

투명조각자기의 고속 FDM 3D 프린팅을 위한 가변 압출 기법

장승호 · 홍정모[†]

동국대학교 컴퓨터공학과

An Adaptive Extrusion Control Technique for Faster FDM 3D Printing of Lithophanes

Seung-Ho Jang and Jeong-Mo Hong[†]

Department of Computer Science and Engineering, Dongguk University

Received 31 January 2017; received in revised form 7 March 2017; accepted 16 March 2017

ABSTRACT

This paper proposes how to solve a problem of FDM 3D printer's irregular output when changing volume of extrusion, adjusting movement speed of the printer's head and a way to fill new inner part. Existing slicers adjust directly to change the rotation speed of the stepper. In this method, the change of the extrusion area is delayed due to the gap between the stepper and the nozzle, so that precise control is difficult. We control the extrusion area adjusting the moving speed of the print head and making constantly the rotation speed of the stepper. Thus, the output time can be shortened by generating an efficient path having a short travel distance. For evaluation, we applied our method to lithophanes with detailed variation. Comparing existing methods, our method reduced output time at least 30%.

Key Words: Additive manufacturing, Additive slicing, Fused deposition modeling, Layer manufacturing, Lithophane

1. 서 론

Fused deposition modeling(FDM) 3D 프린터^[1]는 특허의 만료와 함께 개인용 3D 프린터로 많이 알려지게 되었다. 그러나 긴 출력 시간으로 인한 낮은 생산성이 3D 프린터의 대중화를 가로막고 있다. 기존의 논문들은 긴 출력 시간을 단축시키기 위해서 3D 프린터의 압출 면적을 조절하는 방법^[2], 속도를 제어하는 방법^[3], 내부를 최소한으로 채우는 방법^[4], 그리고 모델을 여러 조각으로 나누어

출력하는 방법^[5,6] 등을 제안하고 있다.

우리는 투명조각자기(lithophane)^[7]와 같이 상세한 표면 정밀도를 갖는 3차원 모델에 대해서 압출 면적을 정밀하게 조절하여 결과물의 품질을 손상시키지 않고 출력 시간을 단축시킬 수 있는 출력 경로 계획 기법을 제안한다. 투명조각자기는 판의 두께에 따라 투과하는 빛의 양이 달라지는 것을 이용한 1800년대 유럽에서 유행했던 예술품이다. 예전에 유행했던 이 예술품이 FDM 3D 프린터와 컴퓨터 그래픽 기술과 만나면서 일반인들도 손쉽게 만들 수 있게 되었다. 그리고 예술품으로의 상품 가치로 인해 많이 출력되고 있다. 투명조각자는 이미지를 정교하게 표현하기 위해 내부를 모

[†]Corresponding Author, jmhong@dongguk.edu
© 2017 Society for Computational Design and Engineering

두 채워 판의 두께로 빛의 양을 조절해야 한다. 그런데 기존의 방법들은 투명조각자기처럼 내부를 완전히 채워야 하는 경우 출력 시간이 오래 걸린다. 우리는 압출 면적을 조절하여 내부를 완전히 채우는 방법을 제안한다. 이 방법은 여러 번 이동해서 채워야 할 곳을 한 번의 이동으로 가능하게 만들어 출력 시간을 단축시킬 수 있다.

전통적 방식의 투명조각자기는 그 제작과정이 복잡하고 수작업이 많이 들어가기 때문에 고가의 예술품으로 거래되었다. 그 제작과정은 녹인 왁스를 유리에 굳히는 것으로 시작된다. 유리 위에 굳은 왁스를 장인들이 투명조각자기로 조각한다. 그러나 실수가 발생하면 그 위에 왁스를 다시 덮어 수정한다. 이 과정을 수없이 반복하여 하나의 투명조각자가 완성된다.

이제는 개인용 3D 프린터와 컴퓨터 그래픽스의 발전으로 일반인들도 쉽게 투명조각자기를 만들 수 있게 되었다. 사용자는 이미지와 기본 3D 모델만 선택하면 그 형태에 맞춰 투명조각자기를 만들 수 있다. Fig. 1은 사용자의 입력으로부터 투명조각자가 만들어지는 과정이다. Preprocessing 단계에서는 사용자로부터 투명조각자기로 출력할 이미지를 입력 받는다. 입력된 이미지는 흑백사진으로 변형한 뒤 그 값을 뒤집어 3D 모델의 높이 값으로 변환된다. Mapping 단계에서는 사용자로부터 기본적인 3D 모델의 모양을 입력 받는다. 입력된 3D 모델의 모양에 높이 값으로 변환된 이미지를 대응시켜 투명조각자기 3D 모델을 만든다.

Slicing 단계에서는 만들어진 투명조각자기 모델을 FDM 3D 프린터가 출력할 수 있도록 FDM 3D 프린터의 명령어인 G-code로 만든다. 이 과정에서 우리는 기존의 출력 경로 대신에 우리가 제안하는 출력 경로로 G-code를 만든다. 마지막 출력 단계에서 FDM 3D 프린터는 G-code를 읽어 들여 3D 모델을 출력한다. 그 결과 뒤에서 빛을 비추면 그림이 나타나는 투명조각자가 완성된다.

우리가 제안한 방법의 특징은 크게 세 가지이다. 첫 번째는 개인용 FDM 3D 프린터가 출력 도중 압출 면적을 정밀하게 조절할 수 있도록 만들어준다. 우리는 스텝 모터의 회전 속도 대신에 프린터 헤드의 이동 속도를 변화시켜 압출 면적을 정밀하게 조절한다. 두 번째는 압출 면적 조절에 따르는 효율적인 경로를 생성해준다. 우리는 단일한 압출 면적으로 여러 번 이동할 곳을 정밀한 제어를 통해 최소한의 이동으로 채운다. 마지막으로 우리는 기존의 방법 중 하나인 나선형을 응용하여 표면과의 충돌을 방지하여 출력 품질의 손상을 최소화한다.

우리는 프린터 헤드의 이동 속도를 이용하여 압출 면적을 조절하고 그에 따르는 출력 경로를 제안하기 위하여 본 논문과 관련된 기존의 연구들을 소개한다(2장). 기존의 내부를 채우는 방법을 응용한 출력 경로를 생성하는 방법에 프린터 헤드의 이동 속도와 압출 면적의 관계를 적용하는 방법을 제안한다(3장). 그리고 제안한 방법을 투명조각자기에 적용하여 실험 결과를 분석한다(4장). 마지막

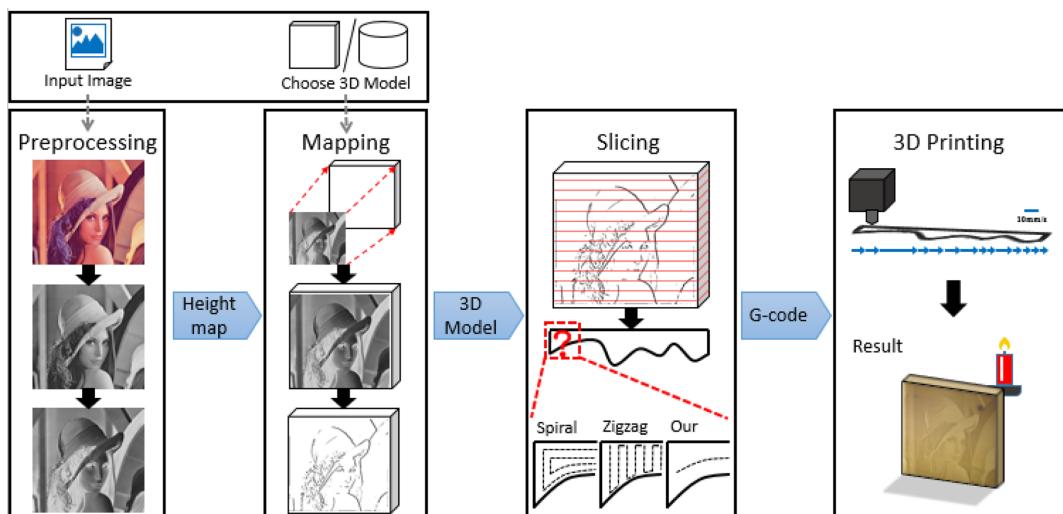


Fig. 1 Digitalized lithophane fabrication process

으로 본 연구의 결론으로 향후 연구와 함께 마무리하겠다(5장).

2. 관련 연구

2.1 Lithophane

Yuan^[10,11]은 Laser sintering 방식으로 투명조각자기를 출력하는데 최적화하는 연구를 했다. 우리는 Laser sintering 방식 대신 일반인들이 많이 사용하는 Fused deposition modeling(FDM) 방식으로 투명조각자기를 품질의 저하 없이 출력 시간을 단축시키는 연구를 했다.

투명조각자기를 FDM 방식으로 출력한 연구에는 Ahn^[12]과 Suwanprateeb^[13]가 있었다. 이들은 FDM으로 출력한 물체와 빛의 투과의 상관관계에 대한 연구를 했다. 투명조각자기는 빛의 투과율로 그림을 표현하기 때문에 이들의 연구는 투명조각자기의 품질 향상에 있어서 중요하다. 또한 FDM 3D 프린터로 투명조각자기를 출력할 때 중요한 것에는 느린 출력에 의한 낮은 생산성을 보완하는 것이다. 그래서 Bikas^[14]와 Mohan Pandey^[15]가 정리한 것처럼 기존 연구들도 품질을 최대한 유지시키면서 출력시간을 단축하는 방법들을 연구하고 있다. 그 방법 중에는 프린터 헤드의 이동 속도를 변화시켜 출력 시간을 단축하는 방법도 있다. Cura^[8]나 MakerBot^[9]와 같은 오픈소스 단면화 프로그램들은 제어가 정밀해야 하는 곳에서는 느리게 출력을 하다가 직선 구간처럼 변화가 적은 구간에서는 빠르게 출력하는 방법을 사용하고 있다. Jang^[5]는 바뀌는 각도에 따라 최적의 속도를 찾아 FDM 3D 프린터의 이동 속도를 조절하여 출력 시간을 단축시키는 동시에 출력 품질도 향상시켰다. 그러나 Bellini^[16]가 언급한 것처럼 속도의 변화에 따라 압출량 또한 달라지기 때문에 압출 면적을 원하는 대로 출력하기가 힘들다. 이러한 문제로 기존의 slicer들^[8,9]은 속도를 변경하는 것을 사용자들에게 고급 옵션으로 제공하고 있지만 사용을 추천하지는 않는다. 따라서 투명조각자기처럼 내부를 가득 채워야 하는 경우에는 출력 시간이 오래 걸린다.

우리는 기존의 방법을 개선하여 압출 면적을 보다 정밀하게 제어하는 방법과 이를 바탕으로 내부를 가득 채워야 하는 경우에 맞는 효율적인 경로를 생성하는 알고리즘을 제안한다. 기존에는 FDM 3D 프린터의 구조적 특성상 압출 면적을 정밀하-

게 제어하기가 어려웠다^[17]. 그래서 우리는 기존에 사용하던 방식인 스텝 모터의 회전속도로 압출 면적을 조절하는 대신에 프린터 헤드의 이동속도를 사용하여 압출 면적을 정밀하게 제어가 가능하도록 만들었다.

2.2 Adaptive slicing

우리는 FDM 3D 프린터에서 압출 면적을 정밀하게 조절하는 방법을 제안하고 그에 따르는 효율적인 경로를 생성하여 출력시간을 단축시키려 한다. 정밀한 압출 면적 제어는 여러 번 이동하여 채워야 할 곳을 한번의 이동으로 가능하게 만들어준다. 출력 경로를 최소화하여 시간을 단축시킬 수 있다. 이렇게 압출 면적을 조절하는 것을 적응적 단면화(Adaptive slicing)라고 한다^[15].

적응적 단면화는 한 모델을 상황에 따라 다양한 두께로 단면화하는 것이다. 다양한 두께로 단면화를 할 경우 계단 현상을 최소화하여 출력 품질을 향상시키면서도 출력 시간을 단축시킬 수 있다. Dolenc^[18]는 곡면에서 발생하는 계단현상의 상태를 측정하기 위한 Cusp Height를 제안했다. Cusp Height는 출력하고 싶은 표면의 위치와 실제로 출력된 위치 사이의 발생하는 오차를 측정하기 위한 도구이다. Sabourin^[19]는 Cusp Height를 이용하여 전체 곡면의 오차를 최소화 할 수 있는 단일한 압출 면적을 찾아 출력하는 방법을 제안했다. Tyberg^[20-22]는 여러 부분으로 나누어진 모델의 각 부분에서 Curvature를 계산하다. 그리고 그 부분마다 알맞은 압출 면적으로 변화시키는 방법들을 제안했다. 그 결과 기존에는 수평으로 나누어 압출 면적을 조절했지만 수직으로 여러 부분을 나누어 출력 모델을 보다 세밀하게 구분하여 압출 면적을 조절할 수 있게 되었다. Sabourin^[23]는 외부는 정밀하게 출력하기 위해서 단면화의 두께를 얇게 만드는 반면에 내부는 출력 시간을 단축시키기 위해서 단면화의 두께를 두껍게 하는 방법을 제안했다. Mani^[24]는 지역적으로 세밀하게 구분하여 적응적 단면화를 적용시켜 출력 시간을 단축시키면서도 Cusp Height의 오차를 최소화 시켰다. Park^[2]은 상하 레이어의 폴리라인을 병합하였다. 레이어 폴리라인들의 총 길이를 줄여 출력 시간을 단축시켰다.

적응적 단면화는 압출 면적으로 출력 높이를 조절하여 출력 시간을 단축시키고 출력 품질 또한

좋게 만든다. 우리는 적응적 단면화의 일부분을 가져와 높이는 일정하게 유지하는 대신 내부의 두께에 따라 압출 면적을 변화하는 방법으로 출력시간을 단축시킨다.

3. 투명조각자기의 고속 제조 방법

3.1 내부를 채우는 경로(Infill) 생성 방법

기존에 내부를 채우는 방법은 Fig. 2(a) 나선형, (b) 지그재그형, (c) 혼합형이 있다. 나선형은 테두리와 평행한 형태로 일정한 두께를 줄여나가면서 내부를 채우는 방법이다. 지그재그형은 양쪽 테두리를 연결하듯 내부를 채우는 방법이다. 그리고 혼합형은 나선형과 지그재그형을 결합한 방법으로 두 방법의 장점과 단점을 보완한다.

나선형을 생성하는 방법에는 테두리에 일정한 간격으로 줄여나가면서 경로를 생성하는 방법과 Medial Axis Transform(MAT)^[25]에 기반한 방법이 있다. MAT는 테두리 안에 생성할 수 있는 모든 원들을 생성한 후 그 중심점을 연결하여 경로를 생성하는 방법이다^[26,27]. 그 결과 나선형은 테두리와 평행한 형태로 경로를 생성한다. 이러한 특징으로 인해 나선형은 표면이 매끄럽게 출력된다는 장점을 갖는다. 단점은 모델의 모양에 따라 빈 공간들이 많이 발생한다는 점이다. 지그재그형은 모델에 Convex Hull 알고리즘^[20]과 Rectangular Hull 알고리즘^[29]을 적용하여 사각형을 만든 다음 가로나 세로 한 방향으로 이동하도록 경로를 생성한다. 지그재그형은 모델의 모양과 상관없이 빈 공간을 최소화할 수 있다는 장점을 갖는다. 단점은 외곽과의 충돌로 인해 표면이 거칠다는 것이다. 혼합형은 테두리로부터 일정 부분은 나선형으로 채우고 그 내부를 지그재그형으로 채우는 방법이다. 혼합형은 나선형을 통해 표면을 매끄럽게 출

력할 수 있으며 지그재그형을 가지고 내부의 빈 공간을 최소화 할 수 있다. 하지만 혼합형은 나선형과 지그재그형을 동시에 사용해야 하기 때문에 내부가 좁을 경우 사용하기 어렵다.

우리는 압출 면적을 조절하는 방법을 사용하여 내부를 채우기 때문에 Fig. 2(d)처럼 두 외곽 사이의 중간을 지나가는 경로를 생성한다. 이 방법은 압출 면적을 조절하여 내부를 완전히 채우면서도 테두리와 거의 평행한 상태를 유지한다. 따라서 우리의 방법은 지그재그형처럼 내부를 완전히 채우면서도 나선형처럼 표면을 매끄럽게 출력한다. 또한 생성된 출력 경로의 이동 거리가 단축되어 출력 시간을 줄일 수 있다.

3.2 프린터 헤드의 이동 속도와 압출 면적 관계

우리의 내부를 채우는 경로 생성 방법은 압출 면적의 정밀한 조절이 필요하다. 기존에는 스텝 모터의 회전 속도로 압출 면적을 조절했다. 기존 방법은 압출 면적을 변경하는 과정이 복잡하여 정밀하게 조절하기 어려웠다. 이 문제를 우리는 프린터 헤드의 이동 속도를 가지고 압출 면적을 조절하여 해결한다.

압출 면적은 FDM 3D 프린터의 명령어인 G-code의 변수 E에 의해서 조절된다. G-code의 변수 E를 가지고 압출 면적을 변경하는 과정은 다음과 같다. FDM 3D 프린터는 G-code의 변수 E의 값을 읽어 변경될 스텝 모터의 회전 속도를 결정한다. 스텝 모터는 결정된 속도대로 회전시켜 필라멘트를 이동시킨다. 필라멘트는 가열 액화기로 이동되어 점성을 가진 액체로 녹는다. 그리고 녹은 필라멘트가 Nozzle에 일정량이상 쌓이게 되면 그 압력에 의해 압출된다. 이러한 복잡한 과정 때문에 기존의 방법으로는 정밀한 제어가 어려웠다.

특히, 스텝 모터가 변경된 회전 속도로 필라멘

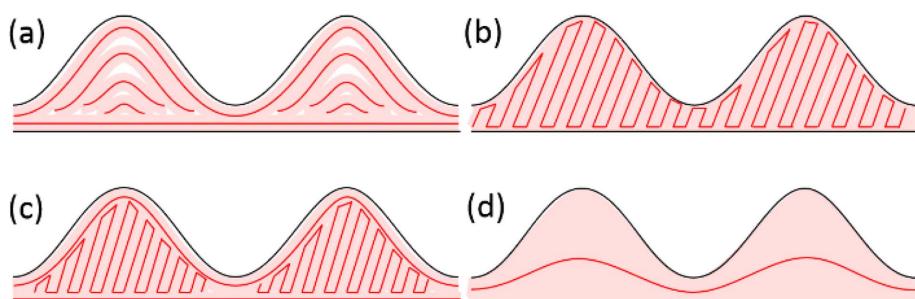


Fig. 2 (a) Spiral infill (b) Zigzag infill (c) Spiral infill and Zigzag infill (d) Our method infill

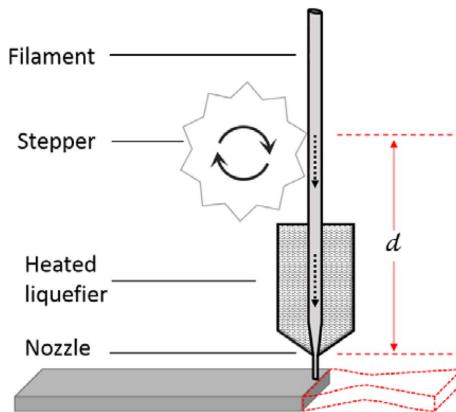


Fig. 3 The deviation, d , between the stepper and the nozzle extruder delays the extrusion amount to respond the change in stepper speed

트를 Nozzle로 이동시키는 동안 압출 면적을 제어하는데 시간이 걸린다. Fig. 3은 스텝 모터와 Nozzle 사이의 간격으로 인해 압출 면적의 변화가 실제 출력에 반영되는 시점이 늦어지는 것을 나타낸 그림이다. 앞에서 언급한 것처럼 압출 면적이 변화되길 원하는 순간 G-code의 변수 E의 값에 의해 스텝 모터의 회전 속도가 제어된다. 필라멘트는 스텝 모터의 회전 속도에 맞춰 Nozzle까지 이동된다. 압출 면적의 변화는 스텝 모터의 변화된 회전 속도에 의해 필라멘트가 Nozzle까지 이동한 뒤에 반영된다. 필라멘트가 이동하는 동안 스텝 모터의 회전 속도도 전파가 되는데 스텝 모터와 Nozzle 사이의 간격이 멀수록 반영되는 시간이 오래 걸린다. 따라서 압출 면적을 정밀하게 제어하기 위해서는 스텝 모터와 Nozzle 사이의 간격 d 의 영향을 최소화하는 것이 중요하다.

우리는 스텝 모터의 회전 속도를 항상 일정하게 만들어 스텝 모터와 Nozzle 사이의 간격 d 에 영향을 받지 않게 만든다. 대신에 우리는 프린터 헤드의 이동 속도 v_{print} 로 압출 면적을 조절한다. 스텝 모터의 회전 속도가 항상 일정하다는 것은 필라멘트의 압출량 q 이 항상 일정하다는 것이다. 압출량이 일정하면 프린터 헤드의 이동 속도에 따라 압출 면적 A 를 제어할 수 있다. 프린터 헤드의 이동 속도로 압출 면적을 제어하면 스텝 모터의 회전 속도가 일정하기 때문에 Fig. 3의 문제에 영향을 받지 않고 압출 면적을 조절할 수 있다.

Bellini^[16]와 Agarwala^[30]에 따르면 압출 면적 A 은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$A = WH = \frac{q}{v_{print}} \quad (1)$$

압출 면적 A 은 압출된 필라멘트의 너비 W 와 높이 H 를 곱한 것이다. 압출량 q 은 Nozzle에서 압출된 필라멘트의 양을 의미한다. 압출 면적은 Nozzle에서 압출된 압출량과는 비례하고 프린터 헤드의 이동 속도 v_{print} 에는 반비례한다. 압출 면적의 관계에 따라 압출량을 일정하게 만들면 프린터 헤드의 이동 속도를 가지고 압출 면적을 조절할 수 있다.

우리는 압출 면적의 관계(식 1)에 따라 압출량만 일정하게 만들면 프린터 헤드의 이동 속도로 압출 면적을 정밀하게 조절할 수 있다. 압출 면적은 높이와 너비의 곱으로 이루어져 있는데 일정한 높이로 고정시키고 프린터 헤드를 이동시키면 프린터 헤드의 이동 속도에 따라 압출 면적의 너비를 조절할 수 있다.

3.3 이동 속도를 이용한 두께 조절 방법

프린터 헤드의 이동 속도를 이용한 두께 조절 방법은 압출량을 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 그러나 프린터 헤드의 이동 속도를 변화시키면 G-code의 변수 E 때문에 압출량도 같이 변하게 된다. 따라서 우리는 G-code의 변수 E를 역으로 계산하여 프린터 헤드의 이동 속도 변화에도 일정한 압출량을 유지시키는 방법을 제안한다.

프린터 헤드의 이동 속도와 상관없이 일정한 압출량을 구하기 위해서는 압출 면적에 변화된 프린터 헤드의 이동 속도로 나누어주면 된다. G-code의 변수 E는 프린터 헤드의 이동 속도와 상관없이 항상 일정한 압출 면적을 출력하도록 프로그램되어 있다. 프린터 헤드의 이동 속도를 변화시키는 명령어가 주어지면 FDM 3D 프린터는 변화될 압출 면적의 크기만큼 압출량을 변화시켜 압출 면적을 유지시킨다. FDM 3D 프린터는 변화될 압출량을 처음 압출량에 프린터 헤드의 이동 속도의 변화율을 곱해서 구한다(식 1). 따라서 우리는 변화될 압출량에 프린터 헤드의 이동 속도의 변화율을 나누어 압출량을 일정하게 출력할 수 있도록 만든다.

우리는 프린터 헤드의 이동 속도로 압출 면적을 변경하기 위해서 G-code의 E 값을 역으로 계산한다. G-code의 E 값은 압출 면적 A 에 이동 거리 l 를 곱한 것이다. 식 (1)의 압출 면적은 변하는 압출량을 곱한 것으로 일정한 압출 면적을 만들기

위해 프린터 헤드의 이동 속도의 변화율로 나누어 준다(식 2).

$$e = E \times \frac{v}{v_0} = A \times l \times \frac{v}{v_0} \quad (2)$$

이렇게 계산된 결과 e 를 G-code의 변수 E 값에 넣어주면 프린터 헤드의 이동 속도로 압출 면적을 조절할 수 있다. 압출 면적은 높이와 너비의 곱으로 항상 같은 높이로 고정하여 압출량을 조절하면 우리는 e 와 프린터 헤드의 이동 속도로 두께를 정밀하게 조절할 수 있다.

Algorithm 1은 투명조각자기의 G-code에 우리의 방법을 적용하는 것이다. 알고리즘은 사용자가 투명조각자기로 출력하기를 원하는 사진을 입력 받아 시작한다. 입력된 사진은 색을 반전시켜 그 크기에 따라 0~1의 높이 값으로 저장한다. 다음은 변경된 사진을 바탕으로 투명조각자기의 출력 경로를 생성한다. 바깥 면은 사진이 표현되는 곳으로 바깥 면의 기본 모델의 좌표에 사진의 높이 값을 더해 G-code의 좌표를 생성해 준다. 이동 속도는 FDM 3D 프린터에 맞게 표면의 품질 저하를 최소화하기 위한 최적의 속도로 설정된다. 안쪽 면은 기본 모델의 좌표 그대로 G-code를 생성한다. 내부는 바깥 면과 안쪽 면의 좌표의 중간을 G-code의 좌표로 설정한다. 그 다음 바깥 면과 안쪽 면의 두께에 따라 변경할 속도를 구한다. 그리고 그 속도에 맞춰 G-code의 변수 E 를 구해서 설정해 준다.

Fig. 4는 Algorithm 1을 Sine파 모형에 적용하여 실험한 결과이다. (위)는 단일한 압출 면적으로 내

부를 채웠을 때이고 (아래)는 우리가 제안하는 방법으로 압출 면적을 조절하여 내부를 채운 것이다. 두 경우 모두 내부를 한번만 이동하고 있는데 (위)의 단일한 압출 면적으로 내부를 채운 경우에는 두께에 따라 빈 공간이 발생한 반면에 (아래)의 우리가 제안한 방법은 빈 공간 없이 내부를 모두 채운 것을 확인할 수 있다.

Algorithm 1 Generate lithophane's G-code

Input: Digital image

Output: Lithophane's G-code

- Convert digital image to printable value
- Compute the thickness
- Generate G-code

```

for i = 0 to print_line_number Do
  if i == outer_line then
    for x = 0 to image.res_x Do
      outer_y = init_y + image_to_height(x, y)
      gcode_create(x, outer_y, e_per_mm)
  else if i == inner_line then
    for x = 0 to image.res_x Do
      inner_y = init_y
      gcode_create(x, inner_y, e_per_mm)
  else
    mid_y = ( outer_y + inner_y ) / 2
    width = | outer_line - inner_line |
    change_speed = 1.0 / width * original_speed
    e_per_mm *= original_speed / change_speed
    gcode_create(x, mid_y, e_per_mm)
  layer_number += 1

```

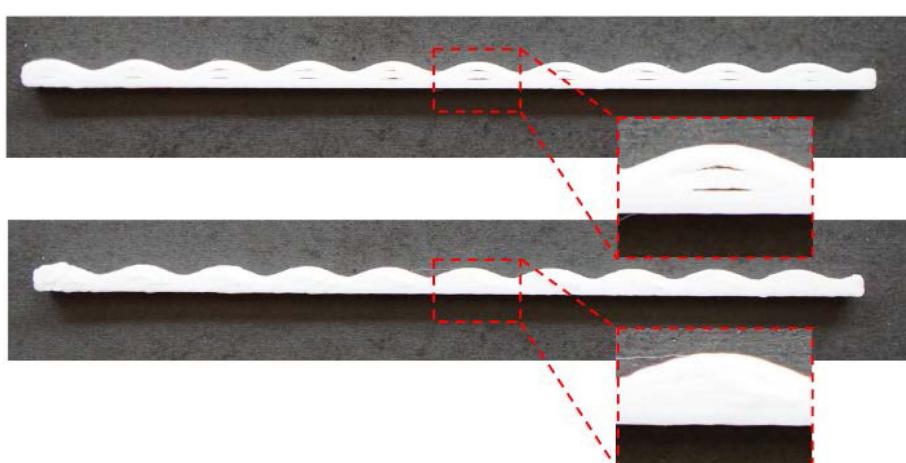


Fig. 4 (top) The result of infill with uniform extrusion (bottom) The result of infill with our method

4. 실험 결과 및 분석

우리는 Fig. 1의 과정을 통해서 투명조각자기를 FDM 3D 프린터가 출력할 수 있도록 만들었다. 이 과정 중에서 Algorithm 1의 압출 면적을 조절하여 경로를 생성하는 방법을 적용하였다. 그리고 기존의 방법은 오픈 소스 프로그램인 Cura 15.04를 이용하여 Fig. 3(a) 나선형, (b) 지그재그형, (c) 혼합형으로 각각 단면화를 시켰다.

완성된 모델의 크기는 평판(Planar)의 경우 Woman은 $100.0 \text{ mm} * 2.4 \text{ mm} * 93.7 \text{ mm}$, Marilyn Audre Hepburn은 $100.0 \text{ mm} * 2.4 \text{ mm} * 99.5 \text{ mm}$ 고 Monroe는 $100.0 \text{ mm} * 2.4 \text{ mm} * 99.8 \text{ mm}$ (가로 * 세로 * 높이)로 만들었다. 원통형(Cylinder)의 경우에는 Marilyn + Audrey, Sky, Alpaca 모두 $54.8 \text{ mm} * 54.8 \text{ mm} * 60.5 \text{ mm}$ 로 통일해서 만들었다. 프린터 헤드의 이동 속도는 우리가 제안한 방법과 기존의 방법 모두 40 mm/s 를 기본값으로 설정했다. 내부를 채우는 부분에서 우리가 제안한 방법에는 압출 면적에 따라 프린터 헤드의 이동

속도를 변화시켰고 기존의 방법들은 100 mm/s 로 설정했다. 그리고 3차원 모델을 출력할 FDM 3D 프린터로는 Almond(오픈크리에이터즈)를 사용했다. Fig. 5는 투명조각자기를 실제로 출력한 결과물이다. 빨간색 안의 사진들은 빛을 비추기 전의 투명조각자기의 모습이고 큰 사진들은 초록색 안의 사진처럼 빛을 설정한 후의 모습이다.

우리는 프린터 헤드의 이동 속도로 압출 면적을 제어하는 방법과 기존의 나선형, 지그재그형, 혼합형으로 출력한 결과물을 비교하는 실험을 했다. Table 1은 출력 실험한 결과로 각각의 모델이 완성되는데 걸린 시간이다. 그 결과 모든 모델에서 우리가 제안한 방법이 가장 빨리 출력되었고 그 다음으로 나선형, 혼합형, 지그재그형 순으로 출력되었다. 기존의 방법과 출력 시간을 비교해보면 우리가 제안한 방법이 평균적으로 나선형에 비해서는 33%, 혼합형은 39%, 지그재그형은 42%의 출력 시간을 단축시켰다.

모든 모델에서 우리가 제안한 방법이 기존의 방법들에 비해서 가장 빨랐다. 그 다음으로 나선형,

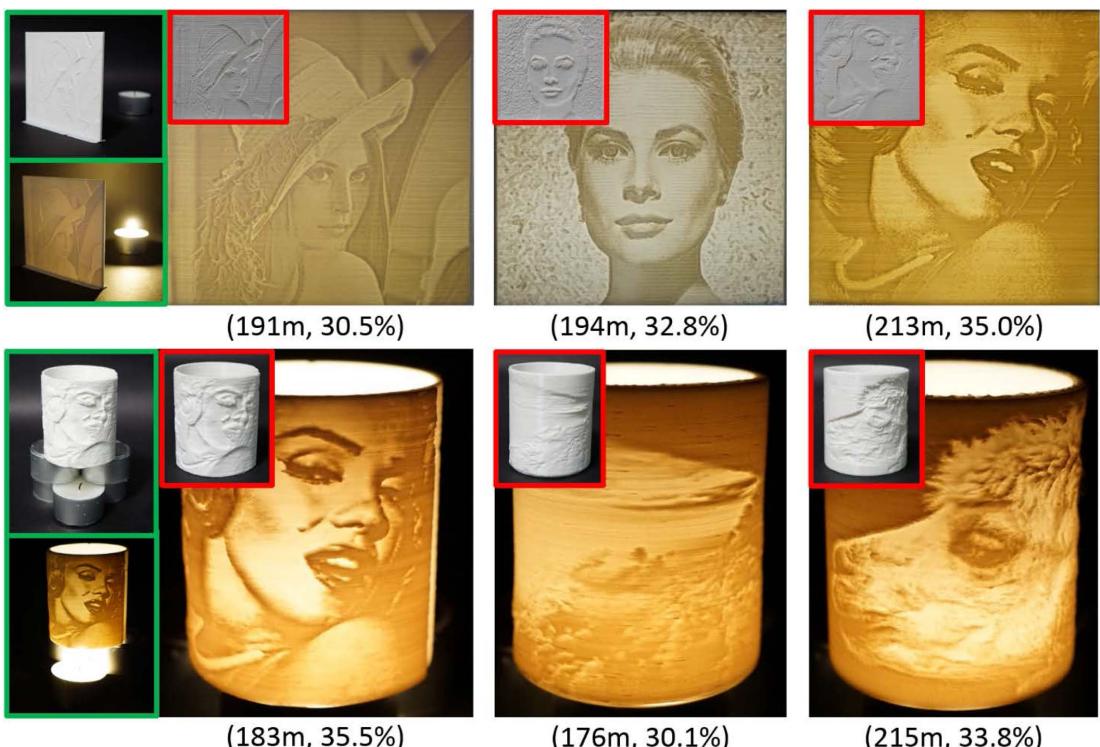


Fig. 5 Photos of the printed lithophane using our method. Photos inside the green box indicate the condition of taking pictures. Photos inside the red box are taken without light. Numbers in brackets below each photo denote its printing time (in minutes) and its ratio of time saving according to the spiral infill

Table 1 Comparison of printing time under the same model of different methods

Model	Printing time (minute)			
	Our Method	Spiral	Spiral + Zigzag	Zigzag
Woman (Planar)	191	275	326	357
Audrey Hepburn (Planar)	194	289	308	305
Marilyn Monroe (Planar)	213	328	358	393
Marilyn+Audrey (Cylinder)	183	284	325	341
Sky (Cylinder)	176	252	268	287
Alpaca (Cylinder)	215	325	358	378

혼합형 그리고 지그재그형의 순으로 출력되었다. 우리의 방법이 가장 빨랐던 이유는 기존의 방법들에 비해 출력 경로를 최소화 시켰기 때문이다. 기존 방법들은 단일한 압출 면적으로 내부를 완전히

채우기 때문에 최소한 3번 이상을 이동했다. 우리는 내부의 두께에 따라 압출 면적을 조절하여 단 한번의 이동으로 빈 공간 없이 내부를 채울 수 있었다. 우리가 제안한 방법은 내부의 두께에 따라

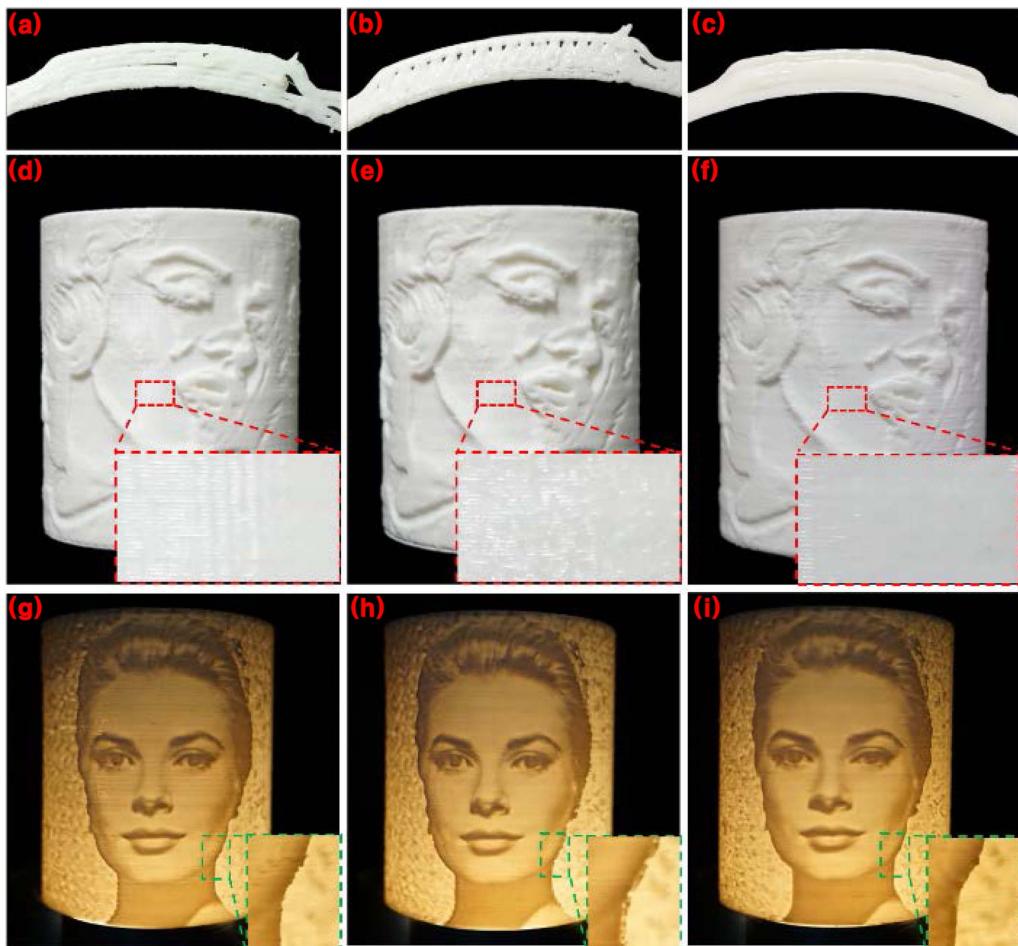


Fig. 6 (a) Section of spiral infill (b) Section of zigzag infill (c) Section of our method infill (d)~(f) The front side of the printing result of spiral, zigzag and our infill without light (g)~(i) The rear side of the printing result of spiral, zigzag and our infill with light

프린터 헤드의 이동 속도가 달라지기 때문에 내부의 두께가 두꺼운 부분이 많을수록 이동 속도가 느린 구간이 많아져 출력 시간이 증가하게 된다. 그 결과 우리는 이동 거리를 절반 이상 줄여 출력 시간을 50% 이상 단축시킬 것이라 예상했지만 내부의 두께에 따라 이동 속도가 변하게 되어 출력 시간이 예상보다 길어졌다. 그래도 우리의 방법이 기존의 방법들에 비해서 최소 30% 이상의 출력 시간을 단축시켰으며 최대 46%까지 단축시켰다.

우리는 각각의 방법들의 출력 품질을 비교하기 위해서 내부가 채워진 정도, 표면의 상태, 그리고 최종적으로 빛을 비춘 모습을 비교하였다. Fig. 6은 원통형 투명조각자기의 앞면과 뒷면에 각각 Marilyn Monroe와 Audrey Hepburn의 이미지를 넣어 만든 결과물이다. 투명조각자기에서 빛 투과의 핵심인 내부가 채워지는 정도는 Fig. 6의 (a), (b), (c)와 같이 각각의 방법으로 출력한 결과물의 단면을 비교했다. (a)는 나선형, (b)는 지그재그형, 그리고 (c)는 우리가 제안하는 방법으로 출력했을 때의 내부의 단면이다. (a)는 중간마다 불규칙적으로 빈 공간이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. (b)는 외벽 근처에 빈 공간들이 발생하였지만 일정한 규칙을 가지고 채워진 것을 확인할 수 있었다. (c)는 우리가 제안한 방법으로 단 한번의 이동으로 빈 공간 없이 내부를 모두 채운 것을 확인할 수 있었다.

투명조각자기의 출력 품질을 비교하기 위해서 Fig. 6의 (d), (e), (f)처럼 출력한 결과물의 표면의 거칠기를 비교했다. (d), (e), (f)는 원통형 투명조각자기의 앞면으로 나선형, 지그재그형, 우리가 제

안한 방법으로 Marilyn Monroe를 출력한 결과물이다. (d)와 (f)는 확대된 사진에 보이듯이 매끄럽게 출력되었다. 그러나 (e)의 확대 사진을 보면 표면이 미세하게 오돌토돌한 것을 확인할 수 있었다. 앞서 내부를 채우는 방법에 따르는 각각의 장단점을 언급했는데 우리가 제안한 방법과 나선형의 출력 경로가 표면과 평행하기 때문에 표면과 충돌을 줄일 수 있어 매끄럽게 출력된다. 그러나 지그재그형의 출력 경로는 (b)의 단면에 보이듯 두 외곽을 바느질하는 것처럼 생성된다. 그 결과 지그재그형은 표면과의 잦은 충돌로 인해서 표면이 거칠어진다.

Fig. 6의 (g), (h), (i)는 투명조각자기의 빛을 비춘 후 출력 품질을 비교한 결과이다. (g) 나선형, (h) 지그재그형, (i) 우리가 제안한 방법은 원통형 투명조각자기의 뒷면으로 Audrey Hepburn을 출력한 부분에 빛을 비춘 결과이다. (g), (h), (i)는 (a), (b), (c)에 보이는 것처럼 내부를 채우는 방식과 채운 정도가 다르기 때문에 빛을 비춘 결과도 서로 달랐다. Fig. 6의 (g), (h), (i)를 비교해 보면 (i) 우리가 제안한 방법이 가장 안정적으로 출력된 것을 확인할 수 있었다. (g) 나선형은 다른 방법들에 비해 가로 줄무늬가 많이 발생되었고 (h) 지그재그형은 얇은 부분에서 두꺼운 부분으로 넘어가는 경계부분에서 가장 불안정한 모습을 보였다. 확대된 사진을 보면 (i) 우리의 방법이 경계선에서 가장 깔끔하게 출력된 것을 확인할 수 있었다.

투명조각자기의 조명으로서의 품질을 비교하기 위해 원본 사진과 Fig. 6의 (g), (h), (i)의 사진을

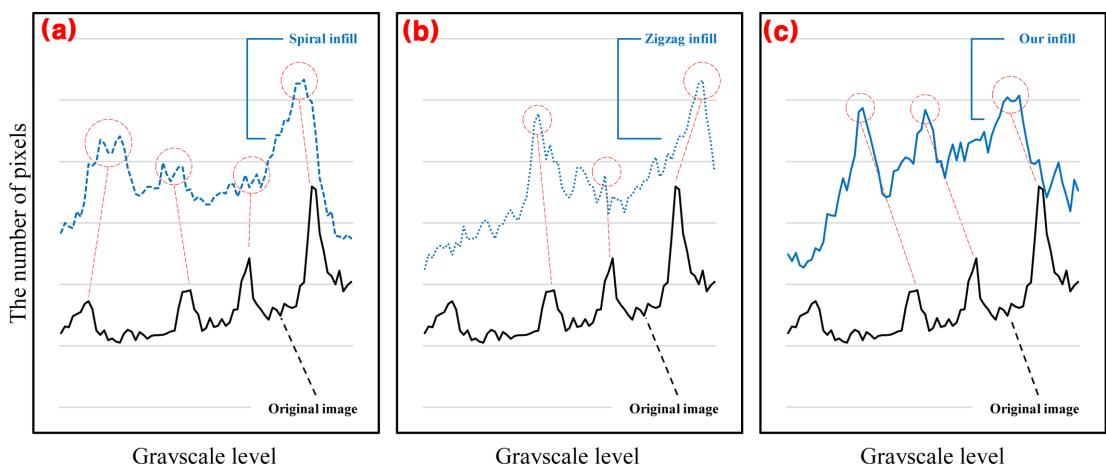


Fig. 7 Compare the histogram of the original image with the histogram of the printing result of (a)spiral infill, (b)zigzag infill and (c)our infill



Fig. 8 Some of our manufactured lithophanes in a natural setting

Fig. 7에서 히스토그램으로 만들어 비교하였다. Fig. 6의 (g), (h), (i)는 조명을 비춘 결과로서 노란 빛을 띠기 때문에 흑백 사진인 원본 사진과의 직접적인 비교가 어렵다. 따라서 히스토그램의 전체 밝기 단계(0~255) 중 중간 부분(110~183)에 해당하는 그래프의 특징 점들과 그의 추세를 원본 사진과 비교하였다. Fig. 7 원본 사진의 히스토그램을 보면 특징 점들이 오른쪽으로 상승하고 있다. Fig. 7의 (a) 나선형과 (b) 지그재그형은 중간에 특징 점들이 낮아졌다가 급격히 상승하는 모습을 보인다. 이는 (a), (b) 모두 빈 공간들로 인해서 예상한 결과보다 빛이 많이 투과된 것을 의미한다. 특히 (a)는 특징 점의 봉우리에서 v자 형태를 띠는데 줄무늬 때문에 색의 연결이 부드럽지 못한 것을 의미한다. 반면에 (c) 우리가 제안한 방법은 내부를 모두 채우기 때문에 원본 사진과 특징 점들의 추세가 가장 비슷했다. 특히 원본 사진과 우리의 방법의 특징 점들의 봉우리 모양이 비슷하고 그들을 연결한 기울기를 통해 간격도 비슷함을 알 수 있다. 따라서 우리가 제안한 방법이 기존의 방법들보다 원본 사진에 가장 유사함을 알 수 있다.

실험 결과 우리가 제안한 방법이 투명조각자기의 품질의 손상 없이 출력 시간을 최소 30% 이상 단축시키는 것을 확인하였다. 그리고 출력 품질에서는 나선형과 같이 표면이 매끄러우면서 빈 공간이 없이 내부를 채워 빛을 세밀하게 조절하여 제일 원본 사진과 유사한 결과를 얻었다.

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 압출 면적을 프린터의 헤드의 이동 속도로 조절하여 출력 경로를 생성하였다. 우리는 여러가지 경로를 적용한 투명조각자기 모델

들을 출력하여 비교해 보았다. 비교 결과 기존의 방법들은 세밀한 표면 정밀도를 갖는 부분에서 빈 공간을 발생시키는 것과 달리 우리의 방법은 내부를 완전히 채우는 것을 확인하였다. 이동 경로에서는 우리의 방법이 기존의 단일한 압출 면적으로 내부를 채웠을 때 보다 출력 시간을 최소 30% 이상 단축 시킬 수 있었다. 단축된 시간만큼 출력 품질이 저하되는 기존의 기술들과 달리 출력 시간이 크게 단축되었음에도 출력 품질에 저하되지 않음을 확인하였다. 한계점은 출력 경로가 한번의 이동만으로 내부를 모두 채우는 방법만 있어 투명조각자기와 같이 얇은 두께를 갖는 물체들에만 적용이 가능하다는 것이다.

앞으로는 압출량 조절방법을 이용한 내부 채우는 방법을 모든 물체에 적용할 수 있도록 다양한 경로에 대한 연구가 필요하다. 그리고 우리의 방법은 내부를 완전히 채우므로 투과되는 빛의 양을 예측하기 쉽다. 이를 빛 시뮬레이션과 결합하여 예측한 결과에 가장 가깝게 만드는 연구를 하겠다.

향후에는 압출량 조절 방법의 특징을 살려 건축물이나 사람의 뼈와 같이 밀도가 높은 출력물을 빠르게 출력해야 하는 응용분야에 적용해 나아갈 예정이다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2013년도 콘텐츠산업기술지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

References

1. Crump, S. Scott., Apparatus and Method for Creating Three-dimensional Objects, Stratasys, Inc., U.S. Patent No. 5,121,329.
2. Park, J.Y., Kang, J.H., Lee, H.-I. and Shin, H.S., 2016, Adaptive Slicing by Merging Vertical Layer Polyline for Reducing 3D Printing Time, *Journal of the Korea Computer Graphics Society*, 22(5), pp.17-26.
3. Jang, S.-H., Lim, J.-G., Kim, B.-J. and Hong, J.-M., 2015, Adaptive Speed Slicing, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, pp.203-210.
4. Musalski, P., Auzinger, T., Birsak, M., Wimmer, M. and Kobbel, L., 2015, Reduced-order Shape Optimization Using Offset Surfaces, *ACM Trans.*

- Graph.*, 34(4), pp.102.
5. Song, P., Deng, B., Wang, Z., Dong, Z., Li, W., Fu, C.W. and Liu, L., 2016, CofiFab: Coarse-to-fine Fabrication of Large 3D Objects, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 35(4), pp.45.
 6. Wang, W.M., Zanni, C. and Kobbelt, L., 2016, Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction, *In Computer Graphics Forum*, 35(2), pp.59-70.
 7. Margaret Carney, 2008, Lithophanes, Schiffer Publishing.
 8. Cura manual, <http://ultimaker.com/en/resources/manuals>
 9. Reprap-dev Accelerating While Extruding Print Quality, <http://reprap.org/pipermail/reprap-dev/2011-May/003323.html>
 10. Yuan, M., 2014, Additive Manufacturing of Laser Sintered Polyamide Optically Translucent Parts, The University of Texas, Austin, TX.
 11. Yuan, M. and Bourell, D., 2013, Fundamental Issues for Additive Manufacturing of Lithophanes, *International Conference of Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, CRC Press, pp.89-93.
 12. Ahn, S., Lee, C.S. and Felong, W., 2004, Development of Translucent FDM Parts by Post-processing, *Rapid Prototyping Journal*, 10(4), pp.218-224.
 13. Suwanprateeb, F. and Suwanpreuk, W., 2009, Development of Translucent and Strong Three Dimensional Printing Models, *Rapid Prototyping Journal*, 15(1), pp.52-58.
 14. Bikas, H., Stavropoulos, P. and Chryssolouris, G., 2016, Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), pp.389-405.
 15. Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N. and Dhande, S.G, 2003, Slicing Procedures in Layered Manufacturing: A Review, *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), pp.274-288.
 16. Bellini, A., Guceri, S. and Bertoldi, M., 2004, Liquefier Dynamics in Fused Deposition, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(2), pp.237-246.
 17. Turner, B.N. and Gold, S.A. 2015. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: II. Materials, Dimensional Accuracy, and Surface Roughness, *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), pp.250-261.
 18. Dolenc, A. and Mäkelä, I., 1994, Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques, *Computer-Aided Design*, 26(2), pp.119-126.
 19. Sabourin, E., Houser, S.A. and Helge Bøhn, J., 1996, Adaptive Slicing Using Stepwise Uniform Refinement, *Rapid Prototyping Journal*, 2(4), pp.20-26.
 20. Tyberg, J. and Bøhn, J.H., 1999, FDM Systems and Local Adaptive Slicing, *Materials & Design*, 20(2), pp.77-82.
 21. Tyberg, J.T., 1998, Local Adaptive Slicing for Layered Manufacturing, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
 22. Tyberg, J. and Helge Bøhn, J., 1998, Local Adaptive Slicing, *Rapid Prototyping Journal*, 4(3), pp.118-127.
 23. Sabourin, E., Houser, S.A. and Helge Bøhn, J., 1997, Accurate Exterior, Fast Interior Layered Manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 3(2), pp.44-52.
 24. Mani, K., Kulkarni, P. and Dutta, D., 1999, Region-based Adaptive Slicing, *Computer-Aided Design*, 31(5), pp.317-333.
 25. Blum, H., 1964, A Transformation for Extracting New Descriptions of Shape, *Symposium on Models for the Perception of Speech and Visual Form*, Cambridge, MA: M.I.T. Press.
 26. Gürsoy, H.N. and Patrikalakis, N.M., 1992. An Automatic Coarse and Fine Surface Mesh Generation Scheme Based on Medial Axis Transform: Part I Algorithms, *Engineering with Computers*, 8(3), pp.121-137.
 27. Held, M., 1991, On the Computational Geometry of Pocket Machining, Springer Science & Business Media.
 28. Preparata, F.P. and Shamos, M., 2012, Computational Geometry: An Introduction, Springer Science & Business Media.
 29. Toussaint, G.T., 1980, Pattern Recognition and Geometrical Complexity, *In Proceedings of the 5th International Conference on Pattern Recognition*, 334, pp.347.
 30. Agarwala, M.K., Jamalabad, V.R., Langrana, N.A., Safari, A., Whalen, P.J. and Danforth, S.C., 1996, Structural Quality of Parts Processed by Fused Deposition. *Rapid Prototyping Journal*, 2(4), pp.4-19.

장 승 호

2015년 동국대학교 컴퓨터공학과 학사
2017년 동국대학교 컴퓨터공학과 석사
2017년~현재 동국대학교 컴퓨터 공학과 박사과정
관심분야: 3D printing, Computer Graphics, CAD/CAM, Digital Manufacturing
E-mail: shjang@dongguk.edu

홍 정 모

2000년 한국과학기술원 기계공학 학사
2002년 한국과학기술원 기계공학 석사
2005년 고려대학교 전산학 박사
2005년~2007년 Stanford University (USA) 연구원
2008년~현재 동국대학교 교수
관심분야: Computer Graphics, Physics-Based Simulation, Visual Effects, 3D printing
E-mail: jmhong@dongguk.edu
