

SLA를 이용한 신속 시작작업에서 최적 성형방향의 결정

허정훈*, 이건우**

Determination of Optimal Build-up Direction for Stereolithographic Rapid Prototyping

Junghoon Hur*, Kunwoo Lee**

ABSTRACT

Stereolithography is a process used to rapidly produce polymer components directly from a computer representation of the part. There are several considerations to be made for the efficient use of the process. Especially, the build-up orientation of part critically affects the part accuracy, total build time and the volume of support structures. The purpose of this study is to determine the optimal build-up part orientation for the SLA process with improving part accuracy, and minimizing total build time and the volume of support structures. The first factor is related to the area of surfaces which have staircase protrusions after solidification, the second factor is related to the total number of layers, and the third factor is related to the area of the surfaces which need to be supported with support structures.

An algorithm is developed to calculate the staircase area, quantifying the process errors by the volume of materials supposed to be removed or added to the part, and the optimal layer thickness for the SLA system which can handle the variable layer thickness. So the optimal part orientation is determined based on the user's selections of primary criterion and the optimal thickness of layers is calculated at any part orientations.

Key Words : SLA(광조형 장치), Optimal Build-up Orientation(최적성형방향), Part Accuracy,(성형정밀도) Build Time(성형시간), Support Structure(지지대), Optimal Layer Thickness(최적층두께)

1. 서 론

시작품(prototype)을 제작하는 일반적인 목적은 제품 개발 초기 단계에서 설계상의 오류나 실제로 대량 생산을 하기에는 적합하지 못한 요인을 조기에 발견하는 것이라

할 수 있다. 그러나 이에는 적지 않은 시간과 비용이 소요 되기 때문에 그 경제성과 효율성이 문제가 된다. 최근에 이러한 한계를 극복하기 위해 신속시작체계(rapid prototyping & manufacturing system)가 활용되고 있으며, 특히 이 중 SLA(Stereolithography Apparatus)는

* 서울대학교 기계설계학과

** 서울대학교 기계설계학과

요 근래 많은 기술적 발전을 보이고 있다. SLA를 이용하여 성형한 3 차원 물체는, 시작품으로서의 마스터 모델로 뿐만 아니라, 구조 품의 주형 제작 등에도 널리 활용되고 있다.

SLA로 물체를 성형하는 기본 원리는, 주어진 3차원 형상 데이터(solid data)를 특정 방향에 대한 복수의 2 차원 단면 데이터들의 집합으로 근사 표현한 다음, 모델을 순서대로 층별 가공(layer-by-layer manufacturing)하여 원하는 형태의 3 차원 물체를 성형하는 것이다. 이러한 고유의 성형 특성 때문에 실제로 수조(vat) 안에서 물체를 성형하고자 할 때에 반드시 고려해야 할 몇 가지 사항들이 있다. 그 중 성형 방향을 결정하는 문제는, 전체 성형 시간 및 성형한 물체의 성형 정확도, 성형 과정 및 후처리 과정에서 요구되는 지지대 (support structure) 의 양과 관련하여 매우 중요한 사항이다⁽¹⁾. 그러나 지금까지는 경험에 의한 사용자의 추측이나, 시행착오를 통해서 성형 방향을 결정하고 있기 때문에⁽²⁾, 이로 인한 과도한 성형 시간의 지연이나, 물체 표면의 계단 효과(stairstepping effect)에서 기인한 성형 정확도의 저하, 불필요한 다량의 지지대의 사용 등의 문제가 발생하기 쉽다. 따라서 SLA에서의 성형 효율을 극대화 시키기 위해서는 임의의 3 차원 모델에 대하여 사용자의 요구 조건에 부합하는 최적의 성형 방향을 결정하는 것이 가장 중요한 문제이다.

본 연구에서는 이러한 최적의 성형 방향을 결정하는 기준으로서, 총 성형 시간, 계단 효과 (stairstepping effect & process planning error), 지지대의 최소화를 고려하였다. 물론 이들 각 기준에 대한 최적의 성형 방향은 서로 상이할 수 있기 때문에, 사용자의 각기 다른 SLA 사용 목적에 부합하도록 각 요인들을 독립적으로 최적화하여 그 결과를 제시해 주며, 세 가지 기준을 모두 고려할 경우 사용자가 지정한 특정 우선 순위에 따라 최적의 성

형 방향을 찾게 된다. Figure.1에서는 성형 방향을 결정하는 세 가지 주요 기준들에 대한 최적화의 방향을 간단히 도식화하였다. 특히, 본 연구에서는 임의의 성형 방향에 대하여 각 층의 두께를 최적화하는 알고리즘도 개발하였다.

2. 관련 연구

Asberg⁽³⁾ 는 다면체 모델의 임의의 성형 방향에 대하여 지지대의 필요성을 검출해 내는 알고리즘을 제안하였다. 이를 토대로 지지대가 요구되는 외팔보의 형상이 최소화 되는 방향을 성형 방향으로 결정하였다.

Puduhai 와 Dutta⁽⁴⁾ 는 성형 방향을 결정하는 첫번째 기준으로 성형에 필요한 총 층의 수를 고려 했으며, 두번째 기준으로 총 표면적과 계단 효과를 발생시키는 표면적간의 면적비를 고려하였다. 이 때, 총 층의 수는 일단 전체 모델을 몇 개의 영역으로 구분하여 각 영역 별로 사용자가 지정한 최대 한계 오차를 만족하는 층의 두께를 계산하고 이를 최소화하는 방법을 제시하였다. 그러나 Puduhai 와 Dutta 가 제시한 방법은 다면체 모델에만 적용할 수 있는 한계가 있다.

Minoo, B. 와 Amit, B.⁽⁵⁾ 는 실제 process planning error를 계산하여 이를 최소화하는 방법과 총 층의 수를 최소화하는 방법 중에 사용자가 택일하여 성형 방향을 결정하도록 하였다. 그러나 최적의 방향을 찾기 위해 모델을 회전 시킬 때 임의의 축에 대하여 이산적(discrete)으로 회전을 시키기 때문에 조건을 만족하는 최적의 성형 방향을 정확히 제시할 수 없는 단점이 있다.

Dietmar Frank와 George Fadel⁽²⁾ 은 사용자의 입력과 결정 행렬(decision matrix)을 기반으로 최적의 성형 방향을 결정하는 전문가 시스템(expert system)을 개발하였다. 이 전문가 시스템은 사용자가 두 종류의 특징 형상(plane 과 cylinder)을 선택하고 각 특징 형상에 우선 순위를 부여하여 최적의 성형 방향을 결정하도록 하였다. 사용자가 지정한 물체형상의 중요한 특징 형상의 축(plane normal 또는 cylinder 의 중심축)을 성형 방향과 우선적으로 일치시켜, 그 부분에 생성되는 계단 효과를 최소화 하는 방향으로 성형 방향을 결정하였다. 그러나 극히 단순한 모델에만 적용 가능하며, 두 종류의 특징 형상만이 정의되어 있으며, 사용자의 입력에 크게 의존한다



Fig. 1 Optimal build-up orientations for three essential factors

는 단점이 있다.

John R. W., George M. Fadel, 과 Chuck Krishman⁽⁶⁾ 은 여러 개의 물체를 동시에 성형할 때에 이들을 수조 공간 상에 적절히 배치하여 정해진 수조 부피 안에 가급적이면 많은 물체를 성형할 수 있도록 각 물체의 위치를 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 계산하였다. 그러나 성형 정확도나 지지대 등은 고려하지 않았다.

Allen, S.과 Dutta, D.⁽⁷⁾ 는, 물체와 지지대가 접촉하는 물체 표면 상의 면적을 최소화하는 방향으로 최적의 성형 방향을 결정하였다. 최적화의 기준으로 지지대의 최소화를 우선적으로 고려한 후, 여러 방향에 대하여 지지대의 양이 같을 경우에 물체의 무게중심이 가장 낮은 방향을 성형 방향으로 선택하게 된다.

Kim, G., Lee, K., 와 Park, J.C.⁽⁸⁾ 은 최적의 성형 방향을 결정하는 기준으로 고립 체적(trapped volume)의 양, 물체의 높이, 그리고 계단 효과를 이루는 물체 표면상의 면적을 고려하였다. 이를 위해 고립 체적을 효과적으로 계산하는 알고리즘을 개발하였으며 최적화 기법으로 모사 풀림 방법(simulated annealing)을 사용하였다. 그러나 지지대를 고려하지 않았으며, 최적화의 결과로 나온 성형 방향이 실제로 성형에 적합하지 않을 수 있다는 단점이 있고 계산 시간 또한 많이 소요된다.

Dolenc와 Makela⁽⁹⁾ 는 3차원 형상 데이터로부터 2차원 단면 데이터를 생성하는 기본적인 기법을 언급하였다. 일정한 층 두께와 가변 층 두께 모두에 대해서, 물체상의 편평한 면(flat area)과 첨점(peak)을 처리하는 방법을 제시하였으나, 최적의 성형 방향을 결정하는 것에 대해서는 언급하지 않았다.

3. 본 론

SLA를 이용하여 물체를 성형하는 원리는 Figure 2.에서와 같고 그 전 과정을 도시하면 그림 Figure.3 와 같이 크게 네 단계로 구분해 볼 수 있다. 이 중에서 CAD 시스템에서 지원할 수 있는 기능은 다음과 같다. 실제로 물체를 수조 안에서 성형하기 전에 형상 모델을 화면 앞에서 모델링하고 이를 SLA machine이 인식할 수 있는 STL 화일로 생성한 후, 성형 방향을 결정한다. 그리고 효과적인 슬라이싱(slicing) 알고리즘에 의해 2차원 단면 데이터를 생성하여 이들을 합쳐서(merging) SLI 화일을 만든다.

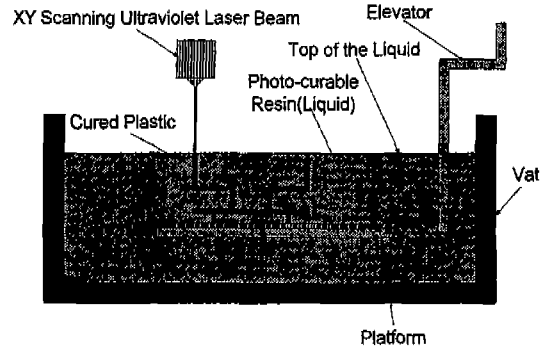


Fig. 2 Operation of Stereolithography Apparatus

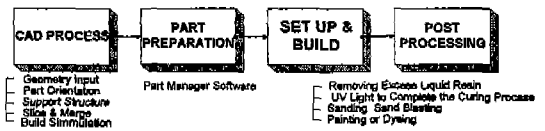


Fig. 3 Stereolithographic Rapid Prototyping Process

이와 같은 CAD 프로세스를 단계별로 구체적으로 도시화하면 Figure. 4 과 같다. 특히, 이 단계에서 중요한 부분이 물체의 성형 방향을 결정하는 일이며, 서론에서 언급한 바와 같이 성형 방향의 결정에 영향을 미치는 인자들은 매우 다양하다.

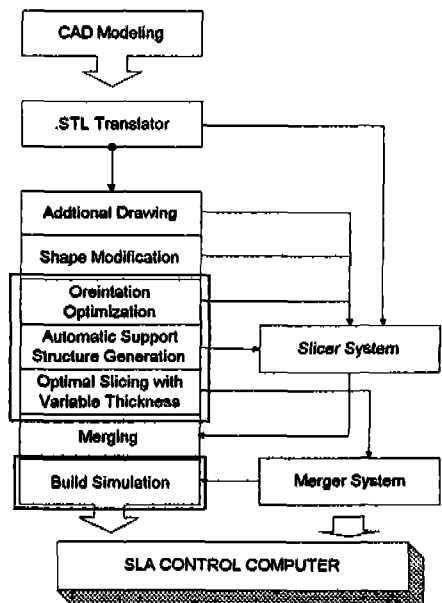


Fig. 4 SLA CAD system strategy in this study

Figure.4는 본 연구가 최종적으로 나아가야 할 방향을 제시해 주고 있으며, 그 첫 단계로서 성형 방향을 최적화하는 작업이 우선되어야 할 것이다. 본 연구에서는, 사용자가 지정한 특정 한계 오차를 만족하는 최적의 층의 두께를 물체 표면의 기울기에 따라 계산하는 알고리즘을 개발하였으며, 이를 이용하여 계산된 총 층의 수가 최소인 방향을 성형 시간을 최소화하는 성형 방향으로 결정하였다. 또한 성형 정확도의 향상을 위해서, 성형 시 계단 효과가 발생하는 부분을 바닥면에 투영시킨 면적과 모델의 총 표면적과의 비를 최소화하는 방향을 계산하였다. 이와 동시에 process planning error를 최소화하는 방향을 계산하여 이 또한 성형 정확도를 높이는 기준으로 고려하였다. 그리고, 지지대에 관해서는, 물체상에 지지대가 요구되는 면적을 바닥면에 투영시켜 이들의 면적을 최소화 하였으며, 성형 과정 중과 후처리 과정에서의 물체의 정역학적 안정성을 동시에 고려하기 위하여 물체와 엘리베이터의 바닥면이 만나고 있는 면적도 함께 고려하

였다. 한편, 최적의 성형 방향을 찾기 위해 모델을 회전시킬 때에는 유한한 특정 후보 방향들로 회전시킴으로써 최적화 연산의 효율성을 높였으며, 최적화의 결과가 실제 성형에 적합하도록 하였다. Figure 5은 육면체에 대하여 본 연구를 적용시킨 결과를 간략히 보여 준다.

3.1 성형 정확도의 향상

앞서 설명한 바와 같이 SLA의 성형 원리상, 성형한 물체의 옆면에는 계단 모양의 돌출 부위가 발생하기 마련이다. 이 계단 효과의 많고 적음은 성형한 물체와 원 모델과의 유사성, 즉 성형 정확도와 직결되며, 이는 성형 방향에 따라 크게 달라질 수 있다.

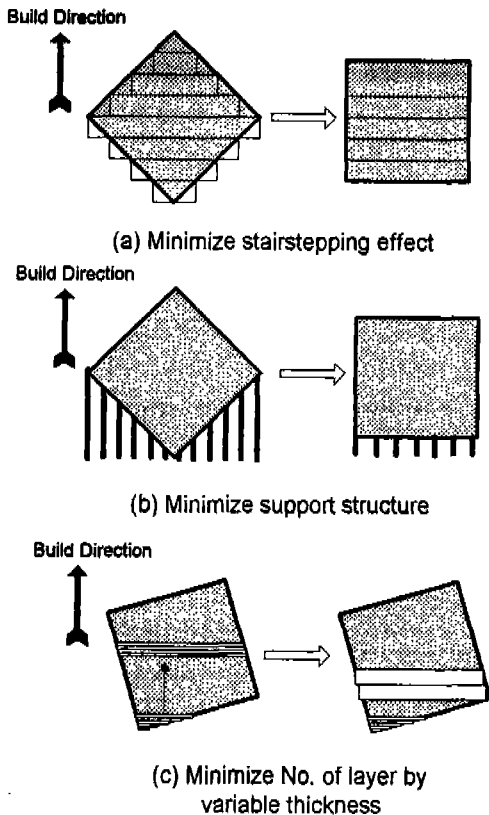


Fig. 5 Determination of build-up orientation

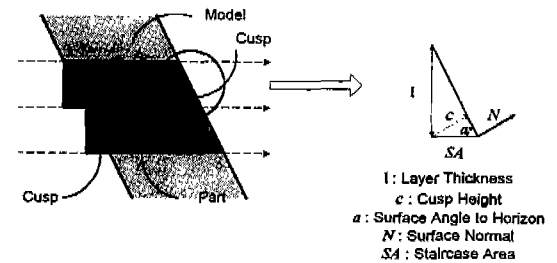


Fig. 6 Staircase effect and cusp height

Figure. 6에서 'SA'로 표현된 부분이 계단 효과에 의해 생성된 staircase area이며, 본 연구에서는 이 부분의 면적을 최소화 하는 방향을 성형 정확도를 향상시키는 최적의 성형 방향으로 결정한다. 이와 동시에 Figure. 6에서 cusp²으로 표현된 삼각형 부분의 면적 또한 성형 정확도를 결정하는 요인으로 고려하여 앞에서 언급한 staircase area와 함께 최적화의 기준으로 선택하였다.

위의 그림 Figure.6에서 삼각형으로 표시된 cusp area를 계산 하면,

$$Cusp\ Area = \frac{1}{2} \frac{cl}{\sin a}$$

그런데, l : Layer Thickness, a : Surface Angle to Horizon (1)

$$l = \frac{c}{\sin(\frac{\pi}{2} - a)} = \frac{c}{\cos a}$$

(2)

그러므로,

$$Cusp\ Area = \frac{1}{2} \frac{c}{\sin a} \frac{c}{\cos a} = \frac{c^2}{2 \sin a \cos a}$$

(3)

그런데, 허용하는 커셉의 높이는 사용자에게 주어지며, 본 연구에서는 조절 가능한 층 두께를 사용하므로 모든 층에서의 커셉의 높이가 항상 지정한 값으로 유지된다. 따라서 모델상의 모든 facet의 커셉의 면적은 단지 각 facet이 수평면과 이루는 각, 'a'에 의해 결정되어, 총 process planning error와 Staircase area를 함께 고려한 목적 함수를 다음과 같이 무차원화시켜 구성할 수 있다.

$$f_{Build Accuracy}(\theta_x, \theta_y) = \frac{\sum_{i=0}^k (Projected Inclined Facet Area)_i}{\sum_{j=0}^n (Facet Area)_j} + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sin a_i \cos a_i}}{n} \quad (4)$$

a: Surface angle to horizon

n: Total number of facets

k: Total number of inclined facets

θ_x, θ_y : Rotational angle about x, y axis

3.2 성형 시간의 최소화

SLA를 이용하여 실제로 성형할 때에, 한 층의 경화가 끝난 후 엘리베이터가 다음 층의 두께 만큼 아래로 이동한 후, 바로 다음 경화 단계로 들어가게 되면 광경화 수지의 점성 등의 영향으로 Figure. 7에서와 같이 원하는 형상을 얻을 수가 없다⁽¹⁰⁾.



Fig. 7 Process without recoating

이러한 현상을 방지하기 위해서 각 층의 성형이 끝난 후에는 반드시 'Dip and Dunk'³ 과정 및 'Sweeping'⁴ 과정, 'z-level wait'⁵ 과정을 반복하게 된다. 따라서 SLA에서 모델의 성형 시에 소요되는 시간은 시작품을 만들기 위해 경화시켜야 하는 수지의 양보다는 그 층의 수에 더 크게 관계한다. 즉, 동일한 물체를 성형하더라도 성형 방향에 따라 각기 다른 성형 시간을 가지게 되며 물체의 총 층의 수가 적은 방향에서 더 빠르게 물체를 성형할 수 있다.

본 연구에서는 성형 시간을 최소화하는 인자로서 물체의 성형 방향에 따른 경화시켜야 하는 수지의 총 층의 수를 고려하기로 한다. 또한, 임의의 각 방향에 따른 총 층의 수를 계산할 때에, 한 모델에 대하여 동일한 한가지의 층 두께를 적용시키던 기존의 방법과는 달리, 각 층마다 그 두께를 변화시켜 가며 최적화된 층의 두께 및 총 층의 수를 계산하여 이 총 층의 수가 최소인 성형 방향을 찾아 성형 시간을 최소화 하고자 하였다.

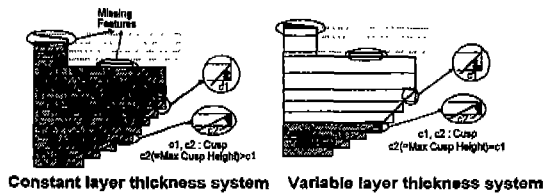


Fig. 8 Disadvantages in constant layer thickness system and Advantages in variable layer thickness system

위의 Figure.8의 오른쪽 그림(b)에서 보는 바와 같이 물체 표면의 기울기에 따라, 사용자가 지정한 최대 커셉 높이를 만족하는 최대 층의 두께를 구하여 그 위치에서의 층의 두께로 결정하였다. 또한 모델의 전 영역에 대하여 커셉의 높이를 최대 커셉높이로 균일화 시켰으며, 성형 방향과 수직인 편평한 면에서는 그 위치에서 층을 형성하여 성형 정확도를 높이고자 하였다. 그리고 성형 방향과 평행한 면에서는 커셉이 형성되지 않으므로 SLA 시스템에 따라 각기 달리 정해져 있는 한번에 경화 가능한 최대 층 두께로 잘라 내고, 층의 수를 최소화 하였다. Figure. 9는 전술한 슬라이싱 기법에 의한 슬라이싱 과정을 보여주고 있으며, Figure.11은 최적의 층의 두께를 계산하는 수도 코드를 보여주고 있다. 이 방법은 최소의 층의 수를 가지고 최대의 성형 정확도를 얻는 것을 그 기본 목표로 한다. 구체적으로 슬라이싱 과정을 설명하면 다음과 같다.

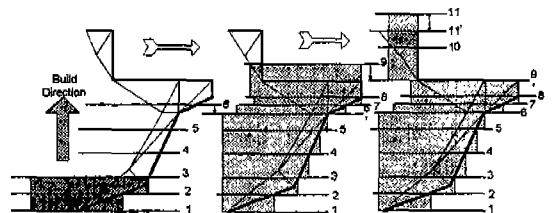


Fig. 9 Algorithm for calculating optimal layer thickness

CASE 1 : 일반적인 경우

임의의 사면에 대하여 지정한 커스 높이를 만족하는 최대 층 두께는 앞의 그림 Figure.6 에서, 사용자가 지정한 성형 공차, 즉 커스 높이에 관한 식으로 다음과 같이 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$l = \frac{C_{max}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - a\right)} = \frac{C_{max}}{\cos a} = \frac{C_{max}}{N_z} \quad (N_z \neq 0) \quad (5)$$

l : Thickness of each layer

C_{max} : Maximum allowable cusp height

a : Surface angle to horizon

N : Unit normal vector of facet (N_x, N_y, N_z)

이 식에서 보는 바와 같이 커스 높이의 값을 사용자가 지정한 C_{max} 의 값과 같도록 하여 최적화된 층의 두께를 결정할 수 있으며, 현재 계산되고 있는 층의 영역에 걸쳐 있는 모든 facet에 대하여 위의 식을 수행하여 i 번째 층의 층 두께를 아래와 같이 결정한다.

$$l_i = \text{Max}\{l_{min}, \text{Min}\{L_{max}, \text{Min}\{l\}\}\} \quad (6)$$

$\text{Min}\{l\}$: Minimum value among the results calculated

for all the facets located in the region of interest

L_{max}, l_{min} : Maximum & Minimum layer thickness allowed for each SLA system

CASE 2 : 표면의 기울기가 변하는 부분

사용자가 지정한 최대 커스 높이를 만족시키기 위해서 기울기가 변하는 부분(No.2-No.3/ No.5-No.6 layers in Figure.9)에서는 약간의 주의를 필요로 한다. 만약 물체 표면의 기울기의 변화에 의해 층의 두께가 층 l_i 와 층 l_{i+1} 사이에서 상대적으로 변하면 두 층의 크기 비교가 요구된다. l_{i+1} 이 l_i 보다 클 경우에는 l_i 의 수정이 불필요하다. 따라서 층의 계산과정이 l_{i+1} 의 위부분에서부터 계속 진행되어 질 수 있다(No.2-No.3 layer in Figure 9.). 반면에, l_{i+1} 이 l_i 보다 작은 경우에는 기울기 변화 지점에서의 l_i 의 수정이 요구된다. 따라서 이전에 계산된 l_i 은 무시하고 층 l_i 의 상단이 기울기 변화 지점과 정확히 일치하는 새로운 l_i' 로 l_i 을 대체한다. 그 다음 층 계산 과정을 l_i' 의 상단으로부터 계속 진행한다(No.5-No.6' layer in Figure. 9).

CASE 3 : 성형 방향과 평행한 면의 경우

성형 방향과 평행한 면에는 계단 효과가 발생하지 않기 때문에 시스템이 허용하는 최대의 층의 두께로 잘라 내어 층의 수를 줄일 수 있다(No.10 layer in Figure.9).

CASE 4 : 성형 방향과 직교하는 면

성형 방향과 직교하는 면에는 두 종류가 있다. 한 가지는 면의 법선벡터의 z 값이 양의 방향인 것이고 또 다른 한가지는 면의 법선벡터의 z 값이 음의 방향인 것이다. 전자의 경우에는 원래의 형상에 정확히 일치시키기 위하여 그 면에서 층을 잘라내야 한다(No.9' layer in Figure.9). 반면에, 슬라이싱 과정 중에 정확히 음의 법선벡터를 가지는 평편한 면을 만났을 경우에는 Figure .10과 같이 아래 방향으로의 미소량의 오프셋(offset)과정이 요구된다. 이는 성형 후의 물체에 원 형상에는 없는 불필요한 부분이 발생하는 것을 막기 위함이다.

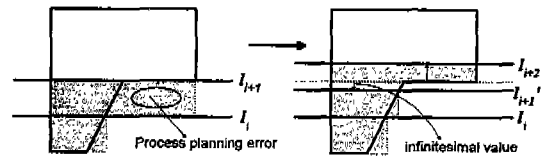


Fig.10 Offset procedure for negative normal flat area

Algorithm Calculate_Optimal_Layer_Thickness

Input : STL file, User Specified Maximum Cusp Height (C_{max}), System Range of Slicing Thickness ($T_{max} - t_{min}$)

Output : Layer Thickness Information File (Optimal Layer Thickness, Total Number of Layers)

```

begin
loop
  facet_list := find_facets_in_current_region(current_level)
  l_i := compute_layer_thickness(facet_list, C_max, T_max, t_min)
  current_level := l_i

  if (there is any positive flat area lower than current_level)
    slice the l_{i-1} layer at the positive flat area
    current_level := shift_down_to_flat_area
  endif
else
  facet_list := find_facets_in_current_region(current_level)
  l_{i+1} := compute_thickness(facet_list, C_max, T_max, t_min)
  if (l_{i+1} is thinner than l_i)
    slice the l_i layer at the slope change point
    current_level := shift_down_to_slope_change_point
  endif
endif

if (current_level is greater than Object Height)
  return Layer_Thickness_Information_File
endif
else
  goto loop
endif
end
    
```

Fig.11 Pseudo-code for optimal layer slicing

CASE 5 : 바닥면과 윗면의 처리

바닥면에서 잘려진 첫번째 층은 원 모델에는 없는 부가적인 층을 형성하기 때문에 이 첫번째 층은 무시되어야 한다. 또한 가장 윗면에서는 그 부분에서 정확히 층을 잘라 내면서 슬라이싱 과정을 종료한다(No.11' layer in Figure. 9).

3.3 지지대의 최소화

SLA의 가공 특성상 필요 불가결하게 되는 것이 바로 지지대이며, 이는 성형 과정과 후처리 과정이 끝나게 되면 물체로부터 다시 제거되어야 하는 것이기 때문에, 그 제거 작업의 번거러움과 소요 시간을 고려하면 지지대는 적으면 적을 수록 좋은 것이며, 이러한 지지대가 최소화 되는 방향으로 물체의 성형 방향을 결정해야 할 것이다. 이와 동시에, 성형 과정 중의 물체의 정역학적 불안정에 의한 붕괴를 막기 위해서는 방향에 따른 정역학적 안정성 또한 지지대와 직결된 중요한 문제이다.



Fig.12 Regions to be supported

위의 그림 Figure. 12 에서 보는 바와 같이, 지지대가 필요한 부위는, 각 면의 법선 벡터의 z 값이 음의 값을 갖는 down-facing face 중에서 그 법선 벡터의 기울어짐의 정도가 일정 각보다도 음의 방향으로 큰 사면임을 알 수가 있다. 본 연구에서는 위 그림의 세 가지 경우를 모두 고려하기 위해, 단지 각 facet들의 법선 벡터 뿐만이 아니라, 엘리베이터의 바닥면과 접촉하고 있는 물체상의 면적도 동시에 그 고려 대상으로 삼고자 한다. base 영역의 면적을 상대적으로 projected potential supported area 보다 크게 하면 성형 물체는 아래 그림 Figure.13

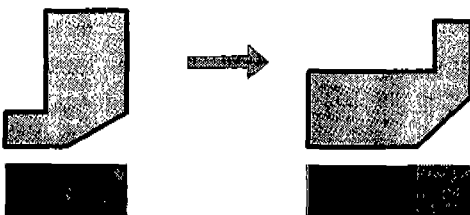


Fig.13 Part orientation with considering stable state of the part

과 같이 새로운 성형 방향을 갖게 될 것이다.

요컨대, 법선 벡터의 방향이 수평면으로부터 기준 값을 넘는 모든 facet을 바닥면에 투영시킨 면적을 S_p 로 표기하면 Total Projected Supported Area(TPSA)는 다음과 같다.

$$TPSA = \sum_{i=1}^k (S_p)_i \quad (7)$$

S_p : Projected area of facet requiring support structures

k : No. of facets requiring support structures

TPSA : Total projected supported area

또한 삼각형 facet의 세 꼭지점의 z 값이 모두 0인 facet(바닥면과 맞닿고 있는 facet)의 면적을 S_b 라 하면, Total Base Area(TBA)는 다음과 같다.

$$TBA = \sum_{j=1}^l (S_b)_j \quad (8)$$

S_b : Base facet area

l : No. of base facets

TBA : Total base area

따라서 지지대의 최소화와 정역학적 안정성을 동시에 고려한 최적화된 성형 방향을 찾기 위한 목적 함수는 TPSA와 TBA의 비로 다음과 같이 표현되어 이를 최소화 한다.

$$\therefore f_{\text{support structure \& stable}}(x, y) = \frac{TPSA + Const}{TBA + Const} = \frac{\sum_{i=1}^k (S_p)_i + Const}{\sum_{j=1}^l (S_b)_j + Const} \quad (9)$$

3.4 성형 방향의 최적화

본 시스템은 사용자의 입력에 의해 성형 의도에 부합하는 최적의 성형 방향을 제시해 주며, 최적의 성형 방향을 찾기 위해 모델을 회전시킬 때에는 유한한 특정 후보 방향들로 회전시켜 최적화 효율성을 높였다. 다시 말해서, 앞에서 언급한 세 가지 인자 각각을 독립적으로 최적화하는 성형 방향을 제시함과 동시에, 세 가지 요소를 모두 고

려할 경우에는 사용자가 지정한 특정 우선 순위에 따라, 동일한 목적 함수 값을 가진 후보 방향에 대하여 계속적으로 다음 우선 순위를 가진 목적 함수의 값을 비교해 가면서 최종적으로 결정된 최적의 성형 방향을 제시하게 된다. 모델을 회전 시킬 때에는, 모델 상의 유한한 facet 개수와 후보 성형 방향을 일치시키기 위해서, 각 facet의 법선 벡터를 성형 방향에 일치 시켜 가며 목적 함수의 값을 계산하여 이를 최적화한다.

4. 적용 예

본 연구에서 제시한 알고리즘을 구와 컴퓨터 마우스 모델에 적용시켜 직접 성형까지 하였다. 이 모델들은 상용 솔리드 모델러인 Pro/ENGINEER 에서 모델링하여 STL 화일로 변환하였으며 3D systems SLA-500/40에서 성형하였다. 성형 조건과 SLA 기계의 제한조건 및 사용자의 입력 등이 아래 제시되어 있다.

Machine constraints :

- Thickness range: 0.15 mm ~ 0.30 mm

Building condition :

- Z level wait time: 20 seconds
- Pre dip delay time: 28 seconds
- Blade gap: 140 %
- Velocity: 60 mm/sec
- Support sweep: No sweep
- Part sweep: 1 sweep

User input :

- Optimized part orientation
- Maximum Cusp height : 0.20 mm

4.1 최적화된 층의 두께 및 층의 수 계산

구(Sphere)

반경 50 mm인 구에 대하여 커스 높이를 0.20 mm 부터 0.50 mm 까지 변화시켜 가며 최적화된 층의 두께를 구하였다. 아래 그림 Figure.14는 faceting 된 모델의 형상과, 실제로 본 알고리즘을 적용시켜 슬라이싱한 결과를 보여 주고 있다. 그림 Figure.14 (b)에서 보듯이 사면의 기울기를 따라 각 층의 두께가 변화하고 있으며, 수평면과의 각의 크기가 작은 구의 아래 부분과 위 부분에서는 층의 두께가 얇아 그 밀도가 상대적으로 크고, 중앙 부위에서는 수평면과의 각의 크기가 커짐에 따라 층의 두

께도 두꺼워 짐을 알 수가 있다. 한편, 각 층에서 의 커스 높이는 항상 같은 값을 유지하고 있다.

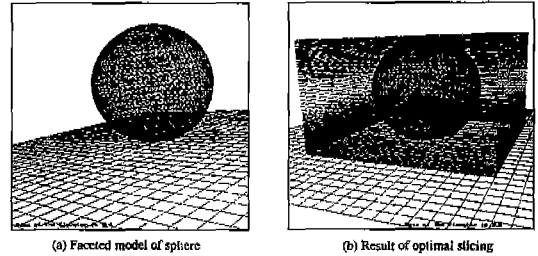


Fig.14 Example of optimal slicing

Table.1 Distribution of layer thickness and total number of layers in case of example sphere in variable thickness system(Dimension : mm , Maximum thickness = 3.000 mm, Minimum thickness = 0.010 mm)

Cusp Height	0.200	0.300	0.400	0.500
1st Layer	0.200251	0.300377	0.400502	0.500628
3rd Layer	0.202209	0.303314	0.404419	0.515589
5th Layer	0.206236	0.309353	0.412471	0.531328
12th Layer	0.212529	0.318794	0.422889	0.553611
20th Layer	0.221444	0.346881	0.466508	0.622708
28th Layer	0.233254	0.373625	0.540212	0.744992
40th Layer	0.249083	0.405159	0.671954	0.973332
52th Layer	0.270106	0.503966	0.936443	3.000000
64th Layer	0.297097	0.583959	3.000000	1.170563
:	:	:	:	:
Last Layer	0.030594	0.133046	0.015589	0.197384
Total (Variable Thickness)	252 개	169 개	128 개	103 개
Total (Constant Thickness)	500 개	333 개	250 개	200 개

위의 표 Table.1은 최대 커스 높이에 따른 각 층의 두께 분포를 나타내고 있다. 특히 주목해야 할 점은, 본 알고리즘을 통해 구해진 각 층의 최적화된 층의 두께와 그의 결과로 나온 총 층의 수는 Table.1에서 보는 바와 같이, 사용자가 지정한 최대 커스 높이를 만족하는 층을 전 모델에 대하여 일정한 층의 두께로 유지하면서 형성하였을 때보다 대략 반 이상의 감소 효과를 가져왔다는 것이다. 이는 곧 성형 시간의 대폭적인 단축을 의미하며, 이에 더하여 이러한 감소된 층의 수가 더욱 작아지도록 최적화된 성형 방향을 찾아 준다면, SLA를 이용하여 모델을 성형할 때에 사용자는 최소의 성형 시간을 제공받게 될 것이다.

컴퓨터 마우스(Computer mouse)

아래 그림 Figure.15는 본 연구에서 제시한 방법으로

최적의 층의 두께와 성형 방향을 결정하고 SLA로 직접 성형하게 될 모델을 보여 주고 있다. Table-2 는 최적화된 슬라이싱의 결과이며 실제 성형을 위하여 각각의 수치를 실제 SLA machine의 경우와 일치 시켰다.

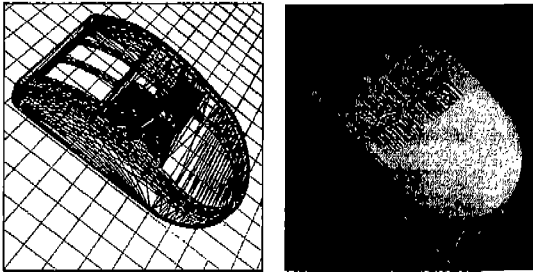


Fig.15 Faceted model and shaded model of the computer mouse model

Table 2. Result of the optimal slicing
(Maximum cusp height : 0.200 mm)

Layer No.	Layer thickness	Layer No.	Layer thickness
1st layer	0.150000	?	?
2nd layer	0.150000	94th layer	0.210000
3rd layer	0.150000	95th layer	0.210000
:	:	96th layer	0.210000
33th layer	0.200431	:	:
34th layer	0.201444	106th layer	0.211338
35th layer	0.201444	101th layer	0.223919
36th layer	0.201908	102th layer	0.222618
:	:	103th layer	0.300000
40th layer	0.201566	:	:
41th layer	0.201566	124th layer	0.300000
		No. of layers (Variable thickness)	124
		No. of layers (Constant thickness)	174

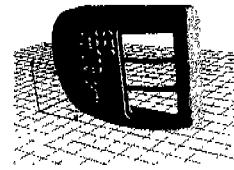
4.2 최적화된 성형 방향의 결정

4.2.1 Single Optimization

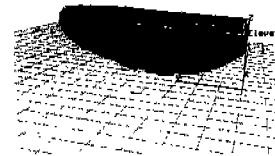
Figure. 16은 각각의 최적화 인자, 즉 성형 정밀도의 향상, 성형 시간의 단축, 그리고 지지대의 최소화를 단일 인자에 대하여 최적화한 결과를 보여 주고 있다. 특히 지지대의 최소화 과정에서 단지 지지대의 최소화를 고려한 경우(CONSIDER_ALL_SUPPORT_MODE)와 정역학적 안정성도 동시에 고려한 경우(CONSIDER_STABLE_STATE_MODE) 모두를 사용자에게 지원하여 시스템의 유연성을 유지하였다.

Figure.17은 성형시간의 단축을 고려한 동일한 목적함수 값을 갖는 후보 성형방향에 대하여 지지대의 최소화를 다음 순위로 두어 최종적으로 최적의 성형방향을 찾는 모

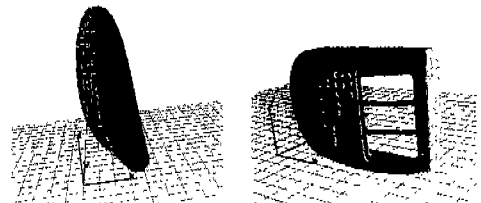
습을 보여준다. 본 시스템에서는 이러한 우선 순위를 사용자가 임의로 지정할 수 있다.



(a) Improving Accuracy



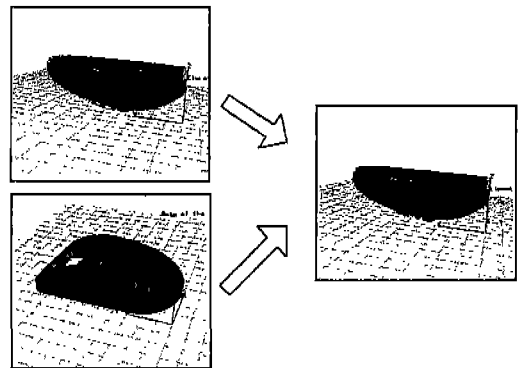
(b) Minimizing Build time



CONSIDER_ALL_SUPPORT_MODE CONSIDER_STABLE_STATE_MODE

(c) Minimizing Support Structures

Fig.16 Optimal build-up direction - Single Optimization



Considering build time → Considering Support structure

Fig.17 Optimal build-up direction - Single Optimization

4.2.2 Multiple Optimization

세가지 인자를 동시에 모두 고려하여 최적화된 성형방향

을 결정하기 위하여 아래와 같이 목적함수를 구성하여 적절한 기중치를 분배하여 최적화의 우선순위를 선택한다.

$$cost = w_{acc} \cdot A(n) + w_{time} \cdot T(n) + w_{sup} \cdot S(n) \quad (10)$$

w_{acc} : Weight value of accuracy

w_{time} : Weight value of build time

w_{sup} : Weight value of support structure

n : Build-up orientation

A, T, S : Objective function of each factor

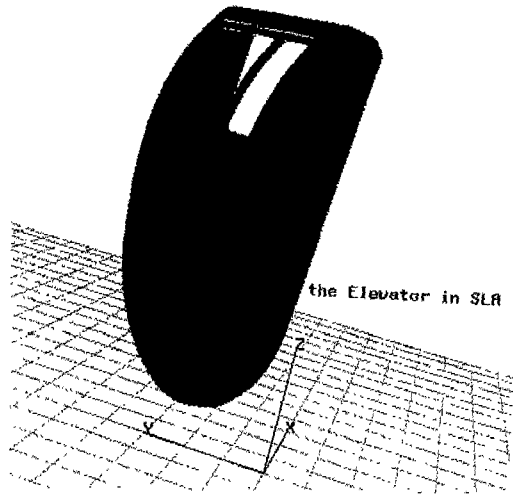


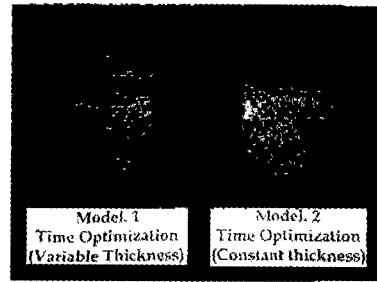
Fig. 18 Optimal build-up direction-Multiple Optimization ($w_{acc} = 0.2, w_{time} = 0.3, w_{sup} = 0.5$)

4.3 성형 - 컴퓨터 마우스 모델

컴퓨터 마우스 모델을 네 가지 다른 조건 하에서 성형하였다. 그들 중 두 가지는 성형 시간 단축을 고려한 성형 방향에서 성형 되었으며, 특히 이들 중 한가지는 일정한 층의 두께로, 나머지 한가지는 본 연구의 결과로 얻어진

Table 3. Result of the experiment

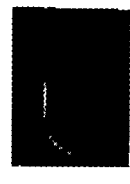
	Part slice time	Total build time	Accuracy (Max Chup height)
Model. 1 (Variable thickness)	2 min. 36 sec.	4 hr. 16 min.	≈ 0.22 mm
Model. 2 (Constant thickness)	2 min. 49 sec.	6 hr. 17 min.	≈ 0.22 mm
Model. 3 (Support Optimization)	8 min. 21 sec.	15 hr. 41 min.	immeasurable
Model. 4 (Accuracy Optimization)	4 min. 12 sec.	11 hr. 29 min.	immeasurable



(a) Build time optimization - Constant thickness & Variable thickness



(b) Support structure optimization



(c) Accuracy optimization

Fig.19 Stereolithographic product built in the experiment

최적화된 층의 두께로 성형 되었다. 또한 마지막으로 지지대의 양을 최소화하는 방향과 성형정확도를 향상시키는 방향으로 성형 되었다. 성형 결과가 아래 표 Table. 3에 명시되었으며, 실제 성형품의 모습이 Figure. 19에 나타나 있다.

5. 결론

본 연구에서는, 제품의 생산 과정 중 시작 단계(Prototyping)에서의 설계 사이클의 단축을 위한 노력, 즉 신속 시작 체계 중에서 요 근래 가장 각광을 받고 있는 SLA(Stereolithography Apparatus)를 이용한 시작 작업의 효율화 방안의 한가지로서 임의의 물체에 대하여 최적의 성형 방향을 찾아 사용자에게 제시해 주는 시스템을 개발하였다. 성형 방향을 결정하는 중요한 기준으로서 성형 정확도의 향상, 성형 시간의 단축, 그리고 지지대의 최소화를 고려하였으며, 이들에 대한 구체적인 목적 함수의 구성은, 성형 정확도와 관련하여 물체 표면에 계단 효과를 이루는 부분의 면적과 성형 후에 제거하거나 덧붙여야 할 부분의 단면적을, 성형 시간과 관련하여 총 층의 수를, 마지막으로 지지대와 관련하여서는 물체 표면과 지지대가 맞닿는 부분의 면적을 고려하였다.

본 연구의 주요 특색은, 물체의 성형에 필요한 총 층의 수를 계산하기 위한 각 층의 두께를 계산할 때에, 물체의 기하학적 형상에 무관하게 사용자가 지정한 커브 높이를

만족시키기 위해 불필요하게 층의 두께를 얇게 형성하여 층 층의 수를 증가시키는 일정한 층의 두께를 사용하는 시스템에서의 단점을 없애기 위해, 가변 층 두께 시스템을 개발하였다. 즉, 임의의 모델에 대하여 사면의 기울기를 따라가며 각 위치에서의 최적의 층을 형성하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 지지대의 양을 최소화는 과정에서 지지대의 양뿐만 아니라 성형 시나 후처리 과정에서의 정역학적 안정성까지도 고려하여 물체의 붕괴 가능성을 최소화 하였다. 그리고, 성형 정확도에 관련된 인자로서 일반적으로 고려되는 계단 효과를 이루는 부분의 면적 뿐만 아니라, 실제로 원 형상과 차이가 나는 부분, 즉 성형 후에 후처리 해야 할 부분을 계산하여 이의 단면적을 최소화 하였고, 이를 계산할 때에 본 시스템에서는 커스 높이가 모든 층에서 일정하다는 장점을 이용하여 계산을 용이하게 하였다. 특히 최적화의 과정에서, 사용자의 특정한 요구 조건에 부합하도록 위의 세 가지 기준에 대한 각각의 최적의 성형 방향을 독립적으로 제시해 주고, 세 가지 요소를 모두 고려할 경우 사용자의 입력에 의해, 사용자가 지정한 특정 우선 순위에 따라 최적의 성형 방향을 찾게 된다. 또한, 최적의 성형 방향을 찾기 위해 모델을 회전시킬 때에는 유한한 특정 후보 방향들로 회전시켜 최적화 연산의 효율성을 높였다.

향후 연구과제로서는, 결정된 성형 방향에 대하여 지지대를 자동으로 생성하여 주는 기능이 추가되어야 할 것이며, 더 나아가 화면상에서 가상적으로 모의 성형 까지도 가능하도록 하여 실제 성형 시에 발생할 수 있는 오류를 미연에 방지할 수 있도록 사용자 환경을 구축해 주어야 하겠다.

참고문헌

1. Paul F. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing : Fundamentals of StereoLithography," Society of Manufacturing Engineers, 1st Ed., 1992.
2. Dietmar Frank, George Fadel, "Preferred Direction of Build for Rapid Prototyping Process," Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping,

- Dayton, OH. pp.191-200, 1994.
3. Asberg, B., et al., Feasibility of Design in Stereolithography, Preprint, 1994.
4. Pudukai, N.S., and Dutta, D., "Determination of Optimal Orientation Based on Variable Slicing Thickness in Layered Manufacturing," Technical report UM-MEAN-94-14, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI.
5. Minoo, B. and Amit, B., "Quantification of Errors in Rapid Prototyping Process, and Determination of Preferred Orientation of Parts," Transaction of the North American Manufacturing Research Institution off SME, Vol. 23, 1995.
6. John R. Wodziak, George M. Fadel, Chuck Kirschmann, "A Genetic Algorithm for Optimizing Multiple Part Placement to Reduce Build Time," Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH. pp. 201-210
7. Allen, S. and Dutta, D., "On the Computation of Part Orientation using Support Structures in Layered Manufacturing," Report No. UM-MEAM-94-15, July, 1994.
8. Kim, G., Lee, K., and Park, J.C., "Efficient Calculation of Trapped Volume to Determination Part Build-up Direction in Layered Manufacturing Process," Preprint, August, 1995.
9. Dolenc, A., and Makela, I., "Slicing Procedures for Layered Manufacturing Technique," Computer Aided Design, Vol. 26, No. 2, 1994, pp. 119-126
10. SLA-500 User Reference Manual, 3D Systems, Inc.
11. D. Kochan, Solid Freeform Manufacturing, Advanced Rapid Prototyping, 1993.