

고속적층조형법에서 최적 적층방향의 자동결정

채희창(전북대 기계공학부), 황동기(전북대 대학원)

The Automatic Determination of the Optimal Build-Direction in Rapid Prototyping

Chang Hee-Chang, Hwang Dong-Kee

Abstract

Rapid Prototyping(RP) is the technique which is used to make prototypes or functional parts directly using the 3-D solid data. Before building the prototype, several processes such as transferring 3D data from CAD system(STL), determination of build-direction, adding support structure and slicing are required. Among the above processes, determination of build-direction is the target of this study.

The build-direction is determined by many factors according to the objective of the user, like part accuracy, number of support structure, build time, amount of trapped volume, etc. But it is not easy to determine the build-direction because there are many factors and some factors have dependent properties with one another. So, in this study the part accuracy, the number of support structures and build time are considered as the main factor to determine the optimal build-direction.

To determine the optimal build-direction for increasing part accuracy, sum of projected area which caused stairstepping effect was considered. The less the projected area is the better part accuracy is. About the optimal build-direction to minimize the amount of support structure, sum of projected area of facets that require support structures was considered. About the build time, we considered the minimum height of part we intended to make.

1. 서론

소비자의 다양한 제품모델의 요구에 따라 제품형상의 다양화와 복잡화가 가속되고 있다. 또한 제품의 라이프 사이클이 짧아져 새로운 제품의 개발 기간을 단축하는 것이 제품의 시장 경쟁력에 있어서 결정적인 요소가 되며, 기업의 매출과 이윤에 직접적으로 영향을 끼치게 된다. 따라서 제품의 다양성과 시작기간의 단축에 부응할 수 있는 새로운 방법의 기술이 필요하게 되었다. 고속적층조형법(Rapid Prototyping)은 이러한 한계들을 극복하기 위해 활용되고 있는 기술로써, CAD상에서 설계한 데이터를 바로 실물로 제작하여 설계 오류를 확인하여 설계완성도를 향상시키고, 상품개발기간을 줄이고자 하는 목적으로 많이 활용되고 있으며, 최근에는 제품의 프로토타입뿐만 아니라 시작 금형과 일부 양산 금형에 활용되고 있고 의학분야에서도 활발하게 응용되고 있다.

고속적층조형법에는 사용 재료와 적층 방식에 따라 여러 가지 공정이 개발되어 있는데, 본 연구에서는 세계적으로 널리 사용되고있는 SLA(Stereolithography Apparatus)를 대상으로 하여 연구를 수행하였다. SLA는 CAD상의 3차원 형상 데이터(solid data)를 높이에 따른 2차원 단면 데이터로 분할하여 층별가공(layer-by-layer)하는 새로운 시작품 성형 방법이다. Fig.1은 SLA의 구조와 작업 과정을 보이고 있다.

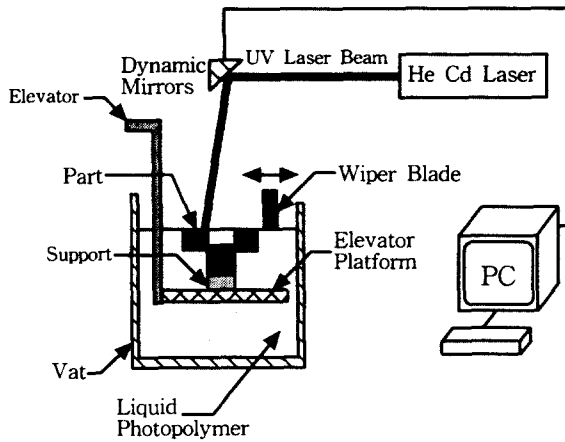


Fig.1 Stereolithographic Apparatus(SLA)

고속적층조형법은 층별가공이라는 새로운 개념의 성형 방법을 이용하므로, 기존의 성형방법에서 찾지 못했던 여러 가지 고려 사항이 대두되었다^[1]. 그 중 적층방향을 결정하는 문제는 부품의 성형 정확도, 서포트 스트럭처의 양, 성형시간, 고립체적의 량 등의 여러 인자들을 고려하지 않으면 안되는 중요한 사항이다. 그러나 이러한 인자들은 서로 독립적이라고는 볼 수 없으며 어느정도 종속적이기 때문에, 최적의 적층방향을 찾는다는 것은 결코 쉬운 일은 아니다. 그러나 지금까지는 사용자의 경험이나 시행오차를 통해 적층방향을 결정하고 있기 때문에, 부품 성형시 계단효과(starstepping effect)에 의한 성형 정확도의 저하, 서포트 스트럭처의 과부족 또는 과사용에 의한 성형 정확도의 저하 및 후처리(post treatment) 과정에서의 부가된 작업, 성형시간의 지연 등의 여러 문제가 발생한다. 따라서 성형 효율을 높이기 위해서는 사용자의 요구 조건에 상응하는 적층방향 결정 기준을 제공하는 것이 가장 중요한 문제이다.

본 연구에서는 최적의 적층방향을 찾는 결정 기준으로써 계단효과의 최소화, 서포트 스트럭처의 최소화 그리고 성형시간의 최소화를 고려했다. 이 세가지 요소는 종속적인 관계가 존재하므로, 첫 번째로 각기 독립적으로 최적화한 결과를 제시했으며, 두 번째로 세 요소를 동시에 고려하고 가중치를 주어 최적화한 결과를 보였다. 또한 이 논문에서는 적층방향을 선택하는 기준으로 삼각형 분할한 모델의 각 패치에 존재하는 법선벡

터의 전부에 대해서 위의 최적화 계산을 수행하였다.

2. 종래의 적층방향 결정법

부품의 성형 정확도는 Fig. 2에서 보는 것처럼 계단효과를 최소화하는 방향을 계산할 필요가 있고, 지금까지 여러 연구가 수행되어 왔다.

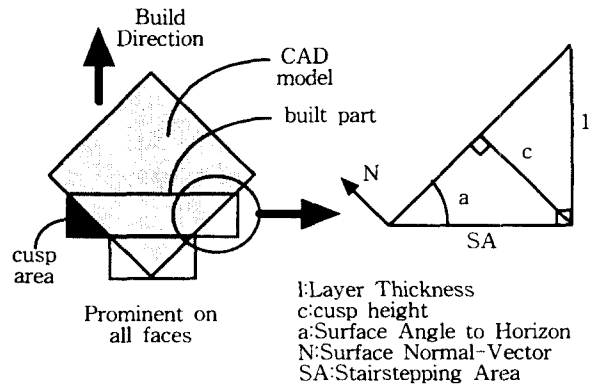


Fig.2 Stairstepping & Cusp Area according to Build Direction

Minoo, B. 등^[2]은 적층방향에 대해서 총 cusp 면적과 모델에 있는 전체의 패치 수와의 비를 계산(process planning error)하여 이를 최소화하는 방법과 부품을 성형하는데 필요한 총 레이어의 수를 최소화하는 방법 중에서 사용자가 선택하여 성형방향을 결정하도록 했다. 그러나 이러한 계산을 하기 위한 적층방향의 선택은 임의의 축에 대하여 이산적으로 회전시켜 최적의 적층방향을 찾기 때문에 모든 적층 후보를 제시할 수 없는 단점이 있다.

Puduhai, S. 등^[3]은 성형방향을 결정하는 첫 번째 기준으로 성형하는데 필요한 총 레이어의 수를 고려했고, 두 번째 기준으로 총 표면적과 계단면적과의 면적비를 고려했다. 그러나 여기서는 다면체 모델에만 적용한 단점이 있다.

서포트 스트럭처의 량은 Fig.3에서 보는 것처럼 수평면과 임의의 경계각 사이의 모든 패치의 면적이 최소가 되는 방향을 계산할 필요가 있다.

C.F.Kirschman 등^{[4][5]}은 CAD 시스템과 SLA 사이의 인터페이스인 CIDES(Clemson Intelligent Design Environment for Stereolithography)를 개발

중이다. 이들은 실험과 전문가들로부터 얻어진 정보를 이용하여 서포트 스트럭처를 자동적으로 생성하는 알고리즘을 개발 중이다.

3. 최적 적층방향 결정 방법

3.1 성형 정확도의 향상을 위한 적층방향 결정 방법

Fig.1과 Fig.2에서 보여지는 것처럼, 고속적층 조형법은 CAD상의 3차원 모델 데이터를 여러개의 직각을 갖는 다각형 레이어로 변환하여 층별 가공하는 제조기술이므로, 적층방향과 모델을 삼각형 분할한 패치의 법선벡터가 수직 또는 수평이 아니면 계단효과의 발생은 당연한 것이다 [Fig.3]. 그리고 이 계단효과의 많고 적음은 성형한 부품의 성형 정확도와 관계가 있고, 더욱이 이것은 적층방향의 선택에 따라서 크게 달라진다.

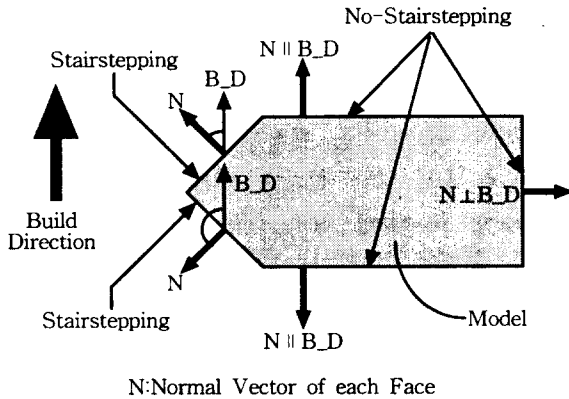


Fig.3 Stairstepping Effect according to Model Shape

본 연구에서는 부품의 성형 정확도를 향상시키기 위해서 계단효과의 최소화를 고려했다. 즉, Fig.2에서 'SA'로 표기된 면적의 합과 모델 전체의 표면적의 비가 최소화하는 방향을 부품의 성형 정확도를 향상시키는 최적의 적층방향으로 선택했다. 이를 위하여 임의의 기준 패치의 법선벡터와 그 밖의 모든 패치의 법선벡터와의 사잇각을 계산해서, 계단효과가 없는 0, 90, 180, 270도가 아닌 패치들의 면적의 투영 면적의 합을 구해 모델 전체의 표면적으로 나누고, 기준을 다음번 패치로 옮겨가며 위의 작업을 반복해서, 최소가 되는 패치를 찾아 그 패치의 법선벡터를 최적의

적층방향으로 선택하였다.

$$f_{Part Accuracy}(Normal\ vector) =$$

$$\frac{\sum_{i=0}^n (SA)_i}{\sum_{i=0}^n A_i} \dots \dots (1)$$

SA: Projected Inclined Facet Area
 A: Area of triangle-patch
 n: Total number of facets
 k: Total number of inclined facets

사잇각, θ 의 계산은 성형방향의 법선벡터를 M , 그리고 대상이 되는 패치의 법선벡터를 N 라 할 때,

$$C = \cos(M, N) = M \cdot N$$

$$S = |\sin(M, N)| = |M \times N| \dots \dots \dots (2)$$

이 두 값을 이용해서 θ 를 계산하면,

$$\theta = \arcsin \cos(S, C) \dots \dots \dots (3)$$

식(1)에서 $(SA)_i$ 는

$$(SA)_i = \begin{cases} |CA_i|, & |C| > \epsilon \text{ and } |C-1| > \epsilon \text{ and } |C+1| > \epsilon \\ 0, & |C| \leq \epsilon \text{ or } |C-1| \leq \epsilon \text{ or } |C+1| \leq \epsilon \end{cases} \dots (4)$$

여기서 A_i 는 각 패치의 넓이이며, C 는 식(2)의 cosine 값, ϵ 은 반올림 오차 한계이다.

3.2 서포트 스트럭처의 량을 최소화하기 위한 적층방향 결정방법

Fig.4에서 보여지는 것처럼, 지지대가 필요한 부위는 down-facing face 중에서 그 법선벡터의 기울어짐이 일정 각보다도 음의 방향으로 큰 패치임을 알 수 있다.

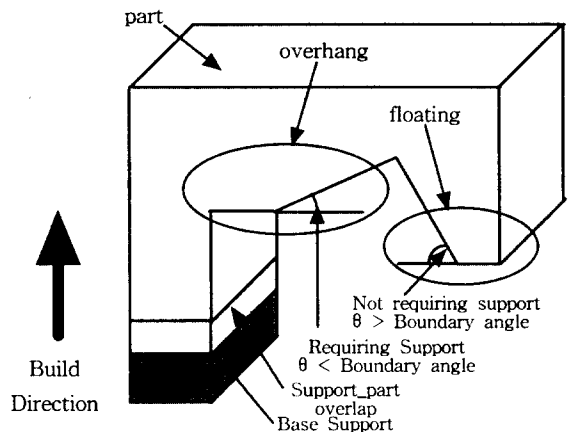


Fig.4 Support Structure

본 연구에서는 서포트 스트럭처의 량을 최소화하기 위하여 서포트 스트럭처가 필요한 부위의 패치의 면적의 투영 면적과 모델 전체의 표면 면

적과의 비가 최소가 되는 패치를 찾아, 그 패치의 법선벡터를 최적 적층방향으로 선택하였다.

$$f_{Support\ Structure}(Normal\ vector) = \frac{\sum_{i=1}^k (S_p)_i}{\sum_{i=0}^n A_i} \dots \dots \dots (5)$$

S_p : Projected area of facet requiring support structures
 A : Area of triangle-patch
 n : Total Number of facets
 k : Number of facets requiring support structures

식(5)에서 S_p 는

$$(S_p)_i = \begin{cases} |C|A_i, & \pi - \theta_{sup} < \theta < \pi + \theta_{sup} \\ 0, & 0 \leq \theta \leq \pi - \theta_{sup} \text{ or } \pi + \theta_{sup} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \cdot (6)$$

여기서 A_i 는 각 패치의 넓이이며, C 는 식(2)의 cosine 값이며, θ_{sup} 는 서포트 스트럭처가 요구되는 경계각도이다. 이를 Fig.5에 나타내었다.

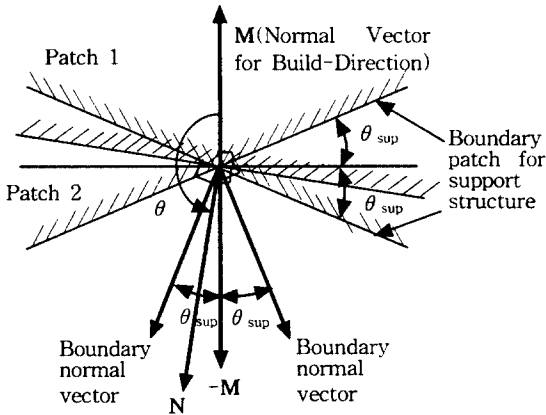


Fig. 5 Calculation of between-angle and boundary angle

3.3 성형시간을 최소화하기 위한 적층방향 결정 방법

사용자가 원하는 시작품을 제작하는데 요구되는 성형시간은 RP의 등장으로 기존의 성형 방법보다 현저하게 줄었을지라도, RP에서의 성형시간은 성형방향에 의해 크게 영향을 받는다.

서론에서 기술했듯이 RP는 점성을 지닌 광경화성 수지를 이용한 층별가공법이므로 각 층의 성형 후에 "Dip and Dunk" 과정(한 층당 약 30초 소요)이 필요하게 된다. 따라서 성형시간은 만들려는 모델의 높이에 따라 크게 좌우된다. 즉 Fig. 6에서 보듯이 성형방향에 대하여 모델의 높이가

낮을수록 성형시간은 적게된다.

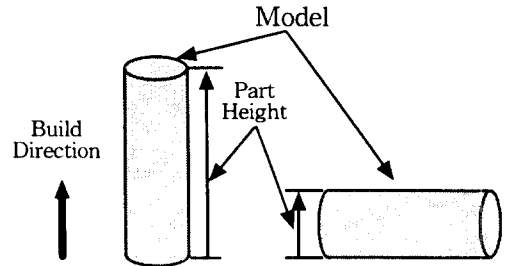


Fig.6 The Build time according to the height of model

따라서 본 연구에서는 성형시간을 최소화하기 위하여 각 삼각형 패치의 법선벡터의 방향에 따른 파트들의 높이를 모델이 가질 수 있는 최대 높이로 나누어 최소가 되는 방향을 성형시간이 최소가 되는 방향으로 선택했다.

$$f_{Build\ Time}(Normal\ vector) = \text{Min} \left(\frac{\text{각 삼각형 패치의 법선벡터의 방향에 따른 파트의 높이}}{\text{파트가 가질 수 있는 최대 높이}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

3.4 성형 정확도, 서포트 스트럭처, 성형시간을 동시에 고려한 적층방향 결정 방법

3.1, 3.2, 3.3에서 살펴본 요소를 동시에 고려하여 적층방향을 결정하기 위해 아래와 같은 목적함수를 만들어 적절한 가중치를 주고 최적화를 수행하였다.

$$f_{accuracy, support} = w_{accuracy} f_{Part\ Accuracy} + w_{support} f_{Support\ Structure} + w_{time} f_{Build\ Time} \dots \dots \dots (8)$$

$w_{accuracy}$ = Weight value for Part Accuracy
 $w_{support}$ = Weight value for Support Structure
 w_{time} = Weight value for Build Time

4. 시뮬레이션 결과

다음은 본 연구에서 제안한 방법에 의해서 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. Fig.7는 본 연구에서 사용한 데이터로, 속이 비어있는 반구와 터빈으로써, 본 시스템에 입력되기 전의 임의의 성형방향을 갖고 있는 것을 보여주고 있다. Fig.8, Fig.9, Fig.10은 Fig.7의 데이터를 이용하여 계산한 결과를 보여주고 있다.

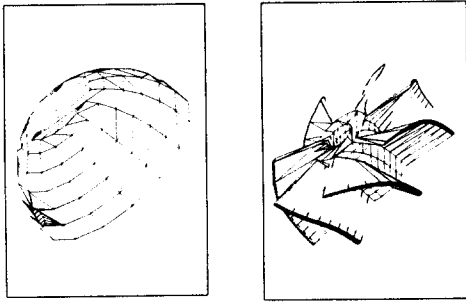
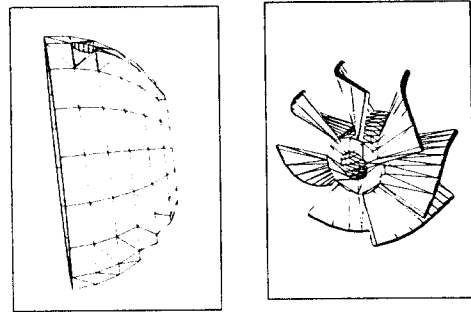


Fig. 7 Input Data

(3) 성형 정확도, 서포트 스트럭처, 성형시간
a.경계각도가 15도인 경우



b.경계각도가 30도인 경우

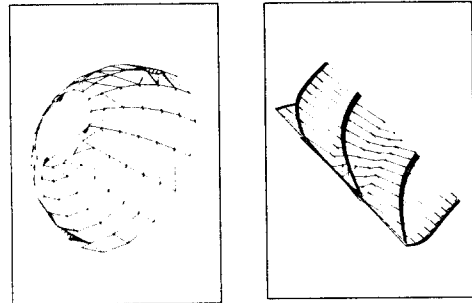


Fig.10 Considering Accuracy, Support Structure & Build Time (Half-Sphere : $w_{accuracy}=0.1$, $w_{support}=0.8$, $w_{time}=0.1$, Turbine : $w_{accuracy}=0.1$, $w_{support}=0.6$, $w_{time}=0.3$)

(1) 성형 정확도의 향상

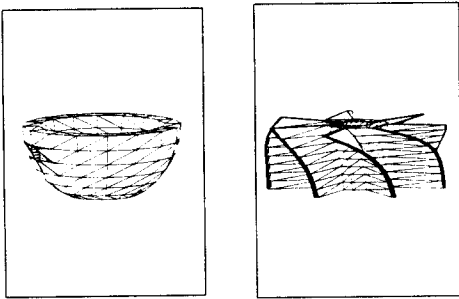
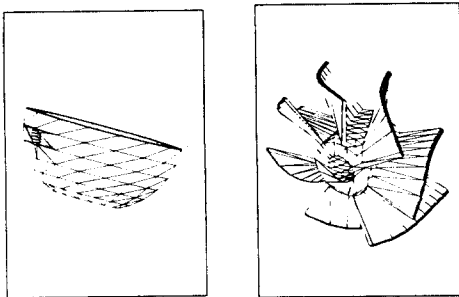


Fig.8 Improving Accuracy

(2) 서포트 스트럭처의 량의 최소
a.경계각도가 15도인 경우



b.경계각도가 30도인 경우

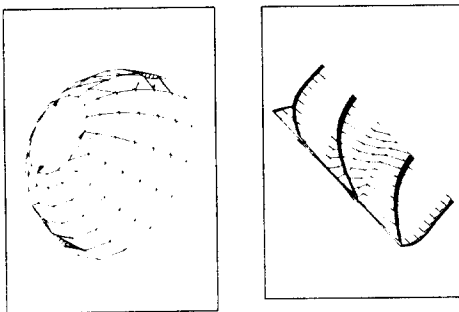


Fig.9 Minimizing Support Structure

6. 결론

본 연구에서는, 고속적층조형법을 적용하여 부품을 성형할 때, 층별가공이라는 가공방법으로 인해 고려하지 않으면 안되는 요소인 적층방향의 결정에 대해서 부품의 성형 정확도, 서포트 스트럭처의 양, 성형시간의 관점에서 살펴보았다.

부품의 성형 정확도에 관해서는 계단효과가 최소가 되는 방향, 즉 계단면적과 모델의 총 표면적과의 비가 최소가 되는 방향을 찾았다.

서포트 스트럭처의 량에 관해서는 수평에 대해 임의의 경계각도 이상으로 경사지어진 삼각형 패치의 투영면적과 모델의 총 표면적의 비가 최소가 되는 방향을 찾았다.

성형시간의 최소에 대해서는 각 삼각형 패치의 법선벡터의 방향에 따른 파트들의 높이를 모

델이 가질 수 있는 최대 높이로 나누어 최소가 되는 방향을 성형시간이 최소가 되는 방향으로 선택했다.

또한 위의 세 요소를 동시에 고려한 목적함수를 구성하여, 가중치에 따른 최적의 적층방향을 찾았다.

본 연구에서는 서포트 스트럭처의 량의 최소화를 고려할 때 gusset 형태의 서포트 스트럭처나 복잡한 형상의 모델에 있어서의 모델과 서포트 스트럭처와의 간섭 등에 대해서 고려하지 않았다. 또한 성형방향을 찾을 때 모델 위에 있는 모든 삼각형의 하나 하나의 법선벡터에 대해서 나머지 모든 법선벡터와의 관계를 조사해 가며 계산을 수행하므로 삼각형의 개수가 증가하면 계산 시간이 길어지는 단점이 있다.

참고문헌

- [1]Jacobs, "Rapid Prototyping and Manufacturing : Fundamentals of Stereolithography", SME, 1992
- [2]Minoo B. and Amit B., "Qualification of Errors in Rapid Prototyping Processes, and Determination of Preferred Orientation of Parts" Transaction of the North American Manufacturing Research Institution of SME, Vol.23.1995
- [3]Puduhai Sreeram and Debasish Dutta, "Determination of Optimal Orientation Based on Variable Slicing Thickness in Layered Manufacturing" Concurrent Product and Process Engineering, ASME, MED-Vol. 1/DE-Vol. 85, 1995
- [4]Kirschman,C.F.,Jara-Almonte,C.C.,Bagchi,A.Dooley, R.L.,and Ogale,A.A., "Stereolithographic Support Structure Design for Rapid Prototyping" Proceedings of the Second International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH, June 1991.
- [5]Kirschman,C.F.,Jara-Almonte,C.C.,Bagchi,A.Dooley ,R.L.,and Ogale,A.A.,"Computer Aided Design of Support Structures for Stereolithographic Components" Proceedings of the fifth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH, June 1994.