



대형 3D프린팅 부품 제작을 위한 이축 압출 스크류 헤드 기반 적층제조 시스템 개발

이필호^{a*}, 하태호^a, 정민교^a, 최준필^a, 양창근^b

Development of Twin-screw Extrusion Additive Manufacturing System for Large-scale Parts

Pil-Ho Lee^{a*}, Taeho Ha^a, Min-Kyo Jung^a, Joon Phil Choi^a, Chang-Geun Yang^b

^a Department of 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials

^b Joong Ang Foundry Pattern

ARTICLE INFO

Article history:

Received	17	April	2023
Revised	15	May	2023
Accepted	16	May	2023

Keywords:

Polymer process
Additive manufacturing
Material extrusion
Wood foundry mold
Composite

ABSTRACT

Large-scale material extrusion additive manufacturing is a promising alternative to the wooden mold industry, which faces challenges such as poor working conditions and an aging workforce. However, the current commercial single-screw extrusion heads have limitations owing to their weight and volume, requiring the use of expensive equipment. This study proposes the development of a twin-screw extrusion head that can be easily installed on an existing large-scale CNC milling machine, creating a prototype for additive manufacturing based on screw extrusion. The developed prototype is used to evaluate the extrusion additive manufacturing of ABS polymer composite material impregnated with glass fiber, the mechanical properties of printed specimens, the microstructure of the specimen fracture surface, and the performance of additive manufacturing shape implementation. The experiment confirmed that the proposed system achieved precision in the laminated shape and mechanical performance and could replace the wood pattern process in the existing wooden mold industry.

1. 서론

최근 적층 제조(additive manufacturing, AM) 공정은 4차 산업 혁명 및 제조혁명의 핵심으로 다양한 산업 분야에서 대두되고 있으며, 특히 금속 적층 제조 기술에 대한 관심이 지속적으로 증가하여, 제조업 현장에서의 기술 적용이 점차 확대되고 있다. 적층 제조 기술은 기존의 제조 공정으로는 제작 불가능한 형상을 제작할 수 있는 특징을 갖고 있으며, 적층제조 맞춤 설계를 통해 기존 부품에

비하여 그 성능을 극대화 할 수 있다. 그중 고분자 재료의 대형 적층제조 기술은 목형 제작 분야에서 많은 관심을 받고 있다.

목형(wood pattern)이란 주조 및 섬유강화플라스틱(fiber reinforced plastics, FRP) 선박 제조 공정 시 주형을 만들기 위한 목재 원형을 의미한다. 목형제작 공정은 제품분석 및 설계, 재료의 재단 및 조립 그리고 CNC 가공의 세부공정을 거치는데 재료의 재단 및 조립 공정은 제조원가 및 공정시간의 약 50% 이상을 차지하고 있다. 또한 목형은 주조나 FRP 제품의 원형의 역할을 하기 때문에

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7786

E-mail address: pilho_lee@kimm.re.kr (Pil-Ho Lee).

매 번 다른 형상으로 제조되며 매우 노동집약적인 산업적 특성을 지니고 있다. 특히 최근 산업용 목형 분야는 주로 3~7인 수준의 영세기업이 90% 이상을 차지하고 있으며 신규 목형 제조전문가의 수급부족 및 고령화 및 열악한 작업환경 등의 문제로 인하여 존재의 기로에 있다. 반면 외부적으로는 고객의 레저 및 선박 등의 분야에서 목형 관련 고품질 제품의 생산/공급과 다양한 욕구충족 등이 발생하여 신규 기술 개발을 통한 경쟁력 강화가 시급한 실정이며 최근 이를 해결하기 위한 고분자 압출 적층제조 기반의 목형대체 공정기술이 연구 및 상용화되고 있다.

미국 Oak Ridge national laboratory(ORNL)는 갠트리 시스템의 로봇에 고분자 압출기가 부착된 big area additive manufacturing (BAAM) 이라는 대형 산업용 압출 적층제조 장비를 개발하였으며 주로 열가소성 ABS 기반의 탄소섬유 복합 재료를 사용하여 자동차, 항공 및 방위 산업분야에 활용하고 있다^[1-2]. 특히 ORNL에서는 최근 BAAM 장비기술을 기반으로 대형 자성복합소재 개발과 관련된 연구를 수행하여 대형 압출 적층제조 기술의 활용방안을 다양화 시키고 있다^[3]. 미국 Thermwood는 용융 압출 기반의 large scale additive manufacturing(LSAM) 적층제조 장비를 개발하였다^[4-5]. 해당 장비는 압출형 적층제조 및 기계가공 형태의 하이브리드 구조를 지니고 있으며 항공우주, 자동차, 국방 및 선박 등 다양한 산업에 적용 가능한 대형 부품 제조에 사용 중이다. LSAM 또한 열가소성 고분자 기반의 복합 소재를 활용하여 3차원 형상을 조형한 후 CNC 라우터를 통해 조형체 표면 가공을 진행한다. 이탈리아 CMS는 Kreator 라는 싱글 스크류 기반 압출 플라스틱 압출 적층제조 및 기계가공 하이브리드 장비를 Fraunhofer IWU와 함께 개발하였다^[6]. 해당 장비는 스크류 헤드와 스핀들을 동일한 모터로 구동시키는 기구적 특징이 있으나 단위시간당 압출량이 7kg/hr 수준으로 제한적인 것으로 알려져 있다. 미국 Ingersoll Machine Tools은 MasterPrint 라는 압출 기반의 산업용 열가소성 플라스틱 3D 프린팅 장비를 개발하였다^[7]. 이 장비는 갠트리 유형의 3D프린터와 5축 밀링 머신을 활용한 대형 하이브리드 장비로, ABS 열가소성 플라스틱 및 탄소섬유와 같은 복합소재를 활용하여 항공, 해상 및 자동차 산업용 부품을 개발하고 있다. 한국생산기술연구원은 최대 3,000×4,000×12,000 mm³ 크기의 제품을 적층제조 할 수 있는 대면적 적층 및 밀링가공 하이브리드 장비 기술을 개발하였다^[8]. 하지만 압출 스크류의 가변이 불가능하고, 스크류 위치별 개별적 온도조절 제약 등으로 적용할 수 있는 플라스틱 소재가 제한적인 것으로 알려져 있다.

아래의 Table 1은 앞서 언급한 국내외 주요 대형 압출형 적층제조 장비의 크기 및 단위 시간 당 압출량을 나타내고 있다. 표를 통해서 알 수 있듯이 해당 장비들은 단축 압출 스크류를 적용하였기 때문에 일정 수준의 단위시간당 압출성능을 보이기 위해서는

Table 1 Comparison of AM head characteristics ^[1-8]

	ORNL	Thermwood	Ingersoll	KITECH
Screw type	Single type			
Screw diameter (mm)	25	40	-	50~70
Head weight (kg)	180	-	-	400
Extrusion rate (kg/Hr)	18	90	450	60

장비의 부피 및 중량이 커지는 것이 불가피한 실정이다. 따라서 신규 설비 투자에 어려움을 겪고 있는 중소 목형업체에서 주로 사용하는 기존 갠트리 CNC 장비에 장착하는 방식으로 활용하기에는 선행 연구들은 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 목형과 같은 대형 부품의 적층제조에 적용이 가능하고 기존의 대형 CNC 가공기에 장착이 가능한 형태의 압출 스크류 헤드를 개발하고 이를 적용한 실험적 연구를 수행하였다. 우선 압출 적층제조 헤드의 중량을 최소화하고 단위시간당 토출량을 극대화 시킬 수 있도록 이축 압출 스크류를 채택하여 시작품을 제작하였다. 개발된 이축 압출 스크류 헤드 기반 적층제조 시스템과 유리섬유가 함침되어 있는 ABS 고분자 복합소재를 활용하여 고분자 압출 적층 성능 평가, 프린팅 시편 기계적 물성 평가, 파단면의 미세구조 분석 및 형상 제조 기초 성능 평가를 수행하였다.

2. 이축 압출 스크류 기반 적층가공 시스템 개발

2.1 이축 압출 스크류 헤드 시작품 개발

본 연구에서 개발된 압출 스크류 헤드는 Fig. 1과 같은 구조를 따르고 있으며, 이는 크게 Fig. 1의 붉은색으로 표시된 원료 공급부(material feeding section), Fig. 1의 파란색으로 표시된 원료 압축 및 용융부(compression and melting section) 및 원료 토출부(extrusion section)로 구성되어 있다. 또한 고분자 원료의 건조/

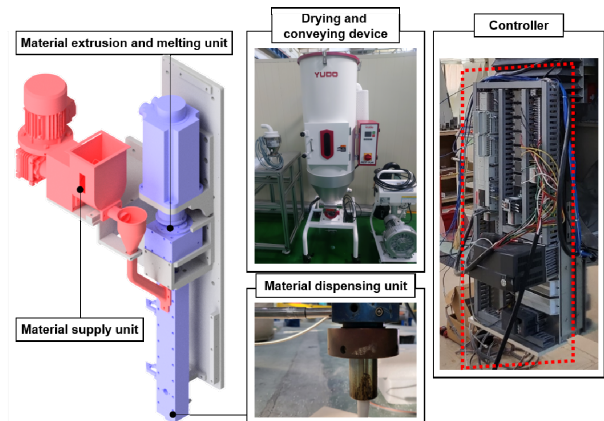


Fig. 1 Composition of Twin-Screw Head Module

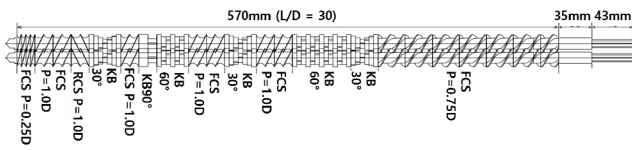


Fig. 2 Design and configuration of twin-screw

이송 장치가 원료공급부와 연결되어 있으며 및 제어/전장부가 적층 헤드의 측면에 장착되어 있다.

원료 공급부의 경우 호퍼에 저장되어 있는 비드 형태의 고분자 재료가 정량 토출을 하는 장치로 두 개의 스크류가 정속회전을 하여 원료 압축 및 용융부에 고체 상태의 고분자를 이송시킨다. 원료 압축 및 용융부는 배럴에 두 개의 스크류가 삽입되어 있는 형태로 구성되어 있으며 본 연구에서는 동방향 회전 이축 스크류(co-rotating twin-screw)를 채택하였다. 동방향 회전 이축 스크류 헤드는 기존 단축 스크류 헤드에 비하여 수지 송출의 안정성이 뛰어나고 고속 회전 조건에서도 마찰열이 상대적으로 적게 발생하여 보다 많은 재료를 토출할 수 있는 장점이 있다. 배럴은 총 7개의 영역으로 나뉘어 80~400℃ 까지 가열이 가능하도록 전기 히팅 모듈이 구축되어 있으며, 클램셸(clamshell) 형상으로 설계되어 내부의 스크류 교체 및 청소가 용이하다. 스크류의 경우 2개의 스플라인축(spline shaft)에 다양한 형상의 조립형 스크류를 조합하여 사용할 수 있으며 스크류의 직경은 19 mm, 길이/직경 값은 30으로 일반적인 압출용 이축 압출 스크류와 비교하여 비교적 짧게 제작하여 중량을 최소화시킨다. 아래 Fig. 2의 이축 압출 스크류의 구성은 다양한 보강 및 비보강 고분자의 사용에 모두 용이할 수 있도록 설계되었다. 원료 토출부에서는 용융된 재료가 일정한 형태를 유지하면서 적층될 수 있게 하는 역할을 수행한다. 원료 토출부는 인청동(phosphor bronze) 재질로 제작된 직경 15 mm 다이 금형과 압력 측정 센서로 구성되어 있다. 개발된 이축 압출 스크류 헤드의 중량은 148 kg 이며 단위시간당 최대 압출량은 25.2 kg/hr 수준으로 본 연구에서 목적으로 하는 압출 적층제조 헤드의 중량을 최소화 및 단위시간당 토출량을 극대화를 만족하는 것으로 볼 수 있다.

2.2 고분자 압출 적층 시스템 구축

이축 압출 스크류 헤드를 적용한 고분자 압출 적층제조 시스템을 구축하였다. 시작품은 상용 대형 트윈 스피들 헤드 5축 CNC 가공기의 한개의 스피들 헤드에 장착하였으며 이축 압출 스크류 헤드와 스피들을 모두 활용하여 하이브리드 적층제조 공정의 구현이 가능하도록 구성하였다. 해당 장비의 적층 가능 영역은 11,000×3,500×2,700 mm³ 이다. 이축 압출 스크류 헤드를 5축 CNC 장비에 장착하여 개발된 압출형 적층제조 시스템의 시작품의 실제 형상은 Fig. 3과 같다.



Fig. 3 Prototype of twin-screw extrusion additive manufacturing system

3. 고분자 압출 적층 프린팅 시스템 성능평가

3.1 고분자 압출 적층공정 실험 설계

개발된 스크류 압출형 고분자 압출 적층 시스템 시작품을 적용하여 직선 형태의 시편 적층시험을 수행하였다. 유리섬유가 20 wt.% 함침된 ABS 재료를 총 11층을 적층 하였으며, 각 층의 높이 방향 적층 간격을 6 mm, 7 mm 및 8 mm의 3가지 수준으로 설정하여 적층 형상을 정성 분석하였다. 압출 조건은 Table 2와 같다. 또한 해당 적층 시편에 대한 기계적 물성 평가를 수행하였다. 물성 평가는 적층 수평 및 수직방향으로 가공된 시편에 대하여 수행하였으며 시편은 Fig. 4 왼쪽 그림과 같이 50×10×2 mm³ 크기로 제작하였다. 제작된 시편은 Fig. 4 오른쪽 그림과 같이 만능시험기(4464, Instron) 이용하여 인장 및 굴곡특성 시험을 수행하였으며, 적층 수직 및 수평방향에 따른 재료의 물리적 성질의 차이를 분석하였다. 시편 적층시험 및 기계적 특성 분석을 통해 도출된 공정조건을 바탕으로 사각튜브 형상을 적층하여 형상 제조 기초성능 평가를 수행하였다. 또한 적층경로 코드를 Powermill Additive 소프트웨어

Table 2 Experimental conditions

Extrusion temperature	235~245 °C
Nozzle diameter	15 mm
Screw speed	1000 RPM
Material feeder speed	4.2 RPM
Printing head feed speed	10 mm/sec
Polymer AM layer	11
AM material	ABS (glass fiber 20 wt.%)



Fig. 4 Printed specimens and universal testing machine

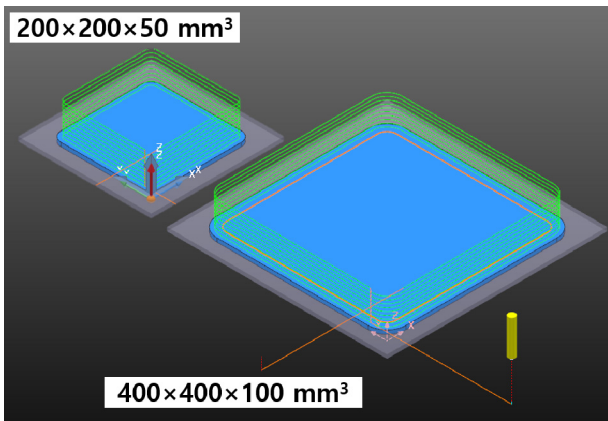


Fig. 5 Additive manufacturing CAM path

트웨어를 적용하여 Fig. 5와 같이 생성하였으며 해당 시험은 200×200×50 mm³, 400×400×100 mm³ 두 가지 크기의 사각튜브에 대하여 수행하였다.

3.2 스크류 압출형 고분자 적층 프린팅 실험 결과

각기 다른 3가지 조건으로 적층한 시편을 200 mm 길이로 절단한 후 정면 및 측면 형상에 대한 정성적 관측을 하였다. 시험결과 Fig. 6에서 확인할 수 있듯 11개의 레이어 모두 적층이 이루어짐을 확인하였으나, 적층높이를 다르게 설정함에 따라서 시편의 적층 폭 및 높이 등의 형상이 변화하는 것을 확인하였다. 시험결과 해당 실험조건에서는 7 mm 수준의 적층높이를 유지할 경우 가장 적은 기울어짐 현상과 편차가 발생함을 정성적으로 확인하였다. 이는 압출 기반의 적층제조 경로 생성 시 적층 방향의 적절한 두께 설정이 제품의 조형 특성에 결정적인 영향을 미치기 때문이다. 적층높이를 매우 작게 설정할 경우 용융 고분자 소재가 형상을 유지하지 못하고 쉽게 무너질 수 있으며 이와 반대로 적층높이가 크게 설정될 경우 소재의 층 분리가 쉽게 발생할 수 있어 적층 형상의 유지가 어렵고 소재의 기계적 특성이 저해될 수 있다.

인장 및 굴곡특성 평가 결과는 Fig. 7의 그래프와 같이 압출 수직 및 수평방향으로 제작된 시편의 인장과 굴곡 강성 및 강도 결과로 나타낸다. Fig. 7의 그래프를 통해 확인할 수 있듯이 적층 수평방향 시편의 경우 적층 수직방향의 시편에 비하여 탄성률 및 강도가 우수한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 강도 및 강성

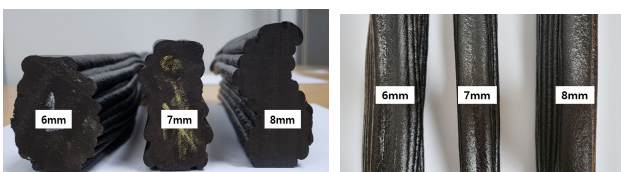


Fig. 6 Side and top view of extruded material (11 layer)

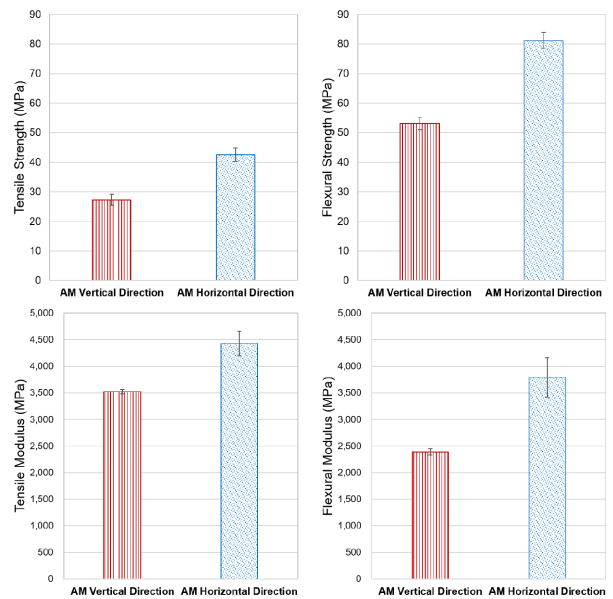


Fig. 7 Mechanical properties of specimens

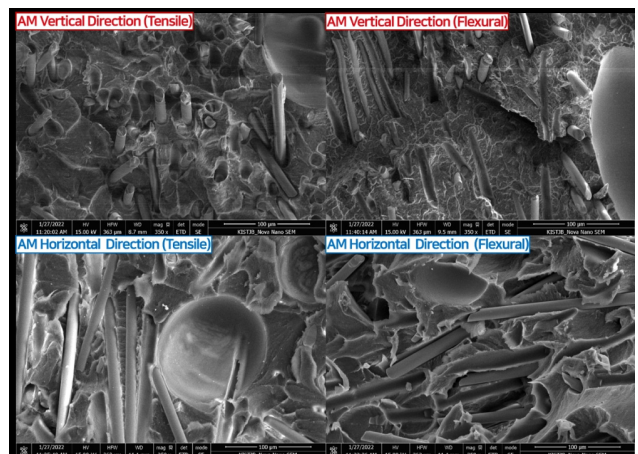


Fig. 8 SEM images of fractured specimens

모두 해당 소재의 고유 물성보다 다소 낮은 특성을 보인다.

인장 및 굴곡특성 시험 결과의 구체적인 분석을 위하여 전자주사 현미경을 이용한 시편 파단면의 측정 및 분석을 Fig. 8과 같이 수행하였다. Fig. 8의 파단면을 통해 확인할 수 있듯이 적층 수직방향 시편의 경우 보강 유리섬유가 파단면과 직교방향으로 삽입되어 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 재료의 기계적 강도 및 강성을 증가시키는 역할을 하는 것으로 확인하였다. 반면 적층 수평방향 시편의 경우 보강 유리섬유가 파단면 수평방향으로 삽입되어 있어 재료의 기계적 성질을 향상시키는 역할을 하지 못하는 것으로 보인다. 이러한 현상이 발생한 이유는 함침되어 있는 유리섬유가 기존의 복합소재의 사출 및 압출 공정과 같이 재료의 용융 및 토출 과정에서 적층이 이루어지는 방향으로 배향을 갖게 된 것으로 분석할 수 있다. 모든 시편에서 100~150 μm 직경 수준의 기포가 발

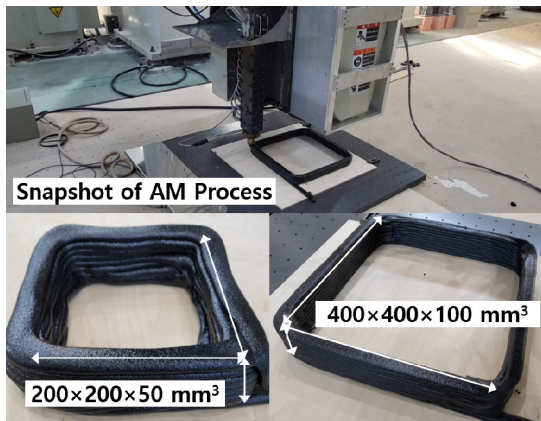


Fig. 9 AM snapshot and fabricated AM samples

생하는 것이 확인되며 이는 해당 앞서 언급된 물성저하의 원인으로 볼 수 있다. 기포 발생은 일반적으로 폴리머 공정에서 가장 큰 물성저하의 원인으로 알려져 있으며, 이러한 현상을 방지하기 위해서는 스크류의 역회전 설계 및 온도 역전 설계 등의 방법으로 기포를 재료 투입방향으로 밀어내는 방식 등이 논의 될 수 있다⁹⁾.

사각튜브 형상 적층 시험 결과 아래의 Fig. 9와 같이 목표로 하는 제품의 형상이 효과적으로 적층됨을 확인하였다. 정성적 분석결과 $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$ 시편의 경우 다소 토출량이 많고 적층 온도가 높아 형상이 다소 무너지는 경향을 보였으나 $400 \times 400 \times 100 \text{ mm}^3$ 시편의 경우 기존 Table 2의 공정조건에서 베럴 평균 설정 온도를 5°C 감소시키고 재료 토출 모터의 회전수를 0.5 RPM 감소시켜 재료의 흐름성을 낮춰 사각튜브 형상을 보다 CAM 형상에 가깝게 적층하였다. 해당 샘플은 적층 후 기계적 가공 공정을 통해 사용자가 원하는 정확한 형상으로 구현될 수 있으며, 최종적으로 개발하고자 하는 목형 3차원 적층 샘플제작이 가능함을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 대형 압출 적층제조 시스템에 일반적으로 채용되었던 단축 압출 스크류 적층 헤드와 비교하여 헤드의 중량과 부피를 줄이고 재료의 토출량을 늘릴 수 있는 동방향 회전 이축 압출 스크류 적층 헤드를 개발하고 이를 대형 CNC 가공기에 장착하여 압출 적층제조 시스템을 구축하였으며 이를 활용한 적층제조 성능평가를 수행하였다. 개발된 이축 압출 스크류 헤드의 직경은 15 mm, 중량은 148 kg이며 단위시간당 최대 압출량은 25.2 kg/hr 으로 Table 1에 열거되어 있는 기존 장비들에 비하여 헤드 중량 대비 압출량의 비율이 우위에 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 목적으로 하는 헤드중량 최소화 및 토출량 극대화를 만족하는 것으로 볼 수 있다. 적층제조 성능평가를 위하여 유리섬

유가 20 wt.% 함침되어 있는 ABS 고분자 복합소재를 선정하였으며 적층 높이에 따른 압출 적층 형상 관측, 프린팅 시편의 기계적 물성 분석, 시편 파단면의 미세구조 분석 및 적층제조 형상 구현 성능 평가를 수행하였다. 실험결과 10 mm/sec의 프린팅 헤드 이송 조건에서 적층 높이 간격을 7 mm 수준으로 유지 하였을 때 가장 안정적인 적층성능을 보이는 것을 확인하였으며 적층 제조된 재료의 경우 함침된 유리섬유가 적층 방향과 동일한 배향을 지니게 되어 적층 수평 및 수직방향의 기계적 물성이 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 시작품을 적용하여 고분자 복합소재의 압출 적층 제조를 수행할 경우 적층경로에 따른 재료의 기계적 특성이 달라지는 부분에 대한 이해가 필요함을 확인할 수 있었다. 적정 재료 적층제조 공정조건에서 사각튜브 형상의 적층제조 시험을 성공적으로 수행하였으며 이는 본 시스템 및 공정 기술이 기존 목형산업에서 사용되던 목재의 재단공정을 대체 할 수 있는 수준의 적층 형상 정밀도 구현 및 기계적 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 본 연구에서 개발된 압출 적층제조 시작품은 이축 압출 스크류 적층 헤드와 5축 가공 스핀들 트윈헤드로 구성되어 있기 때문에 향후 목형분야에서 요구하는 수준의 정밀형상 적층 및 가공 하이브리드 공정의 구현이 가능하다.

이축 압출 스크류 헤드를 적용한 적층 제조 시스템의 성공적인 산업현장 활용을 위하여 본 연구에서 시도하였던 단순 사각튜브 형상의 조형 외의 다양한 구배와 크기를 갖는 형상을 조형할 수 있는 헤드설계, 소재 별 특성에 맞는 적정 공정조건 설정, 재료의 효과적인 탈포 모듈 구축 및 장비 사용자의 목적에 맞는 재료 토출부의 압출 다이 개발 등이 필요한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기관 기본사업 차세대 고성능 모터 개발을 위한 3D프린팅 장비개발(NK242J) 및 대형 3D프린팅 부품 제작을 위한 가변 스크류 압출 적층헤드 개발(KN014D) 으로 수행되었습니다.

References

- [1] Roschli, A., Gaul, K. T., Boulger, A. M., Post, B. K., Chesser, P. C., Love, L. J., Blue, F., Borish, M., 2019, Designing for Big Area Additive Manufacturing, Addit. Manuf., 25 275-285, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.006>.
- [2] Duty, C. E., Kunc, V., Compton, B., Post, B., Erdman, D., Smith, R., Lind, R., Lloyd, P., Love, L., 2017, Structure and Mechanical Behavior of Big Area Additive Manufacturing

- (BAAM) Materials, Rapid Prototyping J., 23:1 181-189, <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0183>.
- [3] Li, L., Tirado, A., Nlebedim, I. C., Rios, O., Post, B., Kunc, V., Lowden, R. R., Lara-Curzio, E., Fredette, R., Ormerod, J., Lograsso, T. A., Paranthaman, M. P., 2016, Big Area Additive Manufacturing of High Performance Bonded NdFeB Magnets, Sci Rep., 6 36212, <https://doi.org/10.1038/srep36212>.
- [4] Fathizadan, S., Ju, F., Rowe, K., Fiechter, A., Hofmann, N., 2020, A Novel Real-Time Thermal Analysis and Layer Time Control Framework for Large-Scale Additive Manufacturing, J. Manuf. Sci. Eng., 143:1 011009, <https://doi.org/10.1115/1.4048045>.
- [5] Bogdanor, M., Agrawal, H., Barocio, E., Favaloro, A., Smiddy, B., Susnjara, K., Pipes, R. B., 2020, Design of Composite Compression Molding Tools Using Large Scale Additive Manufacturing, SAMPE 2020.
- [6] CMS Group, n.d., viewed 6 Aug. 2020, CMS Kreator, <<https://www.scmgroup.com/en/cmsadvancedmaterials/products>>.
- [7] Colón Quintana, J. L., Slattery, L., Pinkham, J., Keaton, J., Lopez-Anido, R. A., Sharp, K., 2022, Effects of Fiber Orientation on the Coefficient of Thermal Expansion of Fiber-Filled Polymer Systems in Large Format Polymer Extrusion-Based Additive Manufacturing, Materials, 15:8 2764, <https://doi.org/10.3390/ma15082764>.
- [8] Kim, J. T., 2017, viewed 10 March 2020, Development of Hybrid 3D Printing System Based on FDM (Fused Deposition Modeling) for Replacing Wood Model for Large Casting with a Size of $3 \times 4 \times 1.2$ (m³), Research Project Report of Korean Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE), <<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201800040250>>.
- [9] Mahmoodi, M., Behraves, A. H., Rezavand, S. A. M., Pashaei, A., 2010, Visualization of Bubble Dynamics in Foam Injection Molding, J. Appl. Polym. Sci., 116:6 3346-3355, <https://doi.org/10.1002/app.31839>.



Pil-Ho Lee

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Process and System Development of Additive Manufacturing System.

E-mail: pilho_lee@kimm.re.kr



Taeho Ha

Principal Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Additive Manufacturing Process and Equipment Development.

E-mail: taehoha@kimm.re.kr



Min-Kyo Jung

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Design for Additive Manufacturing by using FEM.

E-mail: mkjung@kimm.re.kr



Joon Phil Choi

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Material and Process Development for Net-shape Technologies.

E-mail: jpchoi@kimm.re.kr



Chang-Geun Yang

Director in Joong Ang Foundry Pattern. His research interest is Design of Foundry Pattern.

E-mail: jmb2003@hanmail.net