,232 (100)
	Night	132 (2.7)	821 (16.5)	3,348 (67.2)	4,984 (100)
Process	Worktime	263 (3.3)	1,938 (24.2)	5,631 (70.2)	8,023 (100)
	Night	253 (3.6)	1,481 (21.0)	4,950 (70.4)	7,034 (100)



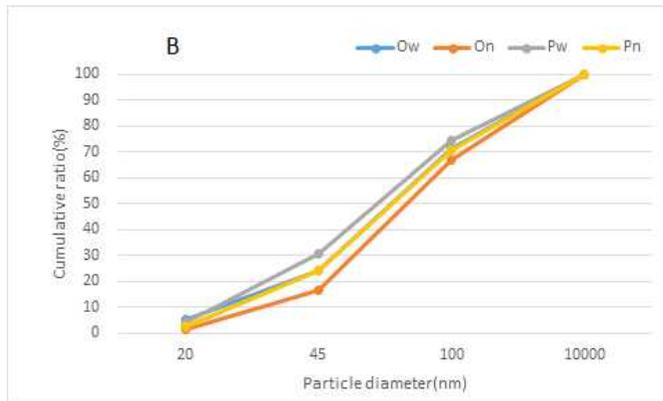
[그림 III-52] A 사업장 입경별 누적분포

(Ow:사무실-근무시간, On:사무실-야간, Pw:프린터공정-근무시간, Pn:프린터공정-야간)

A 사업장에서 100nm 이하의 나노입자 비율은 사무실 및 작업공정에서 비슷한 수준으로 평가되었다. 그러나 입자 수 농도는 작업장이 높게 평가되었으며, 근무시간 중 농도가 야간의 농도보다 높았다.

<표 III-30> B 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS)

Site		<20nm	<45nm	≤100nm	Total
		#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)
Office	Worktime	118 (5.1)	688 (30.1)	1,680 (73.6)	2,283 (100)
	Night	43 (1.7)	387 (15.8)	1,583 (64.7)	2,445 (100)
Process	Worktime	297 (4.3)	2,132 (30.9)	5,150 (74.6)	6,903 (100)
	Night	192 (2.9)	1,603 (24.4)	4,654 (70.8)	6,578 (100)



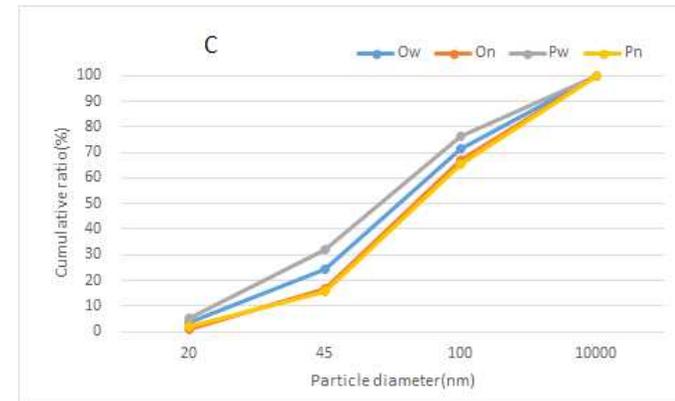
[그림 III-53] B 사업장 입경별 누적분포

(Ow:사무실-근무시간, On:사무실-야간, Pw:프린터공정-근무시간, Pn:프린터공정-야간)

B 사업장에서 100nm 이하의 나노입자 비율은 사무실 및 작업공정에서 64.7~74.6%로 비슷한 수준으로 평가되었다. 그러나 입자 수 농도는 작업장이 높게 평가되었으며, 근무시간 중 농도가 야간의 농도보다 높았다.

<표 III-31> C 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS)

Site		<20nm	<45nm	≤100nm	Total
		#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)
Office	Worktime	175 (3.3)	1,224 (23.0)	3,696 (69.5)	5,317 (100)
	Night	59 (0.9)	624 (10.0)	3,503 (55.8)	6,274 (100)
Process	Worktime	537 (5.3)	3,239 (32.1)	7,689 (76.2)	10,087 (100)
	Night	209 (2.2)	1,500 (15.6)	6,310 (65.6)	9,616 (100)



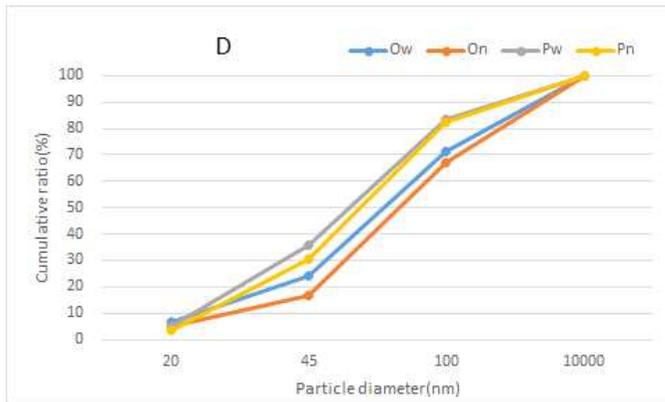
[그림 III-54] C 사업장 입경별 누적분포

(Ow:사무실-근무시간, On:사무실-야간, Pw:프린터공정-근무시간, Pn:프린터공정-야간)

C 사업장에서 100nm 이하의 나노입자 비율은 사무실 및 작업공정에서 55.8~76.2% 였으며, 근무 시간 중의 비율이 야간보다 높았다. 입자 수 농도는 작업장이 사무실보다 높게 평가되었다.

<표 III-32> D 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS)

Site		<20nm	<45nm	≤100nm	Total
		#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)
Office	Worktime	324 (6.5)	1,889 (37.9)	4,018 (80.6)	4,983 (100)
	Night	287 (5.2)	1,822 (32.9)	4,292 (77.6)	5,533 (100)
Process	Worktime	224 (5.0)	1,596 (35.9)	3,712 (83.5)	4,445 (100)
	Night	129 (3.6)	1,100 (30.6)	2,963 (82.5)	3,593 (100)



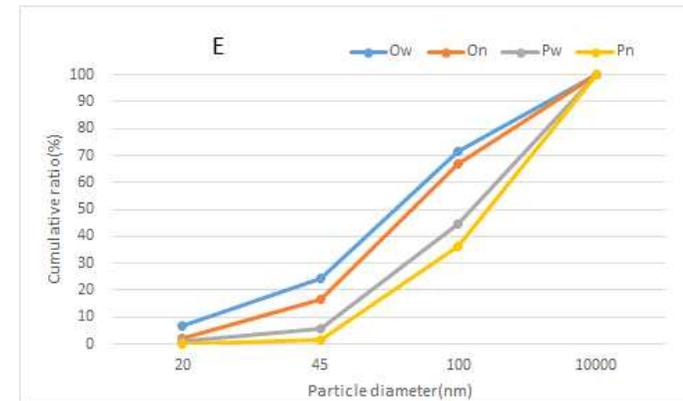
[그림 III-55] D 사업장 입경별 누적분포

(Ow:사무실-근무시간, On:사무실-야간, Pw:프린터공정-근무시간, Pn:프린터공정-야간)

D 사업장에서 100nm 이하의 나노입자 비율은 사무실 및 작업공정에서 77.6~83.5%로 다른 사업장에 비해서 높은 수준이었다. 입자 수 농도는 작업장보다 사무실이 높게 평가되었다.

<표 III-33> E 사업장의 입경별 누적분포 (SMPS+OPS)

Site		<20nm	<45nm	≤100nm	Total
		#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)	#/cm ³ (%)
Office	Worktime	213 (7.0)	693 (22.6)	1,669 (54.4)	3,066 (100)
	Night	126 (2.2)	610 (10.9)	1,982 (35.3)	5,622 (100)
Process	Worktime	88 (1.3)	418 (6.0)	3,138 (44.9)	6,993 (100)
	Night	20 (0.1)	297 (1.7)	6,326 (36.5)	17,307 (100)

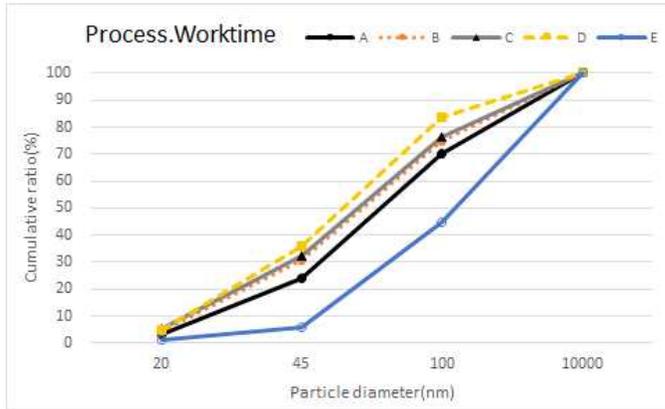


[그림 III-56] E 사업장 입경별 누적분포

(Ow:사무실-근무시간, On:사무실-야간, Pw:프린터공정-근무시간, Pn:프린터공정-야간)

E 사업장에서 100nm 이하의 나노입자 비율은 사무실 및 작업공정에서 35.3~54.4%로 다른 사업장에 비해서 낮은 수준이었으며, 근무시간 중의 비율이 야간보다 높았다. 입자 수 농도는 작업장이 사무실보다 높게 평가되었다.

근무시간 중 사업장별 입경분포는 아래 그림과 같았다. 4개 사업장은 비슷한 분포를 보였으나, E 사업장은 작은 입자의 분포비율이 다른 사업장에 비해서 낮은 것으로 나타났다.

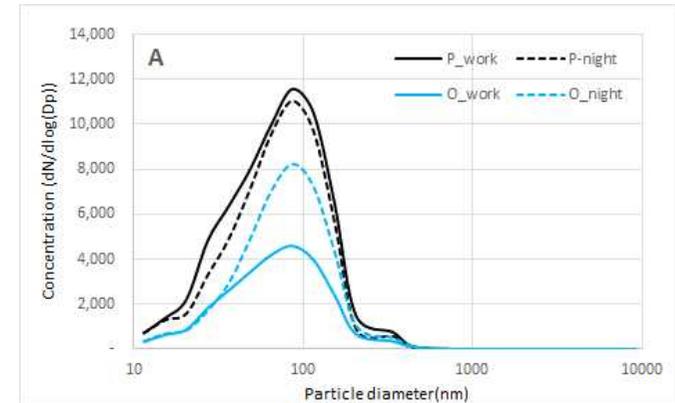


[그림 III-57] 사업장의 입경별 누적분포

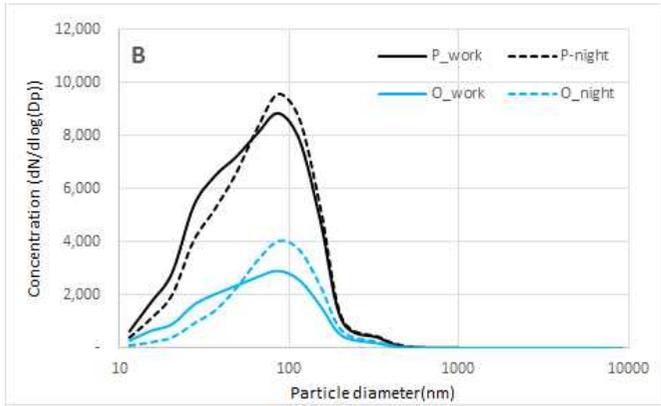
작업자가 나노입자에 노출될 수 있는 근무시간 중 작업장내의 나노입자의 입자 수 농도는 사업장별로 3,138~7,689 개/cm³로 평가되었다. 이는 유럽 국가들에서 사용하고 있는 나노물질 참조값 중 낮은 값인 20,000 개/cm³(비중 >6000 kg/m³)의 15.7~38.4% 수준이었다.

▪ 평균입경분포

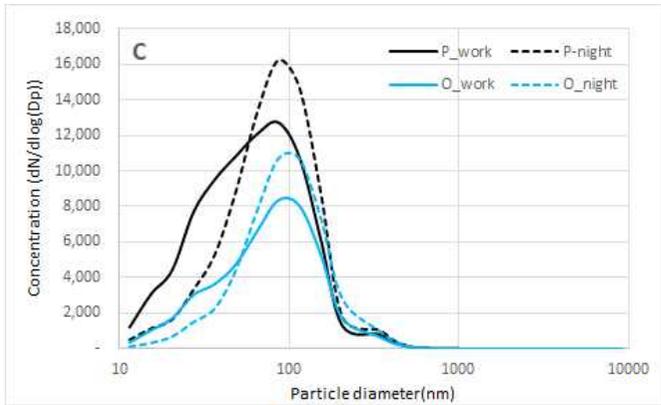
각 측정지점별 입경의 분포는 아래의 그림들과 같았다. 대부분 100 nm 미만에서 가장 높은 농도를 보였으며, E 사업장은 100 nm 보다 큰 입자에서 가장 높은 농도를 보였으며, 50 nm 미만에서도 다수 발생하여 두 번째 주요한 피크를 보였다.



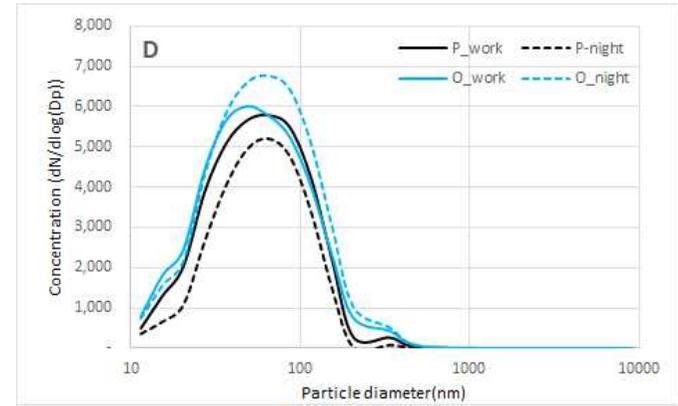
[그림 III-58] A 사업장의 입경분포



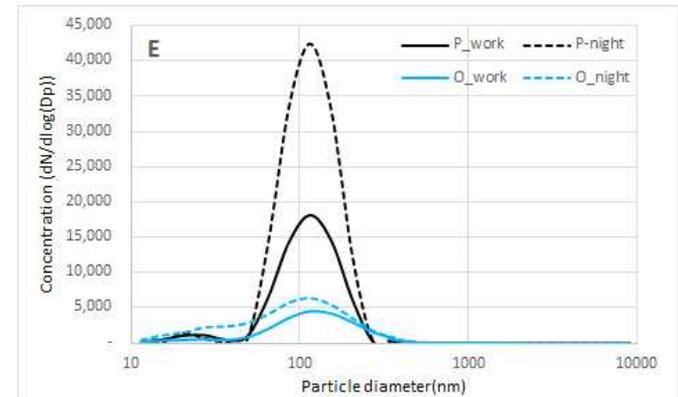
[그림 III-59] B 사업장의 입경분포



[그림 III-60] C 사업장의 입경분포



[그림 III-61] D 사업장의 입경분포

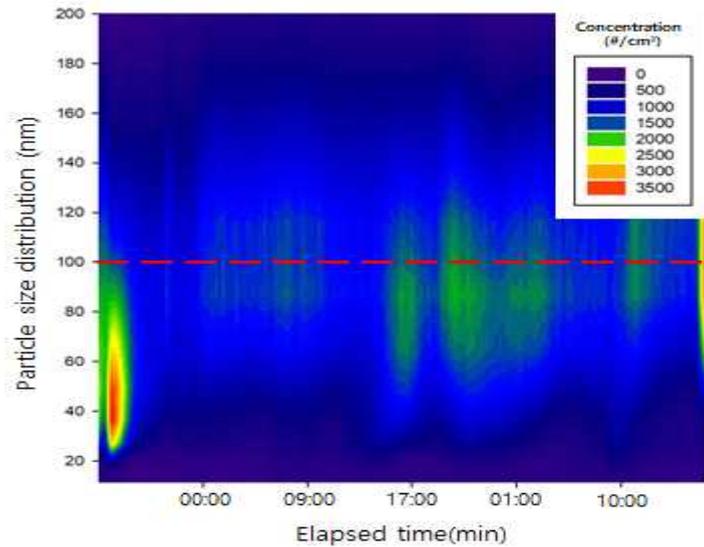


[그림 III-62] E 사업장의 입경분포

▪ 경과시간에 따른 입경분포

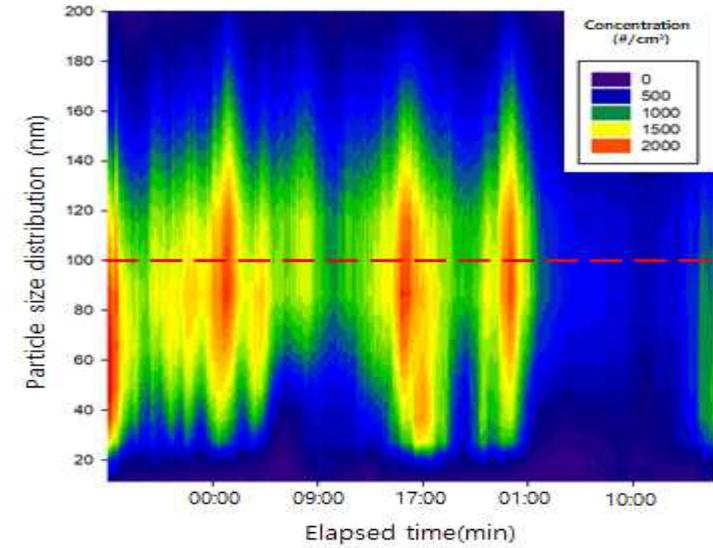
각 사업장의 공정내에서 SMPS로 측정된 데이터를 경과시간에 따른 입경별 분포를 분석하였다.

사업장 A의 경우, 장비 설치 직후 및 철수 직전에 가장 고농도의 분진이 발생하였으나, 입경별 분포에서 설치 직후에는 30~60 nm 입자가 높았으나, 철수 직전에는 80~140 nm 입자가 높았다. 측정 중에는 60~120 nm 에서 주로 농도가 높았다.



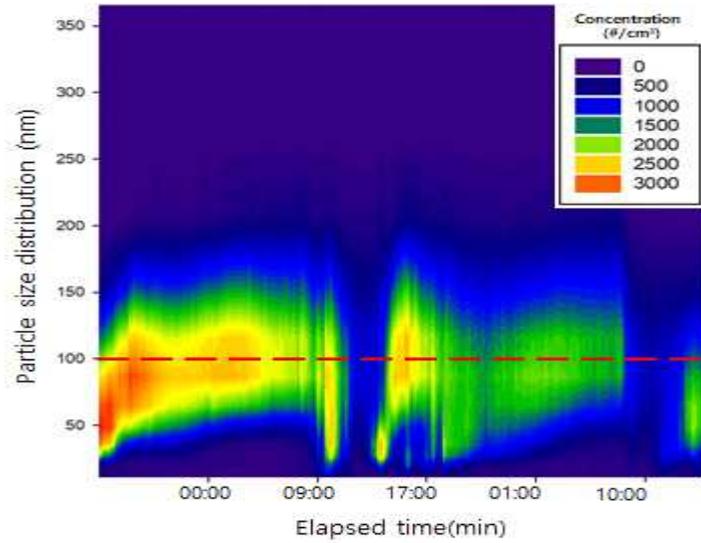
[그림 III-63] A 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS)

사업장 B 에서는 40~140nm 범위에서 높은 농도를 보였으며, 근무시간 중 및 야간에도 높은 농도의 분포를 보였으나, 입경의 분포는 비슷한 것으로 보인다.



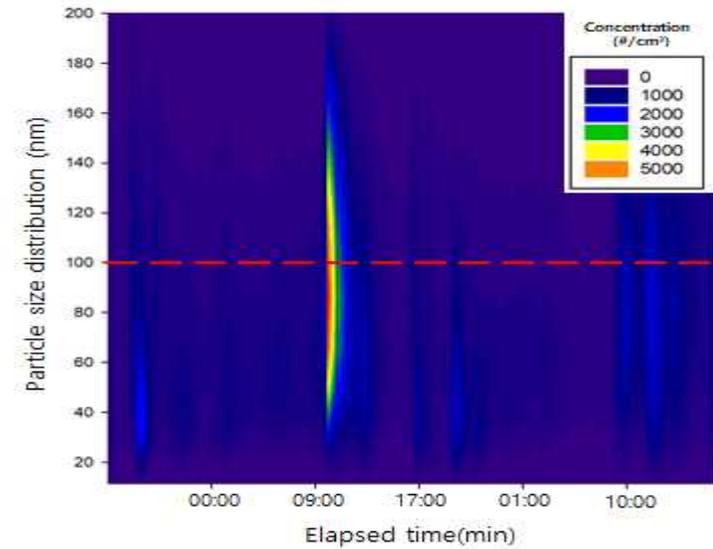
[그림 III-64] B 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS)

사업장 C에서는 근무시간 중 낮은 농도수준을 보인 시간대가 있으며, 평가첫날 오후에는 50 nm 주변의 입자가 주를 이루었다가, 점차 80~120 nm 입경의 입자가 증가하였다.



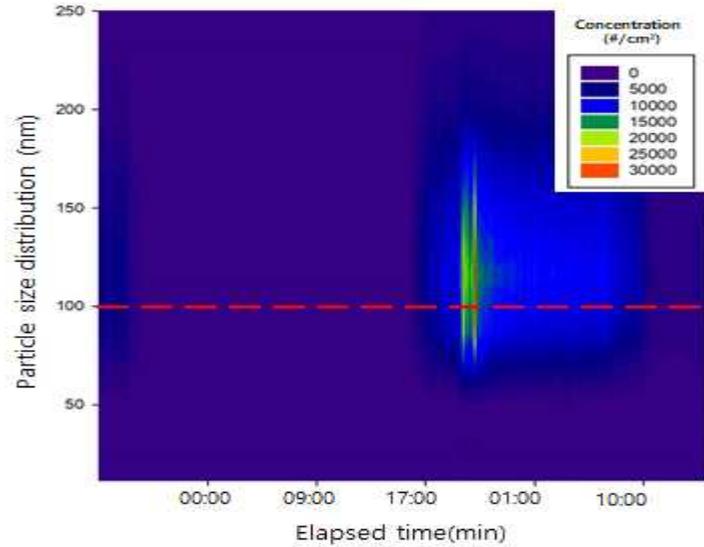
[그림 III-65] C 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS)

사업장 D에서는 전반적으로 낮은 농도수준을 유지하였으나, 평가 2일 차 10시 30분경 60~120 nm 크기의 입자가 급격히 증가하였다가 서서히 감소하였다. 실제 프린팅 작업장내에서 장비를 세팅하고, 시빙작업을 한 후 프린팅을 가동하기까지의 작업은 아침 8시~9시경에 이루어졌는데, 이때는 큰 농도변화가 없었다. 이후의 큰 농도변화는 작업자 출입시 열린문을 통해서 외부의 먼지가 일시적으로 들어왔거나, 기류형서에 의해서 재비산이 되었을 것으로 추정된다. 그 외의 상대적으로 고농도를 보인 입자의 크기는 시간대에 따라서 30~60 nm 또는 50~120 nm 였다.



[그림 III-66] D 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS)

사업장 E는 평가 2일차 근무시간 이후에 매우 높은 농도가 관찰되었으며, 이때 80~150nm 크기의 입자가 주를 이루었다. 이후 다음날 출근시간까지 농도가 점차 낮아졌다.



[그림 III-67] E 사업장 공정내 입경별 입자농도 변화 (SMPS)

▪ 측정장비별 입자 수 농도 비교

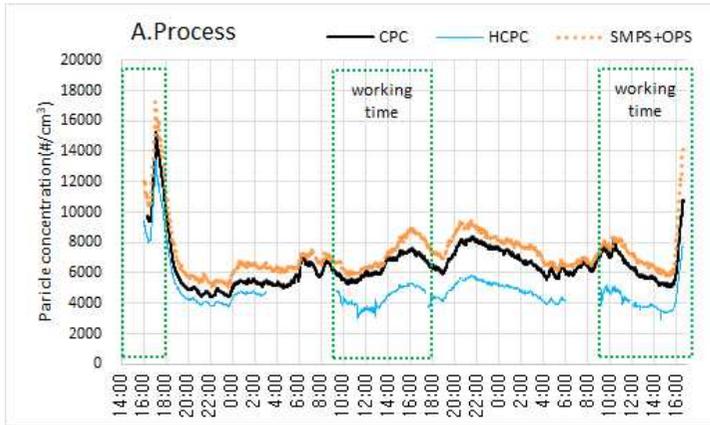
입자 수 농도 측정장비의 측정값을 비교하기 위하여, 공정내의 동일한 위치에서 시간의 경과에 따른 입자 수 농도의 변화를 살펴보았다.

5개 사업장의 3D 프린팅 공정내에서 측정한 3종의 장비(CPC, HCPC, SMPS+OPS)의 측정값의 패턴은 그림과 같이 유사하게 나타났다. 모든 측정지점에서 SMPS+OPS 측정값이 가장 높았고, CPC, HCPC의 순이었다. 이는 각 측정장비의 측정범위가 서로 다른 것이 원인이라 생각되며, SMPS+OPS의 측정범위는 가장 넓은 10-10,000 nm 이며, CPC는 4-3,000 nm, HCPC는 10-1,000 nm의 측정범위를 가진다.

다만, HCPC는 이동식장비로서 한 번에 공급할 수 있는 작동유체(이소프로필알콜)에 제한이 있어서 “워”에 적셔진 알콜이 마르게 되면 입자의 농도가 급격히 떨어지게 되며, 동 분석에서는 이러한 구간을 제외한 후 분석하였다.

아래의 그래프와 같이 5개 지점 모두에서 측정장비별 농도의 차이는 다소 있으나, 변화양상은 유사하였다.

측정장비간의 상관관계는 피어슨 상관분석을 통하여 살펴보았으며, 결과는 아래의 표와 같았다. 모두 유의한 상관관계가 있었으며, 상관계수가 0.9 이상으로 매우 높은 상관을 보였다. 다른 사업장의 측정장비간 관계에서도 모두 유의한 상관관계가 있었으며, 매우 높은 상관을 보였다.

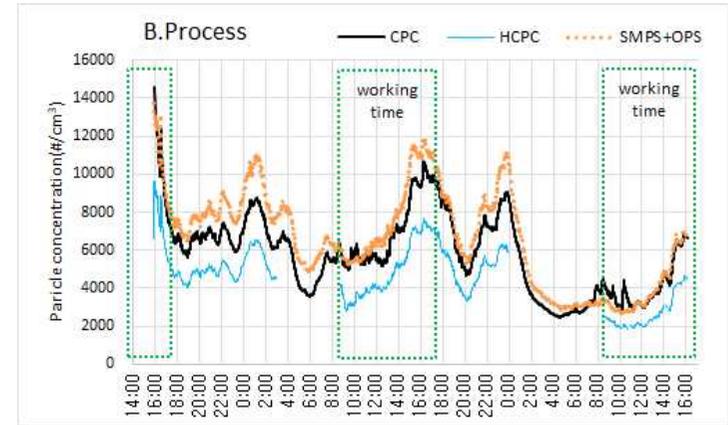


[그림 III-68] 입자 수 농도 측정장비 비교(A사업장 공정내)

<표 III-34> A 사업장 측정장비간의 상관관계

	CPC	HCPC	SMPS+OPS
CPC	1	0.911***	0.975***
HCPC		1	0.929***
SMPS+OPS			1

*** : p-value<0.001

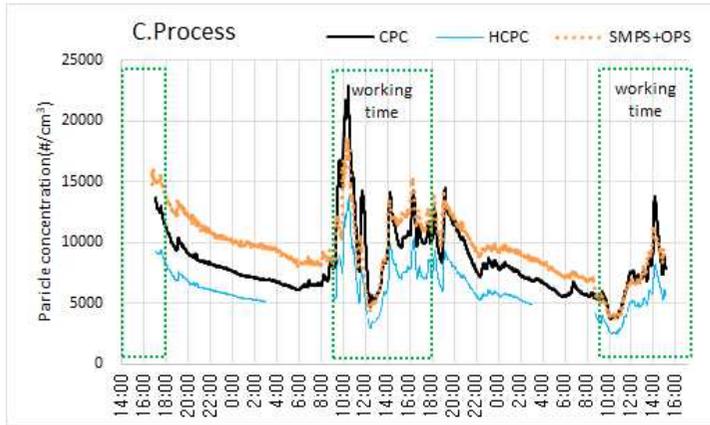


[그림 III-69] 입자 수 농도 측정장비 비교(B사업장 공정내)

<표 III-35> B 사업장 측정장비간의 상관관계

	CPC	HCPC	SMPS+OPS
CPC	1	0.989***	0.967***
HCPC		1	0.983***
SMPS+OPS			1

*** : p-value<0.001

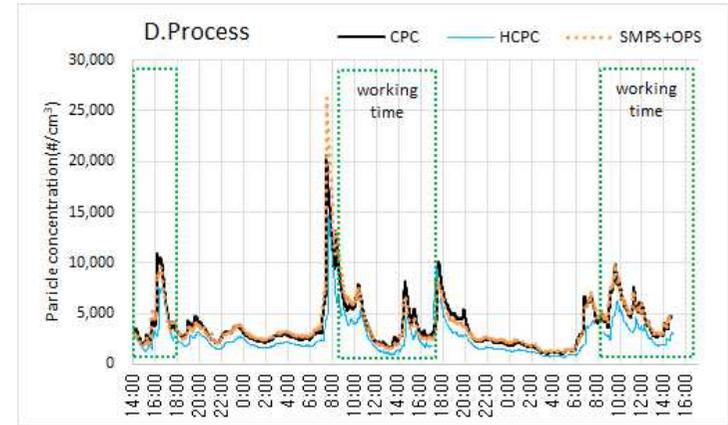


[그림 III-70] 입자 수 농도 측정장비 비교(C사업장 공정내)

<표 III-36> C 사업장 측정장비간의 상관관계

	CPC	HCPC	SMPS+OPS
CPC	1	0.953***	0.834***
HCPC		1	0.917***
SMPS+OPS			1

*** : p-value<0.001

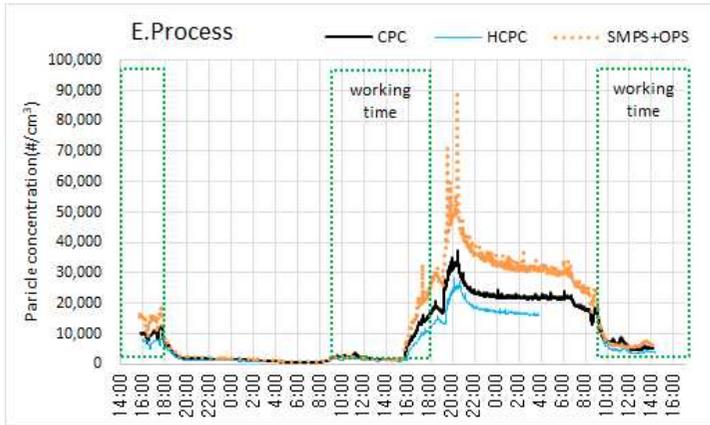


[그림 III-71] 입자 수 농도 측정장비 비교(D사업장 공정내)

<표 III-37> D 사업장 측정장비간의 상관관계

	CPC	HCPC	SMPS+OPS
CPC	1	0.854***	0.961***
HCPC		1	0.820***
SMPS+OPS			1

*** : p-value<0.001



[그림 III-72] 입자 수 농도 측정장비 비교(E사업장 공정내)

<표 III-38> E 사업장 측정장비간의 상관관계

	CPC	HCPC	SMPS+OPS
CPC	1	0.993***	0.992***
HCPC		1	0.987***
SMPS+OPS			1

*** : p-value<0.001

입자 수 농도 측정장비간의 농도는 아래의 표와 같았다. CPC의 농도를 기준으로 했을 때, HCPC의 농도는 69.4~78.7% 수준으로 낮게 평가되었으며, SMPS+OPS의 농도는 CPC 농도의 102.5~122.3% 수준으로 다소 높게 평가되었다.

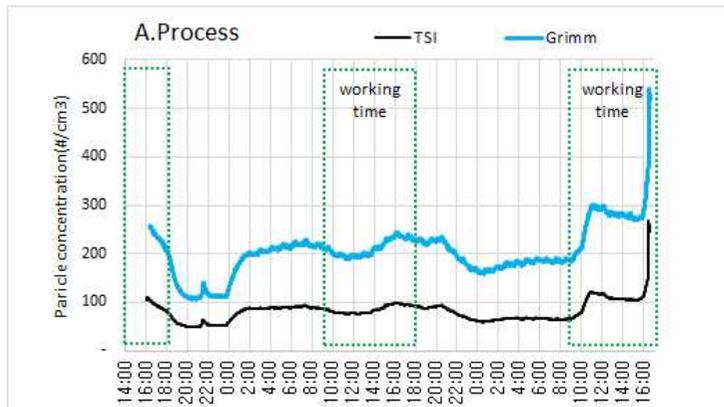
<표 III-39> 입자 수 측정장비간의 비교

Site	측정장비	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	H/C,S/C*
A	CPC	2,901	6,493	1,485	6,234	4,408	15,323	
	HCPC	2,314	4,850	1,465	4,595	2,963	13,476	0.737
	SMPS OPS	2,912	7,357	1,682	6,903	5,073	17,246	1.107
B	CPC	2,891	5,837	2,098	5,908	2,482	14,582	
	HCPC	2,012	4,609	1,526	4,652	1,853	9,646	0.787
	SMPS OPS	2,893	6,619	2,532	6,594	2,600	13,975	1.116
C	CPC	2,768	8,374	2,764	7,740	3,707	22,877	
	HCPC	2,056	6,275	1,801	5,927	2,470	13,729	0.766
	SMPS OPS	2,780	9,604	2,555	9,470	3,765	18,721	1.223
D	CPC	2,913	3,821	2,408	2,987	1,024	20,577	
	HCPC	2,866	2,593	1,716	2,074	696	14,742	0.694
	SMPS OPS	2,918	3,912	2,765	3,062	1,136	26,273	1.025
E	CPC	2,782	9,816	9,459	5,386	565	37,494	
	HCPC	2,016	7,396	7,287	4,078	757	28,387	0.757
	SMPS OPS	2,786	13,838	14,350	6,127	638	90,046	1.138
합계	CPC	14,255	6,828	5,074	6,018	565	37,494	
	HCPC	11,264	4,949	3,811	4,353	696	28,387	0.723
	SMPS OPS	14,289	8,205	7,472	6,687	638	90,046	1.111

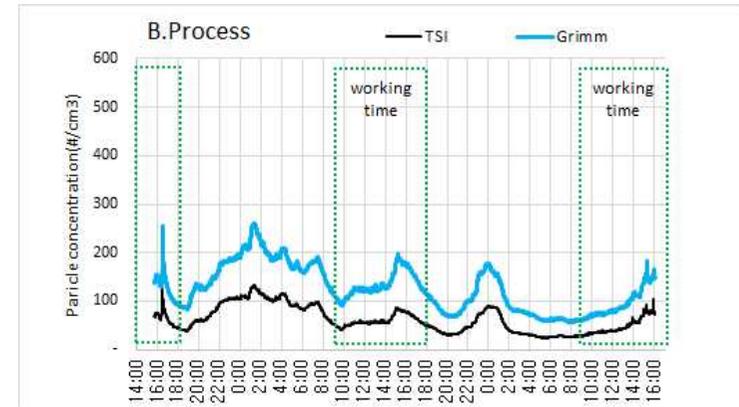
* H/C : HCPC 농도 / CPC 농도, S/C : SMPS+OPS 농도 / CPC 농도

▪ OPS 측정장비 비교

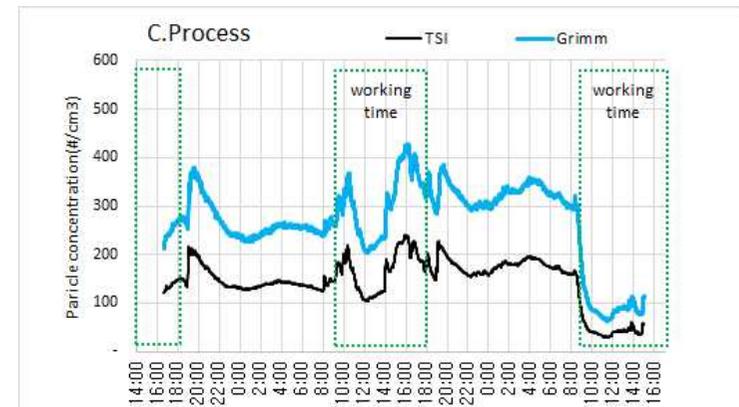
2개 회사(TSI, Grimm)에서 생산된 동일한 광산란방식에 의하여 입자상물질의 수 농도를 평가하는 OPS의 측정값을 비교해 보았다. 장비별 측정범위는 Grimm 장비(300-20,000 nm)가 TSI 장비(300-10,000 nm)보다 넓었는데, 10 um 이상의 큰 입자에 대한 측정가능 여부에 차이가 있었다. 측정지점별 각 장비의 농도수준 및 Grimm 장비를 기준으로 한 TSI 장비의 농도비율은 아래의 그림들과 같았다.



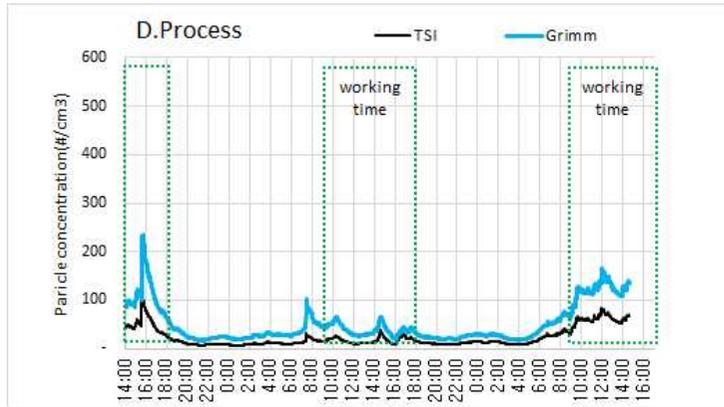
[그림 III-73] OPS 입자 수 농도 비교(A사업장 공정)



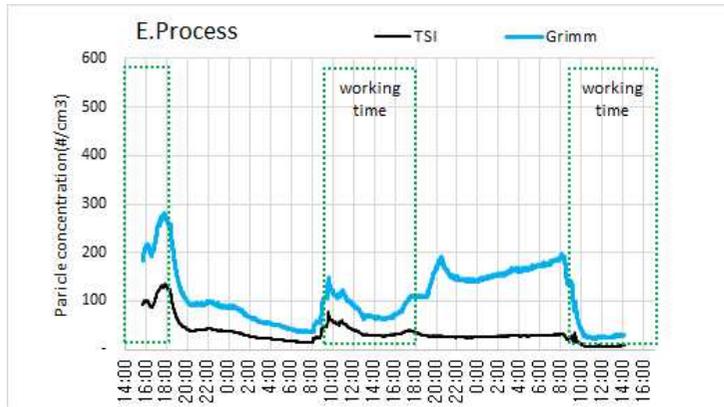
[그림 III-74] OPS 입자 수 농도 비교(B사업장 공정)



[그림 III-75] OPS 입자 수 농도 비교(C사업장 공정)



[그림 III-76] OPS 입자 수 농도 비교(D사업장 공정)



[그림 III-77] OPS 입자 수 농도 비교(E사업장 공정)

TSI 장비에서 측정된 값은 Grimm 장비에서 측정된 값의 평균 33.3~53.6% 였다. 이 비율들의 표준편차는 4개 지점에서는 7% 이하로 나타났으며, 1개 지점에서는 12.3%로 평가되어 일정한 비율을 보였다.

<표 III-40> OPS 장비별 입자 수 농도 측정값의 비교

	장비	n	산술평균 ± 표준편차 (#/cm³)	T/G ratio* (산술평균 ± 표준편차)(%)
A	TSI	2,913	81.6 ± 20.0	40.1 ± 3.1
	Grimm	2,898	204.2 ± 49.1	
B	TSI	2,904	62.0 ± 27.2	48.2 ± 4.7
	Grimm	2,903	125.9 ± 47.4	
C	TSI	2,782	145.8 ± 48.5	53.6 ± 3.7
	Grimm	2,783	268.3 ± 83.4	
D	TSI	2,918	22.9 ± 19.3	44.6 ± 6.7
	Grimm	2,919	49.9 ± 38.9	
E	TSI	2,793	34.2 ± 23.6	33.3 ± 12.3
	Grimm	2,788	109.6 ± 58.0	
합계	TSI	14,310	68.9 ± 52.3	44.0 ± 9.7
	Grimm	14,291	150.8 ± 95.2	

*T/G ratio = TSI ops 입자 수 농도 / Grimm ops 입자 수 농도

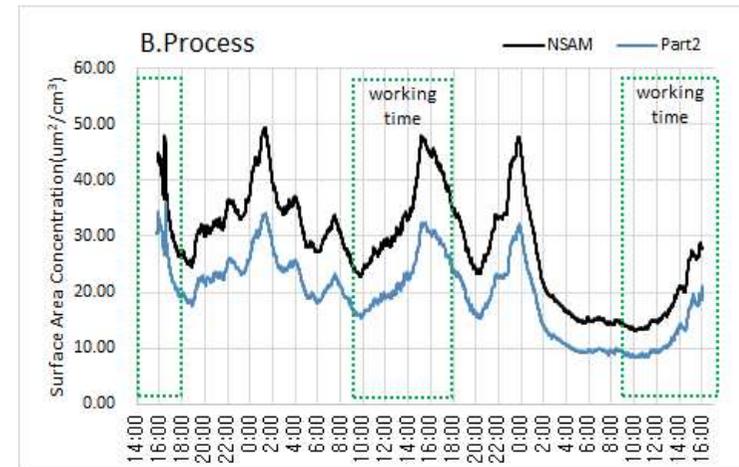
두 장비간의 이러한 차이는 측정범위의 차이로 설명하기는 어려워 보인다. 측정범위의 차이는 10-20 um의 입자를 측정할 수 있으나 없느냐인데, 실제 장비에서 해당구간에 측정된 값은 매우 작았다. 그러므로 농도값이 약 2-3배 일정하게 차이가 발생하는 것은 측정기의 검출 성능 자체의 문제이거나, 검출

된 값을 계산하는 로직의 차이에서 발생할 것으로 생각된다. 원인에 대해서는 세부적인 조사가 필요해 보인다.

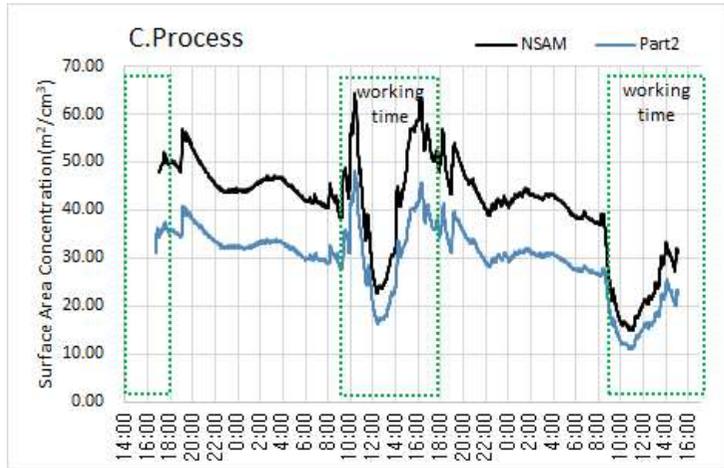
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

▪ 측정장비별 폐침착 표면적 농도 비교

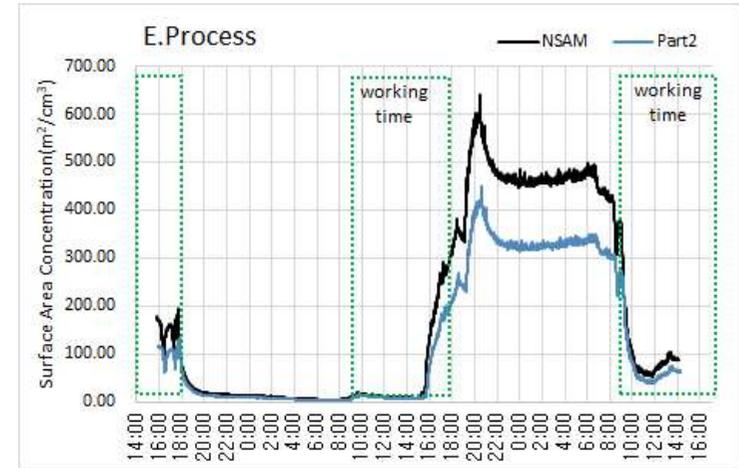
폐침착 표면적 농도를 측정하는 NSAM 과 Partector2 장비간의 측정결과는 아래의 그림과 같이 패턴이 유사한 것으로 평가되었다. 3개 측정지점(B, C, E 사업장)에서는 NSAM 장비의 측정값이 높았다. NSAM의 측정범위(입경 10-1,000 nm)가 Partector2 의 측정범위(10-300 nm)보다 넓기 때문에 대부분의 NSAM 측정값이 Partector2 측정값에 비해서 높게 나타난 것으로 판단된다. 그러나, 1개 측정지점(D 사업장)에서는 NSAM 측정값이 낮게 평가된 구간이 있었다. D 사업장의 측정시 장비의 환경설정에서 기관지 침착 표면적 농도로 측정된 구간이 일부 발견되어, 이 구간에서의 값은 비교가 어렵다.



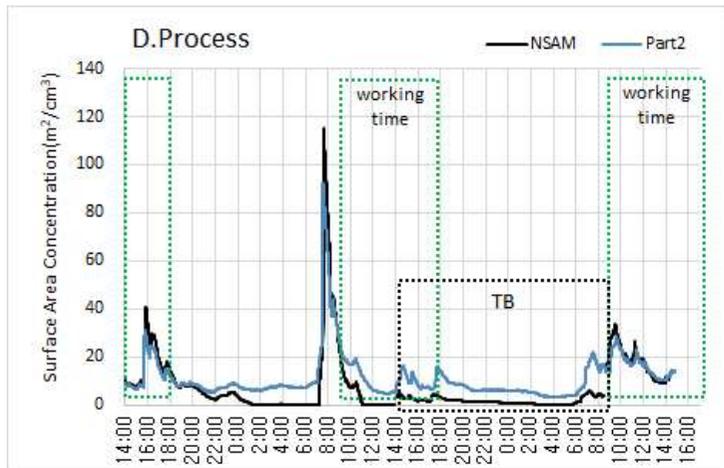
[그림 III-78] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(B사업장 공정)



[그림 III-79] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(C사업장 공정)



[그림 III-81] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(E사업장 공정)



[그림 III-80] 폐침착 표면적 농도 측정장비 비교(D사업장 공정)
(TB : NSAM 측정장비에서 기관지 침착 표면적 농도로 평가된 값)

폐침착 표면적을 평가하는 2개 장비의 농도를 비교해 보면 아래의 표와 같았다. 피어슨 상관분석에서 유의한 상관관계가 있었으며, 상관계수가 0.99 이상인 강한 상관성을 나타냈다. D 사업장의 경우 장비설정 오류가 있었던 것으로 판단되며, 다른 측정지점에 비해서 상관계수가 작았다(0.917).

평균 중위수 값을 기준으로, D를 제외한 3개 사업장의 측정값에서, NSAM 측정값은 Partector2 측정값보다 약 1.39~1.46배 높았다.

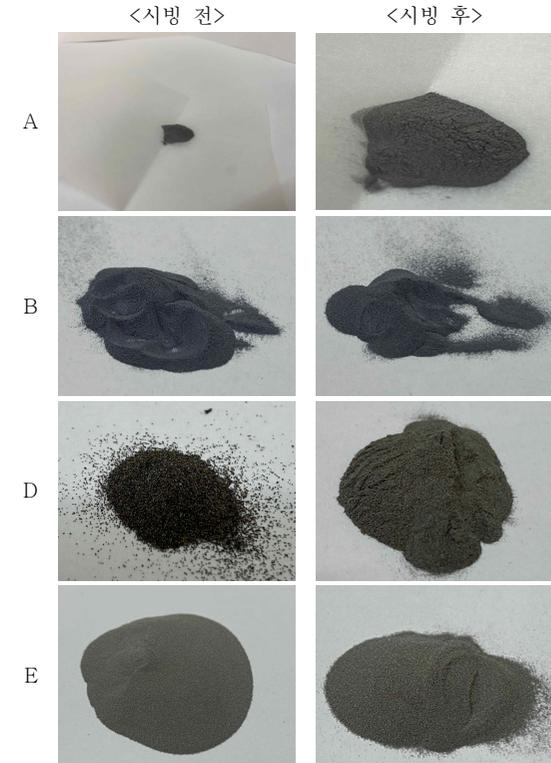
<표 III-41> 폐침착 표면적 측정장비의 농도값 비교 (단위 : $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$)

Site	n	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값	상관계수 (p-value*)
A	NSAM	2,334	26.31	13.80	31.78	0.00	77.33
	Part	-	-	-	-	-	-
B	NSAM	2,890	28.49	9.44	28.70	13.09	49.37
	Part	2,900	19.47	6.84	19.68	8.28	35.94
							(p<0.001)
C	NSAM	2,766	41.34	9.99	43.10	14.88	64.43
	Part	2,786	29.98	7.08	31.08	11.15	48.35
							(p<0.001)
D	NSAM	2,898	7.36	12.70	2.57	0.00	115.05
	Part	2,928	11.33	9.61	8.08	3.21	92.24
							(p<0.001)
E	NSAM	2,784	183.68	201.89	68.68	4.34	640.65
	Part	2,784	129.46	142.10	49.22	3.24	449.11
							(p<0.001)
합계	NSAM	12,569	62.8	115.7	31.4	0.0	640.7
	Part	11,398	46.8	85.0	19.8	3.2	449.1
							(p<0.001)

*p-value : 피어슨 상관분석, 결측값 제외

3) 입자의 성분분석

▪ 금속분말소재 분석

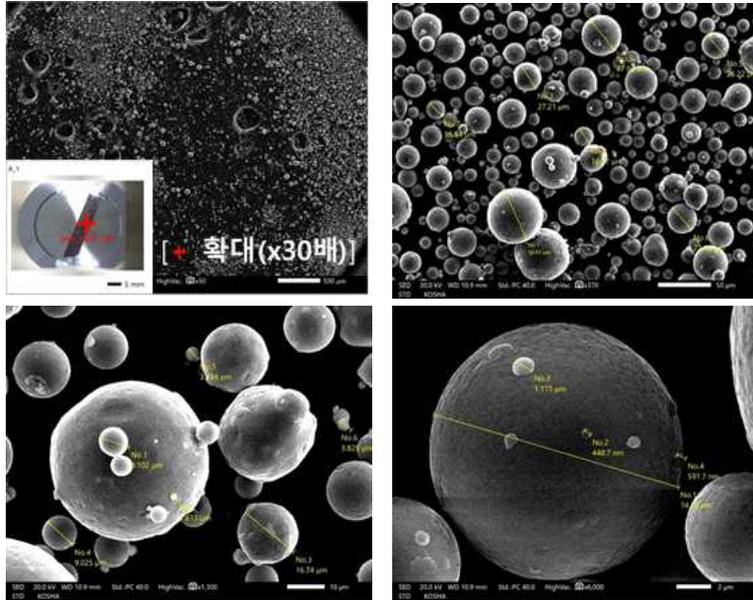


*사업장 C는 분말 소재를 사용하지 않음

[그림 III-82] 금속분말재료 이미지

육안으로 4개소의 사업장의 시빙 전·후 재료의 모양은 큰 차이가 없었다. 하지만 사업장 D의 경우, 시빙 전은 육안으로 거칠게 보였으나, 시빙 후에는 매끄럽게 보였다.

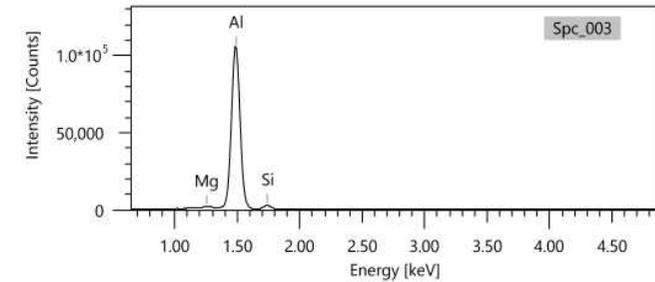
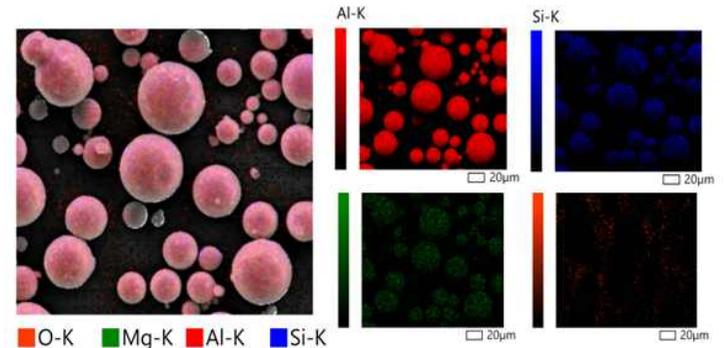
사업장 A의 시빙 전 소재를 주사전자현미경(SEM)으로 분석한 결과는 아래의 그림과 같았다.



[그림 III-83] A 사업장의 금속분말 시빙 전 재료 이미지

대부분 입자의 형태는 구형이었으며, 10~50 µm의 입자가 가장 많았으나, 일부 1 µm 보다 작은 입자도 관찰 되었다.

시빙 전 소재를 주사전자현미경에 장착된 에너지분산분광분석기(EDS)로 분석한 결과는 아래의 그림과 같았다.

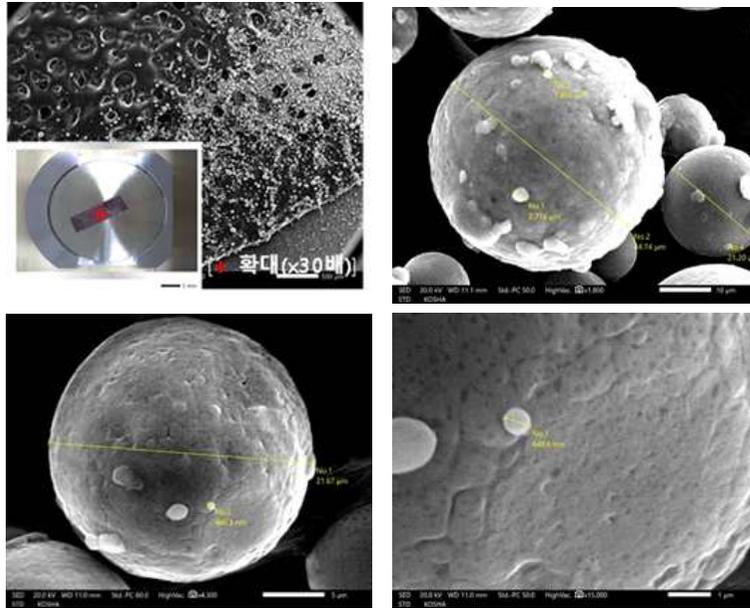


Display name	Standard data	Quantification method	Result Type
Spc_003	Standardless	ZAF	Metal
Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	1.55±0.06	2.59±0.10
Mg	K	0.55±0.02	0.61±0.02
Al	K	91.01±0.21	90.24±0.21
Si	K	6.89±0.10	6.56±0.10
Total		100.00	100.00
Spc_003			Fitting ratio 0.0164

[그림 III-84] A 사업장의 금속분말(시빙 전) 구성성분

입자에서 알루미늄의 중량비가 91%였고, 규소(6.89%), 마그네슘(0.55%) 순으로 분석되었다. 이는 사업장에서 제출한 물질안전보건자료의 구성성분 및 함유율과 유사한 값이었다.

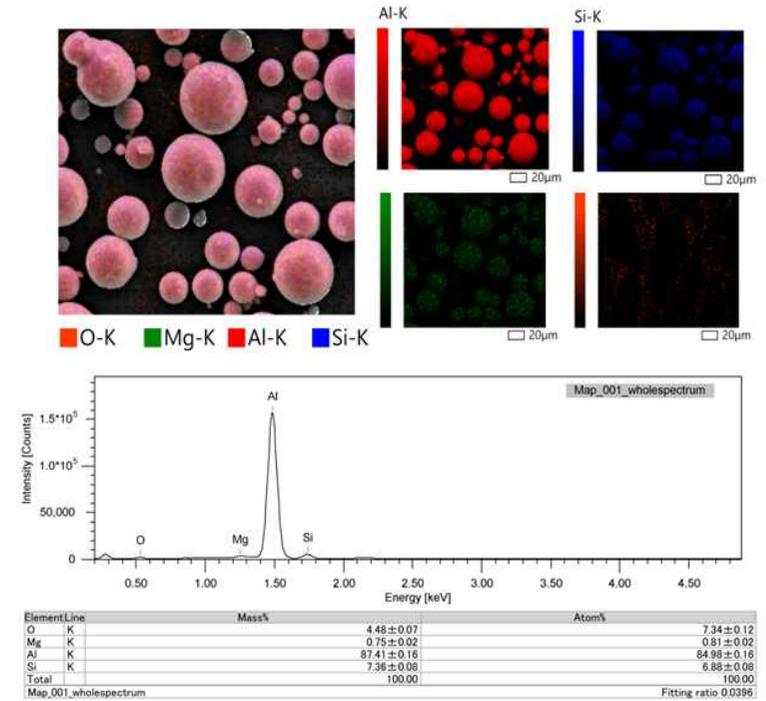
사업장 A의 시빙 후의 금속분말소재의 주사전자현미경 분석결과와는 아래와 같았다.



[그림 III-85] A 사업장의 금속분말 시빙 후 재료의 이미지

시빙 전 재료와 유사하게 큰 입자와 작은 입자가 있었으며, 작은 입자들은 주로 큰 입자에 붙어 있었다.

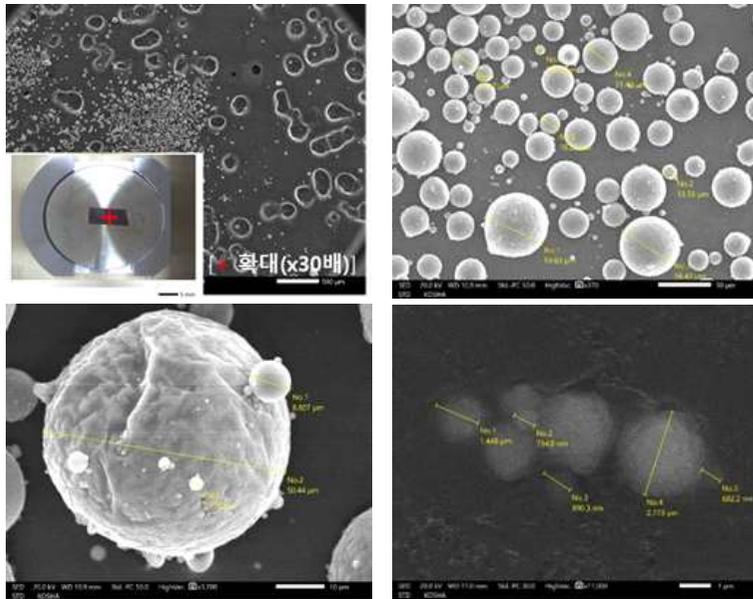
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



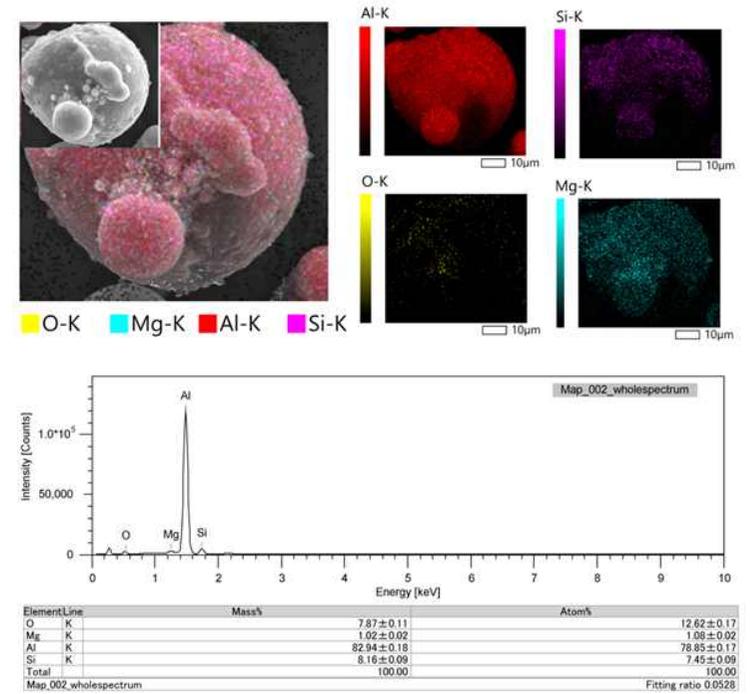
[그림 III-86] A 사업장의 금속분말(시빙 후) 구성성분

시빙 후 금속분말의 구성성분은 시빙 전과 변화가 없었다.

B 사업장에서 사용하는 금속분말은 아래와 같았다. A 사업장과 유사한 분말을 사용하고 있었으며, 구성성분 분석에서 비슷한 분포를 보였다.

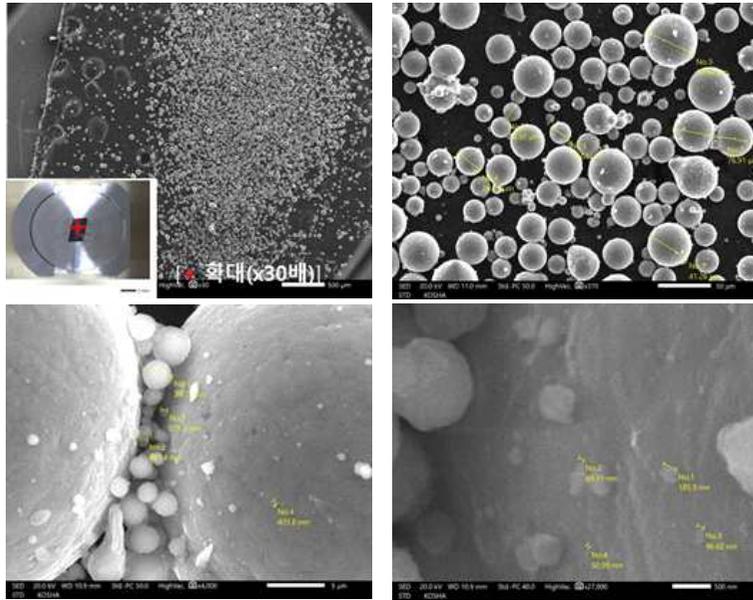


[그림 III-87] B 사업장의 금속분말 시빙 전 재료의 이미지



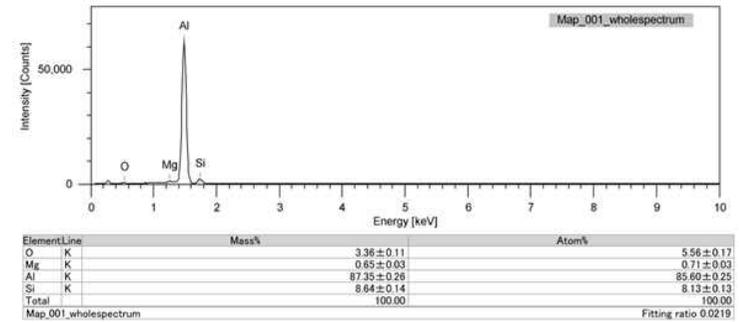
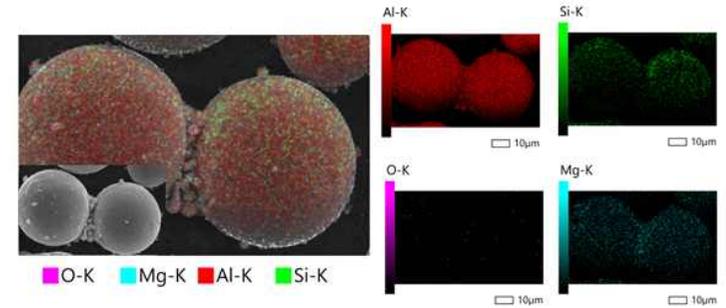
[그림 III-88] B 사업장의 금속분말(시빙 전) 구성성분

B 사업장의 시빙 후의 금속분말은 아래의 그림과 같았다.



[그림 III-89] B 사업장의 금속분말 시빙 후 재료의 이미지

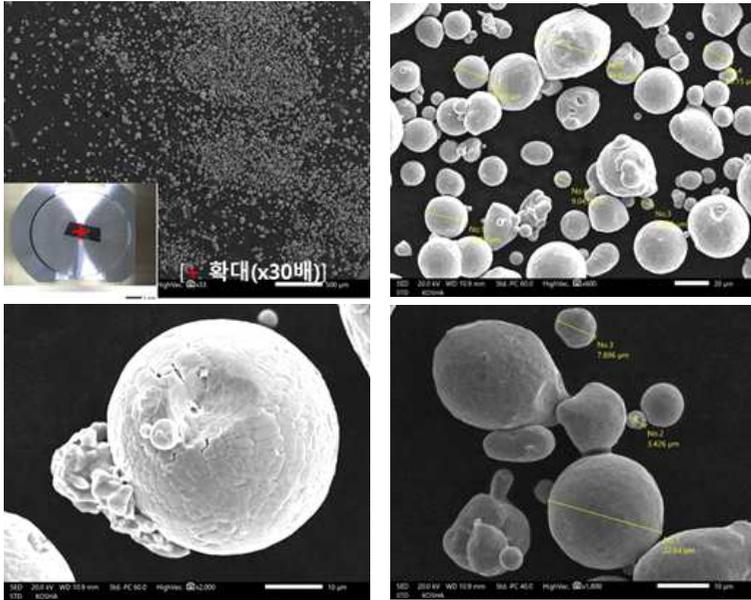
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-90] B 사업장의 금속분말(시빙 후) 구성성분

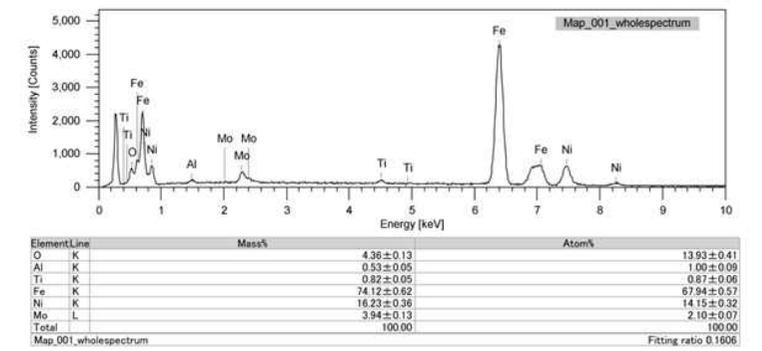
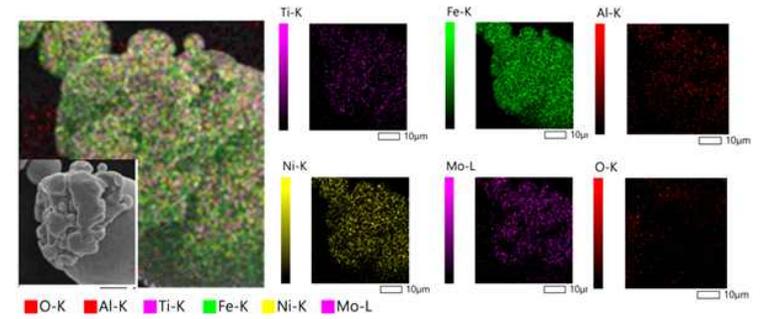
사업장 C의 소재는 금속분말이 아니었기 때문에 주사전자현미경 및 에너지분산광분석기에 의한 분석은 이루어지지 않았다.

사업장 D의 금속분말의 주사전자현미경 분석결과는 아래와 같았다.
 시빙 전의 소재에서 구의 형태에서 찌그러진 모양이 관찰되었으며, 큰 입자와 작은입자가 각각 또는 붙어있는 것을 관찰할 수 있었다.



[그림 III-91] D 사업장의 금속분말 시빙 전 재료의 이미지

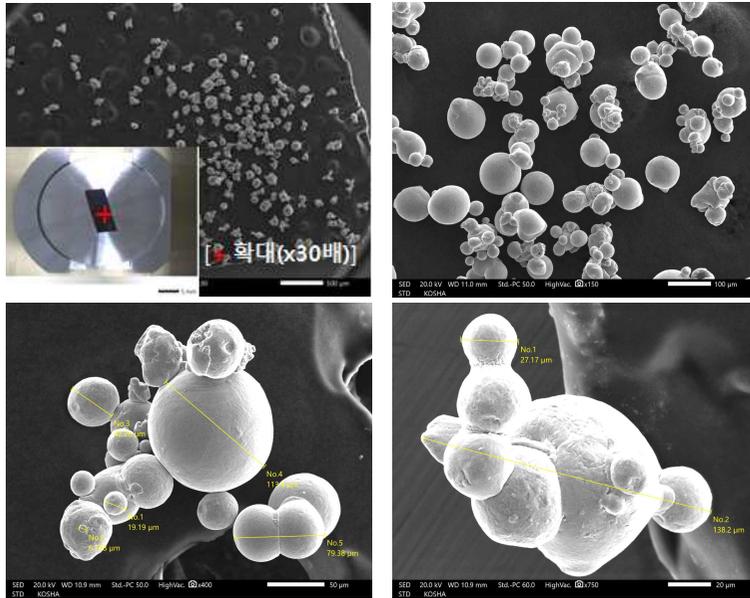
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-92] D 사업장의 금속분말(시빙 전) 구성성분

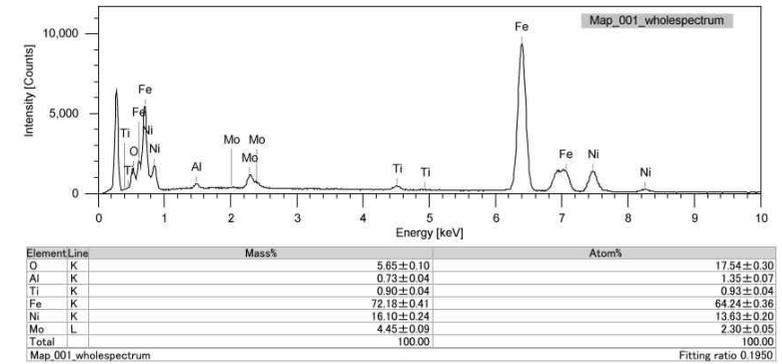
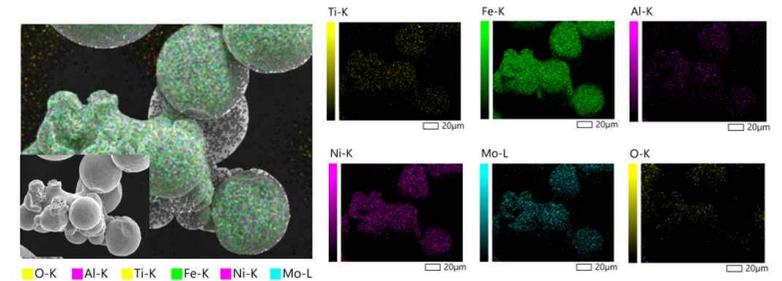
파악된 물질안전보건자료의 구성성분과 유사하였으나, 코발트는 분석에서는 발견되지 않았으나 물질안전보건자료에서는 약 10% 있는 것으로 표기되어 있었다.

사업장 D의 시빙 후 금속분말소재의 주사전자현미경 분석결과는 아래와 같았다.



[그림 III-93] D 사업장의 금속분말 시빙 후 재료의 이미지

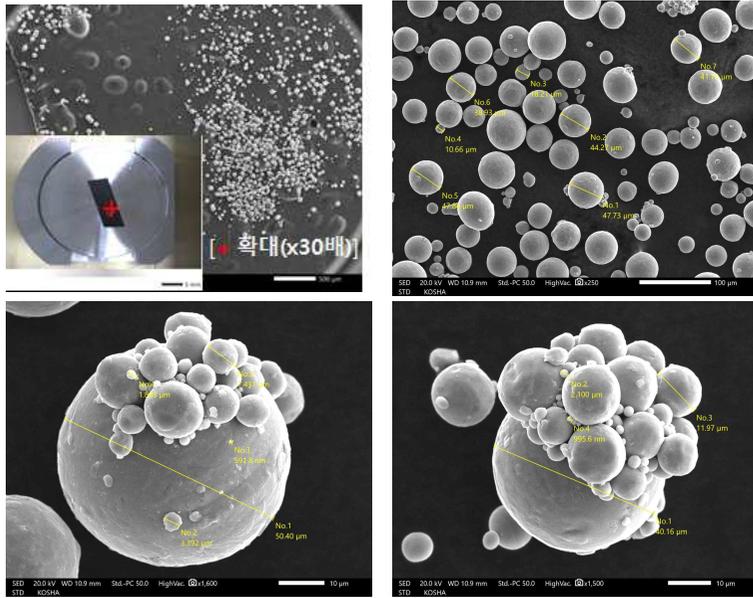
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-94] D 사업장의 금속분말(시빙 후) 구성성분

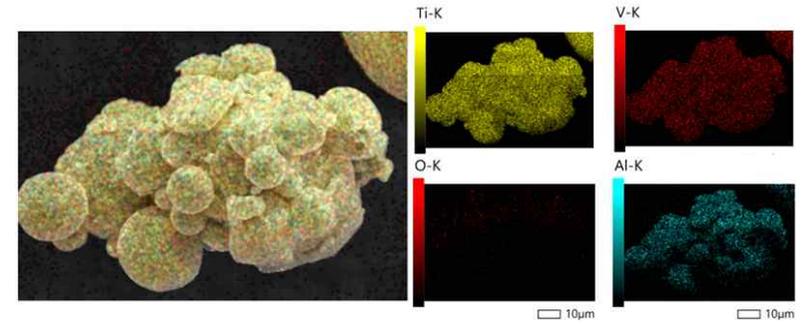
시빙 전의 구성성분과 유사하였다.

사업장 E의 시빙 후 금속분말소재의 주사전자현미경 분석결과는 아래와 같았다. E 사업장은 여러 종류의 소재를 사용하는데, 그 중 평가 당일 M200 기기에서 사용하던 소재는 티타늄이었으며, 이 소재를 분석한 결과이다.

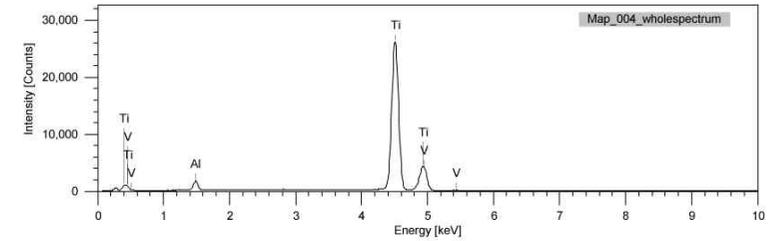


[그림 III-95] E 사업장의 금속분말 시빙 전 재료의 이미지

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



■ O-K ■ Al-K ■ Ti-K ■ V-K



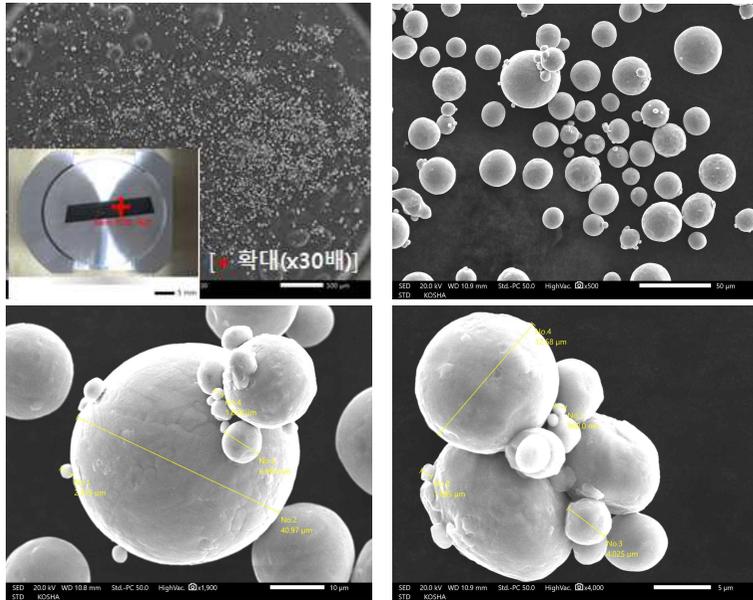
Element	Line	Mass%	Atom%
Al	K	2.56 ± 0.05	4.47 ± 0.09
Ti	K	93.24 ± 0.33	91.65 ± 0.33
V	K	4.20 ± 0.09	3.88 ± 0.08
Total		100.00	100.00

Map_004.wholespectrum Fitting ratio 0.0106

[그림 III-96] E 사업장의 금속분말 시빙 전 재료의 구성성분

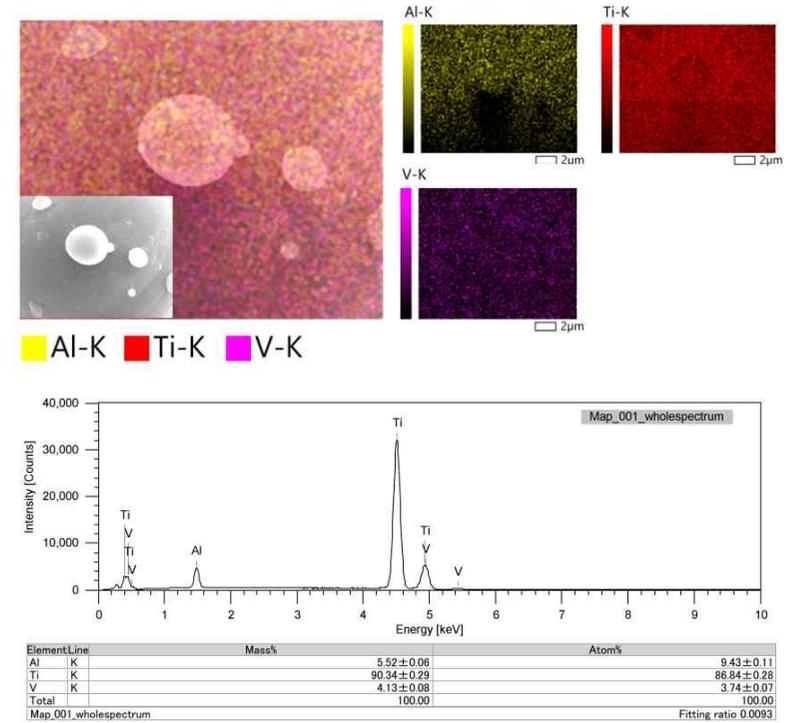
주요 구성성분은 티타늄, 알루미늄, 바나듐이었다.

E 사업장 소재의 시빙 후 금속분말소재는 아래와 같았다.



[그림 III-97] E 사업장의 금속분말 시빙 후 재료의 이미지

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-98] E 사업장의 금속분말 시빙 후 재료의 구성성분

▪ 공기 중 시료 채취후 분석결과

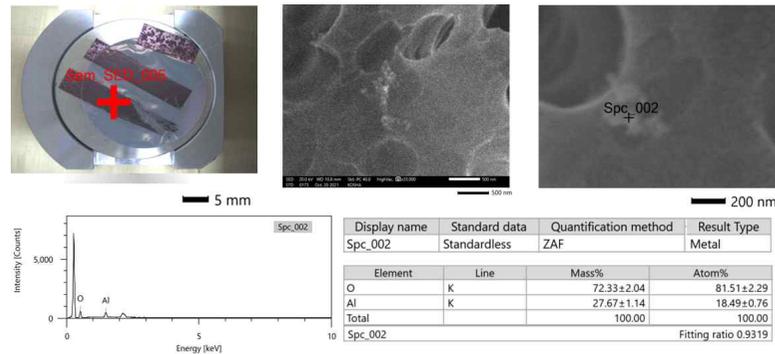
작업환경 또는 비교대상이 되는 사무실 등의 공기 중에서 여과채취로 채취한 분진의 성분을 전자현미경(주사 및 투과전자현미경)으로 분석하였다.

사업장 A 에서는 5개의 시료를 채취하였으며, 채취지점과 시간은 아래와 같다.

<표 III-42> 사업장 A의 시료채취지점 및 시간

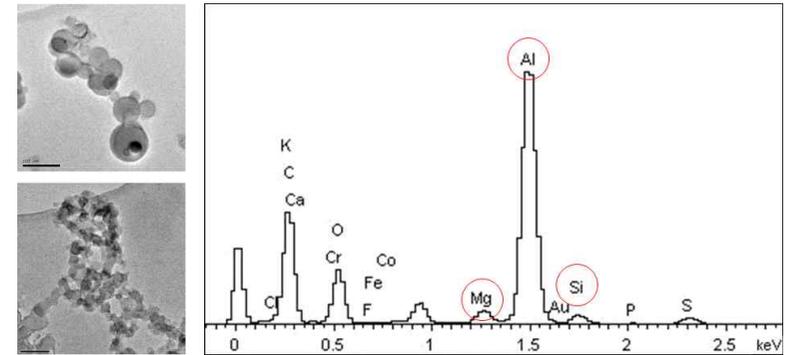
No.	측정지점/작업	채취시간(min)
1	프린터 1호기 앞	12.5
2	전실_신발장	27
3	장입작업 중	10
4	시빙_소재투입	4
5	시빙기 가동 중	12

<1호기 앞>



[그림 III-99] 공기 중 시료(1호기 앞) SEM 분석결과

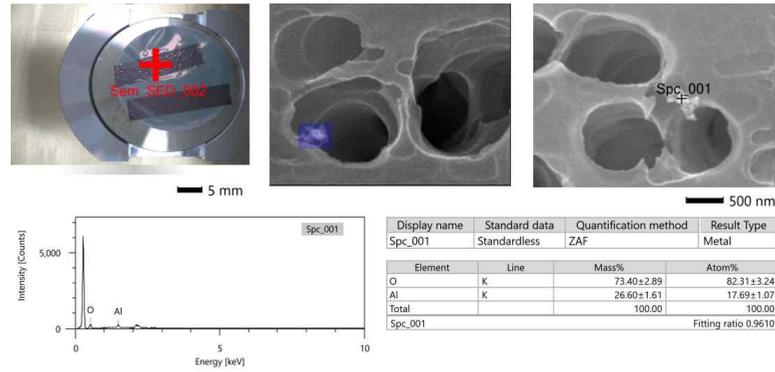
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



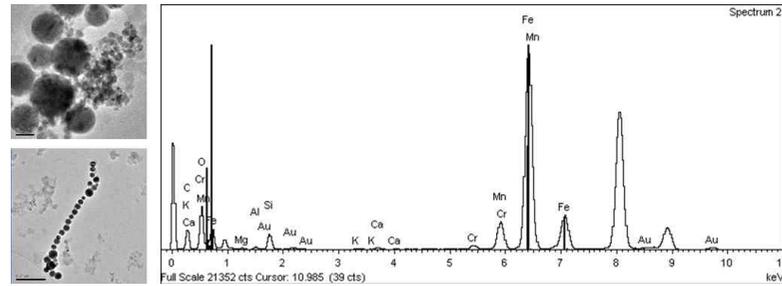
[그림 III-100] 공기 중 시료(1호기 앞) TEM 분석결과

폴리카보네이트(PC) 필터로 채취하여 주사전자현미경으로 분석한 시료에서는, 관찰되는 입자가 거의 없었다. 채취된 입자 중 대표적인 입자는 알루미늄과 산소의 구성성분을 보였다. 그리드(구리)에 포집된 시료를 투과전자현미경으로 관찰한 결과 소재의 주요구성성분과 동일한 성분의 입자들이 100nm 이하의 크기로 관찰되었다.

<전실_신발장>



[그림 III-101] 공기 중 시료(전실_신발장) SEM 분석결과

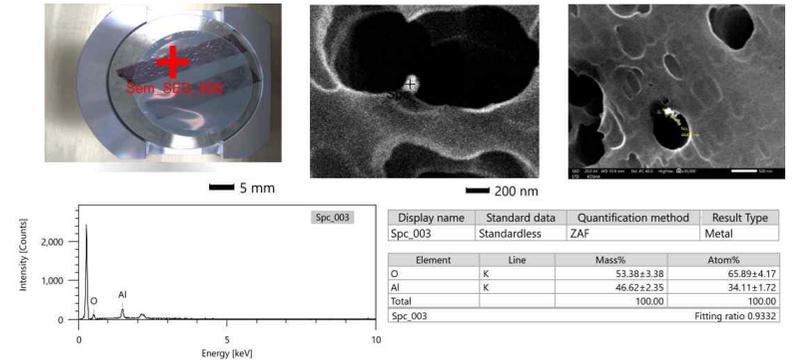


[그림 III-102] 공기 중 시료(전실_신발장) TEM 분석결과

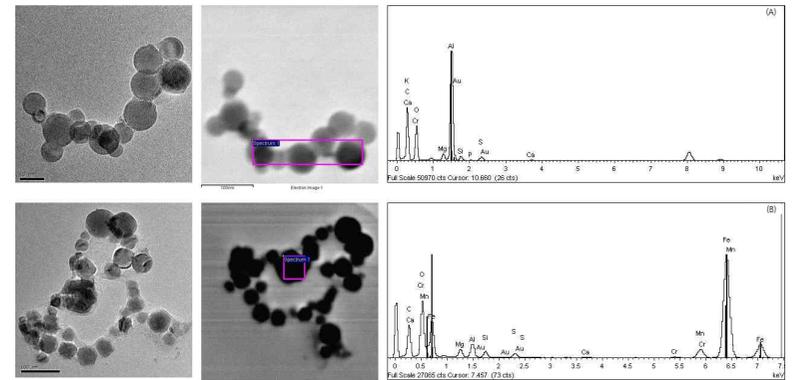
주사전자현미경으로 분석한 시료에서, 관찰되는 입자는 거의 없었으며, 채취된 입자 중 대표적인 입자는 알루미늄과 산소의 구성성분을 보였다. 그러나, 투과전자현미경으로 분석한 결과 관찰된 다수의 입자의 주요 성분은 철과 망간 등으로 소재성분과는 차이가 있었다.

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

<장입작업 중>



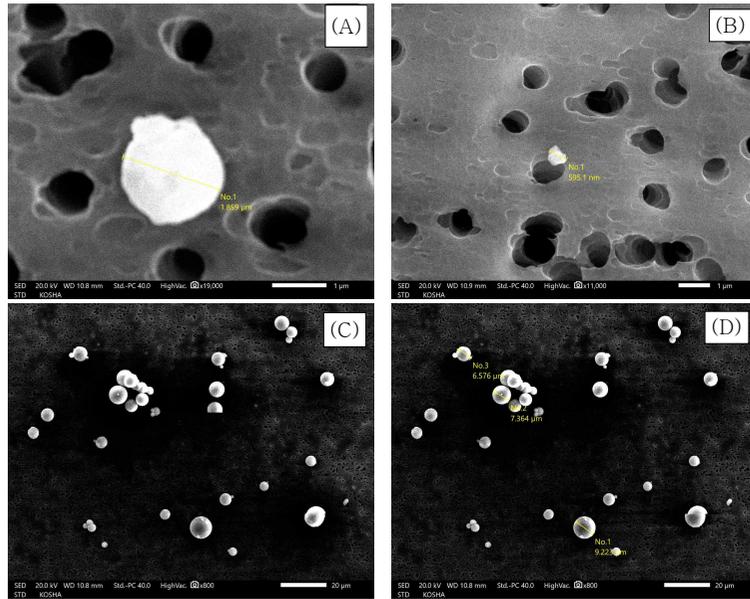
[그림 III-103] 공기 중 시료(장입작업 중) SEM 분석결과



[그림 III-104] 공기 중 시료(장입작업 중) TEM 분석결과

장입작업 중에 채취된 시료에서, 주사전자현미경 관찰에서 알루미늄과 산소가 분석되었으며, 투과전자현미경에서는 입자에 따라서 일부는 알루미늄, 실리카, 마그네슘이 위주였고, 일부는 철과 망간이 위주였다.

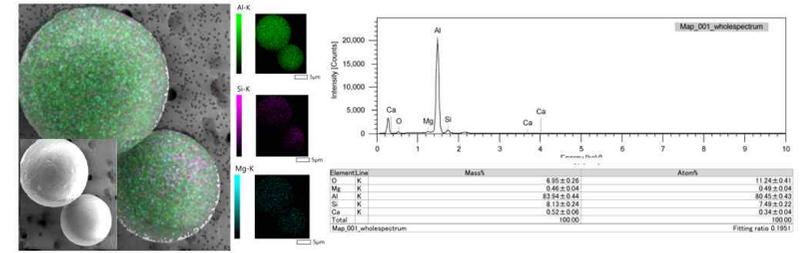
<시빙_소재투입>



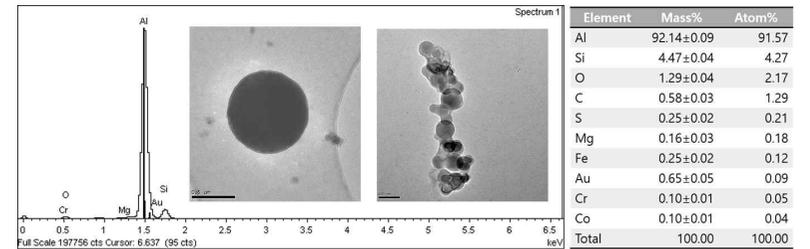
[그림 III-105] 공기 중 시료(시빙_소재투입) SEM 분석결과

시빙을 위하여 재사용을 위한 소재를 시빙용 용기(Bin)에 투입하는 작업에서는 두 가지 종류의 입자가 관찰되었다. 1 μm 이하의 작은 입자((A)와 (B))와 10 μm 정도의 다소 큰 입자((C)와 (D))가 관찰되었다. 1 μm 이하의 작은 입자의 성분에서 소재의 주성분인 알루미늄이 검출되지 않았고, 10 μm 정도의 큰 입자의 대부분의 성분은 알루미늄으로 확인되었다. 이는 시빙된 소재를 투입하는 작업에서 10 μm 정도의 입자에 노출 될 수 있음을 시사한다.

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

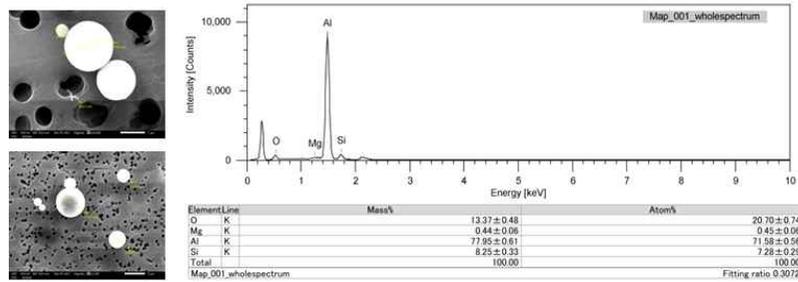


[그림 III-106] 공기 중 시료(시빙_소재투입) SEM-EDS 분석결과

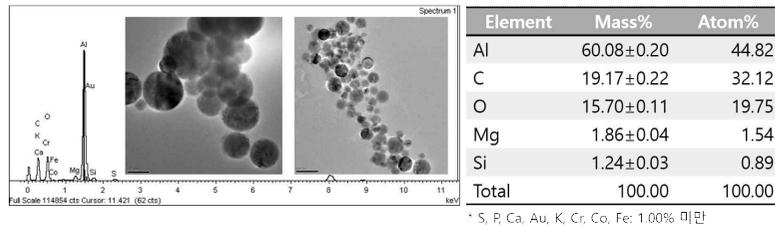


[그림 III-107] 공기 중 시료(시빙_소재투입) TEM 분석결과(1)

<시빙기 가동 중>



[그림 III-108] 공기 중 시료(시빙기 가동 중) SEM 분석결과



* S, P, Ca, Au, K, Cr, Co, Fe: 1.00% 미만

[그림 III-109] 공기 중 시료(시빙기 가동 중) TEM 분석결과

재활용을 위한 소재를 용기에 넣고 시빙기를 체결한 후, 내부의 산소가 1% 미만이 되도록 한 후, 시빙기를 가동하며, 시빙기는 약 1시간동안 지속된다. 시빙기가 가동 중인 시간에 시료를 채취하였다. 주사전자현미경에서 구형의 입자들이 발견되었으며, 구성성분은 소재와 유사하였다. 투과전자현미경용 시료에서도 구형의 크고 작은 입자가 보였으며, 구성성분은 소재와 유사하였다.

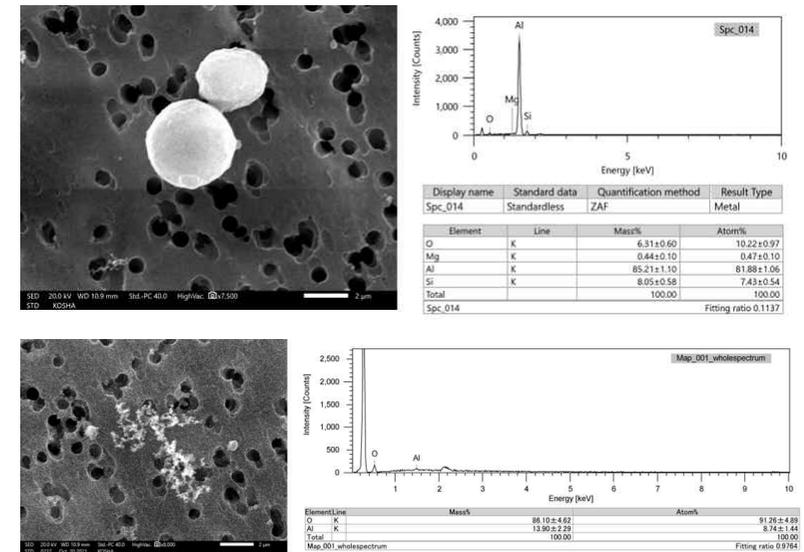
금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

사업장 B에서 채취한 공기 중 시료의 측정지점 및 채취시간은 다음과 같았다.

<표 III-43> 사업장 B의 시료채취지점 및 시간

No.	측정지점/작업	채취시간(min)
1	나노장비 설치위치	455
2	1층복도(외기)	20.5
3	3호기 unpack	45
4	door open	6
5	시빙기 가동 중	48

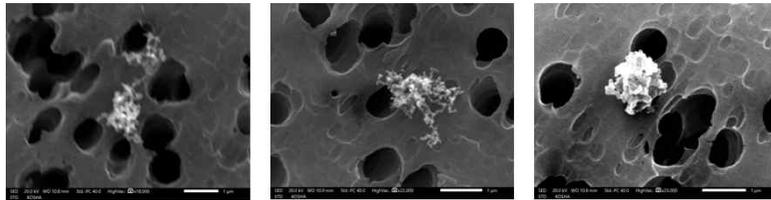
<나노장비 설치위치>



[그림 III-110] 공기 중 시료(나노장비 설치위치) SEM 분석결과

직독식 측정기기를 설치한 위치에서 작업시간 중 채취하였다. PC 여과지 윗면에 분말 소재 일 것으로 추정되는 알갱이가 검출되었고, 구성성분도 사용된 소재와 동일하였다. 그리고 주변에 비교적 둥근 형태의 작은 입자가 서로 엉켜있는 이미지를 관찰하였는데, 구성 성분 중 알루미늄이 낮은 비율로 구성되어 있었다. 함께 채취한 투과전자현미경용 시료는 분석이 불가하였다.

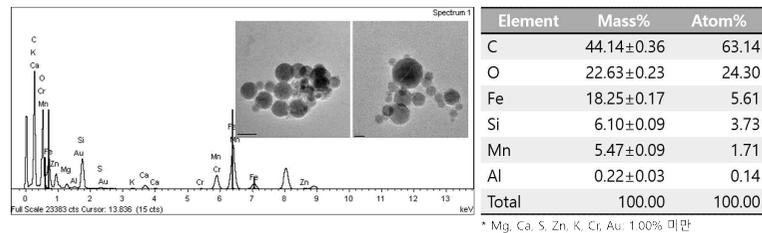
<1층복도(외기)>



[그림 III-111] 공기 중 시료(1층복도(외기)) SEM 분석결과

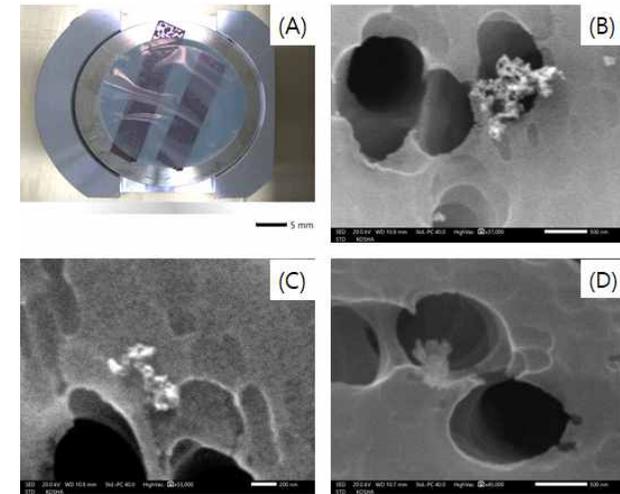
작업장에서 발견된 것과 유사한 입자형태들이 발견되었으나, 구성성분에는 알루미늄 등 분말 소재에 있는 원소가 검출되지 않았으며, 주 구성 성분은 탄소였으며, 미량의 산소가 존재하였다.

TEM 분석에서도 아래와 같이 소재의 성분은 미량이었으며, 탄소, 산소, 철이 주성분이었다.



[그림 III-112] 공기 중 시료(1층복도(외기)) TEM 분석결과

<3호기 unpack 및 Door open>

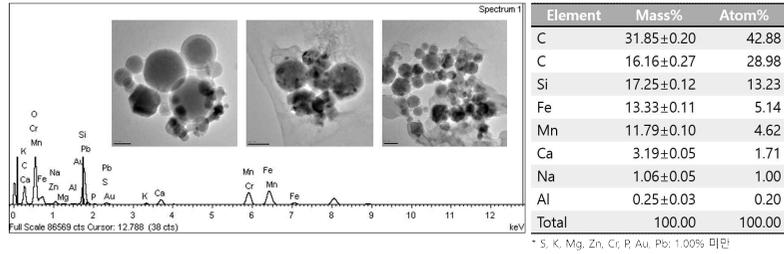


[그림 III-113] 3호기 unpack 및 door open 시 SEM 분석결과

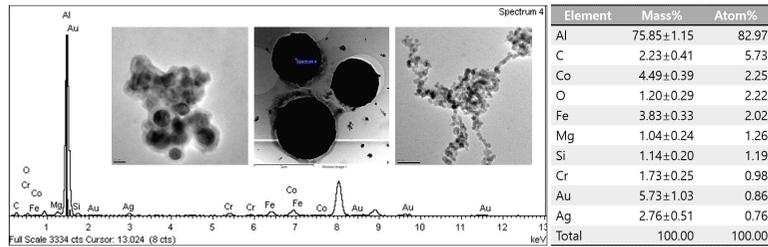
금속 3D 프린터 3호기의 unpack 작업(글로브박스 시스템을 이용하여 작업함) 45분 동안 시료를 채취한 시료 및 글로브박스의 도어를 열고 제품을 꺼내는 작업(약 6분)동안 채취된 시료에서 사용된 분말 소재의 성분은 검출되지 않았다(A~C: 3호기 unpack, D: Door open)

TEM 용 시료에서 3호기 unpack 작업동안 채취된 시료는 소재의 성분은 관찰되지 않았으나, door open 시에 채취도니 시료에서는 소재의 주 성분인 알루미늄이 주를 이루는 입자가 발견되었다.

III. 연구결과

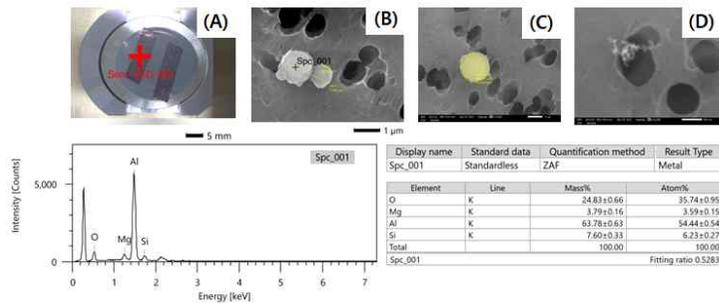


[그림 III-114] 3호기 unpack 작업시 시료의 TEM 분석결과



[그림 III-115] Door open 시 TEM 분석결과

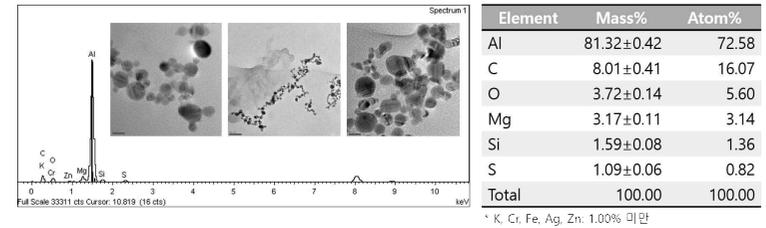
<시빙>



[그림 III-116] 시빙 작업시 채취된 시료의 SEM 분석결과

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

시빙 작업은 시빙 기기 내부로 사용된 분말 소재를 넣고, 재사용할 수 있는 분말 소재를 걸러 주는 작업이다. 이때 10 um 정도의 입자가 PC 여과지에 관찰되었고, 구성성분은 본 소재와 같았다. 이 때 작업장에서 관찰된 뭉쳐진 작은 입자 형태가 발견되었으나, 알루미늄은 포함되어 있지 않았다(D 사진).



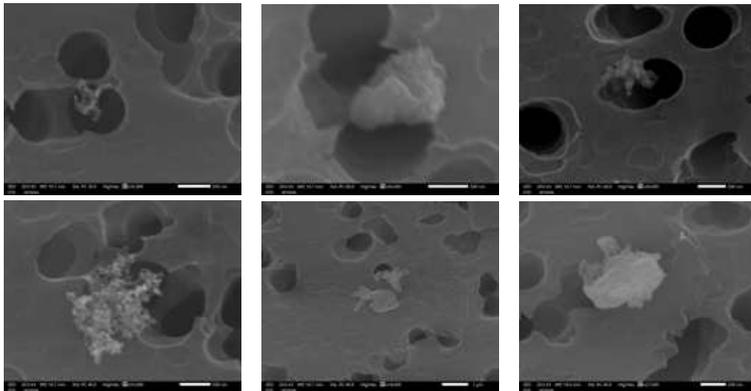
[그림 III-117] 시빙 작업시 채취된 시료의 TEM 분석결과

사업장 C에서 채취한 공기 중 시료는 아래와 같았다. 평가 2일차 9시 30분경 작업장내에서 프린터관련 특정작업이 없는 동안 작업장내 배경수준을 평가하기 위하여 채취하였고, 10시경부터 사무실 배경용 시료를 채취하였다. 또한, 프린터기(BE006)을 작동하는 동안 주변에서 채취하였으며, 2회에 걸쳐 근무시간동안 작업장내의 나노측정장비를 설치한 위치에서 채취하였다.

<표 III-44> 사업장 C의 시료채취지점 및 시간

No.	측정지점/작업	채취시간(min)
1	작업장(배경)	13
2	사무실(배경)	38
3	BE006 작동중	49
4	작업장_나노	450
5	작업장_나노2	357

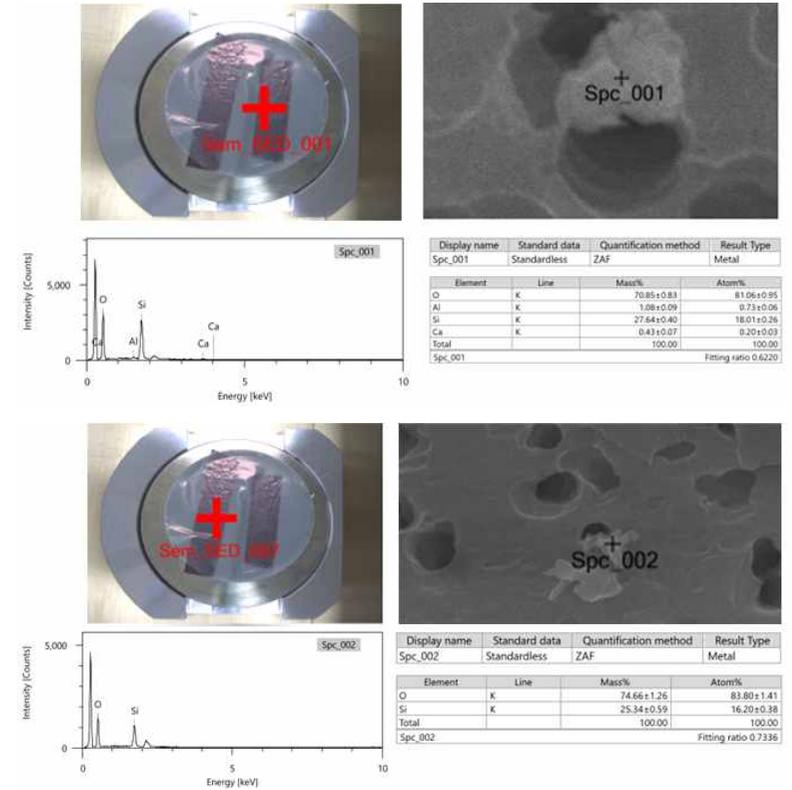
<작업장(배경)>



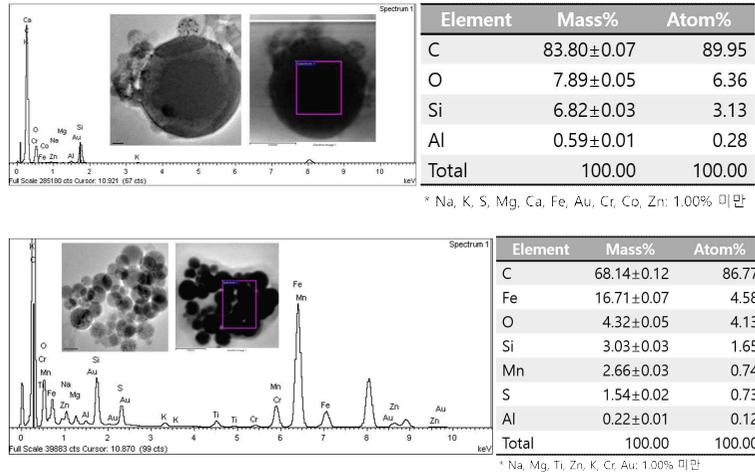
[그림 III-118] 작업장(배경) 시료의 SEM 분석결과

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

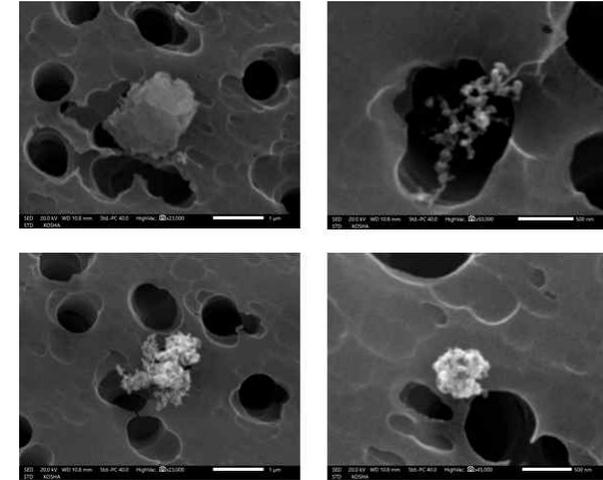
작업장(배경)시료에서 다양한 형태의 입자 형태들이 발견되었다. 이 작업장에서는 3D프린팅 작업 분말 소재를 사용하지 않지만, 동일한 공간 내에서 소형 연마, 실납땜, 에어컨 사용 등 다양한 작업이 이루어지고 있었기 때문이라 생각된다. 검출된 입자는 산소, 규소, 알루미늄, 칼슘으로 구성된 입자가 있는가 하면, 산소, 규소로 구성된 입자도 있었다.



[그림 III-119] 작업장(배경) 시료의 SEM-EDS 분석결과



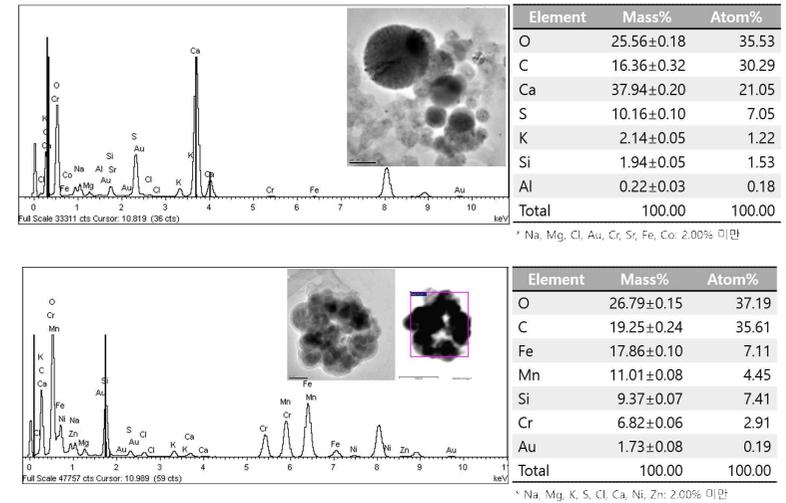
[그림 III-120] 작업장(배경) 시료의 TEM-EDS 분석결과



[그림 III-121] 사무실(배경) 시료의 SEM 분석결과

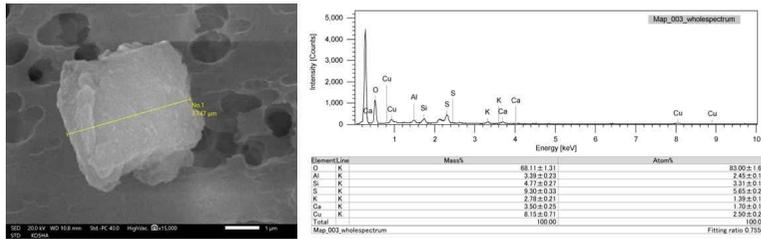
<사무실(배경)>

작은 입자들이 뭉쳐져 있는 입자 형태들이 발견되었으나, 작업장에서 발견된 규소, 알루미늄, 칼슘 등의 원소는 관찰되지 않았다. 그러나 TEM-EDS 분석 결과, 100 nm 보다 작은 입자의 뭉쳐 있는 이미지를 관찰하였고, 칼슘(37.95%)이 가장 많았으며, 규소(1.94%), 알루미늄(0.22%)로 구성되어 있었다. 그리고, 철, 망간, 규소 등으로 뭉쳐진 다른 종류의 입자 덩어리도 발견되었다.



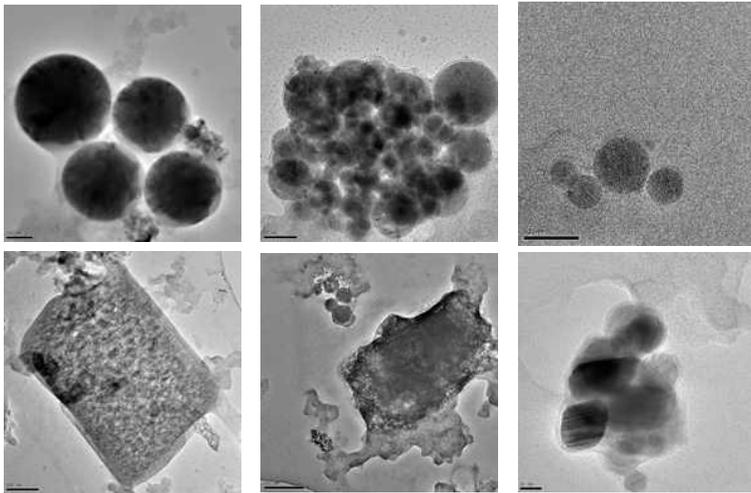
[그림 III-122] 사무실(배경) 시료의 TEM-EDS 분석결과

<BE006 작동중>



[그림 III-123] BE006 작동중 시료의 SEM-EDS 분석결과

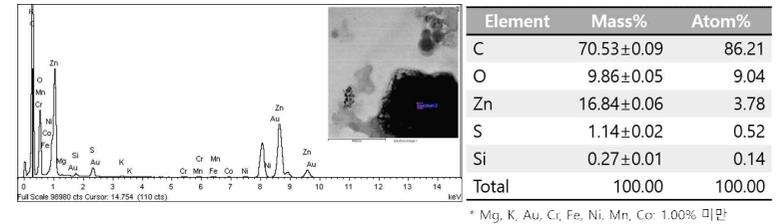
3D프린터가 작동하는 작업시 근접하여 측정한 시료이다. 이 때, 3D프린터에서 발생한 것으로 추정되는 입자를 관찰하였는데, 입자의 직경이 4 um 정도의 호흡성 분진 입경 크기였으며, 성분도 구리, 황, 산소로 구성되어 있었고, 그 밖에 알루미늄 등의 원소도 관찰되었다.



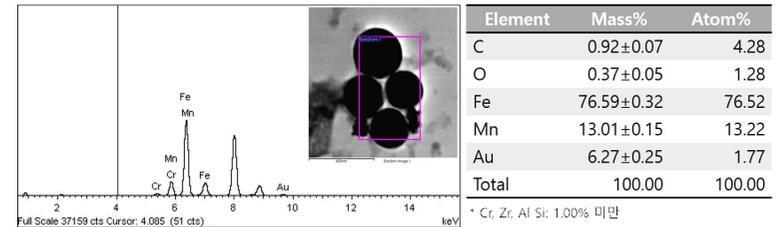
[그림 III-124] BE006 작동중 시료의 TEM 분석결과

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

BE006 작동중, 근접하여 TEM 시료를 채취하였다. 이미지 분석 결과, 둥근 형태의 입자와 직사각형 형태 등 다양한 입자를 관찰 할 수 있었다.



* Mg, K, Au, Cr, Fe, Ni, Mn, Co: 1.00% 미만

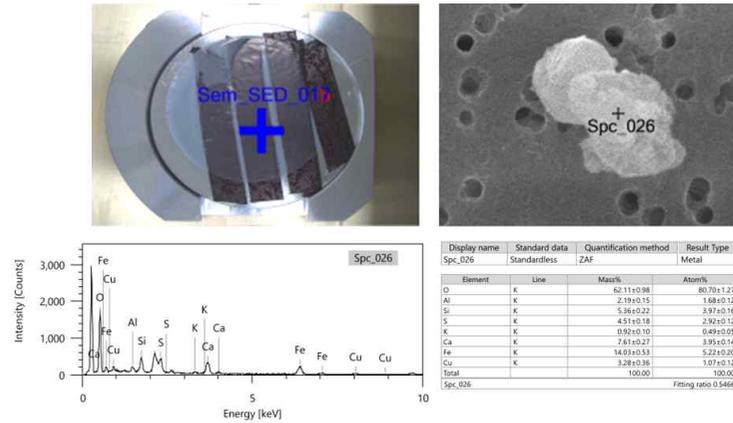


* Cr, Zr, Al Si: 1.00% 미만

[그림 III-125] BE006 작동중 시료의 TEM-EDS 분석결과

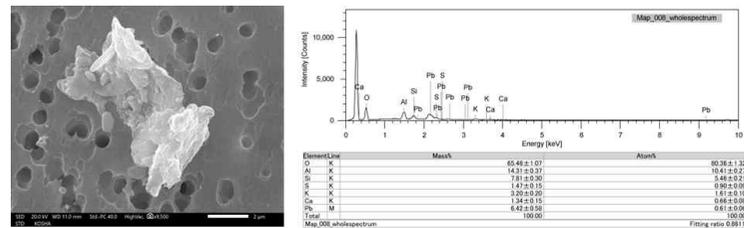
직사각형의 입자의 경우, 탄소와 아연(16.84%)이 주요 원소로 검출되었고, 둥근 입자의 경우, 철(76.59%)과 망간(13.01%)이 주요 원소로 검출되었다.

<작업장_나노>



[그림 III-126] 작업장_나노 시료의 SEM-EDS 분석결과

황산구리(CuSO₄) 수용액의 구리를 이용하여 적층하는 방식의 3D프린터였는데, 그림의 이미지에서 구리(3.28%)와 황(4.51%), 산소(62.11%)로 구성된 입자를 확인하였는데, 작업 중에 의해서 발생한 것으로 추정할 수 있다.

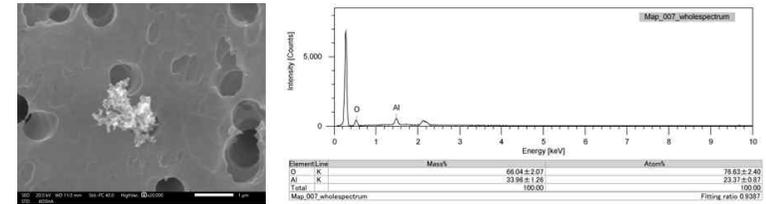


[그림 III-127] 작업장_나노 시료의 SEM-EDS 분석결과

그 밖에 납을 함유하고 있는 입자도 발견되었으며, 측정시 주변에서 납

금속 3D 프린팅 작업장의 나노입자 특성 연구

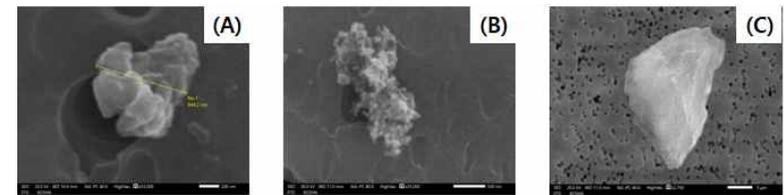
뿔 작업이 있었는데, 거기에서 온 것으로 추정된다. 규소는 자연 중에도 쉽게 발견될 수 있는 원소이나, 작업장내에서 실리콘렌즈를 제작하는 작업이 같이 수행되었으므로 이로부터 기인한 것인지는 명확하지 않다.



[그림 III-128] 작업장_나노 시료의 SEM-EDS 분석결과

3D 프린터기에 사용되는 부품을 알루미늄 페이스트로 연마하는 작업이 작업장내에서 짧게 이루어진 바 있으며, 이러한 작업 중 발생한 입자일 것으로 추정된다.

<작업장_나노2>



[그림 III-129] 작업장_나노2 시료의 SEM 분석결과

직독식 측정기기를 설치한 곳에서 작업 중 연속 채취한 시료에 대하여 분석하였다. 이 시료에서 다양한 입자가 검출되었으나, 검출된 입자에 따라서 산소, 칼슘, 황 및 규소가 주를 이루는 입자들이 있었다. 그러나 3D 프린팅에 사용된 구리성분은 검출되지 않았다.

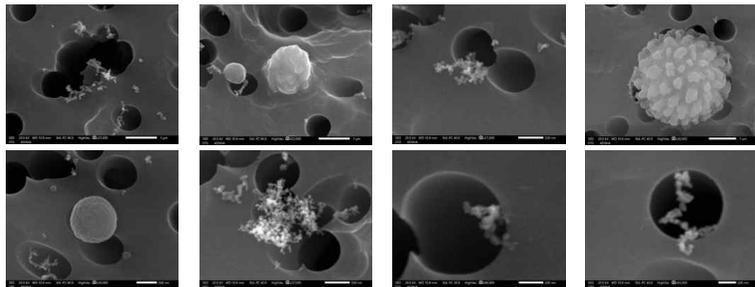
사업장 D에서 채취한 공기 중 시료의 측정지점 및 채취시간은 다음과 같았다.

<표 III-45> 사업장 D의 시료채취지점 및 시간

No.	측정지점/작업	채취시간(min)
1	나노장비(2일차, 3일차)	518, 384
2	장비세팅(지역, 개인)	45, 46
3	사무실	384
4	공시료	-

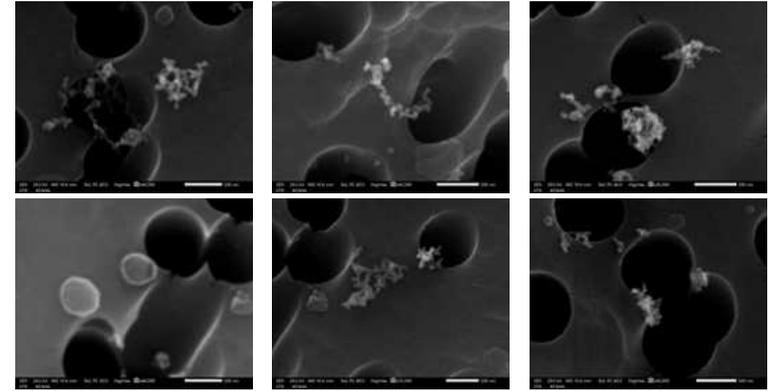
<나노장비>

직독식 나노측정 장비와 같은 위치에서 평가 2일차와 3일차에 근무시간동안 주사전자현미경용 시료를 채취하였다. 분말 소재의 성분은 철 베이스에 폴리브덴, 니켈, 티타늄, 알루미늄이 포함된 소재였는데, 작업장에서 채취한 시료에서 다양한 형태의 입자가 검출되었으나, 철 성분은 검출되지 않았다.

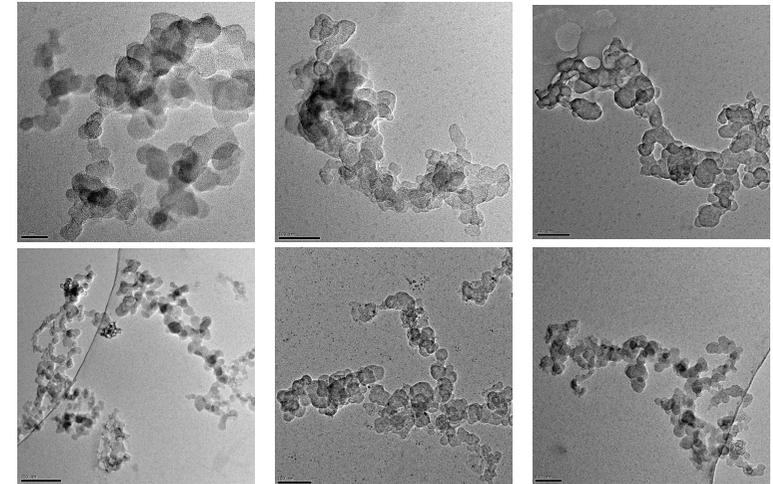


[그림 III-130] 나노장비_2일차 시료의 SEM 분석결과

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-131] 나노장비_3일차 시료의 SEM 이미지

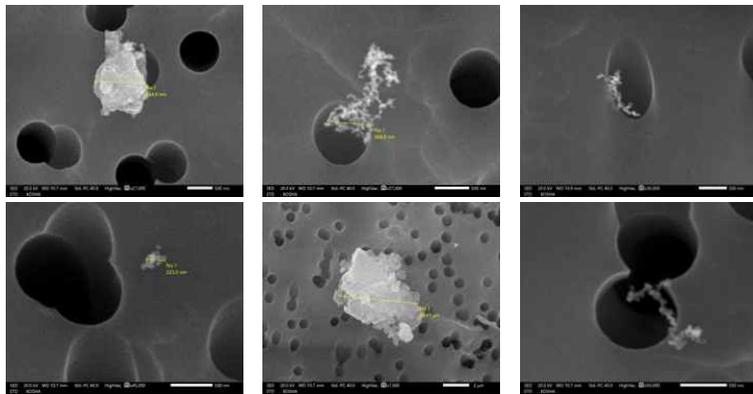


[그림 III-132] 나노장비_3일차 시료의 TEM 이미지

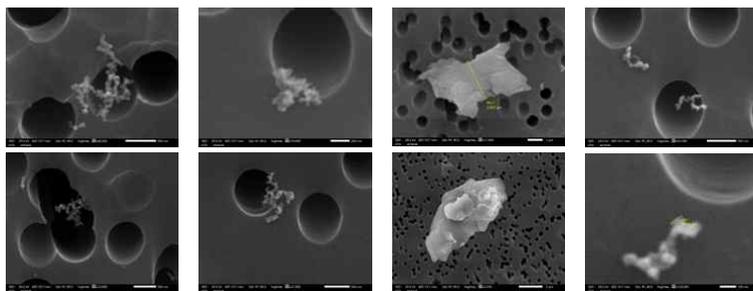
투과전자현미경 분석에서 작은 입자들이 응집된 입자가 다양하게 관찰되었으나, 소재의 주성분인 철은 관찰되지 않았다.

<장비세팅>

출근 직후, 출력이 완료된 제품을 꺼내고, 프린터기의 도어를 개방하여 청소기로 세척작업을 수행하고, 5~7분간 시빙작업을 수행하였으며, 분말을 장비에 넣고 소재의 평탄화 작업 등을 수행한 후 도어를 닫고 프린터기를 작동시키기 전까지 약 45분간 프린터기 위에서 지역시료 형태의 채취와 근로자 주변의 개인시료 형태로 채취하였다.



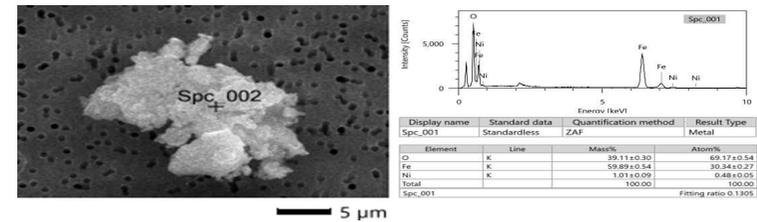
[그림 III-133] 장비세팅_지역 시료의 SEM 이미지



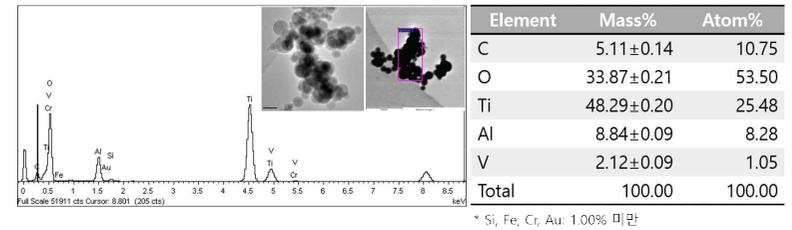
[그림 III-134] 장비세팅_개인 시료의 SEM 이미지

금속 3D 프린팅 작업장의 나노입자 특성 연구

다양한 형태의 입자가 관찰되었으나, 분말 소재의 주성분이 철인 입자는 적었다. 발견된 입자 중 일부는 크기가 약 15 um 였으며, 철이 주성분인 입자도 보였는데, 작업 과정에서 발생한 소재의 입자로 추정된다.



[그림 III-135] 장비세팅_지역 시료의 SEM-EDS 분석결과



[그림 III-136] 장비세팅_개인 시료의 TEM-EDS 분석결과

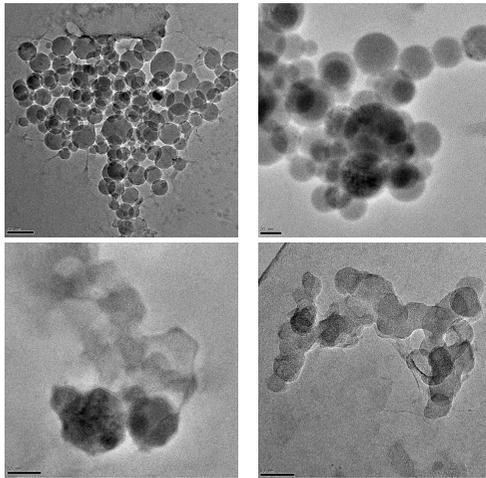
TEM 시료에도 철 성분은 거의 관찰되지 않았으나, 티타늄(48.3%)이 주성분인 입자 뭉치가 관찰되었다. 3D프린팅 작업장의 출입구는 스크린 도어로 되어 있었고, 3D프린팅 작업장 외부에는 타이어 모듈 완성품을 지게차로 옮기는 작업과 일부 다른 작업 공정이 3D프린팅 작업장 외부에서 이루어지고 있었다. 따라서 이 입자는 3D프린팅 작업에서 발생했을 가능성보다 외부의 영향으로 발생했을 것으로 예상된다.

작업시 근접해서 채취하였음에도 소재의 성분이 주성분인 입자가 거의 발견되지 않았는데, 이는 발생한 입자의 크기가 커고 무거워서 공기 중으

로 멀리까지 비산되지 않았기 때문으로 생각된다.

<사무실>

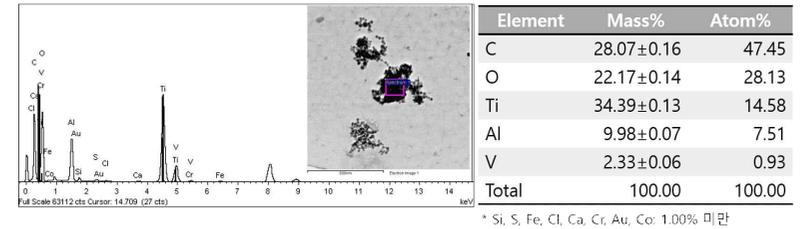
평가 3일차에 사무실에서 투과전자현미경용 시료를 포집하였다. 사무실은 3D프린팅 작업장과는 별도의 공간으로 분리되어 있으며, 타이어의 프레임을 생산하는 공장 내부에 위치해 있다. 따라서 사무실에서 관찰된 입자는 3D프린팅 작업장에서 발생했다고 볼 수는 없다.



[그림 III-137] 사무실 시료의 TEM 이미지

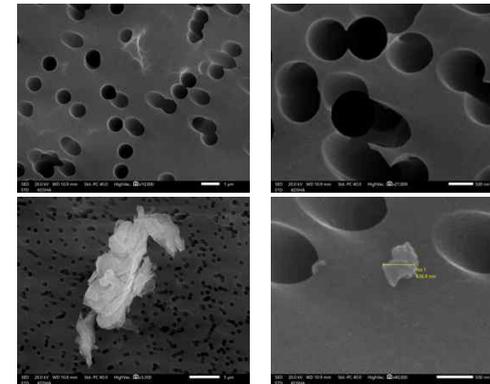
채취된 시료에서 아래와 같이 다양한 형태의 입자가 검출되었다. 발견된 입자의 주성분은 티타늄(34.4%)이었으며, 공장 내부의 공정에서 발생한 입자가 사무실 내부로 유입되었을 것으로 추정된다.

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-138] 사무실 시료의 TEM-EDS 분석결과

<현장공시료>



[그림 III-139] 현장공시료(PC필터) SEM 이미지

주사전자현미경용 시료포집에 사용된 PC 필터 중 현장공시료를 관찰한 결과, 거의 입자가 관찰되지 않았으나, 드물게 작은 입자가 관찰되었다. 그러나, 이는 채취된 시료를 관찰하는 데에는 문제가 없을 것으로 판단되었다.

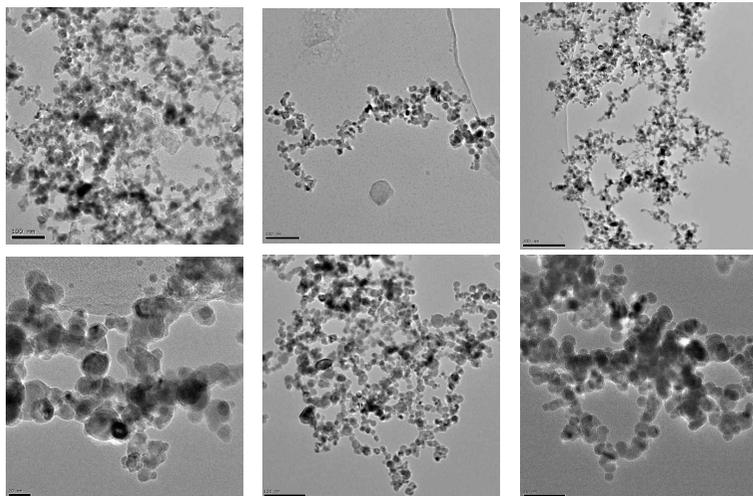
사업장 E에서 채취한 공기 중 시료의 측정지점 및 채취시간은 다음과 같았다.

<표 III-46> 사업장 E의 시료채취지점 및 시간

No.	측정지점/작업	채취시간(min)
1	청소작업	10
2	사무실	20
3	작업장(2일차, 3일차)	477, 343

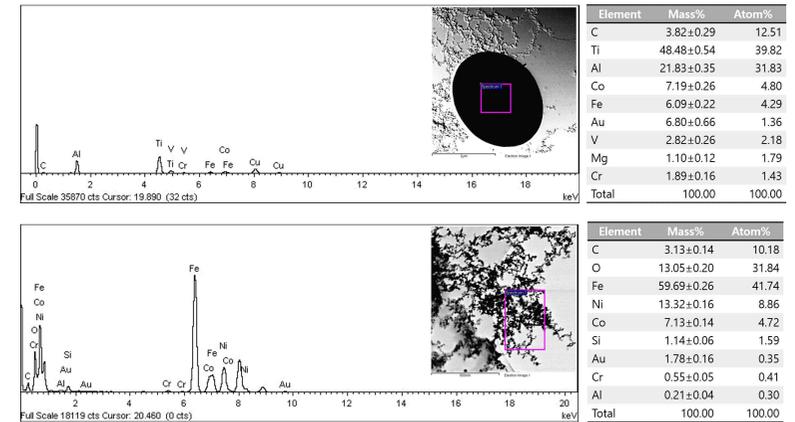
<청소작업>

평가 2일차, 프린터기의 도어를 개방하여 청소하는 동안 투과전자현미경용 시료를 포집하여 분석하였다.



[그림 III-140] 청소작업 시료 TEM 이미지

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구



[그림 III-141] 청소작업 시료 TEM-EDS 분석결과

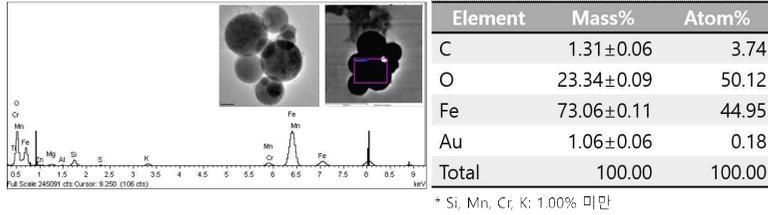
작은 입자가 응집된 여러 입자를 관찰할 수 있었는데, TEM-EDS 분석결과 두 종류의 입자로 나눌 수 있었다. 티타늄(48.5%)이 주성분인 입자와 철(59.7%)이 주성분인 입자의 덩어리였다. 당일 3D프린팅 작업시 사용한 입자와 같은 성분이며, 측정 당일 주로 3D프린팅 작업을 준비 중인 티타늄이 주성분인 입자는 주로 큰 입자가 관찰되었으며, 계속 작동 중이었던 3D프린팅에서 발생하였을 것으로 추정하는 철이 주성분인 입자의 덩어리는 100 nm 이하의 크기로 관찰되었다.

<사무실>

평가 2일차, 사무실에서 투과전자현미경용 시료를 포집하여 분석하였다. 시료에서 철이 주성분인 입자를 관찰하였는데, 작업자의 의복 등에 의해서 이동되었을 수 있는 것으로 추정된다. 이 작업장에서는 프린팅 작업장내의 작업시 별도의 보호의를 착용하지 않았고, 작업 후 별도의 조치 없이 사무실로 이동하는 것이 관찰되었기 때문이다. 작업 중 보호의의 착용과 오염물질의 이동을 방지하는 방법이 필요해 보였다.

급속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

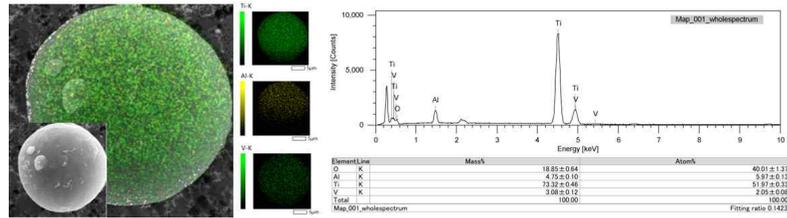
2개의 시료에서 모두 분말 소재의 성분인 티타늄, 바나듐, 알루미늄으로 구성된 성분이 검출되었다.



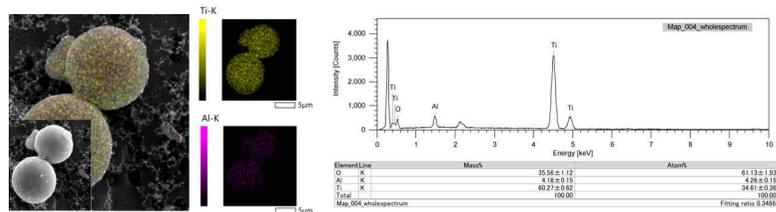
[그림 III-142] 사무실 시료 TEM-EDS 분석결과

<작업장>

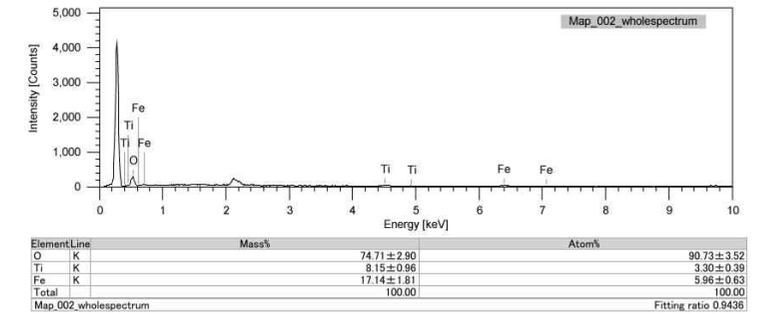
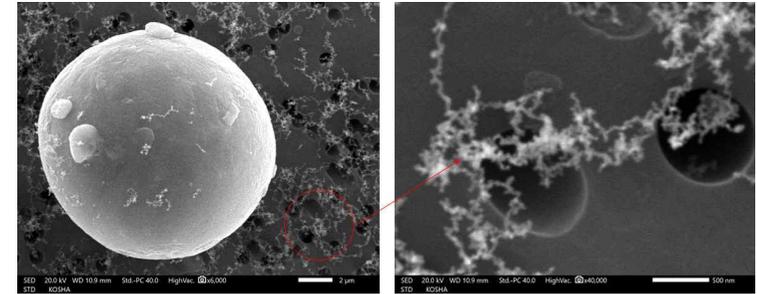
평가 2일차와 3일차에 작업장내 직독식 장비를 설치한 위치에서 근무 시간 중 채취한 시료를 분석하였다.



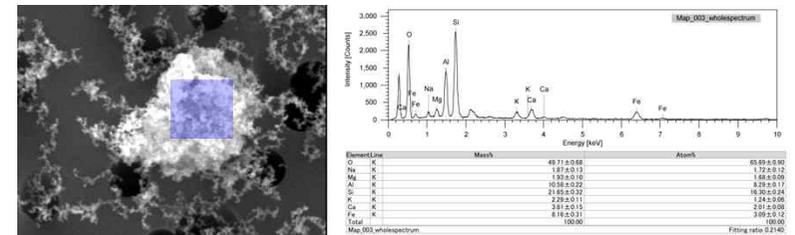
[그림 III-143] 작업장_2일차 시료 SEM-EDS 분석결과



[그림 III-144] 작업장_3일차 시료 SEM-EDS 분석결과



[그림 III-145] 작업장_2일차 시료 TEM-EDS 분석결과



[그림 III-146] 작업장_3일차 시료 TEM-EDS 분석결과

투과전자현미경으로 관찰한 결과, 검출된 입자의 표면에는 3D프린팅 작업시 발생했을 것으로 추정되는 아주 미세한 입자들이 서로 뭉쳐진 것이 보였다. 입자는 대부분 산소(74.7%)였으며, 티타늄(8.2%)과 철(17.1%)이 주요 성분이었다.

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

4) 공기 중 금속

평가 사업장 전체를 대상으로 노출가능한 금속성분을 선정한 후, 공통적으로 분석하였으며, 몰리브덴, 구리, 납 및 주석은 검출된 사업장이 없었고, 검출된 금속성분의 사업장별 농도는 아래의 표와 같았다. D 사업장에서는 검출된 금속성분이 없었다.

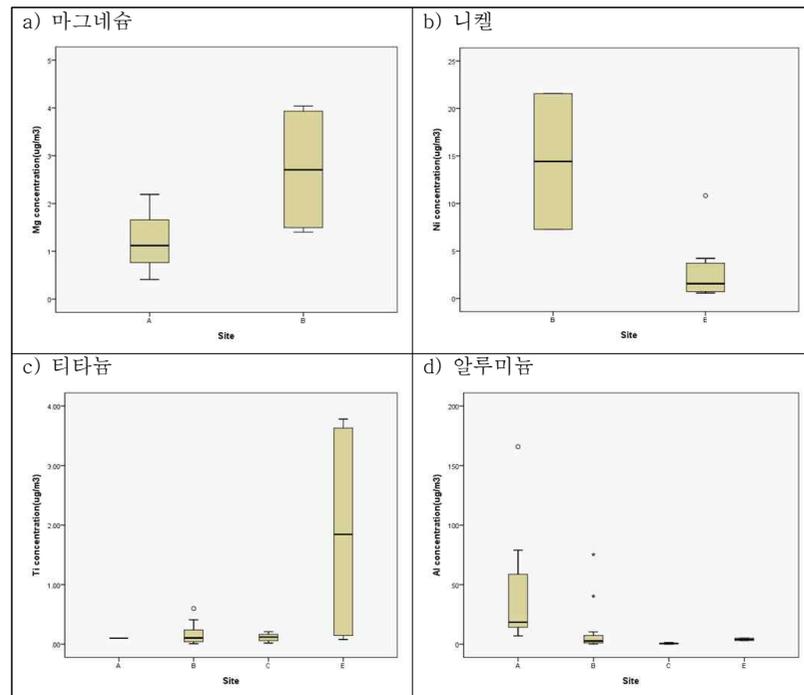
<표 III-47> 사업장 금속시료분석결과 (단위 : ug/m³)

Site	성분	유효 시료수*	검출율 (%)**	산술평균	표준편차	중위수	최소값	최대값
A	Mg	3	17.6	1.24	0.90	1.12	0.41	2.19
	Ti	1	5.9	0.10	-	0.10	0.10	0.10
	Al	13	76.5	40.96	44.63	18.43	6.92	165.81
B	Mg	4	21.1	2.71	1.41	2.71	1.40	4.04
	Cr	2	10.5	4.29	3.08	4.29	2.11	6.46
	Ni	2	10.5	14.43	10.10	14.43	7.28	21.57
	Ti	14	73.7	0.17	0.17	0.11	0.01	0.60
	Al	18	94.7	9.34	18.85	2.73	0.10	75.29
C	Ti	8	40.0	0.12	0.07	0.12	0.02	0.21
	Al	9	45.0	0.51	0.42	0.52	0.05	1.36
D	-	-	-	-	-	-	-	-
E	Ni	11	73.3	2.73	3.03	1.56	0.57	10.82
	Ti	4	26.7	1.89	2.02	1.85	0.08	3.78
	Al	2	13.3	4.09	1.36	4.09	3.12	5.05

*유효시료수 : 해당 금속이 검출된 시료의 수

**검출율(%)=유효시료수/총시료수 × 100

각 금속성분별 농도를 사업장별로 비교해 보면 아래의 그래프와 같았다. 마그네슘은 2개 사업장에서 검출되었으며, 비모수검정(독립표본 Kruskal-Wallis 검정)에서 유의한 차이는 없었다(p=0.157). 2개 사업장에서 검출된 니켈은 비모수검정결과 유의한 차이가 있었으며(p=0.048), B 사업장이 높았다. 티타늄은 4개 사업장에 검출되었으나, 검출한계를 넘는 미량이었으며, 비모수검정결과 유의한 차이는 없었다(p=0.361). 알루미늄은 금속성분 중 가장 높은 농도로 검출되었으며, 비모수검정결과 사업장간 유의한 차이가 있었다(p<0.001).



[그림 III-147] 금속성분별 농도비교

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

총 85개의 채취된 공기 중 시료에서 각 물질별 검출율을 살펴보면, 알루미늄의 검출율이 49.4%로 가장 높았으며, 티타늄(31.8%), 니켈(15.3%), 마그네슘(8.2%), 크롬(2.4%) 순이었다. 각 물질별 최대노출값은 8시간 시간가중평균 노출기준(TWA)에 비해서 0.04~2.16%에 해당하였으며, 니켈이 가장 높은 값이었다. 반면 벤치마크 레벨(Benchmark level)과 비교하는 경우 최대값은 BL의 0.6~32.7%에 해당하는 값이었다.

<표 III-48> 금속성분별 농도수준 (단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

성분	유효 시료수*	검출율 (%)**	산술 평균	표준 편차	최소값	최대값			TWA	BL***
						$\mu\text{g}/\text{m}^3$	TWA%	BL%		
Al	42	49.4	16.99	31.72	0.05	165.81	1.66	25.12	10,000	660
Ti	27	31.8	0.40	0.94	0.01	3.78	0.04	0.57	10,000	660
Ni	13	15.3	4.53	5.96	0.57	21.57	2.16	32.68	1,000	66
Mg	7	8.2	2.08	1.37	0.41	4.04	0.04	0.61	10,000	660
Cr	2	2.4	4.29	3.08	2.11	6.46	1.29	19.58	500	33

*유효시료수 : 해당 금속이 검출된 시료의 수

**검출율(%)=(유효시료수/총시료수) × 100

***BL : Benchmark Level(=0.066×TWA)

TWA% = (최대농도/TWA)×100, BL% =(최대농도/BL)×100

<표 III-49> 금속의 물리적특성

성분	원자량	녹는점 (°C)	끓는점 (°C)	밀도 (g/cm ³)
Al	26.98	660	2,327	2.7
Ti	47.87	1,668	3,287	4.5
Ni	58.69	942	1,758	8.91
Mg	24.3	495	739	1.74
Cr	52.0	1,900	2,642	7.14

3. 기타인자

1) 생물학적 노출지표 평가

작업자 및 사무직에서 받은 소변시료를 분석한 결과는 아래 표와 같았다. 통계처리를 위하여 불검출은 검출한계를 $\sqrt{2}$ 로 나누어서 대체하였다.

<표 III-50> 소변 중 금속성분 분석결과

금속 성분	Site	n	검출율 (%)	산술평균 ($\mu\text{g/L}$)	표준편차 ($\mu\text{g/L}$)	중위수 ($\mu\text{g/L}$)	최소값 ($\mu\text{g/L}$)	최대값 ($\mu\text{g/L}$)
Al	A	5	55.6	59.5	58.4	34.6	22.9	178.0
	B	4	28.6	110.2	285.5	22.9	22.9	1099.3
	C	5	31.3	44.3	39.2	22.9	22.9	123.0
	D	2	25.0	45.4	41.7	22.9	22.9	114.4
	E	3	25.0	36.6	29.3	22.9	22.9	103.5
Ti	A	2	22.2	168.6	313.3	55.0	55.0	1001.3
	B	9	64.3	307.2	358.5	109.8	55.0	1232.9
	C	2	12.5	61.9	20.1	55.0	55.0	129.0
	D	0	0	-	-	-	-	-
	E	2	16.7	93.8	93.5	55.0	55.0	341.5
Cr	A	6	66.7	16.8	14.8	13.8	2.6	44.1
	B	10	71.4	19.7	17.2	16.7	2.6	55.3
	C	6	37.5	6.3	6.5	2.6	2.6	23.4
	D	2	25.0	6.0	6.2	2.6	2.6	17.2
	E	5	41.7	6.4	5.9	2.6	2.6	19.0
Ni	A	3	33.3	3.7	6.3	1.3	1.3	20.5
	B	3	21.4	2.0	1.5	1.3	1.3	6.7
	C	3	18.8	1.7	1.0	1.3	1.3	5.4
	D	3	37.5	2.0	1.2	1.3	1.3	4.7
	E	6	50.0	3.2	2.2	2.2	1.3	6.7

사업장별로 소변 중 금속성분이 검출된 시료의 비율은 평균 22~46%였으며, 금속별로는 크롬(48.5%), 알루미늄(33.1%), 니켈(32.2%), 티타늄(23.1%)의 비율로 검출되었다. 비모수검정에 의하면 티타늄($p=0.003$)과 크롬($p=0.22$)은 사업장간 유의한 차이가 있으나, 니켈($p=0.296$)과 알루미늄($p=0.697$)은 유의한 차이가 없었다. 대부분은 검출율이 낮아서 검출한계로 대체된 값이 중위수로 나타났으며, 비모수검정에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

생물학적 노출지표가 설정된 금속성분은 납, 수은, 카드뮴, 크롬, 니켈, 안티몬, 오산화바나듐, 비소, 망간 등이 있다. 연구과제에서 평가된 금속 성분 중 생물학적 노출기준값을 가지는 물질은 크롬과 니켈이다. 니켈은 주말 소변에서 80 $\mu\text{g/L}$ 이다. 니켈의 참고값으로 일반인은 5 $\mu\text{g/L}$ 수준이다.(근로자 건강진단 실무지침 제1권) 니켈의 경우 최대값이 20 $\mu\text{g/L}$ 수준으로 기준값에 비해서 낮았으며, 대부분의 값은 일반인의 기준보다 낮은 값이었다.

크롬의 기준값은 주말 소변에서 30 $\mu\text{g/g crea.}$ 이며, 동 연구에서는 크레아티닌을 별도로 분석을 하지 않았고, 최대 농도는 55.3 $\mu\text{g/L}$ 였다.

알루미늄의 생물학적 노출기준값은 정해지지 않았으나, 요중 알루미늄의 농도 4~6 $\mu\text{mol/L}$ (108~162 $\mu\text{g/L}$)이 신경계에 악영향이 관찰되는 역치값으로 보고되었고(Riihimaki et al., 2000), 요중 알루미늄이 100 $\mu\text{g/L}$ 이 신경효과를 발현시키는 농도로 보고되었다(Iregren et al., 2001). Ogawa and Kayama(2015)는 알루미늄 취급작업자의 요중 알루미늄농도는 13.0~107.7 $\mu\text{g/L}$ 인 반면 대조군은 4.9~15.4 $\mu\text{g/L}$ 수준이었다. 이에 비해 동 연구에서 평가된 사업장별 최대값은 100 $\mu\text{g/L}$ 이상이었으며, 최대 1,099.3 $\mu\text{g/L}$ 까지 나타났다.

2) 표면오염 및 피부노출 평가

작업장내의 주요 장비 위나 작업자가 사용하는 키보드 등의 오염정도를 알아보기 위하여 장비 등은 일정면적(10×10cm)을 닦아서 채취하였고, 마우스나 키보드는 전체면적을 닦아서 채취하였다. 이에 대한 분석결과는 아래의 표와 같았다(검출된 값들의 산술평균).

<표 III-51> 표면 오염물질 평균량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	Mg	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	Pb	Sn	Al
A	5	15.1	-	0.4	-	6.4	0.6	-	0.3	339.1
B	6	20.3	15.2	38.7	6.7	2.0	5.5	-	-	1,021.7
C	4	16.7	-	5.6	-	0.2	106.5	11.1	307.0	7.7
D	4	-	14.9	2,935.5	732.3	84.0	3.5	-	16.0	27.3
E	4	36.4	14.9	218.5	69.9	635.1	7.6	-	4.2	391.0
합계	23	18.8	16.2	643.0	350.3	170.9	22.9	11.1	52.0	414.3

A, B 사업장은 알루미늄이 비교적 높게 관찰되었다. 금속 3D 프린터기 자판과 시방기에서 모두 비슷한 정도의 양이 관찰되었다. B 사업장은 후처리작업대에서 모든 금속이 가장 높은 농도(예, 알루미늄 4396.4ug)를 보이면서 산술평균값에 영향을 주었다. C 사업장은 납과 주석은 납땜작업대 1곳에서만 검출된 값이며, 사용하는 실납의 주성분이 주석(60%)과 납(40%)이었는데 이에 대한 영향이었다. 구리의 경우 3D 프린터의 키보드와 중앙작업대에서 각각 58 ug, 313 ug 으로 높게 평가되었다.

D 사업장은 니켈과 몰리브데늄이 높게 관찰되었으며, 시방기, 작업대, 선반 등에서 모두 높게 관찰되었다. E 사업장은 작업대와 프린터 및 키판에서 티타늄 농도는 각각 1,286 ug, 928 ug, 312 ug으로 평가되었고, 프

린터에서는 알루미늄도 1,128 ug으로 분석되었다. 니켈과 몰리브데늄은 작업대에서 850 ug, 205 ug 으로 높게 검출되었다.

각 금속성분별 표면 오염량을 살펴보면 아래와 같았다.

마그네슘은 전체 시료의 70%에서 검출되었으며, D와 E 사업장의 검출율이 낮았다.

<표 III-52> 마그네슘의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	5	100	15.1	12.8	2.3	30.1
B	6	100	20.3	16.3	3.4	48.0
C	4	100	16.7	3.9	11.3	20.4
D	-	-	-	-	-	-
E	1	25	36.4	-	36.4	36.4
합계	16	70	18.8	12.8	2.3	48.0

크롬은 전체 시료의 43%에서 검출되었으며, D와 E 사업장은 모든 시료에서 검출되었다.

<표 III-53> 크롬의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	-	-	-	-	-	-
B	3	50	15.2	24.3	0.4	43.3
C	-	-	-	-	-	-
D	4	100	14.9	9.0	1.6	21.5
E	4	100	14.9	9.0	1.6	21.5
합계	10	43	16.2	14.2	0.4	43.3

니켈은 전체 시료의 87%에서 검출되었으며, D 사업장의 평균농도가 높게 평가되었다.

<표 III-54> 니켈의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	4	80	0.4	0.2	0.2	0.6
B	6	100	38.7	89.5	1.0	221.3
C	2	50	5.6	0.4	5.3	5.8
D	4	100	2,935.5	2,515.3	346.3	6,248.8
E	4	100	218.5	420.7	1.3	849.5
합계	20	87	643.0	1,555.1	0.2	6,248.8

몰리브데넘은 전체 시료의 39%에서 검출되었으며, D와 E 사업장에서 검출율과 농도가 높았다.

<표 III-55> 몰리브데넘의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	-	-	-	-	-	-
B	2	33	6.7	8.9	0.4	13.0
C	-	-	-	-	-	-
D	4	100	732.3	627.2	76.9	1,555.8
E	3	75	69.9	117.0	2.3	205.0
합계	9	39	350.3	531.9	0.4	1,555.8

티타늄은 전체 시료의 74%에서 검출되었으며, D와 E 사업장에서 검출율과 농도가 높았다.

<표 III-56> 티타늄의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	3	60	6.4	5.0	0.7	10.1
B	5	83	2.0	2.4	0.2	6.2
C	1	25	0.2	0.0	0.2	0.2
D	4	100	84.0	89.1	8.0	212.2
E	4	100	635.1	577.4	14.3	1,286.4
합계	17	74	170.9	368.2	0.2	1,286.4

구리는 C 사업장의 1개 시료를 제외한 모든 시료에서 검출되었으며, C 사업장의 평균값이 다른 사업장에 비해서 높았다. C 사업장은 황산구리 용액으로 프린팅작업을 하는데, 여기에서 오염되었을 것으로 판단된다.

<표 III-57> 구리의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	5	100	0.6	0.6	0.1	1.3
B	6	100	5.5	12.2	0.1	30.3
C	4	100	106.5	139.5	7.4	313.2
D	3	75	3.5	2.7	0.5	5.6
E	4	100	7.6	8.4	0.2	17.8
합계	22	96	22.9	66.8	0.1	313.2

납은 C 사업장의 납땜작업을 하는 작업대 에서만 검출되었으며, 사용 된 실납에서 기인한 것으로 판단된다.

<표 III-58> 납의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-
C	1	25	11.1	-	11.1	11.1
D	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-
합계	1	4	11.1	-	11.1	11.1

주석은 시료의 30%에서 검출되었으며, C 사업장의 납땜작업대에서 높 게 평가되었다.

<표 III-59> 주석의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	1	20	0.3	-	0.3	0.3
B	-	-	-	-	-	-
C	1	25	307.0	-	307.0	307.0
D	3	75	16.0	23.8	2.2	43.5
E	2	50	4.2	1.3	3.3	5.1
합계	7	30	52.0	113.5	0.3	307.0

알루미늄은 모든 사업장에서 검출되었으며, 평균 $414 \mu\text{g}/100\text{cm}^2$ 으로 평가되었다.

<표 III-60> 알루미늄의 사업장별 표면 오염량 (단위 : $\mu\text{g}/100\text{cm}^2$)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max
A	5	100	339.1	356.9	22.8	852.2
B	6	100	1,021.7	1,675.2	65.3	4,396.4
C	4	100	7.7	6.9	2.6	17.3
D	4	100	27.3	17.9	3.8	42.2
E	4	100	391.0	520.1	9.9	1,128.2
합계	23	100	414.3	925.8	2.6	4,396.4

금속 3D 프린팅 공정내 작업자를 대상으로 작업 전 양손바닥을 닦아서 시료로 사용하였고, 작업 후 동일하게 양손바닥을 닦아서 시료로 사용하였다. 일부 사업장은 동일 작업자에게서 작업 후 시료채취 서로 다른 시간에 2회 반복하여 채취하였다.

<표 III-61> 사업장별 작업자 손 오염물질 평균량 (단위 : μg)

Site	구분	n	Mg	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	Sn	Al
A	작업 전	2	N.D.	N.D.	0.8	N.D.	9.4	4.15	N.D.	43.9
	작업 후	4	N.D.	2.5	1.0	N.D.	21.5	0.85	N.D.	209.1
B	작업 전	2	17.0	N.D.	2.9	N.D.	N.D.	3.91	N.D.	7.1
	작업 후	4	22.8	2.2	7.6	N.D.	0.8	7.35	2.6	67.8
C	작업 전	4	34.4	N.D.	2.2	N.D.	N.D.	133.6	N.D.	4.8
	작업 후	8	26.9	N.D.	4.3	N.D.	N.D.	40.0	2.2	5.0
D	작업 전	2	N.D.	N.D.	35.7	9.8	1.7	0.5	N.D.	3.3
	작업 후	2	N.D.	N.D.	18.0	5.3	0.6	0.3	N.D.	4.2
E	작업 전	2	N.D.	2.3	13.2	3.5	62.3	1.8	3.1	30.2
	작업 후	2	31.8	325.3	479.7	100.9	22,035.9	64.0	29.1	2,191.5

작업자별 작업 전/후 구분에 따른 시료의 분석결과는 위의 표와 같았다. A 사업장은 알루미늄과 티타늄이 증가한 것을 확인할 수 있고, B 사업장은 낮은 농도이지만 대부분의 금속성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. C 사업장은 구리와 마그네슘이 작업 후 농도에서 낮게 평가되었다. D 사업장도 대체적으로 작업 후가 오히려 낮게 평가되었다. E 사업장은 모든 금속에서 작업 후의 농도가 크게 증가하였다. E 사업장은 일회용 폴리글로버를 재사용하는 것으로 관찰되었으며, 평가당일 시빙작업을 수작업으로 시행한 바 있는데, 이에 따른 영향일 가능성이 있다.

각 물질별 검출율과 작업 전후의 손바닥 오염량은 아래와 같았다. 통계 처리를 위하여 작업 후 2회 채취한 경우 평균값을 사용하였고, 작업 전 및 작업 후 모두 불검출인 경우는 제외되었으며, 작업 전 또는 작업 후 시료 중 하나라도 값이 있는 경우 나머지는 검출한계를 $\sqrt{2}$ 로 나누어서 대체하였다. 분포의 정규성을 위하여 변환(Ln) 후 대응표본 t-검정을 실시하였다.

마그네슘의 검출율은 53% 였으며, 작업 전과 후의 오염량에서 95% 유의수준에서 유의한 차이가 있었으나, 작업 전의 농도가 높은 것으로 평가되었다.

<표 III-62> 마그네슘의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	4	33	30.1	22.7	17.0	63.9	0.031
작업 후	13	65	27.5	14.9	12.0	66.6	
합계	17	53	28.1	16.2	12.0	66.6	

p-value : 대응표본 t-검정

크롬은 22%의 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량의 유의한 차이는 없었다.

<표 III-63> 크롬의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	2	17	2.3	0.8	1.7	2.9	0.107
작업 후	5	25	131.5	200.0	2.0	457.3	
합계	7	22	94.6	175.1	1.7	457.3	

p-value : 대응표본 t-검정

니켈은 78%의 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량에 유의한 차이가 있었으며, 작업 후의 농도가 높았다.

<표 III-64> 니켈의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	10	83	11.0	20.1	0.7	66.5	0.039
작업 후	15	75	69.8	210.0	0.5	818.3	
합계	25	78	46.3	163.6	0.5	818.3	

p-value : 대응표본 t-검정

몰리브데늄은 25%의 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량에 유의한 차이가 없었다.

<표 III-65> 몰리브데늄의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	4	33	6.7	7.5	1.8	17.8	0.272
작업 후	4	20	53.1	85.6	2.4	181.0	
합계	8	25	29.9	61.5	1.8	181.0	

p-value : 대응표본 t-검정

티타늄은 47%의 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량은 유의한 차이가 없었다.

<표 III-66> 티타늄의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	5	42	29.1	35.2	1.7	86.8	0.081
작업 후	10	50	4,416.1	9,718.0	0.4	28,111.1	
합계	15	47	2,953.7	8,080.5	0.4	28,111.1	

p-value : 대응표본 t-검정

구리는 88%의 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량은 유의한 차이가 없었다.

<표 III-67> 구리의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	10	83	55.0	123.2	0.5	383.1	0.587
작업 후	18	90	26.7	50.8	0.3	200.4	
합계	28	88	36.8	82.9	0.3	383.1	

p-value : 대응표본 t-검정

주석은 16%의 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량은 유의한 차이가 없었다.

<표 III-68> 주석의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	1	8	3.1	0.0	3.1	3.1	0.121
작업 후	4	20	15.8	16.3	2.2	35.7	
합계	5	16	13.2	15.2	2.2	35.7	

p-value : 대응표본 t-검정

알루미늄은 모든 시료에서 검출되었으며, 작업 전과 작업 후의 오염량은 유의한 차이가 있었으며, 작업 후의 오염량이 높았다.

<표 III-69> 알루미늄의 작업자 손 오염량 (단위 : μg)

Site	n	검출율(%)	AM	SD	Min	Max	p-value
작업 전	12	100	15.7	16.5	1.6	46.4	0.028
작업 후	20	100	277.0	663.8	1.7	2,209.1	
합계	32	100	179.0	535.4	1.6	2,209.1	

p-value : 대응표본 t-검정

납은 작업자의 손에서 작업 전 및 작업 후 모든 시료에서 검출되지 않았다.

3) 설문조사

5개 사업장에서 설문조사한 결과 사무직은 15명, 금속3D 프린팅 작업자는 17명이었다. 여성의 비율은 사무직에서 33%, 작업자에서 18% 수준이었으며, 흡연자의 비율은 사무직 33%, 작업장 12% 였으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p=0.423$, $p=0.209$). 나이는 20대 미만과 50세 이상은 없었으며, 작업자에서 20대의 비율이 높아 보이나, 통계적인 유의성은 없었다($p=0.364$). 사무직의 경우 근무경력으로 질의하였으며, 작업자의 경우 금속3D프린팅 관련 업무경력으로 질의하였으며, 사무직에서는 5년 이상의 경력자가 있었으나, 작업자는 5년 미만으로 조사되었으나 통계적으로 차이는 없었다($p=0.147$).

건강증상에 대한 질의에 대해서는 해당항목을 모두 응답하도록 하였으며, 사무직에서는 피부증상을 경험했다는 근로자가 2명 있었으며, 다른 증상에 대한 응답은 없었다. 작업자는 17명 중에서 8명(47%)이 피부증상을 경험한 것으로 응답하였으며, 호흡기증상(2명) 및 기타 증상(3명)의 경험에도 응답이 있었다. 모든 증상의 경험을 합산하여 통계처리한 결과 작업자가 경험한 비율이 유의하게 높았다($p=0.005$).

사무직의 경우 작업공간에 대한 설문에서 모두 3D 프린팅 작업공간과는 분리된 공간에 사무공간이 마련되어 있다고 답변하였으며, 사무직들도 수시로 출입을 하는 경우(40%)와 거의 출입을 하지 않는 경우(60%)로 나뉘었다.

금속 3D 프린팅 작업자는 하루 작업 중 3D 프린팅과 관련된 작업에 대한 근무시간은 평균적으로 하루 4시간 미만이 6명(35%)였으며, 8시간 이상 작업하는 경우도 5명(29%)이 응답하였다.

<표 III-70> 설문조사 인적사항 및 건강증상조사 결과

	사무직	작업자	p-value
남/여	10/5	14/3	0.423
흡연자	5 (33%)	2 (12%)	0.209
나이	20대	3 (20%)	0.364
	30대	8 (53%)	
	40대	4 (27%)	
근무경력 (금속3D경력)	1년미만	4 (27%)	0.147
	3년미만	4 (27%)	
	3년이상	7 (40%)	
건강증상	피부증상	2 (13%)	0.005*
	호흡기증상	-	
	기타(눈자극, 두통 등)	-	

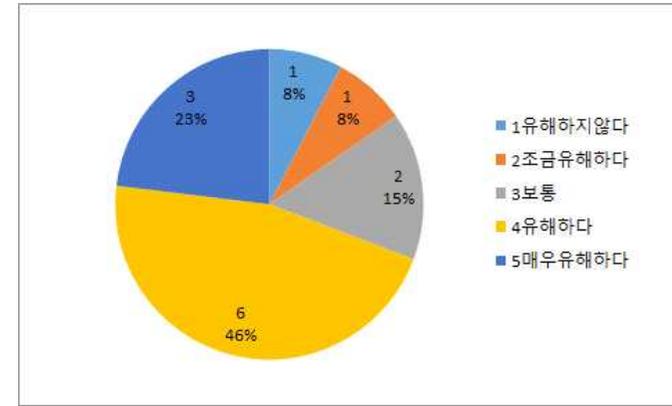
p-value : 피셔의 정확도 검정 또는 카이제곱 검정*

안전인식도와 관련하여, 금속 3D 프린터에 사용되는 재료의 유해성에 대한 자각적인 인식을 5점 리커트 척도로 파악하였는데, 아래의 그림과 같았다. 유해하거나 매우 유해하다에 응답한 경우가 69%에 해당하였다.

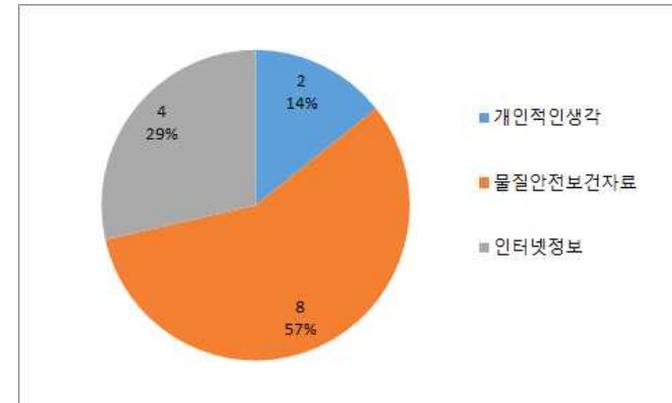
소재의 유해성 여부 판단을 위해서 참조한 자료로는 아래 그림과 같았는데, 물질안전보건자료를 참조한 경우(57%)가 가장 많았다.

3D 프린팅 작업 중 가장 유해하다고 생각되는 단계는 후처리시(8명), 가동초기(4명) 및 기타(4명)의 순이었다. 기타에서는 파우더 취급, 장비 청소, 시빙 등으로 제시되었다.

금속 3D 프린팅 사업장의 근로자 특성 연구

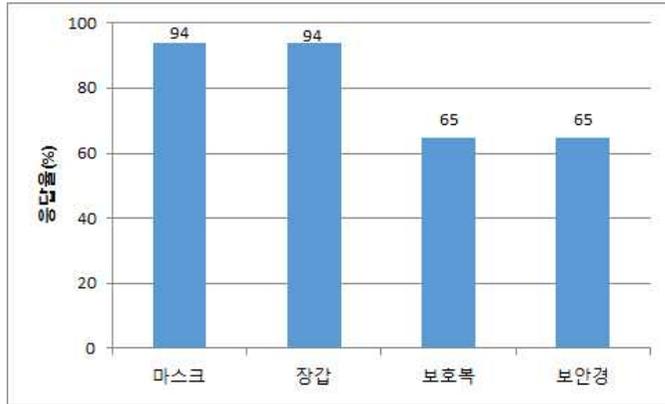


[그림 III-148] 사용재료의 유해성에 대한 자각적인 인식도



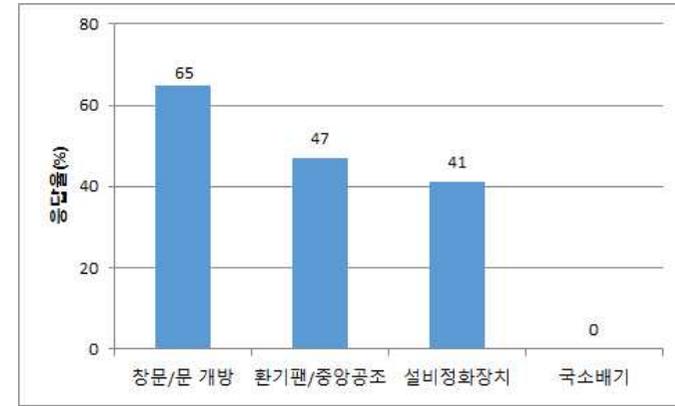
[그림 III-149] 소재에 대한 유해성 여부 판단 근거

3D 프린터 소재의 건강영향을 최소화하기 위해서 어떤 조치를 해야하는가에 대한 질의에서 복수응답을 받았다. 마스크와 장갑은 설문대상 17명 중 16명에서 응답하였으나, 보호복과 보안경에 대해서는 11명이 응답하여 상대적으로 낮은 응답을 보였다.



[그림 III-150] 소재의 건강영향 최소화 위해서 필요한 조치

3D 프린팅 관련업무를 수행하는 장소의 환기방식에 대한 설문(복수응답)에서는 창문이나 출입문을 개방하여 환기한다는 응답이 11명으로 가장 많았으며, 환기팬이나 중앙공조시스템에 의한 환기가 8명, 프린팅 설비 자체에 설치된 정화장치 7명의 순이었다. 별도의 국소배기장치를 설치한 곳은 없는 것으로 파악되었다.



[그림 III-151] 프린팅 작업장 환기방식

3D 프린터와 관련하여 작업하는 곳의 환기수준에 대한 질의에서는 적정 응답자 수(8명)가 불량(2명)에 비해 많았다. 즉, 작업자들은 작업장소의 환기수준은 적정하다고 판단하는 경우가 많았다.

IV. 결 론

.....

IV. 결론

금속 3D 프린팅 사업장의 나노 입자 노출특성을 파악하고자 하였으며, 주요 결과는 아래와 같았다.

직독식 측정장비를 이용하여 5개 사업장에서 나노입자의 수 농도, 입경분포, 표면적 농도를 측정하였다. 사업장별 입자 수 농도(CPC 측정값)의 중위수는 2,987~7,740 개/cm³ 으로 사업장간 유의한 차이가 있었으며, 시간대별(작업시간, 야간, 점심시간) 구분에서 점심시간은 유의하게 낮은 농도였다. 입자 수 농도는 작업상황에 의해서 크게 변화가 관찰되지 않는 경우가 많았으나, 질량농도는 변화를 보였다. 이는 작업시 입경이 큰 입자의 발생이 있었던 것으로 추정되며, 입자를 평가할 때 질량분석이 함께 이루어질 필요가 있음을 보여준다. 입자 수를 측정하는 장비간에는 매우 강한 유의한 상관관계가 있었으나, 장비별 측정가능한 입자의 범위 차이 등에 의해서 일정한 비율의 차이를 보였다(CPC를 기준으로 H-CPC는 69.4~78.7%, SMPS+OPS는 102.5~122.3%). 폐침착 표면적 농도 측정기 간에는 유의한 강한 상관관계를 보였으며, NSAM이 Partector2에 비해서 약 1.4배 높았다. 이러한 장비간의 농도차이는 장비간의 측정범위의 차이에 의해서 영향을 받았을 것으로 생각된다.

작업장 내의 근무시간 중 입자의 분포는 100 nm 이하가 전체입자의 70~84%의 높은 비율을 보였으나, 1개 사업장은 45%로 상대적으로 낮은 비율이었다. 또한, 4개 사업장은 100 nm 이하에서 최대 입자 수 농도를 나타냈다. 입자의 성분을 분석한 결과, 공기 중에서 채취된 입자에서 금속분말소재의 주 성분과 유사한 입자가 검출되었으며, 작은 입자들이 응집되어 있는 모습을 관찰할 수 있었다. 공기 중 금속성분으로 알루미늄이 가장 많이 검출되고, 농도도 가장 높았으나(최대 166 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 노출기준(10 mg/m^3) 및 벤치마크레벨(BL 660 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해서 낮았다.

소변 중 금속성분을 분석한 결과, 니켈(최대 20.5 $\mu\text{g}/\ell$)은 생물학적 노출지표 기준값(주말, 80 $\mu\text{g}/\ell$)보다 낮았으며, 일반인의 참고값(5 $\mu\text{g}/\ell$)보다 대부분

낮은 수준이었다. 작업장내 표면 오염물질은 작업장에서 사용하는 금속소재의 성분인 니켈, 알루미늄 등이 주를 이루었다. 작업자의 작업 전/후 손바닥의 오염도를 조사한 결과 보호장갑을 착용하지 않고 작업한 1개 사업장에서 매우 높은 수준의 농도를 보였다.

현장평가 사업장에서 32명(작업자 17명, 사무직 15명)을 대상으로 설문조사를 실시하였는데, 작업자에서 건강증상(피부증상)을 경험한 비율(47%)이 사무직(13%)보다 높았다.

금속 3D 프린팅 사업장에서 나노입자 등 입자상 물질을 평가하였으며, 금속성분의 노출을 확인하였다. 평가된 사업장의 노출수준은 낮은 것으로 판단되나, 프린팅 방식, 소재, 작업특성에 따라 노출될 수 있는 유해인자와 노출수준은 다를 것이다. 작업관찰 및 작업자 면담 등을 통해서 가장 유해한 환경은 프린팅을 위한 장비세팅, 소재의 처리(시빙 등), 후처리, 장비 청소 등으로 파악되었다. 각 작업단계에서 정해진 보호구를 착용하고 절차를 따르는 것이 중요하며, 주기적인 청소를 통하여 퇴적분진의 재비산을 방지하여야 한다. 일부 작업에서는 작업방식을 변경함으로써 노출을 줄일 수 있는 방법도 있었다. 수작업으로 분말소재를 옮기는 과정을 지급된 설비를 이용하여 밀폐된 상태에서 작업하거나, 그라인딩 등 후처리시 국소배기시설 활용 등이 있다.

정보통신산업진흥원에서 진행한 실태조사에 의하면, 3D 프린팅 관련 종사자 수는 2015년 980명에서 2020년 2,262명으로 꾸준히 증가하였다. 이 중 종사자 구분에서 금속 3D 프린팅 종사자 수만 따로 산출은 되지 않으나, 프린팅 작업 중 유해인자에 노출가능한 장비제조, 소재제조 및 서비스에 종사하는 근로자는 2020년 1,455명 이었다. 현장평가대상 5개 사업장에서 분말소결방식의 경우, 사업장당 프린팅 장비는 2~3대 였으며, 실제 프린팅 작업장에서 작업하는 근로자는 1~2명 이었으며, 작업시간은 1일 1~4시간으로 관찰되었다. 프린팅하는 제품의 크기 및 운영조건 등에 따라 배치당 8시간에서 길게는 약 1주일일 소요되기도 한다. 프린팅 과정에서 배기구에서 Partector 로 측정할 결과 농도가 거의 '0'에 가까웠는데, 이는 장비 내부의 헤파필터 등의 환기시

스텝에 의한 것으로 생각된다. 즉, 정상적인 작동상황에서는 프린팅 과정에서 내부에서 생성된 금속 흡은 외부로 방출되지는 않을 것으로 생각된다. 그러나, 비정상적인 상황 또는 작업 전, 후의 제품을 처리하는 과정에서는 입자의 재비산 등에 의하여 노출은 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 다음과 같은 제한점이 있었다. 먼저, 평가대상 선정시 사업장의 접근성에 제한이 있어서 정부의 연구비 지원대상 사업장을 대상으로 하였다. 이로 인하여, 다른 사업장에 비해서 경쟁력있는 사업장이 선정됨으로써 비교적 작업환경이 양호한 사업장일 가능성이 있다. 두 번째로 금속 3D 프린팅 방식 중 가장 많이 사용되는 PBF 방식은 포함되었으나, DED 방식의 사업장에 대한 평가는 없었다. 관련 전문가의 의견에 따르면, 일반적으로 DED 방식이 PBF 방식에 비해서 입자 노출이 많다고 하였다. 세 번째로 유해인자 노출이 가장 많을 것으로 예측되는 후처리 작업에 대한 평가가 미흡하였다. 후처리를 위주처리하거나, 각 사업장은 연구단계에서의 프린터기를 활용하고 있어서 후처리가 크게 필요치 않은 상황이었기 때문이다. 네 번째로 동일 작업장 내의 타 공정에 의해서 일부 값들이 영향을 받았을 것으로 판단된다. 다섯 번째로 생물학적 노출지표검사서 영양상태에 대한 조사가 없었고, 검사방법에 따른 채취시간을 정확하게 준수하지 못하여 일부 영향을 받았을 수 있다.

여러 가지 제한사항에도 불구하고, 본 자료는 금속 3D 프린팅 사업장의 현 상태를 평가한 자료로서, 새로운 기술의 도입에 따른 작업자의 노출가능 유해인자 및 수준에 대한 유의미한 정보를 제공하리라 생각된다. 향후, 작업자의 건강보호를 위한 방안을 마련하는데 참고할 수 있을 것이다. 또한, 3D 프린팅 관련 전문가들은 프린팅방식 중에서 레진을 사용하는 광중합방식에서 유기화합물 등의 유해인자 발생이 많을 것으로 예측하고 있어, 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 3D프린팅연구조합. Available from: URL: <https://www.3dpro.or.kr/>
- 3D융합산업협회. Available from: URL: <https://www.3dfia.org/>
- (사)3D프린팅산업협회. Available from: URL: <https://www.3dpia.org/>
- (사)한국3D프린팅협회. Available from: URL: <https://www.k3dprinting.or.kr/>
- (사)한국안전보건협회. Available from: URL: <https://www.csha.or.kr/>
- (사)한국3D프린팅협회. 3D 프린팅 산업 동향 및 현황조사. 2020.
- 과학기술일자리진흥원. 3D 프린팅 시장 및 기술 동향. S&T Market Report Vol70. 2019
- 강경원. 3D프린팅 기술과 산업 동향. 정보과학회지. 2017.11.
- 강민철, 예대희, 고근호. 금속 적층제조기술의 국내외 개발동향과 기술적 이슈. Journal of Welding and Joining. 2016;34(4):307-304
- 권영일, 강민철, 김윤철, 배창준, 이슬비. 3D 프린팅 산업 활성화 방안 연구. 2021.
- 김성호, 정은교, 김세동. 3D 프린터 사용자에게 대한 초미세입자 노출평가. 산업안전보건연구원 연구보고서 2018-연구원-889
- 박지훈, 전해준, 오영석, 박경호, 윤충식. 3D 프린팅 기술의 이해, 유해인자 노출평가와 제어. 한국산업보건학회지. 2018;28(3):241-256
- 전기영, 이재득, 강승철. 3D프린팅 산업현황 및 시장동향. Korea Evaluation Institute of Industrial Technology. 2016;16(6):69-78
- 정보통신산업진흥원. 2020 3D프린팅 산업 실태조사. 2021.
- 정은교, 김성호. 3D 프린터에 사용되는 소재의 종류 및 유해물질 특성 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서 2019-연구원-1486
- Alberts E., Ballentine M., Barnes E., Kennedy A. Impact of metal additives on particle emission profiles from a fused filament fabrication 3D printer. Atmospheric Environment 2021;244:117956

- doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117956
- Arrizubieta JL, Ukar O, Ostolaza M, Mugica A. Study of the environmental implications of using metal powder in additive manufacturing and its handling. *Metals*. 2020;10:261 doi:10.3390/met10020261
- Azzougagh MN, Kellaer FX, Cabrol E, Cici M, Pourchez J. Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powder bed fusion of aluminum alloy. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2021 doi:10.1080/15459624.2021.1909055
- Bau S, Rousset D, Payet R, Keller FX. Characterizing particle emissions from a direct energy deposition additive manufacturing process and associated occupational exposure to airborne particles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2020;17(2-3):59-72 doi:10.1080/15459624.2019.1696969
- Broekhuizen P.V., Veelen W.V., Streekstra W.H., Schulte P., Reijnders L. Exposure limits for nanoparticles: Report of an international workshop on nano reference values. *Ann. Occup. Hyg.* 2012;56(5):515-524 doi:10.1093/annhyg/mes043
- Chen R., Yin H., Cole IS., Shen S., Zhou X., Wang Y., Tang S. Exposure assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review. *Chemosphere*. 2020;259 doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127452
- EU-OSHA. Workplace exposure to nanoparticles. 2009.
- EU-OSHA. Tools for the management of nanomaterials in the workplace and prevention measures. E-Facts72.
- FIOH. Control approach Chemical safety of 3D printing at workplaces. available from : ttl.fi/wp-content/uploads/2016/11/chemical-safety-in-3D-printing-at-workplaces.pdf

- Iregren A., Sjogren B., Gustafsson K., Hagman M., Nylen L., Frech W., et al. Effects on the nervous system in different groups of workers exposed to aluminium. *Occup Environ med.* 2001;58:453-460
- Jensen AC, Harboe H, Brostrom A, Jensen KA, Fonseca AS. Nanoparticle exposure and workplace measurements during processes related to 3D printing of a metal object. *Frontiers in Public Health*. 2020;8:1-11 doi:10.3389/fpubh.2020.608718
- Lambat ZY. Particle emission and respiratory exposure to platinum metal powders during additive manufacturing : A pilot study. North West University. 2020
- Ljunggren SA., Karlsson H., Stahlbom B., Krapic B., Fornander L., Karlsson L.E., Bergstrom B., Nordenberg E., Ervik T.K., Graff P. Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing(3D Printing). *Safety and Health at Work* 2019;10:518-526.
- Ljunggren SA., Ward LJ., Graff P., Persson A., Lind ML., Karisson H. Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects. *Plos one* 2021 doi:10.1371/journal.pone.0248601
- Nagarajan HPN., Panicker S., Mokhtarian H., Coatanea E., Haapala KR. Improving worker health and safety in wire arc additive manufacturing : A graph-based approach. *Procedia CIRP* 90. 2020:461-466 doi:10.1016/j.procir.2020.01.116
- Noskov A., Ervik TK., Tsvil'skiy I., Gilmutdinov A., Thomassen Y. Characterization of ultrafine particles emitted during laser based additive manufacturing of metal parts. *Scientific reports*. 2020;10 doi:10.1038/s41598-020-78073-z
- Ogawa M., Kayama F. A study of the association between urinary

- aluminum concentration and pre-clinical findings among aluminum-handling and non-handling workers. *J of Occupational Medicine and Toxicology* 2015;10(13) DOI 10.1186/s12995-015-0055-8
- Riihimaki V., Hanninen H., Akila R., Kovala T., Kuosma E., Paakkulainen H., et al. Body burden of aluminum in relation to central nervous system function among metal inert-gas welders. *Scad J Work Environ Health*. 2000;26:118-130
- Roth GA., Geraci CL., Stefaniak A., Murashov V., Howard J. Potential occupational hazards of additive manufacturing. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2019;16(5):321-328 doi:10.1080/15459624.2019.1591627
- Sousa M., Arezes P., Silva F. Nanomaterials exposure as an occupational risk in metal additive manufacturing. 6th NanoSAFE International Conference. 2019. doi:10.1088/1742-6596/1323/1/012013
- 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;27:398-408 DOI:10.1111/ina.12310
- Taylor AA., Freeman EL., Ploeg MJC. Regulatory developments and their impacts to the nano-industry: A case study for nano-additives in 3D printing. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2021;207:111458 doi:10.1016/j.ecoen.2020.111458
- Visagie B. Respiratory exposure to hazardous chemical substances during additive manufacturing using nylon and alumide. North West University. 2019Walter J., Baumgartel A., Hustedt M., Hebisch R., Kaierle S. Inhalation exposure to hazardous substances during powder-bed porocesses. *Procedia CIRP* 74. 2018:295-299.

Abstract

A study on the characteristics of nanoparticle exposures in metal 3D printing workplace

Objectives : We evaluated the exposure of nanoparticles and major harmful factors in 3D printing workplace that use metal materials.

Method : We monitored four powder bed fusion 3D printing sites and one electrochemical 3D printing site. The direct reading instruments(Condensation particle counter, Handheld condensation particle counter, Scanning mobility particle sizer, Optical particle sizer, Nano particle surface area monitor, and Partector) was used. Airborne particles were collected and analyzed by Transmission electron microscope with energy dispersive spectrometer(EDS), Scanning electron microscope with EDS, and Induced coupled plasma spectrophotometer.

Results : The concentration of particle number was evaluated as 4,367~10,033 particles/cm³ as the median during working time at each site, and there was a difference by site and by time period. Particles with a size of 100 nm or less in the workplace during working

<작업자용>

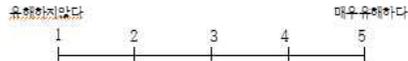
※ 본 설문조사는 3D 프린터와 관련된 작업자 모두(소재 취급, 프린팅, 후처리 등)를 대상으로 하오니, 아래의 질문에 성실히 답변하여 주시기 바랍니다.

※ 인적사항

- 1. 성별 : 남자 여자
- 2. 나이 : 20세 미만 20대 30대 40대 50대 60세 이상
- 3. 흡연여부 : 비흡연 / 흡연(_____개비/일)
- 4. 금속 3D 프린팅 **관련업무 경력**은 얼마나 됩니까?
 1년 미만 3년 미만 5년 미만 10년 미만 10년 이상
- 5. 금속 3D 프린팅 **관련업무**는 최근 1개월 기준으로 **하루 몇 시간** 작업합니까?
 2시간 미만 4시간 미만 6시간 미만 8시간 미만 8시간 이상
- 6. 금속 3D 프린팅 관련 **주 업무**는 무엇입니까? (해당항목 모두 체크)
 소재취급
 프린팅
 후처리
 기타 _____

※ 건강 및 안전보건 인지도 조사

- 1. 금속 3D 프린팅 관련 업무 중 다음의 **증상**을 경험하거나 악화가 된 것을 느낀 적이 있습니까? (해당항목 모두 체크)
 피부증상 (□가려움 □붓거나 짓무름 □ 두드러기 □ 기타)
 호흡기증상(□재채기 □기침 □콧물 □인후통)
 눈 자극 (눈물, 충혈 등)
 두통 □ 어지러움 □ 기타 ()
 위의 증상 경험이나 악화경험은 없다
- 1.1. 위의 증상을 경험한다면 그 빈도는 얼마나 됩니까?
위의 증상 중 **가장 빈도가 높았던 증상**(_____)을 중심으로 다음과 같이 빈도를 체크해 주세요.
 10번 중 8번 이상 10번 중 5-7번 10번 중 2-4 10번 중 1회
- 2. 금속 3D 프린터에 사용되는 **재료가 인체에 얼마나 유해하다고** 생각하십니까?



금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 특성 연구

- 2-1. 3D 프린터에 사용하는 **재료 중 가장 유해하다고** 생각되는 재료는 무엇입니까?
 금속분진(성분 _____) 유기용제(성분 _____)
 기타(성분 _____)
- 2-2. 3D 프린터의 **소재에 대한 유해성** 여부는 **어떤 자료를** 참조하여 판단하십니까?
 개인적인 생각 물질안전보건자료 인터넷 정보
 소재 관련 팸플렛 기타 _____
- 2-3. 3D 프린터를 이용한 **작업 중 언제 가장 유해하다고** 생각하십니까?
 예열 중 가동초기 가동 중 수리 후 예비가동 시 후처리시
 기타 _____
- 3. 3D 프린터 소재의 건강영향을 최소화하기 위해서 근로자는 어떤 조치를 해야 한다고 생각하십니까? (해당항목 모두 체크)
 마스크 착용(□ 가스용 □ 분진용 □면마스크 □ 기타)
 장갑 착용 보호복 보안경
- 4. 귀하가 3D 프린팅 관련업무를 수행하는 장소의 **환기방식**은? (해당항목 모두 체크)
 창문이나 출입문 개방을 통해 환기
 환기팬을 가동하거나 중앙공조시스템에 의한 환기
 3D 프린터 설비자체에 필터 등의 정화장치 있음(제조사)
 3D 프린터 외부에 별도의 국소배기장치 설치(혹은 3D 프린터 자체를 흡출도 내부에 설치)
 위 모두 해당사항 없음
- 5. 귀하가 3D 프린터와 관련하여 작업하는 곳의 **환기수준**은 어떻다고 판단하십니까?



응답자 정보 및 개인정보 수집·이용 동의

<개인정보 수집·이용에 관한 동의>
1. 수집목적: 금속 3D 프린팅 사업장 실태조사
2. 수집항목: 성별, 연령, 흡연, 근무상황, 건강상태 등
위 개인정보는 금속 3D프린팅 작업자의 유해인자 노출에 대한 연구에 활용할 수 있습니다.
개인정보 수집 및 이용에 동의하십니까? 동의합니다. 동의하지 않습니다. (서명)

※ 이번 조사의 원본자료는 연구기간 종료 후 우리 연구원내 절차에 따라 폐기되며, 통계제리를 위한 자료는 기업 및 개인 식별이 되지 않는 형태로 작성 및 사용됩니다.
※ 향후에도 동의 철회가 가능하며, 철회시 절차에 따라 관련자료는 폐기됩니다.
※ 산업안전보건연구원 기관생명윤리위원회 (연락처 Tel) 052-703-0855

<사무직용>

※ 본 설문조사는 3D 프린터와 관련된 작업자와 비작업자의 상황을 비교하기 위한 설문이오니, 아래의 설문에 성실히 답변하여 주시기 바랍니다.

※ 인적사항

1. 성별 : 남자 여자
2. 나이 : 20세 미만 20대 30대 40대 50대 60세 이상
3. 출연여부 : 비출연 / 출연(_____개비/일)
4. 동 회사의 근무경력은 얼마나 됩니까?
 1년 미만 3년 미만 5년 미만 10년 미만 10년 이상
5. 귀하의 주 업무공간과 3D 프린팅 작업공간은 **작업공간을 공유**하고 있습니까?
 항상공유함 (업무공간과 3D 프린팅 관련 작업공간간의 구분이 없음)
 임시구분됨 (피디션 등으로 구분은 되나, 하나의 공간에 있음)
 별도의 업무공간이 있으나, 업무상 3D 프린터 작업공간을 수시 출입
 분리된 공간에서 업무를 하며, 3D 프린터 작업공간을 출입하는 일은 많지 않다.
6. 귀하의 업무는 어떤 직종에 해당됩니까?
 일반사무 3D 설계관련 품질관리 관리자 이상 기타 _____

※ 건강상태

1. **업무를 수행하는 중 다음의 증상을 경험하거나 악화가 된 것을 느낀 적이 있습니까?** (매당항목 모두 체크)
 피부증상 (가려움 붓거나 진물 두드러기 기타)
 호흡기증상(재채기 기침 콧물 인후통)
 눈 자극 (눈물, 충혈)
 두통 어지러움
 기타 (_____)
 위의 증상 경험이나 악화경험은 없다
- 1.1. 위의 증상을 경험한다면 그 빈도는 얼마나 됩니까?
 위의 증상 중 **가장 빈도가 높았던 증상(_____)**을 중심으로 다음과 같이 빈도를 체크해 주세요.
 10번 중 8번 이상 10번 중 5-7번 10번 중 2-4 10번 중 1회

응답자 정보 및 개인정보 수집·이용 동의

<p><개인정보 수집이용에 관한 동의></p> <p>1. 수집목적: 금속 3D 프린팅 사업장 실태조사</p> <p>2. 수집항목: 성별, 연령, 출연, 근무상황, 건강상태 등위 개인정보는 금속 3D프린팅 작업자의 유해인자 노출에 대한 연구에 활용될 수 있습니다.</p> <p>개인정보 수집 및 이용에 동의하십니까? <input type="checkbox"/> 동의합니다. <input type="checkbox"/> 동의하지 않습니다. (서명)</p>
--

- ※ 이번 조사의 원본자료는 연구기간 종료 후 우리 연구원내 절차에 따라 폐기되며, 통계처리를 위한 자료는 기업 및 개인 식별이 되지 않는 형태로 작성 및 사용됩니다.
- ※ 향후에도 문의 절차가 가능하며, 필요시 절차에 따라 관련자료는 폐기됩니다.
- ※ 산업안전보건연구원 기관생명윤리위원회 (연락처Tel) 052-703-0855

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 박해동 (연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 김성호 (연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 이유진 (연구위원, 직업환경연구실)

연구기간

2021. 2. 1. ~ 2021. 11. 30.

본 연구는 산업안전보건연구원의 2021년도 자체연구에 의한 것임

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

산업안전보건연구원장

금속 3D 프린팅 사업장의 나노입자 노출특성 연구
(2021-산업안전보건연구원-751)

발행일 : 2021년 11월 30일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 직업환경연구실 연구위원 박해동

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 중가로 400

전화 : 052-7030-885

팩스 : 052-7030-337

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-92138-14-5