

광조형법에 있어서 OFFSET정보생성 알고리즘 개발에 관한 연구

김준안*, 홍삼열*, 백인환**

A Study on Algorithm Development of Offset Data Generation in Stereolithography

Jun-An Kim*, Sam-Nyol Hong*, In-Hwan Paik**

ABSTRACT

In the Stereolithography process, three-dimensional objects are built by sequentially curing, generated by horizontal slicing of a three-dimensional CAD model. The dimensional accuracy of a manufactured part depends on the accuracy of curing performed by laser. Since a laser beam's diameter has several hundreds micro meter, it is necessary to offset by laser beam radius and the half of curing width. When offsetting, some slices have collinear segments, coincident vertices, line jerks and open loops. After remove above issues we have correct offsets data. And in last step, these data are used to scan paths.

Key Words: RP(Rapid Prototyping), Stereolithography(광조형), Curing(경화), Build model(조형), Scan speed(주사속도), Scan data(주사정보), Photopolymer resin(광경화성수지), Single line scanning(단주사), STereoLithography file(STL 파일)

1. 서 론

최근 들어 생산현장에서는 제품개발시 제품개발기간단축을 시키기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 설계된 정보를 이용하여 신속히 형상을 만들어 보고자 하는 RP 분야에 많은 관심을 보이고 있으며, RP 분야 중에서도 광조형분야에 대해 여러가지 연구가 진행중이다. 광조형을 이용하여 원하는 형상을 만들고자 하는 경우, 정확한 형상을 만들기 위해서는 광원인 레이저의 종류, 형상

으로 재현되는 광경화성수지의 종류 및 특성이 중요하며, 이와 함께 가공정밀도를 향상시키기 위해서는 형상조형용 공구인 레이저 빔을 정확히 제어하는 것이 중요하다⁽¹⁾.

광조형법에 사용하는 레이저에 대해서는 현재 레이저출력, 레이저빔 모드 및 다양한 레이저를 사용하는 방법에 대해 연구되고 있으며, 최근 들어서는 저가격의 반도체레이저를 이용하는 방법 및 자외선 등을 이용하는 방법에 대해서도 연구되고 있다⁽²⁾. 그러나 광조형법 자체는 한층씩 순차적으로 가공해 가는 적층가공으로서 Fig.1에 나

* LG전자 생산기술센터
** 부산대학교 생산기계공학과

타낸 바와 같이 기존의 절삭가공과는 가공하는 프로세스 자체에 많은 차이를 가지고 있다.

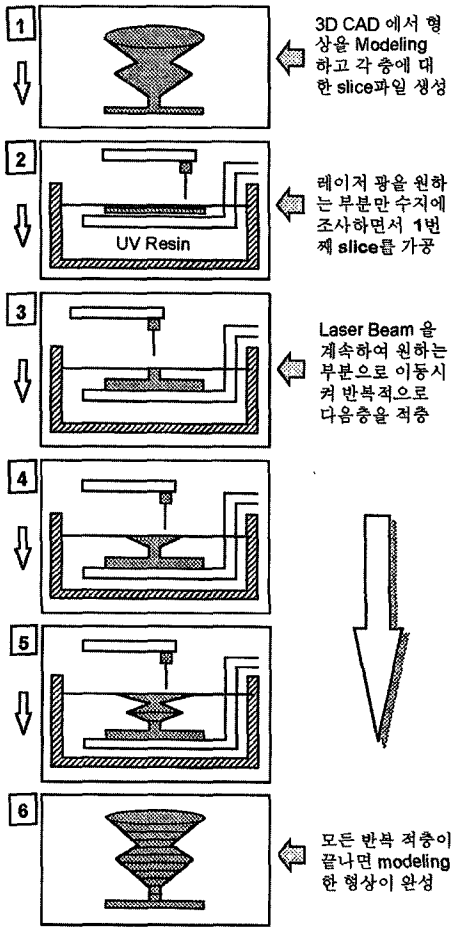


Fig.1 Stereolithography process

광조형법에 있어서 조형정보를 생성하는 방법은 CAD 데이터를 이용하여 입체형상의 단면을 구하고, 이를 이용하여 경화시키고자 하는 층의 범위를 찾는다(Fig.2). 그리고 이 범위정보를 근거로 레이저빔을 주사시키기 위해 단주사에서의 경화폭과 수지수축을 고려하여 주사정보 생성시 offset을 시킨다.

광조형법에 있어서 주사정보에 관해서는 Daniel C. H. Yang 등이 1995년 Helisys의 LOM 장치를 대상으로 레이저빔 보정에 대해 연구하였다. 이 연구에서는 형상의 경계, 즉 외부 loop와 내부 loop를 정의할 때 loop에 방향성을 주어서 구분하여 새로운 offset loop를 만든

는 방법에 대하여 논하고 있다. 외부 loop를 정의할 때는 시계방향의 loop로 정의하고, 내부 loop는 반시계방향의 loop로 정의하여 모든 loop가 만나는 경우에도 이 방향으로 loop를 그려서 폐 loop를 구성하고 있다⁽³⁾. 그리고 R. S. Chambers 등은 3D 시스템사의 SLA250 장치를 이용하여 주사경로에 따른 경화율과 경화깊이, 형상별 수축 및 시간의 경과에 따른 광경화성수지의 변화특성 등에 대하여 변화를 측정하고 해석하여, 해석적으로 조형정도를 향상시키고자 연구하였으며⁽⁴⁾, 이와 유사하게 일본에서도 唯木俊秀 등은 레이저를 이용한 적층경화시 성형물의 변형을 해석하였는데, 광경화성수지의 광중합반응시 발생하는 특성을 기초로 형상을 층별로 분할하여 모델화하고 이것을 시뮬레이션하여 변화특성을 예측하였다⁽⁵⁾. 미국의 Mahendrakumar Ganesan, Georges M, Fadel은 1994년 광조형법에 사용되는 형상표현방법중에 현재까지의 표준방법인 STL을 이용하여 표현하는 것이 비하여 NURBS(Non Uniform Rational B-Spline)로 표현할 때의 장점과 이때 형상을 이루는 3차원 형상중 속이빈 형상을 대상으로 어떻게 offset을 시킬것인지의 방법론에 대해 연구하였다⁽⁶⁾. 그리고 Dayton대학의 Lawrance Flach, Richard P. Chartoff 등도 형상을 조형하기 위하여 레이저빔의 선형주사시 발생하는 수축에 대하여 레이저강도, 빛의 흡수율, 개시제량, 온도, 수지특성 등을 고려하여 모델을 구성하고, 이 5가지 요인들이 형상변화에 어떻게 영향을 미치는지를 측정하여 이 결과를 토대로 간략화된 형상변형의 관계를 유도하였다⁽⁹⁾.

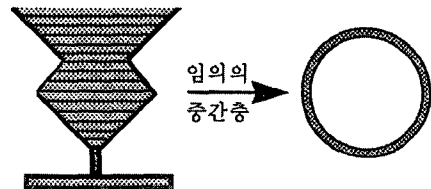


Fig. 2 Searching the curing boundary

본 연구에서는 광조형법에 있어서 정확하게 형상을 재현하기 위하여 STL 파일을 이용하여 광조형용 주사정보를 생성하는 경우에, 조형정도 향상을 위하여 주사정보에 대해 수지의 경화폭과 경화시 수축률 등을 고려하고, 이를 바탕으로 하여 offset 량을 결정하고, 이 값을 이용하여 새로운 주사정보를 생성시킨다. 이를 위해 새로운 주사정보생성시 광조형특징을 고려한 offset 량을 설정하는

방법과 이를 이용하여 새로운 주사정보를 생성시켜 광조형으로 정확한 형상을 만드는 방법에 대하여 연구하였다.

2. Offset 정보생성 알고리즘

3차원 CAD에서 정의된 형상을 광조형으로 제작하기 위하여 정의된 형상을 STL 파일형식으로 변환시킨다. STL 파일은 하나의 normal vector와 3개의 vertex가 한 쌍이 되어 하나의 삼각형 patch를 나타내며, 이것이 여러개 조합되어 하나의 형상을 이룬다⁽⁷⁾. 광조형법에서는 STL 파일로 구성된 3차원형상을 여러 개의 얇은 층으로 분할시켜 한 층씩 조형하여 적층시키는 가공법으로서 STL 파일로 구성된 3차원 형상을 레이저주사시 경화깊이를 고려하여 일정한 두께를 가지는 얇은 층으로 분할시킨다(Fig.2). 분할시키기 위해서 형상을 구성하는 STL 파일의 삼각 patch와 직선방정식 사이의 교점을 구하고 이것을 동일한 Z값을 가지는 정보끼리 묶어서 형상을 분할시켜 각 층의 정보를 생성한다⁽⁸⁾. 여기에서 만들어진 각 층의 정보를 이용하여 조형범위를 결정짓는 loop정보를 생성시킨다.

2.1 Offset의 정의 및 정보의 범위

본 연구에서는 offset 작업을 수행하기 위해서 STL 파일로 분할시킨 층별 loop 정보를 이용한다. Loop 정보의 생성은 삼각형으로 구성된 STL 파일을, 조형할 층두께로 분할하여 loop의 교점을 생성시킨다. STL 파일을 분할시킬 때 자주 발생하는 open loop 현상은 각 층별로 임의의 오차구간 이내에 들어오는 open loop는 close loop로 인식시켜 offset 작업을 수행한다. 그리고 임의의 구간을 벗어날 경우에는 해당 층에 대해 loop의 궤적을 추적하여 loop가 끊어지는 곳에 색깔이 변경되며 * 표시를 한다. 이 표시를 보고 작업자가 여기에서 어디로 연결할지를 판단하여 연결시킨다. 여기에서 open loop를 close loop로 인식할 때 컴퓨터 상에서 자동적으로 처리하는 범위를 레이저빔직경 미만으로 한다. 실제로 레이저주사시 일정한 레이저빔 직경에 대해서도 경화되는 경화폭은 레이저빔 직경보다 크고, 주사속도에 따라 그 값이 일정하지 않으므로(Fig.3) open loop의 한계를 레이저 빔의 직경으로 두고, open loop의 범위를 인식하여 레이저빔직경 미만이면 서로 연결하여 close loop로 만든다(Fig.4). 그리고 loop를 구성하기 위하여 본 연구에서 사용하는 정보는 다음과 같은 조건을 만족한다.

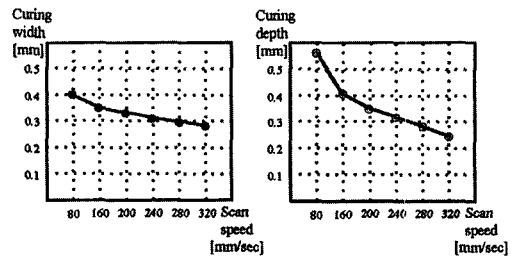
- 2차원 좌표상에서 한 꼭지점은 2개의 직선이 만난다.
- 한 직선은 2개의 꼭지점을 가지며, 시작점과 끝점이 존재한다.

(STL 파일의 구조상 동일직선상에 점이 존재하는 경우가 많이 발생하는데, 동일직선상에 존재하는 점은 시작점과 끝점만 남겨두고 중간에 존재하는 모든 점은 제거시킨다)

- 하나의 loop는 최소 3개 이상의 직선으로 구성된다.
- Loop를 구성하는 직선은 직선의 시작점과 끝점이 다른 직선과 연결되어 있다.

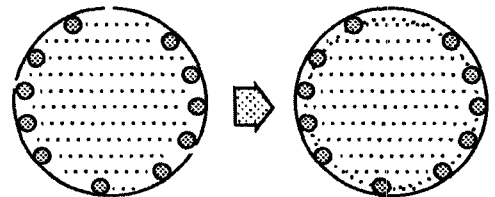
(만약 연결되지 않은 open loop가 발생하면 사이의 거리를 계산하여 거리가 레이저빔직경 이하이면 직선을 연장시켜 연결시킨다(Fig.4))

Item \ Scan speed	80 (mm/sec)	160 (mm/sec)	200 (mm/sec)	240 (mm/sec)	280 (mm/sec)	320 (mm/sec)
Curing width(mm)	0.40	0.35	0.33	0.31	0.29	0.28
Curing depth(mm)	0.57	0.41	0.35	0.32	0.28	0.24



(LASER : He-Cd laser, Beam dia : 0.2mm, Laser power : 30mW)

Fig.3 Curing width and curing depth



(● : Laser beam)

Fig.4 Change open loop into close loop

- 모든 직선은 자신의 고유한 normal vector를 가지고 있으며, offset의 방향은 normal vector와 반대방향이다.
- STL 파일에서 삼각형 patch의 normal vector는 X, Y, Z 방향의 값을 모두 가지고 있으나 삼각형 patch를

이용하여 계산한 모든 직선은 원래의 normal vector 중에서 X,Y 방향의 값만 사용한다. 그리고 offset의 결과로써 직선의 기울기가 변경될 때에는 이때의 X,Y 좌표 및 수평 또는 수직선과의 사잇각을 이용하여 normal vector를 계산한다.

· X 방향의 normal vector : 직선(L)과 수평선사이의 \sin 값(= $L \cdot \sin\theta$) (1)

· Y 방향의 normal vector : 직선(L)과 수평선사이의 \cos 값(= $L \cdot \cos\theta$)

- Loop를 정의하기 위해서 loop에 방향성을 부여하지 않는다(Fig.5,6).

(즉, 외부 loop는 시계방향, 내부 loop는 반시계방향 등의 정의는 사용하지 않는다)

- Close loop를 만들기 위하여 시작점과 끝점을 서로 바꿀 때에 normal vector의 값은 변경되지 않는다.

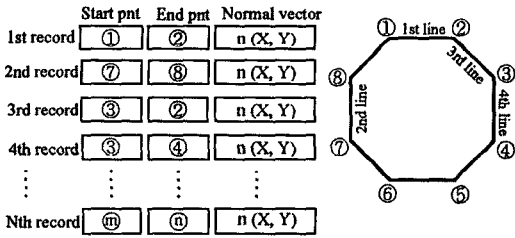


Fig. 5 Data file format and loop of before data sort

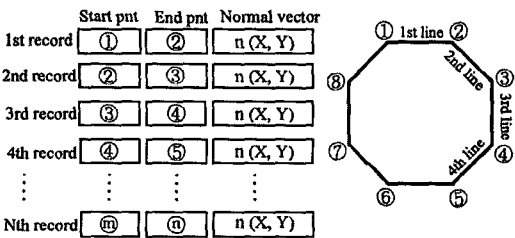


Fig.6 The result of data sort and change loop

2.2 Loop 인식

STL 파일을 일정한 높이로 분할하여 Z값이 일정한 값들을 모아서 하나의 파일로 만든다. 이때 파일의 구조는 직선의 시작점, 끝점, normal vector로 구성된다. 여기에서 normal vector는 삼각형 patch 하나에 하나의 normal vector로 구성되며, X, Y, Z 방향의 값을 가지고 있으며, 각 값 제곱의 합은 1로 되는 단위 normal

vector이다. 이렇게 구성되는 파일을 읽어서 첫번째 읽은 직선을 기준으로 이 직선의 끝점과 같은 점을 찾는다. 이 점을 두번째 직선의 시작점으로 하고 다시 이 직선의 끝점을 찾는다. 이 2개의 직선의 기울기를 비교하여 기울기의 차이가 0에 수렴하면 2개의 직선을 하나의 직선으로 만들고, 그렇지 않은 경우에 별도의 직선으로 둔다. 그리고 두번째 직선의 끝점과 만나는 점을 찾고 다시 이 직선의 끝점을 찾고, 두직선의 기울기값을 비교하여 동일직선인지 아닌지를 판별한다. 동일직선이 아닌 경우 이 직선의 끝점이 첫번째 직선의 시작점과 일치하지 않으면 다음 직선에 대하여 반복수행을 계속한다. 하나의 loop가 구성되기 위해서는 최소한 직선이 3개가 필요하므로 3번째 직선의 끝점부터 첫번째 직선의 시작점과 일치하는지를 계속 비교한다. 만약 첫번째 직선의 시작점과 일치하면 이 직선은 close loop가 되었으므로 동일한 Z 값을 가지는 범위내에서 다른 loop가 있는지를 계속 조사하며, 다른 loop가 없으면 해당 파일의 정렬을 완료한다.

2.3 Offset량의 결정

첫 직선의 시작점과 마지막 직선의 끝점이 일치하여 close loop가 구성되면 이 loop를 대상으로 offset을 실시한다. Offset 방향은 언급한 바와 같이 loop를 연결하는 직선이 가지고 있는 normal vector 방향을 이용하여 각 직선을 normal vector와 반대방향으로 이동시킨다. 이때 이동량은 Fig.3에 나타난 바와 같이 실제 조형시 레이저 주사속도를 얼마로 하느냐에 따라 달라진다. 즉, 주사속도별로 경화폭이 달라지므로 경화폭의 반만큼 offset을 해 주어야 한다(실제로는 동일한 속도에서도 광개시제의 함유량과 laser power에 따라 경화폭과 경화깊이가 달라지나, 본 연구에서는 광개시제의 함유량은 4%, laser power는 30 mW로 고정하여 연구하였다). 그리고 광조형에 사용되는 수지는 액체상태에서 경화되어 고체상태로 바뀔 때 종류에 따라 차이가 있으나 본 연구에서 사용하는 Urethane-acrylate계 수지를 대상으로 offset값을 0.20mm 주어서 실험한 결과 수지는 3% 정도 수축하였다. 그러므로 offset시 수축률 3%로 고려하며, 다음은 측정할 결과이다. 이때의 주사속도는 400mm/sec이고, 주사간격은 0.3mm, 경화시키는 한 층의 층두께는 0.2mm로 하여 정육면체의 시편을 제작하였다. 여기에서 Z 방향의 값은 X, Y 방향의 값과는 달리 경화된 값이 모델값보다 큰 이유는 윗층을 경화할 때 경화시키는 레이저빔이 아래층에 영향을 미쳐서 실제보다 두껍게 경화되기 때문이다.

그리고, 식 (2)는 offset에 영향을 미치는 관련 함수를 묶어 놓았다.

$$f(\text{offset}) \text{ a } f(\text{Dir}, \text{Wc}, \text{Sr}) \quad (2)$$

Table 1. Estimation of resin shrinkage

	X value	Y value	Z value
Model length	20 mm	20 mm	20 mm
Cured length	19.44 mm	19.38 mm	21.13 mm

여기에서 Dir은 방향, Wc는 경화폭, Sr은 수지의 수축율을 나타낸다. 본 연구에서는 offset량 결정을 위하여 경화폭과 수지수축율을 고려하였다.

이렇게 하여 결정된 offset량만큼 loop를 구성하는 직선을 이동시켜 서로 인접한 직선끼리 교차하는 점을 기준으로 새로이 시작점과 끝점을 계산한다. 이때 인접한 직선끼리 교차하는 경우에 교차점을 이용하고, 교차하지 않는 경우에는 인접한 직선을 연장시켜 교차점을 계산한다. 이렇게 하여 offset된 loop의 시작점과 끝점을 다시 계산하여 정렬한다. 그러나 이 경우에 Fig.7과 같은 문제가 발생하기도 한다.

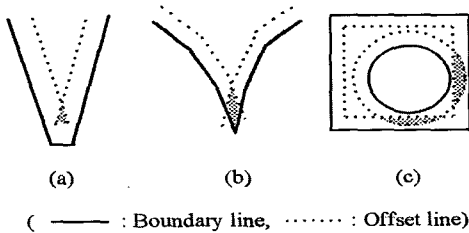


Fig.7 Issues of the offset problem

2.4 꼬임발생방지

Fig.7에 나타난 문제는 offset시 발생하는 전형적인 문제이다. Fig.7의 (a)는 offset량에 비하여 직선의 길이가 짧을 때 즉, "직선의 길이 < offset량 x 2"인 경우에 발생한다. 그림 (b)도 그림 (a)와 유사하게 사잇각을 이루는 두직선 사이에 공유하지 않는 꼭지점 사이의 거리가 offset량 x 2 보다 작은 경우에 발생한다. 그리고 그림(c)은 속이 빈 형상에서 자주 발생하는 것으로 형상의 두께가 offset량의 2배보다 작을 때 발생한다. 그림 (a) (b) (c)에서 빗금친 부분은 원래 형상을 offset 시켰을 경우 offset된 값에 의해 원래형상에서 꼬임이 발생하는 부분이다. 기계가공에서는 이 경우에 과절삭(overcut)이 발생하지만 광조형에서는 과경화(overcure)가 발생하여 조형

정도에 악영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 Fig.7의 (a)를 해결하기 위하여 loop를 구성하는 직선의 길이가 offset량의 2배보다 짧을 경우에 이 직선을 제거하고 인접한 두직선을 가지고 꼭지점을 계산하며, (b)를 해결하기 위하여 인접한 두직선간에 공유하지 않는 꼭지점 사이의 거리를 계산하여, 이 거리가 앞서 언급한 조건에 해당되면 두직선을 제거시키고 offset을 실시한다. 그리고 (c)의 경우에는 형상의 두께를 고려하여 offset값을 결정하지만 아직 여기에 대해서는 고정도의 형상을 유지하기 위한 조건을 계속 연구중이다.

2.5 Offset 정보 생성

전술한 과정을 통하여 offset을 시키기 위한 기본 조건을 만족시킨다. 이 과정을 거친 data와 각 삼각형 patch의 normal vector를 이용하여 offset을 수행한다. 본 연구에서는 offset을 수행하기 위하여 다음의 식을 만들어 offset된 값을 결정한다.

$$X = x + \frac{V_x}{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}} * \text{offset value} \quad (3)$$

$$Y = y + \frac{V_y}{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}} * \text{offset value}$$

여기에서 x와 y는 offset되기 전의 x와 y값, X와 Y는 offset을 수행한 후의 x와 y값이며, Vx는 normal vector의 x방향 요소이고, Vy는 normal vector의 y방향 요소이다. 그리고 offset value는 속도에 따른 경화폭과 수축율을 고려하여 결정한다. 이렇게 하여 최종적으로 식 (3)을 이용하여 offset된 data를 생성한다.

3. 적용 사례 및 고찰

앞서 상술한 내용을 바탕으로 offset을 시킨 data를 생성하였으며, 이것을 이용하여 형상을 제작하였고, 형상을 제작하기 전에 컴퓨터상에서 offset의 실시결과를 확인하였다 (Fig.8). 형상의 경계 loop와 offset을 실시한 loop를 컴퓨터 상에서 나타내었으며, 상대적으로 굵은 선은 실제 형상의 경계이고, 가는 선은 offset을 실시한 결과이다.

Offset을 적용시켜 형상을 제작한 결과 만들어진 형상에 대해서는 Fig.9에 나타내었다. Fig.9의 사례에서 첫번째의 것은 전기밥솥의 두껍부분과 컴프레셔의 챔버부분을 1/8로 축소하여 제작한 후 표면에 코팅처리를 한 것이고, 다음은

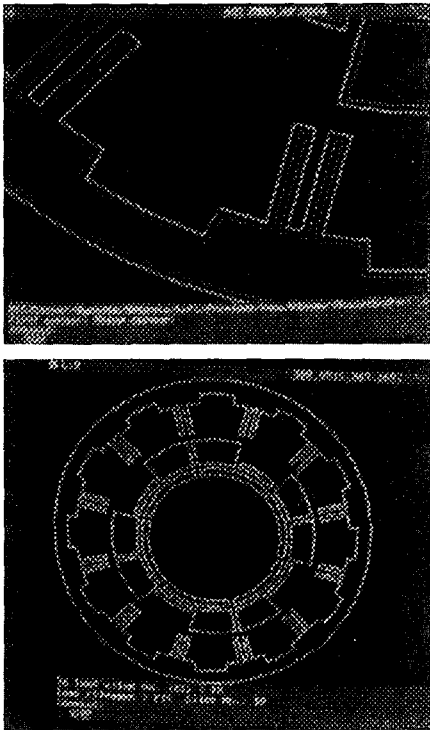


Fig.8 Photo. of boundary and offset loop

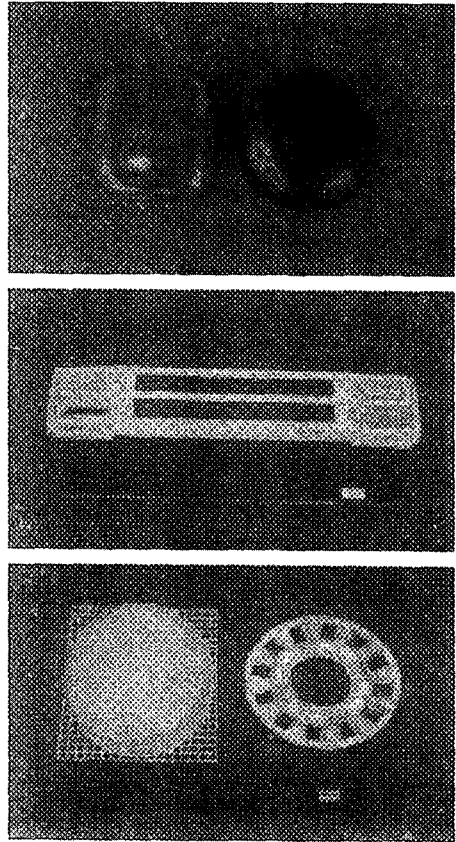


Fig.9 Photo. of stereolithography samples

비디오의 앞부분으로서 상하에 있는 2개의 구멍중 위의 것은 실제로 비디오테이프가 들어가는 구멍이고, 아래 것은 조정용 판넬이 설치되는 부분이다. 마지막 것은 가장 기본적인 support만을 이용하여 컴프레서의 챔버를 제작한 샘플로써 이것까지는 제품의 외관을 제작하여 디자인 평가용으로 활용한 것이고, 나머지 하나는 세탁기에서 세탁조의 회전운동을 지지하는 기능부품으로 사용되는 float를 제작한 사례이다.

이 외에도 여러가지 형상을 조형한 결과, 길이 200mm 이내에서는 형상의 수축 및 뒤틀림의 절대값이 상대적으로 적어서 모델링된 치수대로 비교적 정확하게 조형되었지만 200mm 이상의 형상에 대해서는 액상의 수지가 고상으로 변화될 때 발생하는 수지수축율의 영향뿐만 아니라 조형시 레이저빔에 의해 발생한 잔류응력도 치수정도에 영향을 미쳐 일반적인 기계가공의 오차범위를 벗어나는 현상이 발견되었다.

본 연구에서 사용되는 광조형장치는 X-Y Plotter 방식의 장치이며, 사용된 레이저는 He-Cd 레이저이고, 사용된 수지는 Urethane-acrylate 계의 광경화성수지이다.

4. 결론 및 과제

STL 파일을 이용하여 발생하는 정보를 기초로 한 광조형용 offset 기법은, 기계가공에서 공구반경만큼 offset을 실시하는 것과는 유사한 부분도 있지만 상당히 다른 부분도 고려해야 함을 알 수 있다. 특히 기존의 방법은 대부분 loop의 방향성에 의존하여 안쪽, 바깥쪽 loop를 인식하던 것과는 달리 본 연구에서는 normal vector를 이용하여 offset의 방향을 결정짓는다. 그리고 경화폭과 수축율을 고려하여 offset량을 결정해야 하는 것도 기계가공과 큰 차이라고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 loop간에 일부가 중첩되는 경우 새로운 loop가 발생될 때 이 loop를 인식하여 처리하는 문제 및 실제형상의 크기가 200 mm 이상인 경우 조형시 발생하는 형상의 수축과 변형을 최소화시키기 위한 문제에 대해서는 아직 해결하지 못하였기

에 향후 이 문제에 대해 지속적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 橋原弘之, "光造形法の立體形成機構に關する基礎研究", 博士學位論文, pp.31, 1995.
2. 金東郁, 下岡, 勇田, "光造形法を用いたマイクロ加工に關する基礎的研究", 精密工學會 北海道支部學術論文集, pp.7-8, 1994.
3. Daniel C.H.Yang, Yungsen Jou, Tom Kong, Jui Jen Chuang, "LASER BEAM DIAMETER COMPENSATION FOR HELISYS LOM MACHINE", The 6th international conference on Rapid Prototyping, pp.171-178, The University of Dayton, 1995.
4. R.S.Chambers, T.R.Guess, T.D.Hinnerichs, "A PHENOMENOLOGICAL FINITE ELEMENT MODEL OF PART BUILDING IN THE STEREO LITHOGRAPHY PROCESS", The 6th international conference on Rapid Prototyping, pp.81-90, The University of Dayton, 1995.
5. 唯木俊受, 田中文基, 岸浪建史, "光造形法における樹脂の硬化特性のモデル化と變形シミュレーション", 精密工學會春季大會, pp.543-544, 1995.
6. Mahendrakumar Ganesan, Georges M. Fadal, "HOLLOWING RAPID PROTOTYPING PARTS USING OFFSETTING TECHNIQUES", The 5th international conference on Rapid Prototyping, pp.241-251, The University of Dayton, 1994.
7. 김준안, 이원정, 백인환, "STL FILE를 이용한 SLICE 방법개발에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.434-437, 1994.
8. 최홍태, 김준안, 이석희, 백인환, "Stereolithography를 위한 STL 파일로부터 단면정보변환에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.445-450, 1995.
9. Lawrance Flach, Richard P. Chartoff, "STEREO LITHOGRAPHY PROCESS MODELING : SHRINKAGE PREDICTION", The 5th international conference on Rapid Prototyping, pp.181-190, The University of Dayton, 1994.