

자동공구교환장치를 이용한 융합 FDM 공정 및 장치개발에 관한 연구

Development of Hybrid-FDM Process Using Automatic Tool Changer for Multi-Material Production and Post-Processing

최성민¹, 샤오젠¹, 박인백², 이석희^{1,✉}
Sung Min Choi¹, XiaoJian¹, In Baek Park², and Seok Hee Lee^{1,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)
² LG 전자 소재생산기술원 (Material and Production Engineering Research Institute, LG Electronics)
✉ Corresponding author: sehlee@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2327

Manuscript received: 2015.9.3. / Revised: 2015.12.16. / Accepted: 2016.1.21.

The purpose of this study is an attempt to improve the functionality of a conventional Fused Deposition Modeling (FDM) process using the Automatic Tool Changer (ATC) to perform multi-material production and post-processing. Hybrid-FDM means a fusion of an Additive Manufacturing process and grinding process using the ATC system. In order to enhance the potentiality of production capacity for multi-material fabrication and surface roughness improvement, two extrusion tools and one grinding tool system are suggested. A pneumatic chuck is attached on a moving platform in the XY axes plane and an extrusion head and grinding head are placed in a docking station, allowing for a quick changeover with each other. Therefore, the manufacturing lead time can be reduced efficiently for the fabrication of a product.

KEYWORDS: Fused deposition manufacturing (FDM) (응착조형공정), Post-Processing (후가공), Multi-Material (다중소재)

1. 서론

AM (Additive Manufacturing) 공정은 설계 단계에 있는 3차원 모델을 다른 중간 과정 없이 모형이나 시제품 (Prototype)으로 빠르게 제작하는 기술로써 3차원 모델의 데이터를 통해 소재를 겹겹이 쌓아가며 3차원 형상을 신속하게 제작하는 기술이다.¹

1986년 3D Systems사에서 개발된 SLA (Stereo Lithography Apparatus) 공정을 시작으로 전 세계적으로 수십 가지의 공정이 개발되고 끊임없이 발전

하고 있다.

2000년대 중 후반 이후로는 개인화된 3DP (3D Printer)가 등장하였고, 많은 기업이 개인 3DP 제품을 소비자들에게 제공하고 있다. 그중에서 FDM (Fused Deposition Modeling)은 비교적 간단한 구조, 실사용이 가능한 소재 그리고 저렴한 소재 값 때문에 개인 3DP 시장에서 가장 많이 사용되고 있다.^{1,2} 또한, 시제품 개발과 제품실현의 사이의 징검다리의 요소를 가지고 있는 공정이다.^{3,4}

그러나 최근까지 FDM 기반의 시스템은 여전히

낮은 생산율과 표면품질을 가지고 있고 소비자에게 기능이 향상됐다고 여길 만한 요소가 없다.

종래의 FDM 공정은 열가소성 플라스틱 소재를 반응용 상태로 녹여 미세노즐 (Nozzle)에서 압출하는 익스트루더 (Extruder)를 X-Y 축으로 움직이는 플랫폼에 장착한 뒤 한층 한층 재료를 압출하여 형상을 제작하는 방식이므로 광경화 수지를 사용하는 SLA, 중합체 (Polymer) 또는 세라믹 파우더를 사용하는 SLS (Selective Laser Sintering) 공정들과는 달리 소재별로 독립적인 익스트루더를 장착하면 비교적 간단하게 다중소재 제작이 가능하다.

그러나 이론상 n 개의 익스트루더로 n 개의 소재로 부품을 제작할 수 있다고 해도 장착 수만큼 비례하여 시스템이 크고 무거워지게 된다.

그리고 AM 공정은 부품 제작 시 적층 과정을 거치기 때문에 반드시 그 층마다 단 차로 인한 계단 현상이 생기게 된다. 특히 FDM은 노즐 치수의 한계로 인해 다른 공정들에 비해 표면품질이 안 좋다.

이러한 FDM의 단점을 해결하기 위해 다음과 같은 연구들이 진행되었다.

David 등은 Stratasys 사의 FDM 2000과 FDM 3000 장비를 통합하여 두 장비 사이를 왕복하는 정밀 슬라이드를 이용해 서로 다른 층에서 여러 재료의 개별 증착이 가능한 MMT FDM 공정을 개발하였다.⁵ 그 결과 다중소재 제작을 통한 제작 시간 감소와 노즐 치수를 이용한 표면품질 개선을 나타냈지만 두 시스템을 통합하기 위해 전체적인 시스템의 부피가 증가하였고 두 가지 이상의 다중소재 부품을 제작을 위한 방안이 제시되어 있지 않으며 일체형 시스템이라기 보다 하나의 장비에 다른 장비를 더 한 방식이다.

Ahn, Alberto 등은 표면에 부품 방향 선정을 통하여 최적의 방향을 도출하여 표면 거칠기를 최소화시키는 연구와 직접 파라핀 코팅을 하여서 절삭을 통한 후가공을 하였다.^{4,9} 위의 연구는 표면품질 개선을 위한 후가공을 위한 연구지만 직접적인 AM 공정에서 이루어지지 않고 간접적인 방식이거나 수작업을 통한 작업이기에 전체 공정 시간에 막대한 영향을 끼칠 수밖에 없다.^{6,7,11-13}

본 논문에서는 개인 FDM 시스템 향상을 위해 자동공구교환장치 (Automatic Tool Changer, ATC)를 장착하여 제작 시간의 감소, 다중소재제작 및 계단효과로 인한 표면 거칠기 개선공정을 하나의 시스템으로 융합하여 본 공정의 적용성과 효율성을 검증하고자 한다.

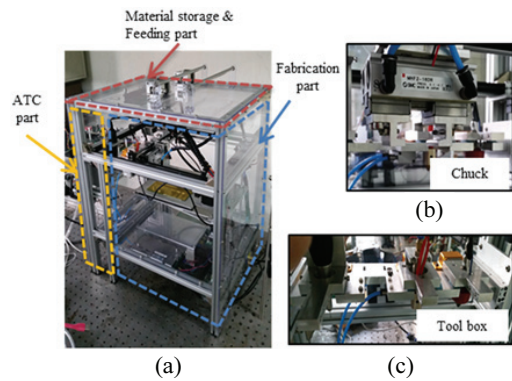


Fig. 1 Hybrid-FDM system using ATC: (a) Overview of entire system, (b) View of pneumatic chuck in Fabrication part, (c) View of toolbox in ATC part

2. 융합 FDM 시스템

2.1 융합 공정의 특징

융합 공정은 FDM 시스템의 장점은 유지하면서 다중소재제작과 후가공 공정을 하나의 시스템으로 융합한 시스템으로 다음과 같은 특징이 있다.

첫째, 본 시스템에서는 공구 보관함을 장착하여 전체 시스템 부피의 감소와 다양한 익스트루더와 절삭공구의 보관이 쉬운 장점이 있다.

둘째, 보관함을 장착함으로써 수작업으로 진행되던 노즐 교환과 재료 교환은 자동공구교환방식의 적용으로 미리 준비되어있는 익스트루더를 교환하기만 하면 되므로 전체 생산시간의 단축이 가능하다.

셋째, 다중소재 구조물 제작은 이전의 연구들과는 달리 자동공구교환장치를 이용하여 장착되어 있는 익스트루더와 공구 보관함에 있는 익스트루더를 교환하는 방식이다.

넷째, 이전의 후가공은 사포 (Sandpaper), 비드 (Bead), 샌드 (Sand), 면 (Cotton), 양털 패드 (Wool Pad) 등의 것들을 사용하여서 추가적인 작업을 해야 했지만, 융합 FDM 시스템은 공구 보관함에 절삭공구를 장착하여 생산 시간의 손실 없이 표면 거칠기 값의 큰 개선 효과를 기대할 수 있다.

이러한 특징은 ATC의 구조나 제어방식에 따라 공간을 효율적으로 사용할 수 있으므로 전체 시스템의 부피에 크게 상관없이 종래의 FDM 시스템보다 다양한 재료와 공구를 사용할 수 있게 된다.

2.2 시스템 구성

융합 FDM 시스템은 Fig. 1과 같이 전체 현상에

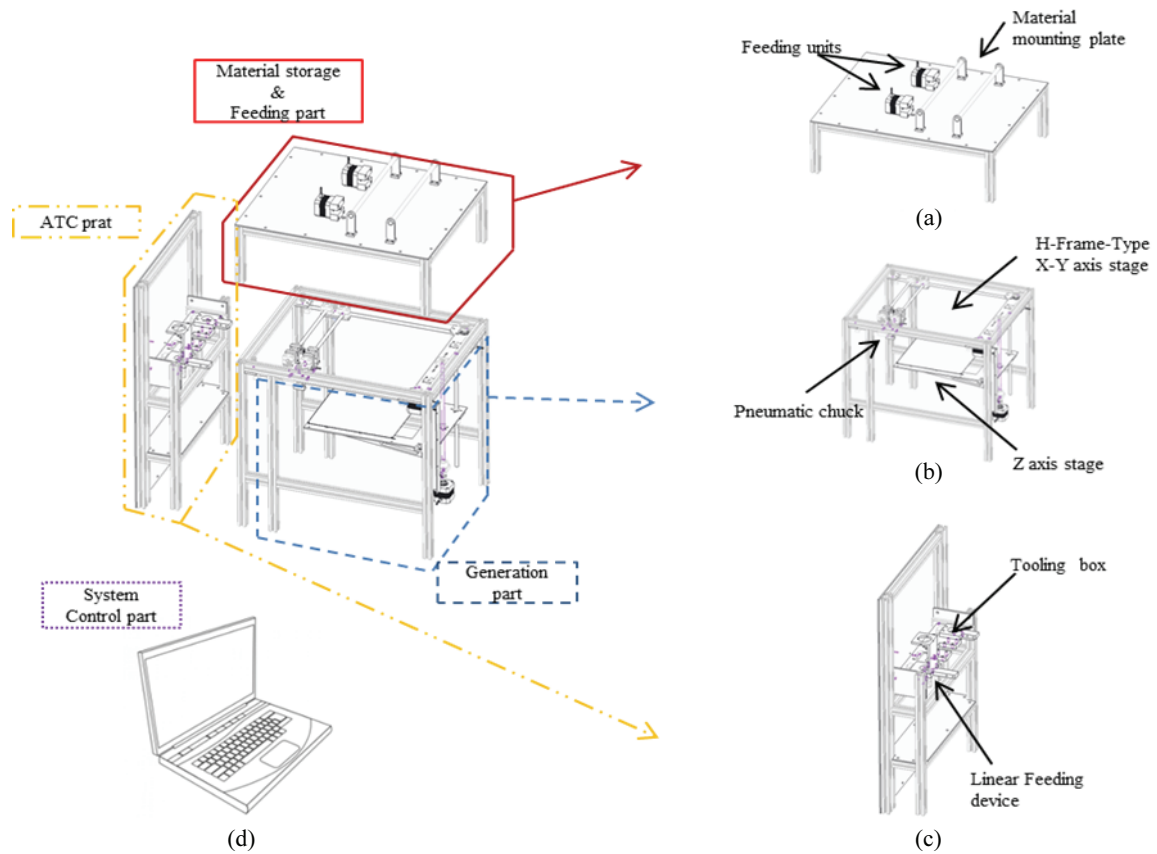


Fig. 2 Schematics of design each part: (a) Material storage & Feeding part, (b) Generation part, (c) ATC part, (d) System control part

서 재료공급 파트, 제작 파트, ATC 파트, 시스템 제어 파트 총 4가지 세부 공정으로 구성된다.

장비의 전체 크기는 395mm×488mm×580mm의 직육면체 형태로 설계되었다. 제작 가능한 파트의 크기는 200mm×200mm×130mm이고, 한 층의 두께는 0.06mm-2mm이다. Fig. 2는 각각의 세부파트 형상들을 나타낸다.

재료공급 파트는 2개의 리니어 샤프트의 양단에 베어링을 설치하여 롤 형태의 FDM 재료를 장착할 수 있게 되어있다. 그 후 장착된 필라멘트는 스텝모터로 구동되는 이송장치를 통하여 압출하는 재료의 양에 비례하여 밀어주게 된다.

제작 파트는 H형상의 X-Y 축과 이송플랫폼이 장착되고 위치결정을 위해 스텝모터와 폴리 벨트를 이용하였다. 2개의 축은 비틀림 없이 유동적으로 움직이기 위한 시스템으로 CORE X-Y를 적용하였다.¹⁰ 2축 이송플랫폼에는 공구교환을 위한 공압

척이 장착되어 있고, 공구교환 시 공구의 비틀림을 방지하기 위해 위치결정 핀이 척에 부착되어 있다. 그리고 Z축에는 재료의 수축변형을 줄이기 위한 히팅베드 (Heating Bed), 정밀이송을 위한 볼스크류 (Ball Screw)와 스텝모터가 장착된다.

ATC 파트에서는 공구를 보관하기 위한 공구보관함이 있다. 공구보관함의 형태는 Fig. 3과 같이 직사각형이며 보관함마다 디근자 홀을 가공하였다. 이는 익스트루더 또는 절삭공구의 모양이 아래로 길게 뻗어있는 형태이기 때문에 공구의 장탈착 시 걸림이 없게 하기 위함이다.

각 공구는 T자 형태의 브라켓 (Bracket)에 고정되어있고 브라켓의 가장자리 부분이 보관함에 걸쳐지게 설계되었고 위치결정 홀을 가공하여 핀을 정확한 위치로 안내한다. 보관함의 양끝단에는 제작 파트에 공급하기 위해서 양측에 슬라이드 레일과 하단부에 공압 실린더를 가지고 있으며, 볼 플

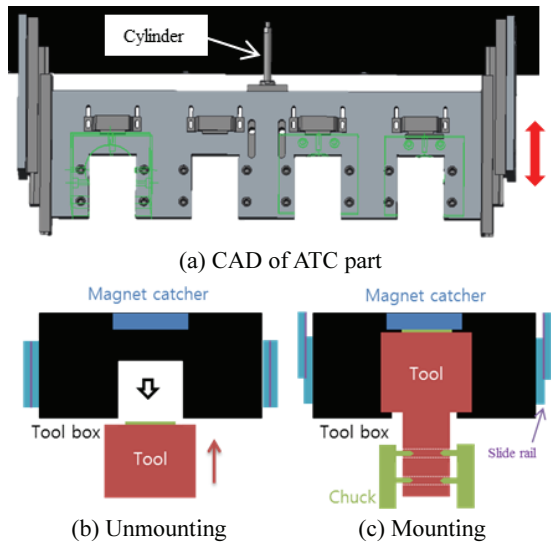


Fig. 3 Methods of mounting tools in ATC part

런저 (Ball Plunger)와 마그넷 캐처 (Magnet Catcher)를 장착하여 안정적인 장탈착이 가능하게 하였고 총 4개의 보관장소가 있고 2개의 익스트루더, 1개의 절삭공구와 1개의 예비 보관함으로 되어있다.

시스템 제어 파트는 3차원 모델링 슬라이싱, 노즐의 이동 경로 생성, 하드웨어 제어를 위하여 마이크로 컨트롤러와 소프트웨어가 사용되며 통신을 위한 PC로 구성된다.

2.3 융합 FDM 공정

융합 FDM 시스템의 전체 공정은 Fig. 4와 같이 전처리 공정 (Pre-Process)과 제작 공정 (Fabrication-Process) 그리고 후가공 공정 (Post-Process)의 세 가지 공정으로 나뉜다.

전처리 공정은 Fig. 5와 같이 위해 3차원 모델링 파일을 STL 파일로 변환하고 지정된 적층 두께로 슬라이싱 후 각층을 미세노즐이 지나가는 공구 경로 (Tool Path)를 생성한다.

제작 공정은 두 가지 과정으로 나누어진다. 단일 익스트루더 공정은 하나의 재료를 사용하여 한층의 작업이 완료되면 Z축이 하강하여 그 다음 층 작업을 반복한다. 다중 익스트루더 공정은 적층 과정은 동일하나 재료교환이 필요한 시점에 X-Y 축이 ATC 파트로 이동하여 공구교환을 하고 교환된 익스트루더를 사용하여 다시 제작과정을 반복한다.

후가공 공정은 제작된 해축조형물의 표면 품질을 향상하기 위한 마무리 단계이다. 제작이 완료

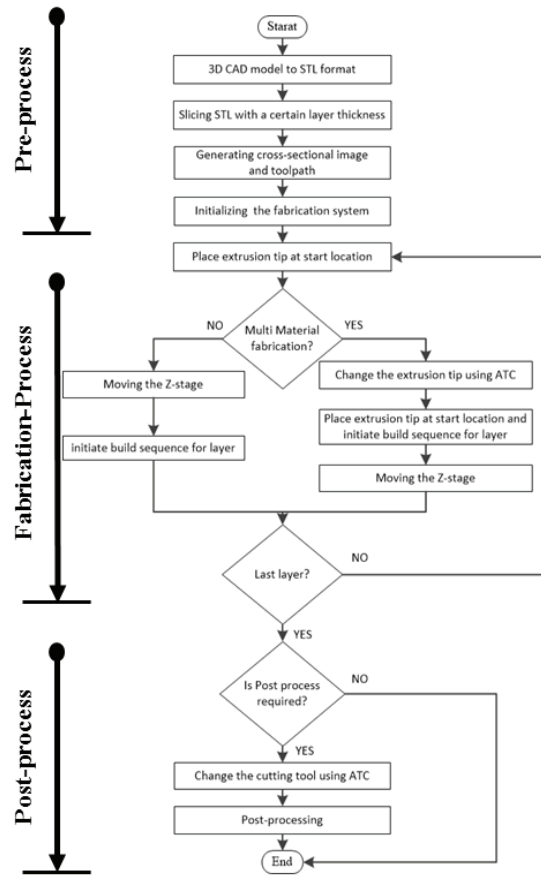


Fig. 4 Flowchart of process in Hybrid-FDM

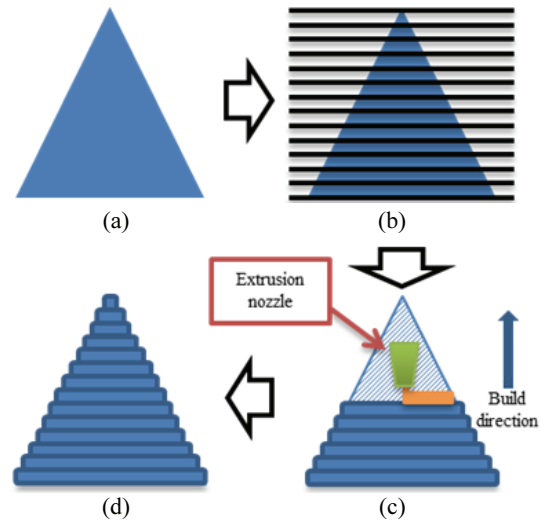


Fig. 5 Schematics of layered manufacturing in FDM system

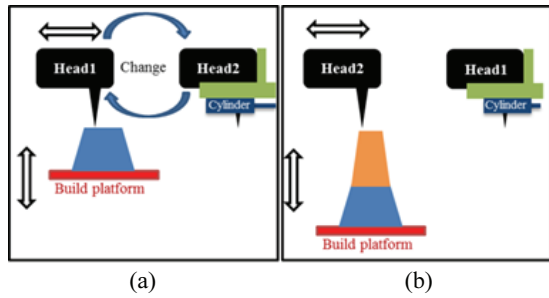


Fig. 6 Schematic of multi-material fabrication process:
(a) Before change of extrusion head, (b) After change of extrusion

되면 ATC 파트에서 절삭 공구로 교환하여 부품의 설계 윤곽선 (Contour)을 기준으로 표면을 절삭 가공한다. 만약 쾌속조형물의 후가공을 원하지 않을 때는 제작이 완료된 후 전체 공정을 종료한다.

2.4 제어 프로그램 개발

시스템 제어 파트는 XY 축 제어, 공구교환 제어를 PC 환경에서 제어할 수 있도록 C++과 MFC를 사용하여 구축하였다.

제어 프로그램은 하드웨어 제어와 STL 파일의 단면 이미지 생성 및 공구 이동을 위한 G 코드까지 생성할 수 있다. 또한, 제어 프로그램을 통하여 PC에서 시리얼 통신으로 제어 보드에 연결하여 스텝모터 5축, DC모터 1축, 공압 솔레노이드 밸브 2개, 아날로그 출력 4개를 유동적으로 제어한다.

3. 구조물 제작실험

3.1 연속적인 구조물 제작

융합 FDM 공정 및 장치를 이용하여 Fig. 8과 같은 스테이지, 꽃병 등 6개의 모델을 단일 익스트루더 공정과 다중 익스트루더 공정으로 각각 제작 후 비교 분석을 진행하였다.

실험결과는 Table 1과 같으며 약 20%의 시간이 단축되어 연속적 제작에서 생산능력 향상을 확인하였다. 이러한 생산시간의 차이가 나는 이유는 단일 익스트루더 공정에서는 하나의 제품을 제작 후 소재나 노즐 치수 교환을 위해 작업자의 수작업을 거쳐야 하기 때문이다.

단일 익스트루더 공정은 작업자의 숙련도에 따라 편차가 크므로 작업시간이 길어지게 되는 반면 융합 FDM의 자동공구교환장치를 이용하면 공구교

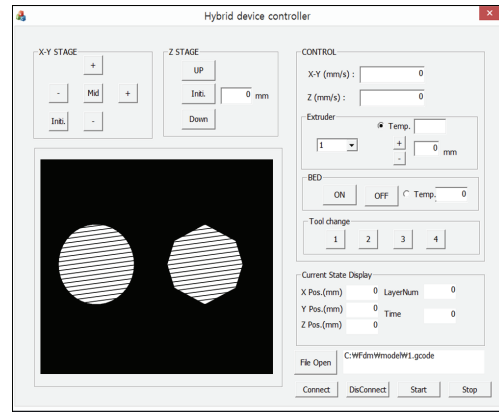


Fig. 7 GUI for hardware control program

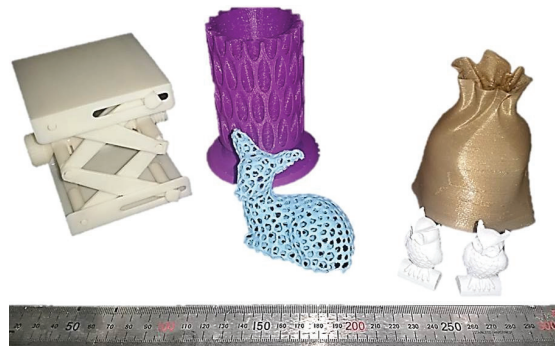


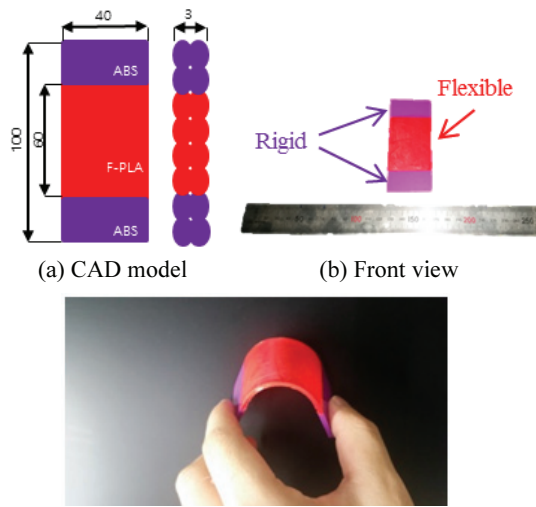
Fig. 8 Fabrication of 3D models using Hybrid-FDM

Table 1 Total fabrication times of the entire model using the single extrusion head and the multi extrusion head

Process	Layer thickness (mm)	Total building time (min)
Single-Extruder process	0.2	723
Multi-Extruder process	0.2	584

환이 자동화되어 다음 제품의 제작 시까지 정해진 시간 내에 교환할 수 있다. 그리고 Fig. 8에 나와 있는 팬터그래프 (Pantograph) 스테이지 같이 별도의 어셈블리 (Assembly) 작업 없이 완성품으로 제작되는 부품은 정밀하게 제작이 안 된다면 각 부품의 구동부가 붙어버려 사용할 수 없게 되므로 노즐의 치수교환이 필수적이게 된다.

결과적으로 단일 익스트루더 공정에서는 제품 제작 중 사용되고 있는 노즐의 치수와 소재를 변



(c) Potential of working with an elastomeric material in combination with a rigid plastic

Fig. 9 Fabrication of Multi-material model using Hybrid FDM

경하는 것은 많은 시간이 소요되는 반면 자동공구 교환장치를 이용한 다중 익스트루더 공정에서는 공구교환을 통하여서 장착된 소재와 노즐 치수가 다른 준비된 익스트루더로 교환하여 제작하기 때문에 정밀도 향상과 제작 시간 단축을 할 수 있다.

3.2 다중소재 구조물 제작

다중소재 구조물 제작은 하나의 구조물 내에 두 가지 이상의 소재를 사용하여 어셈블리 작업을 최소화하고 다양한 기능을 가진 구조물을 제작하기 위한 실험으로 Fig. 9(a)와 같은 도면을 이용하여 구조물을 제작하였다.

제작결과 Figs. 9(b)와 9(c) 같이 서로 다른 성질을 가지는 소재를 사용하여 다중소재 구조물 제작의 잠재적인 능력을 확인하였다. 제작을 위해 사용된 재료는 단단한 지지대로 사용된 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)와 고무와 같은 탄성을 가지는 소재로 F-PLA (Flexible-Poly Lactic Acid)를 사용하였다.

다중소재를 이용한 제품들은 지지대 역할을 하는 강체 소재에 탄성을 가지는 소재가 큰 틀어짐 없이 결합한 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 그러므로 피스톤 (Piston), 댐퍼 (Damper)와 같은 다중소재를 사용하는 최종단계의 제품을 제작하기 위한 시간을 단축할 수 있고 적용하는 방법에 따라 다양한 가능성을 확인할 수 있었다.

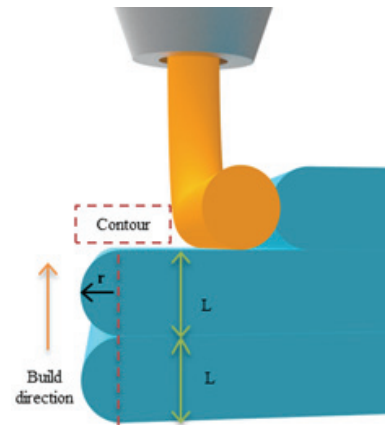


Fig. 10 Simplified geometry of the parts manufactured in FDM system

4. 후가공 공정

4.1 표면 거칠기 특징

Fig. 10은 Fig. 3(c)의 적층 중간과정을 그래픽화하여 나타냈다. 다음과 같이 적층 중간과정에서 미세노즐에 의해 압출된 재료는 한층 한층 쌓아 올라가면서 제작 파트의 표면에는 반원 형태의 계단현상이 생기게 된다. 이렇게 발생한 반원은 제작된 파트의 치수에 오차를 생기게 하고, 표면품질을 저해하는 요소가 된다. 여기서 얻는 평균표면 거칠기 값 (Surface Roughness Average, R_a)은 Fig. 10에서 윤곽선을 기준으로 반지름 r 만큼 반원의 산술평균 편차 값으로 정의된다.⁸

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

여기서 L 은 전체 평가 길이이고, $y(x)$ 는 거칠기 곡선식이다.

융합공정은 표면 거칠기를 개선하기 위해 절삭 공정을 융합하였고 모델의 실측 치수 윤곽선을 기준으로 깎음으로써 개선된 표면을 얻는다.

4.2 절삭조건 실험

FDM에서 제작된 형상에 불특정한 반원 형태의 계단현상을 개선하기 위한 최적 절삭조건을 구하기 위한 실험이다. 이번 실험에서 사용된 소형그라인더 (STRONG90-102)는 최대 35,000rpm과 280gf*cm의 토크를 낼 수 있으며 간단한 조작을 통하여 절삭 바 (Bur)를 교환하게 되어있고, 또한 공구보

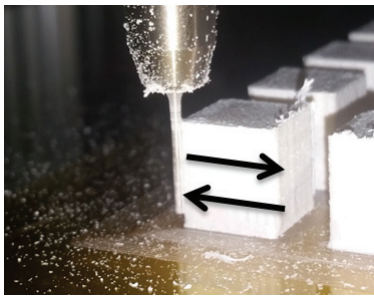


Fig. 11 Test of cutting tool for post-processing in Hybrid-FDM

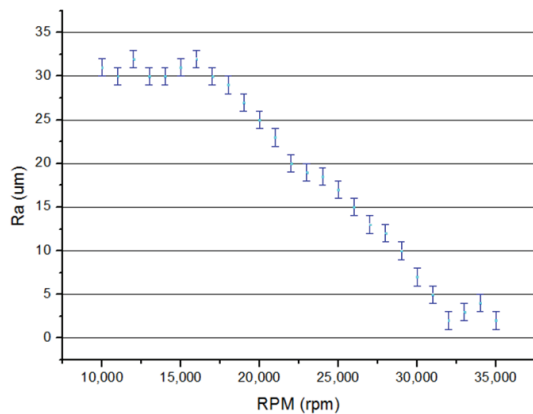


Fig. 12 Roughness parameters as a variation of RPM

관함에 맞추어 T자형 브라켓에 장착하였다.

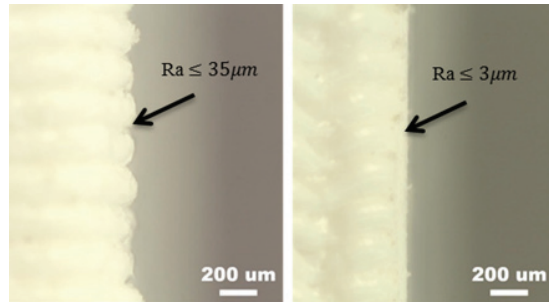
본격적인 실험에 앞서 절삭공구의 최적 가공조건을 찾기 위한 사전실험을 하였다. Fig. 11과 같이 표면을 따라 각 1회 왕복한 뒤 표면 거칠기 값을 측정하여 가장 낮은 값이 되었을 때의 가공조건을 찾는 것이다. 시편은 노즐 치수 0.4 mm, 적층 높이 0.2 mm 소재는 ABS를 사용하고, 10 cm x 10 cm x 10 cm 정육면체 모델을 제작하였다. 절삭공구는 지름 1.2 mm 절삭 바를 이용하여 10,000 rpm으로 시작하여 1,000 rpm씩 증가시켜 단계별로 실험을 진행하였다. 다수의 절삭 실험을 하였을 때 Fig. 12와 같이 소형그라인더의 회전속도가 25,000 rpm - 35,000 rpm 일 때 표면품질에서 가장 좋은 결과와 Ra 값 또한 최저치를 기록했다.

4.3 표면개선 실험 및 결과

절삭조건 실험결과를 바탕으로 Table 2와 같이 가공조건을 설정하여 후가공 후 표면상태의 변화를 정밀 관찰하였다. 우선 표면의 변화를 가시적

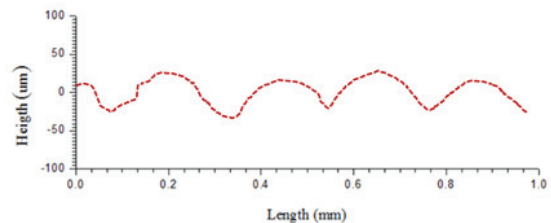
Table 2 Post-Processing experimental conditions

Layer thickness(mm)	0.2
Move speed(mm/min)	500
RPM(rpm)	3200
Tooling dia(mm)	1.2
Material	ABS

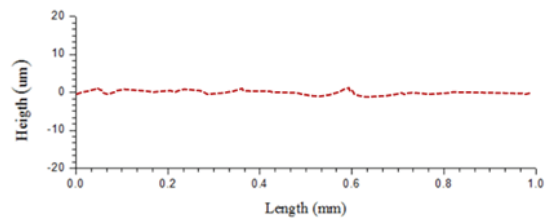


(a) Before post-processing (b) After post-processing

Fig. 13 Result of post-processing



(a) Before post-processing



(b) After post-processing

Fig. 14 Measured surface roughness

으로 확인하기 위해 현미경(DCF™280 Microscope)을 사용하였다.

Fig. 13은 후가공 전후 사진으로 표면품질이 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. Fig. 14는 측정된 결과값을 이용하여 표면의 변화를 잘 나타내기 위해 그래프로 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 후가공 전 Ra 값이 ≤ 35μm 로 다소 거친 상태였으나 후가공을 거친 후에는 Ra 값이 ≤ 3μm 에서 ≤ 3μm 로 대폭 개선되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 융합 FDM 공정은 전체 제작 시간을 감소시키거나 다중소재 구조물 제작을 위하여 ATC 파트를 구성하였고, 열가소성 소재의 적층으로 임의형상을 제조하는 종례의 FDM 시스템과 소재를 깎아서 형상을 제조하는 절삭 및 연삭 공정을 융합하여 쾌속조형물의 표면품질을 향상할 수 있는 시스템을 제안하였다.

연속적인 모델의 제작에서는 각 하나의 모델마다 소재가 다를 경우 간단한 공구교환을 통하여 약 5-10초 이내에 다른 소재로 제작할 수 있으며, 각 익스트루더 공구의 노즐 치수의 차이로 제작 중 정밀도의 향상 또는 제작 시간을 단축할 수 있었다. 그리고 제작공정 중 공구교환을 통해 다중소재 구조물 제작을 확인하였다. 또한, 모든 제작이 완료된 이후 AM 공정에서 제기되는 문제점인 계단현상을 해결하기 위한 소형 그라인더를 장착하여 모든 공정이 끝난 후 작업자가 계단현상 제거를 위한 작업이 최소화되었다.

향후 연구에서는 3축 융합 FDM 공정을 5축으로 적용하여 공정의 정밀도 및 다양성을 향상하여 좀 더 복잡한 쾌속조형물의 후가공에 적합한 실험 및 해석적 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Jacobs, P. F., "Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling," Society of Manufacturing Engineers, 1995.
- Wohlers, T., "Wohlers Report 2015: Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report Title of Paper," Wohlers Associates, 2015.
- Chua, C. K., Leong, K. F., and Lim, C. S., "Rapid Prototyping: Principles and Applications," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003.
- Boschetto, A., Giordano, V., and Veniali, F., "3D Roughness Profile Model in Fused Deposition Modelling," Rapid Prototyping Journal, Vol. 19, No. 4, pp. 240-252, 2013.
- Espalin, D., Alberto, R. J., Medina, F., and Wicker, R., "Multi-Material, Multi-Technology FDM: Exploring Build Process Variations," Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, No. 3, pp. 236-244, 2014.
- Kim, H.-C. and Lee, S.-H., "Reduction of Post-Processing for Stereolithography Systems by Fabrication-Direction Optimization," Computer-Aided Design, Vol. 37, No. 7, pp. 711-725, 2005.
- Ahn, D., Kim, H., and Lee, S., "Fabrication Direction Optimization to Minimize Post-Machining in Layered Manufacturing," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 3, pp. 593-606, 2007.
- Ahn, D., Kweon, J.-H., Kwon, S., Song, J., and Lee, S., "Representation of Surface Roughness in Fused Deposition Modeling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 15, pp. 5593-5600, 2009.
- Ahn, D., Kim, H., Jeong, H., and Lee, S., "A Study on Improving the Surface Roughness of Stereolithography Parts," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 21, No. 9, pp. 196-203, 2004.
- Core[X,Y], "Principle of Operation," <http://corexy.com/theory.html> (Accessed February 19 2016)
- Choi, S. M., Lee, S. H., Kim, M. S., and Park, I. B., "Application Method of Friendly Environment Material for Physical Properties," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 880-880, 2014.
- Choi, S. M. and Lee, S. H., "Study on the Color Enhancement of Photo-Curing Structures Using Stereo Lithography," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 993-994, 2015.
- Kim, M. S., Park, I. B., Choi, S. M., and Lee, S. H., "A Study of Post-Process for Improvement Material Properties of Plastic 3D Printing Structures," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 694-694, 2014.