

듀얼 노즐 FDM 프린터에서 노즐 간의 간섭을 최소화하는 모델의 빌드 방향 최적화를 위한 방법

김태영 · 이용구[†]

광주과학기술원 기계공학부

A Method for Optimizing Building Position of Model to Minimize Interference between Nozzles in FDM with Dual-nozzles

Tae-young Kim and Yong-gu Lee[†]

Dept. of Mechanical Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

Received 11 September 2016; received in revised form 30 October 2016; accepted 9 November 2016

ABSTRACT

3D printing techniques can be used in various application fields and many researches have been reported. FDM (Fused Deposition modeling) can make multi-material or multi-color models with the simultaneous use of two or more filaments. In a dual-nozzle FDM printers, while the active nozzle is working, the remaining nozzle will be idle. The remaining molten resins inside an idle nozzle can ooze out unwantedly. The spill over from the resting nozzle produces unwanted remaining on the fabricated product. In this research, we suggest a method for optimizing building position of a model to minimize the unwanted spill-over that could possibly contaminate the final product. The method is based on minimizing the two intersection volumes. The first intersection volume is obtained by intersecting the volume defined by the first material and the Minkowski sum between the volume of the first material and the vector obtained by subtracting the center point of the first nozzle from the center point of the second nozzle. The second intersection volume can be obtained by reversing the role of the first and second volumes and nozzles. Some results obtained from the implementation using the Parasolid (Siemens) geometric modeling kernel is presented.

Key Words: Building position, Dual-nozzles, FDM (Fused deposition modeling), 3D printing

1. 서 론

현재 3D 프린팅 분야는 다양한 분야에 적용될 수 있는 가능성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다. 또한, 이로 인해 3D 프린팅 관련 시장도 급격하게 성장하고 있다. 3D 프린팅 기술은 SLA

(Stereolithography), SLS(Selective Laser Sintering), FDM(Fused Deposition Modeling), Polyjet 등 다양한 방식이 있다. 그 중에서도 필라멘트를 가열된 노즐을 통해 녹이면서 적층하는 방식인 FDM 프린터는 다른 방식에 비해 편의성이 좋아 대중들에게 가장 많이 알려지고 사용도 되고 있다. FDM 방식은 출력하고자 하는 모델을 소프트웨어를 통해 여러 층으로 나눈 뒤 각 층의 단면을 노즐의 경로로 바꾸게 된다. 소프트웨어를 통해 노즐의 경

[†]Corresponding Author, lygu@gist.ac.kr
©2017 Society for Computational Design and Engineering

로로 바뀐 파일을 일반적으로 G-code라고 한다. 이 G-code에 따라 프린터가 출력을 한다. FDM은 아래부터 한 층씩 적층하는 방식이기에 복잡한 구조나 바닥면에 안착이 되지 않는 모델을 출력할 경우 실패하는 경우가 발생한다. 이를 보완하기 위해 모델에서 각 부분별로 내부를 채우는 정도를 달리하여 무게중심을 최대한 아래로 내려서 출력하거나(Asger *et al.*^[5]) 서포터를 같이 출력하여 모델을 좀 더 안정감 있게 지지할 수 있도록 하면서 출력하는 방법도 있다(Allen *et al.*^[11]). 하지만 단일 노즐 프린터의 경우 서포터와 모델 재료가 같기 때문에 서포터를 깔끔하게 제거하는데 어려움이 있다. 반면에 듀얼 노즐 프린터를 이용하여 제거하기 쉬운 재료로 서포터를 출력하는 방법도 있다. 듀얼 노즐 프린터는 헤더에 두 개의 노즐이 있고 필라멘트 주입구도 각각 나뉘어져 있어 2가지의 재료 혹은 색상을 동시에 출력할 수 있는 장점이 있다. 또한 이를 이용하여 출력 물체 표면에 또 다른 그림을 나타내는(Reiner *et al.*^[2]) 등 단일 노즐보다 더 다양한 표현이 가능하다. 듀얼 노즐 프린터는 먼저 한 개의 노즐이 현재 레이어에서 담당하는 부분을 모두 출력하고 나면 대기하고 있던 두 번째 노즐이 나머지 부분의 출력을 시작하는 방식으로 작동된다. 이 때 대기하고 있는 노즐은 바로 작업을 진행하기 위해 계속 가열된 상태를 유지한다. 노즐이 가열된 상태이기 때문에 대기하고 있는 노즐에서 필라멘트가 새어 나오는 경우가 있다. 그리고 두 개의 노즐이 독립적이지 아니고 하나의 헤더에 연결되어 있기 때문에 물체의 크기가 노즐간의 거리보다 크게 되면 한 개의 노즐이 출력하는 동안 대기하고 있는 노즐이 작동중인 노즐의 출력 영역을 침범하면서 출력을 방해하는 경우가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 듀얼 노즐을 이용한 출력 시 각 노즐이 서로의 출력 영역을 침범하는 정도를 수치화하여 비교하는 방법을 찾고, 그 결과를 통해 침범이 최소화되는 빌드 방향을 알아보기 위해 Siemens사의 Parasolid를 이용하여 C++ 개발환경에서 이를 구현해보았다.

2. 방법 및 구현

2.1 목적

듀얼 노즐을 이용한 출력 시 출력 모델이 노즐

간의 거리만큼 작지 않은 이상 각 노즐이 서로의 출력 영역을 침범하는 상황이 발생한다. Fig. 1은 Makerbot사의 Replicator2X라는 프린터로 PLA(왼쪽 노즐)와 Woodfill(오른쪽 노즐)을 이용하여 출력하고 있는 모습이다. 왼쪽 노즐은 출력 중이고 오른쪽 노즐은 대기중인 상태이다. 그리고 오른쪽 노즐에서 필라멘트가 새어 나오는 것을 확인할 수 있다. 다음 동작을 위해 대기하고 있는 노즐은 가열이 된 상태이기 때문에 노즐에 닿아 있는 필라멘트가 녹아 흘러나오는 현상이 발생한다. 이런 경우, 출력하고 있는 영역을 침범하게 되면 새어 나온 필라멘트로 인해 출력물이 움직이게 되거나 출력물에 달라붙어 출력을 방해하게 된다. Fig. 1의 출력 물체의 오른쪽부분에 새어 나온 필라멘트가 붙어 출력 과정을 방해하고 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 작동하다가 대기상태가 되면 필라멘트를 살짝 역방향으로 당겨 새어 나오는 현상을 방지한다. 또는 Hergel *et al.*^[3]는 이런 문제를 해결하기 위해 출력 모델로부터 일정거리에 벽을 출력하여 새어 나온 필라멘트가 벽을 지나면서 제거되도록 하는 방법을 제안하기도 하였다. 하지만 이미 노즐 끝에 닿아서 녹아 있는 부분은 필라멘트와 함께 당겨지지 않고 남아있기 때문에 새어 나오는 현상이 발생할 가능성이 있고, 벽을 생성해도 출력 모델의 크기가 크면 내부를 출력하는 동안에 새어 나와 출력한 벽의 의미가 무색해지는 경우도 있다.

따라서 모델 출력 시 두 개의 노즐이 서로의 출력 영역을 최대한 침범하지 않는 빌드 방향을 찾

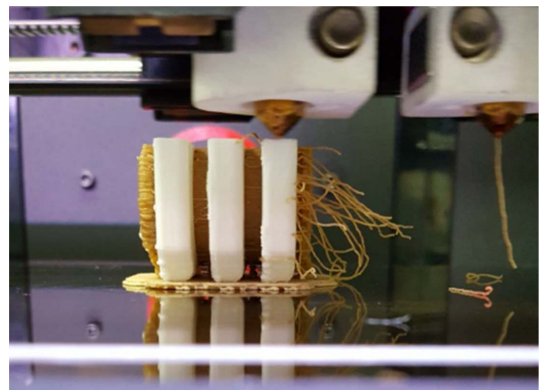


Fig. 1 Oozing filament(right) and a model disturbed by oozing filament(center) while printing using Replicator2X of Makerbot

아 새어 나와도 출력에 덜 방해가 되도록 하고자 한다. 이 방법으로 출력 모델을 회전시키며 각 노즐이 침범하는 영역을 부피로 나타내어 비교 후 최적화된 모델의 위도와 경도를 찾도록 하였다.

2.2 대기중인 노즐이 출력중인 노즐 영역에 침범하는 부피를 구하는 방법

Fig. 2는 다각형과 벡터의 Minkowski sum을 나타낸 것이다. Minkowski sum은 다음과 같이 표현된다:

$$A \oplus B = \{x+y|x \in A, y \in B\}$$

여기서 $x + y$ 는 두 점의 벡터합을 의미한다. 위 식에서 B가 벡터이면 다음과 같이 식을 다시 쓸 수 있다:

$$A \oplus b = \{x+b|x \in A\}$$

이는 A가 벡터 b만큼 움직인 것을 의미한다. Fig. 2의 윗부분은 사각형 A와 벡터 b를 나타낸 것이고, 아랫부분은 A와 b의 Minkowski sum의 결과인 A'를 나타낸 것이다.

Fig. 3는 노즐이 침범하는 영역의 부피를 구하는 과정을 나타낸 것이다. (a)와 같이 6 cm × 3 cm × 3 cm의 직육면체 두 개를 빨간색과 파란색으로 출력한다고 하자. 먼저 빨간 파트의 아래면(첫 번째 레이어)에 대해서만 보자(b). 두 개의 노즐은 하나의 헤

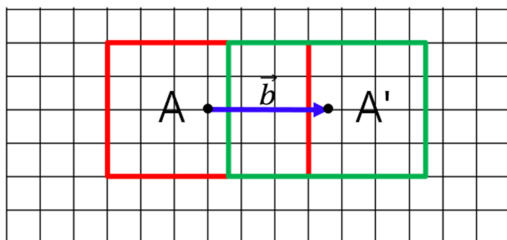
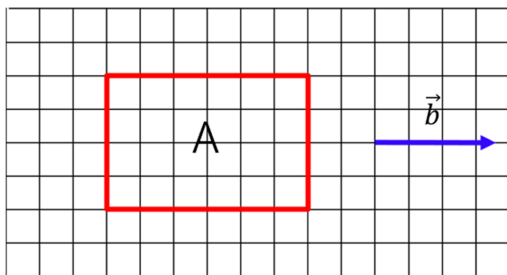
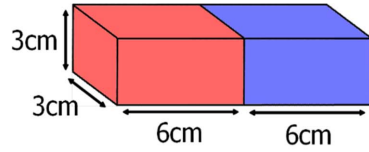
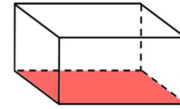


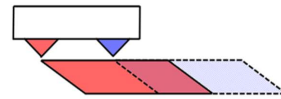
Fig. 2 Minkowski sum of a polygon and a vector. Black dot means center of box



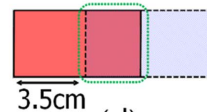
(a)



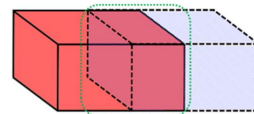
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 3 Schematics of calculating the volumes of passing other nozzle's extrusion section

더에 연결되어 있기 때문에 빨간색 노즐이 이동하는 경로를 노즐 간의 간격만큼 떨어져서 파란색 노즐도 동일하게 움직인다. 따라서 빨간색 노즐이 출력하는 모양과 동일한 모양을 파란색 노즐도 가상적으로 그리게 된다(c). 이 과정에서 Minkowski sum을 이용하면 (d)와 같이 된다. 이 때 출력하는 영역(빨간부분)이 Fig. 2에서 A에 해당하고, 파란 노즐의 중심에서 빨간 노즐의 중심을 뺀 벡터가 벡터 b에 해당하게 된다. 따라서 노즐 간의 간격

이 X축 방향으로만 3.5 cm이면, 파란색 노즐은 X축 방향으로 3.5 cm의 간격을 유지한 채 빨간색 출력 경로와 동일하게 움직이며 가상의 모양을 만들게 된다. 이 때 가운데의 빗금 영역과 교차되는 부분이 빨간색 파트를 출력하는 동안 파란색 노즐이 침범하는 영역을 의미한다. 모든 레이어에 대해 같은 방식을 적용하면 파란색 노즐이 침범하는 영역의 부피가 나타난다(e).

파란색 파트에 대해서도 위와 동일한 방식을 적용하면 파란색 파트를 출력하는 동안 빨간색 노즐이 침범하는 영역의 부피를 구할 수 있다. 단, 빨간색 노즐은 파란색 노즐을 기준으로 X축 방향으로 -3.5 cm이기 때문에 빨간색 노즐의 가상 모양은 왼쪽에 그려지게 된다. 위에서 구한 두 개의 노즐이 침범하는 영역의 부피를 더하면, 해당 위도와 경도에 대해서 각 노즐이 침범하는 영역의 총 부피를 구할 수 있다(f).

Fig. 4은 Fig. 3와 같은 모델을 Z축에 대해 45도를 회전한 상태에서 노즐이 침범하는 영역을 구하는 과정을 도식화한 것이다. 초기 상태(a)의 모델을 (b)와 같이 Z축에 대하여(경도) 45도를 회전시킨 후, Fig. 3와 같은 과정을 거쳐 각 노즐이 가상으로 그리는 모양을 나타내면 (c)와 같이 나타난다. 빨간색 파트의 오른쪽으로 3.5 cm 거리에 동일한 모양으로 가상의 파란색 모양이 그려지고 파란색 파트 왼쪽으로 3.5 cm 거리에 동일한 모양으로 가상의 빨간색 모양이 그려지게 된다. 이제 출력 모델과 가상으로 그려진 모양을 교차시키면 (d)와 같은 부분만 남게 되고 이 부분이 다른 노즐이 침범하는 영역이 된다. 이 영역을 각 레이어마다 구하여 합하면 부피가 되고 이 부피값이 경도를 45도 회전시켰을 때의 노즐들이 침범하는 부피가 된다.

위의 방법을 통하여 위도와 경도를 10도씩 회전하며 여러 빌드 방향에 대한 침범 부피값을 비교하여 가장 작은 부피값을 찾고 그 때의 위도와 경도를 알아내도록 한다.

2.3 Parasolid를 이용한 구현

앞서 설명한 방법을 Siemens사의 Parasolid를 이용하여 C++ 개발환경에서 구현하였다. Parasolid는 NX와 같이 3D 제품 설계 및 해석에 관한 소프트웨어의 기반으로 사용되는 소프트웨어이다.

따라서 3D 모델링 및 해석과 관련된 기능을 사

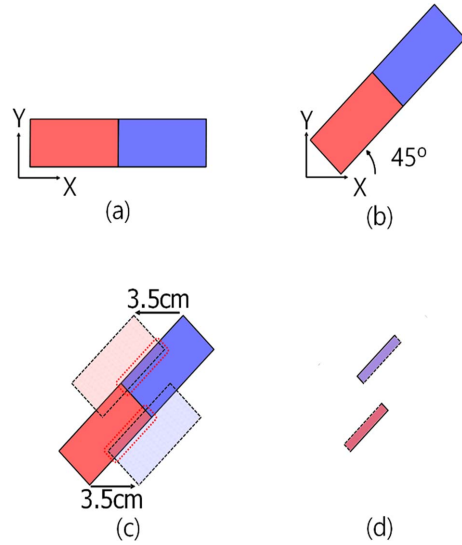


Fig. 4 An example of rotating model about Z-axis by 45 degree (longitude rotation)

용자가 원하는 방식으로 적용시켜 새로운 어플리케이션을 만드는데 유용하다. Parasolid는 X_T 파일 형식을 지원하는데 이 파일에는 모델의 지오메트리, 색상, 제약 조건등의 정보가 담겨 있다. CAD 프로그램으로 제작한 모델을 X_T 형식으로 저장하여 얻을 수 있다.

프로그램이 동작하는 순서는 다음과 같다. 우선 Parasolid가 인식할 수 있는 X_T 파일 형식의 출력 모델을 불러드린다(Fig. 5(a)). 이 때 각 노즐에 해당하는 파트를 A, B라고 하면, A를 복사하여 A'를 생성하고 X축 방향으로 3.5 cm만큼 이동시킨다. 여기서 A'는 Fig. 3에서 파란색 노즐이 가상으로 그리는 모양에 해당한다. 그 뒤, Parasolid의 boolean기능을 이용하여 A와 A'를 교차시킨다(Fig. 5(b)). 그리고 Parasolid의 부피를 측정하는 기능을 이용하여 부피 V_a 의 값을 구한다. 마찬가지로 B를 복사하여 B'를 생성하고 X축 방향으로 -3.5 cm만큼 이동시킨 후 B와 교차시켜서 부피 V_b 의 값을 구한다. 이렇게 구한 V_a 와 V_b 를 더하여 각 노즐이 침범하는 부피값을 계산하여 미리 선언해둔 배열에 저장해둔다. 출력 모델을 위도와 경도에 대해 10도 간격으로 0도부터 350도까지 회전시키면서 침범하는 부피를 구하여 총 1296개의 부피값 데이터 배열을 만든다. 마지막으로 부피값들 중에서 가장 작은 값을 찾고 그 때의 위도와 경도를 반환한다.

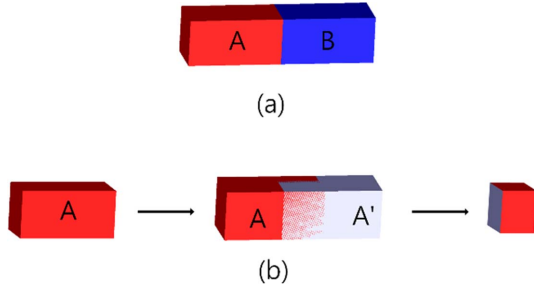


Fig. 5 Schematics of describing the volumes of passing other nozzle's extrusion section using Parasolid

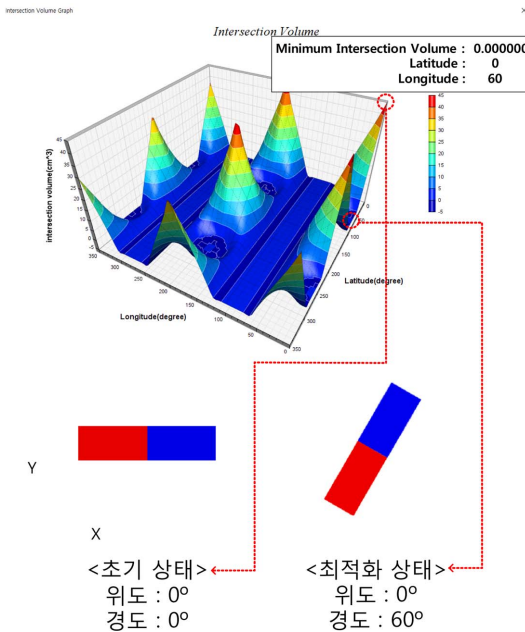


Fig. 6 An execution result about Fig. 3. A 3D graph shows intersection volume change according to latitude and longitude (top). Initial (left-bottom) and optimized (right-bottom) building positions are represented

3. 결 과

위의 방법을 토대로 구현한 프로그램을 실행시키면 위도와 경도에 따라 노즐이 침범하는 부피값을 3차원 그래프로 도시하고 가장 적게 침범할 때의 부피값과 위도, 경도를 나타내준다. 그래프는 Chart Director라는 라이브러리를 이용하여 표현하였다. 그리고 회전하지 않은 초기 상태의 모습과 최적화 상태의 모습을 보여준다.

Fig. 6, Fig. 8, Fig. 9은 다양한 출력 모델에 대해 테스트 해본 결과를 나타낸 것이다. 3차원 그래프

를 통해 위도와 경도에 따른 노즐 간의 침범 부피의 변화 추이를 확인할 수 있다. 먼저, Fig. 6는 Fig. 3의 과정에 대한 결과다. 결과로 나온 침범하는 부피의 최솟값이 0이므로 각 노즐이 서로 침범하지 않고 출력을 할 수 있음을 의미한다. 최적화된 상태의 위도는 0도, 경도는 60도로 나타났다. 여기서 위도는 Y축을 왼손으로 감은 방향으로 회전하고, 경도는 Z축을 오른손으로 감은 방향으로 회전한다. Fig. 6의 노즐 형상은 빨간색이 왼쪽 노즐에서 출력되고 파란색이 오른쪽 노즐에서 출력됨을 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과는 최적화 상태일 때 노즐의 침범이 없어야 한다. 즉 출력 모델을 60도 회전시켰을 때 모든 부분에서 X축과 평행한 길이가 노즐간의 거리보다 짧아야 한다. Fig. 7의 왼쪽은 Fig. 6의 최적화된 모습을 나타낸 것이고, 오른쪽은 출력 모델에 X축과 평행한 선을 그어 만

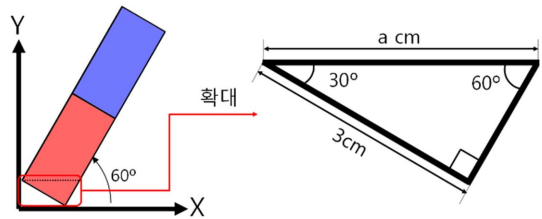


Fig. 7 Optimized position of Fig. 6(left) and expanded figure(right) for proving that the length of x-axis is under the distance(3.5cm) between nozzles

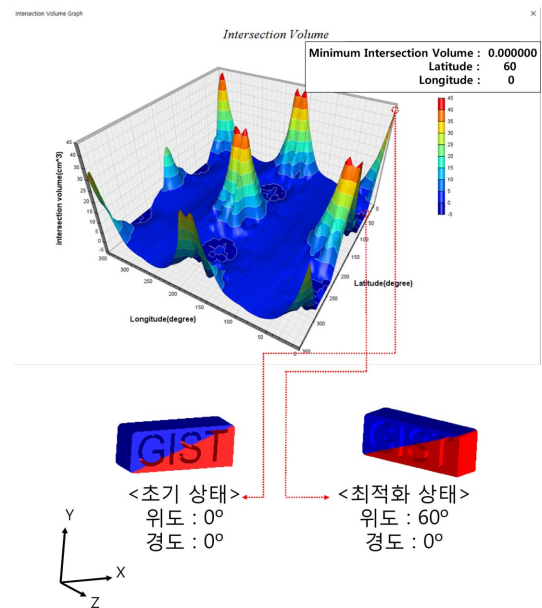


Fig. 8 An execution result about other model

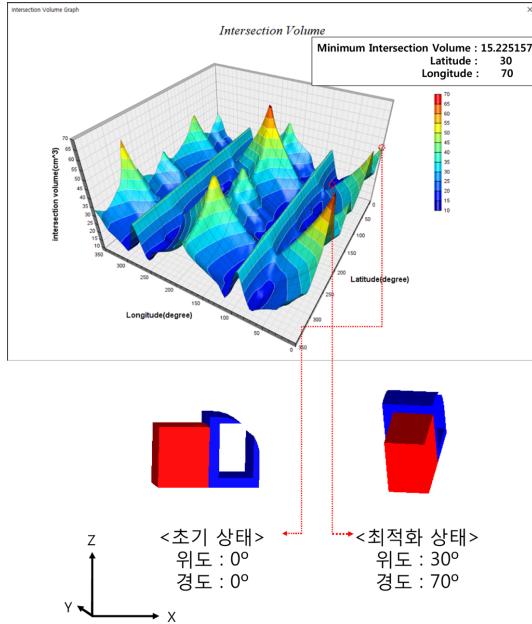


Fig. 9 An execution result that minimum intersection volume is not zero

든 삼각형을 확대한 모습이다. 여기서 길이 a 는 출력 모델에서 X축으로 가장 긴 길이와 동일하다. 즉, a 가 노즐 간의 거리인 3.5 cm보다 작으면 출력하는 동안 두 노즐이 서로 침범하지 않게 된다. 길이 a 를 구하는 식은 다음과 같다:

$$a = \frac{3\text{cm}}{\cos 30^\circ} = 3.4641\text{cm}$$

따라서 $a < 3.5\text{ cm}$ 이므로 출력 시 각 노즐이 다른 영역을 침범하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 8와 Fig. 9은 좀 더 복잡한 형태의 출력 모델을 테스트해 본 결과이다. Fig. 8는 Fig. 6처럼 최소 부피값이 0이므로 노즐이 서로 침범하지 않으면서 적층할 수 있는 방향이 존재한다.

반면에 Fig. 9의 결과를 보면 침범하는 최소 부피값이 0이 아니다. 이는 어떤 방향으로 회전해도 출력 시 노즐이 다른 노즐 영역을 침범하게 됨을 의미한다. Fig. 9의 모델을 10도씩 회전시키며 침범 부피값을 계산했을 때 가장 적게 침범할 때의 부피값은 15.225157 cm^3 이 되고, 이 부피값을 갖는 조건 중 가장 먼저 계산된 위도 30도, 경도 70도의 조건이 최적화 상태를 나타내는 조건이 된다.

Fig. 6, Fig. 8, Fig. 9의 그래프를 보면 침범하는

부피의 최솟값이 나타나는 조건이 하나가 아님을 알 수 있다. 이는 마지막 결과를 찾는 과정에서 최솟값에 대한 조건을 찾을 때 데이터가 저장된 순서대로 찾고 첫 번째로 찾은 조건만을 나타내도록 했기 때문에 나머지 조건에 대한 정보는 나타나지 않은 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 FDM 방식에서 듀얼 노즐을 이용한 출력 시 각 노즐이 다른 노즐의 영역을 침범하는 영역의 부피를 구하는 방법을 구상하였고 이 방법을 토대로 출력 모델을 회전시키며 노즐 간의 간섭을 최소화 할 수 있는 최적화된 빌드 방향을 찾아보았다. 이 방법으로 구한 빌드 방향을 출력 시 적용하면 듀얼 노즐의 간섭으로 인한 실패율을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, FDM에서는 일반적으로 평평한 면이 바닥에 오도록 하여 안정감 있게 적층하는데 Fig. 9과 같은 결과는 바닥에 안착되어 있지 않은 상태이기 때문에 서포터가 더 많이 필요하게 되고, 적층 높이도 높아져 출력 시간도 증가하게 된다. 또한, 출력 시 안정감이 떨어져서 약간의 진동에도 영향을 받을 가능성이 커질 것이다. Umetani *et al.*^[4]의 연구 내용은 출력 물체의 빌드 방향에 따라 물체에 작용하는 힘을 분석하여 빌드 방향을 최적화하는 방법에 관한 것인데, 이런 부분에 대한 고려도 포함시켜야 할 필요성이 있다. 따라서 문제점을 개선하기 위해서는 적층 높이에 따른 적층 시간과 빌드 방향으로 인한 안정감, 출력 물체에 작용하는 힘 등을 고려하면서 최적화 할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2015년도 문화기술연구개발지원사업과 [R2015120006, 콘텐츠형 온오프라인 3D프린팅 포털/센터 구축을 위한 통합솔루션 개발] 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음[R0190-15-2040, 창의소재 활용이 가능한 3D 프린팅 콘텐츠형상관리 시뮬레이터 연구].

References

1. Allen, S.W. and Dutta, D., 1995, Determination and Evaluation of Support Structures in Layered Manufacturing, *Journal of Design and Manufacturing*, 5, pp.153-162.
2. Reiner, T., Carr, N., Mech, R., Stava, O., Dachsbacher, C. and Miller, G., 2014, Dual-color Mixing for Fused Deposition Modeling Printers, *Computer Graphics Forum*, 33(2), pp.479-486.
3. Hergel, J. and Lefebvre, S., 2014, Clean Color: Improving Multi-filament 3D Prints, *Computer Graphics Forum*, 33(2), pp.469-478.
4. Umetani, N. and Schmidt, R., 2013, Cross-sectional Structural Analysis for 3D Printing Optimization, *SIGGRAPH Asia 2013 Technical Briefs*, pp.5:1-4.
5. Christiansen, A.N., Schmidt, R. and Bærentzen, J.A., 2015, Automatic Balancing of 3D Models, *Computer-Aided Design*, 58, pp.236-241.



김 태 영

2015년 서울시립대 신소재공학과
학사
2016년~현재 광주과학기술원 기계
공학부 석사과정
관심분야: 3D 프린팅, 4D 프린팅



이 용 구

1992년 서울대 기계설계학과 공학사
1994년 서울대 기계설계학과 공학
석사(CAD)
1997년 서울대 기계설계학과 공학
박사(CAD)
1997년~2000년 삼성SDS 책임
연구원
2000년~2003년 미국 NIST 객원
연구원
2010년~2011년 미국 NIST 객원
연구원
2003년~현재 GIST 기계공학부 교수
관심분야: 3D 프린팅, 리버스 엔지
니어링, 포토닉스, CAD