

적층제조공정에 관한 환경영향평가의 사례 연구

Case Study of Different Additive Manufacturing (AM) Processes from Environmental Impact Assessment

권주연¹, 김남훈¹, 마정목^{2, #}
JuYoun Kwon¹, Namhun Kim¹, and Jungmok Ma^{2, #}

¹ 울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부 (School of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)
² 국방대학교 국방과학학과 (Department of Defense Science, Korea National Defense University)
Corresponding Author / E-mail: jxm1023@gmail.com, TEL: +82-41-831-5384
ORCID: 0000-0001-5390-8483

KEYWORDS: 3D printing (3D 프린팅), Additive manufacturing (적층제조), Power consumption (전력 소비), Environmental impact (환경영향), Life cycle assessment (전과정평가)

The additive manufacturing (AM) process is known to have a major influence on environmental impact. To find out AM process with lower environmental impact in the product manufacturing process, this study compares material extrusion (Fused Deposition Modeling, FDM), powder bed fusion (Laser Sintering, LS) and material jetting processes (Poly-Jet, PJ) for 200 NIST test artifacts, using data from the specification and software of three 3D printers (J750, P770 and uPrint SE Plus), the findings from various literature and Ecoinvent of SimaPro 8.4 database. The results showed that the effects of materials on the environment were the severest for LS (20.45 Pts) and the least for FDM (10.38 Pts) although the effects of power consumption on the environment were severest for FDM (126.91 Pts) and least for LS (20.18 Pts). To reduce the emission to environment in PJ and FDM, it is recommended to improve their printing speed and reduce power consumptions of waterjet and auxiliary equipment for support removal.

Manuscript received: August 14, 2018 / Revised: October 19, 2018 / Accepted: November 12, 2018

NOMENCLATURE

AM = Additive manufacturing
FDM = Fused deposition modeling
LS = Laser sintering
PJ = Poly-jet
LCA = Life cycle assessment

1. 서론

적층제조(Additive Manufacturing, AM)는 제조 공정에서 재료 낭비를 최소화하고, 주문생산에 적합하여 공급망을 단순화할 수 있기 때문에 지속 가능한 친환경 기술로 여겨진다.^{1,2} 하지만,

적층제조는 경우에 따라서는 절삭가공과 사출성형과 같은 종래의 제조방식보다 환경에 미치는 영향이 더 큰 경우도 있다.³⁻⁵ 특히, 적층제조의 경우는 기존의 방식들과는 다르게, 제조단계가 환경영향에 미치는 비중이 제품 전수명주기의 절반을 차지하는 것으로 알려져 있다.⁶ 이러한 환경영향도 분석을 위해서는, 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 방식이 사용되고 있다. 특히, ISO 14040는 LCA 프레임워크로 제품 및 공정의 환경영향을 평가하기 위한 표준이며, 환경영향을 줄이기 위한 의사결정 도구로서 실제 연구에서 일반적으로 사용되어진다.⁷⁻⁹

적층제조의 환경영향평가를 위해서는, LCA 프레임워크의 적용 범위를 명확히 해야 할 필요가 있다. 이러한 이유로, 기존의 연구사례에서는, 적층제조의 과정 중 3D 프린터로 제품을 출력하는 과정만 한정해서 분석한다든지, 제품 설계와 출력과정까지만 한정해서 전력 소비량위주로 환경영향 평가를 수행하는 방법

을 사용하는 등으로 분석의 범위를 한정하는 방법을 사용하였다.^{5,10} 다른 연구사례에서는 제품출력에서 인적오류 및 공정상의 결함 문제에 초점을 맞춰 문제를 정의하기도 하였다.^{11,12} 국내에서도 유사 연구들이 진행되어왔는데, 여기서도 적층제조는 전주기적인 공정과 환경 영향도가 고려되기 보다는, 제품 출력시의 기계적 물성 및 출력물의 정밀도 등만을 고려하여 연구를 진행하였다.^{13,14} 하지만, 적층제조는 친환경 분석을 위해서는, 제품 출력시 발생할 수 있는 부산물인 서포트의 제거 또는 소재 재활용을 위한 파우더 재사용 등을 포함하는 적층제조 전후과정을 모두 고려한 분석이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 세 가지 유형의 3D 프린터(J750, P770, uPrint SE Plus)에 대하여 제품제조단계에서 LCA에 기초한 환경영향평가를 실시하고, 다양한 적층제조공정이 보여주는 미래 제조기술로서의 지속가능성을 논하고자 한다. 이를 위해 본 논문은 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 제시한 적층제조공정 표준 테스트 샘플에 대하여 3D 프린터의 제품사양 및 소프트웨어에서 제공하는 자료, 문헌의 내용 및 SimaPro 8.4의 Ecoinvent 데이터베이스를 사용하여, 재료압출성형공정(Fused Deposition Modeling, FDM), 분말베드용융공정(Laser Sintering, LS) 그리고 재료분사공정(Poly-Jet, PJ)의 제품제조공정을 비교하고 환경영향을 분석하였다. 이 연구가 제시하는 결과가 향후 적층제조를 활용하고자 하는 연구자들 및 사용자들에게 친환경성 평가를 위한 배경 정보를 제공하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 배경

산업혁명을 계기로, 기계가 인간의 노동력을 일부 대신하여 제품의 대량 생산이 가능하게 되었다.¹⁵ 적층제조 기술이 등장한 후, 최종 완성품의 직접제조 또는 프로토타이핑을 위한 기존에는 구현하기 힘들었던 기능적인 파트를 제작하는데 큰 이점이 있어, 제품의 개발주기를 단축하는 등 설계 및 제조 기술의 발전에 큰 공헌을 했다. 사출성형, 절삭가공과 같은 종래의 제조공정과 달리, 적층제조는 3D CAD 모델을 통해 제품을 층별로 쌓으면서 제작한다. 적층제조에는 다양한 공법들이 존재하고 각각의 공정별 특성이 상이해서, 제작하고자 하는 제품의 소재 및 품질 요구특성 등에 따라 적합한 공정의 선택이 중요하다. 전반적 공정 절차는 Fig. 1과 같으나, 재료압출성형공정 및 재료분사공정은 서포트를 제거하는 단계가 필요한 반면, 분말베드용융공정은 서포트는 없지만, 파우더를 재활용하기 위하여 파우더 분리과정이 필요하다.

프로슈머가¹⁶ 등장하게 되면서, 적층제조에 기반한 제조시스템은 그 가치사슬이 점점 짧아지고 효율적인 소비를 통해 더욱더 지역화되는 변화를 만들어냈다. 이는 적층제조는 수익성 창출은 물론이거니와 환경적으로 지속가능성이라는 장점을 기대할 수 있도록 하였다.¹ 적층제조기술의 사용이 증가함에 따라,

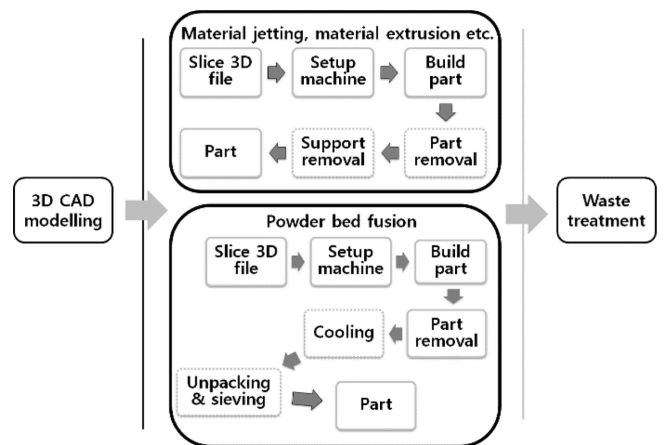


Fig. 1 Work flow of additive manufacturing processes

여러 연구들에서 적층제조방식과 기존 제조방식의 환경영향차이를 다루어 왔다. 적층제조는, 소량의 제품을 제작하는 경우, 기존 방식(예, 사출성형 등)보다 환경에 더 적은 영향을 미친다고 여겨진다. 하지만, 적층제조는 다양한 공법에 따라, 서로 다른 공정 변수, 재료종류, 에너지 소비량을 보이기 때문에 어떤 공법을 사용하느냐에 따라 환경영향도에 차이가 있어서, 기존의 제조방식보다 항상 환경에 적게 영향을 미치는 것은 사실이 아닐 수 있다.

적층제조 기술은 약 30년 전에 등장했지만, 환경적인 영향에 관한 연구가 본격적으로 진행된 것은 그리 오래되지 않았다. 기존의 연구들 중에 많은 수의 연구가 적층제조는 전력 소비와 같은 제한적 범위에서 접근되었다. Telenko and Seepersad⁴는 레이저 소결 방식의 적층제조 원재료인 나일론의 정제, 레이저 소결 및 사출성형공정 그리고 사출금형 제작의 에너지 효율을 비교 분석하였다. 이 연구에서 레이저 소결 공정이 적용되었을 때, 사출금형보다 소량의 제품생산이 전력 소비 관점에서 유리하다는 사실을 입증하였다. 하지만, 여전히 소비 전력의 비교에만 국한된 연구 결과였다. 레이저 소결 과정에 대한 환경영향도 분석은 Sreenivasan 등에 의해서도 연구되었다. 레이저 소결 단위 공정의 지속가능성을 위하여 에너지 소비를 줄이는 방법들을 분석하기 위해, 단위 공정의 세부 단계에 따른 전력소비량을 조사하였고, 그 결과 파우더 투입 및 파트베드 가열, 이 모두가 총 전력 소비량의 40%를 차지한다는 결론을 도출하였다.^{17,18} 게다가, Faludi 등³은 FDM이 CNC보다 환경영향이 적지만, 재료분사공정은 CNC보다 환경에 더 안 좋은 영향을 준다는 사실을 발견하였다. Yoon 등⁵은 또한 선행연구를 통해 고유전력소비(SEC)를 비교하면서, 적층제조방식에서의 에너지 소비가 기존의 제조방식들보다 훨씬 더 많다는 것을 보여주었다. 하지만, FDM의 에너지 소비는 소량의 제품을 생산할 때, 환경에 훨씬 더 적은 영향을 미치는 것을 발견하였다.

환경에 영향을 미치는 적층제조 공정 요인들에 관한 연구에서 에너지 소비량의 비교를 통해 출력 시간의 최소화가 전력 소비를 줄이는데 필수적이라는 것을 발견하였다.^{10,19} 또 다른 관점

의 연구 사례로는, Faludi 등³은 3D 프린터의 지속가능함을 결정하는 하나의 영향 인자로서 3D 프린터의 기계 가동률(Machine Utilization)이 재료나 기계 크기보다 환경에 더 큰 영향을 준다는 것을 발견하였다. 기계 가동률은 결국 전력 소비에 영향을 미치게 된다. 적층제조에서의 전력 소비는 3차원 출력에서 중앙 집중형 제조 시스템(Centralized Manufacturing System)과 분산 제조 시스템(Distributed Manufacturing System)간의 차이점이 환경에 지배적으로 영향을 미친다는 것을 보여준 연구도 있었다.⁶

하지만, 앞서 언급한 연구들은 모두 적층제조공정에서 소비 전력 위주의 환경영향도 분석이 주를 이루었다. 비록 선행 연구들이 적층제조 환경 영향성을 다루고 있다는 것은 틀림없지만, 서포트 제거 및 소재의 재사용 등 출력 제품의 후처리 단계의 환경영향에 대하여는 포괄적으로 다루지 않았다는 사실이 아쉽다. 따라서, 본 사례 연구에서는 기존의 연구에서 찾아보기 힘든, 적층제조의 후처리 단계를 포함한 제품제조단계의 전과정에 대하여 세 적층제조 공정의 환경영향평가를 실시하였다.

3. 적층제조 공정이 환경에 미치는 영향: NIST표준 테스트 샘플의 사례 연구

본 연구에서는, 다양한 적층제조 공법의 환경영향도를 비교 분석하기 위해, 200개의 NIST 테스트 표준 샘플이 출력되는 동안 LCA 방법을 이용하여 재료압출성형공정, 분말베드용융공정 그리고 재료분사공정의 환경영향을 비교하였다. ISO 14040에 따르면 LCA는 목적 및 범위 정의(Goal and Scope Definition), 전과정 목록분석(Inventory Analysis), 전과정 영향평가(Impact Assessment) 그리고 전과정 해석(Interpretation)의 4단계로 구성되어 있다.⁹ 본 연구의 목적은 서포트 제거 및 후처리 공정을 포함하는 제품제조단계의 전단계에서 적층제조 친환경성을 파악하는 것이다. 전과정 목록분석을 위한 자료는 해당 3D 프린터(J750, P770, uPrint SE Plus)들의 사양서와 운용지침서^{20,21} 그리고 SimaPro 8.4의 Ecoinvent 데이터베이스로부터 수집되었다. NIST 표준 테스트 샘플을 출력하기 위한 에너지 사용은 3D 프린터의 사양과 실제 부품 제작시간을 토대로 계산하였다. 환경영향은 SimaPro 소프트웨어의 ReCiPe 환경분석지표를 활용하였으며, 그 결과 17가지(기후변화로 인한 인간 건강: Climate Change Human Health, 오존층파괴: Ozone Depletion, 독성으로 인한 인체 손상: Human Toxicity, 광화학산화제 형성: Photochemical Oxidant Formation, 초미세먼지 형성: Particulate Matter Formation, 이온화 방사선: Ionizing Radiation, 기후 변화에 의한 생태 시스템의 손상: Climate Change Ecosystem, 토양 산성화: Territorial Acidification, 담수의 부영양화: Freshwater Eutrophication, 토양의 생태독성: Territorial Ecotoxicity, 담수의 생태독성: Freshwater Ecotoxicity, 해양의 생태독성: Marine Ecotoxicity, 농지사용: Agricultural Land Occupation, 도시토지

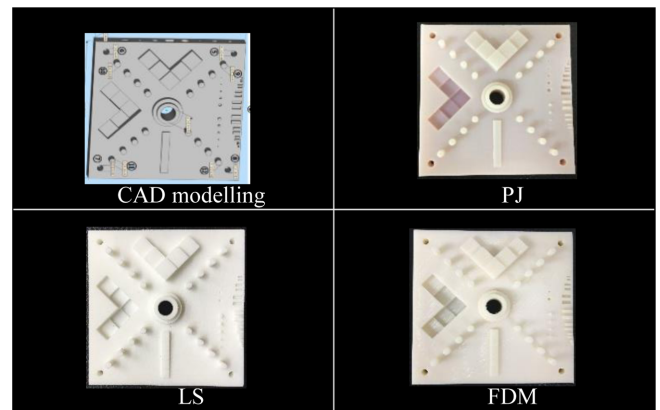


Fig. 2 CAD modeling and 3D printed NIST test artifact

사용: Urban Land Occupation, 자연지대변형: Natural Land Transformation, 금속 고갈: Metal Depletion, 화석연료 고갈: Fossil Depletion)의 환경 특성으로 손상을 표현하였다.²² 이 특성들의 단위는 포인트(Point, Pt) 또는 밀리포인트(Millipoint, mPt) 이었다. 이 포인트는 영향 범주(Impact Category), 손상 범주(Damage Category), 정규화 요인(Normalization Factor), 가중치 요인(Weighting Factor)들을 고려하여 구해진다.^{22,23} 또한, 기능 단위 및 다른 LCA 환경분석지표를 사용하여 불확실성을 평가하였다.

본 연구의 기능 단위는 NIST 표준 테스트 샘플 200개이다. (Fig. 2) 환경영향은 세 가지 적층제조 공정의 최신형 3D 프린터(J750, P770, uPrint SE Plus) 각각의 제품제조단계에 대하여 평가되었다. 이 세 적층제조 공정은 광경화 수지를 사용하는 재료분사공정(J750, PJ), 레이저 소결되는 파우더를 사용하는 분말베드용융공정(P770, LS) 그리고 필라멘트를 사용하는 재료압출성형공정(uPrint SE Plus, FDM)이다.

모든 3D 프린터가 적층제조 공정 시작 이전에 가공에 적합한 시스템 온도에 도달하기 위해 예열 작업이 필요하다. 기계별 공정특성에 따라 PJ와 FDM을 예열하는데 소비되는 시간은 10분, LS는 2시간이었다. 각 3D 프린터에 대한 예열과 출력에 대한 전력 소비는 프린터 사양의 전원 요구사항을 참고하여 분석에 적용되었다.

본 연구에서 적용하는 적층제조 공정의 시스템 경계(System Boundary)는 소재투입에서 최종제품의 추출까지로 정의하였고, NIST 테스트용 파트를 출력하고 서포트를 제거하거나 파우더를 제거하는 후처리 단계까지 고려되었다. PJ와 FDM은 출력된 제품과 함께 서포트가 만들어져서, 서포트를 제거하고, LS로 출력된 제품 주변의 파우더를 제거해야 한다. NIST 표준 테스트 샘플을 출력할 때 사용하는 재료, 전기, 물 그리고 투입되는 불활성 기체 등을 고려하였으며, 적층제조 시스템 운용 과정에서 부산물은 각종 열, 물, 재료 그리고 기체가 방출되는 것을 기준으로 한다(Fig. 3). 각 3D 프린터의 운용을 위한 자체 소프트웨어가 제공하는 출력 시간 및 재료 소비량을 실시간으로 분석하여 비교 자료에 반영하였다.

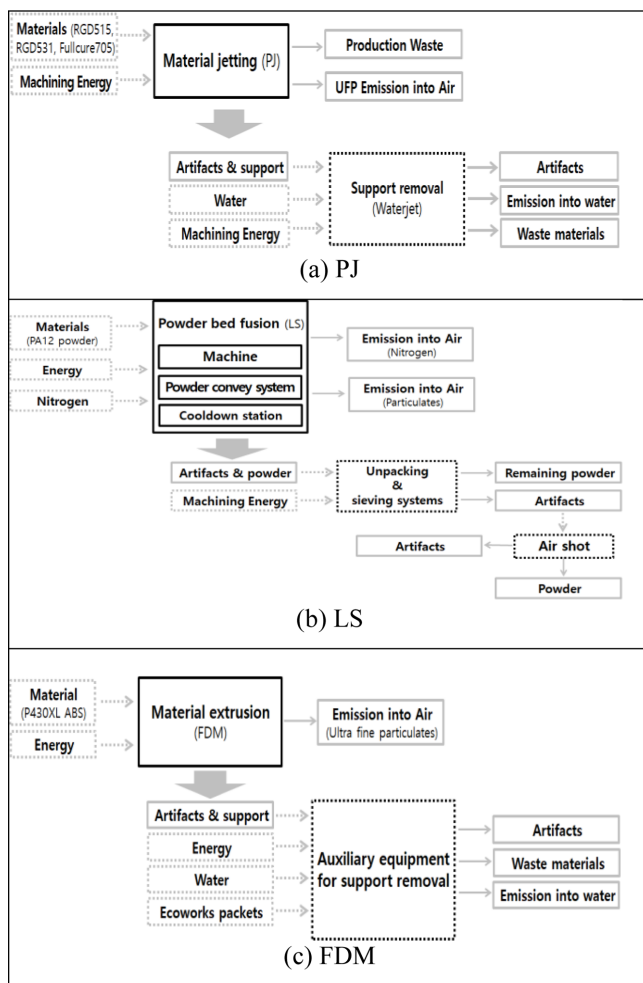


Fig. 3 Product manufacturing processes of PJ, LS and FDM

PJ와 FDM은 NIST 표준 테스트 샘플을 출력하기 위해 샘플 및 서포트 모두에 대한 재료가 필요하지만, LS는 샘플을 위한 재료의 양만 필요로 한다(파우더 소재 자체가 서포트 역할을 수행). PJ로 출력된 서포트는 워터젯으로 제거하고, FDM으로 출력된 제품은 보조 장비로 제거가 된다. LS의 경우는, 적층제조를 위한 챔버내에서 레이저 가공 안정성을 위해 불활성 기체인 질소를 사용한다(Fig. 3). 프린팅 공정별 주요 입력 조건은

Table 1과 같다.

- PJ (Stratasys J750)는 최대 여섯 종류의 광중합체 수지(서포트 재료도 동시 사용)를 동시에 사용 가능하고, 기본적으로 두 가지 이상의 물질을 혼합하여 사용한다. 본 연구에서는 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 소재가 비교 분석을 위해 사용되었고, 서포트로는 1,2-프로필렌 글리콜, 폴리에틸렌 글리콜, 글리세린 등의 성분을 포함하고 있는 수용성 소재가 사용되었다. 환경영향도 분석을 위해 SimaPro에서, 샘플의 재료로 ABS 수지 공중합체(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer)가 Ecoinvent 데이터베이스에서 선택되었고, 프로필렌 글리콜과 글리세린이 서포트 재료로 선택되었다. PJ 공정에서는 최대 출력 부피를 감안했을 때, 목표 부품은 한 배치에 12개가 동시에 출력 가능하였다. 서포트를 제거하기 위한 워터젯은 3.6 kW의 전력이 사용되었으며, 워터젯 사용시간은 평균 30분으로 가정하였다.

- LS에서는 폴리아미드 12 (Poly-Amid 12)의 나일론 계열 파우더가 사용된다. SimaPro에서, 환경영향도 분석을 위해 Ecoinvent 데이터베이스에서 제공되는 유사소재 나일론 6-6이 선택되었다. LS는 기계, 냉각 시스템, 파우더 운반 시스템, 쿨다운 스테이션, 샷 피닝 캐비닛, 파우더 소재 분리 시스템(Unpacking & Sieving System), 공기 분사기와 같은 다양한 장비로 구성되어 있으며, 각각의 전력은 11 kW, 6.4 kW, 6.4 kW, 92 W, 598 W, 1.04 kW 및 2 kW를 사용한다. 사용시간을 고려할 때, 200개의 NIST 표준 테스트 샘플의 파우더를 분리 후 처리하는 시간은 30분 그리고 공기 분사기를 이용하여 파우더를 제거하는 시간은 각 샘플당 5분으로 가정하였다.

- FDM에서 샘플 출력에는 ABS수지가 사용되었고, 서포트 출력에는 수용성 물질인 2-프로펜산, 2-메틸-뷰틸 2-프로펜산 함유 중합체로 구성되어 있다. 투입되는 재료의 경우, 샘플에는 ABS와 서포트에는 벤젠 그리고 산출되는 성분으로 프로페노익산이 Ecoinvent 데이터베이스에서 선택되었다. FDM은 보조 장비를 사용하여 과탄산나트륨, 탄산나트륨, 시트르산 등의 성분을 갖고 있는 용액에서 서포트를 제거하였다. 투입되는 재료에는 과탄산나트륨 및 시트르산이, 산출되는 재료에는 탄산염 및 시트르산이 사용되었다.

Table 1 Resource characteristics and consumptions used for inventory analysis

Process	Sample materials	Support materials	Max. batch size at a time	Layer thickness	Electricity for 3D printer	Electricity for auxiliary equipment
PJ	Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) copolymer	Propylene glycol and glycerin	12 units	14 μ m	1.68 kW	3.6 kW
LS	Nylon 6-6	-	200 units	120 μ m	11 kW	6.4 kW for cooling system, 6.4 kW for powder conveying system, 92 W for cooldown-station, 598 W for shot-peening cabinet, 1.04 kW for unpack & sieving system and 2 kW for air shot blast
FDM	ABS	Benzene/Propenoic acid	2 units	0.254 mm	1.68 kW	1.2 kW

Table 2 Power and material consumptions

	PJ	LS	FDM
Total power consumption (kWh)	916.2	666	2093.8
Material consumption (g)	61,286	61,286	22,214

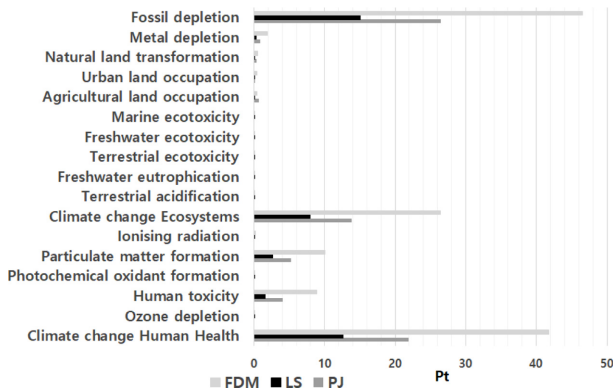


Fig. 4 Environmental impacts of PJ, LS and FDM by environmental categories (for printing 200 NIST test artifact with ReCiPe methodology)

앞서 기술된 조건상에서 각 3D 프린팅 공정별 환경영향평가의 결과 및 해석은 다음과 같다. 출력 시간 및 재료 소비량은 적층제조 공정에 따라 상이한 결과를 얻을 수 있었다. 그 결과, 공정에 소요되는 시간이 짧을수록, 환경 및 인간의 건강에 미치는 영향이 낮게 나타났다. 출력 시간은 전력 소비량과 관련성이 커서, PJ, LS 그리고 FDM의 총 전력 소비량은 각각 916.2 kWh, 666 kWh, 2093.76 kWh이었다.

PJ와 FDM은 목표 제품을 제작하는 용도 이외에도 서포트 구조의 제작을 위한 재료가 추가적으로 필요하지만, 해당 재료들은 재활용이 불가하다. 하지만, LS는 물체가 출력된 후 출력 플랫폼 내에 남아있는 파우더는 대부분 재활용이 가능하다. 이번 사례연구에서 총 투입 파우더 소재의 양은 빌드 베드를 꼭 채워야 하는 공정 특성 때문에 61,286 g이었지만, 200개의 NIST 표준 테스트 샘플을 생산할 때 실제 소비된 파우더 양은 30,294 g으로 고려되었다(재활용 시 손실을 일부 고려). 그리고, PJ는 39,070 g, FDM은 22,214 g의 재료를 소비하였다(Table 2).

Fig. 4는 각 적층제조 공정에서, 환경에 미치는 특성(Characterization)별 분석으로 환경 영향도를 포인트로 환산하여 평가한 결과이다. 세 3D 프린터, PJ, LS 및 FDM은 기후변화로 인한 인간 건강의 손상, 독성으로 인한 인체 손상, 초미세먼지 형성으로 인한 손상, 기후 변화에 의한 생태 시스템의 손상, 금속 고갈로 인한 자원 손상 그리고 화석연료 고갈로 인한 자원 손상의 여섯 가지 특성에 따른 환경영향도를 분석할 수 있었다. 세 3D 프린터 모두는 화석연료 고갈에 가장 큰 영향을 미쳤고 두 번째로는 기후변화로 인한 인간의 건강에 크게 영향을 미쳤다. 세 번째로는 기후변화로 인한 생태계에 큰 영향을 미쳤다. 세 3D 프린터 중, LS가 환경에 영향을 가장 적게 미치는 것으로 분석되었고, FDM이 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났

다. FDM은 기후변화로 인한 인간건강의 손상 및 기후 변화로 인한 생태시스템의 손상에 PJ 및 LS보다 두 배 이상 많이 영향을 미쳤다. 빠른 출력 속도는 낮은 전력 소비로 인하여 환경으로 배출되는 양이 적기 때문에 이러한 결과가 도출되었을 것으로 판단된다.

한편, 3D 프린터가 작동하는 동안 초미세입자를 만성적으로 흡입하는 것은 건강에 위험을 초래할 수 있다. 비록 PJ가 작동하는 동안에 대기 중에 방출되는 입자들에 대하여는 문헌에서 알려진 것이 거의 없지만, PJ의 사용설명서에는 기계 설치 시 환기 시스템의 필요성에 대해 언급하고 있다.²⁴ 다른 한편으로는, LS는 40 - 90 μm 크기의 미세 분말로 이루어진 폴리아미드 12 (PA2200)를 사용하고, 인간의 호흡기로 흡입시 건강상 문제를 야기할 가능성이 없지 않다. 실제로, Goedkoop 등²²은 입자크기가 10 μm 보다 작으면 건강상의 문제가 있을 수 있다는 것을 언급하였으며, 적층제조 공정에서 기계든 분말이든 환경으로 배출되는 양을 줄이려는 노력이 필수적일 것이다.

4. 결과 및 고찰

적층제조 공정별 환경영향도를 비교분석하기 위해서, 200개의 NIST 표준 테스트 샘플을 제작하는 조건에서, 세 가지의 3D 프린터(PJ, LS 및 FDM)에서 분석을 수행하였다. Table 3은 세 3D 프린터가 환경에 미치는 영향을 투입된 요소별로 비교한 것이다. 제작단계에서 PJ, LS와 FDM의 재료 소비량은 실제 제품 제작에 사용되는 양과는 다르다. 하지만, 전력 소비는 모든 범주의 환경 특성에 크게 영향을 미친 반면에, 재료는 상대적으로 중간 정도의 영향을 미쳤다. ReCiPe 방법을 기준으로 환경 특성들을 정규화하여 하나의 값으로 나타내었을 때 환경에 영향을 미치는 정도는 LS (40.6 Pts), PJ (73.8 Pts), FDM (137.3 Pts) 순서로 크게 나타났다.

세부적으로는, 세 3D 프린터가 전체 사용되는 재료는 화석연료 고갈로 인한 자원의 손상 측면에서 가장 큰 영향(PJ: 8.33 + 0 = 8.33 Pts, LS: 8.33 + 0.16 = 8.49 Pts, FDM: 4.93 + 0.17 = 5.1 Pts)을 미쳐서, FDM은 환경에 가장 적은 영향을 미쳤다. LS의 샘플 및 서포트 재료는 다른 두 3D 프린터와 비교했을 때 기후변화로 인한 인간건강의 손상, 기후 변화로 인한 생태시스템의 손상, 그리고 화석연료 고갈로 인한 자원의 손상에서 FDM (4.93 Pts)보다 큰 영향을 미쳤다. 특히 LS는 기후 변화들 관련 범주에서 가장 큰 영향(6.28 + 3.98 = 10.26 Pts)을 미쳤다. 하지만, PJ는 LS 및 FDM과 달리, 다른 부가적인 재료를 필요로 하지 않았다. 비록 LS는 FDM 보다 두 배 이상 환경에 큰 영향을 미쳤지만, 부가적으로 사용된 재료들은 환경에 거의 영향을 미치지 않았다. 요약하자면, 전력 소비량의 환경영향도는 FDM (79.63 + 47.28 = 126.91 Pts)이 가장 크고 LS (19.16 + 1.02 = 20.18 Pts)가 가장 적었지만, 재료가 환경에 미치는 영향은 LS (19.86 + 0.59 = 20.45 Pts)가 가장 컸고 FDM (9.91 + 0.47 =

Table 3 Comparison of environmental categories by influential factors of PJ, LS and FDM (unit: Pts)

Categories	Object/support material			Additional material			Power consumption					
	PJ	LS	FDM	PJ	LS	FDM	PJ		LS		FDM	
							Printing	Support removal	Printing	Sieving	Printing	Support removal
Climate change human health	4.81	6.28	2.66	-	0.17	0.15	10.35	6.70	5.88	0.31	24.45	14.51
Human toxicity	0.24	0.21	0.06	-	0.03	0.01	2.34	1.51	1.33	0.07	5.53	3.28
Particulate matter formation	1.11	0.99	0.54	-	0.11	0.04	2.53	1.63	1.44	0.08	5.97	3.54
Climate change ecosystems	3.04	3.98	1.68	-	0.11	0.10	6.55	4.24	3.72	0.20	15.47	9.18
Metal depletion	0.08	0.05	0.02	-	0	0	0.50	0.32	0.28	0.02	1.18	0.70
Fossil depletion	8.33	8.33	4.93	-	0.16	0.17	11.00	7.12	6.25	0.33	25.98	15.43
Other categories	0.66	0.02	0.03	-	0.01	0	0.45	0.29	0.26	0.01	1.07	0.63
Total	18.27	19.86	9.91	-	0.59	0.47	33.71	21.81	19.16	1.02	79.63	47.28

10.38 Pts)이 가장 적었다.

전력 소비량은 여섯 범주의 환경 특성에 가장 크게 영향을 미쳤다. 전력 소비의 경우, 비록 기후 변화로 인한 인간건강의 손상에 미치는 영향이 화석연료 고갈보다는 아주 조금 적었지만, 이 두 범주에 가장 큰 영향을 미쳤다. 이 결과는 Faludi 등³의 연구 결과와 일치하였다. FDM과 Poly-Jet 프린터의 사용은 화석연료 고갈에 의한 자원 손상에서 가장 큰 영향을 미쳤고, 기후 변화관련 손상에 두 번째로 큰 영향을 미쳤다. 3D 프린터로 샘플을 출력하는 동안 소비전력은 CO₂ 배출을 통해 온실 가스를 유발한다. 이는 결국 인간건강의 손상에 영향을 미치는 기후변화에 영향을 미친다.²² 본 연구에서는 전력 소비가 적으면 환경에 적은 영향을 미치는 것을 보여주었다. 출력 속도는 전력 소비량과 관련되어 있어서, LS는 환경에 가장 적게 영향을 미쳤다. 또한, LS는 재료의 낭비가 거의 없었으나 PJ와 FDM은 각각 19% 및 9%가 서포트에 소비되었다. 특히, PJ는 출력 과정에서 일부 액체 재료가 버려져서 총 재료 소비량의 38.5%를 차지하는 공정 폐기물을 발생시켰다. 하지만, PJ는 출력시의 전력 소비량이 환경에 더 큰 영향을 미쳤다. LS의 주요 환경영향은 파우더 소재 재활용 단계이전에 나타났고, FDM은 출력 시의 전력 소비량이 가장 큰 영향을 미쳐서 약 60%를 차지하였다. FDM에서 서포트를 수작업으로 제거하는 것은 환경에 적게 영향을 미칠 것으로 기대할 수 있다. 왜냐하면 이 서포트 제거 단계에 대한 환경영향(47.28 Pts)이 LS와 PJ로 출력 시의 환경영향보다 크기 때문이다. 다른 한편으로는, PJ의 경우 서포트 제거를 위하여 특수 용액(수용성 서포트 소재를 용액내에서 장시간 넣어두고 서포트를 제거한다)을 사용하는 것은 환경에 적은 영향을 미쳤다. 이는 PJ가 서포트 제거에, 전기 소비가 많은 워터젯을 사용할 경우는, 특수 용액을 사용하는 것보다 더 많이 환경(21.81 Pts)에 영향을 미쳤다. 본 연구에서는, 결론적으로, 제품제조 동안에 전력 소비량이 지배적인 요인이라는 것을 발

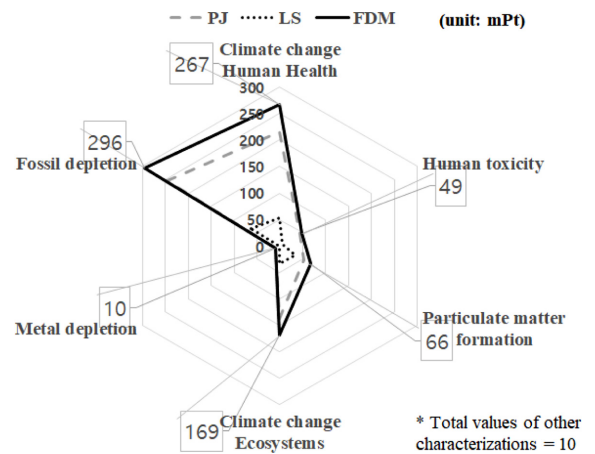


Fig. 5 Environmental impacts of PJ, LS and FDM for printing single NIST test artifact

견하였다. FDM으로 생산하는 것은 PJ 및 LS로 생산하는 것보다 더 많은 전력을 소비하였다. Mognol 등²⁵은 FDM의 경우 대기 모드 및 출력 모드 사이에 에너지 소비가 10%보다 적어 출력을 위한 설치단계에서 전력소비(대략 1.4 kW)가 가장 크다고 하였다.²⁶ 본 사례 연구의 결과로 재료가 전력의 사용보다 환경에 더 적게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

LS에서 사용되는 질소는 증발되고, 남은 파우더는 재활용된다. 그러나 PJ와 FDM으로 물체가 출력될 때는 서포트가 제거되어야 한다. 이것은 추가적인 공정, 비용이 필요하고 환경 부담이 더해질 수 있다. PJ 및 FDM의 사용시에 환경영향도를 줄이기 위해서, PJ와 FDM의 출력 속도를 향상시키고 워터젯 및 보조 장비의 전력 소비를 줄여야 할 필요성이 대두되었다.

NIST 표준 테스트 샘플을 출력하는데 사용되는 에너지는 세 3D 프린터의 사양 및 공정 시간을 기반으로 하여 계산되었다. 그런데, 3D 프린터는 배치 크기로 물체를 출력하여, 출력된 물

체의 수나 물체의 방향이 출력 시간에 영향을 미치기 때문에 상황에 따라 불확실성이 존재할 수 있다. 따라서, 추가적으로 기능단위의 변화 및 다른 LCA 환경분석지표를 이용하여 두 가지 분석을 수행하였다.

첫 번째 분석은 한 개의 NIST 표준 테스트 샘플을 출력할 경우를 가정하여 수행되었다(Fig. 5). LS는 최소 면적을 보여서 여섯 범주 모두에서 가장 적게 환경에 영향(190.13 mPt)을 미쳤고, 실선의 FDM은 여섯 범주에서 가장 크게 영향(857.39 mPt)을 미쳤다. FDM의 기후 변화로 인한 인간건강의 손상(267.45 mPt) 및 화석연료 고갈로 인한 자원의 손상(296 mPt)은 LS (각 52.75 mPt와 63.75 mPt보다 5배 이상 높았다. PJ의 면적은 LS보다 4배이상 넓었고, FDM보다 아주 약간 좁았다(Fig. 5). PJ의 독성으로 인한 인체 손상 및 금속 고갈로 인한 자원의 손상의 범주에서 FDM과 유사하였다.

Table 3과 Fig. 5에서 FDM의 총 값이 가장 높아 각각 137 Pt 및 867 mPt이어서, 200개의 NIST 표준 테스트 샘플 출력시에 FDM이 환경에 미치는 영향은 한 개의 NIST 표준 테스트 샘플을 출력하는 것보다 158배나 컸다. 반면에, 가장 낮은 단일 값은 LS로 200개의 NIST 표준 테스트 샘플을 출력 시에는 41 Pt 이었고, 한 개의 NIST 표준 테스트 샘플을 출력 시에는 191 mPt이었다. 따라서, 200개의 NIST 표준 테스트 샘플을 출력할 때가 한 개의 샘플을 출력할 때보다 환경에 215배나 더 많은 영향을 미쳤다. PJ로 200개의 NIST 표준 테스트 샘플을 출력 시의 단일 값은 74 Pt이고, 이는 한 개의 샘플 출력 시의 714 mPt보다 104배가 더 컸다. 이러한 결과의 발생 원인은 총 출력 시간에 영향을 주는 배치크기에 기인하는 것으로 보인다.²⁷

두 번째 분석은 IMPACT 2002+의 방법을 사용하여 200개의 샘플 출력에 대하여 실시하였다. Fig. 6은 IMPACT 2002+의 손상 평가 결과를 보여준다. IMPACT 2002+ 방법으로 환경에 영향을 미치는 정도는 LS, PJ, FDM 순이어서, FDM이 환경에 가장 큰 영향을 미쳤고 LS가 가장 적은 영향을 미쳤다. 비재생 에너지에서는 전체 환경 영향에서 가장 높은 비율을 보이는 FDM이 LS보다 3배 이상 높았다. 세 3D 프린터(PJ, LS, FDM)는 16개의 환경 범주 중 해양 산성화 및 수생 부영양화를 제외한 14개에 영향을 미쳤다. 그 중 Fig. 6과 같이, 지구 온난화, 비재생 에너지, 호흡하는 무기물, 발암 물질과 생태독성의 5가지 환경 범주에 가장 큰 영향을 미쳤다. 지구 온난화, 비재생 에너지, 호흡하는 무기물 그리고 생태 독성의 경우 FDM이 환경에 영향을 미치는 정도는 PJ의 거의 절반 수준이었다. 하지만 FDM은 LS보다 3배 이상 높았다. 비록 FDM과 PJ의 차이는 거의 없었지만, PJ가 발암 물질 범주에 가장 큰 영향을 미쳤다.

ReCiPe Endpoint와 IMPACT 2002+의 결과를 비교하면, IMPACT 2002+의 손상 평가에 대하여 환경에 영향을 미치는 순서는 세 3D 프린터(PJ, LS 및 FDM)가 ReCiPe Endpoint의 순서와 동일하였다. LS는 모든 손상 범주에서 가장 적게 환경에 영향을 미쳤다. 또한, Figs. 4와 6과 같이 ReCiPe Endpoint의 LS에 대한 영향도 값은 IMPACT 2002+의 LS 값보다 훨씬 적

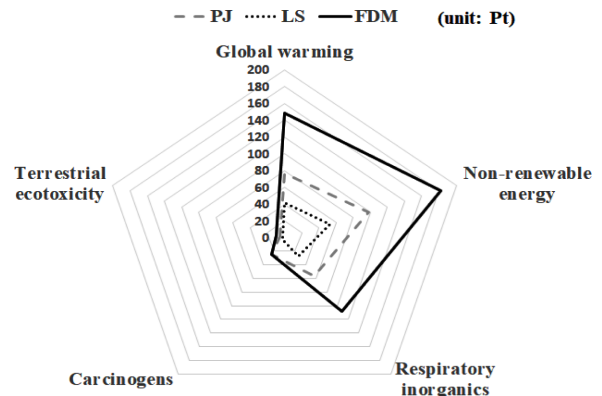


Fig. 6 Environmental impacts of PJ, LS and FDM for printing 200 NIST test artifact with IMPACT 2002+

었다. 이는 LS의 경우 출력할 때 재료를 재활용함으로써 제품제조단계에서의 폐기물(서포트 및 서포트 제거 용액 등)이 최소화되었기 때문이다.

그밖에도, 적층제조는 제품의 배치 방향 및 제품의 설계 복잡도에 따라 후처리 시간과 공정이 달라지는 경우가 많다. 따라서, 공정의 특성을 반영한 설계 최적화 (DFAM, Design for Additive Manufacturing)를 통해 적층제조 공정이 환경에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다.²⁸ 이러한 측면에서 서포트 생성이 필요없는 LS 공정이 가장 유리하다는 사실을 알 수 있다. 즉, 본 연구의 결과로부터 서포트 생성 및 제거로 인한 환경 영향도가 무시하지 못할 정도라는 것을 알 수 있다.

본 연구의 사례연구는 선정된 세 종류의 3D 프린터가 특정기종에 한정되어 있기 때문에, 재료압출성형공정 (FDM), 분말베드용융공정(LS), 재료분사공정(PJ) 방식을 대표하는 결과로 해석하는 데에는 한계가 있을 수 있을 것이다.

5. 결론

환경 친화적인 적층제조 공정을 찾기 위하여, 적층제조 공정의 제품가공단계가 고려되었다. 이런 측면에서, LS는 PJ 및 FDM과 비교하여, 환경영향도가 상대적으로 적다는 것을 의미하는 중요한 결과를 보여주었다.

분석 결과를 요약하면, 환경에 영향을 미치는 요인에 관하여 전력 소비의 영향은 FDM (126.91 Pts)이 가장 컸고, LS (20.18 Pts)는 가장 적은 반면에, 환경영향에서 재료의 효과는 LS (20.45 Pts)가 가장 컸고, FDM (10.38 Pts)이 가장 적었다. 심지어 LS (19.16 Pts)에서 출력하는 것은 전력 소비 때문에 PJ (21.81 Pts) 및 FDM (47.28 Pts)의 서포트 제거보다 더 적은 환경적인 영향을 보여주었다. 즉, 서포트의 생성과 제거는 적층제조 공정에서 환경영향도에 악영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터, 제품의 설계나 적층제조 공정 활용시, 서포트 생성을 최소화하는 구조나 적층 방향을 결정함으로써, 환경영향

도를 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다. 특히, PJ 및 FDM 프린터는 하나의 물체를 한 개씩 출력하는 것보다 파트베드를 가능한 채워서 여러 물체를 동시에 출력하는 것이 바람직할 것이다.

적층제조는 양산뿐만 아니라 교육 및 디자인 프로토타입제작 등과 같은 다양한 목적으로 사용되고 있다. 그러므로 환경영향을 고려하여 적층제조 공정을 선정하고 설계하는 것이 친환경적인 제조환경을 위해 필요할 것이다. 또한, 분석 결과, 적층제조에서는 전력 소비의 비중이 환경에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으므로, 향후 적층제조 공정 개발에서 청정에너지를 활용하거나 저전력 3D 프린팅 공법을 개발하는 것이 필요할 것이다. 이는 안전하고 건강한 환경을 만들고 3차원으로 출력되는 제품이 기술 및 경제적으로 더 우수한 제품이 되는데 일조할 것이다. 더 나아가, 3D 프린터는 공립도서관, 초·중·고 교육 시스템, 실험실 등에서 널리 사용되고 있어, 작업 환경에서 생물학적인 위험 및 물리·화학적 위험과 같은 여러 요인들이 인간의 건강에 해를 끼칠 수 있을 것이다. 따라서 3D 프린터에서 배출되는 파우더와 기체 등 초미세먼지의 효과적 처리는 작업환경을 설계할 때 반드시 고려되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20170009100011001, 유연동작 감지 및 제어용 센서모듈 구현을 위한 다중소재 3D프린팅 기술 개발)

REFERENCES

1. Ford, S. and Despeisse, M., "Additive Manufacturing and Sustainability: An Exploratory Study of the Advantages and Challenges," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, pp. 1573-1587, 2016.
2. Kwon, J., Park, H. W., Park, Y.-B., and Kim, N., "Potentials of Additive Manufacturing with Smart Materials for Chemical Biomarkers in Wearable Applications," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 335-347, 2017.
3. Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., and Iribarne, M., "Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing VS Traditional Machining Via Life-Cycle Assessment," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 1, pp. 14-33, 2015.
4. Telenko, C. and Conner Seepersad, C., "A Comparison of the Energy Efficiency of Selective Laser Sintering and Injection Molding of Nylon Parts," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 18, No. 6, pp. 472-481, 2012.
5. Yoon, H.-S., Lee, J.-Y., Kim, H.-S., Kim, M.-S., Kim, E.-S., et al., "A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 261-279, 2014.
6. Cerdas, F., Juraschek, M., Thiede, S., and Herrmann, C., "Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System," *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21, No. S1, pp. S80-S93, 2017.
7. Ingrao, C., Scrucca, F., Tricase, C., and Asdrubali, F., "A Comparative Life Cycle Assessment of External Wall-Compositions for Cleaner Construction Solutions in Buildings," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 124, pp. 283-298, 2016.
8. Ortiz, O., Castells, F., and Sonnemann, G., "Sustainability in The Construction Industry: A Review of Recent Developments Based on LCA," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 28-39, 2009.
9. ISO 14040, "Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework", 2006.
10. Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., and Hague, R., "Energy Inputs to Additive Manufacturing: Does Capacity Utilization Matter," *EOS*, Vol. 1000, No. 270, pp. 30-40, 2011.
11. Song, R. and Telenko, C., "Material and Energy Loss Due to Human and Machine Error in Commercial FDM Printers," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 148, pp. 895-904, 2017.
12. Da Silva Barros, K. and Zwolinski, P., "Influence of the Use/ User Profile in the LCA of 3D Printed Products," *Procedia CIRP*, Vol. 50, pp. 318-323, 2016.
13. Kim, D., "3D Printing Equipment and Material Technologies," *Journal of the Korean Society Precision Engineering*, Vol. 32, No. 9, p.763, 2015.
14. Yoo, C.-J., Kim, H., Park, J.-H., Yun, D.-H., Shin, J.-K., et al., "Study of Optimal Process Conditions of 3D Porous Polymer Printing for Personal Safety Products," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 333-339, 2016.
15. Hu, S. J., "Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization," *Procedia CIRP*, Vol. 7, pp. 3-8, 2013.
16. Toffler, A., "The Third Wave," William Morrow, 1980.
17. Sreenivasan, R. and Bourell, D., "Sustainability Study in Selective Laser Sintering - An Energy Perspective," *Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 257-265, 2009.
18. Sreenivasan, R., Goel, A., and Bourell, D. L., "Sustainability Issues in Laser-Based Additive Manufacturing," *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 81-90, 2010.
19. Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurens, K., and Donmez, M. A., "An Additive Manufacturing Test Artifact," *Journal of*

Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 119, pp. 429-459, 2012.

20. EOS, "EOS P 770 - High Productive Laser Sintering System for Parts of Up to One Meter in Length," https://www.eos.info/systems_solutions/eos-p-770 (Accessed 8 MAR 2019)
21. Stratasys, "FDM Legacy 3D Printers," <http://www.stratasys.co.kr/3d-printers/idea-series/uprint-se-plus> (Accessed 3 MAR 2019)
22. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. D., Struijs, J., et al., "Recipe 2008 a Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonized Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level," http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/Downloads (Accessed 3 MAR 2019)
23. Goedkoop, M. and Spriensma, R., "A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment," The Eco-Indicator 99, <https://www.pre-sustainability.com/news/eco-indicator-99-manuals> (Accessed 8 MAR 2019)
24. Stratasys, "J750/J735 3D Printing System User Guide," Stratasys Ltd., pp. 1-128, 2018.
25. Mognol, P., Lepicart, D., and Perry, N., "Rapid Prototyping: Energy and Environment in the Spotlight," Rapid Prototyping Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 26-34, 2006.
26. Balogun, V. A., Kirkwood, N., and Mativenga, P. T., "Energy Consumption and Carbon Footprint Analysis of Fused Deposition Modelling: A Case Study of RP Stratasys Dimension SST FDM," International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol. 6, No. 8, pp. 442-447, 2015.
27. Kellens, K., Renaldi, R., Dewulf, W., Kruth, J.-P., and Dufloy, J. R., "Environmental Impact Modeling of Selective Laser Sintering Processes," Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, No. 6, pp. 459-470, 2014.
28. Faludi, J., Baumer, M., Maskery, I. and Hague, R., "Environmental Impacts of Selective Laser Melting," Journal of Industrial Ecology, pp. 1-13, 2016.



Namhun Kim

Associate Professor in the System Design and Control Engineering and the director of 3D printing research center, UNIST. His research interest is 3D printing, manufacturing system modeling and agent-based simulation.

E-mail: nhkim@unist.ac.kr



Jungmok Ma

Associate Professor in the Department of Defense Science, Korea National Defense University. His research interest is data analytics, optimal design, and sustainability.

E-mail: jxm1023@gmail.com



JuYoun Kwon

Research Scientist in the Center for 3D Advanced Additive Manufacturing, UNIST. Her research interest is 3D printing application.

E-mail: jkwon@unist.ac.kr