연구보고서

실험동물을 이용한 3D 프린터 발생 독성물질에 대한 생체영향 연구(I)

- 다중 발생장치 개발 중심으로 -

이성배, 임철홍, 한정희, 이미주, 김태현, 정은교

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원

요 약 문

연구기간 2019년 1월 ~ 2019년 11월

핵심단어 초미세입자, 3D 프린터, 다중 발생 시스템, FDM

연구과제명 실험동물을 이용한 3D 프린터 발생 독성물질에 대한 생체영향 연구(I) - 다중 발생 시스템 개발 중심으로

1. 연구배경

3D 프린터를 이용한 가공품 생산 사업장 및 개인이 늘어나고 있다. 3D 프린팅 프로세스로 발생된 입자는 화학적으로 안정적이고 불활성이며 생체지속성(bio-persistant)으로 인체에 유해한 영향을 미치고 있음에도 불구하고 3D 프린터 사용시 노출되는 물질의 법적 규제는 전무하다. 따라서 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하고 실험동물에 의한 독성시험을 통하여 생체 독성 영향을 파악하며 법적 규제 근거자료를 제공하고 근로자의 건강장해 예방을 도모하고자 한다.

2. 주요 연구내용

본 연구는 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하여 기성품 발생조건과 동물실험을 위한 최적의 조건을 만들기 위해 수행하였다.

다중 3D 프린팅 발생 시스템에서 여러 조건에서 공통적인 양상을 보였다. 발생시작 후 작은 ㎚ 크기의 초미세입자의 발생이 급격하게 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였으며, 1시간 후부터는 안정적으

로 발생하였다.

기성품 발생조건의 실험은 제조사에서 권장하는 요구조건으로 수행하였다. 실험 재료 ABS 필라멘트는 직경 1.75 ㎜, 노즐의 토출 직경은 0.4 ㎜, 그리고, 노즐의 토출 온도는 240℃, 그리고 노즐의 토출속도는 10 level로 수행하였다. 실험결과, 실험물질 발생량이 최대로 발생되지는 않았으며, 이는 양질의 3D 프린터 제품 성형을 위한 조건이었다.

노즐 토출 온도에 따른 실험에서, 210℃에서 300℃로 노즐 토출 온도가 높아짐에 따라 입자 발생 농도는 증가하였다. 노즐 토출 직경을 0.2 ㎜에서 1.2 ㎜까지 수행한 실험에서 노즐 직경이 크거나 작아질 때 농도가 높아지지 않았으며, 노즐 토출 직경이 0.4 ㎜ 또는 0.6 ㎜일 때 입자 발생 농도는 높았다. 노즐 토출 속도에 따른 실험에서 노즐 토출 속도가 빠를수록 입자 발생농도는 증가하였다. 다중 발생을 위해 구성한 노즐 수량에 따른 실험에서 노즐 수량이 증가함에 따라 입자 발생 농도는 증가하였다. 공기유량 조건에서는 공기 유량이 증가할수록 입자 수 농도는 증가하였으며, 중량농도와 표면적 농도는 반대로 감소하였다.

개인시료 시료 채취기로 포집한 필터 중량법으로 측정한 농도는 같은 시간대에 SMPS로 측정한 중량농도와 비교하여 157.8%로 더 높았다. OPC를 이용하여 농도를 측정한 결과, SMPS 측정범위 이상인 1.0 ㎛～2.5 ㎛에서 입자가 측정되었으며, 이는 필터 중량법의 농도와 SMPS 측정 중량 농도 차이에 영향을 주었다.

노즐 토출 온도가 300℃일 때는 토출된 필라멘트가 회오리형태로 꼬여서 발생챔버의 유속을 방해하여 동물발생 온도조건은 270℃가 보다 더 적합하였다. 또한, 공기유량의 경우 측정장비와 동물실험을 위해 필요한 공기유량을 감안할 때 고농도 발생을 위한 최저유량은 30 LPM이었다.

상기의 조건 실험을 토대로 볼 때, 다중 3D 프린팅 발생 시스템의 동물실험을 위한 최적 발생조건은 노즐 토출 직경 0.4 ㎜(또는 0.6 ㎜), 노즐 토출 온도 270℃, 챔버 내 공기 공급유량 30 LPM, 그리고, 노즐 토출 속도 15 level 이었다. 동물실험을 위한 최적 발생조건 실험 결과, 기성품 발생

조건과 비교하여 입자 수 농도는 13.8배, 중량 농도는 13.7배, 그리고 표면적 농도는 13.3배 높은 결과를 얻었다.
주사전자현미경으로 입자가 포집된 상태를 관찰한 결과, ABS 발생물질은 작은 입자로 존재하기도 하였으나, 대부분 입자끼리 서로 뭉쳐져 산봉우리 형태의 모습이었다. 투과전자현미경으로 관찰한 grid 상의 입자는 10 ㎚~200 ㎚ 크기의 입자가 관찰되었다. 또한, 수 ㎚~수십 ㎚ 크기의 입자가 뭉쳐져서 포도송이 형태로 관찰되었다.
이상의 결과, 본 연구는 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 제작하여 여러 조건에 따른 일정한 패턴 확인, 농도의 안정적 발생, 그리고 동물실험 조건을 확립하여 향후 동물실험의 가능성을 보여주었다. 이 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 이용하여 향후 다각적인 연구 수행이 가능하며, 더 나아가 3D 프린팅 발생물질에 대한 법적 규제의 근거자료를 제공함으로써 근로자의 건강장해 예방을 도모할 수 있을 것이다.

3. 연구 활용방안

본 연구는 다년 연구로 수행되며 연구 완료시 3D 프린터 사업장에서 발생되는 독성물질의 규명 및 법적규제를 위한 근거자료 제공될 수 있을 것이다.

4. 연락처

- 산업안전보건연구원 산업화학연구실 흡입시험연구부 이 성 배
  - ☎ 042) 869 8512
  - E-mail sblee@kosha.or.kr

본 문 차 례

Ⅰ. 서 론 ····· 1
1. 연구배경 ····· 1
2. 연구목적 ····· 4

Ⅱ. 연구방법 ····· 5
1. 프린팅 방식과 시험물질 ····· 5
2. 3D 프린팅 발생 시스템 구축 ····· 6
3. 실험물질 측정 장비 ····· 8
4. 실험 방법 ····· 10

Ⅲ. 연구결과 ····· 13
1. 3D 프린팅 시스템 발생 조건 ····· 13
2. 다중 3D 프린팅 시스템 조건 변경 실험 ····· 16
3. 입자의 특성과 형태 ····· 44

Ⅳ. 고 찰 ····· 59

Ⅴ. 결 론 ····· 67

참고문헌 ····· 69

표 차 례

〈표 1〉 국내 3D 프린팅 소재제조 제품별 시장규모 ····· 2
〈표 2〉 3D 프린팅 발생장치 사양 ····· 7
〈표 3〉 기성 제품 발생조건의 농도 측정 결과 ····· 14
〈표 4〉 토출 온도에 따른 입자 수 농도 ····· 17
〈표 5〉 토출 온도에 따른 중량 농도 ····· 18
〈표 6〉 토출 온도에 따른 표면적 농도 ····· 18
〈표 7〉 노즐 직경 크기에 따른 입자 수 농도 ····· 21
〈표 8〉 노즐 직경 크기에 따른 중량 농도 ····· 22
〈표 9〉 노즐 직경 크기에 따른 표면적 농도 ····· 23
〈표 10〉 노즐 토출 속도에 따른 입자 수 농도 ····· 27
〈표 11〉 노즐 토출 속도에 따른 중량 농도 ····· 28
〈표 12〉 노즐 토출 속도에 따른 표면적 농도 ····· 29
〈표 13〉 노즐 수량별 입자 수 농도 ····· 33
〈표 14〉 노즐 수량별 중량 농도 ····· 33
〈표 15〉 노즐 수량별 표면적 농도 ····· 34
〈표 16〉 공기 유량에 따른 입자 수 농도 ····· 38
〈표 17〉 공기 유량에 따른 중량 농도 ····· 38
〈표 18〉 공기 유량에 따른 표면적 농도 ····· 39
〈표 19〉 최적 발생 조건에서의 농도 ····· 42
〈표 20〉 OPC에 의한 입자 수 농도 측정 결과 ····· 45
〈표 21〉 OPC에 의한 중량농도 측정 결과 ····· 46
〈표 22〉 필터 중량법에 의한 중량 농도 ····· 52

그 림 차 례

[그림 1] 글로벌 3D 프린팅 시장규모의 전망 (2014년~2022년) ····· 3
[그림 2] 3D 프린팅 발생 시스템 모식도 ····· 6
[그림 3] 3D 프린팅 발생장치 발생모습 ····· 7
[그림 4] 시중 3D 프린터 제품 및 사양 ····· 10
[그림 5] 기성 제품 발생조건의 시간에 따른 농도 변화 ····· 15
[그림 6] 기성 제품 발생조건의 시간에 따른 입자크기 분포 ····· 16
[그림 7] 노즐 토출 온도에 따른 농도 ····· 19
[그림 8] 노즐 토출 온도에 따른 입자크기 분포 ····· 20
[그림 9] 노즐 토출 직경에 따른 농도 ····· 24
[그림 10] 노즐 직경 크기에 따른 농도 분포 ····· 25
[그림 11] 노즐 토출 속도에 따른 농도 변화 ····· 26
[그림 12] 노즐 토출 속도에 따른 농도 ····· 30
[그림 13] 노즐 토출 속도에 따른 입자크기 분포 ····· 31
[그림 14] 노즐 수량에 따른 농도 변화 ····· 32
[그림 15] 노즐 수량에 따른 농도 ····· 35
[그림 16] 노즐 수량에 따른 입자크기 분포 ····· 36
[그림 17] 공기 유량에 따른 농도 변화 ····· 37
[그림 18] 공기 유량에 따른 농도 ····· 40
[그림 19] 공기유량에 따른 입자크기 분포 ····· 41
[그림 20] 최적 발생 조건에서의 농도 변화 및 분포 ····· 43
[그림 21] ELPI+ 단계에 따른 입자 포집 유형 ····· 48
[그림 22] ELPI+에 의한 ABS의 MMAD 및 GSD ····· 50

[그림 23] ELPI+에 의한 ABS의 입자 수 농도 및 중량 농도 변화 ····· 51
[그림 24-1] SEM에 의한 Plate 별 입자 형태 ····· 53
[그림 24-2] SEM에 의한 Plate 별 입자 형태 ····· 54
[그림 24-3] SEM에 의한 Plate 별 입자 형태 ····· 55
[그림 24-4] SEM에 의한 Plate 별 입자 형태 ····· 56
[그림 25-1] TEM을 이용한 입자 형태 ····· 57
[그림 25-2] TEM을 이용한 입자 형태 ····· 58
[그림 26] ELPI+ 입자 포집 원리 ····· 60
[그림 27] 노즐 토출 온도에 따른 발생챔버 내 필라멘트 적층 모습 ·· 64
[그림 28] 전자현미경을 이용한 ABS 수지의 입자 형태 ····· 65

Ⅰ. 서 론

1. 연구배경

수년전까지만 하여도 꿈같이 여겨졌던 가상현실(virtual reality, VD), 빅데이터, 인공지능(artificial intelligence, AI), 무인 운송수단, 사물인터넷(Internet of things) 등의 디지털 기술을 활용한 산업이 나날이 발전하고 있으며, 우리는 현재 이 현실 속에 살아가고 있다. 4차 산업혁명시대는 산업구조도 복잡·다양화 되어가고 있으며, 3D 프린터 산업도 그중에 하나이다. 이 3D 프린터 산업이 최근에 출현한 것은 아니다. 약 40년 전인 1981년 일본 히데오 코다마(Hideo Kodama) 박사의 3D 프린터에 대한 아이디어와 보고서를 시초로 볼 수 있으며, 1984년 미국의 콜로라도 출신인 찰스 헐(Charles W. Hull)이 광경화성 수지를 활용하여 제품을 개발하면서 세상에 첫 선을 보였다. 이후 1988년 미국 미네소타주의 스콧 크럼프(S. Scott Crump)는 자녀를 위하여 장난감을 손수 만들었는데, 글루건(glue gun)을 사용하여 원통형 고체 접착제를 녹여서 붙이는 방식이었다. 이것이 오늘날 용융 적층 모델링(Fused Deposition Modeling, FDM) 방식의 시초가 되었다(이성배, 2018). 3D프린터가 구체화된 것은 지금으로부터 30년 전이라고 할 수 있으나, 3D 프린팅 기술 특허의 권리 보장 기간인 20년으로 규정하고 있는 점과 비용이 많이 드는 점이 대중화에 걸림돌이 되었다. 하지만, FDM 이외에 SLA(Stereo Lithography Apparatus), SLS(Selective Laser Sintering) 분야에서 100여 건의 특허가 만료됨에 따라, 오늘날 3D 프린터 업계에서 가장 많이 쓰이는 세 가지 방식 중심으로 대중화되기 시작하였다. 이중에서 FDM의 3D 프린터 방식이 다른 방식보다 저렴할 뿐만 아니라, 사용하기 용이하고 내구성도 좋아서 전체 3D프린터의 절반이상을 차지할 정도로 널리 사용되고 있다.

3D 프린팅 산업실태조사에서 2017년도 기준으로 기업체 수는 302개, 종사자는 1,893명, 그리고 매출액은 3,469억으로 2015년 이후로 계속적으로 성장하고 있다. 또한 3D 프린팅 산업 활용 현황을 살펴보면, 국내 전국 초·중·고·대학교의 3D 프린터 시스템 도입률에서 대학교는 46.5%, 고등학교는 34.5%, 중학교는 26.9%, 초등학교는 19.2%순이었다. 공공기관의 경우는 30.8%였으며, 재료압출방식이 75.2%, 광중합방식이 12.7%를 이루었다. 수요기업의 경우 3D 프린팅 도입률은 8.7%로 낮게 나타났다. 업종별로

는 의료/치과 업종이 15.3%, 자동차/조선/항공 분야가 11.2%로 나타났고, 재료압출방식이 96.22%를 차지하고 있으며, 필라멘트 소재를 62.7%, 레진을 18.6% 순으로 사용하고 있다(이 등, 2018).

<표 1>은 2016년과 2017년의 국내 3D프린팅 소재에 대한 제품별 시장규모를 나타낸 것이다. 국내 제조 및 유통 비율은 변동이 거의 없어 보이지만, 전체적인 제조와 유통량이 4.6% 증가하고 있는 것을 볼 때 점차 확대되고 있다.

유통시장을 보면 시장규모가 큰 열가소성 플라스틱인 필라멘트가 2016년에는 약 85억원, 2017년에는 약 101억원으로 약 19% 성장하였으며, 광경화성 플라스틱인 레진은 2016년도에 약 103억원, 2017년도에는 약 135억원으로 약 31% 성장하였다. 이를 볼 때 열가소성 플라스틱인 필라멘트를 사용하는 FDM 방식 혹은 FFF(Fused Filament Fabrication)과 광경화성 레진을 사용하는 SLA방식이 많이 사용되고 있음을 알 수 있다.

<표 1> 국내 3D 프린팅 소재제조 제품별 시장규모

(단위 : 백만원)

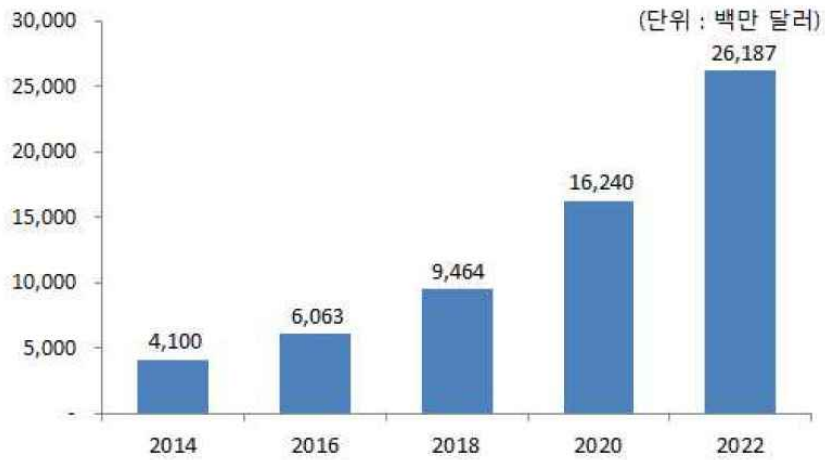
구분			열가소성		광경화성	금속	기타	합계	비율(%)	
			필라멘트	파우더	레진					
2016	제조	국내	1,554	20	743	6	40	2,363	79.1	11.0
		수출	535	0	88	0	0	623	20.9	
		합계	2,089	20	831	6	40	2,986	100.0	
	유통		8,504	2,844	10,265	1,347	1,112	24,071	-	89.0
	전체		10,593	2,864	11,096	1,353	1,152	27,057	-	100.0
2017	제조	국내	2,169	20	1,522	26	60	3,797	79.6	14.6
		수출	810	0	165	0	0	975	20.4	
		합계	2,979	20	1,687	26	60	4,772	100.0	
	유통		10,124	3,554	11,822	1,960	546	28,006	-	85.4
	전체		13,103	3,574	13,509	1,986	606	32,778	-	100.0
증감율 (%)	제조	국내	39.6	0.0	104.8	333.3	50.0	60.7	-	
		수출	51.4	0.0	87.5	0	0.0	56.5	-	
		합계	42.6	0.0	103.0	333.3	50.0	59.8	-	

※ 열가소성 플라스틱 : 용융 압출 조형 방식에서 쉽게 녹여 압출할 수 있도록 가느다란 실가닥처럼 만든 플라스틱류 3D프린팅 원료를 지칭

※ 광경화성플라스틱 : 광경화 조형 방식에서 사용되는 자외선(UV)에 굳는 성질을 가진 액체 상태의 플라스틱류로 3D 프린팅 원료를 지칭하며 '수지' 라고도 지칭

(3D 프린팅 산업실태 및 동향분석 보고서, 2018;36쪽)

세계 3D 프린팅 시장은 각국 정부의 강력한 육성정책, 특허만료 및 관련 기술발전으로 2016년도에 시장규모가 60억 6,300만 달러를 기록하였으며, Wohlers 보고서에서 향후 6년간 3D 프린팅 시작은 연평균 28%의 성장률을 유지하여 2022년에는 2016년의 4배 성장치인 262억 달러에 육박할 것으로 전망하였다(이 등, 2018).



출처: Wohlers Associates, 2017

(3D 프린팅 산업실태 및 동향분석 보고서, 2018;191쪽)

[그림1] 글로벌 3D 프린팅 시장규모 및 전망 (2014-2022년)

이와 같이 향후 3D 프린팅 산업은 크게 증가할 것으로 예측되고 있으며, 3D 프린팅으로 인하여 발생하는 유해인자에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 어떠한 방법으로 어떤 재료를 사용하여 제품을 만들 때 유해물질이 얼마나 발생하고 있는가의 환경평가는 여러 문헌을 통해 접할 수 있다. 이렇게 3D 프린팅 작업시 비의도적으로 발생하는 유해물질인 100 ㎚이하의 초미세 입자와 HAPs에 대한 모니터링에 대한 연구(Stephens 등, 2013; Kim 등, 2015; Deng 등, 2016; Azimi 등, 2016; 박 등, 2018)는 계속적으로 수행되고 있으며 각각의 물질에 대한 유해성은 인지하고 있으나 노출기준은 없다. 그러나, 3D 프린팅 프로세스로 생성된 흡입 입자로 인하여 생체에 어떤 경로로 유입되고 얼마나 건강에 영향을 주는가에 대한 연구는 거의 없다. 최근에 Floyd 등(2017)은 3D 프린터에서 발생하는 흄에 대한 독성평가가 필요하다고 하였으며, 박

등(2018)은 발생 입자의 흡입 노출량을 추정한 연구를 수행하였다. 이에 따라 3D 프린팅 프로세스를 통하여 발생하는 물질에 대한 생체독성의 영향을 직접적으로 평가하는 연구가 필요하다. 이를 위해서 먼저 생체에 노출할 수 있을 정도의 충분한 물질을 발생시키고, 장시간 동안 안정적인 농도를 장시간 유지할 수 있는 발생 시스템 구축이 선행되어야 할 것이다.

2. 연구목적

3D 프린팅 프로세스로 발생된 입자는 화학적으로 안정적이고 불활성인 것으로 간주될 수 있다. 이 때문에 초미세 입자는 생체 지속성(bio-persistant)이 있다는 점, 이 생체 지속성은 입자의 흡입과 밀접한 관련되어 있다(EPA, 2017). 실험실 또는 좁은 방에 설치된 한 대의 3D 프린터에서 발생하는 유해물질의 양은 생체 노출평가를 할 수 있는 만큼 충분하게 발생되지 않는다. 한정된 공간에서 3D프린터 작업시 발생하는 초미세 입자와 HAPs 등의 물질을 고농도, 그리고 일정한 농도로 안정적, 지속적으로 발생시킬 수 있다면 생체 지속성인 초미세 입자를 동물의 호흡기에 노출시켜 생체영향을 평가할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 동물 실험이 가능할 정도로 고농도 독성물질을 발생시킬 수 있는 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하고 동물실험을 위한 최적의 발생조건을 확립하며, 이 시스템을 활용하여 향후 실험동물 등을 활용한 생체영향 연구를 수행하고자 하였다. 더 나아가 3D 프린팅 발생물질에 대한 법적 규제의 근거자료를 제공함으로써 근로자의 건강장해 예방을 도모하고자 하였다.

Ⅱ. 연구방법

1. 프린팅 방식과 시험물질

1) 프린팅 방식

서론에서 언급한 바와 같이 현재 3D프린팅 산업에서 가장 많이 사용하는 방식 중에 하나로 저렴하고 사용하기에도 용이하며, 내구성도 강한 장점을 가지고 있는 용융 적층 모델링 (FDM) 방식이다. 이 FDM 방식으로 대형 사출 성형이 가능하고, 최근에 판매량이 많은 기성 제품 중에 하나를 선정하였다.

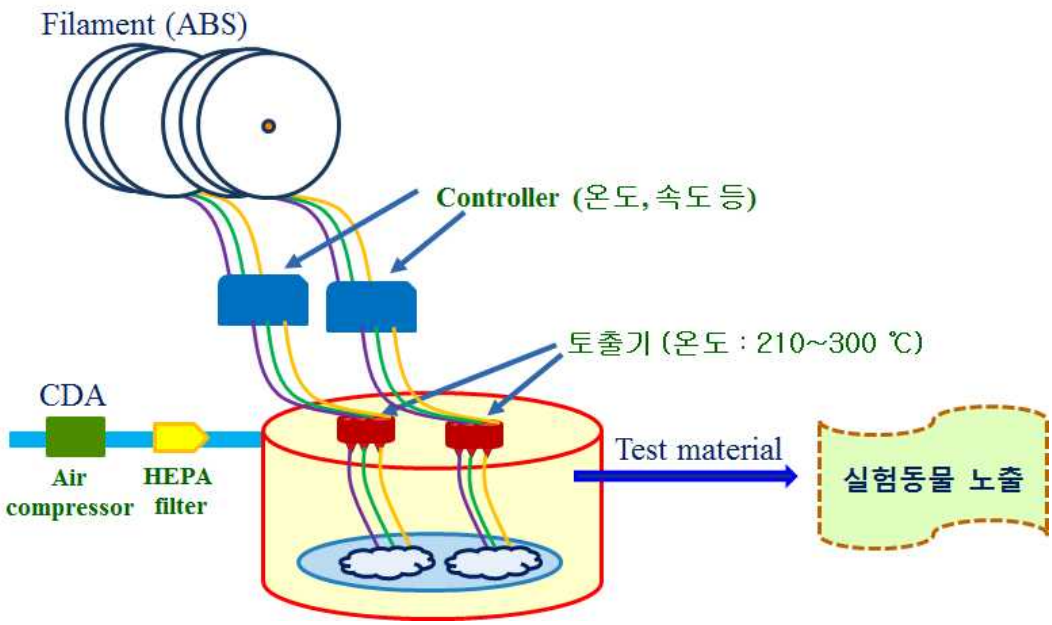
2) 실험 재료

3D프린팅에 사용한 물질은 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)이었다. 일반인의 경우 친환경 소재로 알려진 폴리젖산(PolyLactic Acid, PLA)을 주로 사용하지만, 60℃이상 온도에서는 출력물의 변형이 생길 수 있음으로 산업현장에서는 많이 사용하지는 않는다. 이와 비교하여 ABS는 저렴하고 가공이 용이하며, 내구성이 우수하여 자동차 부품, 헬멧, 전기기기 부품 등의 금속 대용[1]으로 산업현장에서 가장 많이 사용하고 있어서 선정하였다. 그 외에도 Nylon, PVA(Polyvinyl Alcohol), HIPS(High Impact Poly Styrene), Laywood 등은 사용량이 많지 않기 때문에 선정에서 제외하였다.

1) [네이버 지식백과] ABS수지 [acrylonitrile butadiene styrene copolymer] (두산백과)

2. 3D 프린팅 발생 시스템 구축

한정된 공간에 여러 대의 3D 프린터를 설치하는 것과 이 프린터에서 발생하는 물질을 포집하여 동물실험을 하는 것은 매우 비효율적이다. 왜냐하면, 프린터와의 거리에 따라서 입자 크기와 농도도 다르며, 밀폐된 공간에서 3D 프린터를 가동할 경우 시간이 지남에 따라 농도는 계속 바뀌게 되어 평가 자체가 어려울 뿐더러 그 공간에서 동물실험을 위한 가혹한 농도로 발생하는 자체가 불가능하기 때문이다. 따라서, 여러 대의 FDM방식의 프린터 발생부를 하나의 챔버 내에 설치하였으며, 이것에서 초미세 입자를 발생할 수 있도록 3D 프린팅 발생 시스템을 제작하였다. 발생 시스템의 모식도는 [그림 1]에 나타내었으며, 발생장치의 주요 사양은 <표 3>과 같다.



[그림 2] 3D 프린팅 발생 시스템 모식도

<표 2> 3D 프린팅 발생장치 사양

항 목	사 양
발생 방식	FDM
Temperature Control	상온 ~ 300℃ 가능
재료 공급	Filament roll
Air Flow	최대 50 LPM
발생 시스템 크기 (W×D×H, ㎜)	635×220×390

[그림 3] 3D 프린팅 발생장치 발생모습

3. 실험물질 측정 장비

나노입자 크기를 측정하기 위해서 직독식 측정이 가능한 ELPI+(Electronic Low Pressure Impactor, Dekati, Finland), OPC(Optical Particle Counter, Model : 11-A, Grimm Aerosol Tecknik, Germany), 그리고 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, Model : 5.416, Grimm Aerosol Tecknik, Germany) 장비를 이용하였다. 발생시간 동안 모니터링은 SMPS로 입자 수 농도, 질량농도, 그리고 표면적 농도를 측정하였으며, 투과전자현미경(TEM : Transmission Electron Microscope, Model : H-7100FA, Hitachi-Instruments, Japan)과 주사전자현미경(SEM : Scanning Electron Microscope, Model : S-3000N, Hitachi-Instruments, Japan)을 사용하여 공기 중 입자의 형태와 크기를 분석하였다. 아울러, ELPI+ 및 개인시료 채취용 펌프를 이용하여 필터 중량법의 중량 농도를 측정하였다.

1) 발생농도 측정

실시간 발생농도를 측정하기 위해서 사용한 장비는 ELPI+, OPC, 그리고 SMPS이었다. 이 중 발생 모니터링을 위하여 SMPS를 주 장비로 사용하였으며, ELPI+와 OPC는 수치 비교를 위한 보조 장비로 사용하였다. 아울러, 필터 중량법으로 발생 농도를 측정하여 상기의 장비의 측정값과 비교하였다.

2) 측정 장비

(1) ELPI+[2)]

ELPI+는 공기 중 입자 수 농도를 코로나 충전기로 입자를 대전시켜 구간별 일정한 크기로 측정할 수 있는 장비이다. 공기 유량은 10 L/min를 사용하며, 포집된 공기 중

2) ELPI+ user manual Ver. 1.12, Dekati Ltd., 2011

입자는 14개의 단계로 구성된 캐스케이드 임팩터에 6 ㎚~10 ㎛ 범위의 입자를 크기별로 측정하였다. 필터는 greased aluminium foil(CFG-225, Dekati, Finland)를 장착하였다. Aluminium foil filter의 장착 전·후의 무게를 측정하여 필터 중량법에 의한 중량농도를 측정하였다.

(2) OPC

OPC는 0.25 ㎛~32 ㎛ 범위의 공기 중의 입자를 광학장치를 이용하여 측정할 수 있는 장비이다. 장비 후단에는 Teflon 필터(1.2㎛, 47㎜, Grimm Aerosol Tecknik, Germany)를 장착하였으며, SMPS로 측정할 수 없는 범위를 커버하였다.

(3) SMPS

SMPS는 Long DMA(Differential Mobility Analyzer)를 사용하여 전기장을 통과하는 입자의 전기적 특성을 이용하여 5 ㎚~1 ㎛의 크기로 분류하고 계수하는 장비이다. CPC로 입자를 응축시킨 후 광학검출기로 감지하여 입자 수 농도 등 에어로졸의 입경분포를 측정하였다. 중화기(neutralizer)는 Am-241을 장착하여 입자의 하전을 중화시켜 사용하였다.

(4) 개인시료 채취기 및 PVC 필터

필터 중량법으로 중량 농도를 측정하기 위하여 개인시료 채취기(Air Chek XR, SKC, USA)와 PVC 필터(5.0 ㎛, 37 ㎜, SKC, USA)를 이용하였다.

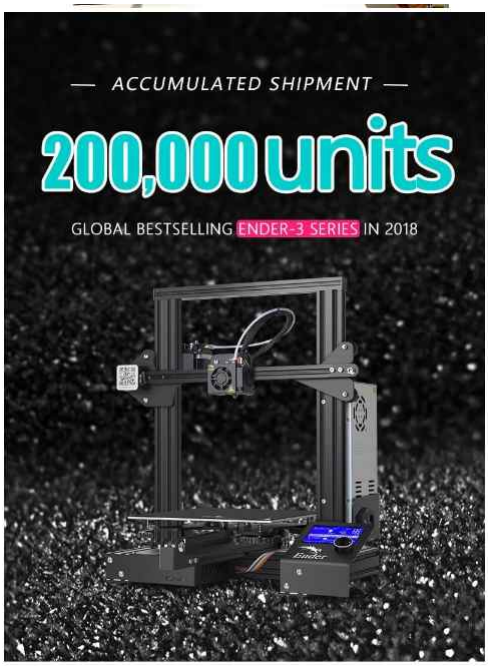
(5) 전자 현미경

실험물질이 어떠한 형태로 발생되었는지 투과전자현미경과 주사전자현미경으로 분석하였다.

4. 실험 방법

1) 기성 제품 발생 조건

시중에서 판매량이 많은 FDM방식의 3D 프린터 중에 하나의 제품(Ender-3 Pro Series 3D 프린터, Shenzhen Creality3D Technology Co. LTD., China)을 표준으로 발생 시스템을 구성하였으며, 제조사에서 권장하는 표준 노즐 직경은 0.4 ㎜이고, 사용하는 ABS 필라멘트(SGS, White color ABS filament, Diameter 1.75 ㎜, RoHS, China)의 요구한 토출 노즐 온도가 230℃~250℃이었다. 이에 따라, 노즐 직경은 0.4 ㎜, 노즐 온도는 240℃로 발생시키는 것을 기준으로 실험을 수행하였다.



Machine model	Ender-3
Molding technology	FDM(Fused Deposition Molding)
Printing size	220*220*250mm
Printing speed	≤180mm/s, normal 30-60mm/s
Printing precision	±0.1mm
Nozzle diameter	standard 0.4mm, can be in 0.3 or 0.2mm
Hotbed temperature	≤100℃
Working mode	Online or SD card offline
File format	STL, OBJ, AMF
Slicing software	Cura/Repetier-Host/Simplify3D
Power supply	input: AC 100-120V/6.8A 200-240V/3.4A 50/60HZ output: DC 24V 270W
Filament	1.75mm PLA, ABS, TPU, wood, copper, gradient, etc.
N.W.	7.6kg
Machine size	440*410*465mm
G.W.	8kg
Packaging size	510*400*190mm

[그림 4] 시중 3D 프린터 제품 및 사양

2) 발생 조건

(1) 토출 온도 변경

ABS 필라멘트 제품 제조사에서 요구하는 노즐 토출 온도인 240℃를 포함하여 210℃, 240℃, 270℃, 그리고 300℃에서 실험을 수행하였다.

(2) 노즐 직경 변경

제품 제조사에서 표준으로 권장하는 노즐 직경인 0.4 ㎜를 포함하여 0.2 ㎜, 0.4 ㎜, 0.6 ㎜, 0.8 ㎜, 1.0 ㎜, 그리고 1.2 ㎜에서 실험을 수행하였다.

(3) 토출 속도 변경

기성제품에서 요구하는 노즐 토출속도가 없었으나, 압출기(extruder) stepper의 조정 가능한 5 level을 기준으로 하였으며, 8 level, 10 level, 12 level, 그리고 15 level의 노즐 토출 속도로 실험을 수행하였다.

(4) 노즐 수량 변경

FDM 방식의 3D 프린터 한대에는 하나의 노즐을 사용하고 있다. 한정된 공간에 여러 대의 3D 프린터 효과를 얻고자 시스템을 구성하였으며, 이에 따라 노즐 수량을 1대, 2대, 4대, 그리고 6대로 하여 실험을 수행하였다.

(5) 공기 유량 변경

공급되는 공기 유량을 질량유량제어기(MFC : Mass Flower Controller)를 이용하여 20 LPM, 30 LPM, 40 LPM, 그리고 50 LPM에서 실험을 수행하였다.

(6) 동물실험 발생 조건

상기 조건의 실험 결과를 토대로 동물실험 노출 실험을 위한 안정적, 지속적으로 발생시킬 수 있는 조건에서 실험을 하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 3D 프린팅 시스템 발생 조건

시중에서 판매량이 많은 제품 중에 하나를 선택하고 발생 시스템을 구축하였으며, 제조사에서 표준으로 권장하는 사용 조건인 노즐직경 0.4 ㎜로 하였다. 또한, 사업장에서 많이 사용하는 재료인 ABS 필라멘트를 사용하였으며, 재료의 제조사에서 권장하는 노즐 추출 온도인 240℃에서 실험을 수행하였다. 노즐의 온도 변화는 세팅한 온도에서 ±14℃(226℃～252℃)이었다.
먼저 노즐 토출 직경과 노즐 토출 온도, 노즐 토출 속도, 그리고 공기유량을 세팅한 다음, 발생장치를 가동하였다. 공급 공기가 설정된 유량으로 발생되면, SMPS 등 입자 농도측정 장비를 연결하고 3D 프린팅 발생챔버 내의 background 농도를 약 30분간 모니터링 하였다. 이후 노즐 heater에 전원을 인가하여 노즐이 세팅된 온도에 도달하게 되면 압출기를 가동하여 발생을 시작하였다.

(1) 기성품 발생 조건 실험

3D 프린팅 발생 시스템의 발생조건을 확립하기 위하여 먼저, 시중의 3D 프린터 제조사에서 권장하는 운용조건으로 실험하였으며, 이를 토대로 향 후 장시간 동안 안정적으로 실험동물에게 실험물질을 발생시키는 조건과 비교하고자 하였다. 노즐의 토출 직경은 0.4 ㎜, 노즐의 토출 온도는 240℃, 챔버 내 공급유량은 30 LPM, 그리고, 노즐의 토출 속도 10 level에 의하여 속도가 조절되는 excluder stepper 6 대에 대하여 1 cycle을 각각 3번 이상 측정하여 평균치를 계산하였다.
<표 3>은 기성 제품 발생조건의 농도 측정 결과를 나타낸 것이다. 안정적으로 유지되는 발생시간대의 입자 수 농도는 ccm당 전체 평균 개수는 2,223,332 개(370,555 개/CH)이었고, 직경 크기 최빈값(mode)은 81.53 ㎚, 입자 수 농도 중위직경(CMD : Count Median Diameter)은 76.58 ㎚, 그리고 기하학평균 크기는 73.74 ㎚이었다. 질량농도는 ㎥당 전체 평균 질량은 1,083.65 ㎍(180.61 ㎍/CH)이었으며, 직경 크기 최빈값

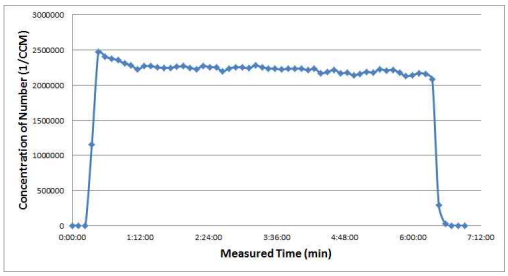
은 129.02 ㎚, 공기역학적질량중앙직경(MMAD : Mass Median Aerodynamic Diameter)은 125.51 ㎚, 그리고 기하학평균 크기는 129.38 ㎚이었다. 표면적 농도의 경우 ㎤당 전체 평균 표면적은 55,857.03 ㎛² (9,309.5 ㎛²/CH)이었으며, 직경 크기 최빈값은 113.75 ㎚, 중위직경은 108.65 ㎚, 그리고 기하학평균 크기는 106.33 ㎚이었다. 이때의 토출속도는 1 cycle당 평균 51.89초 이었다.

<표 3> 기성 제품 발생조건의 농도 측정 결과

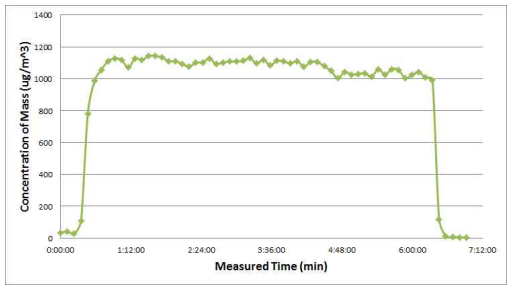
Concentration	Total (unit)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.
Number	2,223,332 (1/ccm)	81.53	76.58	73.74	1.60
Mass	1,083.65 (㎍/㎥)	129.02	125.51	129.38	1.67
Surface	55,857.03 (㎛²/㎤)	113.75	108.65	106.33	1.50

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle mean 51.89 sec, 1~6 CH)

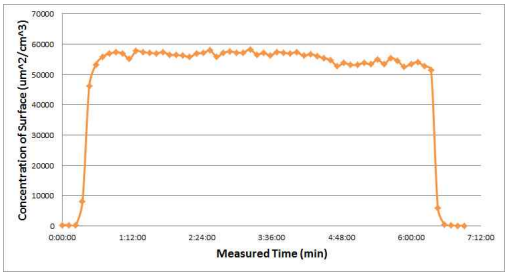
[그림 5]는 기성 제품 발생조건의 시간에 따른 농도 변화를 나타낸 것이다. 챔버 내 입자 수 농도는 발생시작 직후 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였으며 발생시작 후 약 60분부터 큰 변화 없이 안정적으로 유지되었다. 중량농도와 표면적 농도는 발생시작 후 서서히 증가하였다가 약 60분 후부터 안정적으로 발생하였다.



(a) Concentration of Number



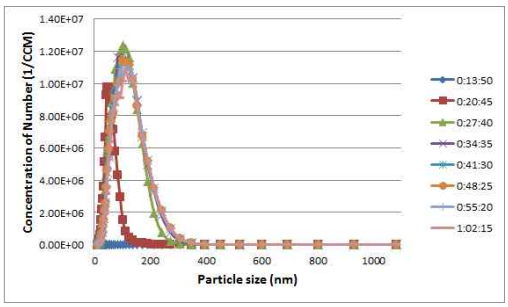
(b) Concentration of Mass



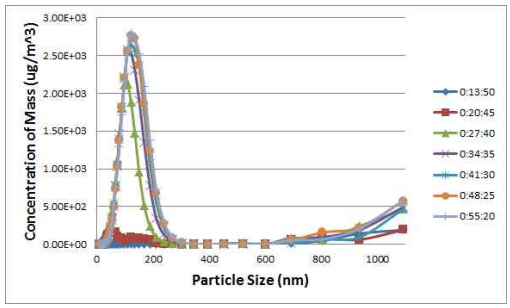
(c) Concentration of Surface

[그림 5] 기성 제품 발생조건의 시간에 따른 농도 변화

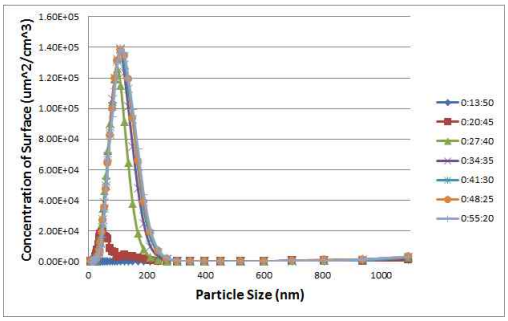
[그림 6]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 발생시간에 따른 농도변화를 나타낸 것이다. 입자 수 농도의 경우에는 (a)에서 발생시작 직후에 크기가 작은 70 ㎚ 정도의 입자가 많이 발생하다가 점차 큰 140 ㎚ 정도의 입자가 발생되었다. (b)에서 질량 농도의 경우도 발생시작 직후에 크기가 작은 90 ㎚ 정도의 입자가 많이 발생하다가 점차 큰 120 ㎚ 정도의 입자가 측정되었다. 아울러, 질량 농도에서는 400 ㎚~900 ㎚의 입자가 측정되지 않다가 1.0 ㎛ 크기의 입자가 측정되었다. (c)에서 표면적 농도의 경우도 발생시작 직후에 크기가 작은 50 ㎚ 정도의 입자가 많이 발생하다가 점차 큰 110 ㎚ 정도의 입자가 측정되었다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Number



(c) Concentration of Mass

[그림 6] 기성품 발생조건의 시간에 따른 입자크기 분포

2. 다중 3D 프린팅 시스템 조건 변경 실험

(1) 토출 온도

ABS 필라멘트 제품 제조사에서 권장하는 토출 온도인 240℃를 포함하여 210℃, 240℃, 270℃, 그리고 300℃로 실험을 수행하였다. 발생시작 후 약 25분 후부터 안정적으로 발생하였다.

<표 4>는 노즐 토출 온도에 따른 입자 수 농도 결과이다. 실험결과, 각 온도에서 입자 수 농도 결과를 보면 ccm당 전체 평균 개수는 210℃에서 204,089개, 240℃에서

1,819,859개, 270℃에서 3,099,369개, 그리고 300℃에서 4,739,316개 이었다. 직경 크기 최빈값은 210℃에서 74.31 ㎚, 240℃에서 74.86 ㎚, 270℃에서 80.71 ㎚, 그리고 300℃에서 91.25 ㎚이었다. CMD의 경우 210℃에서 71.55 ㎚, 240℃에서 69.21 ㎚, 270℃에서 76.10 ㎚, 그리고 300℃에서 86.78 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 210℃에서 69.27 ㎚, 240℃에서 66.39 ㎚, 270℃에서 73.45 ㎚, 그리고 300℃에서 84.38 ㎚이었다. 이때의 토출속도는 1 cycle당 노즐 토출 온도가 210℃의 경우 평균 210초, 240℃의 경우 평균 62.08초, 270℃의 경우 평균 42.33초 그리고 300℃의 경우 평균 37.56초 이었다.

<표 4> 토출 온도에 따른 입자 수 농도

Temperature (℃)	Total (1/ccm)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
210	204,089	74.31	71.55	69.27	1.58	210.00
240	1,819,859	74.86	69.21	66.39	1.58	62.08
270	3,099,369	80.71	76.10	73.45	1.61	42.33
300	4,739,316	91.25	86.78	84.38	1.63	37.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Inlet Air : 30 LPM,
Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

<표 5>는 노즐 토출 온도에 따른 중량 농도 결과이다. 각 온도에서 질량 농도 결과를 보면 ㎥당 전체 평균 질량은 210℃에서 82.18 ㎍, 240℃에서 614.89 ㎍, 270℃에서 1,564.80 ㎍, 그리고 300℃에서 3,848.34 ㎍ 이었다. 직경 크기 최빈값은 210℃에서 117.33 ㎚, 240℃에서 111.33 ㎚, 270℃에서 126.63 ㎚, 그리고 300℃에서 173.24 ㎚이었다. MMAD의 경우 210℃에서 118.39 ㎚, 240℃에서 109.48 ㎚, 270℃에서 129.19 ㎚, 그리고 300℃에서 155.31 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 210℃에서 143.75 ㎚, 240℃에서 128.63 ㎚, 270℃에서 153.55 ㎚, 그리고 300℃에서 154.32 ㎚이었다.

<표 5> 토출 온도에 따른 중량 농도

Temperature (℃)	Total (μg/㎥)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
210	82.18	117.33	118.39	121.54	1.63	210.0
240	614.89	111.33	109.48	110.90	1.57	62.08
270	1,564.80	126.63	129.19	130.95	1.62	42.33
300	3,848.34	173.24	155.31	154.32	1.57	37.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Inlet Air : 30 LPM,
Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

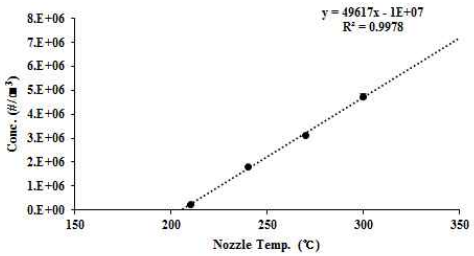
<표 6>은 노즐 토출 온도에 따른 표면적 농도 결과이다. 각 온도에서 표면적 농도 결과를 보면 ㎤당 전체 평균 표면적은 210℃에서 4,500.06 ㎛^{2}, 240℃에서 36,305.44 ㎛^{2}, 270℃에서 79.108.41 ㎛^{2}, 그리고 300℃에서 164.382.26 ㎛^{2}이었다. 직경 크기 최빈값은 210℃에서 100.68 ㎚, 240℃에서 99.26 ㎚, 270℃에서 120.21 ㎚, 그리고 300℃에서 136.85 ㎚이었다. 중위직경(median)의 경우 210℃에서 100.16 ㎚, 240℃에서 95.60 ㎚, 270℃에서 111.08 ㎚, 그리고 300℃에서 131.75 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 210℃에서 99.97 ㎚, 240℃에서 93.87 ㎚, 270℃에서 108.48 ㎚, 그리고 300℃에서 128.16 ㎚이었다.

<표 6> 토출 온도에 따른 표면적 농도

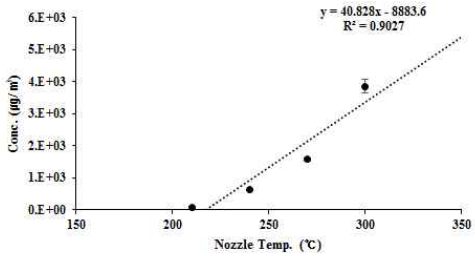
Temperature (℃)	Total (㎛^{2}/㎤)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
210	4500.06	100.68	100.16	99.97	1.51	210.0
240	36,305.44	99.26	95.60	93.87	1.48	62.08
270	79,108.41	120.21	111.08	108.48	1.52	42.33
300	164,382.26	136.85	131.75	128.16	1.53	37.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Inlet Air : 30 LPM,
Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

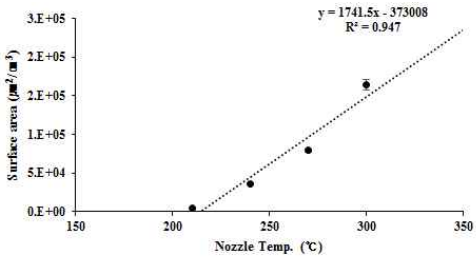
[그림 7]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 노즐 토출 온도에 따른 농도를 나타낸 것이다. R^2 값은 입자 수 농도의 경우 0.998, 질량 농도의 경우 0.903, 그리고 표면적 농도의 경우는 0.947이었으며, 모두 양의 상관관계로 선형성을 보였으며, 온도가 올라갈수록 발생 농도도 높아지는 경향을 볼 수 있다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass

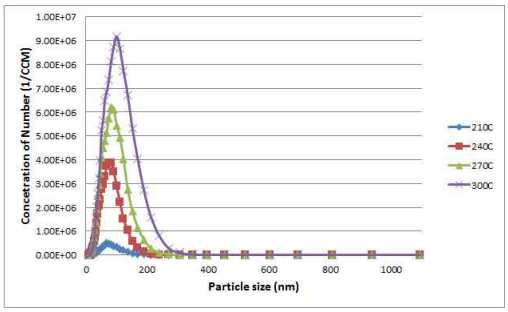


(c) Concentration of Surface

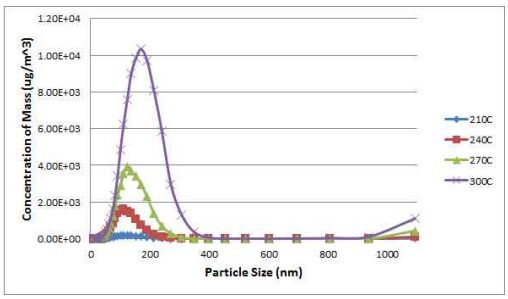
[그림 7] 노즐 토출 온도에 따른 농도

[그림 8]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 온도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 노즐의 온도가 210℃의 경우는 발생량이 매우 적었으며, 노즐 토출 온도가 올라감에 따라 발생량은 증가하였다. (a)에서 챔버 내 수 농도는 70 ㎚ 정도의 입자 크기가 많이 발생하였으나, 노즐 토출 온도가 증가함에 따라 90 ㎚ 정도의 입자 크기가 더 많이 발생하였다. (b)에서 질량 농도의 경우도 노즐의 온도가 210℃일 때 110 ㎚ 정도의 입자 크기가 많이 발생하였으나, 노즐 토출 온도가 300℃까지 올라가게 되면 170 ㎚ 크기의 입자가 더 많이 발생하였다. 아울러, 질량 농도에서는 400 ㎚~900 ㎚의 입자 크기가 측정되지 않다가 1.0 ㎛ 크기의 입자가 측정되었다. (c)에서 표면적 농도의 경우도 노즐의 온도가 210℃의 경우는 추출이 잘 되지 않아서

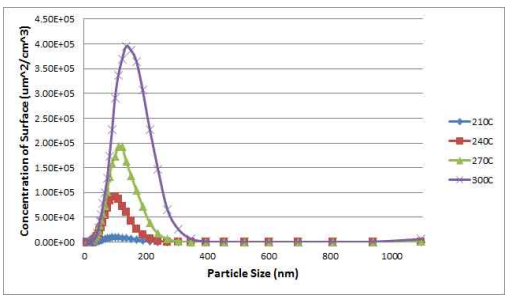
적었으며, 100 ㎚ 정도의 입자 크기가 많이 발생되었고, 노즐 토출 온도가 240℃이후부터 온도가 증가함에 따라 발생량도 증가하여 300℃에서는 140 ㎚ 정도의 입자 크기가 많이 발생하였다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass



(c) Concentration of Surface

[그림 8] 노즐 토출 온도에 따른 입자크기 분포

(2) 노즐 직경

노즐의 직경을 0.2 ㎜, 0.4 ㎜, 0.6 ㎜, 0.8 ㎜, 1.0 ㎜, 그리고 1.2 ㎜으로 발생 실험을 수행하였다. 단, 노즐의 온도가 300℃ 조건에서 수행하였으며, 일반적으로 발생시작 후 약 60분 후부터 안정적으로 발생하였다.

<표 7>은 각 노즐 직경에서 크기에 따른 입자 수 농도 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과, ccm당 전체 평균 개수는 0.2 ㎜에서 5,056,591개, 0.4 ㎜에서 5,990,712개, 0.6 ㎜에서 6,216,421개, 0.8 ㎜에서 5,461,262개, 1.0 ㎜에서 5,380,212개, 그리고 1.2 ㎜에서

5,056,728개 이었다. 직경 크기 최빈값은 0.2 ㎜에서 104.22 ㎚, 0.4 ㎜에서 107.18 ㎚, 0.6 ㎜에서 106.27 ㎚, 0.8 ㎜에서 105.21 ㎚, 1.0 ㎜에서 111.61 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 106.40 ㎚이었다. CMD의 경우 0.2 ㎜에서 91.93 ㎚, 0.4 ㎜에서 98.65 ㎚, 0.6 ㎜에서 94.30 ㎚, 0.8 ㎜에서 92.68 ㎚, 1.0 ㎜에서 96.49 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 92.72 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 0.2 ㎜에서 88.69 ㎚, 0.4 ㎜에서 95.36 ㎚, 0.6 ㎜에서 91.71 ㎚, 0.8 ㎜에서 89.64 ㎚, 1.0 ㎜에서 93.44 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 89.65 ㎚이었다. 이때의 노즐 토출 속도는 1 cycle당 노즐 직경이 0.2 ㎜의 경우 평균 42.11초, 0.4 ㎜의 경우 평균 40.17초, 0.6 ㎜의 경우 38.72초, 0.8 ㎜의 경우 평균 42.50초, 1.0 ㎜의 경우 평균 42.22초, 그리고 1.2㎜의 경우 평균 45.67초 이었다.

<표 7> 노즐 직경 크기에 따른 입자 수 농도

Nozzle size (㎜)	Total (1/ccm)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
0.2	5,056,591	104.22	91.93	88.69	1.63	42.11
0.4	5,990,712	107.18	98.65	95.36	1.66	40.17
0.6	6,216,421	106.27	94.30	91.71	1.66	38.72
0.8	5,461,262	105.21	92.68	89.64	1.64	42.50
1.0	5,390,212	111.61	96.49	93.44	1.64	42.22
1.2	5,056,728	106.40	92.72	89.65	1.63	45.67

Material : ABS filament, Nozzle Temp. : 300℃, Inlet Air : 30 LPM,
Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

<표 8>은 노즐 직경 크기에 따른 중량 농도 결과이다. 각 노즐 직경에서 질량 농도 결과를 보면 m^3당 전체 평균 질량은 0.2 ㎜에서 4,627.65 ㎍, 0.4 ㎜에서 7,379.50 ㎍, 0.6 ㎜에서 6,903.58 ㎍, 0.8 ㎜에서 5,292.41 ㎍, 1.0 ㎜에서 5,934.23 ㎍, 그리고 1.2 ㎜에서 4,816.81 ㎍이었다. 직경 크기 최빈값은 0.2 ㎜에서 169.89 ㎚, 0.4 ㎜에서 188.85 ㎚, 0.6 ㎜에서 188.49 ㎚, 0.8 ㎜에서 178.83 ㎚, 1.0 ㎜에서 179.95 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 171.95 ㎚이었다. MMAD의 경우 0.2 ㎜에서 159.16 ㎚, 0.4 ㎜에서 179.93 ㎚, 0.6 ㎜에서 175.26 ㎚, 0.8 ㎜에서 164.01 ㎚, 1.0 ㎜에서 171.21 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 162.11 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 0.2 ㎜에서 159.29 ㎚, 0.4 ㎜에서 179.64 ㎚, 0.6

㎜에서 173.52 ㎚, 0.8 ㎜에서 163.18 ㎚, 1.0 ㎜에서 171.01 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 161.19 ㎚이었다.

<표 8> 노즐 직경 크기에 따른 중량 농도

Nozzle size (㎜)	Total (㎍/㎥)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
0.2	4,627.65	169.89	159.16	159.29	1.57	42.11
0.4	7,379.50	188.85	179.93	179.64	1.59	40.17
0.6	6,903.58	188.49	175.26	173.52	1.57	38.72
0.8	5,292.41	178.83	164.01	163.18	1.57	42.50
1.0	5,934.23	179.95	171.21	171.01	1.58	42.22
1.2	4,816.81	171.95	162.11	161.19	1.56	45.67

Material : ABS filament, Nozzle Temp. : 300℃, Inlet Air : 30 LPM,
Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

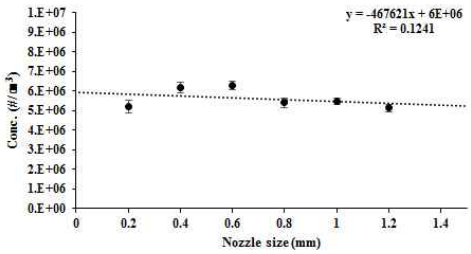
<표 9>는 노즐 직경 크기에 따른 표면적 농도 결과이다. 각 노즐 직경에서 표면적 농도 결과를 보면 ㎤당 전체 평균 표면적은 0.2 ㎜에서 191,200.81 ㎛^{2}, 0.4 ㎜에서 272,095.56 ㎛^{2}, 0.6 ㎜에서 262.815.50 ㎛^{2}, 0.8 ㎜에서 213,526.99 ㎛^{2}, 1.0 ㎜에서 229,157.68 ㎛^{2}, 그리고 1.2 ㎜에서 196,302.16 ㎛^{2} 이었다. 직경 크기 최빈값은 0.2 ㎜에서 139.73 ㎚, 0.4 ㎜에서 158.07 ㎚, 0.6 ㎜에서 158.70 ㎚, 0.8 ㎜에서 147.59 ㎚, 1.0 ㎜에서 155.23 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 148.09 ㎚이었다. 중위직경의 경우 0.2 ㎜에서 136.33 ㎚, 0.4 ㎜에서 152.38 ㎚, 0.6 ㎜에서 148.08 ㎚, 0.8 ㎜에서 139.74 ㎚, 1.0 ㎜에서 146.04 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 138.87 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 0.2 ㎜에서 132.87 ㎚, 0.4 ㎜에서 147.97 ㎚, 0.6 ㎜에서 143.38 ㎚, 0.8 ㎜에서 135.83 ㎚, 1.0 ㎜에서 141.74 ㎚, 그리고 1.2 ㎜에서 134.83 ㎚이었다.

<표 9> 노즐 직경 크기에 따른 표면적 농도

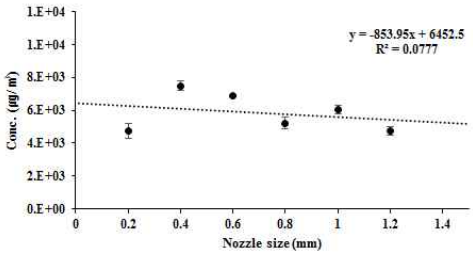
Nozzle size (㎜)	Total ($\mu m^2/cm^3$)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
0.2	191,200.81	139.73	136.33	132.87	1.52	42.11
0.4	272,095.56	158.07	152.38	147.97	1.54	40.17
0.6	262,815.50	158.70	148.08	143.38	1.55	38.72
0.8	213,526.99	147.59	139.74	135.83	1.53	42.50
1.0	229,157.68	155.23	146.04	141.74	1.53	42.22
1.2	196,302.16	148.09	138.87	134.83	1.52	45.67

Material : ABS filament, Nozzle Temp. : 300℃, Inlet Air : 30 LPM,
Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

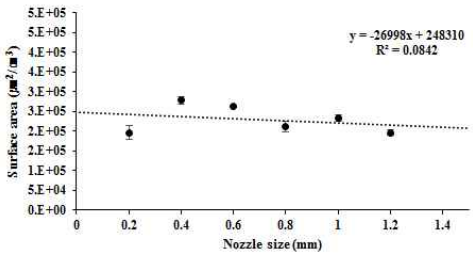
[그림 9]는 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 노즐 토출 크기에 따른 농도를 나타낸 것이다. R^2 값은 입자 수 농도의 경우 0.1241, 질량 농도의 경우 0.0777, 그리고 표면적 농도의 경우는 0.0842이었으며, 기울기가 모두 음의 상관관계로 선형성을 보였으며, 노즐 토출 크기가 올라갈수록 발생 농도는 낮아지는 경향을 볼 수 있다.



(a) Concentration of Number



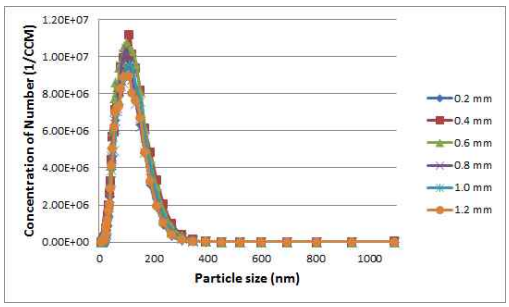
(b) Concentration of Mass



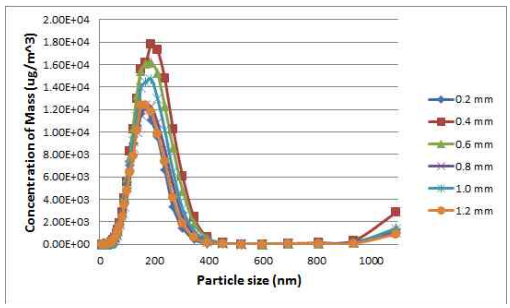
(c) Concentration of Surface

[그림 9] 노즐 토출 직경에 따른 농도

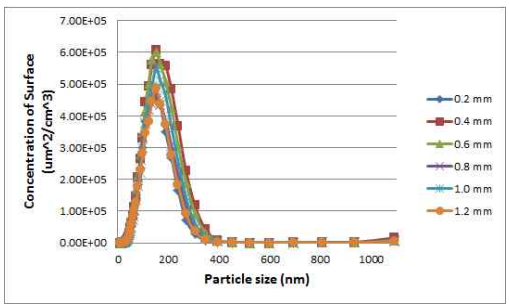
[그림 10]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도에서 노즐의 직경 크기에 따른 농도 분포를 나타낸 것이다. 입자 수 농도의 경우를 살펴보면 (a)에서 챔버 내 입자 수 농도는 노즐의 직경이 0.6 ㎜ 일 때 발생 농도가 가장 높았다. (b)에서 질량 농도의 경우는 노즐의 직경이 0.4 ㎜ 일 때 발생 농도가 가장 높았으며, (c)에서 표면적 농도의 경우도 노즐의 직경이 0.4 ㎜ 일 때 발생 농도가 가장 높았다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass



(c) Concentration of Surface

[그림 10] 노즐 직경 크기에 따른 농도 분포

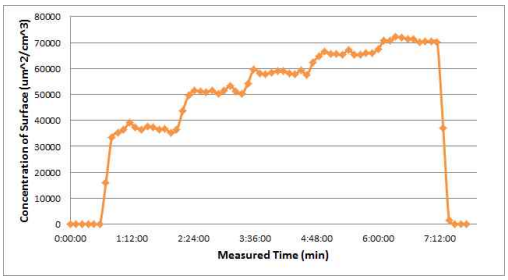
(3) 토출 속도

압출기(extruder) stepper의 level로 노즐의 토출 속도를 조절할 수 있다. 5 level, 8 level, 10 level, 12 level, 그리고 15 level로 노즐의 토출 속도에 따른 실험을 수행하였으며, 발생시작 후 약 50분 후부터 안정적으로 발생하였다.

[그림 11]은 노즐의 토출 속도 변경에 따른 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도를 나타낸 것이다. (a)에서 발생 직후에 입자 수 농도의 경우는 크게 증가하였다가 낮아지면서 안정화되는 양상을 보였으며, 노즐 토출 속도가 증가함에 따라 농도도 증가하였다. (b)의 질량 농도의 경우는 발생 직후에도 크게 증가하지 않고 서서히 증가하면서 안정화되었으며, 노즐 토출 속도가 증가함에 따라 농도도 증가하였다. (c)의 표면적 농도의 경우도 질량 농도와 비슷한 양상을 보여, 발생 직후에 크게 증가하지 않고 서서히 증가하면서 안정화되었으며, 노즐 토출 속도가 증가함에 따라 농도도 증가하였다.

(a) Concentration of Number

(b) Concentration of Mass



(c) Concentration of Surface

[그림 11] 노즐 토출 속도에 따른 농도 변화

<표 10>은 노즐 토출 속도에 따른 입자 수 농도 결과이다. 각 노즐의 토출 속도에서 입자 수 농도 결과를 보면 ccm당 전체 평균 개수는 5 level에서 1,763,220개, 8 level에서 2,130,407개, 10 level에서 2,261,550개, 12 level에서 2,415,746개, 그리고 15 level에서 2,459,370개 이었다. 직경 크기 최빈값은 5 level에서 77.30 ㎚, 8 level에서 79.85 ㎚, 10 level에서 87.12 ㎚, 12 level에서 84.18 ㎚, 그리고 15 level에서 87.50 ㎚이었다. CMD의 경우 5 level에서 70.60 ㎚, 8 level에서 75.93 ㎚, 10 level에서 78.29 ㎚, 12 level에서 80.06 ㎚, 그리고 15 level에서 82.30 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 5 level에서 67.67 ㎚, 8 level에서 72.74 ㎚, 10 level에서 74.92 ㎚, 12 level에서 76.87 ㎚, 그리고 15 level에서 78.97 ㎚이었다. 이때의 토출속도는 1 cycle당 토출속도 5 level의 경우 평균 86.38초, 8 level의 경우 평균 56.22초, 10 level의 경우 평균 45.33초, 12 level의 경우 평균 41.17초, 그리고 15 level의 경우 평균 37.56초 이었다.

<표 10> 노즐 토출 속도에 따른 입자 수 농도

Excluder speed (level)	Total (1/ccm)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
5	1,763,220	77.30	70.60	67.67	1.59	86.38
8	2,130,407	79.85	75.93	72.74	1.59	56.22
10	2,261,550	87.12	78.29	74.92	1.60	45.33
12	2,415,746	84.18	80.06	76.87	1.60	41.17
15	2,459,370	87.50	82.30	78.97	1.60	37.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 5~15 Level (1 cycle, 1~6 CH)

<표 11>은 노즐 토출 속도에 따른 질량 농도 결과이다. 각 노즐의 토출 속도에서 질량 농도 결과를 보면 ㎥당 전체 평균 질량은 5 level에서 627.23 ㎍, 8 level에서 949.51 ㎍, 10 level에서 1,126.85 ㎍, 12 level에서 1,308.85 ㎍, 그리고 15 level에서 1,457.94 ㎍이었다. 직경 크기 최빈값은 5 level에서 115.18 ㎚, 8 level에서 123.22 ㎚, 10 level에서 129.28 ㎚, 12 level에서 138.40 ㎚, 그리고 15 level에서 141.49 ㎚이었다. MMAD의 경우 5 level에서 111.34 ㎚, 8 level에서 120.10 ㎚, 10 level에서 125.36 ㎚, 12 level에서 129.61 ㎚, 그리고 15 level에서 134.05 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 5 level에서 111.62 ㎚, 8 level에서 120.90 ㎚, 10 level에서 126.05 ㎚, 12 level에서 130.27 ㎚, 그리고 15 level에서 134.71 ㎚이었다.

<표 11> 노즐 토출 속도에 따른 중량 농도

Excluder speed (level)	Total (μg/㎥)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
5	627.23	115.18	111.34	111.62	1.55	86.38
8	949.51	123.22	120.10	120.90	1.56	56.22
10	1,126.85	129.28	125.36	126.05	1.55	45.33
12	1,308.85	138.40	129.61	130.27	1.56	41.17
15	1,457.94	141.49	134.05	134.71	1.57	37.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 5~15 Level (1 cycle, 1~6 CH)

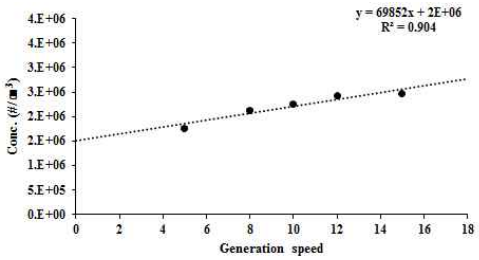
<표 12>노즐 토출 속도에 따른 표면적 농도 결과이다. 각 노즐의 토출 속도에서 표면적 농도 결과를 보면 ㎤당 전체 평균 표면적은 5 level에서 36,613.40 μm^2, 8 level에서 51,264.59 μm^2, 10 level에서 58,371.88 μm^2, 12 level에서 65,743.74 μm^2, 그리고 15 level에서 70,923.07 μm^2이었다. 직경 크기 최빈값은 5 level에서 105.81 ㎚, 8 level에서 111.16 ㎚, 10 level에서 115.18 ㎚, 12 level에서 114.78 ㎚, 그리고 15 level에서 125.95 ㎚이었다. 중위직경의 경우 5 level에서 98.19 ㎚, 8 level에서 105.57 ㎚, 10 level에서 109.90 ㎚, 12 level에서 112.84 ㎚, 그리고 15 level에서 116.40 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 5 level에서 95.38 ㎚, 8 level에서 102.92 ㎚, 10 level에서 107.13 ㎚, 12 level에서 110.26 ㎚, 그리고 15 level에서 113.72 ㎚이었다.

<표 12> 노즐 토출 속도에 따른 표면적 농도

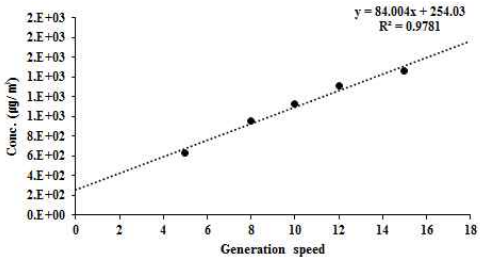
Excluder speed (level)	Total ($\mu m^2/cm^3$)	Mode (nm)	Median (nm)	Geo. Mean (nm)	Geo. SD.	cycle (sec)
5	36,613.40	105.81	98.19	95.38	1.47	86.38
8	51,264.59	111.16	105.57	102.92	1.47	56.22
10	58,371.88	115.18	109.90	107.13	1.48	45.33
12	65,743.74	114.78	112.84	110.26	1.48	41.17
15	70,923.07	125.95	116.40	113.72	1.49	37.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 5~15 Level (1 cycle, 1~6 CH)

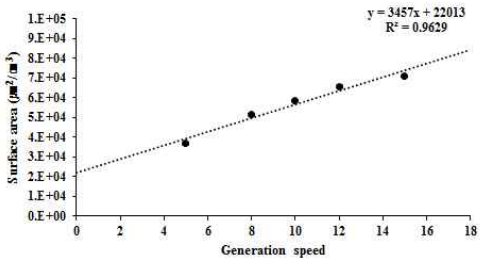
[그림 12]는 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 노즐 토출 속도에 따른 농도를 나타낸 것이다. R^2 값은 입자 수 농도의 경우 0.904, 질량 농도의 경우 0.978, 그리고 표면적 농도의 경우는 0.963이었으며, 기울기가 모두 양의 상관관계로 선형성을 보였으며, 노즐 토출 속도가 높을수록 발생 농도도 높아지는 경향이 있음을 알 수 있다.



(a) Concentration of Number



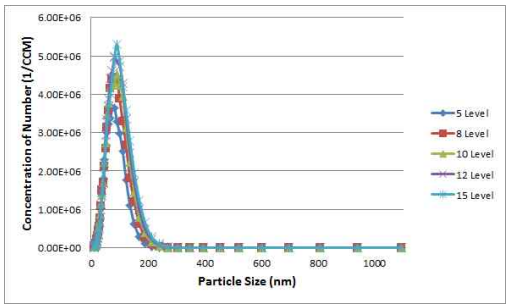
(b) Concentration of Mass



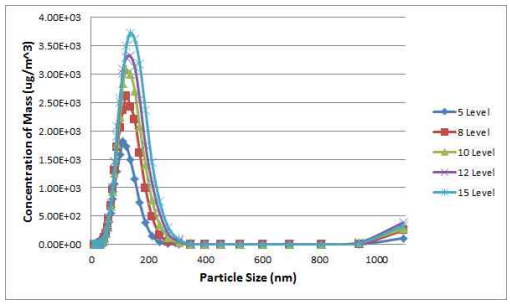
(c) Concentration of Surface

[그림 12] 노즐 토출 속도에 따른 농도

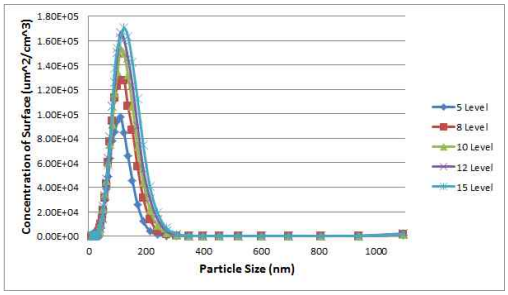
[그림 13]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도에서 노즐의 토출 속도에 따른 입자크기 분포를 나타낸 것이다. 입자 수 농도의 경우를 살펴보면 (a)에서 챔버 내 입자 수 농도는 노즐의 토출 속도가 증가함에 따라 발생되는 입자 수 농도가 증가하였으며, 입자크기도 증가하였다. (b)의 질량 농도와 (c)의 표면적 농도의 경우도 노즐의 토출 속도가 증가함에 따라 농도 및 입자크기가 증가하였다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass

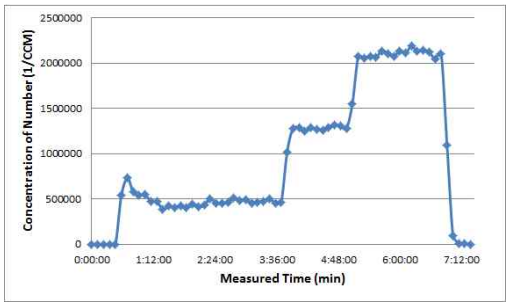


(c) Concentration of Surface

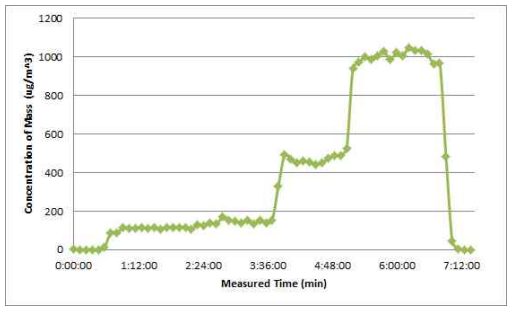
[그림 13] 노즐 토출 속도에 따른 입자크기 분포

(4) 노즐 수량

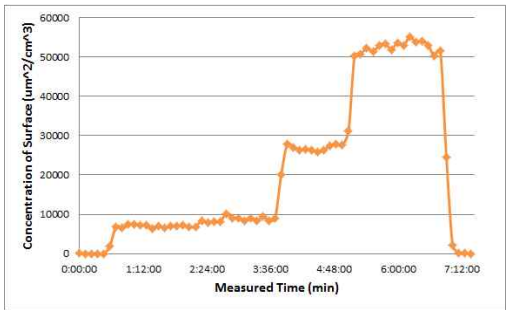
3D 프린팅 시스템에 다량의 3D 프린터 효과를 얻기 위하여 총 6개의 노즐을 장착하였으며, 노즐 수량을 1 대, 2 대, 4 대, 그리고 6 대로 변경해가며 실험을 수행하였다. [그림 14]는 노즐 수량에 따른 농도변화를 나타낸 것이다. 발생시작 직후 챔버 내 입자 수 농도의 경우 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였으며 약 60분 후부터 큰 변화 없이 안정적으로 측정되었다. 이후 발생되는 노즐 수량이 증가함에 따라 입자 발생량이 증가하였는데, 1 대에서 2 대로 증가 시켰을 때는 농도가 약간 상승하였고, 4 대, 그리고 6 대로 증가할 때는 농도가 크게 상승하였다. 질량 농도와 표면적 농도는 발생시작 후 서서히 증가하였다가 약 60분 후부터 안정적으로 측정되었다. 이후 발생되는 노즐 수량이 증가함에 따라 입자 발생량이 증가하였는데, 입자 수 농도와 비슷한 양상으로 1 대에서 2 대로 증가 시켰을 때는 농도가 약간 상승하였고, 4 대, 그리고 6 대로 증가할 때는 농도가 크게 상승하였다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass



(c) Concentration of Surface

[그림 14] 노즐 수량에 따른 농도 변화

<표 13>은 노즐 수량에 따른 입자 수 농도 결과이다. 노즐의 개수에 따라 측정한 입자 수 농도 결과를 보면 ccm당 전체 평균 개수는 1 대에서 416,535개, 2 대에서 473,879개, 4 대에서 1,282,608개, 그리고 6 대에서 2,105,801개 이었다. 직경 크기 최빈값은 1 대에서 71.51 ㎚, 2 대에서 71.63 ㎚, 4 대에서 72.16 ㎚, 그리고 6 대에서 83.25 ㎚이었다. CMD의 경우 1 대에서 60.71 ㎚, 2 대에서 66.63 ㎚, 4 대에서 70.37 ㎚, 그리고 6 대에서 76.42 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 1 대에서 56.15 ㎚, 2 대에서 62.78 ㎚, 4 대에서 68.56 ㎚, 그리고 6 대에서 73.49 ㎚이었다. 이때의 노즐 토출 속도는 1 cycle당 노즐이 1 대인 경우 평균 61.33초, 2 대인 경우 평균 53.33초, 4 대인 경우 평균 42.67초 그리고 노즐이 6 대인 경우 평균 43.56초 이었다.

<표 13> 노즐 수량에 따른 입자 수 농도

Nozzle No. (EA)	Total (1/ccm)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
1	416,535	71.51	60.71	56.15	1.74	61.33
2	473,879	71.63	66.63	62.78	1.64	53.33
4	1,282,608	72.16	70.37	68.56	1.56	42.67
6	2,105,801	83.25	76.42	73.49	1.60	43.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

<표 14>는 노즐 수량에 따른 중량 농도 결과이다. 발생하는 노즐의 개수에 따라 측정한 질량 농도 결과를 보면 ㎥당 전체 평균 질량은 1 대에서 112.54 ㎍, 2 대에서 146.82 ㎍, 4 대에서 466.75 ㎍, 그리고 6 대에서 1,000.45 ㎍이었다. 직경 크기 최빈값은 1 대에서 106.71 ㎚, 2 대에서 111.03 ㎚, 4 대에서 119.92 ㎚, 그리고 6 대에서 130.49 ㎚이었다. MMAD의 경우 1 대에서 107.22 ㎚, 2 대에서 107.49 ㎚, 4 대에서 112.83 ㎚, 그리고 6 대 에서 124.28 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 1 대에서 112.76 ㎚, 2 대에서 110.84 ㎚, 4 대에서 113.38 ㎚, 그리고 6 대에서 124.28 ㎚이었다.

<표 14> 노즐 수량에 따른 중량 농도

Nozzle No. (EA)	Total (㎍/㎥)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
1	112.54	106.71	107.22	112.76	1.80	61.33
2	146.82	111.03	107.49	110.84	1.67	53.33
4	466.75	119.92	112.83	113.38	1.57	42.67
6	1,000.45	130.49	124.26	124.28	1.55	43.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

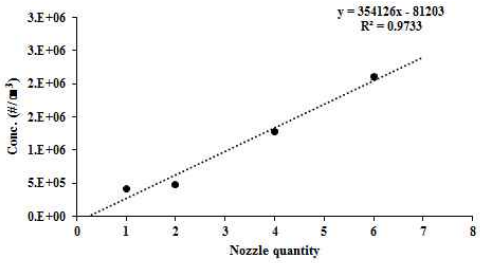
<표 15>는 노즐 수량에 따른 표면적 농도 결과이다. 발생하는 노즐의 개수에 따라 측정한 표면적 농도 결과를 보면 ㎤당 전체 평균 표면적은 1 대에서 6,821.05 ㎛^{2}, 2 대에서 8,812.56 ㎛^{2}, 4 대에서 26,947.40 ㎛^{2}, 그리고 6 대에서 52,545.12 ㎛^{2}이었다. 직경 크기 최빈값은 1 대에서 92.36 ㎚, 2 대에서 96.53 ㎚, 4 대에서 101.64 ㎚, 그리고 6 대에서 115.18 ㎚이었다. 중위직경(median)의 경우 1 대에서 91.12 ㎚, 2 대에서 92.73 ㎚, 4 대에서 97.50 ㎚, 그리고 6 대에서 108.44 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 1 대에서 89.10 ㎚, 2 대에서 91.56 ㎚, 4 대에서 96.00 ㎚, 그리고 6 대에서 105.59 ㎚이었다.

<표 15> 노즐 수량에 따른 표면적 농도

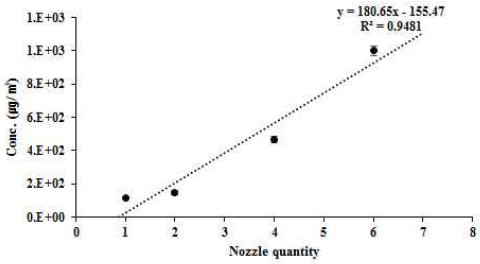
Nozzle No. (EA)	Total (㎛^{2}/㎤)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
1	6,821.05	92.36	91.12	89.10	1.54	61.33
2	8,812.56	96.53	92.73	91.56	1.49	53.33
4	26,947.40	101.64	97.50	96.00	1.48	42.67
6	52,545.12	115.18	108.44	105.59	1.48	43.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 240℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 10 Level (1 cycle, 1~6 CH)

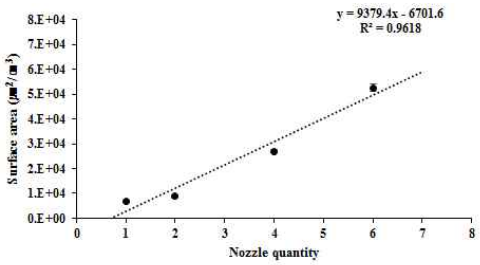
[그림 15]는 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 노즐 수량에 따른 농도를 나타낸 것이다. R^2 값은 입자 수 농도의 경우 0.973, 질량 농도의 경우 0.948, 그리고 표면적 농도의 경우는 0.962이었으며, 기울기가 모두 양의 상관관계로 선형성을 보였으며, 노즐 수량이 증가할수록 발생 농도도 높아지는 경향이 있음을 알 수 있다.



(a) Concentration of Number



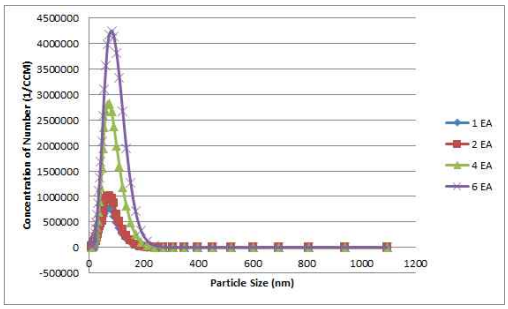
(b) Concentration of Mass



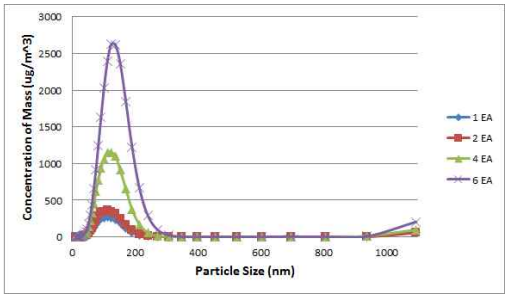
(c) Concentration of Surface

[그림 15] 노즐 수량에 따른 농도

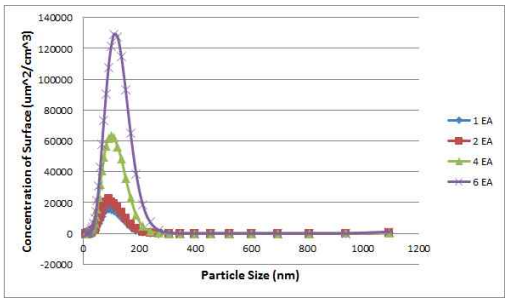
[그림 16]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도에서 노즐 수량에 따른 입자 크기 분포를 나타낸 그래프이다. (a)에서 입자 수 농도의 경우 챔버 내 입자 수 농도는 노즐 수량이 6 대일 때 발생 농도가 가장 높았다. (b)에서 질량 농도의 경우는 노즐 수량이 6 대일 때 발생 농도가 가장 높았으며, (c)에서 표면적 농도의 경우도 역시 노즐 개수가 6 대일 때 발생 농도가 가장 높았다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass

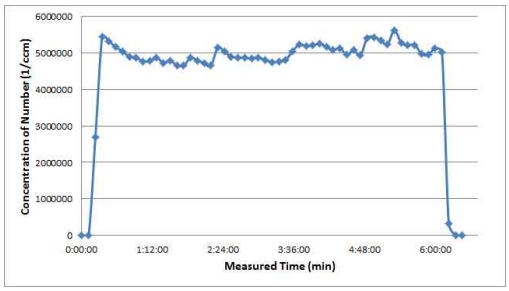


(c) Concentration of Surface

[그림 16] 노즐 수량별 입자크기 분포

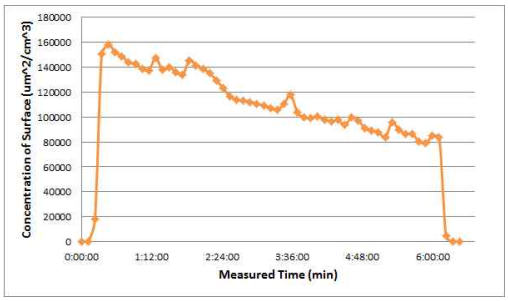
(5) 공기 유량

공급되는 공기 유량을 질량유량제어기(MFC : Mass Flower Controller)를 이용하여 20 LPM, 30 LPM, 40 LPM, 그리고 50 LPM 조건으로 실험을 수행하였다. 다만, 토출온도는 270℃, 토출속도는 15 level로 세팅하여 실험을 수행하였다. [그림 17]은 공기 유량에 따른 농도 변화 그래프이다. 실험결과, 발생시작 직후 챔버 내 입자 수 농도의 경우 증가하였다가 공기 유량을 변경하면 증가와 감소를 반복하였으나, 결과적으로 유량이 증가함에 따라 입자 수 농도는 약간 증가하였다. 질량 농도와 표면적 농도는 발생시작 후 급격히 증가하였다가 공기 유량이 증가함에 따라 계속적으로 감소하여 유량이 50 LPM일 때의 질량 농도와 표면적 농도는 유량이 20 LPM일 때의 절반이하로 감소하였다.



(a) Concentration of Number

(b) Concentration of Mass



(c) Concentration of Surface

[그림 17] 공기 유량에 따른 농도 변화

<표 16>은 공기 유량에 따른 입자 수 농도 결과이다. 공기 유량에 따른 입자 수 농도 결과를 보면 ccm당 전체 평균 개수는 20 LPM에서 4,777,023개, 30 LPM에서 4,871,863개, 40 LPM에서 5,124,765개, 그리고 50 LPM에서 5,259,131개 이었다. 직경 크기 최빈값은 20 LPM에서 93.42 ㎚, 30 LPM에서 79.29 ㎚, 40 LPM에서 68.57 ㎚, 그리고 50 LPM에서 60.27 ㎚이었다. CMD의 경우 20 LPM에서 80.40 ㎚, 30 LPM에서 70.67 ㎚, 40 LPM에서 64.05 ㎚, 그리고 50 LPM에서 58.87 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 20 LPM에서 77.40 ㎚, 30 LPM에서 68.33 ㎚, 40 LPM에서 62.14 ㎚, 그리고 50 LPM에서 57.47 ㎚이었다. 이때의 토출속도는 1 cycle당 20 LPM의 경우 평균 27.33초, 30 LPM의 경우 평균 26.17초, 40 LPM의 경우 평균 25.83초 그리고 50 LPM의 경우 평균 25.11초 이었다.

<표 16> 공기 유량에 따른 입자 수 농도

Air Flow (LPM)	Total (1/ccm)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
20	4,777,023	93.42	80.40	77.40	1.64	27.33
30	4,871,863	79.29	70.67	68.33	1.66	26.17
40	5,124,765	68.57	64.05	62.14	1.66	25.83
50	5,259,131	60.27	58.87	57.47	1.66	25.11

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 270℃, Inlet Air : 20~50 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 15 Level (1 cycle mean, 1~6 CH)

<표 17>은 공기 유량에 따른 중량 농도 결과이다. 공기 유량에 따른 질량 농도 결과를 보면 ㎥당 전체 평균 질량은 20 LPM에서 3,024.82 ㎍, 30 LPM에서 2,188.91 ㎍, 40 LPM에서 1,748.13 ㎍, 그리고 50 LPM에서 1,435.99 ㎍ 이었다. 직경 크기 최빈값은 20 LPM에서 143.98 ㎚, 30 LPM에서 128.32 ㎚, 40 LPM에서 118.69 ㎚, 그리고 50 LPM에서 113.60 ㎚이었다. MMAD의 경우 20 LPM에서 142.03 ㎚, 30 LPM에서 127.13 ㎚, 40 LPM에서 116.43 ㎚, 그리고 50 LPM에서 109.15 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 20 LPM에서 143.56 ㎚, 30 LPM에서 130.12 ㎚, 40 LPM에서 119.05 ㎚, 그리고 50 LPM에서 111.43 ㎚이었다.

<표 17> 공기 유량에 따른 중량 농도

Air Flow (LPM)	Total (㎍/㎥)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
20	3,024.82	143.98	142.03	143.56	1.62	27.33
30	2,188.91	128.32	127.13	130.12	1.67	26.17
40	1,748.13	118.69	116.43	119.05	1.68	25.83
50	1,435.99	113.60	109.15	111.43	1.70	25.11

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 270℃, Inlet Air : 20~50 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 15 Level (1 cycle mean, 1~6 CH)

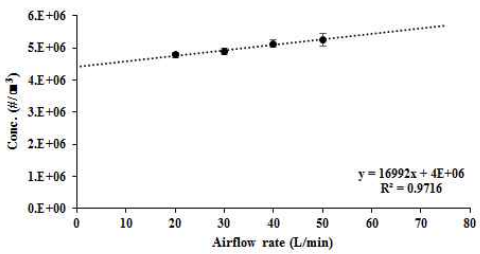
<표 18>은 공기 유량에 따른 표면적 농도 결과이다. 공기 유량에 따른 표면적 농도 결과를 보면 ㎤당 전체 평균 표면적은 20 LPM에서 139,974.60 ㎛², 30 LPM에서 112,762.20 ㎛², 40 LPM에서 98,560.19 ㎛², 그리고 50 LPM에서 86,848.98 ㎛²이었다. 직경 크기 최빈값은 20 LPM에서 121.73 ㎚, 30 LPM에서 109.21 ㎚, 40 LPM에서 104.73 ㎚, 그리고 50 LPM에서 101.53 ㎚이었다. 중위직경의 경우 20 LPM에서 120.15 ㎚, 30 LPM에서 108.10 ㎚, 40 LPM에서 99.05 ㎚, 그리고 50 LPM에서 92.18 ㎚이었다. 기하학평균 크기는 20 LPM에서 117.90 ㎚, 30 LPM에서 105.33 ㎚, 40 LPM에서 96.22 ㎚, 그리고 50 LPM에서 89.43 ㎚이었다.

<표 18> 공기 유량에 따른 표면적 농도

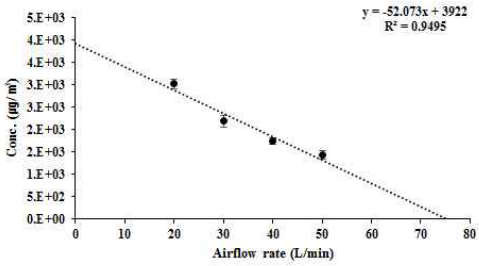
Air Flow (LPM)	Total (㎛²/㎤)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.	cycle (sec)
20	139,974.60	121.73	120.15	117.90	1.54	27.33
30	112,762.20	109.21	108.10	105.33	1.55	26.17
40	98,560.19	104.73	99.05	96.22	1.55	25.83
50	86,848.98	101.53	92.18	89.43	1.56	25.11

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 270℃, Inlet Air : 20~50 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 15 Level (1 cycle mean, 1~6 CH)

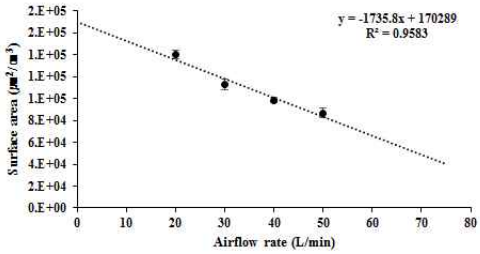
[그림 18]은 입자 수 농도, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 공기 유량에 따른 농도를 나타낸 것이다. R^2 값은 입자 수 농도의 경우 0.972, 질량 농도의 경우 0.950, 그리고 표면적 농도의 경우는 0.958이었으며, 입자 수 농도의 경우는 기울기가 양의 상관관계로 선형성을 보였으며, 공기 유량이 증가할수록 발생 농도는 높아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 표면적 농도와 질량 농도의 경우는 기울기가 음의 상관관계로 선형성을 보였으며, 공기 유량이 증가할수록 발생 농도는 입자 수 농도와 반대로 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있다.



(a) Concentration of Number



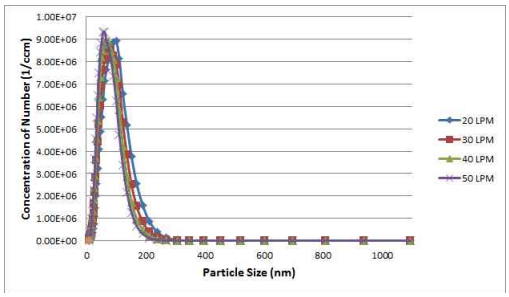
(b) Concentration of Mass



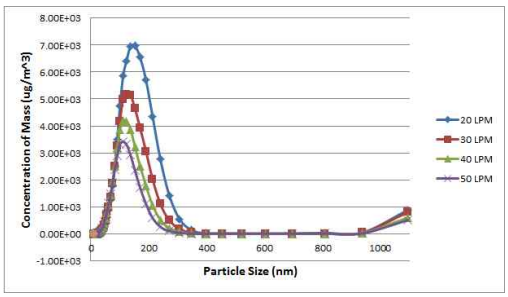
(c) Concentration of Surface

[그림 18] 공기 유량에 따른 농도

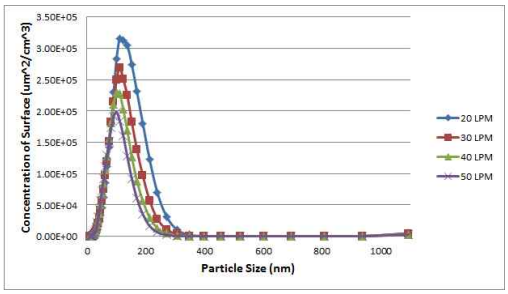
[그림 19]는 공기유량에 따른 입자크기 분포를 나타낸 것이다. 입자 수 농도는 유량이 증가함에 따라 증가하였으며, 질량 농도, 그리고 표면적 농도의 경우 유량이 증가함에 따라 감소하였다. (a)에서 공기 유량이 20 LPM일 때 챔버 내 입자 수 농도도 90 ㎚ 정도의 입자가 많이 발생하였으며, 공기 유량이 증가함에 따라 입자 크기가 점차 작아졌으며 50 LPM일 때 60 ㎚ 크기의 입자가 많이 발생하였다. (b)에서 질량 농도의 경우는 공기 유량이 20 LPM일 때 140 ㎚ 크기의 입자가 많이 발생하였고, 공기 유량이 증가함에 따라 발생되는 입자 크기가 작아졌으며 공기 유량이 50 LPM일 때 110 ㎚ 크기의 입자가 더 많이 발생하였다. 질량 농도에서는 400 ㎚~900 ㎚의 입자가 거의 발생하지 않다가 1.0 ㎛ 크기를 초과하는 입자 발생이 증가하였다. (c)에서 표면적 농도의 경우도 공기 유량이 20 LPM일 때 120 ㎚ 정도의 입자가 많이 발생하였고, 공기 유량이 증가함에 따라 입자 크기는 감소하였으며 50 LPM에서는 100 ㎚ 크기의 입자가 많이 발생하였다. 아울러, 공기 유량이 증가함에 따라 발생량은 감소하였다.



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass



(c) Concentration of Surface

[그림 19] 공기유량에 따른 입자크기 분포

(6) 동물실험 발생 최적 조건

동물실험을 위한 발생 최적 조건의 노즐 직경은 0.4 ㎜, 노즐 토출 온도는 270℃, 챔버 내 공급유량은 30 LPM, 노즐 수량은 6 대, 토출 속도는 15 level로 설정하였다. 발생 노즐 excluder stepper의 1 cycle을 3번 이상 측정한 평균치는 28.0초 이었다.

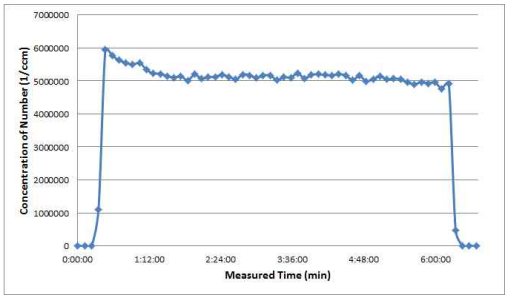
<표 19>는 최적 발생 조건에서의 농도 결과이다. 실험결과, 안정적으로 유지되는 발생 시간대의 입자 수 농도는 ccm당 전체 평균 개수는 5,095,600개 이었고, 직경 크기 최빈값은 80.61 ㎚, 입자 수 농도 중위직경(CMD)은 71.88 ㎚, 그리고 기하학평균 크기는 69.39 ㎚이었다. 질량 농도는 ㎥당 전체 평균 질량은 2,478.26 ㎍ 이었으며, 직경 크기 최빈값은 132.98 ㎚, MMAD는 131.92 ㎚, 그리고 기하학평균 크기는 134.18 ㎚이었다. 표면적 농도의 경우 ㎤당 전체 평균 표면적은 123,689.23 μm^2이었으며, 직경 크기 최빈값은 113.51 ㎚, 중위직경은 111.21 ㎚, 그리고 기하학평균 크기는 108.61 ㎚이었다.

<표 19> 최적 발생 조건에서의 농도

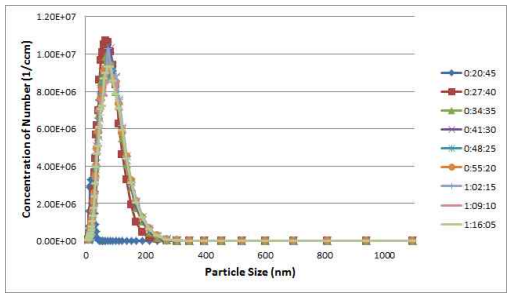
Concentration	Total (unit)	Mode (㎚)	Median (㎚)	Geo. Mean (㎚)	Geo. SD.
Number	5,095,600 (1/ccm)	80.61	71.88	69.39	1.67
Mass	2,478.26 (㎍/㎥)	132.98	131.92	134.18	1.66
Surface	123,689.23 ($\mu m^2/cm^3$)	113.51	111.21	108.61	1.56

Material : ABS filament, Nozzle Diameter : 0.4 ㎜, Nozzle Temp. : 270℃, Inlet Air : 30 LPM, Nozzle Number : 6 Channel, Excluder Stepper : 15 Level (1 cycle mean 28.0 sec, 1~6 CH)

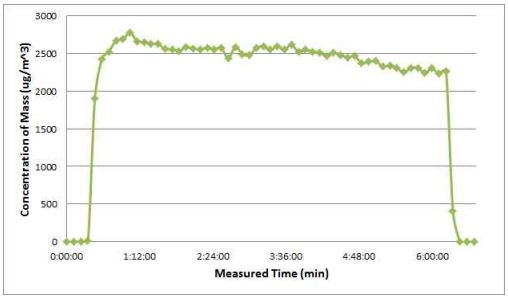
[그림 20]은 최적발생 조건에서의 농도 변화 및 분포를 나타낸 것이다. (a)에서 보는 바와 같이 발생시작 직후 입자 수 농도가 급격하게 증가하다가 1시간 뒤부터 안정적으로 발생하였으며, 발생 종료 1시간 전부터 발생 농도가 감소하였다. 발생 챔버 내 입자 수 농도는 (b)에서 보는 바와 같이 70 ㎚~80 ㎚의 입자 크기가 많이 발생하였다. (c), (e)에서 질량 농도와 표면적 농도의 경우는 발생시작 직후에는 농도가 증가하였다가 1시간 뒤부터 안정적으로 발생하였으며, 4시간 뒤부터는 농도가 점차 감소하였다. 다만, 질량 농도의 경우는 (d)에서 보는 바와 같이 400 ㎚~900 ㎚의 입자가 거의 발생하지 않았으며, 1.0 ㎛ 크기를 초과하는 입자가 증가하였다.



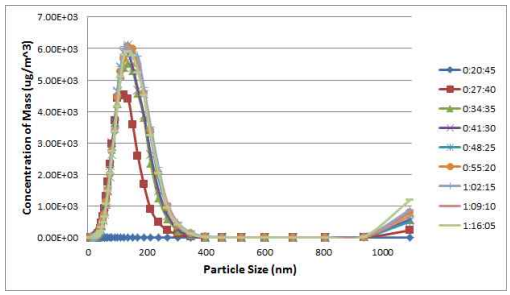
(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Number

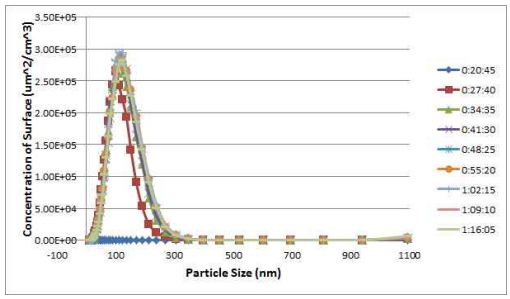


(c) Concentration of Mass



(d) Concentration of Mass

(e) Concentration of Surface



(f) Concentration of Surface

[그림 20] 최적발생 조건에서의 농도 변화 및 분포

3. 입자의 특성과 형태

(1) 입자 특성 비교

3D 프린팅 발생 시스템을 통하여 ABS 물질을 발생시켜서 발생 농도 및 크기를 분석하기 위하여 사용한 장비간의 분석 결과치를 상호 비교하였으며, 필터 중량법으로 측정한 값과의 일치여부를 확인하였다.

가) OPC

OPC의 입자 측정범위는 0.25 ㎛~32.0 ㎛로 SMPS가 1.0 ㎛이상을 측정하지 못하는 범위를 커버하였다. 다만, 1시간 전후로 장비 후단의 teflon필터가 막혀 측정 오류가 발생하여 1시간 이상의 장시간 농도를 측정하기에는 부적합하였다. <표 20>과 <표 21>은 각각 OPC를 이용하여 측정한 입자 수 농도와 중량 농도이다. 대부분의 입자는 0.4 ㎛이하에서 측정되었으며, 이 중 0.25 ㎛이하의 입자크기가 가장 많이 측정되었다. 그리고, 1.0 ㎛~2.5 ㎛의 입자도 산발적으로 측정되었다.

<표 20> OPC에 의한 입자 수 농도 측정 결과

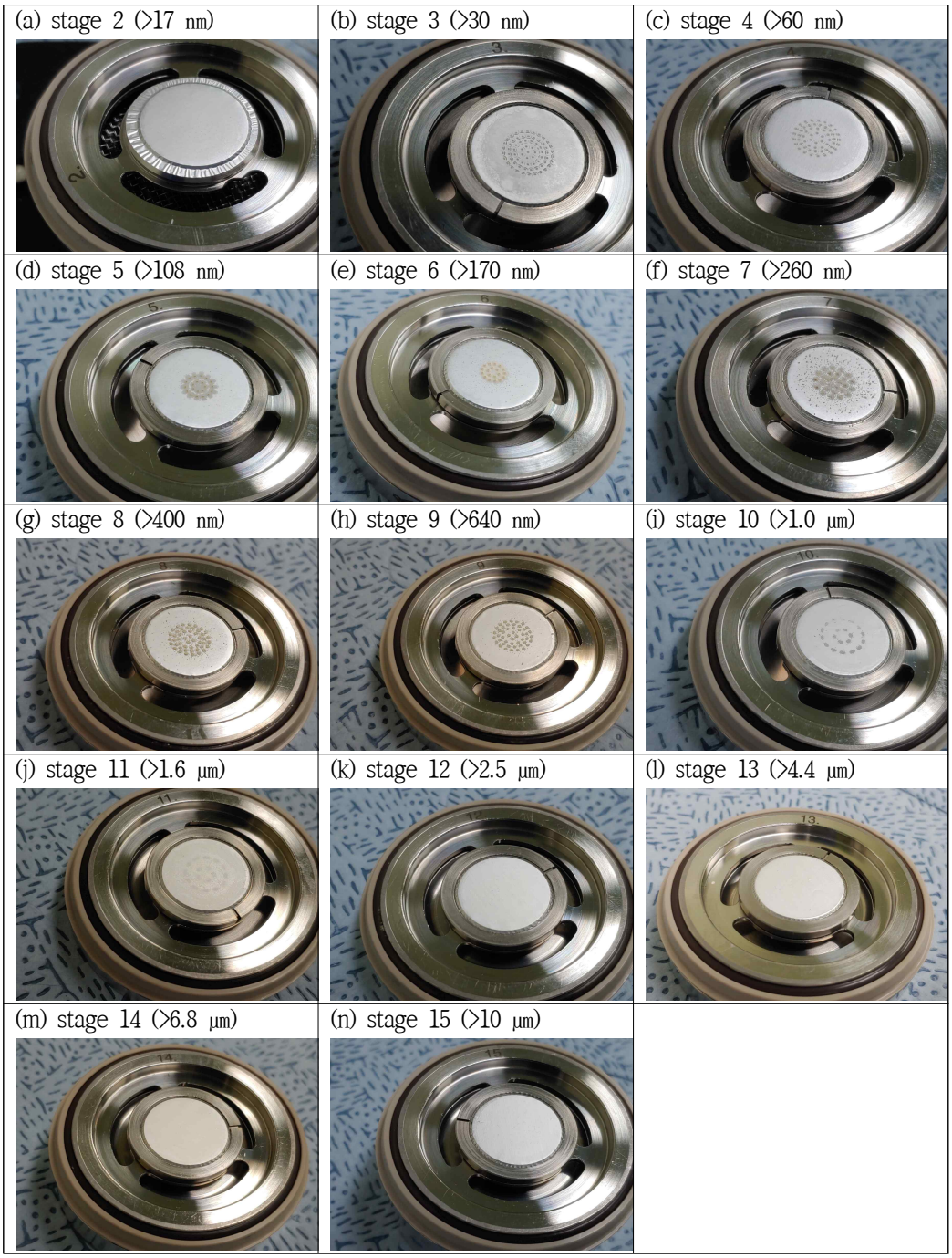
Nozzle No. Particle size (㎛)	1 EA Mean (1/L)	2 EA Mean (1/L)	4 EA Mean (1/L)	6 EA Mean (1/L)
0.25	21459.82	59527.74	109841.90	148300.07
0.28	3501.79	12771.31	22495.71	26926.11
0.30	240.71	973.81	1598.81	2019.69
0.35	14.64	51.79	89.05	136.16
0.40	1.25	3.21	4.44	10.38
0.45	0.00	0.36	0.71	2.64
0.50	0.00	0.71	0.63	2.14
0.58	0.00	0.00	0.24	0.74
0.65	0.00	0.12	0.00	0.41
0.70	0.00	0.12	0.08	0.00
0.80	0.18	0.00	0.00	0.25
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.30	0.00	0.00	0.00	0.00
1.60	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.07	0.00	0.05
2.50	0.00	0.05	0.00	0.03
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32.00	0.00	0.00	0.00	0.00

<표 21> OPC에 의한 중량농도 측정 결과

Nozzle No. Particle size (㎛)	1 EA Mean (㎍/㎥)	2 EA Mean (㎍/㎥)	4 EA Mean (㎍/㎥)	6 EA Mean (㎍/㎥)
0.25	0.34914	0.96845	1.78752	2.41334
0.28	0.07686	0.27938	0.49238	0.58923
0.30	0.00711	0.02936	0.04792	0.06094
0.35	0.00014	0.00098	0.00283	0.00562
0.40	0.00004	0.00002	0.00013	0.00036
0.45	0.00000	0.00000	0.00000	0.00007
0.50	0.00000	0.00014	0.00011	0.00030
0.58	0.00000	0.00000	0.00005	0.00015
0.65	0.00000	0.00002	0.00000	0.00008
0.70	0.00000	0.00005	0.00003	0.00000
0.80	0.00011	0.00000	0.00000	0.00015
1.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.30	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.60	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.00	0.00000	0.00071	0.00000	0.00049
2.50	0.00000	0.00086	0.00000	0.00059
3.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
6.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
7.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
12.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
15.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
17.50	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
20.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
25.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
30.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
32.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

나) ELPI+

ELPI+의 입자 측정범위는 6 ㎚~10.0 ㎛으로 3D 프린팅 발생 시스템을 통하여 발생하는 입자의 대부분을 측정할 수 있었다. [그림 21]은 ELPI+ 단계에 따른 입자 포집 유형을 나타낸 것이다. 1 단계는 filter를 장착하지 않기 때문에 2 단계부터 15 단계까지 포집유형을 볼 수 있었다. 2 단계에서는 >17 ㎚이고 양이 많지 않았기 때문에 육안으로 확인은 불가능하였으며, 3 단계(>30 ㎚)부터 11 단계까지(>1.6 ㎛)는 육안으로 확인이 가능하였다. 또한, 12 단계부터는 육안확인은 불가능하였다.



[그림 21] ELPI+ 단계에 따른 입자 포집 유형

[그림 22]는 ELPI+의 단계별로 구성한 필터를 활용하여 측정한 중량 농도를 나타낸 것이다. 각 단계에 구성되어 있는 캐스케이드 임팩터에 greased aluminium foil 필터를 장착하여 발생 전과 발생 후의 필터 무게를 측정하였으며, 중량이 측정된 단계는 7 단계(>260 ㎚)부터 15 단계(>10 ㎛)이었고, 중량 농도는 0.91 ㎎/㎥, MMAD는 0.11, 그리고 GSD는 2.1이었다. [그림 23]은 ELPI+에 의한 ABS의 입자 수 농도와 중량 농도를 나타낸 것이다. 입자 수 농도의 경우 실험물질 발생 직후 급격하게 증가하였다가 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하였으며, 중량 농도의 경우는 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가하였다.

Stage	Size range (μm)	Cut-off size (μm)	Initial Mass (mg)	Final Mass (mg)	Mass (mg)	Mass%	Cumm. Mass%	Mass Probi
15	0.017	0.009919677	15.58	15.60	0.020	3.390	0.000	
14	0.030	0.022218011	15.52	15.54	0.020	3.390	3.390	3.174
13	0.060	0.04053961	15.61	15.69	0.080	13.559	6.780	3.508
12	0.108	0.07202083	15.55	15.71	0.160	27.119	20.339	4.170
11	0.170	0.121346611	15.43	15.62	0.190	32.203	47.458	4.936
10	0.260	0.199587074	15.38	15.48	0.100	16.949	79.661	5.830
9	0.400	0.313737151	15.43	15.44	0.010	1.695	96.610	6.826
8	0.640	0.481367843	15.70	15.70	0.000	0.000	98.305	7.121
7	1.000	0.758122681	15.44	15.45	0.010	1.695	98.305	7.121
6	1.600	1.248198702	15.46	15.46	0.000	0.000	100.000	#NUM!
5	2.500	2.016730027	15.48	15.48	0.000	0.000	100.000	#NUM!
4	4.400	3.012772809	15.58	15.55	0.000	0.000	100.000	#NUM!
3	6.800	4.43743169	15.67	15.67	0.000	0.000	100.000	#NUM!
2	10.000	7.301766909	15.48	15.48	0.000	0.000	100.000	#NUM!
		10			0.590		100.000	

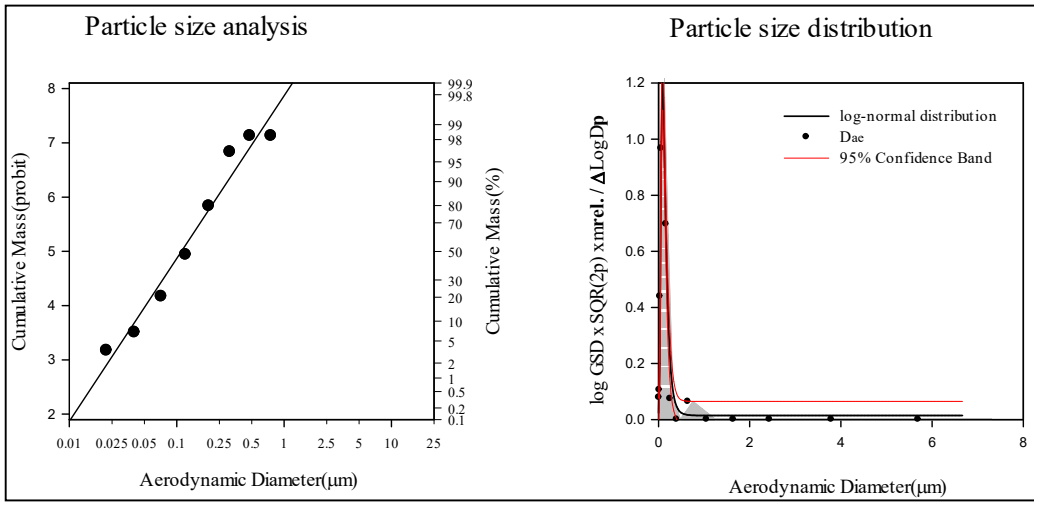
y = slope x + intercept (cumm mass vs. mass probit)

MMAD=$10^{((5-Intercept)/Slope)}$

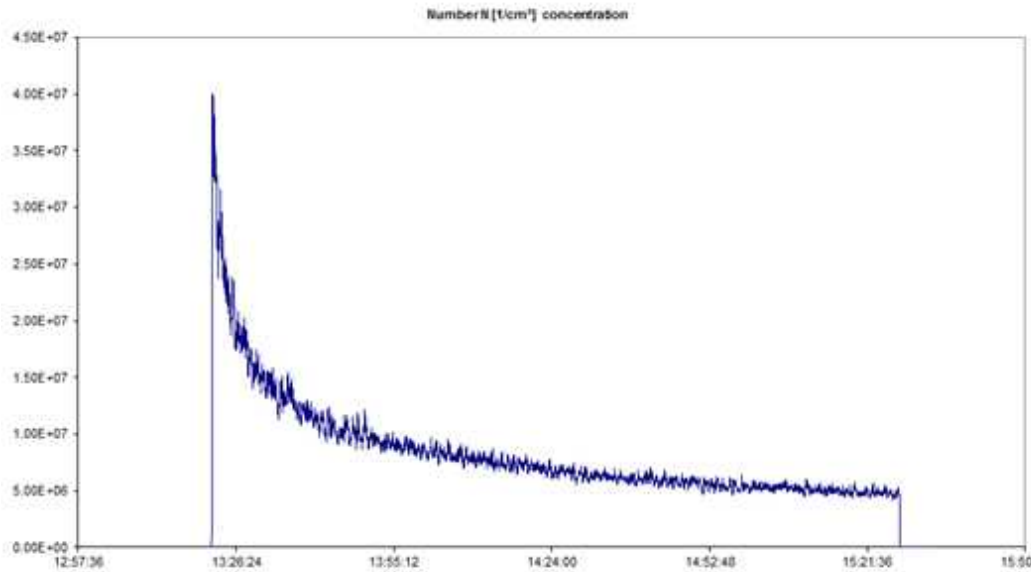
GSD= $10^{((5.9944579-Intercept)/Slope)}$/MMAD

Intercept	7.86
Slope	2.99
Correl	0.98

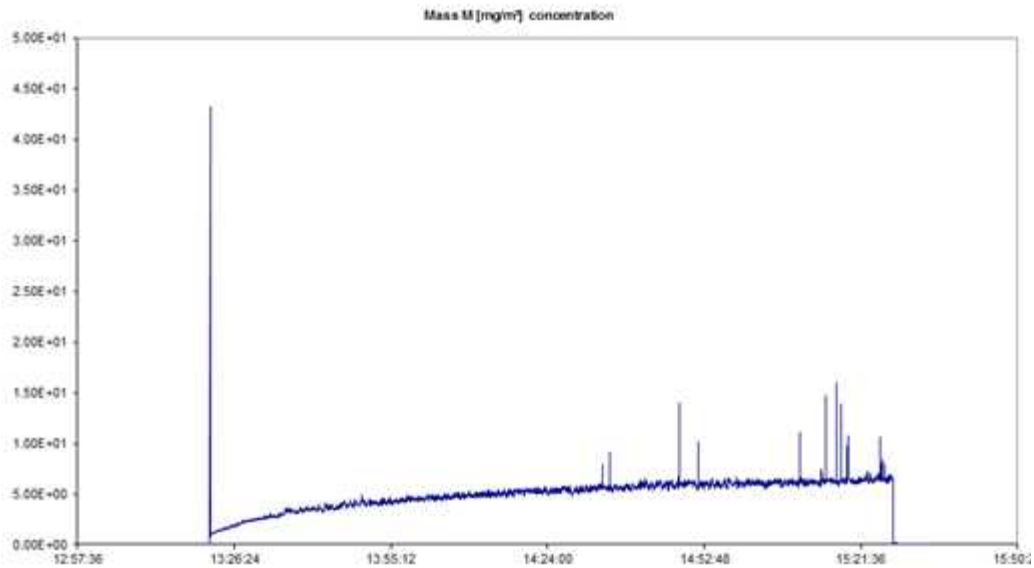
MMAD	0.111
GSD	2.1



[그림 22] ELPI+에 의한 ABS의 MMAD 및 GSD



(a) Concentration of Number



(b) Concentration of Mass

[그림 23] ELPI+에 의한 ABS의 입자 수 농도와 중량 농도 변화

<표 22>는 필터 중량법에 의하여 중량 농도를 측정한 결과이다. 발생시간 동안 2 LPM으로 40분간 3회 측정하였으며, 기하평균 중량 농도는 3.93 ㎎/㎥이었으며, 필터 포집시간대에 SMPS의 중량 농도를 측정하여 필터 중량법의 결과와 비교하였다. SMPS로 측정한 기하평균 중량 농도는 2.50 ㎎/㎥이었으며, 필터 중량법으로 측정한 값은 SMPS로 측정한 중량 농도의 157.8%이었다.

<표 22> 필터 중량법에 의한 중량 농도

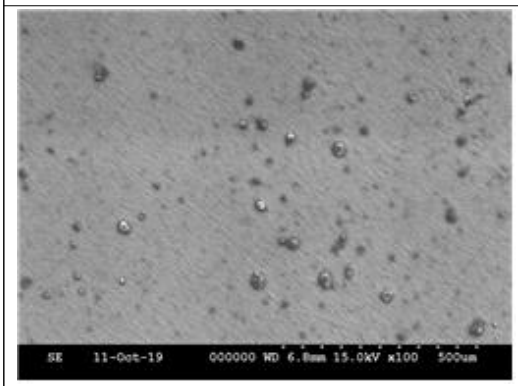
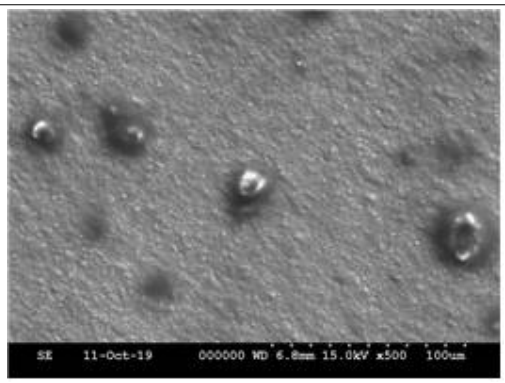
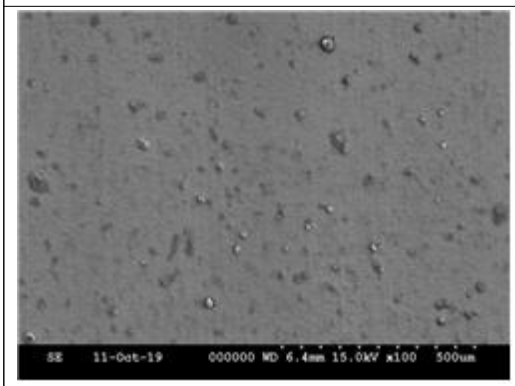
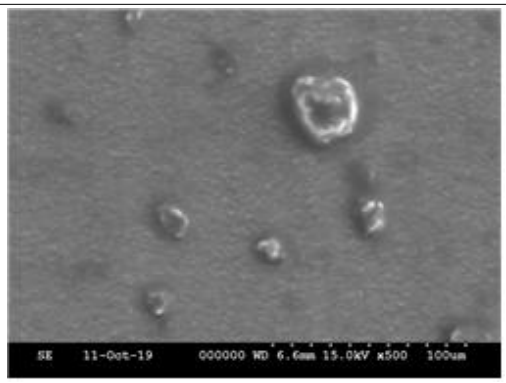
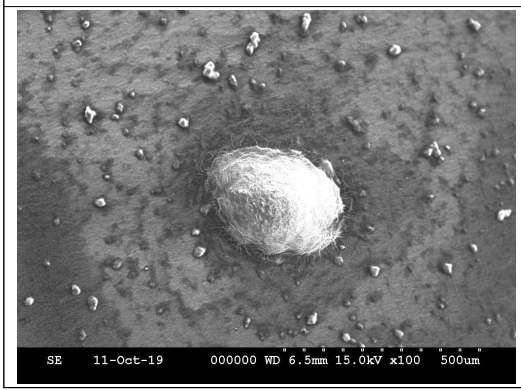
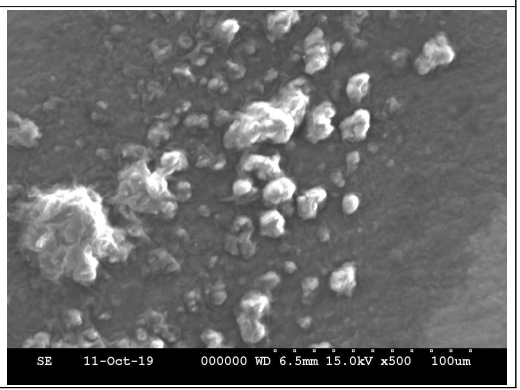
	포집전	포집후	중량	포집시간	유량	중량법(A)	SMPS(B)	A/B
No.	(㎎)	(㎎)	(㎎)	(min)	(L)	(㎎/㎥)	(㎎/㎥)	(%)
1	14.97	15.33	0.36	40	2.0367	4.42	2.55	173.29
2	16.73	17.06	0.33	40	1.9842	4.16	2.55	163.05
3	15.11	15.41	0.3	40	2.0367	3.68	2.56	143.84
4	16.78	17.08	0.3	40	1.9842	3.78	2.56	147.65
5	15.19	15.5	0.31	40	2.0367	3.81	2.38	159.88
6	16.53	16.83	0.3	40	1.9842	3.78	2.38	158.82
GM±GSD						3.93±1.07	2.50±1.02	(157.8%)

(2) 입자 형태 비교

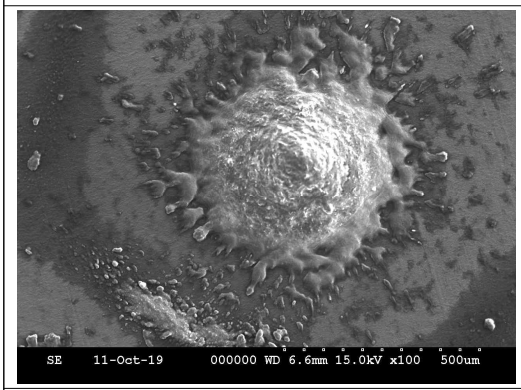
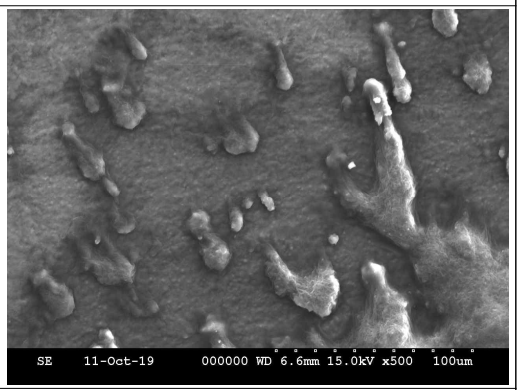
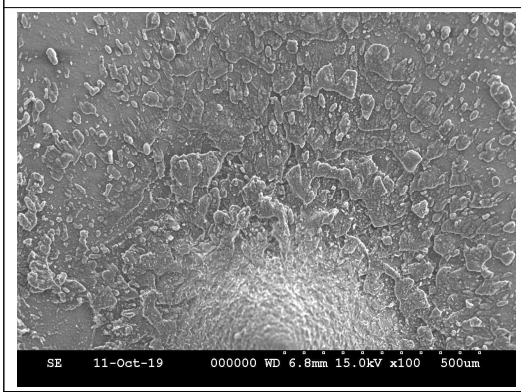
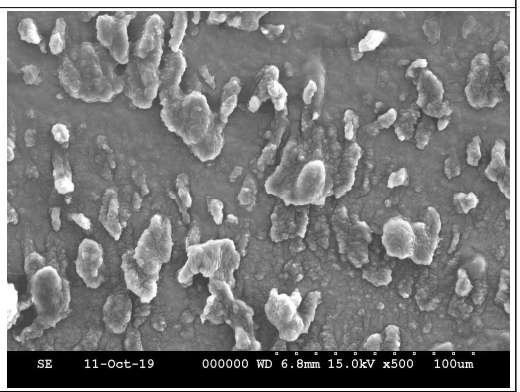
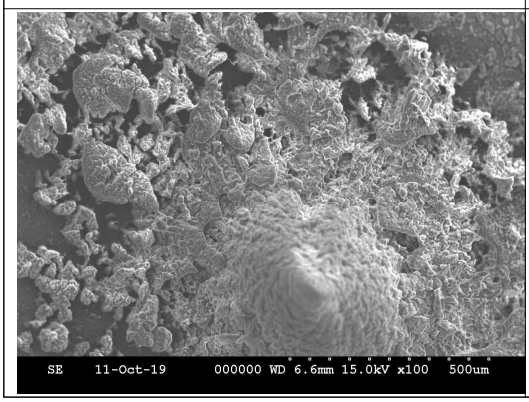
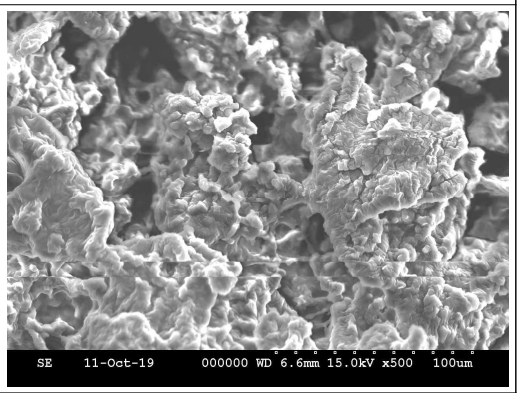
3D 프린팅 발생 시스템을 통하여 발생시킨 ABS 물질이 어떠한 형태와 크기로 발생되는지 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)으로 분석하였다.

가) SEM

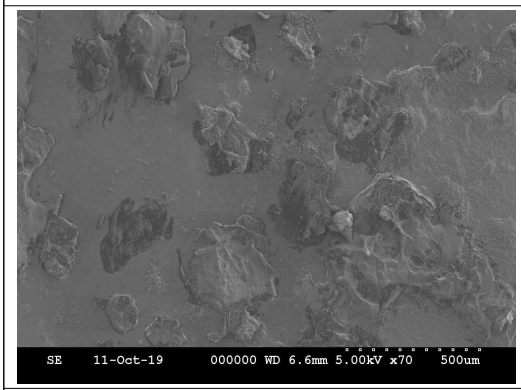
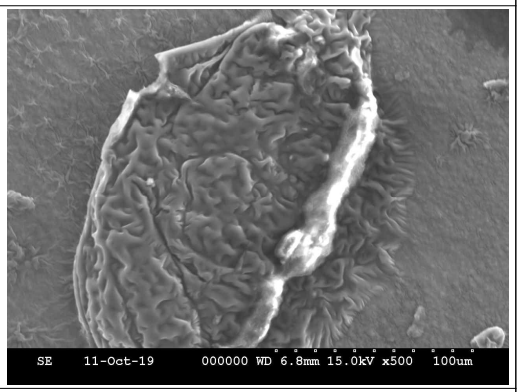
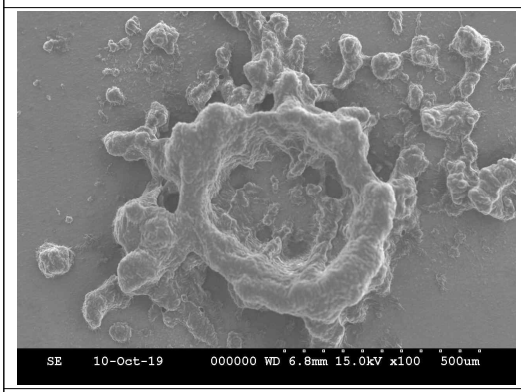
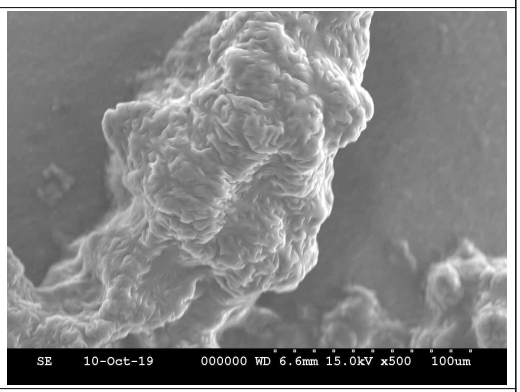
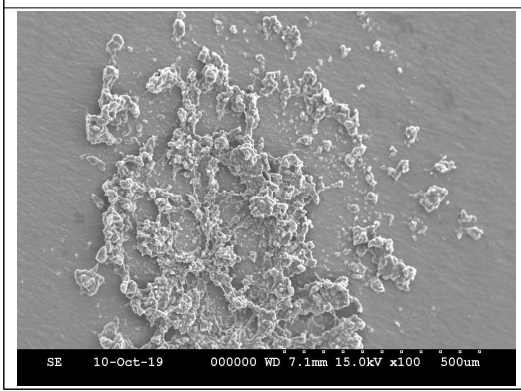
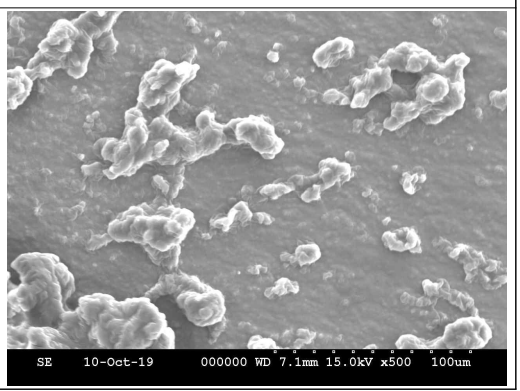
SEM 분석을 위한 grid 장착은 2 단계부터 11 단계까지 장착하였다. [그림 24]는 SEM을 이용한 Plate 별 입자 형태를 나타낸 것이다. ABS 필라멘트를 발생 시스템에 의하여 발생시킨 후 ABS 형태를 보면 섬유형태는 아니었으며, 타원형 입자였다. ELPI+ 단계별로 입자 포집 크기가 커지고 포집량이 증가함에 따라 입자의 뭉침 현상이 두드러져서 산봉우리 모양으로 쌓여있는 형태였다. 포집되는 입자가 커지는 단계가 올라갈수록 포집량은 적었으며 입자끼리 서로 뭉쳐져서 거대 입자의 형태를 보였다.

(a) SEM (>17 ㎚ plate)×100	(b) SEM (>17 ㎚ plate)×500
	
(c) SEM (>30 ㎚ plate)×100	(d) SEM (>30 ㎚ plate)×500
	
(e) SEM (>60 ㎚ plate)×100	(f) SEM (>60 ㎚ plate)×500
	

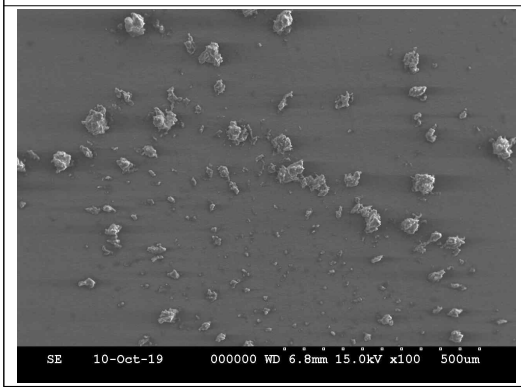
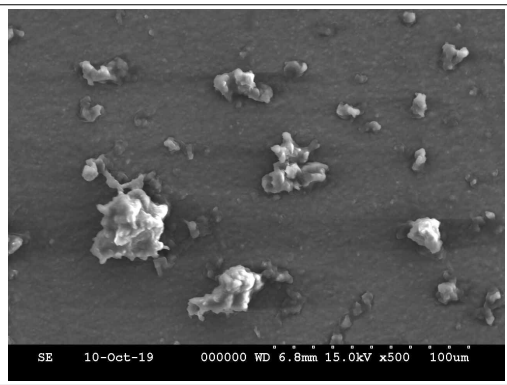
[그림 24-1] SEM을 이용한 Plate 별 입자 형태

(g) SEM (>108 ㎚ plate)×100	(h) SEM (>108 ㎚ plate)×500
	
(i) SEM (>170 ㎚ plate)×100	(j) SEM (>170 ㎚ plate)×500
	
(k) SEM (>260 ㎚ plate)×100	(l) SEM (>260 ㎚ plate)×500
	

[그림 24-2] SEM을 이용한 Plate 별 입자 형태

(m) SEM (>400 ㎚ plate)×100	(n) SEM (>400 ㎚ plate)×500
	
(o) SEM (>640 ㎚ plate)×100	(p) SEM (>640 ㎚ plate)×500
	
(q) SEM (>1,000 ㎚ plate)×100	(r) SEM (>1,000 ㎚ plate)×500
	

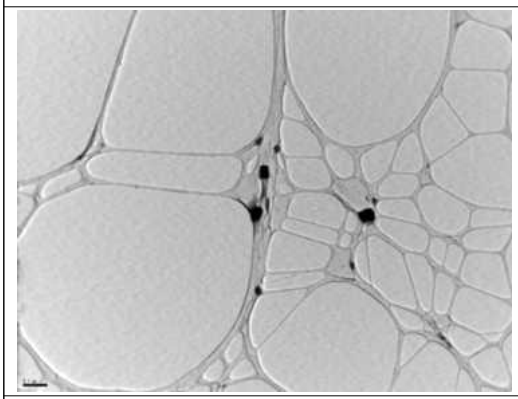
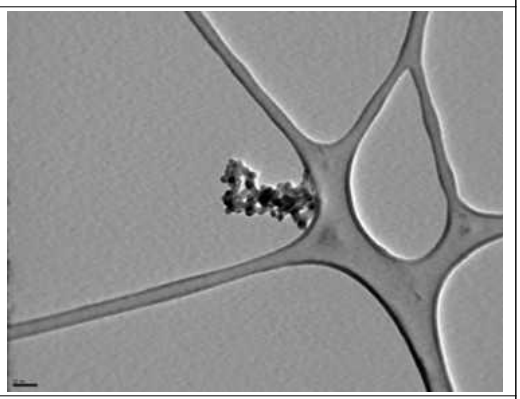
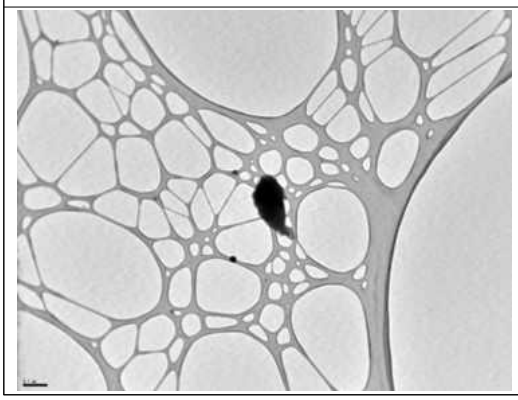
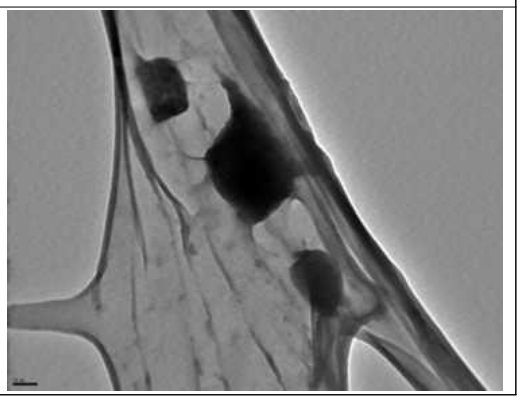
[그림 24-3] SEM을 이용한 Plate 별 입자 형태

(s) SEM (>1,600 ㎚ plate)×100	(t) SEM (>1,600 ㎚ plate)×500
	

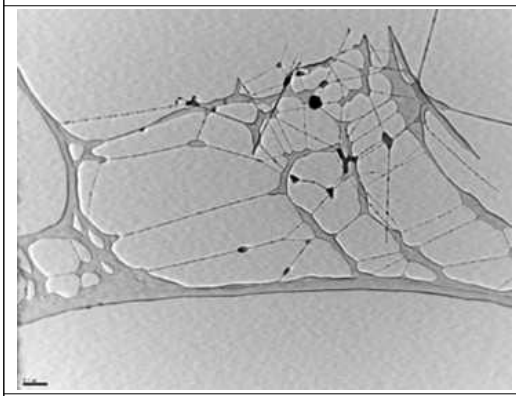
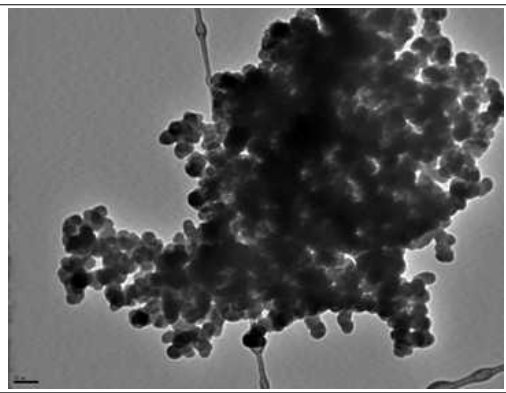
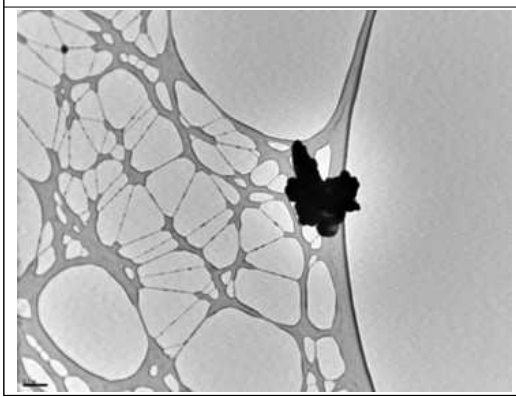
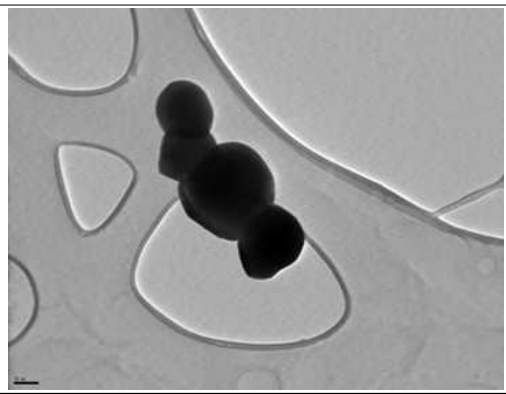
[그림 24-4] SEM을 이용한 Plate 별 입자 형태

나) TEM

[그림 25]는 TEM을 이용한 입자 형태를 관찰한 것이다. LC grid를 발생챔버 내의 하단과 배출구에 장착하여 ABS 필라멘트를 용융 토출시킨 후 TEM을 이용하여 형태를 관찰한 것이다. (a)와 (e)에서 보듯이 10 ㎚~50 ㎚크기의 입자가 관찰되었으며, (b)와 (f)에서와 같이 수 ㎚크기의 포도송이가 뭉쳐져 있는 입자도 관찰되었다. 또한, (c)와 (g)에서와 같이 수 ㎚ 및 200 ㎚의 입자, 그리고 (d)에서는 수십 ㎚ 입자가 관찰되었다. (h)에서와 같이 20 ㎚~40 ㎚크기의 포도송이 형태의 입자가 뭉쳐서 수백 ㎚의 덩어리형태도 관찰되었다.

(a) TEM (In chamber)×5,000	(b) TEM (In chamber)×50,000
	
(c) TEM (In chamber)×5,000	(d) TEM (In chamber)×50,000
	

[그림 25-1] TEM을 이용한 입자 형태

(e) TEM (Out let)×5,000	(f) TEM (Out let)×50,000
	
(g) TEM (Out let)×5,000	(h) TEM (Out let)×50,000
	

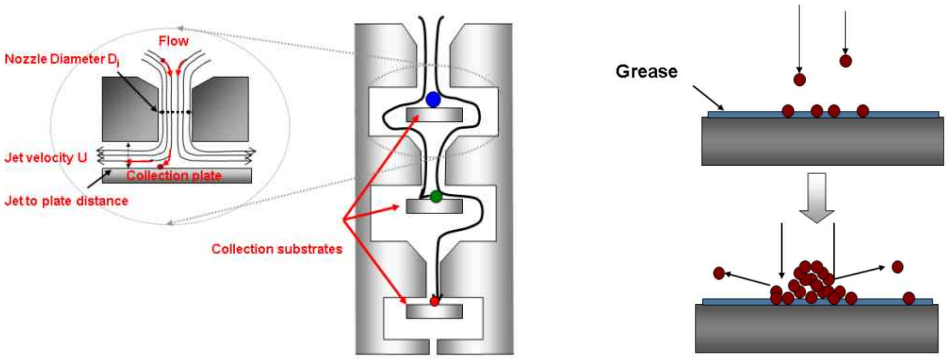
[그림 25-2] TEM을 이용한 입자 형태

Ⅳ. 고 찰

최근에는 3D 프린터를 비산업장에서 사용하는 빈도가 증가하고 있으며(Stehpenes 등, 2013; Zhou 등, 2015; Stefaniak 등, 2017; Gümperlein 등, 2018), 통풍이 잘 안되는 작은 방에서 오랜 시간동안 인쇄 할 때 발생하는 휘발성 물질 및 입자 배출로 인하여 호흡기 및 눈 자극의 위험이 있다(EPA, 2017). Stabile 등(2017)은 다양한 실내 환경에서 실험을 한 결과, 평균 에어로졸 배출량은 108~1,011 입자/min까지의 범위였고 인쇄 작업의 속도 및 환경에 따라 농도가 다양했으며, ABS 필라멘트가 가장 많은 수의 에어로졸을 생성했다 했다. FDM 방식으로 3D 프린팅시 나노 크기의 입자 외에 포름알데하이드 등의 유기화합물도 검출지만 유기화합물의 농도는 직업적 노출 한계보다 훨씬 낮은 수준이었다(Kim 등, 2015; Azimi 등, 2016; EPA, 2017; Floyd 등, 2017; Stefaniak 등, 2019). 레진과 에폭시 수지 등 분말 소재인 경우는 제품 제작시 바인더 분사방식으로 접착제도 함께 분사하여 적층시키기 때문에 사용된 유기화합물이 다량 발생할 수 있겠지만(Afshar-Mohajer 등, 2015), 본 연구는 접착제를 사용하지 않고 열가소성 소재에 열을 가하여 사용하는 FDM 방식으로 수행하여 유기화합물 발생을 최소화하였다. EPA(2017)의 유해성 평가 보고서에서는 FDM 방식으로 프린팅 작업을 할 경우 VOCs중에 포름알데하이드 등이 주로 발생하나 건강에 미칠 수 있는 영향을 나타내지 않는 노출 수준이하이며, 초 미세입자의 주성분으로 스티렌을 80%이상 배출하고 있으나, 아직까지는 건강상의 부작용의 위험과 관련하여 불확실성이 존재하기 때문에 건강영향을 평가하기는 이르다고 하였다. 다만, VOCs 물질이 미세입자 표면에 흡수 되고 그 입자가 호흡기 계통에 침착될 수 있음으로 호흡기 조직에 집중적으로 노출되는 자극효과가 커질 수 있을 것이라고 하였다. 따라서, 본 연구는 이러한 관점에서 VOCs 측정을 하면서 발생조건 실험을 하는 것은 비효율적이라고 판단하여 초미세입자에 초점을 맞추어서 수행하였다. 또한, 선행연구에서의 제한점인 3D 프린팅 프로세스로 고농도 발생, 일정한 농도 유지를 할 수 있는 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하고 동물실험까지 가능한 발생조건을 확립하고자하였다.

본 연구에서는 나노입자 크기를 측정하기 위해 SMPS, ELPI+, OPC를 이용하였다. 하지만, 발생물질의 농도가 높았기 때문에 ELPI+의 경우 6 ㎚~10 ㎛까지 측정이 가능함에도 불구하고 발생하는 동안 발생물질의 농도가 계속적으로 감소하는 양상을 보였다. 이는 [그림 26]에 나타낸 것과 같이 입자를 포집할 때 충격 원리를 사용함에 따라

과부하가 발생하였거나 입자의 바운스로 인하여 입자가 튀는 현상으로 인하여 시간이 지남에 따라 포집된 농도가 감소한 것으로 판단하였다. OPC의 경우에서는 측정하는 동안 0.5 ㎛이하의 입자가 대부분 발생된 것을 확인할 수 있었으나, 1시간 정도 측정하게 되면 OPC 후단의 teflon 필터가 막혀서 측정기의 오류가 발생하는 문제가 발생하였다. 이에 따라 ELPI+와 OPC는 발생 시스템의 장시간 측정에 제한이 있었다. SMPS의 경우에는 5 ㎚~1.0 ㎛까지 측정이 가능하여 1.0 ㎛를 초과하는 입자의 경우는 측정 못하는 제한이 있었지만 다른 장비와 다르게 고농도로 장시간(5시간 이상)까지 농도 모니터링이 가능하였다. 이러한 이유로 발생시간동안 안정적으로 모니터링이 가능한 SMPS 장비를 주 장비로 활용하고 중량 농도법으로 중량 농도를 측정하였으며, ELPI+와 OPC 장비는 보조 장비로 활용하였다. 본 연구에서는 SMPS 장비를 활용하여 입자 수 농도, 질량농도, 그리고 표면적 농도 등을 측정하였다.



임팩터 포집 원리　　입자 튀는 현상

(출처 : ELPI+ user manual Ver. 1.12, Dekati Ltd., 2011)

[그림 26] ELPI+ 입자 포집 원리

3D 프린팅 시스템의 입자 발생 특성을 보면, 열선과 연결된 노즐을 가열하여 설정한 온도로 안정화된 후에 실험재료인 ABS 필라멘트를 노즐을 토출시켜 발생시켰다. 노즐을 가열하고 실험재료를 공급하는 발생 시작부터 약 20분까지는 직경이 작은 입자가 많이 발생하였고, 이후 시간이 경과함에 따라 점차적으로 직경이 큰 입자가 발생되면서 일정한 크기로 발생하는 양상을 보였다. 농도의 경우도 발생 시스템을 가동 직후 농도가 급격하게 발생되다가 시간이 지남에 따라 점차적으로 감소하면서 안정화

되는 양상을 보였다. 이러한 양상은 Zhang 등(2017)과 박 등(2018)의 연구와 같이 발생을 시작하게 되면 입자 수 농도를 기준으로 80 ㎚보다 작은 입자의 양이 증가하면서 전체 입자 수 농도도 증가하였으며, 점차 100 ㎚ 이상의 입자 수가 증가하면서 전체 입자 수 농도는 낮아졌다. 이에 따라 80 ㎚의 입자 수 농도가 대량 발생하는 발생 직후의 중량 농도는 입자 수 농도와 반대로 낮았다. 시간이 지나면서 100 ㎚ 이상 크기의 입자 수 농도가 많아졌지만, 전체적인 입자 수 농도는 적어지면서 안정되었다. 중량 농도는 증가하다가 안정화되는 경향을 보였다.

노즐 토출 온도에 따른 3D 프린팅 시스템의 발생 실험 결과를 보면 210℃에서는 ABS 필라멘트가 완전하게 용융이 되지 않아서 노즐 토출 속도도 3배 이상 오래 걸렸으며, 발생되는 입자의 농도도 적었다. 이 온도에서 3D 프린터를 사용할 경우에는 초미세입자가 적게 발생할 뿐 만 아니라, ABS 필라멘트가 용융되기가 어렵기 때문에 원하는 물체를 가공하는 것은 불가능 할 것으로 보인다. ABS 필라멘트 제조사의 권장 온도인 240℃(230℃～250℃)이상에서는 용융이나 토출 속도가 기성품의 조건이기 때문에 양질의 물체를 성형하는데 최적 조건이라고 판단되었다. 노즐 토출온도를 높일수록 입자 수 농도, 중량 농도, 그리고 표면적 농도 모두 증가하였으며, 직경 크기 최빈값을 포함한 CMD, MMAD를 포함한 중위직경, 그리고 기하학 평균 직경 크기도 증가하였다. 특히, 300℃에서는 제조사의 권장 온도인 240℃보다 입자 수 농도의 경우의 약 2.6 배 많았으며, 중량 농도는 약 6.3 배 높았고, 표면적 농도는 약 4.5 배 더 높았다. 입자의 직경 크기에서 노즐 토출 온도가 높아질수록 커지는 양상은 다른 연구들(Deng 등, 2016; Stabile 등, 2017; 박 등, 2018)에서도 확인 되었다. Deng 등(2016)은 인쇄 공정보다는 가열 공정에서 입자 배출량의 대부분을 유발한다고 하였으며, 이러한 이유는 필라멘트가 압출기에 투입 된 후 가열 시간 동안 필라멘트가 열에 의해 변형 또는 분해되기 때문이라고 하였다.

노즐 직경에 따른 3D 프린팅 시스템의 발생 실험 결과에서는 노즐 토출 직경 크기에 따라 치우쳐지는 양상을 보이지 않았다. 입자 수 농도의 경우를 살펴보면 0.6 ㎜의 노즐 크기에서 입자가 가장 많이 발생하였으며, 이때의 직경 크기 최빈값은 106.27 ㎚이었고, CMD는 94.3 ㎚이었다. 입자 수 농도에서 2 번째로 높은 농도는 노즐 토출 직경이 0.4 ㎜이었다. 반면에 중량 농도의 경우는 노즐 토출 직경이 0.4 ㎜에서 가장 높았으며, 이때의 직경 크기 최빈값은 188.85 ㎚, 그리고 MMAD는 179.93 ㎚이었다. 중량 농도에서 2번째로 높은 농도는 노즐 토출 직경이 0.6 ㎜이었다. 표면적 농도의 경우는 노즐 직경이 0.4 ㎜에서 가장 높았으며, 이때의 직경 크기 최빈값은 158.07 ㎚, 그리고 직경의 중위직경은 152.383 ㎚이었다. 표면적 농도에서 2번째로 높은 농도는 노즐 토

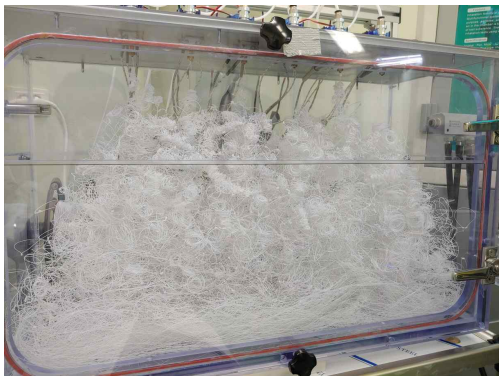
출 직경이 0.6 ㎜이었다. 일반적으로 가열된 노즐과 접촉한 면적이 넓으면 입자의 발생량이 증가하고 반대로 가열된 노즐과 접촉한 면적이 적으면 입자의 발생량이 감소할 것으로 예상하였다. 그러나 본 연구에서 노즐 직경 크기가 0.2 ㎜에서 0.4 ㎜와 0.6 ㎜로 갈수록 입자 발생농도는 높아지다가 노즐 직경 크기가 0.8 ㎜, 1.0 ㎜, 그리고 1.2 ㎜로 갈수록 입자 발생농도는 다시 낮아졌다. Deng 등(2016)의 연구에서 노출 속도를 증가시키면 입자 수 농도도 증가하는데, 60 ㎜/sec 일 때가 가장 높은 입수 수 농도를 보였고, 이 이후에서는 노출 속도를 증가시켜도 입자 수 농도가 증가하지 않는다고 하였다. 본 연구에서는 노즐의 토출 속도 측정방식이 상이하기 때문에 직접적으로 비교하기는 어려우나, 노즐 직경 크기가 0.2 ㎜ 일 때 토출되어 나오는 속도가 매우 빨랐기 때문에 입자 수 농도 및 중량 농도, 그리고 표면적 농도가 크지 않은 것으로 추측된다. 노즐 토출 크기에 대한 연구는 아직까지 진행된바가 없기 때문에 재료 특성, 실험 조건 등의 원인 파악이 더 필요할 것으로 본다.

노즐 토출 속도는 압출기의 속도 level을 조절하여 수행하였다. 각 level의 속도는 압출기의 1 cycle되는 시간을 3 회 이상 측정하였다. level 5의 경우는 1 cycle에 86.38초가 소요되었으며, level을 올릴수록 노즐 토출 속도도 증가하다가 15 level일 때 압출기의 1 cycle이 37.56 초로 약 2.3배 증가하였다. 노즐 토출 level을 올릴수록 노즐 토출 속도가 빨라졌으며, 입자 수 농도, 중량 농도, 그리고 표면적 농도 모두 증가하였다. 이 외에 중위직경이나 기하학평균 크기도 모두 증가하였다. 다만, 입자 수 농도에서 직경 크기 최빈값은 10 level 일 때 87.12 ㎚로 15 level 보다는 작았고, 5 level, 8 level, 12 level 보다는 직경 크기 최빈값이 컸으며, 전체적으로 볼 때 직경 크기 최빈값은 노즐 토출 속도가 증가함에 따라 커졌다. 이 밖에, 표면적 농도에서 직경 크기 최빈값은 10 level 일 경우에 15 level 보다는 작았으나, 5 level, 8 level, 12 level 보다는 직경 크기 최빈값이 컸으며 입자 수 농도와 같은 양상을 보였다. 노즐 토출 속도 8 level, 10 level, 12 level의 경우 속도에 큰 차이가 없었으며, 노즐 토출 온도, 압출기에 가해진 필라멘트의 압력 등 각 노즐 환경에 따라 차이가 발생한 것으로 판단되었다.

노즐 수량을 변경하여 3D 프린팅 시스템의 발생 실험을 수행한 결과, 노즐의 개수가 2 대는 1 대일 경우와 비교하여 농도가 증가하기는 하였으나 증가폭이 크지 않았으며, 4 대와 6 대로 했을 경우는 농도변화를 확실하게 구분할 수 있을 만큼 농도가 크게 증가하였다. 이는 토출기의 상태 및 압출기에 가해진 필라멘트의 압력 등의 차이로 인하여 노즐의 개수가 1 대와 2 대일 때 분명한 차이가 나지 않은 것으로 보였으나, 선형 회귀분석에서는 R^2=0.94~0.97의 선형성을 보였다.

공기 유량에 따른 3D 프린팅 시스템의 발생 실험 결과, 공기 유량이 증가할수록 입자수 농도는 증가하였고, 중량 농도, 그리고 표면적 농도는 반대로 감소하였다. 다만, 직경 크기 최빈값, 중위직경, 그리고 기하학 평균값은 공기 유량이 증가할수록 감소하였다. 동물 실험을 위해서는 동물에 흡입노출을 할 수 있는 공기유량과 측정장비에서 필요로 하는 공기유량을 모두 고려하여야 한다. ELPI+는 10 LPM, SMPS는 0.3 LPM, 그리고 OPC는 1.2 LPM, 필터 중량법의 개인 시료 채취기의 포집 유량은 1~4 LPM으로임을 감안하고, 적은 양의 시험물질로 동물 실험이 가능한 비부노출 흡입챔버에서 실험동물 10마리로 실험을 한다고 가정하였다. 권장하는 비부노출 흡입챔버의 흡입 노즐 1개당 공기유량을 1 LPM로 본 다면 공기유량은 최소 22.5~25.5 LPM이 필요하다. 따라서, 본 연구에서 20 LPM에서 중량 농도가 가장 많이 발생하였으나, 동물 실험을 위해서는 25.5 LPM 이상에서 발생시키는 것이 바람직하다는 결론을 얻었으며, 실험환경 변수도 고려하여 30 LPM을 최적 조건으로 판단하였다. 아울러, 공기 유량에 따라 발생하는 물질의 직경 크기가 변화되는 것을 볼 때, 추후 입자의 직경 크기 변화 연구도 가능할 것으로 본다.

[그림 27]의 a)에서 보는 바와 같이 노즐의 토출 온도가 300℃일 경우 노즐을 통과한 필라멘트가 발생 챔버 바닥에 차곡차곡 누워서 쌓여가는 것이 아니라 회오리 형태로 꼬여서 탑을 이루게 된다. 이 영향으로 장시간 발생을 시킬 경우 발생 챔버의 공기흐름을 방해하여 농도를 안정적으로 유지하지 못하게 되고, 결국 시간이 지남에 따라 농도의 편차가 발생하면서 농도가 떨어지게 되었다. 이와 비교하여 [그림 27]의 b)에서 보는 바와 같이 노즐의 토출 온도가 270℃일 경우는 긴 필라멘트가 타원형으로 차곡차곡 쌓여가기 때문에 [그림 20]의 (a)에서 보는 바와 같이 약 5시간정도 농도가 유지된 것으로 판단되었다.



a) 300℃토출 모습

b) 270℃토출 모습

[그림 27] 노즐 토출 온도에 따른 발생챔버 내 필라멘트 적층 모습

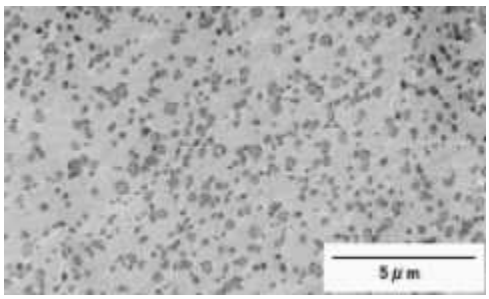
따라서, 동물실험을 위한 최적 농도 발생조건은 노즐 직경 0.4 ㎜(또는 0.6 ㎜), 노즐 온도는 270℃, 챔버 내 공기 공급유량 30 LPM, 토출 속도 15 level, 발생 노즐 6 대로 판단되었다. 이 조건에서 실험한 결과, 기성품 발생조건과 비교하여 입자 수 농도는 약 13.8배, 중량 농도는 약 13.7배, 그리고 표면적 농도는 약 13.3배로 거의 비슷한 비율을 보였다.

OPC의 입자 측정범위는 0.25 ㎛~32.0 ㎛로 SMPS가 1.0 ㎛ 이상을 측정하지 못하는 범위까지 가능하였다. 다만, 발생 시작 1시간 후에 장비 후단의 teflon필터가 막히게 되면서 측정 오류가 발생함에 따라 짧은 시간동안만 농도를 측정할 수 있었으며, 장시간 농도 측정에는 바람직하지 못하였다. SMPS 장비의 경우는 0.4 ㎛이하의 입자들은 측정할 수 있는 있었지만, 1.0 ㎛ 초과한 입자의 경우는 측정할 수 없었다. 1.0 ㎛ 크기를 초과한 입자는 양이 적었기 때문에 SMPS로 측정한 입자 수 농도 그래프 상에서 잘 나타나지 않았으며, 중량 농도에서는 비록 입자 수가 적다고 할지라도 중량이 크기 때문에 그래프 상에서 확인할 수 있었다.

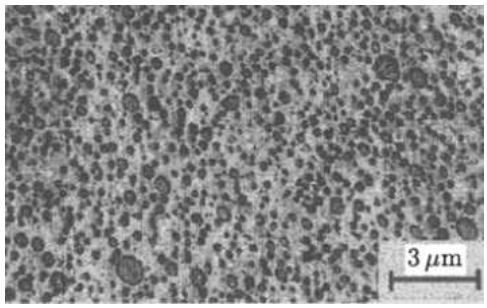
필터 중량법에 의해서 측정한 결과 값은 같은 포집시간동안 측정한 SMPS의 중량 농도와 비교한 결과와 비율이 157.8%로 나타났으며, 이는 SMPS로는 1.0 ㎛ 크기를 초과한 입자를 측정할 수밖에 없기 때문에 필터 중량법보다 중량이 적었다고 사료된다. 가장 넓은 범위를 측정할 수 있는 ELPI+의 경우는 특정한 크기의 입자가 대량으로 발생할 경우 해당 stage의 바운스 형상으로 발생시간 동안 일정한 결과를 얻을 수 없었고, OPC의 경우도 고농도를 장시간 측정할 수 없었다. 만약, SMPS와 필터 중량법에 의한 결과의 비율이 일정하다면, 간접적으로 중량 농도를 유추할 수 있을 것이다.

전자현미경으로 발생된 ABS 물질의 입자 형태를 보면, 주사전자현미경(SEM)으로 >17 ㎚ plate에 포집된 입자는 섬유상은 아니었으며, 작은 입자로 존재하기도 하였고, 대부분 입자끼리 서로 뭉쳐져 있는 형태였으며, 뭉쳐져 있는 입자는 작게는 10 ㎛~20 ㎛, 크게는 200 ㎛의 크기까지 되는 것도 있었다. 농도가 높은 plate에서는 뭉침이 더 심하여 산봉우리 형태를 보였다.

TEM으로 관찰한 입자의 형태는 다양하였다. 10 ㎚~200 ㎚크기의 입자가 관찰되었다. 또한, 수 ㎚~수십 ㎚ 크기의 포도송이 형태의 입자가 뭉쳐져서 수백 ㎚의 덩어리 형태로도 관찰되었으며, [그림 28]의 ABS 수지와 같이 수십 ㎚~수백 ㎚ 입자가 잘 분산되어 있는 것과는 다른 형태를 보였다. 이러한 형태는 김 등(2018)의 연구에서 동일하게 확인할 수 있었다.



SEM Fractography of ABS resin[3)]



TEM micrographs of ABS resin[4)]

[그림 28] 전자현미경을 이용한 ABS 수지의 입자 형태

이상의 결과, 본 연구는 한정된 공간을 활용하여 3D 프린팅 발생 시스템을 제작하였다는 점과 여러 조건에서 발생하는 초미세 입자의 일정한 패턴 확인하였다는 점, 그동안 선행연구들에서 수행할 수 없었던 여러 조건에서 안정적으로 농도를 발생·유지시켰다는 점, 이를 토대로 향후 동물실험을 비롯한 in vitro 시험까지의 응용 가능성을 보여준 점에서 의미가 있다. 앞으로 본 연구에서 구축한 다중 3D 프린팅 발생장치를 통하여 다각적인 연구 수행이 가능할 것으로 판단된다.

---

3) https://www.mcanac.co.jp/en/_images/service/detail/4047/fi_4047-1.gif?20180731

4) https://www.researchgate.net/profile/Mitsuo_Notomi/publication/225635310/figure/fig1/AS:341484491558914@1458427655056/TEM-micrographs-of-ABS-resin-a-and-PC-ABS-alloy-b.png

Ⅴ. 결 론

본 연구는 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하여 동물실험을 위한 최적의 조건을 만들기 위해 수행하였다.

다중 3D 프린팅 발생 시스템에서 여러 조건에서 공통적인 양상을 보였다. 발생시작 후 작은 ㎚ 크기의 초미세입자의 발생이 급격하게 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였으며, 1시간 후부터는 안정적으로 발생하였다.
ELPI+를 이용한 농도분석에서는 고농도 발생에 따른 입자 바운스로 인하여 greased filter내에서 팅김 현상이 발생하였으며, 이 영향으로 장시간 분석이 불가능하였다. OPC를 이용한 농도분석에서도 장비 후단에 장착된 teflon필터의 파과로 인하여 장시간 분석은 적합하지 않았다.
기성품 발생조건의 실험은 제조사에서 권장하는 요구조건으로 수행하였다. 실험 재료 ABS 필라멘트는 직경 1.75 ㎜, 노즐의 토출 직경은 0.4 ㎜, 그리고, 노즐의 토출 온도는 240℃, 그리고 노즐의 토출속도는 10 level로 수행하였다. 실험결과, 실험물질 발생량이 최대로 발생되지는 않았으며, 이는 양질의 3D 프린터 제품 성형을 위한 조건이었다.
노즐 토출 온도에 따른 실험에서, 210℃에서 300℃로 노즐 토출 온도가 높아짐에 따라 입자 발생 농도는 증가하였다.
노즐 토출 직경을 0.2 ㎜에서 1.2 ㎜까지 수행한 실험에서 노즐 직경이 크거나 작아질 때 농도가 높아지지 않았으며, 노즐 토출 직경이 0.4 ㎜ 또는 0.6 ㎜일 때 입자 발생 농도는 높았다.
노즐 토출 속도에 따른 실험에서 노즐 토출 속도가 빠를수록 입자 발생농도는 증가하였다.
다중 발생을 위해 구성한 노즐 수량에 따른 실험에서 노즐 수량이 증가함에 따라 입자 발생 농도는 증가하였다.
공기유량 조건에서는 공기 유량이 증가할수록 입자 수 농도는 증가하였으며, 중량 농도와 표면적 농도는 반대로 감소하였다.
개인시료 시료 채취기로 포집한 필터 중량법으로 측정한 농도는 같은 시간대에

SMPS로 측정한 중량농도와 비교하여 157.8%로 더 높았다.
OPC를 이용하여 농도를 측정한 결과, SMPS 측정범위 이상인 1.0 ㎛~2.5 ㎛에서 입자가 측정되었으며, 이는 필터 중량법의 농도와 SMPS 측정 중량 농도 차이에 영향을 주었다.
노즐 토출 온도가 300℃일 때는 토출된 필라멘트가 회오리형태로 꼬여서 발생챔버의 유속을 방해하여 동물발생 온도조건은 270℃가 보다 더 적합하였다. 또한, 공기유량의 경우 측정장비와 동물실험을 위해 필요한 공기 유량을 감안할 때 고농도 발생을 위한 최저유량은 30 LPM이었다.
상기의 조건 실험을 토대로 볼 때, 다중 3D 프린팅 발생 시스템의 동물실험을 위한 최적 발생조건은 노즐 토출 직경 0.4 ㎜(또는 0.6 ㎜), 노즐 토출 온도 270℃, 챔버 내 공기 공급유량 30 LPM, 그리고, 노즐 토출 속도 15 level 이었다.
동물실험을 위한 최적 발생조건 실험 결과, 기성품 발생조건과 비교하여 입자 수 농도는 13.8 배, 중량 농도는 13.7 배, 그리고 표면적 농도는 13.3 배 높은 결과를 얻었다.
주사전자현미경으로 입자가 포집된 상태를 관찰한 결과, ABS 발생물질은 작은 입자로 존재하기도 하였으나, 대부분 입자끼리 서로 뭉쳐져 산봉우리 형태의 모습이었다.
투과전자현미경으로 관찰한 grid 상의 입자는 10 ㎚~200 ㎚ 크기의 입자가 관찰되었다. 또한, 수 ㎚~수십 ㎚ 크기의 입자가 뭉쳐져서 포도송이 형태로 관찰되었다.

이상의 결과, 본 연구는 다중 3D 프린팅 발생 시스템을 구축하여 여러 조건에 따른 일정한 패턴 확인, 안정적으로 농도 유지, 그리고 동물실험 조건을 확립하여 향후 동물실험의 가능성을 보여주었다. 이 다중 3D 프린팅 시스템을 이용하여 향후 다각적인 연구 수행이 가능하며, 더 나아가 3D 프린팅 발생물질에 대한 법적 규제의 근거자료를 제공함으로써 근로자의 건강장해 예방을 도모할 수 있을 것이다.

참고문헌

김성호, 정은교, 김세동. 3D 프린터 사용자에 대한 초미세입자 노출평가 보고서. 산업안전보건연구원;2018(71쪽)

박지훈, 전혜준, 박경호, 윤충식. 3D 프린팅 가동 조건 별 발생 입자크기 분포와 흡입 노출량 추정. 한국환경보건학회지 2018;44(6):524-538

이성배. 3D 프린터 산업보건 관점에서 고민. 대한산업보건협회 산업보건 2018;365:21-29

이용, 함완식. 2017 3D프린팅 산업실태 및 동향분석 보고서. 정보통신산업진흥원;2018.(36쪽, 191쪽.)

Afshar-Mohajer N, Wu C-Y, Ladun T et al. Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D 프린터. Building and Environment 2015;93(2):293-301

Azimi P, Zhao D, Pouzet C et al. Stephens B. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional 프린터s with Multiple Filaments. Environ Sci Technol 2016;50(3):1260-1268

Dekati. ELPI+ User manual Ver.1.12 Dekati Ltd.;2011.p.60

Deng Y, Cao S-J, Chen A et al. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D 프린터 in the perspective of emission reduction.

Building and Environment 2016;104:311-319

Floyd EL, Wang J, Regens JL. Fume emissions from a low cost 3-D 프린터 with various filaments. J Occup Environ Hyg 2017;14(7):523-533

Gümperlein I, Fischer E, Dietrich-Gümperlein G et al. Acute health effects of desktop 3D 프린팅 (fused deposition modeling) using acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid materials: An experimental exposure study in human volunteers. Indoor Air 2018;28(4):611-623

Kim Y, Yoon C, Ham S, Park J, Kim S, Kwon O, Tsai PJ. Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D 프린터 Operation. Environ Sci Technol 2015;49(20): 12044-12053

Kwon OH, Yoon CS, Ham SH et al, Characterization and Control of Nanoparticle Emission during 3D 프린팅. Environ Sci Technol 2017;51(18):10357-10368

Stabile L. Scungio M, Buonanno G et al. Airborne particle emission of a commercial 3D 프린터: the effect of filament material and 프린팅 temperature. Indoor Air 2017;27:398-408

Stephens B, Azimi P, Orch ZE et al. Ultrafine particle emissions from desktop 3D 프린터s. Atmospheric Environment 2013;79:334-339

Stefaniak AB, LeBouf RF, Duling MG et al. Inhalation exposure to three-dimensional 프린터 emissions stimulates acute hypertension and microvascular dysfunction. Toxicol Appl Pharmacol 2017;335:1-5

Stefaniak AB, Johnson AR, Preez S et al. Evaluation of emissions and exposures at workplaces using desktop 3-dimensional 프린터s. Journal of Chemical Health and Safety 2019;26:19-30

The Danish Environmental Protection Agency. Risk assessment of 3D 프린터s and 3D printed products. Environmental Protection Agency;2017.p.8,10,70

Zhang Q, Wong JPS, Davis AY et al. Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D 프린터s. Aerosol Science and Technology 2017;51(11):1275-1286

Zhou Y, Kong X, Chen A et al. Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D 프린터s in the Clean Room. Procedia Engineering 2015;121:506-512

[네이버 지식백과] ABS수지 [acrylonitrile butadiene styrene copolymer] (두산백과); Available from: URL:
https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1125410&cid=40942&categoryId=32404

SEM Fractography of ABS resin; Available from: URL:
https://www.mcanac.co.jp/en/_images/service/detail/4047/fi_4047-1.gif?20180731

TEM micrographs of ABS resin; Available from: URL:
https://www.researchgate.net/profile/Mitsuo_Notomi/publication/225635310/figure/fig1/AS:341484491558914@1458427655056/TEM-micrographs-of-ABS-resin-a-and-PC-ABS-alloy-b.png

Abstract

A Study on Bioeffects of 3D Printer-Generated Toxic Substances Using Experimental Animals – Development of 3D Printing Multi-Generator System

Objectives : This study was performed to create an optimal condition for animal experiments by establishing a 3D printing multi-generation system.

Methods & Results : In the experiments with the nozzle discharge temperature, the particle generation concentration was increased with increasing nozzle discharge temperature from 210° C to 300° C. In the experiments with the nozzle discharge diameter from 0.2 ㎜ to 1.2 ㎜, the concentration was not increased when the nozzle diameter became larger or smaller, and the particle generation concentration was high when the nozzle discharge diameter was 0.4 ㎜ or 0.6 ㎜. In the experiments with the nozzle discharge speed, the particle generation concentration was increased as the nozzle discharge speed increased. In the experiment with the number of nozzles for multiple generations, the particle generation concentration was increased as the number of nozzles increased. In the air-flow conditions, the particle number concentration was increased with increasing air-flow, but the weight concentration and surface area concentration were decreased in reverse.

The concentration measured with the filter gravimetric method by collecting with a personal sampler was 157.8% higher than the weight concentration

measured by SMPS at the same time.

When the nozzle discharge temperature was 300° C, the discharged filaments were twisted in a whirlwind form and prevented the flow rate of the generation chamber, so that the animal generation temperature condition was more suitable at 270° C. In addition, in the case of the air-flow, the minimum flow rate for generating a high concentration was 30 LPM considering the air-flow rate required for measuring equipment and animal experiments.

Based on the above condition experiments, the optimum conditions for the animal experiments of the multiple 3D printing generation systems are the nozzle discharge diameter of 0.4 ㎜ (or 0.6 ㎜), the nozzle discharge temperature of 270℃, the air supply flow rate in the system of 30 LPM, and nozzle discharge speed of 15 level. As a result of experiments under optimal generation conditions for animal experiments, the results obtained that the particle number concentration was 13.8 times, the weight concentration was 13.7 times, and the surface area concentration was 13.3 times higher than the ready-made product generation conditions.

As a result of observing the state of the collected particles with the scanning electron microscope, the ABS generation material was present as small particles, but most of the particles were agglomerated to form a mountain peak shape. Particles on the grid, which were observed by the transmission electron microscope were 10 ㎚ to 200 ㎚ size. In addition, particles of the grape bunch form of several ㎚ to several tens ㎚ were agglomerated and observed in the form of lumps of hundreds ㎚.

Conclusions : Through the above results, this study produced 3D printing multi-generation system, confirmed a certain pattern according to various

conditions, stable generation of concentration and showed the possibility of future animal experiment. This multiple 3D printing generation system will enable various researches to be carried out in the future, and furthermore, by providing evidence of legal regulations on 3D-printing substances, it will help prevent workers' health hazards.

key words : Ultra fine particle, 3D printer, Multi-generation system, FDM

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이 성 배 (차장, 이학박사, 산업화학연구실)
연 구 원 : 임 철 홍 (연구위원, 약학박사, 산업화학연구실)
연 구 원 : 한 정 희 (차장, 의학석사, 산업화학연구실)
연 구 원 : 이 미 주 (연구위원, 수의사, 산업화학연구실)
연 구 원 : 김 태 현 (연구원, 환경공학사, 산업화학연구실)
연 구 원 : 정 은 교 (연구위원, 이학박사, 직업환경연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2019. 01. 03.～ 2019. 11. 30.

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

산업안전보건연구원장

실험동물을 이용한 3D 프린터 발생 독성물질에 대한 생체영향 연구 (I) – 다중 발생 시스템 개발 중심으로

(2019-연구원 1610)

발 행 일 : 2019년 11월 30일
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 고 재 철
연구책임자 : 흡입독성연구센터 이성배 차장
발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400
전 화 : 042-869-8512
F A X : 042-869-8693
Homepage : http://oshri.kosha.or.kr