

X-Y 로봇을 이용한 광조형시스템 개발

김준안*, 홍삼열*, 백인환**

Development of Stereolithography system using X-Y robot

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

Abstract

In this study, we have developed the stereolithography system that supports the development of a products. This paper presents the development of the stereolithography system. The system is composed of hardware, software and control part. The software converts a STL file to NC data and displays the monitoring figure in control part. The hardware part deals with structure of machine. The most important theme in this paper is LG-SLCAM software. This software can generate NC data and scanning condition data from a STL file semiautomatically. On the basis of three dimensional shapes, it makes data for support structure from STL file. The effectiveness of using our stereolithography system is confirmed by processes of good development.

KeyWords : STL(STereoLithography) RP(Rapid Prototype)
Galvano mirror(갈바노미러) CAD(컴퓨터 이용 설계)
Photopolymer resin(광경화성 수지) Support(서포트)
Polymer powder(폴리머 파우더) Plotter(플로터)
Slice(분할) Inkjet(잉크젯)
Vertex(정점좌표) Scanning(주사)
Squeegee(밀대)

1. 서 론

빛을 이용하여 형상을 제작하는 방법이라는 의미의 광조형법은 지난 80년대 초에 이론적인 원리는 개발되었

으나 시스템적으로 실현되지 못하였고, 80년대 후반부터 상용화된 시스템이 등장하면서 조금씩 알려지기 시작하였다.

이것은 3차원 CAD 보급이 확대되면서 CAD로 모델

* LG전자 생산기술센터 기술개발연구소

** 부산대학교 생산기계공학과

링한 형상정보를 이용하여 원하는 형상을 빠르게 제작할 수 있는 도구로 활용하고자 하는 목적에서 개발되었다. 즉, 설계한 것을 바로 실물로 제작하여 설계 오류를 확인함으로써 설계완성도를 향상시키고, 상품개발기간을 줄이고자 하는 목적으로 많이 활용되고 있고, 최근 들어서는 형상을 신속히 제작하는 기능을 이용하여 기능부품 및 금형 등을 제작하는 분야로도 활용되고 있으며, 3차원 측정데이터를 이용하여 형상을 빨리 재현하고자 하는 분야로도 많은 연구가 진행중이다.

형상제작에 사용되는 재료는 액상의 광경화성수지가 현재 가장 널리 사용되고 있으며, 종이, 폴리머파우더 등을 중심으로 사용 가능한 재료의 폭이 점차 넓혀지고 있는 추세이고, 사용하는 광원도 자외선파장대의 레이저에서 점차 강한 출력의 레이저로 바뀌고 있으며, 레이저 외의 다른 도구를 이용하는 방법도 많이 개발되고 있다.

본 연구에서는 CAD로 모델링한 형상정보를 이용하여 형상을 신속히 제작하고, 제작된 형상을 이용하여 형상의 외관 및 조립성을 쉽게 평가하여 궁극적으로 제품개발기간을 단축하고자 하는 목적으로 광조형시스템을 개발하였으며, 자외선파장대의 레이저를 이용하여 광경화성수지를 경화시켜 입체형상을 제작한다. 특히 이 광조형시스템은 국내에서도 널리 사용하고 있는 2축 로봇을 이용하여 광원인 레이저광을 전송시키고, 이것을 일정하게 얇은 두께를 가지는 광경화성수지에 비추어 한 층씩 원하는 부분만 경화시키며, 이 작업을 계속적으로 반복해서 원하는 형상을 제작하는 것이다(그림 1).

2. 연구개발동향

빛을 이용하는 광조형시스템의 전형적인 모델은 80년대 후반에 최초로 상용화된 미국의 3D Systems사의 SLA(StereoLithography Apparatus) 시리즈 시스템이다. 이 시스템은 자외선파장대의 레이저를 광원으로 사용하고, 광경화성수지를 재료로 사용하여 형상을 제작한다. 이와 유사한 시기에 유사한 방식으로 일본에서도 광조형시스템이 개발되었다. 하나는 C-MET사의 SOUP시스템이며, 다른 것은 D-MEC사의 SCS(Solid Creator System)이다. 이 시스템들은 광원인 레이저 빛의 전송을 위하여 공통적으로 갈바노미러를 사용하고 있으며, SOUP 시스템만이 90년대 들어서 X-Y 플로터

를 이용한 시스템을 개발하였다. 그리고 많은 종류의 시스템이 미국과 일본에서 개발되고 있으며 유럽에서도 몇 종류의 시스템이 개발되어 상용화되고 있다.¹⁾

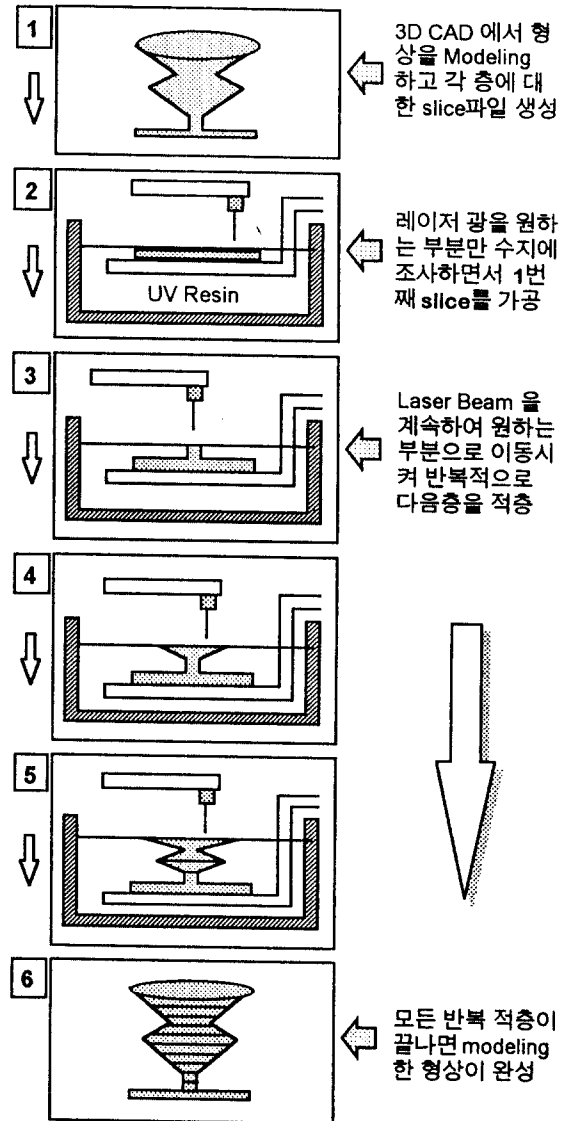


Fig.1 Stereolithography process

90년대 들어서는 새로운 방식 또는 새로운 재료를 사용하는 시스템들이 많이 개발되고 있다. 기존의 시스템이 레이저 빛을 이용한 연속적인 점단위의 경화법인데 반하여 이스라엘에서 개발된 SGC(Solid Ground Curing) 시리즈의 시스템은 복사방법과 유사하게 경화하고자 하는 각 층마다 마스크를 만들어서 층단위로 한번에 경화시키는 방법을 사용하고 있다. 경화시키는 광원은 자외선과장대의 레이저 대신에 자외선패를 이용하여 층단위로 광경화성수지를 경화시킨다. 기존 방법은 변형을 방지하기 위하여 형상제작시 광경화성수지를 경화시켜 형상뿐만 아니라 형상을 지지하는 서포트구조물도 제작하는데, 이 시스템은 서포트를 형상과 다른 재료인 왁스를 사용하여 제작한다. 그리고 각 층마다 형상을 경화시킨 다음 면삭밀링을 이용하여 충표면을 가공하는 작업을 수행하는 것이 다른 시스템과 차이점이다.

미국에서 개발된 시스템으로는 SLA시리즈를 제외하고 LOM(Laminated Object Manufacturing), SLS(Selective Laser Sintering), FDM(Fused Deposition Modeling), BPM(Ballistic Particle Manufacturing), MODEL MAKER 등이 있다. 그리고 일본에서 개발된 시스템으로는 SOUP, SCS외에 명공(名工), KIRA Solid Center, SLP(Solid LD Plotter system) 등이 있으며 이것 외에 독일에서 개발된 Stereos시스템이 있다. 여기에서 LOM시스템과 KIRA시스템은 각 층마다 종이를 적층시켜 원하는 형상대로 절단하여 형상을 제작하는 방식인데, LOM시스템은 종이를 절단하기 위해 CO₂ 레이저를 사용하고, KIRA시스템은 칼을 사용한다. SLS시스템은 폴리머 파우더를 재료로 사용하고 광원은 고출력의 CO₂ 레이저를 사용하여 각 층마다 파우더를 용융, 결합시켜 형상을 제작하는 방식이다. FDM시스템은 가는 띠 형태로 된 고체상태의 수지를 원하는 위치로 이동시켜 녹인 후 필요한 양만큼씩 계속해서 적층시켜 형상을 제작하는 방식이며, BPM시스템과 MODEL MAKER시스템은 잉크젯 방식과 유사하게 입자를 계속 분사하여 형상을 제작하는 방식을 사용하고 있다. 이에 비하여 명공(名工)시스템은 보석류와 같이 작은 형상을 제작하고자 하는 목적으로 저출력의 He-Cd 레이저를 사용하여 형상을 제작하고, SLP시스템은 여기된 Nd-Yag 레이저를 광원으로 사용하는 방식과 반도체레이저를 사용하는 방식이 있다. 그

리고 독일에서 개발된 Stereos시스템은 SLS시스템방식과 같은 종류와 SLA시스템과 같은 방식의 2종류가 있다. 이외 여러 실험실에서 간이형으로 RP 시스템을 제작하여 새로운 시스템개발을 위한 연구가 진행중이다.²⁾

3. 광조형용 STL 파일의 구조 및 처리

본 연구에서는 3차원 CAD에서 생성되는 STL 파일을 이용하여 원하는 형상을 조형할 수 있는 조형용 정보를 생성시키고자 하는 것으로, 여러가지 3차원 CAD 중 에서 널리 사용되고 있는 Pro-Engineer와 I-DEAS를 대상으로 연구하였다.

3.1 광조형용 STL 파일의 구조

STL 파일을 모델링한 물체의 외면을 그림 2와 같은 삼각형망(Triangular Net)의 집합으로써 구성되는데, 이 삼각형망의 정보는 삼각형의 세 정점좌표와 삼각형을 이루는 facet normal로 구성되며, 하나의 삼각형망은 facet normal로 시작하여 endfacet으로 끝난다. 각 삼각형망에서의 facet normal은 이 삼각형망이 어느 방향으로 향하고 있는지를 나타내므로 정확한 형상제작을 위한 서포트생성시 정점좌표 정보와 함께 서포트의 높이 및 필요한 영역을 결정하는 중요한 역할을 한다.³⁾

solid Part Name

```
facet normal 0.00000e+00 0.00000e+00 1.00000e+00
outer loop
vertex 1.00000e+01 -1.00000e+01 0.00000e+00
vertex 0.00000e+01 0.00000e+00 0.00000e+00
vertex 1.00000e+01 0.00000e+01 1.00000e+00
endloop
endfacet
endsolid Part Name
```

Fig.2 STL file format

3.2 광조형용 STL 파일의 처리

STL 파일을 이용하여 최종적인 조형용 정보인 NC 데이터를 생성시키기 위해서 STL 파일의 모든 삼각형망을 차례로 읽어 들여 삼각형망끼리 완전하게 인접해 있는지를 확인하고, facet 정보와 정점좌표정보를 이용하여 서포트를 생성시킨 뒤 분할할 층두께를 입력하여 형상을 순차적으로 분할시킨다.^{4) 5)} 이것을 수행하는 단

계는 다음과 같다.

- [단계 1] STL 파일을 읽어들이며 형상확인
- [단계 2] 분할할 방향으로 결정하여 이것을 Z축으로 설정
- [단계 3] 변형방지용 서포트정보를 STL 파일 형식으로 생성
- [단계 4] 분할할 층두께를 결정
- [단계 5] STL 파일의 Zmin 값에서부터 Z축을 따라 위로 층두께만큼씩 분할

형상을 분할시켜 경계정보를 연결시키면 STL 파일의 구조상 한 직선상에 시작점, 중간점, 끝점이 존재하게 되어 인접한 삼각형 patch와 동일한 법선벡터(normal vector)를 가졌을 경우에는 동일한 층의 경계를 이루는 동일직선상에 여러개의 점이 존재하게 되므로 파일크기의 축소와 처리시간의 단축을 위해서 시작점과 끝점을 남겨두고 중간점을 모두 제거시킨다. 이 작업을 수행한 후 분할된 각 층마다 연속되는 직선의 순서대로 데이터의 정렬 및 open loop 확인, 수정을 수행하고 레이저의 주사순서, 주사간격 및 주사패턴을 선택하면 이에 따라서 층마다 주사경로가 생성된다. 주사순서는 루프의 경계와 내부중에서 어느 것을 먼저 주사할 것이냐의 순서를 결정하는 것이고, 본 연구에서 주사경로는 기본적으로 zigzag 방식의 주사법과 web 방식의 주사법을 기본으로 하며, 형상크기 및 특징에 따라 변형을 방지하기 위하여 층별로 주사시 주사영역을 구분하여 영역별로 주사할 수 있도록 개발하였다. 형상이 큰 경우에는 길이방향으로 한 번에 주사하면 광경화성수지의 수축으로 인하여 전체길이가 줄어들고 양끝단에 변형이 많이 발생하게 되는데, 이 형상을 분할하여 분할된 단위는 레이저빔경만큼 간격을 두고, 분할된 단위마다 먼저 주사한 뒤, 단위 사이를 주사하여 전체를 하나로 묶는 주사법을 개발하였다. 이 경우에는 분할된 단위의 크기가 작을수록 전체형상의 변형은 줄지만 효율적인 조형을 고려하여 최대 9등분까지로 한다. 이 처리과정은 그림 3과 같고 여기에서 사용하는 파일의 구조 및 내용은 그림 4와 같다.

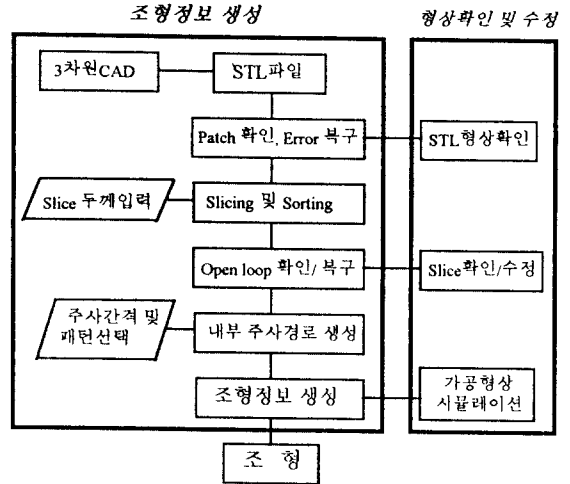


Fig.3 Flowchart of scan data generation

파일명	데이터파일의 구조 및 내용	
STL	Solid filename facet normal f8.6e3 f8.6e3 f8.6e3 outer loop vertex f8.6e3 f8.6e3 f8.6e3 vertex f8.6e3 f8.6e3 f8.6e3 vertex f8.6e3 f8.6e3 f8.6e3 endloop endfacet endsolid filename	각 patch별 법선벡터 및 꼭지점의 X,Y,Z 좌표
Slice	[f8.2f8.2f8.2 f8.2f8.2f8.2]	각 삼각Patch에 대한 Slice선분
조사경로	SOB SOL [f8.2 f8.2 f8.2] EOL SOIN [f8.2 f8.2 f8.2] EOIN EOB	각 loop별 선분을 연 결한 좌표 각 slice별 조사경로 좌표
조형정보	일련번호, X,Y좌표값, Slice No., Laser On/Off, 속도 index 등	NC

[]:N회 반복

Fig. 4 Structure and contents of data file

시스템을 분류하면 기구부, 제어부 및 조형정보처리부로 나눌 수 있다.⁶⁾ 여기에서의 시스템 구성은 기구부를 중심으로 나타내었다.

4. 광조형용 시스템 구성

광조형시스템은 시스템의 특징에 따라 구성 요소에서 많은 차이를 발견할 수 있지만, 본 연구에서 개발한 시

4.1 시스템 구성

광조형시스템은 특정한 파장의 빛을 받아서 액체상태에서 고체상태의 형상으로 직접 경화되는 광경화성 수지, 수지를 경화시키는 레이저 및 레이저 빛을 전송시키는 광학부, 마지막 초점부위에서 보다 작은 초점을 얻기 위해 반사거울 직전에 설치한 beam expander, 조형하고자 하는 원하는 위치로 광학부를 이동시키는 로봇과 장치의 골격을 이루는 프레임, 수지를 저장하고 있는 수지저장조, 수지면을 항상 일정한 높이로 유지시키는 밑대 등으로 구성된다(그림 5). 본 시스템에서 사용한 밑대는 조형중인 형상과 부딪쳤을 때 형상에 나쁜 영향을 주지 않도록 부드러워야하며, 액체상태의 수지가 잘 묻지 않는 폴리 카보네이트계열의 필름을 사용하고 있다. 이 외에도 실제로 경화되는 형상이 없혀지는 작업판과 이것의 Z방향 높이를 일정하게 유지시키는 Z축용 로봇가 있으며,¹⁾ 수지저장조에 항상 일정한 량의 수지가 저장되도록 수지를 공급하는 정량 펌프가 사용된다.

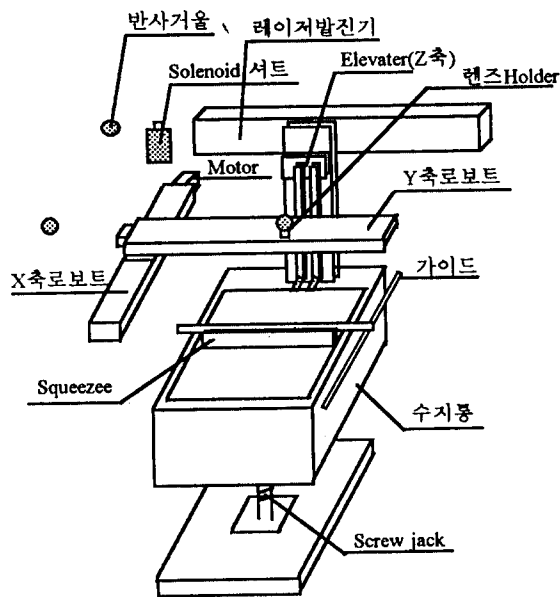


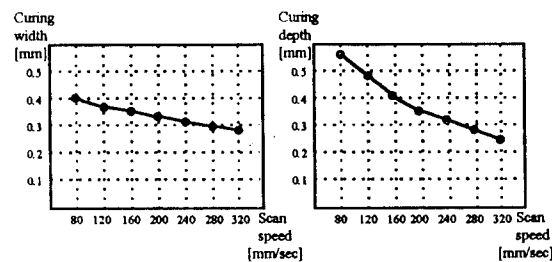
Fig.5 Structure of stereolithography machine

4.2 형상조형실험

모델링된 형상을 정확하게 조형하기 위하여 형상조형

실험을 하였다. 먼저, 광경화성수지의 경화폭과 경화깊이의 경향을 파악하기 위하여 주사속도별로 실험하였다(그림 6).

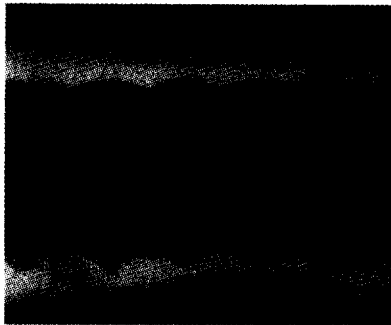
Item \ Scan speed	80 (mm/sec)	120 (mm/sec)	160 (mm/sec)	200 (mm/sec)	240 (mm/sec)	280 (mm/sec)	320 (mm/sec)
Curing width(mm)	0.40	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.28
Curing depth(mm)	0.57	0.48	0.41	0.35	0.32	0.28	0.24



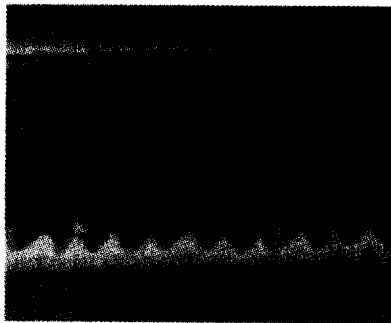
(LASER : He-Cd laser, Beam dia : 0.2mm, Laser power : 30mW)

Fig.6 Curing width and curing depth

실험에 의하면 단주사시 경화되는 형상은 가우스곡선 형태를 이루며 경화되는 것을 알 수 있다(그림 7). 그리고 한 층을 경화시킨 뒤 그 단면을 보면 그림 7의 (a)는 하나의 선을 주사하는 단주사시의 경화형상을 나타낸 것이고, 그림 (b)와 (c)는 단주사를 연결시켜 한 층을 경화시킨 뒤 이것의 경화단면을 촬영한 것이다. 여기서 그림 (b)는 그림 (c)에 비하여 주사간격이 넓기 때문에 사진 아래쪽에 있는 경화형상의 꼭지점부분이 2배로 벌어, 경화층의 표면도 주사간격이 멀 경우 좋지 않다는 것도 그림을 통해 알 수 있다. 경화속도의 경우 주사속도가 빠를수록 경화깊이와 경화폭은 줄어드는 것을 알 수 있으며, 경화폭과 경화깊이는 무한정 늘어나지도 줄어들지도 않으므로 형상에 따라 실제 조형하고자 하는 주사속도를 선택하여서 그때의 경화폭과 경화깊이를 고려하여 offset 량 및 한층 두께를 결정하여야 한다. 본 실험에 사용된 레이저는 Multi mode, 325nm의 파장과 30mW의 출력을 가지는 Omnichrome사의 He-Cd 레이저이고, 경화에 사용된 수지는 Acrylate계의 광경 화성수지이다.



(b) Cross section of cured slice at scan space 0.2 (x 75)



(c) Cross section of cured slice at scan space 0.1 (x 75)

Fig.7 Shape of cured line and slice's cross section

5. 형상조형용 CAD/CAM 소프트웨어 (LG-SLCAM) 개발(그림 7)

3차원 CAD에서 모델링된 형상을 STL 파일로 변환해서 받아들이고, 이것을 이용하여 최종적으로 가공하고자 하는 NC 데이터를 생성한다. 이때 모델링된 형상의 좌표축과 원활한 조형을 위한 좌표축이 일치하지 않는 경우가 많으므로 조형용 좌표축으로 형상을 돌리기 위하여 "회전기능"이 필요하며, 모델링된 형상이 한 번에 조형할 수 있는 크기보다 클 경우에는 형상을 분할하여 조형한 후, 이 형상들을 붙여야 하므로 형상을 나눌 수 있는 기능 "분할기능"이 필요하다. 그리고 같은 형상을 여

러개 동시에 만들기 위해서는 "복사기능"이 필요하며, 큰 형상을 실험용형상으로 만들기 위해서 형상크기를 조절할 수 있는 기능도 개발하였다. 이 외에도 여러 가지의 CAD 기능이 필요하므로 여기에 관한 것을 개발하였으며, 이 단계를 거친 파일을 이용하여 각 층마다 원하는 NC 데이터를 생성시키기 위하여 층 분할기능과 NC 데이터 생성기능을 개발하였다. 그리고 그림 8은 개발한 LG-SLCAM 소프트웨어에서의 작업화면이며, 정확한 NC 데이터를 생성하기 위하여 주사속도별로 경화폭을 고려하여 offset을 시켜줄 수 있도록 offset 기능을 개발하였으며, 레이저 빛이 실제로 완전한 원형이 아닌 관계로 X와 Y 각 방향으로 다른 값의 offset을 줄 수 있도록 개발하였다.

본 시스템은 PC 버전으로서 Windows NT 환경하에서 운영되며 Visual C++를 이용하여 개발하였다.

6. 형상지지용 서포트생성 소프트웨어 개발

STL 파일을 이용하여 조형의 효율성을 극대화시키기 위한 형상의 분할, 회전, 복사, 이동 등의 작업을 수행한 뒤 조형방향, 조형위치 등을 결정한 뒤 제작할 형상에 적합하도록 서포트 구조물의 생성이 필요하다. 서포트 데이터는 좌표 변환이 완료된 최종 STL 데이터로부터 형상을 인식하여 생성시키는데, normal vector와 정점좌표정보를 이용하여 서포트의 높이 및 위치를 계산하고, 서포트 데이터는 STL 파일의 형식으로 만들어지며, 제작할 형상의 STL 파일에 부가되어진다. 서포트는 조형중 적층되는 형상을 지지하여 형상의 처짐이나 비틀림을 방지하기 위해 필요하지만, 조형후 형상으로부터 분리시켜야 하기 때문에 형상의 변형을 방지하면서 형상 및 작업판으로부터 분리가 용이해야 한다. 즉, 서포트는 작업판과 형상의 최하위치 사이를 연결하여 형상을 작업판으로부터 형상을 분리할 때 형상의 파손을 방지하기 위한 기본 서포트(base support)와 적층되는 과정에서 형상 스스로 자신을 지탱하지 못하는 부분의 변형을 방지하기 위한 형상 서포트(part support)로 분리시켜 서포트를 생성한다.⁸¹ 그리고 서포트의 형태는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 개선된 Web 형태를 개발하여 적용시키는데, 기본적인 web 형태의 서포트를 사용하여 형상을 제작한 결과 서포트 자체의 수축과 변형 그

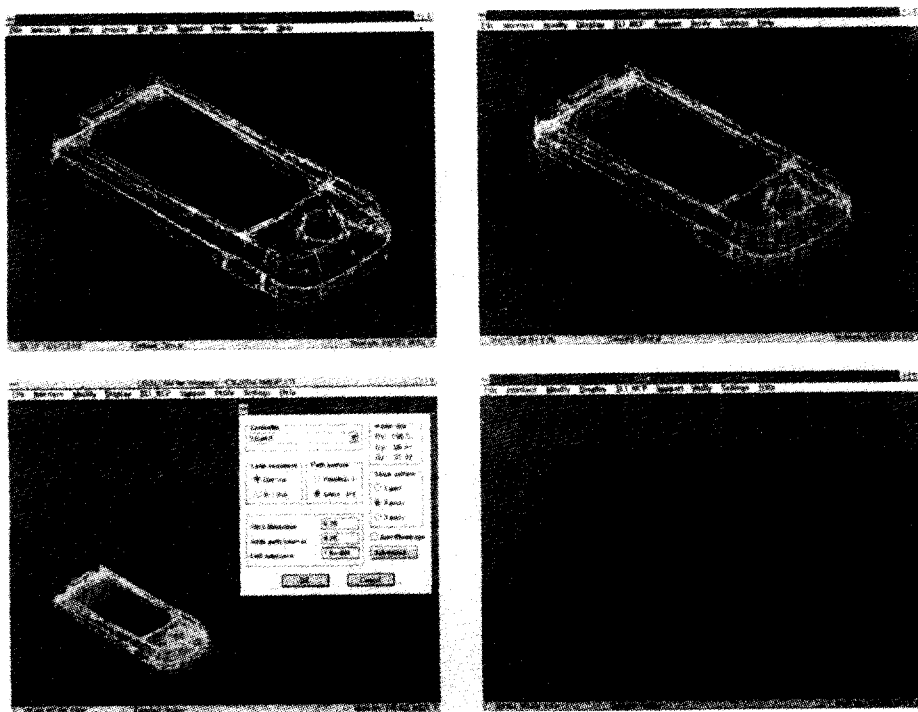


Fig.8 LG-SLCAM software for RP's CAD/CAM

리고 서포트구조상 내부에 있는 수지의 흐름을 방해하여 서포트 역할을 제대로 수행하지 못하였기 때문이다. 그림 8에 Web 형태와 개선된 Web 형태를 나타내었다.

지 흐름이 원활하여 보다 정확한 형상을 만들 수 있었고, 작업판으로부터 조형형상을 분리시킬 때 작업성이 우수하였다(그림 9).

7. 제어용 소프트웨어 개발

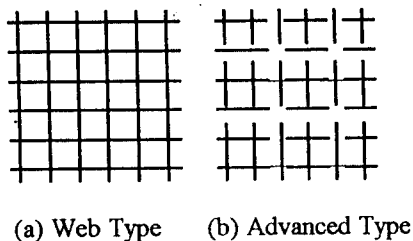


Fig.9 Top view of support structure

개선된 Web 형태는 기본적인 Web 형태를 작은 단위로 분리시킨 것으로 이것을 적용시킨 결과 각 단위 서포트의 수축응력이 형상전체에 전달되지 않고 서포트내의 수

원하는 형상을 조형하기 위해 NC 데이터를 만든 다음에 실제로 이 값을 이용하여 원하는 형상을 제작한다. 이때의 NC 데이터는 형상과 서포트의 가공순서, 위치 정보 및 층정보를 가지고 있으며, 정확하게 형상을 조형하기 위해 필요한 정보인 서포트와 형상의 조형속도, 작업판의 down/up 량, 밀대이동속도, 밀대횟수 및 각 층별 대기시간 등은 제어용 소프트웨어상에서 결정하여 입력하도록 개발하였다. 이 외에 정량 펌프를 이용한 수지

공급시간 입력, 비상정전시 현재 작업중인 정보를 저장하여 연속해서 조형할 수 있는 기능 등을 개발하였다.이 계에서 결정하는 변수는 앞 단계인 형상조형용 소프트웨

어상에서 결정할 수 있으나, 조형작업을 시작하기 직전에 장치의 상태(레이저출력, 주위온도 등)에 따라 이러한 정보를 가변시키야 하므로 제어용 소프트웨어상에서 처리하도록 개발하였다. 제어용 소프트웨어는 현재 작업 중수, 작업상태, 작업시간 및 예상 남은시간 등을 나타낸다(그림 10).

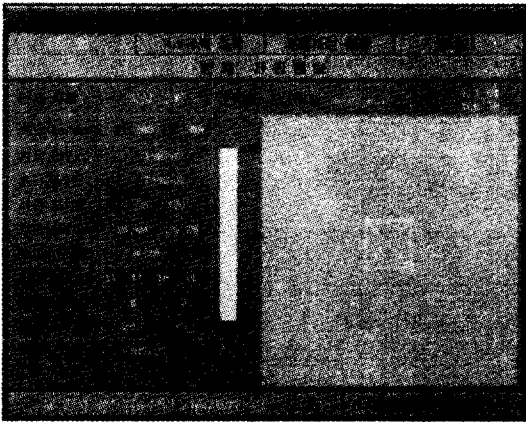


Fig.10 Software for system control

8. 결 론

3차원 CAD의 활용빈도가 점차 높아지고, 제품개발기간의 단축을 지원하기 위하여 광조형시스템을 개발하였다. 광조형시스템은 CAD 데이터를 이용하여 형상을 즉시 제작하기 위해서 여러 가지 기능을 필요로 한다. 즉, CAD 데이터의 처리, NC 데이터 생성, 제어용 소프트웨어 개발, 광학기기 제작, 기구부 제작 및 원하는 기능을 구현할 수 있는 재료의 개발 등이 광조형시스템의 개발에 있어서 성공의 관건이 된다. 이러한 기본조건을 다 갖추었다고 하더라도 원하는 형상 및 요구하는 정밀도를

가지기 위해서는 많은 실험 및 고유의 조형프로세스 개발을 필요로 한다. 이러한 과정을 거쳐서 개발한 광조형시스템으로 여러 가지 제품개발을 지원하였다. 그러나 아직까지 광조형으로 제작한 형상은 광조형 프로세스로 인하여 발생하는 표면의 단차 때문에 현업에 바로 적용하기 곤란하며, 반드시 표면처리과정을 거쳐야 한다. 앞으로 이러한 문제를 해결하기 위하여 레이저 주사(scanning) 방법을 개선할 예정이며, 이와 함께 공업용 샘플로 직접 사용이 가능한 재료를 이용하여 형상을 직접 제작할 수 있는 단계까지 도달하여야 광조형시스템이 개발현장에서 널리 사용될 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 第6會 光造形SYSTEM SYMPOSIUM 資料, 型技術協會, p.p.9-24, 1994.
2. 第8會 光造形SYSTEM SYMPOSIUM 資料, 型技術協會, p.p.1-20, 1995.
3. 김준안 외, "광조형법을 구현하기 위한 장치구성 및 조형에 관한 연구(제1보)", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, p.p.481-484, 1995.
4. 홍삼열 외, "Stereolithography의 조형정보생성에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, p.p.440-444, 1995.
5. 최홍태, 김준안, 이석희, 백인환, "Stereolithography를 위한 STL 파일로부터 단면정보변환에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, p.p.445-450, 1995.
6. 檜原弘之, "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, p.p.11, 1995.
7. 丸谷洋二 外, "光造形法", 日間工業新聞社, p.p.110, 1990.
8. Paul F. Jacobs, "Rapid prototyping & manufacturing", p.p.173-194, 1992.