

FDM에서 경사면의 표면과 면적오차법의 관계에 대한 연구

A Study on The Surface Roughness and Area Error at FDM

전재익 · 정진서 · 황영모(부경대 대학원), 김수광(부산정보대학),
김준안(경남정보대학), 계중읍(국방품질관리소), 하만경(부경대학교)

Jae Uhk Jun · Jin Seo Jung · Young Mo Hwang(PuKyung Graduated School), Soo
Kwang Kim(Busan Col.), Jun Ahn Kim(Kyungnam Col.), Joong Yup Ke(DQAA),
Man Kyung Ha(PuKyung Univ.)

ABSTRACT : In any rapid prototyping process, the layer by layer building process introduces an area error between the staircase and the surface line specified by the computer-aided design model. This affects the dimensional accuracy as well as the surface finish for different part build orientations. This paper describes a methodology for computing the area error for any orientation of the part built by the fused deposition modelling system. This technique can be applied to determine the best build orientation of the part, based on the minimum area error. This technique is verified by comparing the results with the experimental measurements of the area error of the parts built at different orientations.

1. 서론

현재는 소비자들의 소비형태가 취향에 따라 다양하고 쉬게 변하는 경향이 있다. 이런 형태의 소비경향에 맞추어 다양한 제품을 빠른 시일 내에 생산하려면 시제품의 제작이 관건이 된다. 시제품의 제작은 금형을 직접 만들어서 생산할 경우 금형의 제작에 비용 및 시간이 많이 소요된다. 이에 따라 금형이 필요 없이 시제품을 제작할 수 있는 방법이 패속조형법(Rapid Prototyping)이다. 이 패속조형은 컴퓨터를 이용하여 3차원 모델을 제작하고

그 데이터를 변환하여 패속 조형 장치에 전송하여 3차원 제품을 제작하므로 시제품의 제작기간을 줄이고 금형 제작에 필착조형공정(FDM: Fused Deposition Modeling), 선택적 레이저 소결법(SLS: Selective Laser Sintering), 3차원프린팅공정(3DP: 3 Dimensional Printing)을 이용하여 3차원 제품을 제작하므로 시제품의 제작기간을 줄이고 금형 제작에 필요한 비용을 상당히 감소시킬 수 있다.⁽¹⁾ 현재 상용화되고 있는 RP 기술은 광조 형법(SLA: Stereo lithgraphy), 용착조형 공정(FDM: Fused Deposition Modeling), 선택적 레이저 소결법(SLS: Selective Laser Sintering), 3차원 프린팅공정(3DP: 3 Dimensional Printing), SPI 공정, Object, 시트 적층 공정(LOM) 등이 있다.^(2,3) 그리고 패속조형장치를 이용하여 만든 시제품은 실제 제품과 외형이 동일 할 뿐만 아니라, 그 종류에 따라 차이는 있지만 사용하는 소재가 고분자 화합물로 기능성 테스트까지 가능하다.⁽⁴⁾ 이러한 장점이 있는 반면 패속조형법은 3차원 데이터를 얇은 층으로 변환하여 그 층을 아래에서부터 적층해 가는 방법을 사용하므로, 각 층을 적층할 때 발생하는 계단형상에 의해 표면거칠기가 불량해지고, 열을 가하여 소재를 용착시키거나 소결시키는 방법을 사용하기 때문에 열변형에 의한 비틀림이나 수축으로 형상, 치수 정밀도에서 문제점을 가지고 있다.⁽⁵⁾ 이러한 문제가 여러 연구가들에 의해 연구되어지고 있다. 그 연구들에 대하여 아래에 그 예를 들었다. R.Ippolito는 3D Systems사에서 제안한 원

래의 벤치마크를 사용하여 RP 기술의 치수 정밀도와 표면의 사상을 연구하였다.⁽⁶⁾ 김준안은 SLA 장치와 소프트웨어를 개발하고 조형정밀도 및 표면 거칠기 성능 향상을 위한 연구를 하였다.⁽⁷⁾ 하만경과 전재익등은 FDM 장치에서 주사간격과 시작품의 경사가 표면거칠기에 미치는 영향에 대하여 연구하였다⁽⁸⁾. 최만성과 최배호는 LOM 시스템을 이용한 패턴제작에서 치수 정밀도와 기계적 강도에 관하여 연구하였다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 FDM장치를 이용한 시제품제작에서 제품의 표면의 경사각의 변화에 따른 표면 거칠기의 변화를 측정하고, 면적오차에 따른 표면 거칠기를 예측하여 실험결과와 비교, 분석하였다.

2. 실험장치의 원리 및 소재

2.1 FDM의 구조 및 원리

FDM 장치의 원리는 열에너지와 층제조기술을 토대로 한다. 소재는 스펴(Spool)에 감긴 필라멘트(Filament)형태이고, 이 소재를 특별히 설계된 헤드(Head)에서 용융하고 모델의 각 층의 형상을 주사패턴에 따라 분사한다.

이렇게 분사된 재료는 층과 층으로 적층되면서 모델의 형상으로 냉각 응고된다. 이 FDM 시스템도 다른 RP 시스템과 같이 층단위로 적층하여 제작한다.⁽¹⁰⁾

Fig. 1은 FDM장치의 기본구조와 제작원리를 나타낸 것이다.

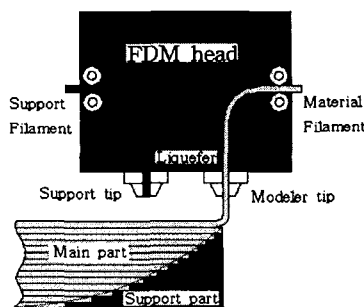
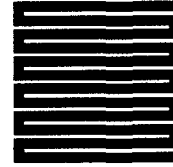


Fig. 1 Structure of FDM

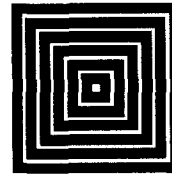
2.2 주사패턴

FDM 장치는 층별로 단면의 형상을 주사하여

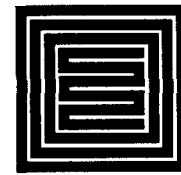
고화 시키는데 이 때의 주사 경로에는 왕복형(Raster type), 회전형(Contour type), 혼합형(Mix type ; Contour / Raster)이 있다. Fig. 2 에서는 각 주사패턴을 나타내었다.



(a) Raster type



(b) Contour type



(c) Mix type

Fig. 2 Injection pattern of FDM

2.3 소재

본 연구에서 사용된 소재는 ABS P400으로 내구력이 높으므로 기능성 시험용 패속 조형 모델을 제작하는데 적합하다. ABS의 특징으로는 내충격성, 인성, 열안정성, 내화학적, 강성 등을 들 수 있다. 이 재료는 사출금형을 위한 시작 금형을 만들 필요를 없게 하므로 경제적 시간적 이점이 있다.

ABS 모델은 전통적인 방법의 주조에서도 목형 대신 이용할 수 있으며, 기계가공, 드릴, 텀, 도색, 접착, 다듬질 등을 할 수 있다. ABS 수지는 고강성, 고경도, 저수축률, 빠른 응고성으로 사출금형 및 FDM에서 유용하게 사용되고 있다.

2.4 면적오차

FDM장치에 의해서 제작된 제품은 표면에 계단형상이 만들어진다. 이렇게 생성된 계단은 제품을 제작할 때 제작방향을 어떻게 설정하느냐에 의해 그 수가 결정되고 단면곡선에서 뚜렷하게 나타난다. 단면곡선은 피측정면의 평균표면에 직각방향의 면으로 피측정면을 절단하였을 때 그 단면에 나타나는 윤곽을 말한다. 이 곡선은 각 층간의 형상차이에 따라 나타나고 CAD에서 모델링한 형상의 표면과 Fig. 3에서 빗금부위로 나

타난 단면곡선의 면적 오차를 가진다. 이러한 면적 오차는 표면거칠기와 직접적인 관계를 가지고 있다. Fig. 4에서 두께가 일정한 수평한 층과 수평면을 기준으로 경사진 표면을 가진 물체를 예로 나타내었다.

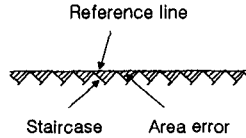


Fig. 3 Area error

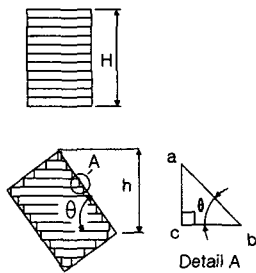


Fig. 4 Area error in a part oriented at an angle

θ 표면에 발생한 한 층의 계단형상에 의한 면적 오차는 수평한 층과 경사면사이의 직각삼각형 abc의 면적과 같다. 이러한 오차는 층 두께와 제작 방향에 의한 경사각과의 관계로 표현되어질 수 있다. 한 층에서의 면적 오차는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$A_e = \frac{1}{2}(ac)(bc) \quad (1)$$

제작될 제품의 높이(H)에 따라 층의 개수(n)은 T 다음의 식 (2)로 구할 수 있다.

$$n = H \cdot \sin\theta / t \quad (2)$$

여기서 θ 는 경사각, t = 층 두께이다.

그리고 $bc = \frac{ac}{\tan\theta}$ 이며, $ac = t$ 이다.

그러므로 각 변수를 대입하면 다음 식(3)과 같다.

$$A_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{\tan\theta} \cdot t = \frac{t^2}{2 \tan\theta} \quad (3)$$

여기서 전체 면적오차를 구하기 위해 층의 개수(n)을 곱하면 다음 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$A_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{\tan\theta} \cdot t \cdot n = \frac{t^2}{2 \tan\theta} \cdot n \quad (4)$$

위 식(4)에서 θ 가 '0'이 되면 n의 값도 '0'이 되어 거칠기 또한 '0'이 되므로 면적 오차가 발생하지 않는 것으로 나타나지만, 실제 제품에서는 면적 오차가 발생한다. 그것은 평면에서 섬유질의 간격에 의해서 생긴다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 시스템은 Stratasys사에서 제작한 범용 RP시스템으로 명칭은 FDM 3000이다. 이 시스템의 제품 제작부의 외부 규격은 660(w)×1067(h)×914(d)(mm)이고, 제작부내에서 제작할 수 있는 최대 부품의 크기는 254×254×406(mm)이다. 그리고 시스템에 포함되어 있는 PC에서는 STL 포맷으로 만들어진 그래픽 파일을 퀵슬라이스(Quick Slice)라는 소프트웨어를 이용하여 데이터를 처리하고 데이터는 최종적으로 SML(Stratasys Modeling Language) 파일로 저장되어 FDM장치로 전송되어 제품을 생산한다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 현재 범용적으로 사용되는 CAD 프로그램인 AutoCAD를 이용하여 제품의 형상을 생성하고 STL파일로 저장하였다. 이 모델은 다면체의 형상으로 되어 있고, 기준을 경사면의 각이 바닥과 평행한 각을 0°로 하였고, 각 0°, 15°, 3°와 5°에서 90°까지 5°간격으로 기울기가 변하도록 되어 있다. 주사간격과 층간격의 조건은 Table 1에 나타내었다. 이 그래픽 파일을 퀵슬라이스 소프트웨어에서 층(Layer)별로 슬라이싱(Slicing)하고, 그 데이터는 SSL(Stratasys Slicing Language) 파일로 저장한다. 이 과정에서 모델을 배치하고 STL 파일의 오류를 수정했다. 다음 과정으로 지지대(Support)를 생성하고 주사 패턴, 팁(Tip)의 종류 등을 설정했다. 이러한 일련의 처리를 거친 데이터를 FDM 3000에 전송하여 시작모델을 만들었다. 그리고 시작모델의 표면거칠기를 측정하여 시작품의 형상에 따라 표면거칠기를 비교하였다. 그리고 블랜드 C++빌더를 이용하여 면적오차법을 적용한 소프트웨어를 만들어 각 층간

격에 대한 면적오차를 구하여 표면거칠기 값과 비교하였다.

Table 1 Conditions of injection

Tip No.	Road Width(mm)	Slice Interval(mm)
12	0.3150	0.2540
16	0.4070	0.2540
12	0.5150	0.2540
16	0.8020	0.2540

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

각 조건에 의해 만들어진 시작품을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 각 조건에서의 표면의 표면거칠기를 측정하여 얻어진 값을 그래프로 나타내었다.

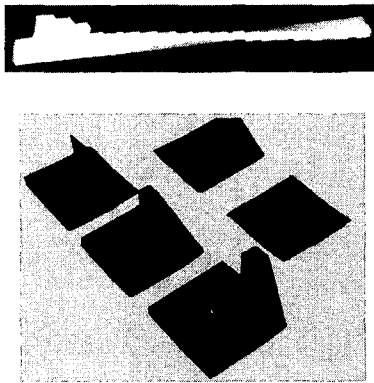


Fig. 5 Photo of Produced Parts

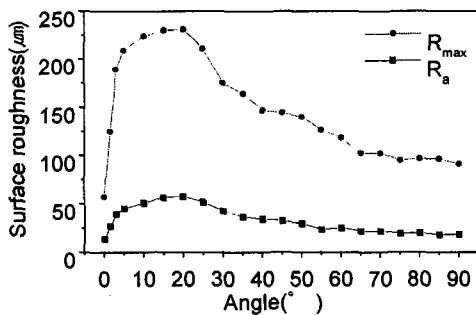


Fig. 6 Surface roughness at various build orientations
(Road Width 0.315, Slice Interval 0.254)

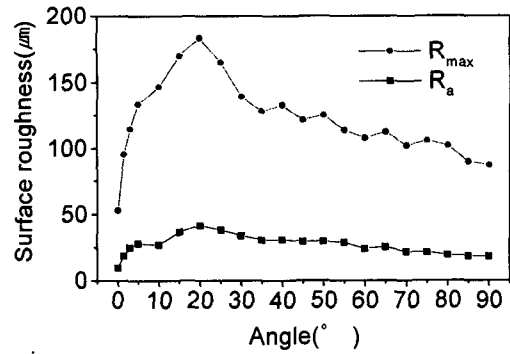


Fig. 7 Surface roughness at various build orientations
(Road Width 0.407, Slice Interval 0.254)

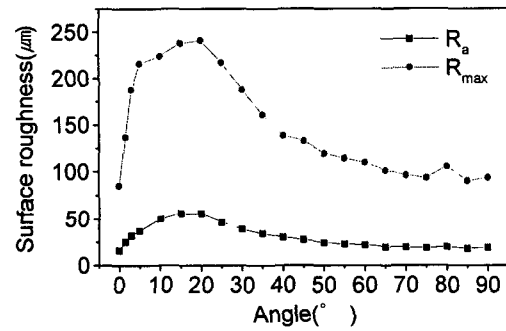


Fig. 8 Surface roughness at various build orientations
(Road Width 0.515, Slice Interval 0.254)

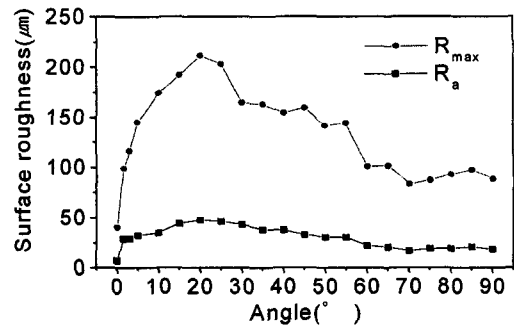


Fig. 9 Surface roughness at various build orientations
(Road Width 0.802, Slice Interval 0.254)

면적오차를 이용한 시뮬레이션 프로그램을 이용

하여 예측한 결과는 Fig. 10과 Fig. 11같이 나타났다. Fig. 10은 층간격이 0.254mm일 경우의 결과이고, Fig. 11는 층간격이 0.3556mm일 때의 결과이다.

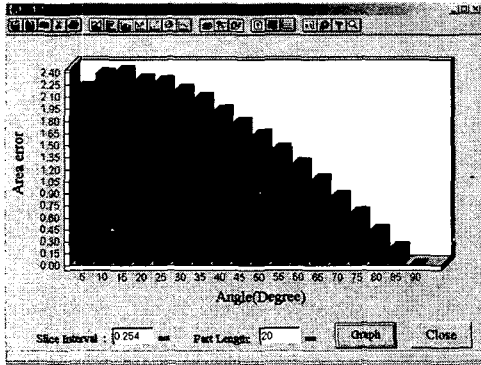


Fig. 10 Graph of Area Error Program
(Slice Interval 0.254mm)

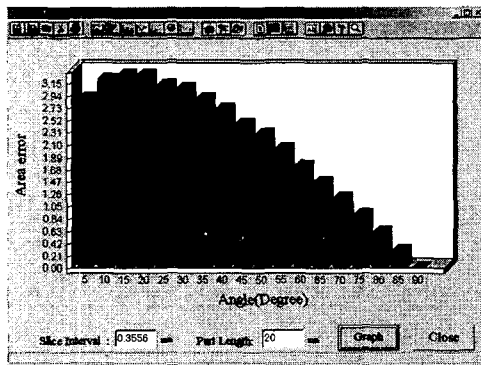


Fig. 11 Graph of Area Error Program
(Slice Interval 0.3556mm)

4.2 고찰

제품 표면의 각도변화에 따른 표면 거칠기의 변화에 대한 실험에서 일반적으로 시제품의 경사가 커짐과 동시에 표면의 상태는 좋아지고 있으며 기울기가 0인 평면의 경우가 가장 표면이 좋고, 여기서부터 15~25°의 기울기 면까지 표면상태가 좋지 못하다가 이 구간을 지나면서 표면이 점차 좋아져 90°의 기울기에서 가장 좋아진다.

이것은 평면에서 긴 봉의 형상으로 주사되는 소재들이 응고해서 발생한 엠보싱에 의한 거칠기

를 나타내는 반면, 기울기가 변하면 이 긴 봉들이 계단을 형성하여 표면거칠기에 상당한 영향을 주기 때문에 사료된다. 그리고 일정각도 이상이 되면 계단형상간의 폭이 줄어들므로 거칠기가 감소하였다.

이론적 면적오차의 모의실험에서는 앞선 실험에서는 앞 절의 실험과 완전히 일치하지는 않지만 같은 패턴을 나타내고 있다. 이는 실제 시제품의 제작에서 적용되는 모든 작업 변수가 고려되지 않은 것이 그 주요한 요인으로 작용한 것이라고 사료된다. 그러나 일반적으로 모의실험 결과가 실제 시제품의 기울기 면에서 나타나는 표면 형태를 나타내므로 시제품 표면의 예측을 위한 기초 자료로 충분히 활용가능 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 FDM장치를 이용한 쾌속조형물의 제작에서 제품의 표면과 단면 오차법의 관계를 알기 위해서 제품 표면의 경사를 바꾸어 표면 거칠기를 측정하고, 표면상태를 향상하기 위한 시제품 표면예측 프로그램의 제작을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. FDM장치에서 시제품의 경사가 0° 부터 20° 까지 각도가 커짐에 따라서 거칠기는 나빠지고, 10° 에서 20° 까지의 기울기에서 가장 나쁜 거칠기 값을 가지고, 그 이상의 각도에서는 점점 더 각이 커짐에 따라서 표면거칠기는 향상되었다.

2. 제작 방향에 따른 이론적 단면 곡선에서의 면적오차 모의실험에서는 경사각이 0° 에서 15°까지는 단면오차가 커지고 15°를 정점으로 경사각도가 높아질수록 감소하는 것으로 나타났다.

3. 이론적 단면곡선의 면적오차법에 의한 표면 거칠기의 예측이 실제 조형물의 패턴분석에서 적합한 것으로 나타났다.

제품 경사면의 표면거칠기와 이론적 단면곡선의 면적오차 모의실험 패턴은 실제 표면거칠기의 패턴과 거의 일치하므로 표면거칠기의 개선을 위하여 모델링 후 배치에 있어서 제작 방향을 고려하는 것이 중요한 것을 알 수 있으며, 이러한 제

작 방향을 자동으로 생성할 수 있는 소프트웨어의 개발을 위해 이론적인 단면곡선의 면적오차법을 이용한다면 최적의 조건을 구할 수 있었다. 이러한 방식의 도입으로 보다 나은 표면거칠기가 얻어지고 표면거칠기가 불량한 각도를 피하는 최적의 조건으로 모델을 배치하여 좋은 표면상태의 제품을 제작할 수 있게 될 것이다.

참고문헌

1. 정해도 역, "적층시스템: 3차원 카피기술의 신전개" 성안당 pp.155-161, 1996.
2. 양동렬, 손현기, "쾌속제품(RP)을 위한 쾌속조형 기술의 최근동향", 한국 정밀공학회지, 제 17권, 제 10호, pp.5-10, 2000.
3. 이은덕, "쾌속 조형 기술의 동향" 월간 프레스 기술 pp.15-28, 2001.
4. Chua chee kai and Leong kah fai, "Rapid prototyping", pp.7-9, 1997.
5. Syed H. Masood, "Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling", Rapid Prototyping Journal, Vol.2·Number 1, pp.24-33, 1996.
6. R.Ippolito, L.Luliano, and Politecnodi Torino, "Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish", Annals of CIRP, Vol.44,pp.157-160, 1995.
7. 김준안 "급속시작을 위한 광조형시스템 개발 및 성능향상에 관한 연구" 부산대학교 생산기계공학과, 박사학위 논문, 1997.
8. 하만경, 전재역, 정진서, "FDM 장치에서 주사간격과 시작품의 경사가 표면거칠기에 미치는 영향", 한국 공작기계학회, 제 10권 제 5호, pp.104-109, 2001
9. 최만성, 최배호 "LOM 시스템을 이용한 패턴제작에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제 18권, 제 3호, pp.47-52, 2000.
10. FDM 3000 Manual.