

다구찌 방법을 이용한 공정변수의 최적화 Optimization of the Process Parameters of SLA Using Taguchi Method

*이수호(한국과학기술원 대학원), 박원식, 조형석(한국과학기술원)

Su Ho Lee(Graduate School, KAIST), Won Shik Park, Hyung Suck Cho(KAIST)

Abstract

Though SLA(Stereolithography Apparatus) is being recognized as an innovative technology, it still can not be used to fully practical applications since it lacks of dimensional accuracy compared to conventional processes. In SLA, the accuracy of cured part depends upon the set of process parameters. In order to improve the accuracy of SLA, this paper quantitatively evaluates how largely each process parameter of SLA contributes to the part accuracy and estimates the optimal set of process parameter which minimizes the dimensional errors of the test part, "letter-H" part. For this purpose, we use ANOVA(analysis of variance) and S/N(signal-to-noise) ratio of Taguchi method.

Key Words : Stereolithography(광조형공정), Diagnostic part(표준제품), Taguchi method(다구찌 방법), S/N ratio.

1. 서론

광조형공정은 패속조형방법의 일종으로 한 층씩 적층하는 층별가공(layer-by-layer manufacturing)방법이며, 3 차원의 입체형상을 만들기 위해 2 차원의 층상으로 겹쳐쌓아 제조하는 방법이다. 이것은 기존의 절삭 방법에 비해 상당히 적은 시간으로 제품을 만들 수 있으며, 아무리 복잡한 형상이라도 만들 수 있다.

이러한 이점에도 불구하고 한정된 응용분야에만 적용되고 있는 것이 현실이다. 그 이유는 광조형공정에 사용될 수 있는 재료가 광경화(photo curable)성 재료에 한정되어 있고, 제품의 형상이 충분한 정확도를 갖지 못하기 때문이다. 과거에 비해 형상 정확도가 좋아졌으나 여전히 정밀한 것을 필요로 하는 제품에 적용되기에는 무리가 있다.

광조형방법을 이용하여 정밀한 제품을 만들기 위해서는 공정 중에 발생하는 형상 오차를 줄이는 연구가 필요하다. 광조형 제품의 형상 오차를 줄이는 연구가 이루어져 왔으며 크게 3 가지로 분류될 수 있다.

첫째, 수지 개발에 의한 정확도 향상으로 Jacobs[1]와 Schultness[2]는 에폭시(epoxy) 수지에 의해 만들어진 제품이 아크릴(acrylate) 수지로 만들어진 제품보다 더 좋은 형상 정확도를 가진다는 것을 밝혔다.

둘째, 패속조형장치의 하드웨어와 소프트웨어의 개발에 의한 형상정확도 향상으로 고성능 서보 제어기와 레이저 스캐닝 시스템의 개발은 광조형장치가 좀 더 정확한 제품을 만들 수 있도록 하였다[3].

마지막으로 최적의 공정변수의 선정에 의한 형상정확도 향상으로 Pahati 와 Dickens[4]는 주어진 hatch spacing에 대해 최적의 layer thickness가 존재한다는 것을 밝혔다. Chartoff 등[5]은 수축과 Warpage는 적절한 레이저 스캐닝

속도에 의해 줄여질 수 있다는 것을 보였고, Jayanthi 등 [6]은 공정변수로 layer thickness, hatch spacing, hatch overcure, fill cure depth를 선정하여 다구찌 실험계획법을 이용하여 hatch spacing 과 hatch overcure, fill cure depth 세 공정변수의 상대적인 기여도를 정량적으로 구하였다.

본 논문에서는 광조형제품에서 발생하는 여러가지 형상오차를 최소화하는 공정변수조건을 찾고자 한다. 이를 위하여 형상오차에 영향을 주는 공정변수로 제품변수를 선정하였다. 그리고 광조형제품에서 발생하는 여러가지 형상오차를 정량화하기 위하여 이를 대표할 수 있는 표준제품으로 H-part를 선정하였다. H-part를 다구찌의 직교배열표를 이용하여 실험하였으며, S/N비를 이용하여 실험에서 얻어진 H-part의 각 치수의 형상오차를 최소화시키는 최적의 공정변수조건을 구하였다.

2. 광조형공정

2.1 광조형공정의 원리

광조형 공정은 제품준비단계(part preparation step), 만드는 단계(build step), 후처리단계(post processing step)라는 3 단계를 거쳐야 완성된 제품을 만들 수 있다.

제품준비단계는 만들고자 하는 형상의 물체를 CAD로 3 차원 모델링한 뒤 광조형장치가 물체의 형상을 3 차원적으로 만들 수 있도록 해주는 소프트웨어적 처리 절차이다. 이 소프트웨어적 처리 절차는 CAD 파일의 형태로 3 차원 모델링된 것을 검증과 수정을 거친뒤 만들고자 하는 방향을 설정하며 그에따라 지지체를 생성하고, 지지체(support)가 생성된 후 적절한 제품 변수의 값과 리코우트(recoat) 변수의 값을 설정한다. 공정 변수의 값들이 설정되면 3 차원 형태의 파일을 2 차원 형태의 얇은 층으로

조각된 제어 컴퓨터에서 광조형장치를 구동하여 얇은 층을 적층하는 방식으로 원하는 형태의 물체를 만들게 된다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 광조형장치는 자외선 영역의 파장을 가지는 레이저 광으로 원하는 영역만을 선택적으로 경화시키는 스캐닝 시스템을 이용한다. 스캐닝 시스템과 한층씩 적층하는데 있어서 중요한 플랫폼의 위치를 제어하는 모터를 PC 제어 컴퓨터가 제어하고 있다. 레이저의 스캐닝 속도와 경화 깊이는 파트준비단계에서 설정한 공정변수의 값들의 조합에 의해서 결정된다. 제품을 만드는 공정에서는 공정중 수지는 95%까지 경화되며, 제품이 플랫폼(platform)에서 제거된 후 UV(ultra violet)오븐에 넣어서 100%까지 경화된다. 이 과정이 후경화(post curing) 공정이다. 후경화과정을 거쳐 완전히 경화된 제품의 표면은 상당히 거칠다. 이렇게 거친 제품의 표면을 매끈하게 다듬는 공정이 필요한데 이 공정을 표면처리(surface finishing) 공정이라 한다. 표면처리공정은 단순 표면만을 매끈하게 하는 기능만 있는 것이 아니라 표면처리시 제품의 형상이 크게 나오는 것을 표면을 갈아내어 원래의 치수로 맞게 하는 기능도 한다.

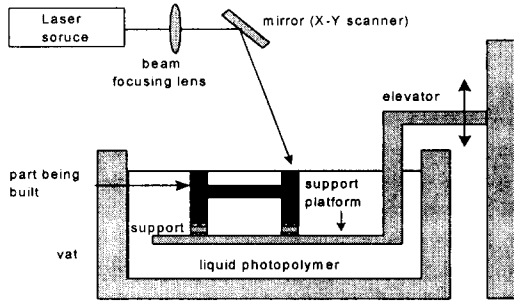


그림 1. 광조형공정의 원리

2.2 광조형공정의 공정변수

광조형공정에는 크게 3 종류의 공정변수가 있다. 즉, 제품 변수(part parameter), 지지체 변수(support parameter), 리코우트 변수(recoat parameter)들이며, 이외에도 수축인자, hatch type 등이 있으나 이들 공정 변수들 중 광조형공정에서 제품의 치수에 가장 큰 영향을 주는 변수는 제품 변수이다. 그림 2에 나타나 있듯이 제품 변수는 layer thickness, hatch spacing, fill spacing, border overcure, hatch overcure, fill cure depth로 6 개이다. Layer thickness는 층의 두께이며, Spacing은 인접한 경화선(strand) 간의 간격이다.

경화선 부분은 그림 2에서 볼 수 있듯이 레이저의 스캐닝에 의해 경화된 좁은 영역이다. 만약 경화선이 제품의 표면인 윗면이나 아랫면에 있다면, 두 경화선 간의 간격을 fill spacing이라 하며, 표면이 아닌 곳에서의 두 경화선 간의 간격은 hatch spacing이라 한다. Cure depth는 경화선의 두께이다. 만약 경화선이 제품의 표면에 있다면, cure depth를 fill cure depth라 한다. Overcure는 경화선이 밑의 층까지 내려간 깊이이다. 경화선이 제품의 경계 지

점에 있다면 overcure를 border overcure라 하며, 그렇지 않은 경우는 hatch overcure라 한다. Fill cure depth는 해당 되는 면이 아랫면이면 fill cure depth(DF), 윗면이면 fill cure depth(UF)라 하며, 본 논문에서는 fill cure depth(DF)가 fill cure depth(UF)보다 항상 0.004 inch 크게 하였다.

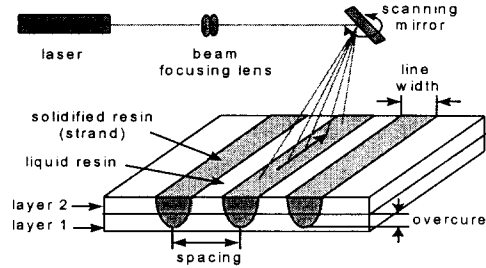


그림 2. 광조형공정의 공정변수

2.3 형상 정확도 평가를 위한 표준 제품

광조형의 형상정확도를 평가하기 위해 현재 사용되고 있는 표준 형상으로는 User-part, Christmas tree가 있다. User-part[4]는 사각형 모양의 제품이다. 이 표준 제품은 SLA(stereolithography apparatus)의 사용자(user)에 의해 제안된 것으로 광조형 장치가 만들 수 있는 형상정확도에 대한 정도를 통계적인 정보로 줄 수 있다는 이점이 있지만 측정해야 할 치수가 170 개나 되며 측정이 복잡하고 어렵다. 또한 형상 오차에서 중요한 휨(distortion)에 대한 아무런 정보를 주지 못한다는 것이다.

Christmas tree는 User-part에 비해 적은 측정 치수이지만 User-part와 마찬가지로 휨에 대한 정보를 나타내지 못하므로 형상오차를 줄이기 위한 연구의 표준 제품으로는 부적절하다.

그림 3에 나타나 있는 H-형상은 측정해야 할 치수가 단 6 개이며, 측정도 용이하다. Allison(1994)에 의해 2 인치 H-형상이 처음으로 제안되었을 때, 형상의 단순함과 형상정확도에 대한 의미있는 정보를 제공하는 표준 제품으로 인정받았다. 그 후 Pang(1995)에 의해 지금의 4 인치 H-형상이 제안되었다.

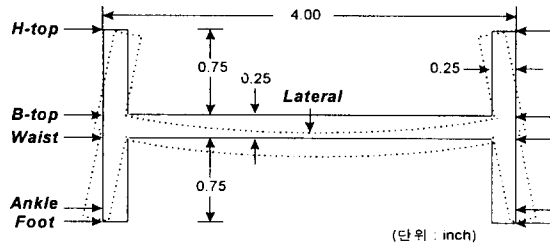


그림 3. H-형상의 표준제품

H-형 표준 제품의 특징 치수는 그림 3에 나타나 있듯이 Foot, Ankle, Waist, B-top, H-top, Lateral이다. H-형상은

광조형공정에서 발생하는 형상오차인 휨이나 수축 형상을 잘 나타내어 준다. 휨에 대한 정보는 *Ankle*, *H-top*, *Lateral* 에 나타나며, 수축에 대한 정보는 *Waist* 에 나타난다. 그리고 *B-top* 은 광조형 기계의 보정된 상태를 나타낸다. 즉 *B-top* 의 값이 CAD 데이터의 값에서 기계의 허용오차 밖으로 벗어나 있다면 그 기계는 보정이 제대로 되어 있지 않다고 판단할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 User-part 나 Christmas tree 에 비하여 광조형 공정에서 생길 수 있는 여러가지 형상 오차에 대한 정보를 내포하고 있으며, 형상이 간단하고 측정이 용이한 H-형상을 표준 제품으로 선택하였다. 특징 치수중 *Foot* 은 재현성과 신뢰성이 부족하므로 본 논문에서는 특징 치수로 고려되지 않는다.

3. 다구찌 방법을 이용한 공정변수의 최적화

3.1 다구찌 방법을 이용한 실험계획

전조합실험법이나 부분조합실험법과 같은 기존의 실험계획법들은 실험인자가 많아지면 많은 수의 실험을 필요로 하며 작업수행에 있어서도 일관성이 없는 우연의 일치를 기대하는 등 비 논리성과 실험결과해석의 어려움 등을 내포하고 있다. 이에 반하여 다구찌 방법을 이용한 실험계획법은 기존의 실험계획법과 비교해 다음과 같은 특성이 있다[6].

- (1) 기존의 방법은 인자(factor)의 평균 응답에 관한 수학적 모형화가 목적이며, 다구찌 방법은 제품의 변동을 최소화하는데 목적이 있다.
- (2) 직교배열표(orthogonal array)상에 제어인자(control factor)와 잡음인자(noise factor)를 모두 고려한다.
- (3) 기존의 방법은 실제상황에서의 결과 예측에 대한 신뢰성과 재현성이 취약하나 다구찌 방법은 실험적 결론의 재현성이 우수하다.
- (4) 향상된 품질을 손실함수의 품질손실이 줄어든 것으로써 입증한다.

다구찌방법은 직교배열표상에 제어인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 S/N 비를 최대화하는 제어인자의 조건 즉, 잡음하에서도 성능특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 근접하는 제어인자의 조건을 찾는 것이며, 직교배열표를 활용하는 주 목적은 재현성이 높은 요인효과에 중점을 두는데 있다. 직교배열표는 인자 배치에 있어서 직교성(어떤 요인의 어떤 수준에 대해서나, 다른 인자의 전체 수준이 같은 회수씩 나타나는 성질)과 데이터 해석에 있어서 매우 중요한 성질로서 분산분석(ANOVA)을 통해 데이터의 전분산을 인자별의 분산합으로 분해하는 것이다[7].

공정변수인 제어인자가 6 개이며, 각인자의 수준수는 인자의 비선형특성이 고려될수 있도록 3 수준이상의 수준이 되도록 인자의 수준수를 고려할때 가장 적합한 직교배열표는 $L_8(2^1 \times 3^7)$ 이다. 이 직교배열은 각 열의 결과가 다른 열에 영향을 주지않고, 각인자의 주효과를 가장 잘 나타내므로 형상오차에 대한 공정변수의 영향을 잘

나타낼 수 있는 직교배열표이다.

본 연구에서 사용될 실험조건들은 아래와 같으며, 2 번을 반복 실험하고, 실험순서는 무작위로 실시되었다.

- 1) 제어인자 설정: p_1 : layer thickness
 p_2 : border overcure
 p_3 : hatch overcure
 p_4 : fill cure depth
 p_5 : fill spacing
 p_6 : hatch spacing
- 2) 수 준: 각 제어인자마다 3 수준으로 설정하고 제어인자들의 수준치들은 표 1 과 같이 정한다.
- 3) 반응치(실험결과) : 반응치는 H-형상의 5 개 치수를 측정 한 값의 오차를 데이터로 삼는다.

표 1. 제어인자들의 수준값 (단위:inch)

| Factor | Level | | |
|-----------------|--------|--------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| layer thickness | 0.004 | 0.008 | 0.012 |
| border overcure | 0.005 | 0.009 | 0.013 |
| hatch overcure | -0.004 | -0.001 | 0.003 |
| fill cure depth | 0.007 | 0.011 | 0.015 |
| fill spacing | 0.003 | 0.006 | 0.010 |
| hatch spacing | 0.002 | 0.006 | 0.010 |

각 인자들의 제 1 수준치들은 광조형장치에서 사용될 수 있는 하한값들이며, 제 3 수준의 값들은 광조형장치에서 사용하고 있는 상한값들이다. 제 3 수준 이상의 값들을 사용할 수는 있지만 현재로는 사용하지 않는 값들이다. 실험을 2 회 반복한 이유는 노이즈에 강인한 최적 공정변수조건을 구하기 위해서이다.

3.2 공정변수의 최적수준

어떤 제품, 부품이나 재료가든 목적특성에는 목표치가 있으며 목표치에서 멀어질수록 손실의 비중을 더 주자는 의미에서 관측치의 목적특성에 따라 망소특성, 망대특성, 망목특성으로 손실함수가 정의되며, 본 연구의 목적인 형상 오차 최소화에 적합한 손실함수는 망소특성을 갖는 것이 적합하다.

망소특성의 손실함수는 관측치 y 가 작을수록 좋은 것을 말하며 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_r = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

두번의 반복실험으로 얻은 36 개의 실험 결과를 목표치가 0 이 되게하는 손실함수인 망소특성의 S/N 비 식(1)에 대입하여 각 치수에 대한 평균치를 구하면 표 2 와 같다. 표 2 에서 B-top 의 S/N 비 값이 가장 크다. 이것은 B-top 의 치수오차가 상대적으로 가장 작으며, 노이즈의 영향에 상대적으로 덜 민감한 치수라는 것을 보여준다.

표 2. 각 치수의 S/N 비 평균값 (단위: dB)

| Dimensions | Ankle | Waist | B-top | H-top | Lateral |
|------------|-------|-------|-------|-------|---------|
| S/N ratio | 9.71 | 10.33 | 21.43 | 10.25 | 16.59 |

H-형상의 특징 치수의 평균적인 S/N 비를 구하면 표 3 과 같다. 각 인자의 수준별 S/N 비를 보면 layer thickness, hatch overcure, fill spacing 값이 작을수록 형상 오차가 작게 되고 노이즈에 강인하며, hatch spacing 은 클수록 형상오차를 작게하고 노이즈에 강인한 경향을 나타낸다. Border overcure, fill spacing 은 수준별로 큰 차이를 보이지 않는다.

표 3 에서 형상오차를 최소화하는 최적의 공정변수조건은 각 인자의 S/N 비가 최대인 수준이 된다. 즉 layer thickness, hatch overcure, fill spacing 은 제 1 수준이며, border overcure, fill cure depth 는 제 2 수준이며, hatch spacing 은 제 3 수준이 되는 공정변수의 조건이 형상오차를 최소화하는 조건이 된다.

위의 결과는 layer thickness 가 얇을수록 형상오차가 줄어든다는 것을 보여주고 있는데, 이것은 한층이 두꺼울때 보다 얇을때가 레이저의 노광량분포가 상대적으로 균일해지기 때문에 층이 얇을수록 수축이 적게 일어나 상대적으로 수축에 의한 형상오차가 줄어들게 된것이다. hatch overcure 값이 작을수록, hatch spacing 값이 클수록 형상오차가 줄어들게 되는 것은 레이저의 광량이 수지에 적게 주사되고, 깊이가 주사되지 못하므로 노광량분포가 상대적으로 덜 불균일해지고 주사량이 적으므로 수축이 적게 일어나기 때문이다.

표 3. 공정변수의 수준별 S/N 비 (dB)

| parameters | level | | |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| layer thickness | 17.58 | 13.56 | 9.83 |
| border overcure | 12.40 | 14.33 | 14.25 |
| hatch overcure | 15.78 | 13.86 | 11.34 |
| fill cure depth | 13.14 | 14.18 | 13.66 |
| fill spacing | 14.25 | 13.99 | 12.74 |
| hatch spacing | 10.02 | 14.53 | 16.43 |

다구찌는 공정변수의 최적치가 형상오차를 줄이는 효과가 있는지를 알아보기 위하여 공칭값의 공정변수 조건의 S/N 비 값과 다구찌 방법으로 구한 최적치의 S/N 비 값을 구해서 S/N 비 값이 향상되었음을 보이므로 형상오차를 줄였다는 것을 보일 수 있다고 하였다.

$$\Delta\eta = \eta_{opt} - \eta_{\text{initial}} = \sum_{i=1}^6 (m_{opt,i} - m_{\text{initial},i}) \quad (2)$$

여기서 $\Delta\eta$: 두 조건의 S/N 비값의 차

$m_{opt,i}$: 최적조건에서의 S/N 비

$m_{\text{initial},i}$: 각인자의 2 수준의 S/N 비

그리고 i 는 각 인자를 나타낸다.

식(2)에 의하여 최적치의 S/N 비 값이 공칭값의 S/N 비 값보다 7.824(dB) 만큼 커졌다. 이것은 다구찌 방법으로 구한 최적치가 기존의 공칭값의 조건보다 형상오차를 줄이고 노이즈의 영향에 강인한 공정변수의 조합이라는 것

이다.

4. 결론 및 향후과제

광조형공정의 최적 공정 변수치와 공정변수의 기여도를 구하기 위하여 먼저 형상 정확도를 평가할 수 있는 표준 제품으로 H-형상을 선정하였다. H-형상을 다구찌 방법으로 L_8 을 2 번 반복 실험을 하였다. L_8 을 2 번 반복 실험으로 얻은 데이터를 S/N 비중 원하는 목표치가 0 인 망소특성을 이용하여 최적공정변수치를 구하였다. 각 공정변수의 경향은 layer thickness 가 얇을수록, hatch overcure 값이 작을수록, hatch spacing 값이 클수록 변형량이 적으며 노이즈에 덜 민감하다는 것을 보였으며, border overcure, fill cure depth 값은 중간 수준의 값일때 변형량이 최소가 되고 노이즈에 덜 민감하다는 것을 보였다. 이것은 결국 수지에 주사되는 레이저의 양이 적을수록 변형이 적다는 것을 보여준다.

본 논문에서는 다구찌 방법으로 공정변수의 최적치를 구하였으며, 이 조건이 공칭값의 조건보다 형상오차를 줄이는 공정변수 조건인지를 보이기 위하여 다구찌 방법으로 구한 최적치의 손실함수 값이 공칭값의 손실함수 값보다 크다는 것을 보였다. 향후과제로서 실험을 통해 공칭값의 조건으로 만든 H-part 와 다구찌의 방법으로 구한 최적치의 조건으로 만든 H-part 의 각 치수의 형상오차를 비교할 계획이다.

참고 문헌

- [1] Jacobs, P. F. (1995), "Stereolithography 1993: epoxy resins, improved accuracy and investment casting", *Rapid Prototyping System fast track to product.*
- [2] Schulthess, A., M. Hunziker, and M. Hofmann, "New resins for Stereolithography applications", *Rapid Prototyping Systems fast track to product.*
- [3] Jacobs, P. F.(1995), "Stereolithography and other RP&M technologies", ASME Press.
- [4] Pahati, S., and P. M. Dickens(1995), "Stereolithography process improvement", *First National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research.*
- [5] Chartoff, R. P., L. Flach, and P. Weissman(1995), "Material and process parameters that affect accuracy in Stereolithography", *The sixth international conference on Rapid Prototyping*
- [6] Jayanthi S., M. Keefe and E. P. Gargiulo, Studies in Stereolithography : Influence of Process Parameters on Curl Distortion in Photopolymer Models, *Solid Freeform Fabrication System 1994*
- [7] Phadke, M. S.(1989), "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall.