

# 가변 적층 쾌속 조형 공정 개발을 위한 단위형상조각 자동 생성 소프트웨어 개발 및 적용 예

이상호\*, 김태화\*\*, 안동규\*, 양동열\*, 채희창\*\*

## Software Development for Automatic Generation of Unit Shape Part for Variable Lamination Manufacturing Process

Sang Ho Lee\*, Tae Hwa Kim\*\*, Dong Gyu Ahn\*, Dong Yol Yang\*, Hee Chang Chae\*\*

### ABSTRACT

In all the Rapid Prototyping (RP) techniques, the computer-aided design (CAD) model of a three-dimensional part is sliced into horizontal layers of uniform, but not necessarily constant, thickness in the building direction. Each cross-sectional layer is successively deposited and, at the same time, bonded onto the previous layer. The stacked layers form a physical part of the model. The objective of this study is to develop a software for automatic generation of unit shape part (USP) for a new RP process, Variable Lamination Manufacturing using the linear hotwire cutting technique and expandable polystyrene foam sheet as part material (VLM-S). In order to examine the applicability of the developed software to VLM-S, USPs of general three-dimensional shapes, such as an auto-shift lever knob and a pyramid shape were generated.

**Key Words :** Rapid Prototyping(쾌속조형), Variable Lamination Manufacturing(가변 적층 쾌속조형), Expandable Polystyrene Foam(EPS Foam : 발포 폴리스티렌 폼), Unit Shape Part(USP : 단위 형상 조각)

### 1. 서론

1986 년 미국에서 개발된 '쾌속조형'기술(Rapid Prototyping Technology)은 제품의 CAD 데이터로부터 플라스틱, 종이, 광경화성수지 및 금속 등의 재료를 이용하여 제품을 직접 만들 수 있는 새로운 개념의 공정이다. RP 의 대표적인 공정으로는 3D Systems 사의 SLA, Stratasys 사의 FDM, DTM 사의 SLS, Z Corp.사의 3DP, Objet Geometries 사의 Objet Quadra 등이 있다<sup>1)3)</sup>. SLA(StereoLithography Apparatus)는 광조형법이라 불리며 액상의 광경화수지에 레이저광선을 선택적으로 조사하여 한 층

씩 적층해 나가는 방법이고, FDM(Fused Deposition Modeling)은 용착조형공정이라 불리며 선(filament) 형태의 열가소성 수지를 노즐 안에서 녹인 후 압출하여 적층시키는 방법이다. 그리고 SLS(Selective Laser Sintering)은 선택적 레이저 소결 공정으로 균일한 크기의 고체분말을 한 층씩 도포한 뒤 레이저 광을 조사하여 소결시킨 뒤 적층시키며, 3DP(3D Printing)는 3 차원 프린팅으로 녹말과 같은 분말을 얇게 도포한 뒤 그 위에 액상의 접착제를 잉크젯 방식으로 분사하여 입체 형상을 제작하며, Objet Quadra 는 2000 년 3 월에 소개된 방식으로 프린터 헤드가 이동하면서 노즐을 통해 단면형상

2001 년 1 월 12 일 접수

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 전북대학교 기계설계학과

에 따라 광경화성 수지 또는 지지대(support)를 도포하면서 헤드에 부착된 UV 램프(Ultra Violet lamp)에서 UV 자외선을 조사하여 재료를 경화시키는 방식이다.

이러한 기존의 쾌속 조형 공정은 다음과 같은 문제점이 있다.

- 3 차원 CAD 데이터를 z 방향으로 슬라이싱하여 2 차원 슬라이스 데이터를 얻는 과정에서 z 방향으로 계단형상의 단차가 생긴다.
- 고정된 두께의 얇은 층과 선 형태로 적층하기 때문에 많은 조형 시간이 소요된다.
- 시작품의 정밀도 향상과 지지대 제거등을 위한 추가적인 후처리 공정이 요구된다. 그리고, 후처리 공정에 소요되는 시간 및 비용이 상당하며 추가적인 장비가 요구되기도 한다.
- 장치의 도입 가격과 유지비가 상당히 고가이므로 일반 산업 현장이나 교육시설 등에 도입하기 어렵다.

이와 같은 기존의 쾌속 조형 공정의 문제점을 극복하기 위하여 정밀도 향상과 조형 시간을 획기적으로 단축시키며 후처리 공정이 거의 요구되지 않는 새로운 개념의 가변 적층 쾌속 조형 공정 (Variable Lamination Manufacturing: VLM)이 개발중에 있다. 특히, Fig. 1에 보여진 바와 같이 현재 개발되고 있는 가변 적층 쾌속 조형 공정중 발포 폴리스티렌 폼 (Expandable Polystyrene Foam: EPS Foam)를 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정(VLM-S)<sup>(4)</sup>은 장비 가격과 유지비가 저렴하며 개념 모델, 로스트 폼 주조(Lost Foam Casting) 등 쾌속 조형 적용분야의 약 90% 이상에 적용할 수 있어 산업적으로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

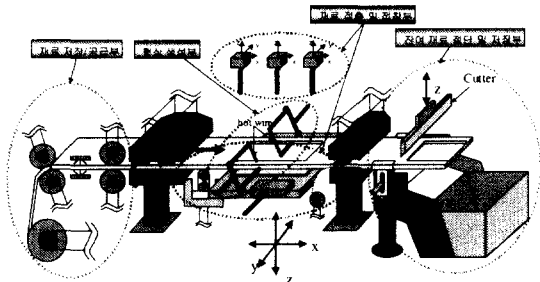


Fig. 1 VLM-S apparatus schematics

본 연구에서는 현재 RP 장비의 표준으로 자리 잡고 있는 STL 파일을 입력 파일로 하여 VLM 시스템의 제어부로 들어가는 USP(Unit Shape Part)과

일을 자동 생성하는 VLM-S 용 CAD 소프트웨어를 개발하였다. USP 파일은 두꺼운 재료를 사용함으로써 나타날 수 있는 계단 효과를 최소화하기 위하여 3 차원 CAD 모델의 측면 경사각을 포함하고 선의 형태가 아닌 판재의 재료를 사용하기 때문에 판재의 넓이에 맞도록 한 층의 단면을 여러 조각으로 만들어 이 조각사이의 위상 데이터를 포함하게 된다.

정밀도를 유지하면서 층의 수를 최적화하는 adaptive slicing 방법이 Dolenc<sup>(7)</sup>와 Kulkarni<sup>(8)</sup> 등에 의해 연구 되었다. 본 연구에서는 재료 공급의 자동화를 위해서 층의 두께는 일정하게 유지 하면서 측면에 경사각을 부여하여 측면의 계단 효과를 최소화할 수 있도록 절단 경로 데이터를 생성하였다.

## 2. VLM-S 용 CAD 소프트웨어

본 연구에서 개발한 VLM-S(Variable Lamination Manufacturing system by using hard Styrofoam)용 CAD 소프트웨어는 현재 개발중인 VLM 장비의 제어부의 입력 파일인 USP(Unit Shape Part) 파일을 자동 생성하기 위한 소프트웨어이다.

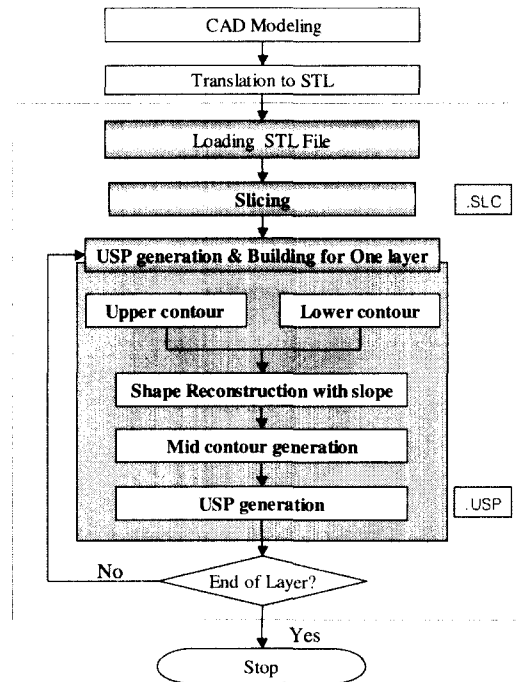


Fig. 2 Flowchart of the VLM-S's CAD software

VLM-S 용 CAD 소프트웨어는 Fig. 2 에 나타난 흐름도와 같이 크게 5 가지 모듈로 구성된다.

- 가. STL 파일 로딩(Loading) 모듈
- 나. 슬라이싱(Slicing) 모듈
- 다. 측면 형상 재구성(shape reconstruction) 모듈
- 라. 중간 단면 생성 모듈
- 마. 단위 형상 조각(Unit Shape Part) 생성 모듈

VLM-S 용 CAD 소프트웨어는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 입력 파일 형식은 현재 패속 조형 산업의 표준으로 자리 잡은 STL 파일이다. 둘째, PC 기반의 Windows 98 과 Windows NT 상에서 작동하도록 C++ 과 Visual C++ 6.0 컴파일러를 사용한다. 셋째, 각각의 모듈의 가시화는 OpenGL 그래픽 라이브러리를 사용한다.

### 2.1 STL 파일 로딩(Loading)

STL 파일 로딩모듈은 3 차원 CAD 모델로부터 변환된 STL 파일<sup>[9,10]</sup>(ASCII or Binary type)의 기하학적 정보(각각의 facet 에 관한 정보)를 읽어 들여서 저장하는 모듈이다.

STL 파일 포맷(format)은 미국의 3D Systems 사에 의해 개발된 파일 포맷으로서 3 차원 형상의 외곽을 삼각형 패치와 그 법선 벡터를 이용하여 근사화 시킨 것이며, 현재 대부분의 RP 장비의 입력 데이터로 사용되어지고 있다.

Fig.3 는 중공형 원통 형상의 모델을 STL 파일로 변환시킨 것이다.

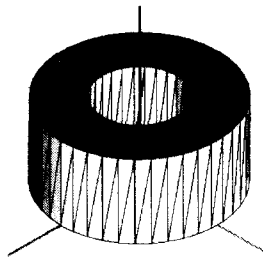


Fig. 3 STL file loading of a hollow cylinder

STL 파일은 두 가지 요구 조건<sup>[9,10]</sup>을 만족해야 한다. 첫째, 오른손 법칙(Right-hand rule)은 삼각형의 꼭지점 순서에 따라 입체의 안쪽면과 바깥쪽면을 확인할 수 있는 법칙이다. 둘째, VV 법칙(Vertex-to-Vertex rule)은 모든 삼각형은 각각의 인

접한 삼각형과 정확히 두 개의 공통 꼭지점을 공유해야 한다는 법칙이다.

일반 상용 CAD 소프트웨어에서 지원하는 STL 변환기를 이용하여 3 차원 CAD 모델을 STL 파일로 변환하는 경우 변환 과정에서 꼭지점의 누락이나 중복 등과 같은 오류가 발생하기도 하며 극히 작은 각을 가지는 예각삼각형(Acute triangle)으로 인해 연산과정 중에 오류를 발생할 수 있기 때문에 STL 파일을 로딩한 후에는 이러한 오류를 검색, 수정해주어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 STL 파일의 검색, 수정을 위해서 채희창<sup>[11]</sup>이 개발한 STL Editor 를 사용하였다.

로딩된 STL 파일에서 인접한 두 삼각형은 반드시 하나의 모서리를 공유해야 하므로, STL 파일을 데이터 베이스에 저장하게 되면 꼭지점이 중복되어 메모리 낭비를 가져오게 된다. 그래서 속도 향상과 메모리 절약을 위하여 이러한 중복 꼭지점을 제거한다. 그리고, 3 차원 CAD 의 좌표계와 VLM-S 의 좌표계가 서로 다르기 때문에 두 좌표계를 일치시키기 위해서 모델의 가장 아래 면의 중심이 XY 테이블의 원점에 위치하도록 좌표 변환을 한다.

### 2.2 슬라이싱(Slicing)

슬라이싱 모듈은 3 차원 CAD 데이터를 2 차원 단면 데이터로 슬라이싱<sup>[12,13]</sup>하고 루프(loop)를 형성하여 SLC 파일을 생성하는 모듈이다. Fig. 4 는 Fig. 3 의 중공형 원통 형상을 슬라이싱 한 그림이다.

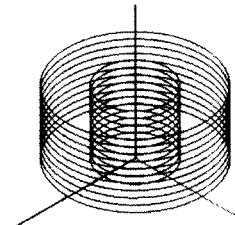


Fig. 4 Slicing of a hollow cylinder

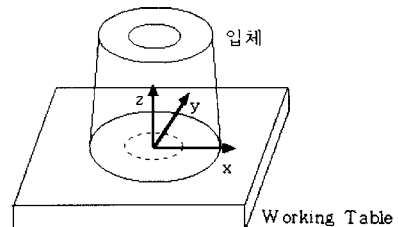


Fig. 5 Coordinates of VLM-S Apparatus

VLM-S 는 Fig. 5 과 같이 좌표계가 구성된다. 따라서  $Z = 0$  인 평면에서부터 순차적으로 적층하면 됨으로  $Z = D(0 \cdot D \cdot \text{최대입체크기})$  인 절단 평면과 교차하는 입체의 삼각형에서 단면을 구하면 된다.

```

solid      filename total_layer_numbers
SIZE      xMin xMax yMin yMax zMin zMax
.....
layer     N total_loop_numbers      z-coordinate
.....
loop N    total_point_numbers
          1 x y
          .....
          N x y
        endloop
.....
end layer
.....
endsolid
    
```

Fig. 6 SLC file format

먼저 평면과 직선과의 위치 관계를 고려하여 무한 평면과 삼각형의 한 모서리 사이의 교점을 구한다. 이와 같이 구해진 교점을 각각 에지(Edge)로 저장한다. 그리고 나서, 이러한 에지들은 반시계방향으로 고정하여 정렬을 한 후에 루프를 형성한다. 이렇게 형성된 루프를 Fig. 6 과 같은 포맷의 SLC 파일로 출력한다.

**2.3 측면 형상 재구성(shape reconstruction)**

VLM-S 는 조형시간을 단축하기 위하여 두꺼운 재료를 사용하고, 계단효과를 줄이기 위해 측면에 경사를 주어서 선형열절단기로 절단하는 개념을 가지고 있다. 선형열절단기로 절단할 때, 절단 후에 아랫면과 윗면이 어긋나는 경우가 발생하지 않도록 하기 위해서 앞서 구한 슬라이싱 단면을 이용하여 측면의 형상을 삼각형으로 재구성하여 단면 사이에 하나의 삼각형만 존재하도록 한 뒤 이 삼각형을 다시 슬라이싱한다. 이러한 개념을 CAD 에서 구현하기 위해서 Fig. 7 과 같이 SLC 파일을 맨 아래 층부터 위쪽으로 2 개의 층을 읽어 들여서 격자 자동 생성 알고리즘인 선진 전단 기법(Advancing Front Technique)<sup>[14]</sup>을 적용하여 아래, 위 단면을 삼각형으로 둘러싸서 측면 형상을 재구성<sup>[15]</sup>한다.

선진 전단 기법(AFT)의 적용순서는 다음과 같다. 첫째, Base front 를 잡는다. nth contour 의 한 점에

서 가장 가까운 거리에 있는 n+1th contour 의 한 점을 선택하여 선분으로 연결한다. (B1,i, B2,i) 이 선분이 Base front 가 된다.

둘째, 첫 번째 삼각형을 구성하기 위해서 base front 에서 루프의 진행방향으로 가장 가까이 있는 점을 선택한다.(C1, C2)

셋째, base front 와 C1 으로 삼각형을 구성하여 이 삼각형의 외접원의 중심과 반경을 구한다.

넷째, 위에서 구한 외접원의 중심과 C2 사이의 거리와 반경을 비교하여 반경이 더 작을 경우에는 C1 을 삼각형의 세 번째 점으로 선택하고 그렇지 않으면 C2 를 선택한다.

다섯째, base front 를 이동시킨다. 만약 세 번째 점으로 C1 이 선택되었으면 base front 는 C1 과 B2,i 가 된다.

여섯째, base front 와 다음 체크 포인트를 선정하여 세 번째부터 n 또는 n+1th contour 의 점이 모두 사용될 때까지 반복한다.

일곱 번째, n(n+1)th contour)의 남아 있는 점과 n+1(n)th contour 의 마지막 점을 이용하여 삼각형을 구성한다.

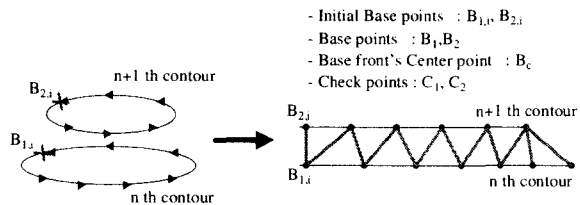


Fig. 7 Advancing front technique for shape reconstruction of two adjacent contours

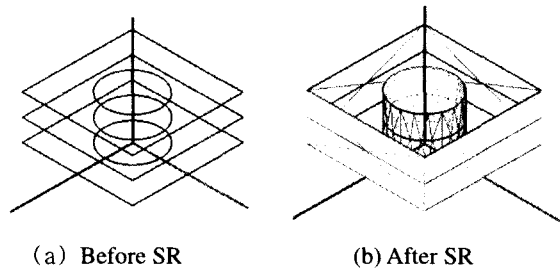


Fig. 8 Shape reconstruction of a hollow cylinder

선진 전단 기법을 적용하는데 있어서 전단(Front)을 전진시키기 위해서 이미 만들어진 삼각형과 삼각형 후보들의 법선 벡터를 이용하였고, 삼각형의 세 번째 점을 찾기 위해서 Delaunay 삼각화 개념을 부분적으로 도입하였다. Fig. 8 는 중공형 원통 형상의 단면 데이터를 이용하여 측면 형상을 복원한 모습이다.

### 2.4 중간 단면 생성

선형열절단기를 경사지게 하면서 그 중심을 맞추기 위해서 재료 두께로 슬라이싱 한 후 연속한 두 레이어를 이용하여 측면 형상을 복원하여 t/2 만큼 옵셋(offset)시켜 다시 한번 슬라이싱 하여 중간 단면을 구해주어야 한다.

2.3 절에서 복원한 측면의 삼각형에 2.2 절의 슬라이싱 모듈을 적용하여 Fig. 9 과 같이 아래, 위 단면의 중간 단면을 구할 수 있다.

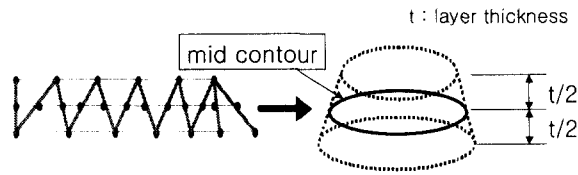


Fig. 9 Generation of Mid-Contour

중간단면은 실제 VLM-S 의 절단기 경로를 나타낸다. 따라서 중간단면을 구하면서 중간단면을 이루고 있는 에지(edge)가 만들어진 삼각형의 법선벡터를 이용하여 절단기의 경사 각도를 계산한다.

VLM-S 에서 절단기는 3 차원적인 기울기를 가지고 있다. 절단기의 형상은 사람의 손에 막대기를 끼운 형상과 비슷하면서 손목이 회전하면서 손가락을 앞뒤로 움직여 막대기의 위치를 조절하는 것과 같은 방법으로 VLM-S 절단기의 위치를 결정한다. 또한 팔 전체가 움직여 단면 전체를 따라 절단하게 된다. 절단기의 기울기 Rx, Ry 는 삼각형의 법선벡터를 이용하여 계산할 수 있다. 절단기는 x, y 축과의 회전 각도만 가지고 있으므로 삼각형의 법선벡터를 z 축과 일치하도록 삼각형의 법선벡터를 yz 평면에 투영하여 x 축에 대한 회전 각도 Rx 를 계산할 수 있고, xz 평면에 투영하여 y 축에 대한 회전각도 Ry 를 계산 할 수 있다. 이렇게 구한 경사각은 삼각형 자체가 하나의 평면이기 때문에 삼각형이 기울어진 방향으로 재료를 절단하면 형상의 기울기와 맞게 재료를 절단할 수 있다.

### 2.5 단위 형상 조각(Unit Shape Part) 생성

단위 형상 조각 생성 모듈은 각각의 layer 에 대하여 기하학적 데이터와 위상학적 데이터(단위 형상 조각 사이의 인접 관계)를 가진 여러 조각의 띠(strip)로 분할하여 Fig. 10 과 같은 USP 파일을 생성하는 모듈이다.

```

Solid usp_filename total_layer_numbers
.....
layer N total_usp_numbers z-coordinate
.....
usp N total_point_numbers
x y Rx Ry v V I
.....
(usp n의 위치좌표, 각도, 속도, 전압, 전류)
.....
x y Rx Ry v V I
.....
endusp
.....
endlayer
.....
endsolid
    
```

Fig. 10 USP file format

VLM-S 는 조형시간 단축을 위해서 두꺼운 판 형태의 두께를 가진 재료를 사용한다. 이는 선형태로 하나의 단면을 조형할 때 보다 훨씬 적은 시간으로 같은 형상을 조형할 수 있는 장점이 있는 반면 한 층의 넓이가 공급되는 재료의 폭보다 크게 되면 조형하기가 곤란한 문제가 발생한다. 다시 말하면 VLM-S 에 공급되는 재료의 길이(x 축 방향)는 작업 테이블 최대길이까지 할 수 있으나 폭(y 축 방향)은 그 한계가 정해져 있다. 때문에 하나의 단면을 하나의 조각으로 성형할 수 없는 경우도 발생할 수 있다. 그래서 2.4 절에서 구한 중간 단면을 재료의 폭에 맞게 절단해서 여러 개의 조각으로 만들어 주어야 한다. 이 조각을 단위 형상 조각(USP, Unit Shape Part)이라 한다.

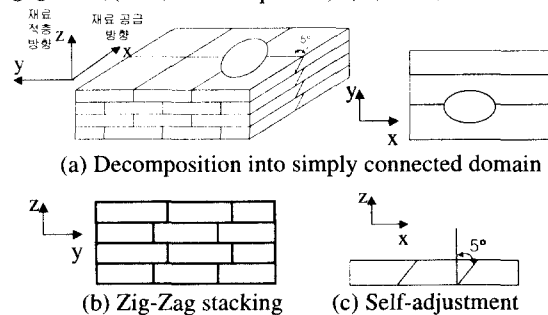


Fig. 11 The requirements of USP generation

Fig. 11 와 같이 3 가지 요구조건을 만족하도록 단위형상조각을 생성한다.

첫째, Fig. 11(a)와 같이 슬라이싱해서 얻은 단면을 단순연결영역으로 분할한다. 둘째, Fig. 11(b)와 같이 접착시에 모델의 강도를 높이기 위해서 Y 방향으로 일정한 간격으로 자를 때, 지그재그로 자른다. 셋째, Fig. 11(c)와 같이 X 방향으로 영역을 분할할 때, XY 테이블에서 적층시 끼워 맞춤이 용

이하도록 전면과 후면에 5°이하의 경사각을 준다. 이때 서로 끼워 맞춤이 되는 단위 형상 조각 사이의 경사각은 크기는 같고, 부호는 반대이다.

USP 파일의 단위 형상 조각의 위치와 그 위치에서의 경사각과 같은 기하학적 데이터는 선형 열선 절단기의 절단 경로를 나타낸다. 이러한 절단 경로는 실험<sup>16)</sup>에 의해서 주어진 열선 절단 속도와 열선의 열량, 공구의 직경(0.36 mm) 등을 고려하여 공차를 보정하여 최적의 절단 경로를 생성한다.

### 3. VLM-S 용 CAD 소프트웨어 적용예

VLM-S 용 CAD 소프트웨어의 유용성을 검증하기 위하여 피라미드 형상과 EF SONATA 오토시프트 레버 노브에 적용하여 보았다.

#### 3.1 피라미드

피라미드 형상은 간단하면서도 측면 경사각을 가장 잘 나타낼 수 있는 모델로 판단되어 프로그램 검증에 사용되었다. 결과에서 보듯이 피라미드의 경사각이 제대로 표현되었음을 알 수 있다.

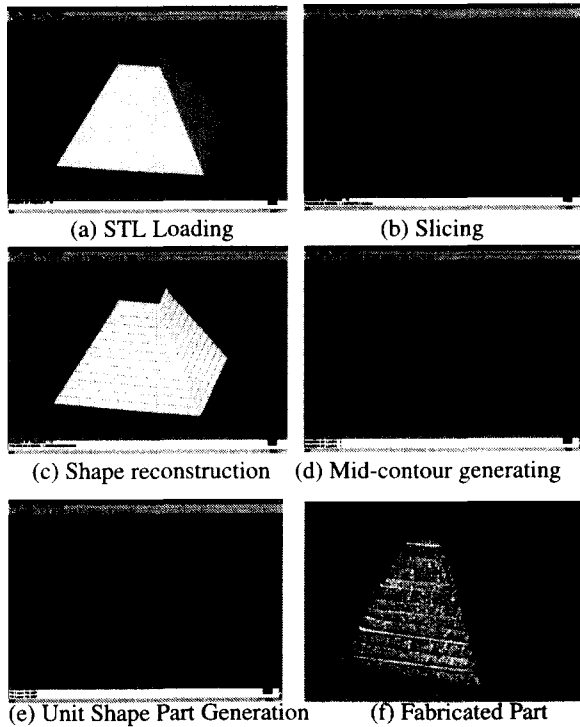


Fig. 12 Pyramid Shape

#### 3.2 EF SONATA 오토 시프트 레버 노브

보다 실제적인 모델에 VLM-S 용 CAD 소프트웨어를 적용해 보기 위해서 EF SONATA 오토시프트 레버 노브에 적용하여 보았다.

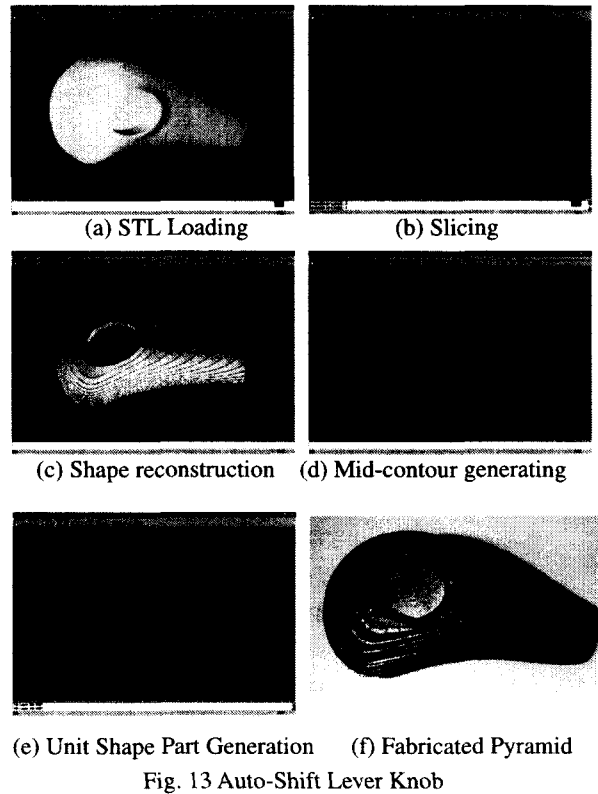


Fig. 13 Auto-Shift Lever Knob

### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 쾌속조형 공정 및 장치의 문제점인 계단 형상 발생, 장시간의 조형시간 소요 및 고가의 장비 가격과 유지비를 해결할 수 있는 가변 적층 쾌속 조형 공정 및 장치의 입력 파일인 USP 파일을 자동으로 생성하기 위해서 아래와 같은 5 가지 모듈을 개발하였다.

- 가. STL 파일 로딩(Loading) 모듈
  - 나. 슬라이싱(Slicing) 모듈
  - 다. 측면 형상 재구성(shape reconstruction) 모듈
  - 라. 중간 단면 생성 모듈
  - 마. 단위 형상 조각(Unit Shape Part) 생성 모듈
- 그리고 이 소프트웨어를 피라미드 형상과 EF

SONATA 의 오토시프트 레버 노브에 적용해 보았다.

향후 추가적인 연구를 통해서 측면 형상 재구성 알고리즘과 측면 경사각 구현 알고리즘을 보완하고 개선하는 한편, 지지대 생성 알고리즘 제안하고 추가 하여 궁극적으로 VLM-S 용 제어 소프트웨어와 결합되어 VLM-S 공정 전체를 제어 운영하는 통합 VLM-S 용 CAD 소프트웨어를 개발하고자 한다.

### 참고문헌

- Paul F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press, 1996.
- 양동열, 손현기, "쾌속제품개발(RPD)을 위한 쾌속조형 기술의 최근 동향," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 10 호, pp. 5-10, 2000.
- 양동열, 안동규, "쾌속조형공정의 원리 및 기술동향," 월간 프레스 기술 12 월호, pp. 41-63, 2000.
- A. F. Lennings, J. J. Broek, I. Horvath, A. de Smit, J. S. M. Vergeest, "Prototyping large-sized objects using freeform thick layers of plastic form," Solid Free Fabrication Symposium Proceedings, pp. 97-104, 1998.
- "선형 열절단 시스템을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정 및 장치" 특허 출원 번호 2000-18175, 2000.
- 안동규, 이상호, 양동열 외 2 인, "가변 적층 쾌속 조형 공정 개발을 위한 발포 폴리스티렌 폼의 선형 열선 절단시스템 절단 특성 및 접착강도 특성에 대한 연구," 한국정밀공학회 제 17 권, 제 12 호, pp. 185-194, 2000.
- Dolenc, A. and Makela, I., "Slicing Procedures for Layered Manufacturing Technique," Computer Aided Design, Vol. 26, No. 2, pp. 119-126, 1994.
- Kulkarni, P. and Dutta, D., "An accurate slicing procedure for layered manufacturing," Computer Aided Design, Vol. 28, No. 9, pp. 683-697, 1996.
- 박근, 윤정환, 양동열, 조종래, "쾌속 3 차원 조형법과 유한요소해석을 연계한 소성가공 금형설계의 동시공학적 접근방법," 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 8 호, pp. 146-154, 1996.
- 최홍태, 이석희, "급속조형시스템을 위한 STL 포맷의 오류 검증에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 10 호, pp. 46-55, 1996.
- 채희창, "STL 에 위상정보를 부여하기 위한 삼각형 기반 형상 모델링," 한국 정밀공학회지, 제 14 권, 제 2 호, pp. 136-144, 1997.
- 채희창, 정인성, "분리형 삼각형을 기준으로한 입체모델링에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 10 권, 제 1 호, pp. 89-99, 1993.
- 최홍태, 김준안, 이석희, 백인환, "Stereolithography 를 위한 STL 파일로부터 단면정보 변환시스템의 개발," 한국정밀공학회지, 제 12 권, 제 11 호, pp. 140-147, 1995.
- C. K. Lee and R. E. Hobbs, "Automatic adaptive finite element mesh generation over arbitrary two dimensional domain using advancing front technique," Computers and Structures, Vol. 71, pp. 9-34, 1999.
- David Meyers, Shelley Skinner, and Kenneth Sloan, "Surfaces from Contours," ACM Transactions on Graphics, Vol. 11, No. 3, pp. 228-258, 1992.