

광조형물의 표면 거칠기 저감을 위한 성형방향의 선정

안대건, 김호찬(부산대학교 대학원 지능기계공학과), 이석희(부산대학교 기계공학부)

Selection of Build Orientation for Reducing Surface Roughness with Stereolithography Parts

Dae-Kun Ahn, Ho-Chan Kim(Dept. of mechanical and intelligent systems engineering, Pusan National University), Seok-Hee Lee(School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

ABSTRACT

In general, stereolithography parts is not suitable for master pattern. Because of its bad surface roughness. Therefore, To reduce roughness it requires post-process that is depending on user skill and takes long time to do. This study aims to develop an expert system which can select an optimal build orientation, reduce roughness and shorten post-processing time. Genetic Algorithm was introduced for optimization. A simplified computation model was developed for real-time response. For accurate roughness estimation, interpolation of experimental data was implemented.

Key Words : Rapid prototyping(쾌속조형), Surface roughness(거칠기), Optimization(최적화), Build orientation(성형방향), Genetic algorithm(유전알고리즘), Rapid product development(쾌속제품개발)

1. 서론

새로운 제품의 개발기간을 단축하기 위하여 사용되는 쾌속조형장치(rapid prototyping apparatus)는 적층조형기법(layered manufacturing technique)을 바탕으로 하고 있다. 적층조형기법은 3차원적인 형상을 여러 개의 단면 층(sliced layer)으로 나누어 한 층씩 조형하여 쌓는 방법이다. 따라서 쾌속조형물의 각 단면 층 사이에는 단차가 발생하게 되며 이러한 현상을 계단효과(stair stepping effect)라 한다. 계단효과는 광조형장치(stereolithography apparatus)와 같이 소재의 입도(粒度)가 매우 작고 레이저가 조사(照射)된 영역만 경화되는 광조형물(stereolithography part)의 표면 거칠기를 악화시키는 가장 큰 원인이다.

3차원 CAD 모델로부터 단면의 정보를 생성하기 위해서는 단면 층을 쌓아나갈 성형방향(build orientation)의 선정이 필요하다. 일반적인 경우 성형방향은 쾌속조형 장비운영자의 경험에 의해 선정되고 있다. 그러나 성형방향은 쾌속조형물의 정밀도는 물론 성형시간과 성형비용 등에도 영향을 미치는 매우 중요한 공정변수이다. 따라서 성형방향을 자동으로 선정하는 전문가 시스템의 개발 요구된다.

일반적으로 쾌속조형물은 금형제작을 위한 마스

트모델(master model)로 직접 이용되기에는 표면 거칠기가 수십 마이크로미터 수준이므로 부적격하다. 따라서 표면 거칠기를 저감(低減)하기 위한 후가공이 요구되는데 이것은 작업자의 숙련도에 매우 민감하고 많은 시간을 소요한다.[1]

본 연구는 광조형물의 후가공 시간을 감소시키거나 또는 제거하기 위하여 최소의 표면거칠기를 갖는 성형방향을 자동으로 선정하는 전문가 시스템을 개발하기 위하여 수행되었다. 최적화를 위하여 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용하였으며, 실시간 응답이 가능한 성형방향선정을 위하여 단순화된 연산모델을 개발하였으며, 비선형적 재료거동과 각 장비에 따른 특수한 사용환경하에서도 정확한 거칠기 예측을 위하여 실험데이터를 이용한 내삽법(內插法)을 이용하였다.

2. 관련연구

계단현상은 광조형물의 표면 거칠기를 결정하는 주 원인이며, 이를 줄이기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 각 단면 층의 높이를 줄이는 방법이 거칠기 저감에 가장 효과적이나 성형시간이 증가되고 새로운 소재의 개발이 필요하다.[2] 단차 부위에 수

지를 발라 한번 더 경화시키는 miniscus smoothing 등과 같이 공정개선을 통한 방법도 연구 되었으나 추가적인 공정 역시 성형시간을 증가시킨다.[3] 형상에 따라 가변적인 최적 층 두께에 의해 단면화함으로써 STL 파일로 변환시의 오류와 함께 계단현상을 특정한 수준에서 유지하는 소프트웨어적인 접근 등이 수행되었다.[4] 이들 선형연구들은 성형시간이 증가되거나 성형공정의 안정성이 낮아지는 단점이 있다.

최적의 성형방향을 구하는 연구는 다음과 같다. STL 포맷으로 변환되기 이전의 CAD 데이터로부터 모델링에 사용된 방향 중에서 최적의 조형방향을 얻고자 하였다.[5] 조형 정밀도와 조형 시간을 서로 다른 목적함수로 간주하여 두개의 목적함수를 최적화 하는 방법도 제안되었다.[6] 표면품질, 조형시간, 지지대 중 하나의 인자를 선택하여 이를 convex hull 을 구성하는 모든 면의 법선벡터로부터 선정하는 연구도 수행되었다.[7] 국내에서는 성형방향의 결정 기준으로서 성형시간, 계단효과 그리고 지지대의 투영면적을 이용하였으며, 조절 가능한 층 두께 모델을 사용하여 계단효과와 성형시간을 구하였다.[8] 이러한 연구들은 단순한 거칠기 모델을 사용하여 실제 장비나 소재의 특성을 잘 반영하지 못하고, 특정한 방향만을 대상으로 최적방향을 선정하는 단점이 있다.

3. 성형방향의 선정

3.1 거칠기 모델

광조형물의 표면 거칠기는 단면데이터로부터 한 층씩 심형하여 쌓아 올릴 때 발생하는 계단현상에 따라 결정된다. 이러한 거칠기의 모델은 경화모델에 의하여 달라진다. 일반적으로 많이 사용되는 경화모델을 Fig. 1 에 나타내었다. 가장 많이 사용되는 경화모델은 원기둥(Cylinder)모델로서 90 도로 깎인 단차를 갖는다. 원뿔대(truncated cone)모델은 레

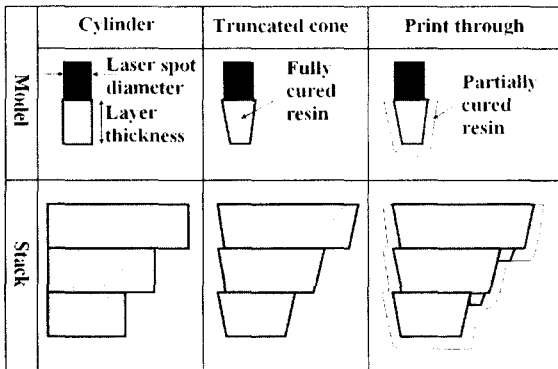


Fig. 1 Photopolymerization models and stack

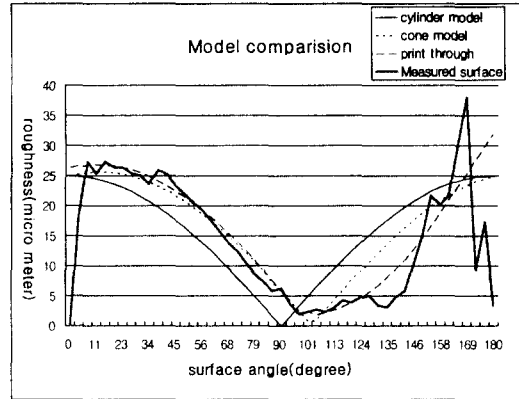


Fig. 2 Comparison of models with empirical data.

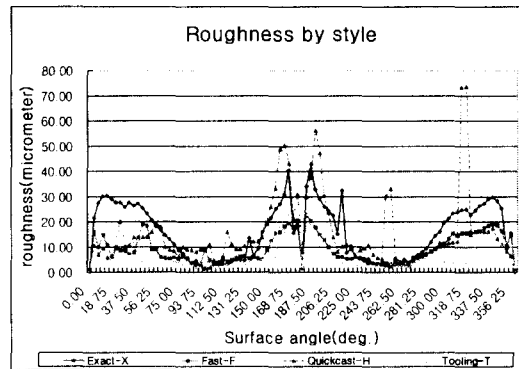


Fig. 3 Roughness by various build style.

이저 빔이 수지 속에 투과될 때 강도가 Lambert-Beer 법칙에 따라 감쇠할 때의 경화형상을 모델링한 것이다. Print through 모델은 완전경화된 수지 인근의 수지들이 반경화상태에 있으므로 다음 층의 경화시에 조금의 에너지를 더 받으면 경화되는 현상을 추가한 모델이다.

Fig. 2 에는 전술한 각 모델들과 실험데이터를 비교한 것을 보인다. 이론 모델들은 CAD 데이터상의 면의 각도인 surface angle 이 90~140 도 사이인 면의 경우에 실험값과 큰 차이가 발생하게 되며, 이 구간이 거칠기의 저감이 가능토록하는 영역이다

Fig. 3 은 SLA350 에서 SL5510 수지를 사용하여 각기 다른 4 개의 build style 로 성형한 경우의 거칠기를 보인다. 이때 각 style 별 층 두께로는 Exact-X 는 0.15 mm, Fast-F 와 Quickcast-H 는 0.1 mm 그리고 Tooling-T 는 0.05 mm 을 각각 사용하였으며, 모든 조형 변수는 기본값을 사용하였다. 이 결과로 동일한 장비에서 동일한 수지를 사용하더라도 build style 에 따라 거칠기의 분포가 달라짐을 알 수 있으며, 장비의 레이저 출력과 수지의 종류 및 조형 변수가 달라지면 거칠기 분포 또한 달라진다. 따라

서 본 연구는 실험부품의 제작 및 측정을 통해 각 장비, 소재 및 조형변수에 따른 거칠기 분포를 계산하는 모델을 제안한다. 정해진 각도(본 연구에서 10 도)에 별로 거칠기 정보를 입력하여 사이값은 내삽법으로 연산하는 거칠기 모델이다. 주어진 성형 방향 \mathbf{b} 에 대한 평균 거칠기 R_a 는 면 i 의 surface angle θ_i 의 거칠기를 $R(\theta_{i,b})$ 라 하고 면적을 a_i 라 하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ra_{\mathbf{b}} = \frac{\sum_i R(\theta_{i,\mathbf{b}}) \times a_i}{\sum_i a_i} \quad (1)$$

3.2 유전알고리즘을 이용한 성형방향 선정

식(1)과 같이 나타나는 성형물의 평균 거칠기를 평가함수로 하는 성형방향의 최적화를 위하여 유전알고리즘을 이용하는 것이 적절하다. 유전알고리즘은 국부 최적해가 많은 문제의 풀이에 특히 유용하며, 성형방향에 따른 평균 거칠기는 모델의 형상이 복잡할수록 많은 국부 최적해를 가진다.

탐색공간은 성형방향벡터(z 축 방향)를 회전하여 얻을 수 있는 무한히 많은 벡터들이다. 본 연구에서는 z 축 방향 단위 벡터를 먼저 x 축에 대하여 θ_x 만큼 회전시킨 y 축에 대하여 후에 θ_y 만큼 회전하여 얻을 수 있는 벡터로 탐색공간을 나타내었다. 따라서, 유전자(chromosome)는 첫째 유전인자(gene)로 0 에서 359 의 정수를 두번째 유전인자로 0 에서 179 의 정수를 이용하였다.

탐색의 안정성을 높이고 해의 수렴속도를 가속시키기 위하여 Fig. 4 에 보인 정상상태유전알고리즘

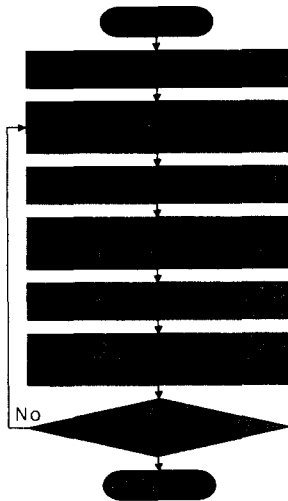


Fig. 4 Steady state genetic algorithm

(steady state genetic algorithm)을 이용하였다. 정상상태 유전알고리즘은 다음 세대를 생성 할 때 교배(crossover)와 돌이변이(mutation) 연산을 통해 일정한 비율의 유전자를 생성하여 부모 세대에 삽입한 후에 이들 전체에서 가장 열성인 유전자들을 제거하여 인구(population)을 일정하게 유지하면서 다음 세대를 생성하는 방식으로서, 부모세대와 자식세대에 중첩(overlap)되는 유전자가 존재하게 된다. 본 연구에서는 교배를 위한 선택 알고리즘으로 룰렛휠 선택(roulette wheel selection)방법을 사용하였다.

산업현장에서 일반적으로 사용되는 STL 파일은 수만 개에서 수십만 개의 삼각형으로 이루어져 있다. 따라서, 식(1)의 평가함수를 평가하기 위해서는 상당히 오랜 시간이 소요된다. 본 연구에서는 유전자의 평가시간을 줄이기 위하여 동등한 거칠기를 갖는 단순화모델을 이용할 것을 제안한다. 단순화모델을 생성하기 위하여 먼저 식(2)를 이용하여 면들의 그룹을 설정한다. 이때 i, j 는 면의 인덱스이며, N_i, N_j 는 두 면의 법선벡터이며, θ_{ij} 는 두 면의 사잇각이며, θ_{group} 은 두 면이 하나의 그룹으로 선정될 수 있는 최소 사잇각이다.

$$\left| \vec{N}_i - \vec{N}_j \right| = 1 \cdot \theta_{i,j} \leq \theta_{group} \quad (2)$$

$$N_{equ} = \frac{\sum_i a_i \times N_i}{\sum_i a_i} \quad (3)$$

이후 그룹화된 면들의 면적을 합하여 하나의 면으로 취급하며 그룹의 법선벡터는 식(3)과 같이 면적의 효과를 고려하여 선정한다. 마지막으로 그룹의 면적 중에서 가장 큰 그룹의 면적에 비해 일정한 비율(수백배에서 수천배) 이하의 면적을 갖는 그룹은 삭제한다. 이상과 같은 방식으로 만들어진 단순화 모델은 비교적 정확하면서 매우 빠른 시간 내에 유전자의 평가가 가능해 지도록 하므로, 더 많은 성형방향에 대한 최적해의 탐색이 가능해 지도록 하며, 정밀도와 연산속도 간의 trade-off 이다.

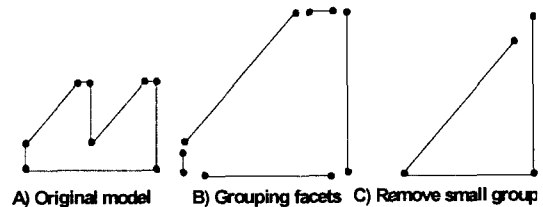


Fig. 5 Equivalent roughness simplified model

4. 적용예

본 연구를 검증하기 위하여 Visual C++과 OpenGL 을 이용하여 최소 거칠기를 갖는 성형방향을 자동으로 선정하는 소프트웨어를 개발하였다. 거칠기 모델을 활용하기 위한 테스트 부품과 이를 측정하여 입력한 다이얼로그 창을 Fig. 6 에 보인다. 실험을 위한 모델은 연료통, 손잡이, 그리고 종

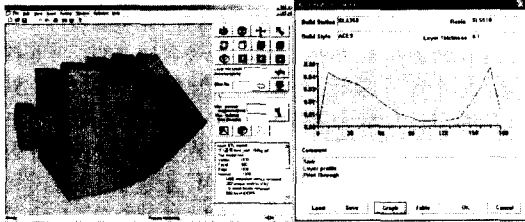


Fig. 6 Roughness test part and input dialog

이다. 이들 모델은 형상이 서로 크게 다르지만 Table 1 에 나타낸 것 같이 STL 모델과 등가모델의 면 갯수 비가 매우 적음을 알 수 있다. Table 2 에는 유전알고리즘을 적용하여 최적해를 찾은 것을 보인다. 이 실험에서 장비는 SLA350 을 이용하였으며, Exact-X build style 을 이용하였고, 수지는 SL5510 을 이용하였으며, 층두께는 0.01 mm 를 사용하였다. 유전알고리즘은 overlap population 으로 50%, 교배 70%, 돌연변이 1%, population 50 개 그리고 100 세대 까지 진행하도록 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 광조형물의 후가공 시간을 감소 시키거나 또는 제거하기 위하여 최소의 표면거칠기를 갖는 성형방향을 자동으로 선정하는 전문가 시스템을 개발하였으며, 정확한 거칠기 예측방법과 효율적인 단순화 모델을 개발하였다.

Table 1 Comparison of equivalent model with STL

model	fuel box	handle	bell
number of triangle in STL	101146	147420	326746
number of initial equivalent face group	2950	3204	3899
number of final equivalent face group	48	263	2400
ratio(triangle/face)	0.05%	0.18%	0.73%
total triangle area(mm ²)	242822	164311	536172
total equivalent face area(mm ²)	186017	163705	495564
area ratio	76.6%	99.6%	92.4%

Table 2 Comparison for effectiveness

model		fuel box	handle	bell
STL	computati on time	2hr7min 9sec	3hr5min 11sec	6hr49min 15sec
	minimum roughness	10.8 μm	7.99 μm	11.6 μm
equiva -lent model	computati on time	8sec	20sec	1min 18sec
	minimum roughness	10.4 μm	7.98 μm	11.5 μm
compa -rison	time ratio	0.10%	0.18%	0.30%
	roughness difference	0.4 μm	0.01 μm	0.10 μm

참고문헌

1. Chadwick, A.L., "Surface finishing of stereolithography models used as patterns for rapid tooling techniques," BEng dissertation, Department of Manufacturing Engineering, University of Nottingham, June 1996.
2. Paul F. Jacobs, "Rapid prototyping & manufacturing," Society of Manufacturing Engineers, pp. 32-52, 1992.
3. Philip E. Reeves and Richard C. Coob, "Reducing the surface divatioin of stereolithography using in-process techniques," Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 20-31, 1997.
4. 최광일, 이관행, "등고선 간격과 수직방향 특징 선을 이용한 RP 파트의 adaptive 단면화 방법," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, pp. 15-21, 1998.
5. D. T. Pham, S. S. Dimov and R. S. Gault, "Part Orientation in Stereolithography," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 9, pp. 674-682, 1999.
6. W. Cheng, J. Y. H. Fuh, A. Y. C. Nee, Y. S. Wong, H. T. Loh and T. Miyazawa, "Multi-objective optimization of part building orientation in Stereolithography," Rapid Prototyping Journal, Vol. 1, No. 4, pp. 12-23, 1995.
7. P. Lan, S. Chou, L. Chen and D. Gemmill, "Determination of fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus," Computer-Aided Desing, Vol. 29, No. 1, pp. 53-62, 1997.
8. 허정훈, 이건우, "SLA 를 이용한 신속 시작작업 에서 최적 성형방향의 결정," 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 163-173, 1996.