

FDM(Fused Deposition Modeling) part 의 후가공 최소화를 위한 최적성형방향 결정

안대건* (부산대학교 기계기술연구소), 김호찬(영남대 기계공학부), 양화준, 이일엽, 장태식(현대자동차 연구개발본부), 정해도, 이석희(부산대학교 기계공학부)

Determining Optimal Build Orientation in Fused Deposition Modeling for Minimizing Post Machining by Using Genetic Algorithm.

D. K. Ahn(Research Int. Mecha. & Tech., PNU), H. C. Kim(Mechanical Eng. Dept., YNU), H. J. Yang, L. Y. Lee, T. S. Jang(Pilot Cent., HMC), H. D. Jeong, S. H. Lee(Mechanical Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling (FDM) parts are made by piling up thin layers that cause the stair stepping effect at the surface of FDM parts. This effect brings about poor surface roughness of the part and requires additional post machining such as manual finishing that is detrimental to the part geometry and time consuming. Determining optimal build orientation for FDM parts can be one solution to minimize the post machining. However, by using the CAD model, calculating the optimal build orientation is impractical due to heavy computing process. In order to calculate the optimal build orientation with high speed, the surface roughness model based on measured data and interpolation is newly developed in this research. Also, the genetic algorithm (GA) is applied for acquiring reliable solution. Finally, It is verified from the test that the presented approach is very efficient for reducing the additional post machining process for FDM parts.

Key Words : Rapid prototyping(폐속조형); Rapid tooling(폐속툴링); Fused Deposition Modeling(FDM); Surface roughness(표면거칠기); Post machining(후가공); Parts orientation(제품성형방향); Genetic algorithm (유전자알고리즘)

1. 서론

폐속 시작 및 제조(Rapid Prototyping and Manufacturing ; RP&M)기술은 제작하고자 하는 부품의 삼차원 캐드(CAD) 정보를 이용하여 공정설계단계를 거의 거치지 않고, 폐적한 작업 환경에서 신속히 복잡한 삼차원 형상을 형성의 복잡성에 관계없이 제작할 수 장점을 가지고 있다. 따라서 제품수명 주기가 극히 짧아지고 있는 최근의 제조산업 상황에 보다 유연하게 대응할 수 있는 기술로 각광을 받고있다[1]. 폐속조형기술은 사용되는 재료의 특성상 지금까지 주로 설계 평가나 기능성 검토를 위한 시작품 제작에 주로 한정되어 사용되어 왔으나 최근에는 금형(Die)제작 같은 다른 제작공정을 위한 패턴(Pattern) 제조나, 직접 몰드(Mold)와 같은 공구(tool)를 신속하게 제작하는 신속툴링(Rapid

Tooling ; RT)기술에 그 응용의 관심과 연구가 집중되고 있다.

이러한 폐속 시작 및 제조 기술은 이차원의 각 단면을 만들어 이것을 높이 방향으로 쌓아 삼차원 형상을 제작하는 적층공정을 이용하므로 대부분의 폐속조형물(Rapid Prototyping part; RP part)은 그 표면에 단차가 발생하게 되며, 이러한 현상을 계단효과(Stair stepping effect)라 한다. 계단효과는 폐속조형장치로부터 부품 제작시 표면거칠기를 악화시키는 가장 큰 원인이다. 적층두께가 1mm 인 경우, 계단현상으로 폐속조형물 표면거칠기는 표면경사각도에 따라 수십 마이크로미터 수준에 이른다. 이것은 금형제작 등과 같은 제조기술과 관련된 폐속조형기술의 동시공학적인 응용인 폐속툴링 기술의 적용에서 그 잠재적인 많은 유용성을 감소시킨다. 우수한 표면품질을 가지는 폐속조형물을 얻기 위하여 폐속조

형물 제작 후 사상작업과 같은 추가적인 후가공이 필요한데 이것은 수작업에 의한 많은 시간과 비용을 야기시킨다.

폐속조형물 제작시 입력이 되는 삼차원 CAD 모델로부터 단면의 정보를 생성하기 위해서는 먼저, 각 단면 층들을 쌓아 나갈 성형방향(Build orientation)의 선정이 필요하다. 일반적인 경우 성형방향은 폐속조형장비 운용자의 경험에 의해 결정되고 있다. 그러나 성형방향은 폐속조형물의 정밀도, 성형시간 그리고 후처리 공정에 영향을 미치는 매우 중요한 공정변수다[2]. 따라서 최적의 폐속조형물 성형방향을 선정하는 기술개발이 필요한데 이와 관련된 기존 연구들의 대부분은 광조형장치(Stereolithography apparatus ; SLA)에서 제작된 광조형물(SL part)을 대상으로 주로 성형시간과 표면거칠기 등의 비용관계를 산출하여 성형방향을 결정하는 방안을 제시하였다[3],[4],[5]. 그러나 많은 계산시간과 보다 복잡한 형상에 대한 최적성형방향 결정에는 문제점들을 가지고 있다.

본 연구에서는 폐속조형물의 후가공을 줄이기 위하여, 파트 제작 실패율이 적고, 파트 제작후 냉각이나 세척과 같은 후공정을 필요치 않으며, ABS계 재료의 사용으로 우수한 도장성을 가지며, 또한 양호한 접착성 등으로 사이즈가 큰 파트를 제작할 수 있는 장점을 가진 폐속조형기술인 용착조형공정(FDM : Fused Deposition Modeling)으로 만들어진 FDM 파트를 대상으로 후가공을 최소화하기 위한 최적성형방향 결정에 관한 방안을 제시한다. 즉, 요구 표면거칠기를 기준으로 후가공 대상 면적을 최소로 하는 FDM 파트의 최적 성형방향을 결정하는 것이다. 측정데이터(Mmeasured data)와 보간법(Interpolation)을 기반으로 한 새로운 표면거칠기 모델을 제안한다. 이것은 광조형물의 비선형적 표면거칠기 분포 특성을 잘 반영하고, 표면거칠기를 줄이기 위한 성형방향결정시 정확하고도 빠른 연산 특성을 가진다. 그리고 성형방향 계산에서 신뢰성 있는 해를 얻기 위하여 유전자알고리즘(Genetic algorithm)을 사용한다. 마지막으로 제안된 방안이 매우 효율적임을 실험결과로부터 검증한다.

2. FDM part의 표면거칠기 특성 분석

2.1 폐속조형물의 표면거칠기 특성

계단현상에 의한 폐속조형물의 표면거칠기 분포에 영향을 미치는 인자들로써 적층두께(Layer Thickness), 성형 형태(Build style), 사용되는 수지 특성, 표면경사각도(Surface angle), 경화윤곽(Layer profile) 등 여러 가지가 있다. 일반적으로 제작(Build)이 끝난 광조형물의 표면은 Fig. 1에 보이는

것처럼 계단형상을 가진다. 이처럼 간단화된 표면 윤곽형상으로부터 표면 경사각도에 따라 계산된 이론적인 표면거칠기 값의 분포는 Fig. 2와 같다. 여기서 적층두께는 0.1mm, 경화윤곽각도는 5도이다. 그리고 원뿔형, 원통형 등고 같은 경화윤곽 형태에 따라 각도별로 광조형물 표면거칠기 분포도 약간씩 달라진다. 또한, 성형형태에 따라서도 거칠기 분포 특성 역시 모두 다르다. 실제, 이들 표면거칠기 결정 인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 광조형물의 표면거칠기에 대한 정형화된 수학적 모델을 만드는 것은 어렵다. 본 연구에서는 우선 FDM part의 성형방향결정을 위하여 보다 정확하고 빠른 연산 특성을 가지는 FDM part에 대한 새로운 표면거칠기 모델 개발하여 사용한다.

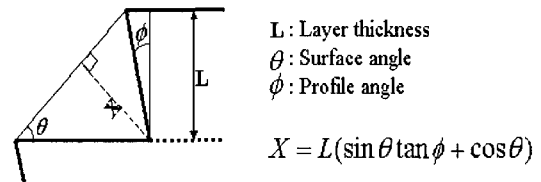


Fig. 1 Surface profile schema of SL part surface

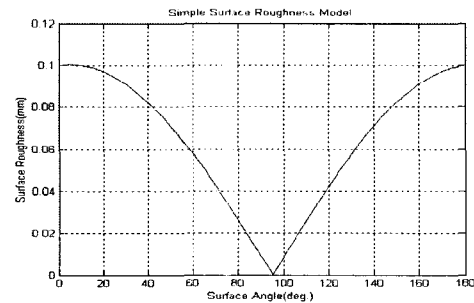


Fig. 2 Simple surface roughness model for SL part

2.2 FDM part의 표면거칠기 특성

FDM 파트의 일반적인 표면 형태는 Fig. 3(b)에 보이는 것처럼 압출성형된 비드 (Extruded beads) 모양으로 Fig. 3(a)의 광조형물 표면과 비교하여 다소 완만한 커스프(Cusped grooves)들을 가지고 있다.



Fig. 3(a) SL part surfaces

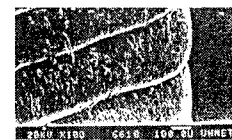


Fig. 3(b) FDM part surfaces

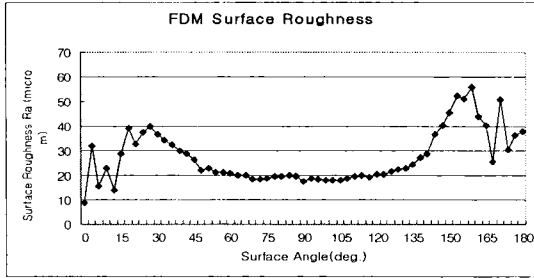


Fig. 4 Measured surface roughness data of FDM part

FDM Maxum RP 장비에서 0.254mm의 적층 두께로 제작한 FDM 파트를 Fig. 5와 같은 측정용 파트를 별도로 제작하여 3도씩 표면경사각도에 따라 기울진 평면상에서 측정된 표면거칠기 값의 분포를 위 Fig. 4에 보여주었고 있다. 표면경사각도가 약 50~130도 범위에서 상대적으로 양호한 표면거칠기 값을 가진다.

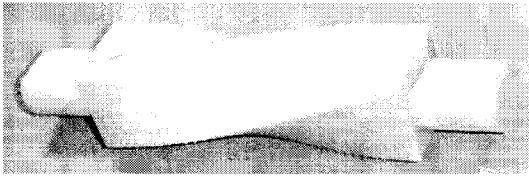


Fig. 5 Test part for measuring surface roughness data

2.3 FDM part의 표면거칠기 계산

임의의 표면경사각도에서 정확한 표면거칠기 값을 얻기 위하여 우선 별도로 제작된 시험편의 측정으로부터 얻어진 표면거칠기 데이터를 기준으로 내삽법으로 보간하여 표면거칠기를 계산한다. 즉, 성형방향이 \mathbf{b} 인 경우 표면경사각이 θ_i 인 면의 평균 표면거칠기값 $R(\theta_i, \mathbf{b})$ 은 이미 측정된 값으로부터 얻어진 이웃의 거칠기값 $R(\theta_p)$ 와 $R(\theta_n)$ 으로부터 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$R(\theta_{i,b}) = R(\theta_p) + \frac{R(\theta_n) - R(\theta_p)}{\theta_n - \theta_p} \times (\theta_{i,b} - \theta_p) \quad (1)$$

$$R_b = \frac{\sum_i R(\theta_{i,b}) \times a_i}{\sum_i a_i} \quad (2)$$

또한 제작하고자 하는 폐속제품의 CAD 모델 즉 STL 파일에 대하여 성형방향이 \mathbf{b} 일 때, 전체표면의 평균표면거칠기 R_b 는 STL 파일을 구성하는 임의의 삼각평면 i 의 면적을 a_i 라 하면 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)과 식 (2)는 삼각함수를 포함하지 않아 연산 속도가 매우 빠르다. 이것은 또한 측정된 데이터 사용으로 파트의 비선형적 표면거칠기 분포 특성을 그대로 반영하므로 임의의 표면경사각

도에서 파트의 표면 평균거칠기를 빠르고 정확하게 계산할 수 있다. 그리고 표면거칠기와 연관된 폐속조형 변수의 최적화에 이용될 때 빠른 연산 특징으로 실용적 가치를 가진다.

3. 최적성형 방향 결정

3.1 후가공 대상 면적 계산

최적의 성형방향인 폐속조형 장치에서 오랜 제작시간을 요하는 경우도 있으나, 폐속조형물 표면 품질 개선을 위하여 수작업으로 이루어지는 후가공에 의해 소요되는 작업 시간과 비용이 일반적으로 더 크다. 따라서 본 연구에서는 후가공 대상 면적 최소화를 목적함수로 정한다. 임의의 성형방향 \mathbf{b} 로 제작된 FDM 파트에서 후가공이 필요한 전체면적은 해당 파트의 STL 파일을 구성하는 임의의 삼각평면 i 의 설계상 요구 거칠기값 R_i 일 때 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$A_b = \sum_i (s_{i,b} \times a_i) \quad \text{where, } s_{i,b} = \begin{cases} 0 & \text{if } R(\theta_{i,b}) \leq R_i \\ 1 & \text{if } R(\theta_{i,b}) > R_i \end{cases} \quad (3)$$

3.2 유전자 알고리즘을 이용한 성형방향 최적화

FDM 파트의 후가공 대상 면적 최소화를 위한 최소의 평균표면거칠기 값을 갖는 성형방향 탐색에서 모델의 형상이 복잡할수록 많은 국부 최적해를 가진다. 유전자알고리즘은 많은 세대를 거쳐 적합도 통계치(Fitness statistics)를 축적(Accumulating)함으로써 광역탐색이 가능하며 국부 최적해가 많은 문제의 풀이에 보다 유리하다. 따라서 식 (3)과 같이 나타나는 후가공 면적을 평가함수로 하고 이를 최소화하는 최적화된 해를 구하기 위하여 본 연구에서는 유전자알고리즘을 이용한다.

3.3 유전자 알고리즘 적용

FDM 파트의 후가공면적 최소화를 위한 탐색공간(Search space)은 성형방향벡터 \mathbf{b} 를 회전하여 얻을 수 있는 무한히 많은 방향벡터들이다. 본 연구에서는 z 축 방향 단위 벡터를 먼저 x 축에 대하여 θ_x 만큼 회전시킨 후 y 축에 대하여 θ_y 만큼 회전하여 얻을 수 있는 벡터로 탐색공간을 취한다. 따라서, 염색체(Chromosome) 구성은 전위는 x 축 방향 회전량으로 0에서 360 사이의 부동소수(Floating point number)를 후위는 y 축 방향 회전량으로 0에서 180 사이의 부동소수를 사용하여 정밀도(Resolution) 0.001로서 각각 4 바이트(Byte)로 구성한다. 선택 메커니즘(Selection mechanism)은 탐색의 안정성을 높이고 해의 수렴속도를 가속시키기 위하여 정상상태선택(Steady-state selection)을 사용한다. 이

정상상태유전자알고리즘은 다음 세대를 생성 할 때 교배(Crossover)와 돌연변이(Mutation) 연산을 통해 일정한 비율의 유전자를 생성하여 부모 세대에 삽입한 후에 이들 전체에서 가장 열성인 유전자들을 제거하여 인구(Population)를 일정하게 유지하면서 다음 세대를 생성하는 방식으로서, 부모세대와 자식세대에 중첩(Overlap)되는 유전자가 존재하게 된다. 그리고 탐색의 다양화를 위한 균일교배(Uniform crossover)와 균일돌연변이(Uniform mutation) 비율(Rate)을 본 연구에서는 여러 번의 실험으로 각각 0.9 와 0.01 로 하고, 개체크기(Population size)는 100 으로 하여 개체군 초기화는 무작위로 생성하고, 세대횟수(Number of generation)는 1000 으로 한다.

4. 실험 및 검토

본 연구에서 제시된 방안을 실제 구현하기 위하여 Window XP 환경에서 작동하는 소프트웨어를 Visual C++를 이용하여 개발하였다. 결과의 화면출력을 위하여 그래픽라이버러리인 OpenGL 을 이용하였다. Layer thickness, 모델의 원하는 최종 거칠기, 인구, 돌연변이 비율, 교배비율, 세대횟수 등을 사용자가 입력하여 사용할 수 있도록 제작하였다.

제안된 방안의 검증을 위하여 우선 최적의 성형 방향을 미리 알 수 있는 Fig. 6 (a)의 타원체에 대하여 개발한 프로그램을 수행시켜 보았다. 층두께는 0.245mm, 요구 거칠기는 0.02mm 로 하였다. 적용결과 Fig. 6 (b)에 나타난 바와 같이 타원체의 장축이 성형방향(z-axis)이 됨으로써 최소의 후가공이 요구되는 성형방향을 제대로 구할 수 있음을 확인하였다.

그리고, 실제 모델을 대상으로 본 연구를 검증하기 위하여 자동차 변속장치(Transmission)의 손잡이(Knob)와 덮개(Cover) 모델에 대하여 적용한 결과를 성형방향은 Fig. 7, 그리고 연산시간과 후처리 대상 면적계산결과는 Table 1 에서 각각 보이고 있다.

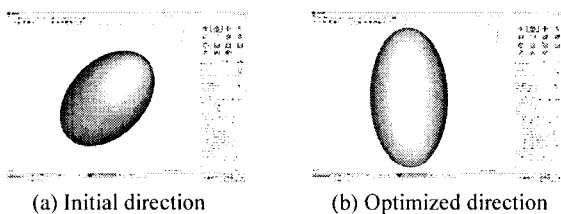


Fig. 6 Verification for optimal build direction by oval

	Knob	Cover
Time(sec)	25.71	4.9
Initial area(mb ²)	37.49	287.83
Final area(mb ²)	25.32	139.14

Table 1 Result of computing time and post-machining area

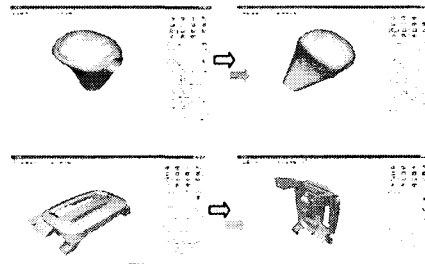


Fig. 7 Optimal build direction for car transmission part

5. 결론

본 연구는 FDM 파트의 후가공을 줄이기 위하여 최소의 표면거칠기를 갖는 최적의 성형방향을 자동으로 결정하는 방안을 제시하였다. 측정데이터와 보간법을 기반으로 한 신속 정확하게 폐속 조형물의 표면거칠기를 계산할 수 있으며, 후가공을 최소로 하는 목적함수를 유도하고, 이것들로부터 유전자알고리즘을 적용하여 후가공을 최소로 하는 성형방향을 결정하는 방법을 개발하였다. 그리고 본 연구가 매우 효율적임을 개발된 프로그램의 수행결과로부터 검증하였다.

후기

본 연구는 한국과학기술평가원의 주문적응형패속제품개발시스템사업의 과제(2000-J-RP-01-B-02-A3)로 수행되었습니다. 관계자 분들에게 감사 드립니다.

참고문헌

1. Jacobs, P.F., 1996, Stereolithography and other RP & M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, SME, Dearborn, MI, ISBN 0-07-032433-6.
2. Reeves, P.E. and Cobb, R.C., 1997, Reduction the surface deviation of stereolithography using in-process technique, Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No 1, pp. 20~37.
3. P. Lan, S. Chou, L. Chen and D. Gemmill, 1997, "Determination of Fabrication Orientations for Rapid Prototyping with Stereolithography Apparatus," Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 1, pp. 53~62.
4. D. T. Pham, S. S. Dimov and R. S. Gault, 1999, "Part Orientation in Stereolithography," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 9, pp. 674~682.
5. Kim, H.C., Ahn, D.K., and Lee, S.H., 2002, Reduction of Post-processing Time for Stereolithography Parts by Selection of Build Direction, Proceedings of The 35th CIRP International Seminar on Manufacturing, Seoul, Korea, 13-15 May.