부품방향의 선정을 통한 광조형물의 후가공면적 최소화

김 호 찬* · 이 석 희†

(2002 년 3 월 29 일 접수, 2002 년 9 월 12 일 심사완료)

Minimization of Post-processing area for Stereolithography Parts by Selection of Part Orientation

Ho-Chan Kim and Seok-Hee Lee

Key Words : Rapid Prototyping(쾌속조형), Post-process(후처리), Stereolithography(광조형), Build Orientation(성형방향), STL(쾌속조형 표준 파일형식), SLA(광조형장치)

Abstract

The surfaces of prototypes become rough due to the stair-stepping which is the inevitable phenomenon in the Rapid Prototyping. In real workshop, the stair-stepping is removed in the post-processing which is generally required if the prototypes are not used only for the verification of feature. The grinding, coating, or the composition of them is a main operation in post-processing in which lots of costs and long build time are needed. The solution is proposed to increase the efficiency of rapid prototyping by minimizing or removing the regions for post-processing. The factors to cause the surface roughness and their effects are analyzed through the experiments. Software modules are developed to predict the surface roughness of each face in the prototyping with the result. An experimental compensation method is developed to apply the modules to various RP equipments, materials and build styles. The build direction is searched with use of genetic algorithm to maximize the total areas of the surface of which roughness is better than the user-defined value.

1. 서 론

제품의 수명주기가 짧아지고 소비자의 기호가 다양해짐에 따라 국제시장에서 경쟁력을 갖추기 위하여 시장상황 변화에 신속히 대응할 수 있고 고품질의 제품을 적기에 개발하고 양산을 수행할 수 있도록 하는 쾌속제품개발(rapid product development; RPD)의 중요성이 높아지고 있다. 쾌속제품개발이 가능하도록 하는 기술들 중 특히 쾌속조형은 3 차원 CAD 모델이 만들어진 이후에 외관형상확인, 기능성평가, 테스트 및 양산 금형 제작 등에 활용되어 신제품개발 기간을 크게 줄이는 데 활용되고 있다.

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소
E-mail : schlee@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-1476 FAX : (051)514-0685
* 부산대학교 대학원

쾌속조형 시스템은 모두 적층조형 기술을 이용한다. 이것은 얇은 두께의 2 차원적 형상들을 쌓아 올려 임의의 3 차원 형상으로 만드는 것이다. 쾌속조형의 입력정보는 3 차원 CAD 모델이며 STL 포맷이 사실상의 업계 표준이다. STL 포맷은 3 차원 형상을 여러 개의 삼각형의 조합으로 나타낸 것이다. 쾌속조형 시스템 중에서 특히 광조형 시스템은 경화와 적층을 반복하여 3 차원 형상의 부품을 제작한다. 경화는 액상의 광경화성 수지의 표면에 레이저를 조사하여 특정 모양을 갖는 고상의 2 차원 형상을 만드는 것이다. 적층은 경화된 수지를 수직 하향으로 이동시키고 그 위에 다시 특정한 두께의 새로운 액상 수지의 층을 생성하는 것이다 이렇게 경화와 적층을 반복하므로, 쾌속조형물의 각 단면 층 사이에는 단차가 발생하게 되며 이러한 현상을 계단효과(stair stepping effect)라 한다. 계단효과는 광조형장치(stereolithography apparatus)에서 광조형물(stereolithography part)의 표면 거칠기를 악화시키는 가장 큰 원인이다. 일반적인 경우에

쾌속조형물이 금형 제작을 위한 마스트모델(master model)로 직접 이용되기에는 표면거칠기가 수십 마이크로미터 수준이므로 부적격하다. 따라서 표면거칠기를 저감(低減)하기 위한 후가공이 요구되는 데 이것은 작업자의 숙련도에 매우 민감하고 많은 시간이 소요된다.[1]

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

본 연구는 성형방향의 선정을 통한 광조형물의 후가공 시간 단축을 위하여 수행되었으며, 사용자가 지정한 거칠기 조건을 만족 하는 표면적이 최대가 되도록 하는 전문가 시스템을 개발하였다. 해의 최적화를 위하여 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용하였으며, 비선형적 재료거동과 실제적 사용환경에서도 정확한 표면거칠기를 예측하기 위하여 실험데이터의 내삽법(內揷法)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 소재 및 장비의 개발이 필요하다.[2] 단차 부위에 수지를 발라 한번 더 경화시키는 meniscus smoothing 등과 같이 공정개선을 통한 방법도 연구 되었으나 추가적인 공정 역시 성형시간을 증가시킨다.[3] 레이저의 조사 각도를 경사지게 함으로써 표면거칠기를 줄이고자하는 연구가 수행되었다.[4] 형상에 따라 가변적인 최적 층 두께에 의해 단면화 함으로써 STL 파일로 변환시의 오류와 함께 계단현상을 특정한 수준에서 유지하는 소프트웨어적인 접근 등이 수행되었다.[5] 이들 선형 연구들은 부품의 표면 거칠기는 향상되지만 성형시간이 증가되거나 성형공정의 안정성이 낮아졌다.

최적의 성형방향을 구하는 연구는 다음과 같다. STL 포맷으로 변환되기 이전의 CAD 데이터로부터 모델링에 사용된 방향 중에서 최적의 조형방향을 얻고자 하였다.[6] 조형 정밀도와 조형 시간을 서로 다른 목적함수로 간주하여 두개의 목적함수를 최적화 하는 방법도 제안되었다.[7] 표면품질, 조형시간, 지지대 중 하나의 인자를 선택하여 이를 convex hull 을 구성하는 모든 면의 법선벡터로부터 선정하는 연구도 수행되었다.[8] 성형방향의 결정 기준으로서 성형시간, 계단효과 그리고 지지대의 투영면적을 이용하였으며, 조절 가능한 층 두께 모델을 사용하여 계단효과와 성형시간을 구하였다.[9] 프로토타입의 체적오류(volumetric error)를 최소화하는 성형방향을 선정하는 연구도 있었다.[10] 이러한 연구들은 단순한 거칠기 모델을 사용하여 실제 장비나 소재의 특성을 잘 반영하지 못하거나, 특정한 방향만을 대상으로 최적방향을 선정하는 단점이 있다.

모든 경우에 대하여 후가공 없이 만족스러운 프로토타입을 만들어 내는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 각종 성형변수를 인공지능을 이용하여 잘 선택함으로써, 정밀도를 향상하고자 하는 연구도 수행되었다.[11] 모델이 만들어진 후 barrel tumbling 이나 vibration finishing 등을 이용한 연삭에 관한 연구도 수행되었으나 조형물의 형상을 훼손할 수 있고, 원하는 표면 정도를 얻기에는 많은 시간이 소요된다.[12] 매우 부드러운 표면을 요구하는 모델의 경우 불가피하게 수작업에 의한 후처리를 수행할 수 밖에 없다. 이러한 쾌속조형물의 수작업 후처리에도 시간을 단축시킬 수 있는 방법이 연구 되었다.[13] 그것은 먼저 골을 매우기 위해 코팅을 한 후 다시 연삭하는 것이다.

일반적인 부품에서 모든 표면의 거칠기가 동일할 것이 요구 되지는 않는다. 즉 영역별로 요구되는 거칠기가 다르다. 다른 부품과 만나는 부분, 끼어 맞추는 부분, 슬라이딩 되는 부분 그리고 외부에서 보이므로 미관이 우수한 부분 등 한 부품에도 각기 다른 거칠기가 요구되는 경우가 많다.

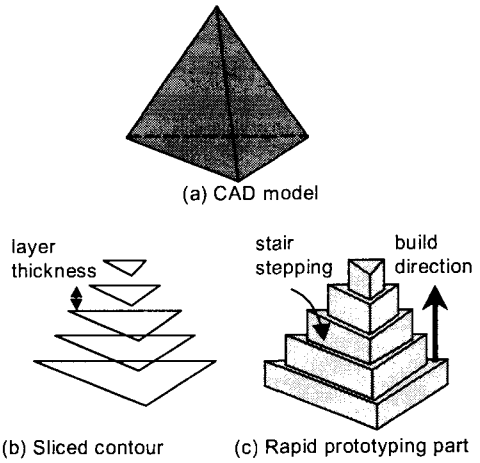


Fig. 1 Layered manufacturing example

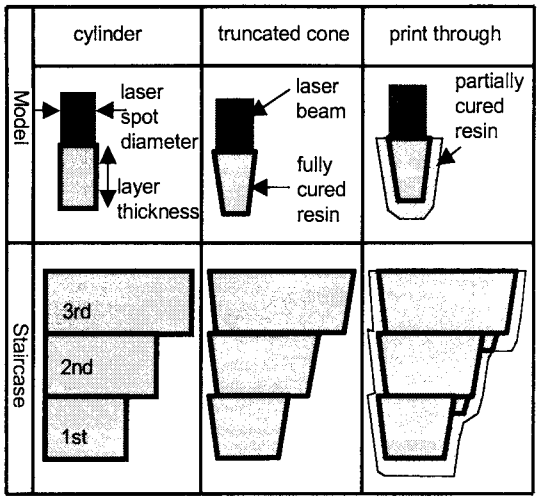


Fig. 2 Photopolymerization models

따라서 이러한 경우에 성형 방향을 적절히 선택한다면 후가공 시간의 축소에 매우 큰 효과를 얻을 수 있다. 본 연구는 후가공이 최소화되는 성형방향의 선택을 위하여 유전알고리즘을 이용하였다. 유전자에 성형방향을 인코딩하여 최소의 후가공을 요구하는 성형방향을 탐색하는 것이다.

3. 표면거칠기의 예측

3.1 계단현상

광조형장치는 Fig. 1 과 같이 적층조형방식을 사용하여 수직 상향으로 적층한다. 따라서 경사진 면의 성형시에는 계단의 모양과 같은 단차가 발생하게 되며 이를 계단현상이라 한다. 계단 현상은 광조형물의 표면 거칠기를 결정하는 가장 주된 인자이다. 이러한 광조형물의 표면 거칠기를 이론적으로 계산하고자 만들어진 경화모델들 중 자주 사용되는 것을 Fig. 2 에 정리 하였다.[2,4]

경화 모델 중 가장 단순하며 가장 자주 이용되는 것은 원기둥(cylinder)모델이다. 원형단면을 갖는 레이저 빔이 액상의 광경화성 수지에 주사되고, 경화깊이(curing depth)까지 완전히 경화된다고 가정한다. 원기둥 모델의 경우 경사면은 90 도의 사이각을 갖는 단차를 갖게 된다. 원뿔대(truncated cone)모델은 레이저 빔이 수지 속에 투과될 때 강도가 Lambert-Beer 법칙에 따라 감쇠할 때의 경화형상을 모델링 한 것이다. Print through 모델은 완전 경화된 수지 인근의 수지들이 반경화상태에 있으므로 다음 층의 경화시에 조금의 에너지를 더 받으면 경화되는 현상을 추가한 모델이다. Fig. 3

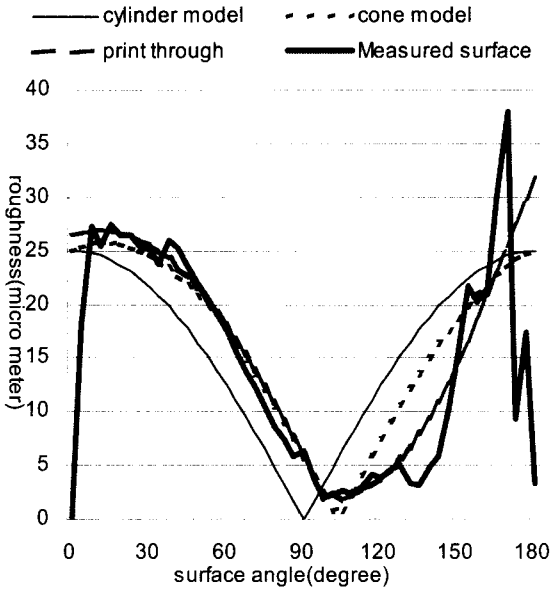


Fig. 3 Comparison of models with empirical data

에는 전술한 각 모델들과 실제 부품에서의 측정데이터를 비교한 것을 보인다. 부품의 표면상의 특정 지점에서의 surface angle 은 해당 지점에서 물체의 표면에 수직하고 물체의 외부를 향하는 법선벡터와 성형방향 벡터의 사잇각이다. 이론 모델들은 CAD 데이터상의 면의 각도인 surface angle 이 90~140 도 사이인 면의 경우에 실험값과 큰 차이가 발생하였다.

3.2 실험 결과의 보간을 통한 거칠기 예측

Fig. 4 는 SLA350 장비를 이용하여 SL5510 수지에 대하여 각기 다른 4 개의 build style 로 성형한 경우의 표면 거칠기를 보인다. 이때 각 style 과 층두께는 Exact-X 는 0.15 mm, Fast-F 와 Quickcast-H 는 0.1 mm 그리고 Tooling-T 는 0.05 mm 을 각각 사용하였다. 각 스타일에 대한 층두께 및 모든 조형 변수는 기본값을 사용하였다. 이 결과로 build style 에 따라 거칠기의 분포가 달라짐을 알 수 있으며, 각 장비의 특성과 수지의 종류 및 특정 조형변수가 달라지면 거칠기 분포 또한 달라진다. 광조형물의 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자가 많고 복잡하므로 정확한 이론 모델을 만드는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구는 테스트파트를 제작하여 실제 환경하에서의 거칠기를 측정함으로써, 각 장비, 소재 및 조형변수들의 변화에 따른 어려움 없이 거칠기 분포를 계산하는 방법을 사용한다. 정해진 각도(본 연구에서 10 도) 별로 실험에 의한

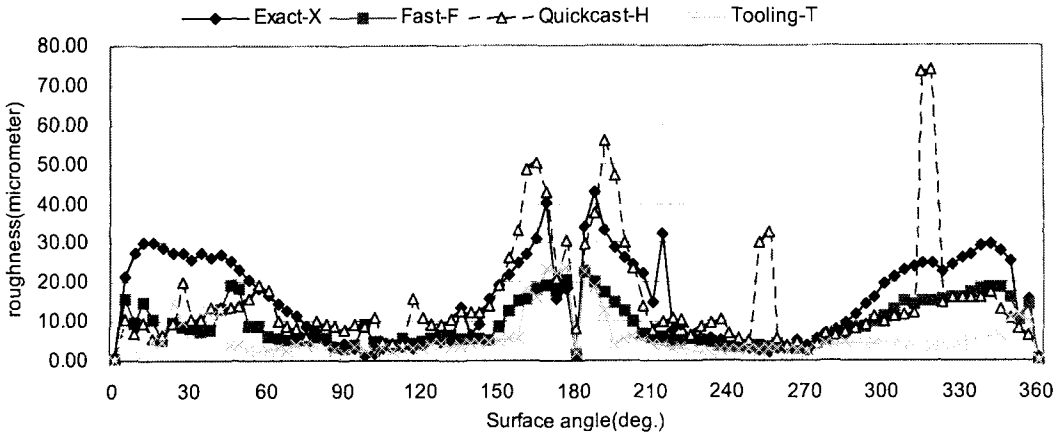


Fig. 4 Roughness by various build style

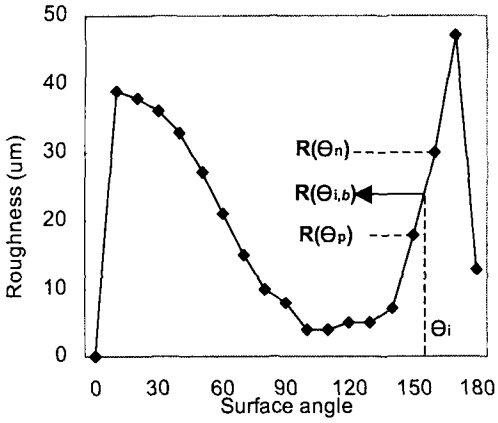


Fig. 5 Roughness interpolation

거칠기 정보를 입력하며 사이값은 내삽법으로 연산하는 거칠기 모델이다. 전형적 예를 Fig. 5 를 보인다.

성형방향이 **b** 인 경우에 surface angle 이 θ_i인 면의 거칠기 $R(\theta_i,\mathbf{b})$는 주위의 거칠기 $R(\theta_p)$와 $R(\theta_n)$로부터 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 모델의 평균 거칠기 R_b 는 면 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. 따라서 본 연구와 같이 빈번한 거칠기 연산이 필요한 작업에서는 매우 효율적이다.

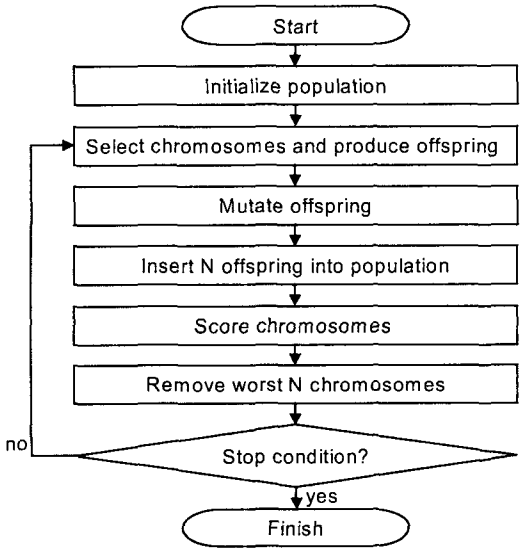


Fig. 6 Steady state genetic algorithm

4. 후가공 면적의 최소화

4.1 유전알고리듬을 이용한 성형방향의 최적화

임의의 성형방향 **b** 로 제작된 프로토타입의 후가공이 필요한 면의 전체면적은 면 i 의 설계상 요구 거칠기를 R_i라면 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

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

식 (3)과 같이 나타나는 후가공면적을 평가함수로 하고 이를 최소화하는 최적화를 위하여 본 연구에서는 유전알고리즘을 이용하였다. 유전알고리

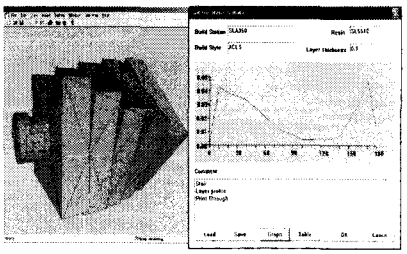
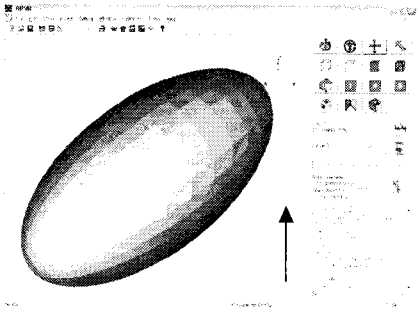


Fig. 7 Roughness input dialog and test part



(a) Initial direction

(b) Optimized direction

Fig. 8 Optimality test example of ellipsoid

듬은 광역탐색이 가능하여 국부 최적해가 많은 문제의 풀이에 특히 유용하다. 또한, 후가공면적은 모델의 형상이 복잡할수록 많은 국부 최적해를 가진다.

가능해의 공간은 성형방향벡터 **b** 를 회전하여 얻을 수 있는 무한히 많은 방향벡터들 이다. 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 나타내었다. 따라서, 유전자(cromosome)의 선두는 x 축 방향 회전량으로 0 에서 360 사이의 실수를 코딩한다. 후위는 y 축 방향 회전량으로 0 에서 180 사이의 실수를 이용하였다. 탐색의 안정성을 높이고 해의 수렴속도를 가속시키기 위하여 Fig. 6 에 보인 정상상태유전알고리즘(steady state genetic algorithm) 을 이용하였다. 정상상태유전알고리즘은

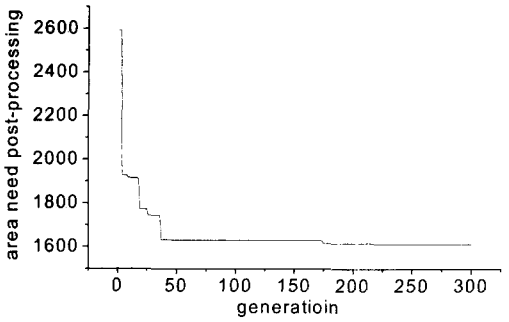


Fig. 9 Best chromosome with ellipsoid model

다음 세대를 생성할 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 룰렛휠선택(roulette wheel selection)방법을 사용하였다.

5. 실험결과

본 연구를 검증하기 위하여 Window NT 환경에서 작동하는 소프트웨어를 Visual C++를 이용하여 개발하였다. 결과의 화면출력을 위하여 그래픽 라이버러리인 OpenGL 을 이용하였다. Layer thickness, 모델의 원하는 최종 거칠기, 인구, 돌연변이 비율, 교배비율, 세대수등을 사용자가 입력할 수 있도록 하였다. 각도별 거칠기값을 입력하기 위한 실험 부품과 입력 결과를 Fig. 7 에 보인다.

알고리즘을 평가하기 위하여 먼저 최적의 성형방향이 정해진 Fig. 8 (a)의 타원체에 대하여 최적 성형방향을 구하여 보았다. 층두께는 0.1mm 로 하였으며 요구 거칠기는 0.01mm 로 하였다. 1944 개의 삼각형으로 구성된 타원체를 x 축과 y 축에 대하여 1° 의 해상도로 회전하면서 모든 목적함수 값을 조사할 경우 18 개의 국부 최적해가 발견되었으며, 0.1° 단위로 계산한 결과 96740 개의 국부 최적해가 발견되었다. 따라서 결과로 얻어진 최적해는 유전자의 해상도와 구체적인 탐색방법에 따라서 달라질 수 있다. 적용결과는 Fig. 8 (b)에 나타난 바와 같이 타원체의 장축이 성형방향(z-axis)이 됨으로써 최소의 후가공을 요구함을 확인하였다. 또한 유전알고리즘이 최적의 해를 탐색하는 과정을 각 세대의 최적 유전자를 표시하여 Fig. 9 에 나타내었다. 최적의 성형방향이 쾌속조형기에

Table 1 Application results

		fuel box	handle	bell
number of faces		101146	147420	326746
surface area to be considered		242822 mm^2	164311 mm^2	536172 mm^2
area need post-processing	worst build direction	95151 mm^2	87448 mm^2	238372 mm^2
	best build direction	30482 mm^2	8794 mm^2	89351 mm^2
	Ratio(best/worst)	32%	10%	37%

*Condition : Layer thickness 0.1mm, target average roughness 0.01mm, Pentium III 800MHz, 256Mbyte RAM, target machine SLA 350, target resin SL5510, steady state GA, overlap population 20%, crossover 90%, mutation 1%, population 50EA, 100 generation

서 오랜 제작시간을 요구하는 경우도 있으나, 후가공이 전문가에 의하여 수행됨을 고려하여 후가공 면적의 최소화를 목적함수로 이용하였다.

실제적인 모델에 본 연구를 적용하기 위하여 연료통, 손잡이, 종의 테스트 부품을 대상으로 최적의 성형방향을 탐색하였으며, 그 결과를 Table 1 에 나타내었다. 성형 방향을 최적화 함으로써 후가공이 필요한 면적을 최대 90% 까지 줄일 수 있었다. 후가공이 필요한 면적은 성형방향뿐만 아니라 형상의 영향을 크게 받는다.

6. 결 론

본 연구에서는 광조형물의 후가공 시간을 감소시키거나 또는 제거하기 위하여 최소의 표면거칠기를 갖는 성형방향을 자동으로 선정하는 전문가 시스템을 개발하기 위하여 수행되었다. 광조형물의 표면 거칠기에 대한 계단효과, 레이저 빔의 감쇠 그리고 프린트 스루를 반영한 이론 모델의 예를 들었다. 또한 레진의 종류, 빌드스타일 및 각 장비의 세부적인 특성까지 고려한 표면거칠기 예측을 위해서는 실험데이터를 선형보간하여 활용하였다. 유전알고리즘을 이용하여 후가공을 최소로 하는 성형방향을 선정하는 방법을 개발하였다. 이를 위하여 후가공을 최소로하는 목적함수를 유도하였다.

후 기

본 연구는 한국과학기술평가원의 주문적응형쾌속제품개발시스템사업의 과제(2000-J-RP-01-B-02-A3)로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Chadwick, A.L., 1996, "Surface Finishing of Stereolithography Models Used as Patterns for Rapid Tooling Techniques," *BEng Dissertation, Department of Manufacturing Engineering*, University of Nottingham.

(2) Paul F. Jacobs, 1992, "Rapid Prototyping & Manufacturing," *Society of Manufacturing Engineers*, pp. 32~52.

(3) Philip E. Reeves and Richard C. Coob, 1997, "Reducing the Surface Deviation of Stereolithography Using In-Process Techniques," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 20~31.

(4) Hagihara, S. Furukawa, N. Kiyohiro, and H. Makino, 2000, "Laser Lithography for Making Jewelry -A Concept of Diagonal Irradiation-," *Proceedings of The 8th International Conference on Rapid Prototyping*, Tokyo, Japan, 12~13.

(5) Lee, K. H. and Choi, K., 2000, "Generating Optimal Slice Data for Layered Manufacturing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 4, pp 277~284.

(6) Pham, D. T., Dimov, S. S. and Gault, R. S., 1999, "Part Orientation in Stereolithography," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 9, pp. 674~682.

(7) Cheng, W., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., Wong, Y. S., Loh, H. T. and Miyazawa, T., 1995, "Multi-Objective Optimization of Part Building Orientation in Stereolithography," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 12~23.

(8) Lan, P., Chou, S., Chen, L. and Gemmill, D., 1997, "Determination of Fabrication Orientations for Rapid Prototyping with Stereolithography Apparatus," *Computer-Aided Desing*, Vol. 29, No. 1, pp. 53~62.

(9) Jur, J. H. and Lee, K. W., 1996, " Determination of Optimal Build-up Direction for Stereolithographic Rapid Prototyping," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 163~173.

(10) Masood, S. H. and Rattanawong, W., 2002, "A Generic Part Orientation System Based on Volumetric Error in Rapid Prototyping," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 209~216.

(11) Sung-Min Hur, Do-Keun Oh, Kyung-Hyun Choi and Seok-Hee Lee, 2000, "Optimization of Build Parameters in SLS Process," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 3, pp. 769~776.

(12) Cobb, R.C., Spencer, J.D. and Dickens, P.M., 1993, "Better surface finishing techniques for the RPT is a must," *Proceedings of the 2nd Scandinavian Rapid Prototyping Conference*, Danish Technological Institute, Aarhus, Denmark 4~6.

(13) Dae-Keon Ahn, Ho-Chan Kim and Seok-Hee Lee, 2001, "A Study on Reducing the Surface Roughness of Stereolithography Parts Using Paraffin Coating and Grinding Postprocess," *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering, Spring*, pp. 45~48.