

Irregular surface output using FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printer

Jung-Soo Lee[†] and Kyung-Chul Cha^{*†}

Program of IT-Design Fusion, Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

*Department of Metal Art & Design, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

(Received August 19, 2021)

(Revised January 17, 2022)

(Accepted January 21, 2022)

Abstract As 3D printer-related patents expire and major technologies are disclosed, the price of 3D printers is dropping, creating an environment where you can easily find the product you want. In particular, the cheapest FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printer is being used in various fields. The FDM method can be manufactured without collapsing of the shape only by attaching a support under certain conditions when outputting the shape. When printing a shape without a support, the irregular surface that occurs at a certain angle is a defect in the product, but it is considered that it can be used as another fun factor in terms of arts and crafts. In this paper, to obtain such an irregular surface, factors that can affect the output were controlled and only the output angle was tested as a displacement factor. As a result of the experiment, it was possible to obtain an irregular surface without the filament flowing down when printing at an angle of 62° to 70° from the vertical. Also, artificially irregular surfaces were applied to craft products.

Key words 3D printer, FDM, Filament, Crafts

FDM(Fused Deposition Modeling) 방식 3D 프린터를 이용한 불규칙한 표면 출력

이정수[†], 차경철^{*†}

서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 IT·디자인융합프로그램, 서울, 01811

*서울과학기술대학교 금속공예학과, 서울, 01811

(2021년 8월 19일 접수)

(2022년 1월 17일 심사완료)

(2022년 1월 21일 게재확정)

요약 3D 프린터 관련 특허가 만료되고 주요 기술이 공개되면서 3D 프린터 가격이 하락하면서 원하는 제품을 쉽게 찾을 수 있는 환경이 조성되고 있다. 특히 가장 저렴한 FDM(Fused Deposition Modeling) 3D 프린터가 다양한 분야에서 사용되고 있다. FDM 방식은 형상을 출력할 때 특정 조건이상에서는 지지대(Support)를 붙여야만 형상의 무너짐 없이 제작이 가능하다. 지지대를 달지 않고 형상을 출력할 때 특정 각도에서 발생하는 불규칙한 표면은 제품에 있어서는 불량이지만 예술과 공예적 측면에서는 또 다른 재미를 느낄 수 있는 요소로 활용될 수 있다고 사료된다. 본 논문에서는 이러한 불규칙한 표면을 얻기 위해 출력에 영향을 줄 수 있는 요인들을 제어하고 출력 각도만 변위요소로 실험하였다. 실험 결과 수직에서 62°~70°의 각도로 프린팅 시 필라멘트가 흘러내리지 않고 불규칙한 표면을 얻을 수 있었다. 또한 인위적으로 불규칙한 표면을 공예적인 제품에 적용해 보았다.

1. 서론

지금 대중적으로 많이 쓰이는 FDM(Fused Deposition Modeling)방식 3D 프린터는 1989년 미국의 스캇 크럼프(Scott Crump)가 ‘3차원 물체를 생성하는 장치 및 방

법’(미국 특허 No. 5121329)이란 기술로 특허를 획득했고, 그것이 용융적층모델링기술이다. FDM은 개인용 3D 프린터에서 가장 많이 사용되고 있는 방식이다. 그 후로도 다양한 3D 프린터의 방식들이 개발되었다[1].

2009년 스트라타시스(Stratasys)가 보유한 압출적층방식(FDM: Fused Deposition Modeling)의 특허 만료를 시작으로 3D 프린터 관련 주요기술특허권이 대거 만료됨에 따라 3D 프린터의 가격 하락은 고가의 제조 장비

[†]Corresponding author

E-mail: sooartlo@naver.com, cha@seoultech.ac.kr

를 사용하지 않고도 원하는 품질의 제품을 얻을 수 있는 시대가 되었다.

3D 프린터 시장은 해가 지날수록 활용 분야 또한 넓어지고 규모도 점점 커지고 있다. 전자제품, 건축, 항공, 자동차, 음식, 의료 등의 다양한 분야에서 시제품 제작과 완성품까지 만들고 있다.

3D 프린터 장비의 가격하락과 재료의 다양화는 접근 분야의 다변화를 가져 왔다. 이러한 흐름은 산업을 넘어 예술과 공예에도 많이 응용되어 사용되고 있다. 예술에 가까운 영역인 공예는 작가의 영혼을 담는 수작업의 이미지가 강했다. 하지만 최근 신진 작가들 사이에서 3D 프린터로 공예품을 ‘출력’하여 시장에 접근하는 시도가 이루어지고 있다.

2015년 10주년에 맞은 공예전문 박람회인 ‘공예트렌드 페어’에 27명의 작가들 참가하였다. 이 중 9명이 3D 프린터와 관련된 작품을 선보였다. Figure 1을 보면 귀얄 기법으로 도자기를 만들어온 윤주철 작가는 투각식 손잡이를 3D 프린터로 만들었고, 윤상희 작가는 3D 프린팅을 활용해 제작한 결과물에 옷칠을 하는 등 다양하게 응용하여 사용되고 있다[2].

이처럼 3D 프린팅은 예술가에게 혁신적이고 새로운 창작도구로서 표현의 확장에 혁신적 도움을 줄 수 있다는 공감대가 확산되고 있다. 지금까지 상상하기 어려웠던 다양한 재료를 통해 예술이 구현될 수 있을 것이라는 전망도 이런 공감대 확산에 한몫을 하고 있다[3].

생각하는 모든 것이 제약 없이 구현되는 것이라면, 3D 프린팅은 기존의 도구와 공구에 첨단 장비가 더해져 예술가의 창의성을 확장 해줄 수 있다.

압출 적층 방식(FDM; Fused Deposition Modeling)에서 대표적으로 사용되는 열가소성 고체형태의 플라스틱류 소재로는 PLA와 ABS가 대표적이며 실과 같은 형태의 필라멘트 소재가 주로 이용된다.

FDM 방식은 형상을 출력할 때 특정 조건이상에서는 지지대(Support)를 붙여야만 형상의 무너짐 없이 제작이 가능하다. 그렇지 않으면 표면이 고르지 않거나 형상이 형성되지 못하기 때문이다. 지지대를 달지 않고 일정한

각도를 넘으면 표면이 고르지 않다 그 한계를 넘으면 형상이 조형되지 않는 것이다. 오랫동안 3D 프린터를 사용하는 도중 특정 각도에서 조형은 가능하나 표면이 고르지 않는 현상을 발견하였다. 이러한 표면은 기존의 매끈한 표면이 아닌 우연적으로 만들어진 거칠고 불규칙한 표면이었다. 이러한 불규칙한 표면은 제품제작에 있어서는 불량이지만 예술과 공예적 측면에서는 또 다른 재미를 느낄 수 있는 요소로 활용될 수 있을 거라 사료된다.

FDM 방식 3D 프린터는 출력할 때 여러 가지 요인(노즐온도(Nozzle Temperature), 필라멘트(Filament), 베드온도(Bed Temperature), 3D 모델을 지지할 지지대(Support) 등)에 의해 출력물 품질에 영향을 받는다[4].

FDM 방식의 3D 프린터는 장비에 따라 출력물의 차이가 있겠지만 그 외에도 슬라이싱 프로그램의 셋팅에 따라 출력물의 품질이 더욱 달라진다. 본 연구에서는 저가형 장비인 Ender 3D 장비를 사용하였으며, 슬라이싱 프로그램은 Ultimaker Cura 4.0.0 버전을 사용하였다.

본 논문에서는 이러한 불규칙한 표면을 얻기 위하여 출력물에 영향을 줄 수 있는 요인을 통제하고 출력각도만 변위 요소로 두고 실험하였다.

또한 인위적으로 불규칙한 표면을 포함한 제품을 제작해 보았다.

2. 실험 과정

2.1. 지지대

FDM 방식의 문제점 중 하나인 수축 현상은 출력되는 과정 중 출력물의 바닥면에 발생하면 가열판에서 출력물이 분리되거나 평평한 모양이 아닌 들뜬 모양으로 변형된다. 한 층씩 적층하는 특성으로 출력 중 일부 공중에서 출력해야 하는 경우도 있는데, 이를 위해 출력 시작부터 같이 출력하는 출력 보조물 서포트(Support)가 존재한다.

형상의 일부분이 허공에 떠있을 경우 지지대를 달지 않으면 출력할 시 재료가 제대로 적층되지 못하고 그대로 바닥으로 흘러내린다.

또한 다른 경우로는 적층되기 바로 전 레이어에서 급격한 각도로 연결이 되어 있는 경우에 지지대가 붙는다. 경사가 급격하게 꺾이는 부분이 있으면 이 부분에 지지대가 붙지 않으면 이 또한 플라스틱이 건디지 못하고 바닥으로 흘러내린다.

2.2. 실험 장비

본 연구의 테스트 장비는 FDM 방식 3D Printer 중

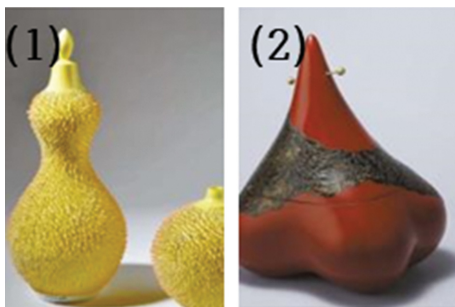


Fig. 1. (1) Yu Ju-cheol's works, (2) Yoon Sang-hee works.



Fig. 2. 3D printer used for research.

Table 1
3D printer specs for research

Specification	Contents
Product name	Ender-3
Output method	FDM
Filament diameter	1.75 mm
Output size	220 × 220 × 250 mm
Nozzle diameter	0.4 mm
Material	PLA, TPU, ABS

전 세계적으로 입문용으로 많이 판매된 Fig. 2인 Creality Ender-3로 테스트하였다. Creality Ender-3는 Table 1와 같은 사양을 가진 소형 장비이다.

Creality Ender-3는 판매가가 20만원도 되지 않지만 히팅베드가 가능하다. 1.75 mm의 PLA뿐 아니라 ABS 필라멘트도 사용이 가능하며, 고가의 장비와 비교해도 뒤지지 않을 정도의 품질로 출력이 가능하다. 활용 소프트웨어는 오픈 프로그램인 CURA 프로그램을 사용하여 슬라이싱, CAM과 제어, 클라이언트 옵션을 한 번에 설정 가능하다.

현재 가장 널리 쓰이는 3D 프린터의 재료는 플라스틱이다. FDM 방식의 보급용 프린터에서는 PLA(Poly Lactic Acid) 플라스틱과 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 플라스틱이 주로 사용되는데 PLA는 옥수수, 감자 전분을 원료로 만들어져 자연분해가 가능한 친환경적 소재이며 ABS에 비해 가격이 상대적으로 비싼 편이다 [5].

본 실험에 사용한 재료로는 Fig. 3을 사용하였으며 Table 2의 속성을 가진 손도리닷컴사의 PLA를 사용하였다. 같은 PLA 재료도 출력해보면 입자의 굵기와 성분에 따라 출력물의 결과가 달라진다. 수차례 출력해 본 결과 일정한 품질을 유지할 수 있어 이 재료를 선택하였다.



Fig. 3. PLA printing material for research.

Table 2
Chemical properties of PLA filament

Specification	Contents
Manufacturer	Sondori.com
Product name	Sondori filament pla+
Temperature	205°C~225°C
Bed temperature	60°C~80°C
Size	Filament 1.75 mm

2.3. 슬라이싱 소프트웨어 설정

3D 소프트웨어를 통해 모델링이 된 3D 모델을 STL 파일로 만들 수 있다. STL 파일로 3D 프린터를 바로 작동할 수가 없기 때문에 슬라이싱 소프트웨어를 통하여 3D 프린터가 바로 읽어 들일 수 있도록 G code로 변환한다.

FDM 방식의 3D 프린터는 G code를 이용하여 노즐의 이동 및 속도, 필라멘트의 시출량, 베드의 온도, 속도 등 출력에 필요한 옵션들을 제어할 수 있다.

슬라이싱 소프트웨어 중에는 키슬라이서(Kisslicer), 큐라(Cura), slic3r 등이 있으며 본 논문에서는 큐라(Cura)를 사용하였다.

슬라이싱 프로그램 중 품질의 영향을 주는 요인으로 크게 Layer height, 프린팅 속도(Print speed), 프린팅 온도(Printing temperature), 프린터 베드 온도(Bed temperature), 지지대(Support) 등이 있다. 모델링 데이터 각도에 따른 표면을 관찰하기 위하여 출력물에 영향을 미치는 주요요인은 CURA 프로그램을 이용하여 다음과 같이 셋팅하였다.

2.3.1. Print speed(mm/s)

출력속도가 느리고 infill density가 높을수록 표면 거칠기는 낮아지고, 출력속도가 빠르고 infill density가 낮을수록 표면 거칠기가 높아지는 것을 알 수 있다[4].

출력속도는 제품의 품질에 많은 영향을 미친다. 출력 속도를 높이면 출력의 품질이 떨어지고 또한 너무 낮추면 제작시간이 오래 걸린다. 출력 속도를 제어하며 출력물의 품질을 체크하여 적절한 속도를 셋팅하여야 한다.

출력 속도가 빠를수록 출력되는 시간은 단축되지만 속도가 빠를수록 출력된 출력물의 표면이 거칠어진다. 본 연구에서는 속도보단 품질을 높이기 위하여 60 mm/s로 설정하였다.

2.3.2. Nozzle size

노즐의 크기는 출력물의 표현할 수 있는 크기와 출력물 제작 속도와 크게 영향을 미친다. 노즐은 일반적으로 0.4, 0.6, 0.8 mm를 주로 사용하며, 노즐의 크기가 클수록 출력물의 품질은 떨어지지만 출력 속도는 빨라진다.

본 연구에서는 출력물의 품질과 제품표면을 동시에 관찰하기 위하여 0.4 mm 노즐을 사용하였다.

2.3.3. Printing temperature(°C)

프린터 노즐 온도를 설정하는 값으로 PLA의 경우 180~220°C 사이로 설정한다.

노즐온도에 따라 필라멘트의 유연성이 틀리며, 온도가 높을 경우 거미줄이나 표면이 흐려 내림을 관찰할 수 있다. 일반적으로 PLA는 200°C 내외로 설정하는데 본 연구에서는 15°C 내외의 조금 추운 날씨로 인하여 프린터 노즐 온도를 215°C로 설정하였다[6].

2.3.4. Bed temperature(°C)

노즐과 베드와의 거리는 일정하고 안착이 잘되기 위한 최적의 거리를 유지하여야한다. 고가의 FDM 장비는 센서를 이용하여 레벨링(베드와 안착거리를 맞추는 일)을 할 필요는 없지만 저가의 FDM 장비는 사용자가 수동으로 레벨링을 하여야 한다. 레벨링이 잘되어야 출력물이 베드에서 떨어지지 않고 원하는 형태의 출력물을 얻을 수 있다.

또한 베드의 온도는 출력물의 디테일을 잡을 수 있다. 적정한 베드온도는 PLA의 경우 60도 ABS는 110도 정도 알려져 있으나 주위의 환경과 재료의 특성 장비의 종류에 따라 사용자의 노하우가 필요하다. 베드온도가 너무 낮으면 출력물이 잘 떨어지고, 그렇다고 너무 높으면 디테일한 부분이 표현되지 않고 흐를 수 있다.

본 연구에서는 PLA 필라멘트를 사용하여 프린터 베드 온도를 설정하는 값을 60°C로 설정하였다.

2.3.5. Support 설정

출력물이 잘나올 수 있도록 닫는 부분을 보강하거나 부분적으로 공중에 있는 부분을 나올 수 있게 도와주는 것을 지지대 혹은 서포트라고 한다. FDM 장비는 아래부

분을 지지하여 윗부분을 형성함으로 아래에서 지지하지 못하면 윗부분이 형성되지 않는다. 모델링의 모양에 따라 적절한 서포트가 필요하다. 본 연구에서는 제품의 표면을 관찰하기 위하여 별도의 서포트가 필요하지 않게 모델링하였으며, 혹시 노즐에 필라멘트가 비어 있음에 나오지 않는 현상을 방지하기 위하여 서포트는 Skirt로 설정하였다.

2.4. 각도에 따른 표면 변화

지지대를 사용하면 지지대와 닫는 부분의 요철현상, 출력시간의 증가, 재료의 낭비의 문제점이 일어나고 원하는 결과물을 얻기가 힘들다. 이를 해소하기 위하여 형상은 바닥면으로부터 타고 올라가는 형태로 모델링 하였다.

Cura 슬라이서 프로그램의 기본 설정으로 출력물의 서포트를 60°로 설정하도록 되어 있다. 일반적으로 Fig. 4와 같은 “overhang” 데이터 출력을 통하여 서포트 오버행 결과를 얻을 수 있다. 3D 프린터를 사용하는 여러 유저들의 사용 리뷰에서 또한 비슷한 결과를 가지고 있다. 재료에 따라 미세하게 다르지만 Fig. 5와 같이 일반적으로 60° 이하에서는 출력물이 서포트없이 안정적으로 출력되고 그 이상부터 불안정적으로 출력되는 것을 볼 수 있다.

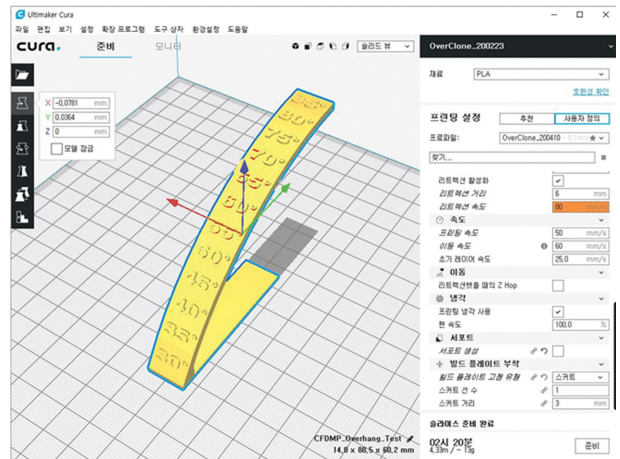


Fig. 4. “Overhang” data output.

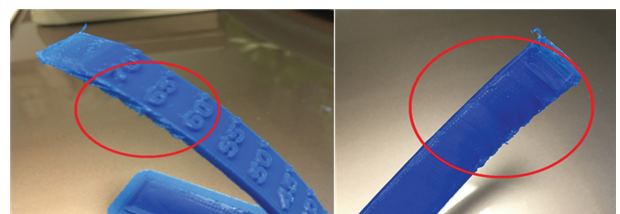


Fig. 5. “Overhang” 3D printing [7].



Fig. 6. Surface after removal of support [8].

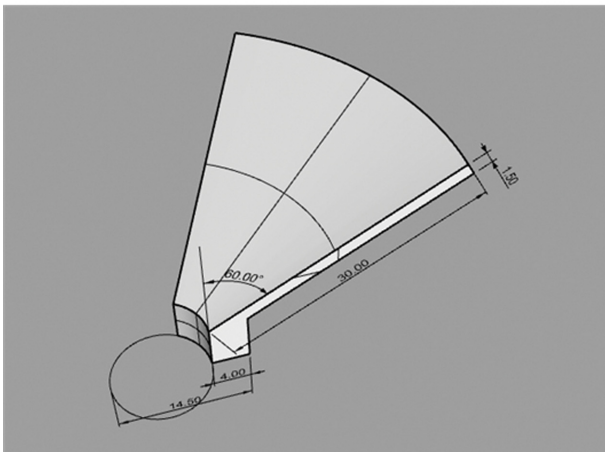
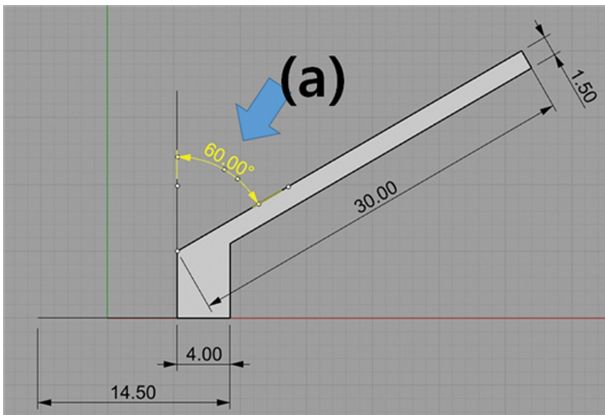


Fig. 7. Modeling for testing (a) variable angle.

모델링은 Rhino 3d 프로그램을 사용하였다. 베드면과 닿는 부분은 2.5 mm 내경과 10.5 mm 외경으로 하는 원기둥으로 하였으며 원기둥과 이루는 각도는 1도씩 6개를 1차 테스트하였다.

Figure 6와 같이 서포트가 생성되고 난 표면에 서포트의 모양으로 흔적이 남게 되어 표면의 품질이 하락된다 [8].

1차 테스트는 서포트가 필요하지 않는 Fig. 7과 같이



Fig. 8. Output of modeling turned 70 degrees (variable angle: 59°~70°).

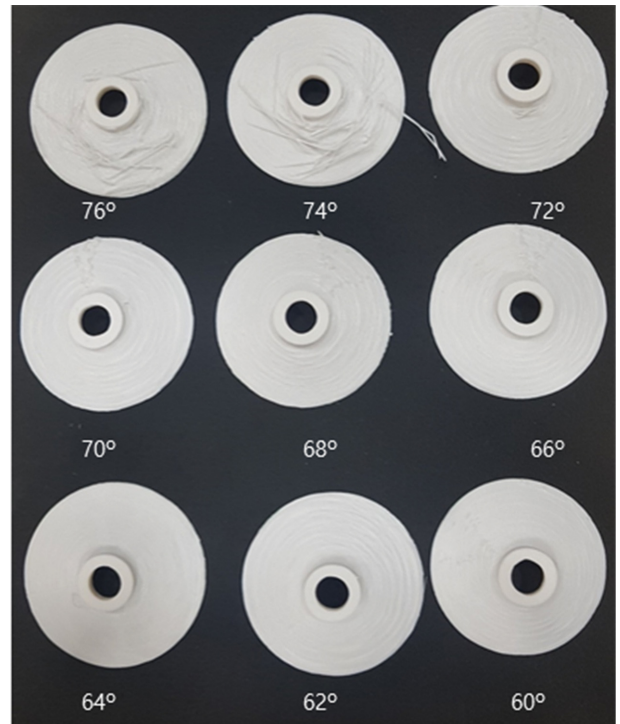


Fig. 9. Output of modeling rotated 360 degrees (variable angle: 60°~70°).

1.5T 30 mm 직사각형을 70° 돌린 모델링으로 진행하였다. 가변 각도는 59°~70°를 1°씩 간격으로 모델링하여 출력하였다.

출력한 결과 Fig. 8을 보면 가변 각도가 64°부터 조금씩 불규칙한 면이 발생하였으며 67°~70°에서 원하는 거칠기의 불규칙한 표면을 얻을 수 있었다.

2차 실험은 단면을 360° 돌린 접시형태로 한번에 한

개씩 출력하였다. 가변 각도는 $60^{\circ}\sim 76^{\circ}$ 를 2° 간격으로 9개를 출력하여 표면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

실험한 결과 대표적 사진인 Fig. 10을 보면 수직으로 부터 $62^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 각도에서 출력했을 때 필라멘트가 흘러 내리지 않고 일정 이상의 불규칙한 면을 얻을 수 있었다.

가변각도가 72° 이상 부터는 필라멘트가 조형되지 않고 흘러내리기 시작하였으며 62° 부터 불규칙한 면이 발생하였다.

이러한 결과치를 토대로 Rhino 3d 프로그램을 이용하여 Fig. 11과 같이 바닥면으로부터 타고 올라갈 수 있게 모델링하였으며 일정부분에 불규칙한 면을 얻을 수 있게 임의적으로 각도를 적용하였다.

이와 같은 방법으로 Fig. 12와 같이 불규칙한 면을 가

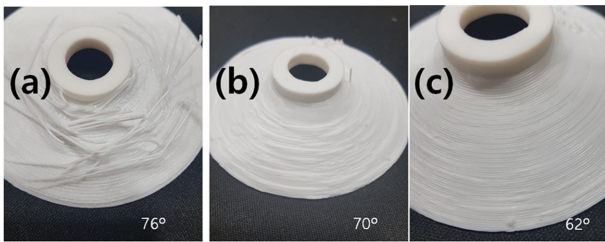


Fig. 10. Detail view of Fig. 9. (a) 76° , (b) 70° , (c) 62° .

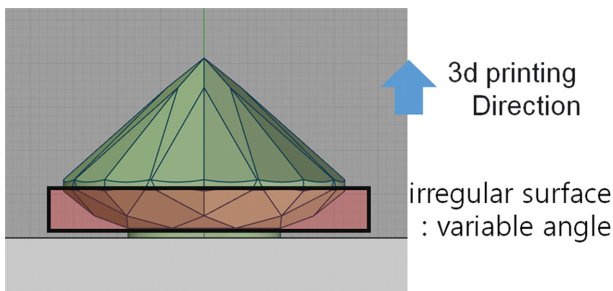


Fig. 11. 3D modellong for research.

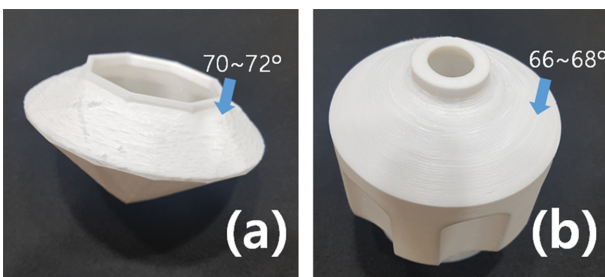


Fig. 12. Output of 3D printing. (a) jewel-shaped pots, (b) geometric-shape vase.

진 제품을 모델링하여 적용해 보았다. 왼쪽의 보석모양 화분은 $70^{\circ}\sim 72^{\circ}$, 오른쪽의 기하학 모양 꽃병은 $66^{\circ}\sim 68^{\circ}$ 의 가변 각도를 포함시켜 모델링을 진행하였다. 왼쪽의 보석모양 화분은 상당히 거친 표면을 얻을 수 있었으며, 오른쪽의 기하학 모양 꽃병은 조금 거친 표면을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

4.1. 한계점

3D 프린터의 활용은 완제품을 만들거나 일부만을 출력해 결합해 쓰는 등 다양하게 활용되고 있다.

본 연구를 통하여 일정각도에서 불규칙한 면을 통하여 특별한 결과물을 얻을 수 있었다. 이러한 불규칙한 면은 기존의 출력물에서 볼 수 없었던 우연적으로 만들어진 독특한 재미와 심미적 요소를 가질 수 있었다.

하지만 디자인함에 있어 다음과 같은 조건을 충족하여야 했다.

첫째, 서포트를 달지 않아도 출력이 가능하도록 바닥면에서 부터 타고 올라가는 형태이어야 한다.

둘째, $62^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 의 각을 포함하여 모델링 되어야 한다.

특히 특정한 각도에서만 불규칙한 면이 형성되기 때문에 원하는 위치에 표현하기엔 한계점이 많다.

4.2. 시사점

보급형 FDM 방식의 3D 프린터는 수공예보다 비교적 짧은 시간의 제작 시간과 저렴한 비용으로 제품화가 가능한 공예문화 상품을 제작할 수 있다. 소비자와의 1:1 맞춤형 제작에도 접근이 비교적 수월하고, 디자인의 수정이 실시간으로 이루어질 수 있다. 이러한 제작 방법은 다품종 소량생산이 주는 경제적인 매력이 있음을 확인할 수 있다[9].

본 연구에서는 제품의 일정부분을 인위적으로 각도를 제어하여 불규칙한 표면을 얻었다. 재료의 녹는점과 프린팅 원리를 효과적으로 이용한다면, 다양한 형태에서 특정 부분에 불규칙한 표면을 가진 결과물을 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 향후 연구가치가 충분하다 판단된다.

이러한 독특한 표면을 가진 제품은 분명 기존의 제품에서 보기 힘든 독특한 재미를 느낄 수 있는 중요 요소 중 하나가 될 수 있다고 판단된다.

본 실험을 통해 얻어진 불규칙한 표면을 공예적 제품에 부분적으로 활용한다면 가볍고, 저렴해 보이는 플라스틱제품에 조금이나마 부가가치를 높일 수 있을 것이라 기대한다.

References

- [1] C.H. Kim, "Practical 3D printing usage guide" (Bjpublic, Korea, 2012) p. 5.
- [2] E.H. Han, "Craft meets 3D printer" (Joongang-Ilbo, Korea, 2015) <https://www.joongang.co.kr/article/19266661#home>.
- [3] S.Y. Kim, "D printing, the opportunity for a new art ecosystem" (tech M, Korea, 2017), p. 34.
- [4] C.J. An, "A study on the efficient figure making using FDM-method 3D printer" (Pusan National Univ., Korea, 2019) p. 2.
- [5] G.D. Kim, "Comparison of mechanical properties and form accuracy in FDM 3D printing based on building conditions", J. Korean Soc. Manuf. Process. Eng. 20 (2021) 52.
- [6] D. Joo, "Study on production methods of person characters using the 3D printer" (Shilla Univ., Korea, 2015) p. 7.
- [7] D.H. You, "Optimal printing conditions of PLA printing material for 3D printer", Trans. Korean. Inst. Elect. Eng. 65 (2016) 826.
- [8] W.B. Oh, "A study on the optimum setting for quality improvement of 3D printer output" (Incheon Catholic Univ., Korea, 2021) p. 39.
- [9] G.D. Park, "A study on the cultural crafted product design development with using FDM type 3D printer", (Honam Univ., Korea, 2015) p. 7.