

쾌속조형에서 직교배열표를 이용한 단면화

김재형*, 김재정**

Slicing Using Orthogonal Arrays For Rapid Prototyping

Jac-Hyoung Kim*, Jay-Jung Kim**

ABSTRACT

At the stage of initial design, prototypes are needed for engineering and aesthetic purposes. In order to get a fast and non-expensive prototype, designers prefer rapid prototyping(RP) to any other means. In driving a 3D CAD model into rapid prototyping, sectioning the model is essential and there are two negotiation-needed targets, enhancing accuracy while taking less build-time, which makes adaptive slicing taken into account. In spite of the advantages of adaptive slicing, it is not yet applied to real RP machines because of the limits of hardwares. In this thesis, a new slicing algorithm which (1)uses several values of thickness available in a RP machine, (2)determines total number of layers to make the prototype within the intended time and (3)arranges the layers using orthogonal arrays to minimize the volume error caused by the difference between a given CAD model and a fabricated model is presented. And the algorithm is expected to have possibility of assisting RP machines to take the advantages of adaptive slicing.

Key Words : Rapid Prototyping (쾌속조형), Adaptive Slicing (적응 단면화), Volume Error (부피 오차), Orthogonal Arrays (직교배열표)

1. 서론

오늘날 제조업체들은 제품의 품질 향상 뿐만 아니라 제품 개발 주기를 단축시켜야만 시장에서 경쟁력을 가질 수 있다. 설계 단계에서 제품의 기능적, 미적 평가 등을 위해 시제품(prototype)을 제작하는데 이에 많은 시간과 비용이 소요된다^{[1][2]}. 따라서 개발비 절감과 제품 개발 주기 단축을 위해 쾌속조형(rapid prototyping)이 사용되고 있다.

3차원 CAD 모델을 쾌속조형 하기 위해서는 모델을 단면화 하는 작업이 필수적인데 정확도를 향상시키면 단면의 두께가 얇아져 제작 시간이 증가하고, 제작 시간을 단축시키면 단면의 두께가

커져 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 정확도 향상과 제작 시간 단축이라는 상반된 두 목표를 만족시키고자 적응(adaptive) 단면화가 연구되고 있다. 그러나 적응 단면화는 위의 두 가지 상반된 목표를 동시에 만족시킬 수 있는 장점이 있음에도 불구하고 실제 쾌속조형에는 적용되지 못하는 형편이다. 이에 본 연구에서는 그 원인을 파악하여 현재 쾌속조형에 적용될 수 있는 단면화 알고리즘을 개발하였다.

2. 관련 연구 및 연구 방향

2.1 직교배열표

설계 시에는 설계하고자 하는 시스템을 이루

* 한국 IBM 엔지니어링 솔루션 사업부

** 한양대학교 기계공학부

는 여러 개의 설계 인자들(design factors)과 그 설계 인자들이 취하는 값들(levels)이 있다. 이 설계 인자들이 어떠한 값을 취하느냐에 따라 시스템 성능이 결정되고 이러한 측면에서 설계는 시스템 성능이 최대가 되는 설계 인자 값들의 조합을 결정하는 것이라 할 수 있겠다. 이 최적의 설계 인자 값들의 조합을 구하는 데에 있어서 모든 경우의 조합을 검사하지 않고 일부 시행만으로 최적의 해를 찾을 수 있어야 하고, 이에 대한 해법 중의 하나가 직교배열표를 이용하는 것이다. 직교배열표란 각 설계 인자가 취할 수 있는 값들을 원소로 하는 배열로서 각 행은 하나의 경우의 수, 즉 설계 인자 값들의 한가지 경우의 조합이며 각 열은 설계 인자를 의미한다. 이 배열에서 임의의 두 열은 서로 직교(orthogonal)하는데 그 의미는 두 설계 인자 간에 나타날 수 있는 모든 값들의 조합이 같은 횟수로 나타난다는 것이고, 그렇기 때문에 직교배열표를 이용한 일부 시행을 신뢰할 수 있는 것이다^[3]. 그리고 각 경우의 설계 인자 값들에 대한 시스템의 성능을 평가할 때는 S/N 비^{[3][4]}를 이용하는데, S/N 비란 최적화 목적 함수를 의미하고 이 값을 최대화(maximize)하도록 설계 문제를 수식화해야 한다. 직교배열표에서의 각 행을 하나의 경우로 하여 S/N 비 값들을 구한 후, 이로부터 전체 시스템에 미치는 각 설계 인자의 영향, 설계 인자 간의 상대적인 중요도, 최적의 설계 인자 값들의 조합을 구할 수 있다^[4]. 특히 설계 인자들이 취할 수 있는 값들이 불연속(discrete)하다면 매우 높은 정확도를 가져서 많이 사용되는 설계 방법 중의 하나이다^[5].

2.2 적응 단면화

현재 적응 단면화의 기초 중 하나인 Dolenc^[6]의 적응 단면화 방법은 Fig. 1과 같이 현재 레이어 높이를 통과하는 삼각형 퍼짓(facet)^{[1][2]}들 중 법선 벡터의 z 성분이 가장 큰 값을 이용하여 레이어 두께를 계산하는 것이다. 법선 벡터의 z 성분이 크다는 것은 모델의 경사가 완만하다는 것을 의미한다. 따라서 현재 레이어 높이에서 오차가 가장 많이 발생하는, 즉 경사가 가장 완만한 부분을 기준으로 레이어 두께를 결정하는 것이다. 여기서 오차는 원래의 형상과 적응될 형상간의 수직 거리(cusp height)를 의미한다. 이 때, 사용자가 입력하는 허용 오차인 최대 수직 거리와, 법선 벡터

의 z 성분 중 최대 값으로 레이어 두께를 식(1)과 같이 결정한다.

$$d_{layer} = \frac{c_{max}}{N_z} \tag{1}$$

where, c_{max} : maximum cusp height

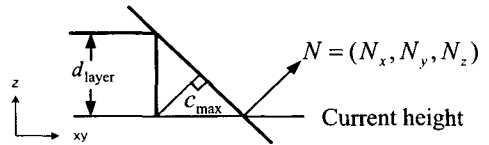


Fig. 1 Maximum cusp height and a layer thickness in Dolenc's adaptive slicing

Sabourin^[7]의 적응 단면화 방법은 Dolenc의 방법을 응용한 것으로서 Fig. 2와 같이 일정한 레이어 두께로 단면화 한 후 레이어의 윗 부분과 아랫부분의 법선 벡터의 z 성분이 서로 다른 경우에는 이 부분을 다시 n 등분 하여서 정확도를 높이는 것이다. 이 때에는 식(2)와 같이 두 법선 벡터의 z 성분 중 큰 값을 이용하여 Dolenc의 방법으로 계산한 레이어 두께와 처음에 단면화 한 레이어 두께와의 비의 정수 값으로 n 등분 한다.

$$d_{layer} = \frac{d}{\text{int} \left[d / \left(\frac{c_{max}}{\max[N_{upper}, N_{lower}]} \right) \right]} \tag{2}$$

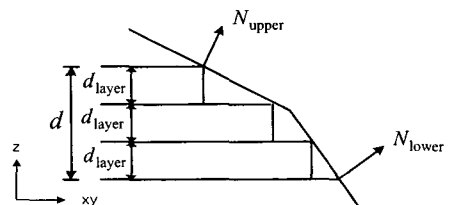


Fig. 2 A new layer thickness in Sabourin's adaptive slicing

2.3 적응 단면화의 문제점

적응 단면화는 정확도와 빠른 제작 시간 두 가지를 모두 만족시킬 수 있는 장점이 있음에도 불구하고 실제 쾌속조형에는 적용이 안 되고 있는 실정이다. 이에 대한 첫 번째 문제점으로는 적응 단면화 방법에 의해 계산된 레이어 두께의 종류가 너무 많기 때문이다. SLA, FDM, SLS와 같은 쾌속조형 장비들은 특정한 범위 내에서의 모든 두께가 제작 가능하지만 이를 위해서는 기계적인 세팅을

다시 설정해야만 하는데 이 작업은 간단하지 않을 뿐만 아니라 많은 시간이 소요되기 때문에 하나의 모델을 제작 완료할 때까지는 기계적인 세팅을 바꾸지 않고 있는 실정이다. 이 기계적인 세팅이 고정되었을 때 제작 가능한 두께는 몇 가지로 한정되어 있다. 따라서 본 연구에서는 사용자로부터 몇 종류의 두께를 입력 받아 그 두께들로만 단면화를 하는 알고리즘을 개발하여, 현재의 장비들에 적용 단면화가 적용될 수 있도록 하였다. 두 번째 문제점은 총 제작 시간을 예측하기가 어렵다는 것이다. 실제 쾌속조형 장비로 물체를 제작할 때 하나의 레이어를 적층하는 데에 소요되는 시간은 1분 이상이다. 그리하여 전체 높이가 10cm 인 물체를 제작하려면 13 시간 정도가 소요된다. 즉 쾌속조형 장비로 물체를 제작하는 것은 많은 시간이 소요되는 작업이므로 설계 초기 단계에서 총 제작 시간을 예측할 수 있어야 한다. 그러나 원하는 시간 내에 제작을 완료하기 위해서는 최대 수직 거리 입력 값을 결정하기가 많은 경험이 부족하면 어려운 일이다. 따라서 단면화를 할 때 사용자가 희망하는 제작 시간을 고려하여 이 시간에 제작이 완료되도록 하는 단면화 알고리즘을 개발하여 경험이 적은 사용자도 설계 초기 단계에 총 제작 시간을 예측할 수 있도록 하였다.

2.4 연구 방향

앞에서 설명한 적용 단면화의 문제점을 해결하기 위해 (1)제작 가능한 몇 종류 두께의 레이어들로 (2)희망 제작 시간에 (3)주어진 CAD 모델과 제작될 형상 간의 부피 오차를 최소화하는 단면화 알고리즘을 개발하였다. 이 과정에서 기존의 적용 단면화 방법으로는 해결할 수 없는, 개선된 부분이 두 가지 있다. 먼저, 희망 제작 시간으로부터 전체 레이어의 개수 및 제작 가능한 각 레이어의 개수가 결정되면 이 레이어들을 적절한 곳에 배치해야 하는데, 하나의 모델 내에 Fig. 3 과 같이 국부적으로 경사진 부분과 Fig. 4 와 같이 전체적으로 경사진 부분이 있을 때 두 부분에서 법선 벡터의 z 성분의 최대 값($\sin 45^\circ$)은 같으나 오차는 경사면 부분에서만 발생하므로 Fig. 3 의 물체는 부분적으로, Fig. 4 의 물체는 전체적으로 오차가 발생하게 된다. 따라서 오차가 상대적으로 적게 발생하도록 하기 위해서는 Fig. 4 의 물체에 얇은 두께를 우선적으로 배치해야 한다. 이를 위해 법

선 벡터의 z 성분의 평균 값을 이용하였다.

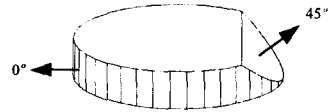


Fig. 3 An object with partially sloped surface

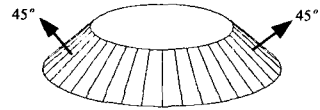


Fig. 4 An object with entirely sloped surface

두 번째 개선된 부분은 최대 수직 거리로 오차를 계산한다는 것이다. 하나의 모델 내에 Fig. 5 와 같이 단면의 둘레가 짧은 부분과 Fig. 6 과 같이 단면의 둘레가 긴 부분이 있을 때 두 부분에서의 최대 수직 거리는 같으나 오차가 상대적으로 적게 발생하도록 하기 위해서는 Fig. 6 의 물체에 얇은 두께를 우선적으로 배치해야만 한다. 따라서 단면의 둘레의 길이를 고려한 부피 오차를 계산하여 이 부분을 개선하였다.

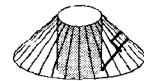


Fig. 5 An object whose boundary of slice is short

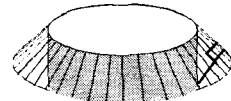


Fig. 6 An object whose boundary of slice is long

제작 가능한 레이어 두께들은 불연속(discrete)인 값들이고 그 종류는 세, 네 가지 정도인 특징이 있다. 본 연구는 부피 오차를 최소화하도록 이들 레이어의 적층 순서를 정하는 것이고 위의 특징에 알맞는 직교배열표를 이용하였다.

3. 직교배열표를 이용한 단면화

3.1 각 두께의 레이어 개수 결정

먼저 사용자가 입력하는 희망 제작 시간과 쾌속조형 장비의 사양인 하나의 레이어 적층 시간으로부터 희망 제작 시간을 초과하지 않는 전체 레이어 개수 N 을 식(3)과 같이 결정하며, 각 두께의 레이어 개수 n_i 는 그 총합이 전체 레이어 개수이어야 하고 제작 가능한 두께들

$d_i (d_1 < \dots < d_m)$ 의 모든 레이어들을 적층하였을 때의 높이는 단면의 윤곽을 찾을 수 있도록 주어진 CAD 모델의 높이 H 를 초과하지 않아야 한다. 또한 정확도 향상을 위해서 얇은 두께의 레이어가 많아야 하므로 식(4)와 같이 각 두께의 레이어 개수를 결정한다.

$$N = \text{int} \left[\frac{\text{희망 제작 시간}}{\text{하나의 레이어 적층 시간}} \right] \quad (3)$$

$$\begin{cases} n_1 + n_2 + \dots + n_m = N \\ n_1 \cdot d_1 + n_2 \cdot d_2 + \dots + n_m \cdot d_m \cong H \\ (n_1 \geq n_2 \geq \dots \geq n_m) \end{cases} \quad (4)$$

3.2 평균 법선 벡터 계산

주어진 CAD 모델의 적층 방향으로의 형상 변화 정도를 파악하고 나중에 계산하게 될 부피 오차를 근사화 하려면 평균 법선 벡터가 계산되어야 한다. 여기서의 평균 법선 벡터는 기존의 법선 벡터와는 다르다. Dolenc 이나 Sabourin 이 제시한 법선 벡터는 특정 높이를 통과하는 퍼시트의 법선 벡터 z 성분 중에서 최대 값을 의미한다. 그렇게 되면 어느 특정 부위만 고려하여 두께가 계산되어지고 특정 높이들 사이의 퍼시트들은 두께 계산 시 고려되지 않는다. 이에 본 연구에서는 모든 퍼시트들이 고려되는 평균 법선 벡터를 이용하였다. 먼저 CAD 모델을 적층 방향으로 검색하여 최소 제작 가능 두께(d_{\min}) 단위로 평균 법선 벡터 값을 계산한다. 물론 최소 제작 가능 두께 내에서도 법선 벡터의 변화가 발생할 수 있으나 이는 실제로 제작할 때 고려할 수 없는 사항이므로 무시한다. 각 검색 영역에서의 평균 법선 벡터 값 N_{jz} 는 Fig. 7 과 같이 검색 영역에 속하는 퍼시트들의 법선 벡터의 z 성분 N_{iz} 와 면적 A_i 를 이용하여 식(5)와 같이 계산하는데 법선 벡터의 z 성분에 절대값을 취하는 이유는 양의 값과 음의 값이 서로 상쇄되어 실제로는 모델의 경사가 완만한데 계산된 결과는 경사가 급격하게 되는 것을 막기 위함이다.

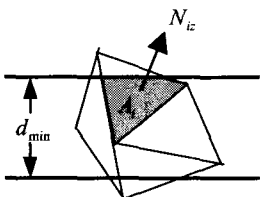


Fig. 7 Calculation of a mean normal vector

$$\bar{N}_{jz} = \frac{\sum_i (N_{iz} | \cdot A_i)}{\sum_i A_i} \quad (5)$$

다음으로 최소 제작 가능 두께 단위로 계산된 평균 법선 벡터 값들을 인접한 검색 영역의 평균 법선 벡터 값들과 비교하여 동일 여부를 판단한다. 이 때, 동일 여부를 판단하는 기준은 사용자가 정해주는 값으로 예를 들면 $0.01745 (\sin 1^\circ)$ 와 같은 값이 될 수 있다. 인접한 두 영역의 평균 법선 벡터가 같으면 두 영역을 하나의 영역으로 병합한 후 평균 법선 벡터 \bar{N}_{kz} 를 식(6)과 같이 갱신하며, 여기서 A_j 는 각 검색 영역에 속하는 모든 퍼시트의 해당 면적을 의미한다.

$$\bar{N}_{kz} = \frac{\sum_j (\bar{N}_{jz} \cdot A_j)}{\sum_j A_j} \quad (6)$$

위의 병합 과정을 모두 마치고 나서 최종적으로 남게 되는 평균 법선 벡터들의 물리적 의미는 CAD 모델의 적층 방향으로 형상 변화의 정도를 나타낸다. 예를 들면, 형상 변화가 심할 수록 평균 법선 벡터의 개수도 증가한다. 또한 평균 법선 벡터들은 나중에 부피 오차를 근사화 할 때 유용하게 사용된다. 최종적으로 평균 법선 벡터들이 계산되면 각 평균 법선 벡터 구간의 양 끝 높이에서의 모델의 둘레를 퍼시트와의 교차 계산을 통하여 구한다.

3.3 부피 오차 근사화

폐쇄조형 장비로 입력되는 STL 파일^[12]은 많은 퍼시트 정보들로 표현된다. 그런데 이들 정보에는 퍼시트간의 연결 정보, 즉 토폴로지가 없기 때문에 이들로부터 면적, 교차 등을 계산하는 것은 상당히 많은 계산량을 필요로 한다^[8]. 앞에서 구한 면적이거나 둘레 계산은 비교적 간단한 경우인데 반하여 부피 오차 계산의 경우는 STL 파일로 표현된 모델과 적층될 모델의 각각의 부피를 단순히 빼는 것이 아니고 불리언 연산으로 구해지는 값이므로 두 모델간의 교차 계산을 수행하여야 하고 이 과정에서 퍼시트의 세 꼭지점 좌표와 법선 벡터 뿐만 아니라 추가적인 정보가 계산되어야 하므로 STL 파일로부터 부피 오차를 계산하는 일은 상당히 복잡한 작업이다. 따라서 본 연구에서는 근사화된 부피 오차를 사용하였다. 주어진 모델과 적

층될 모델간의 부피 오차는 계단 현상으로 인해 발생하는 삼각형의 면적과 단면의 둘레에 의해 발생한다. 하지만 실제로는 삼각형의 크기 및 모양이 계속 변하고 또 어떤 경우에는 삼각형이 아닐 수도 있는 문제가 있으므로 이러한 모든 경우를 고려하기 위해 평균 법선 벡터를 사용하였다.

부피 오차를 근사화 하기 위해 먼저 삼각형의 면적을 계산한다. Fig. 8 과 같이 삼각형 BCD 에서 sine 법칙을 이용하면 식(7)과 같이 면적 값을 구하고자 하는 삼각형 ABC 의 밑변과 수직 거리 (cusp height)와의 관계를 알 수 있으며 여기서 sine 값을 평균 법선 벡터의 z 성분으로 표현하면 식(8)과 같고 이를 정리하여 삼각형 ABC 의 밑변의 길이를 평균 법선 벡터의 z 성분과 레이어의 두께로 나타내면 식(9)와 같다.

$$\frac{x}{\sin 90^\circ} = \frac{c}{\sin \alpha} \quad (7)$$

$$\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha = 1 - \bar{N}_z^2 \quad (8)$$

$$x = \frac{d \cdot \bar{N}_z}{\sqrt{1 - \bar{N}_z^2}} \quad (9)$$

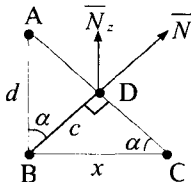


Fig. 8 Calculation of the area of a triangle caused by staircase effect

따라서 삼각형 ABC 의 면적은 식(10)과 같이 계산한다.

$$S = \frac{d^2 \cdot \bar{N}_z}{2\sqrt{1 - \bar{N}_z^2}} \quad (10)$$

부피 오차는 단면의 둘레를 따라 발생하는 데 하나의 레이어에는 현재 높이의 둘레, 다음 높이의 둘레 두 가지가 있다. 이는 각각 삼각형의 꼭지점 A, C 의 자취이다. 이 두 가지의 자취로부터 Fig. 9 와 같이 삼각형의 면적 중심의 자취를 계산하여 부피 오차를 근사화한다. 먼저 삼각형 ADG 와 삼각형 ABM 은 닮은꼴임을 이용하여 식(11)과 식(12)를 얻을 수 있다.

$$\frac{DG}{BM} = \frac{AG}{AM} = 2:3 \quad (11)$$

$$3BE = BC \quad (12)$$

식(12)로부터 점 E 는 BC 를 1:2 로 내분하는

점이라는 것을 알 수 있고 점 B 의 자취는 점 A 의 자취와 상응하므로 이로부터 면적 중심의 자취 L 을 식(13)과 같이 정의한다.

$$L = \frac{2(A \text{의 자취}) + (C \text{의 자취})}{3} \quad (13)$$

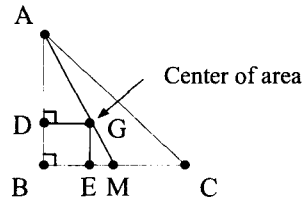


Fig. 9 The center of area of a triangle

이 때 각 레이어에서 점 A 및 C 의 자취는 하나의 평균 법선 벡터 구간 내에서 앞에서 구해 두었던 구간 양 끝에서의 둘레의 길이를 이용하여 계산하고, 근사화된 부피 오차 V 는 식(14)와 같이 앞에서 구한 삼각형의 면적 S 에 그 삼각형의 면적 중심의 자취 L 을 곱한 값으로 정의한다.

$$V = S \cdot L \quad (14)$$

3.4 단면화

근사화된 부피오차를 이용하여 주어진 CAD 모델과 적층될 모델 간의 부피 오차를 최소화하는 레이어들의 순서를 결정하는 데에 있어서 평균 법선 벡터를 설계 인자(design factor)로, 그 곳에 배치될 수 있는 제작 가능한 두께의 레이어를 설계 인자 값(level)으로 하는 직교배열표를 만든 후, 이 직교배열표에 따라 레이어들을 배치해 본 후 최적의 레이어 순서를 결정하였다. 부피 오차를 최소화하는 것은 smaller-the-better^[3] 문제이므로 S/N 비를 앞에서 설명한 근사화된 부피 오차 V 를 이용하여 식(15)와 같이 구한다.

$$\eta = -10 \log_{10}(V^2) \quad (15)$$

직교배열표의 각 행에 해당하는 S/N 비를 모두 구한 후 이 값들로부터 각 평균 법선 벡터의 sum of squares^[3]를 구한다. 이 값은 각 설계 인자의 상대적인 중요도를 나타내고 본 연구에서의 의미는 전체 정확도에 미치는 평균 법선 벡터들의 상대적인 영향도이다. 다시 말하면 이 값이 큰 평균 법선 벡터 구간에서는 부피 오차의 많고 적음이 전체 정확도에 큰 영향을 미친다는 것이고 또한 이 값이 작은 평균 법선 벡터 구간에서는 부피 오차의 많고 적음이 전체 정확도에 별 영향을 미치지

지 못한다는 것이다. 따라서 레이어들의 순서를 정할 때, 평균 법선 벡터 간의 상대적인 영향도가 큰 부분부터 부피 오차를 줄이기 위해 작은 두께의 레이어들을 배치하고 평균 법선 벡터 간의 상대적인 영향도가 작은 부분에는 큰 두께의 레이어들을 배치하여 전체의 부피 오차를 최소화하였다. 이러한 방법으로 레이어들을 모두 배치한 후 CAD 모델의 제일 아랫 부분에서부터의 레이어 순서가 적층 순서가 되며 본 알고리즘의 최종 결과가 된다.

4. 적용 사례

첫 번째 적용 사례로서 수압 케이싱에 대해 단면화를 하였다. 이 번 적용 사례에서는 전체 레이어 개수가 같을 때 균일 단면화와 본 알고리즘의 정확도의 차이에 대해서 알아보겠다. 높이 27mm 인 이 모델을 희망 제작 시간은 14 분, 하나의 레이어 제작 시간은 1 분 그리고 제작 가능한 레이어 두께들은 1.1mm, 1.9mm, 3mm 로 하여 단면화를 하였다. 먼저 Fig. 10 과 같이 일정한 두께로 균일 단면화를 하였다. 희망 제작 시간에 적층을 완료하기 위해 레이어 두께는 1.9mm 로 하였다. 두 번째로는 Fig. 11 과 같이 세 가지 제작 가능한 두께를 모두 사용하여 단면화를 하였다.



Fig. 10 The result of uniform slicing of a hydraulic casing

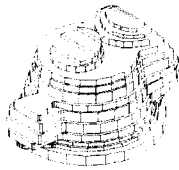


Fig. 11 The result of new slicing of a hydraulic casing

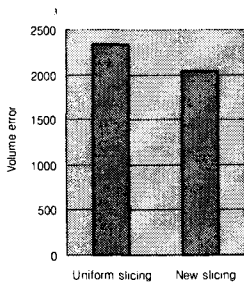


Fig. 12 The comparison of volume errors caused by uniform and new slicing of the hydraulic casing

두 단면화의 경우를 비교해 보면 Fig. 12 와 같이 정확도가 13% 정도 향상된 것을 알 수 있으며 정확도가 향상된 것 이외에도 형상 또한 원래의 CAD 모델에 가까워진 것을 알 수 있다. 따라서 기존의 균일 단면화와 비교하여 동일한 제작 시간에 대해 부피 오차가 감소되어 원래의 CAD 모델의 형상에 가까운 모델을 얻을 수 있었다.

두 번째 적용 사례로서 볼 베어링 지지대에 대해 단면화를 하였다. 이 번 적용 사례에서는 균일 단면화와 본 알고리즘이 전체 레이어 개수와 정확도 모두에 미치는 영향에 대해 알아보겠다. 높이 40mm 인 이 모델을 제작 가능한 레이어 두께로 1.5mm, 2mm, 3mm 를 사용하여 단면화를 하였다. 첫 번째로는 Fig. 13 과 같이 가장 정확한 모델을 얻기 위해 가장 얇은 두께인 1.5mm 로 균일 단면화를 하였다. 두 번째로는 Fig. 14 와 같이 세 가지 제작 가능한 두께를 모두 사용하여 단면화를 하였다. 두 단면화의 경우를 비교해 보면 Fig. 15 와 같이 정확도가 14% 정도 저하되고 전체 레이어의 개수는 26% 정도 줄어든 것을 알 수 있다. 여기서 정확도가 저하된 이유는 제작 가능한 모든 두께를 사용하여 빠른 시간 안에 적층이 가능하도록 하였기 때문이며 좀 더 여유 있게 제작 시간을 준다면 해결할 수 있는 문제이다. 그리고 정확도 저하 정도에 비하여 전체 레이어 개수의 감소 정도가 더 크므로 균일 단면화에 비하여 효율적이라고 할 수 있겠다.

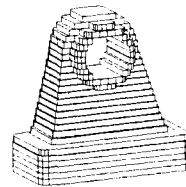


Fig. 13 The result of uniform slicing of a ball bearing support

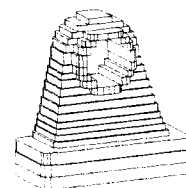


Fig. 14 The result of new slicing of a ball bearing support

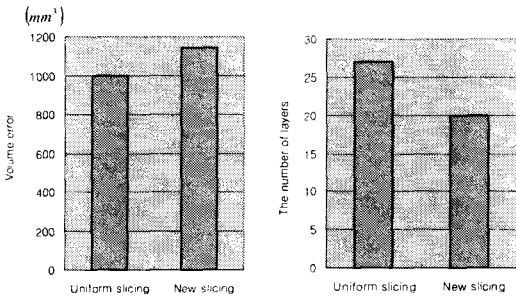


Fig. 15 The comparison of the results of uniform and new slicing of the ball bearing support

5. 결론

본 연구에서는 균일 단면화에 비해 정확도도 향상시키고 제작 시간도 단축시킬 수 있는 적응 단면화의 장점을 살리면서, 현재의 패속조형 장비로 제작 가능한 두께의 레이어들로 단면화를 하였고, 희망 제작 시간에 적층이 완료되도록 결정된 개수의 각 두께의 레이어들이 있을 때, 오차를 최소화하는 이들의 적층 순서를 적교배열표를 이용하여 결정하였다. 여기서 희망 제작 시간을 고려하는 것은 사용자로 하여금 단면화 초기 단계에 실제 제작 시간을 예측할 수 있도록 하기 위함이고 이를 반영하여 전체 레이어의 개수를 결정하였다. 적용 사례에서 보듯이 새로운 알고리즘이 균일 단면화에 비해 정확도가 향상됐고 효율적이지만, 만약 제작 가능한 레이어 두께 값들이 바뀐다면 그 정도는 달라질 수가 있다. 그 이유는 본 알고리즘이 주어진 두께만으로 적응 단면화를 시도하기 때문에 한계가 있는 것이다.

또한 본 연구는 기존의 적응 단면화 방법에서 고려한 수직 거리 뿐만 아니라 부피 오차를 고려하였으므로 보다 정확한 단면화를 할 수 있었다. 이 부피 오차를 계산하는 데에 있어서 상당히 많고 복잡한 계산을 피하기 위하여 부피 오차를 근사화 하였는데 이 값은 참 값이 아닌 근사화된 값이므로 어느 정도의 오차를 가지고 있다. 따라서 부피 오차를 근사화 할 때 삼각형의 면적과 단면의 둘레 이외에 다른 항을 추가하여 보다 더 정확한 근사화를 해야 하겠다. 이러한 추가 항으로는 법선 벡터의 z 성분들의 분산이 한 예가 될 수 있

겠다. 만일 STL 파일로부터 효율적으로 부피 오차의 참 값을 직접 계산할 수 있는 알고리즘을 개발한다면 더 정확한 단면화를 할 수 있겠다.

참고문헌

1. Paul F. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing," Society of Manufacturing Engineers, Michigan, pp. 1-24, 1992.
2. Paul F. Jacobs, "Stereolithography and other RP&M Technologies," Society of Manufacturing Engineers, Michigan, pp. 1-26, 1996.
3. Madhav S. Phadke, "Quality Engineering Using Robust Design," PTR Prentice-Hall Inc., New Jersey, pp. 41-66, 1989.
4. Genichi Taguchi, "System of Experimental Design," UNIPUB/Kraus International Publications, New York, pp. 165-184, 1987.
5. Kenneth L. d'Entremont, *Design for Latitude*, MS Thesis, University of Missouri-Columbia, May 1986.
6. A Dolenc and I Makela, "Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 2, pp. 119-126, 1994.
7. Emmanuel Sobourin, Scott A. Houser and Jan Helge Bohn, "Adaptive Slicing Using Stepwise Uniform Refinement," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 20-26, 1996.
8. Stephen J. Rock and Michael J. Wozny, "Generating Topological Information from a Bucket of Facets," *Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas, Austin, TX, pp. 251-259, 1992.