

쾌속조형의 속도를 향상시키기 위한 알고리즘

고민석#, 장민호*, 왕지남**, 박상철**

An Algorithm to Speed Up the Rapid Prototyping

Min-suk Ko[#], Min-ho Chang^{*}, Gi-nam Wang^{**} and Sang-chul Park^{**}

ABSTRACT

While developing physical prototype from CAD model, rapid prototyping mainly focuses on two key points reducing time and material consumption. So, we have to change from a traditional solid model to building a hollowed prototype. In this paper, a new method is presented to hollow out solid objects with uniform wall thickness to increase RP efficiency. To achieve uniform wall thickness, it is necessary to generate internal contour by slicing the offset model of an STL model. Due to many difficulties in this method, this paper proposes a new algorithm that computes internal contours computing offset model which is generated from external contour using wall thickness. Proposed method can easily compute the internal contour by slicing the offset surface defined by the sum of circle swept volumes of external contours without actual offset and the circle swept volumes. Internal contour existences are confirmed by using the external point. Presented algorithm uses the 2D geometric algorithm allowing RP implementation more efficient. Various examples have been tested with implementation of the algorithm, and some examples are presented for illustration.

Key Words : RP (쾌속 조형), Hollowing out (속비움), Uniform wall thickness (균일한 벽 두께), Circle swept volume (원 자취 부피), 2D curve offsetting (2D 커브 오프셋)

1. 서론

쾌속조형(Rapid Prototyping; RP)은 CAD 모델을 층별 하여 생산하는 방식으로, 전통 제조방식에 비해 시제품(Prototype)생산시간을 단축 시켰다. 일반적인 쾌속조형은 0.5 ~ 0.6 mm 이하의 얇은 층 두께와 수직벽을 갖는 박판 적층식 쾌속조형공정을 의미한다.¹⁵ 재료를 제거하는 과거 절삭기술과 다르게, 대다수 RP 생산과정은 재료를 층별로 더하거

나 고형화 시켜 부피를 증가시켜 나간다. Fig. 1 과 과같이 CAD 모델의 층별 방향은 RP 적층 방향과 수직을 이루며, 각 층들은 바닥에서 위 방향으로 순차적으로 부피를 더해간다. 하지만 각 층의 단면은 꼭 채워져 있기 때문에 RP 생산과정에서 이 불필요한 단면의 부피를 추가하는데 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서 Fig. 2 에서 보이는 것 같이 모델에서 단면을 제거한 속이 빈 모델을 사용하여, RP 의 생산성 및 경제성을 향상 시킬 수

☞ 접수일: 2007 년 7 월 26 일; 게재승인일: 2007 년 12 월 10 일

교신저자: 아주대학교 산업공학과 대학원

E-mail: sebastianminsuk@hanmail.net Tel. (031) 219-1763

* 단국대학교 기계공학과

** 아주대학교 산업공학과

있다. 즉, 속이 빈 솔리드 모델(Hollowing out solid model)을 통해 모델 내부의 불필요한 고형면적을 감소시킴으로써, RP 제작 시간과 비싼 재료를 감소시킬 수 있다. 이를 위한 기존의 다른 연구는 정밀 주조틀링(Investment cast tooling) 및 SLA (Stereolithography)를 이용하여 왁스(wax)를 사용하지 않고 정밀주조용 마스터 패턴(master pattern)을 직접 제작하는 급속주조(quick cast) 기법이 있다.¹⁶

RP는 넓은 분야에 걸쳐 빠르게 확산되었다. 다양한 주조(Investment casting, die casting and sand casting)를 위한 주형(mold)제작, 제품 조립에 사용되는 파트 제작, 의료분야에 필요한 파트 제작 등이 그 예이다. 본 논문에서 제안된 속이 빈 RP 파트를 이러한 분야에 응용할 때, 균일한 벽 두께(Uniform wall thickness)를 유지하는 것은 매우 중요하다.

예를 들어 세라믹 셸(Ceramic shell)에 둘러 쌓여진 주물의 코어(core)역할에 RP 파트를 사용할 때, 이는 cavity(플라스틱 성형 시 밀봉하는 금형 속 빈 틀)를 두고 태워 없어진다. 만약 이 코어의 두께가 일정하지 않다면, 고형화 중에 세라믹 셸이 깨지는 주조결함(shrinkage)을 초래할 수 있다. 이러한 속이 빈 솔리드(Solid)모델을 위해 개발된 방법은 크게 4 가지로 분류된다. 1) Octree(옥트리)나 Voxel(복셀) 모델 같이 공간을 조사하는 기술 2) 고체구조기하학(Constructive Solid Geometry)의 오프셋 방법 3)커브 오프셋 방법 그리고 4)표면 오프셋 방법이다. Lam¹⁰은 본래의 솔리드 내부에 위치하는 Octree의 보조 경계를 이용한 얇은 셀 솔리드 모델을 제시하였다. Chiu와 Tan⁷은 속이 빈 형상을 만들기 위해 Voxel 요소를 사용하였다. 어려운 3 차원의 불리안(Boolean) 연산을 피하기 위해 모델의 층 표현과 Voxel 요소 사이의 1 차원 불 연산을 수행한 것이다. Alexander와 Dutta¹¹ 또한 RP 모델의 균일한 벽 두께를 계산하기 위해서 voxel 요소를 사용하였다. Octree와 voxel 요소를 사용하여 속이 빈 솔리드 모델을 조사했기 때문에, 이들의 본래 특성 중 하나인 계단 현상이 내부에서 발생한다. Li et al.⁹는 본래 오프셋 쌓에서 솔리드를 제거함으로써 얇은 셀 솔리드를 얻어내는 방법을 제안하였다. CSG 모델은 박스나 실린더, 구와 같이 간단한 기초형상들의 조합으로 정의되기 때문에 오프셋이 매우 쉽다. 하지만 이 방법은 경계의 표현, 혹은 STL 모델 같이 다른 작은 면 근사의 오프셋 파트에 쉽게 적용할 수 없다. 따라서 이는 오직 CSG 모델에만 적용할 수 있다. Koc와 Lee⁸는 속이 빈 솔리드 모델을 위해 평균 표면에 수직인 방법에 기초한 비 균일 오프셋 모델을 제안하였다. 하지만 이 모델은 모든 자기 교차점을 찾는 것, 유효하지 않은 삼각형을 제거하는 것 그리고 행 오프셋(raw offsetting) 후의 간격을 채우는 것 등의 조정 상 어려움을 갖고 있다. 따라서 실제로 STL 모델의 정확한 오프셋(facet offsetting) 모델을 계산하는 것은 쉽지 않다.^{8,13,14} Fig. 3(a)에 보이는 것 같이 행 오프셋 모델은 본래의 모델 보다 더 많은 삼각형과 자기 교차점 그리고 유효하지 않은 삼각형을 포함하고 있다. 이러한 문제를 분석하기 위해 Koc와 Lee는 평균 표면의 수직방법에 기초한 vertex(꼭지점) 오프셋을 통한 접근을 시도하였다. 이 방법은 각 vertex를 추정된 수직방

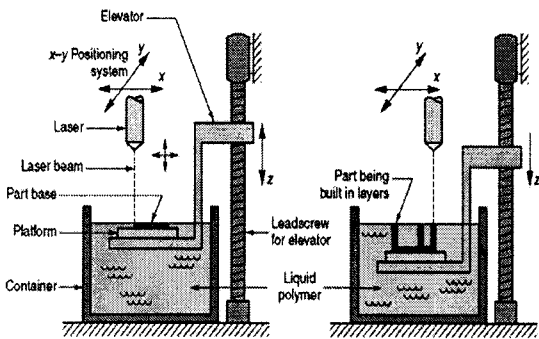


Fig. 1 Hollowing out a solid model

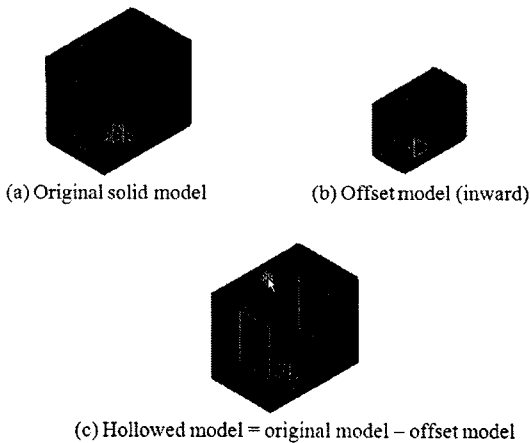


Fig. 2 Hollowing out a solid model

향으로 움직여서 오프셋 했기 때문에, 많은 수의 삼각형이 행 오프셋 후에 증가하지 않는다. 이는 매우 효과적인 결과를 산출하였지만, 몇 가지 잠재적 결함을 내포하고 있다. 1) vertex 에 연결된 마면들(facet)의 법선 벡터의 평균에 의해 vertex 수직 방향이 추정된다. 따라서 날카로운 vertex 는 추정된 vertex 수직의 정확성이 보증되지 않는다. 2) vertex 오프셋 접근이 복잡한 행 오프셋 모델을 줄이지만, 여전히 많은 자기 교차점과 유효하지 않은 삼각형을 포함하고 있다.

본 논문에서 커브 오프셋 방법의 활용은 3 개의 카테고리로 구분되며, 이는 간단한 2D 오프셋 방법과 차이를 가진다. 쉽게 알 수 있듯, 2D 단면 윤곽선(cross-sectional contour)을 간단히 오프셋 함으로써 균일한 벽 두께를 얻는 것은 불가능하다.

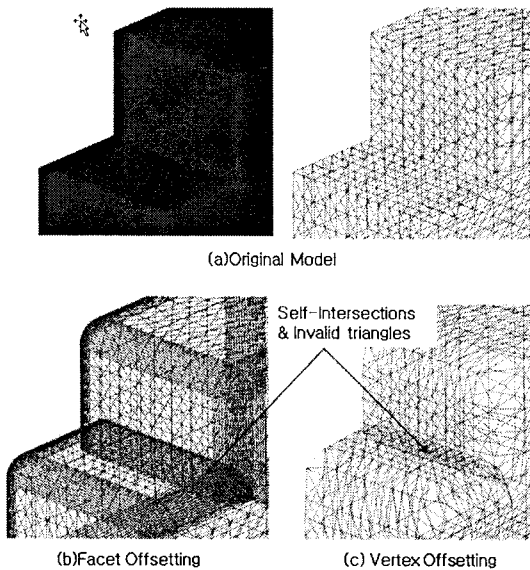


Fig. 3 Facet offsetting & Vertex offsetting

Fig. 4(a) 는 매우 간단한 솔리드 모델이며, Fig. 4(b) 는 벽 두께가 균일한 속이 빈 모델이다. 단면 윤곽이 같은 원의 중심이라는 가정하에 Fig. 4(c)와 (d)는 균일한 벽 두께를 가지는 단면 윤곽을 보인다. 외부 윤곽선(external contour)과 내부 윤곽선(internal contour) 사이의 거리는 표면 수직을 따라서 변화한다. 이는 외부 윤곽선을 벽 두께만큼 2D 오프셋 하여 내부 윤곽선을 계산하는 것이 불가능하다는 것을 의미한다. 이러한 기존의 곡면 오프셋

방법의 약점을 극복하기 위해 균일한 벽 두께를 갖는 내부 윤곽선 산출방법이 새롭게 개발되었다.

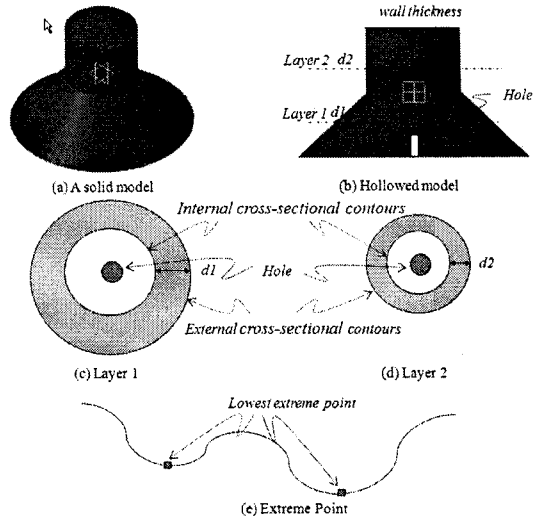


Fig. 4 Offsetting cross-sectional contours, extreme point and its problem

이는 2D 커브 오프셋을 포함하는 2D 기하 알고리즘(2D geometric algorithm)에 기초한 방법이기 때문에 3D 기하 알고리즘을 사용한 다른 방법에 비교하여 비교적 간단하고 쉽게 수행할 수 있다.

Fig. 4 에서 실제 RP 생산의 고려요소가 되는 Hole(구멍)을 확인할 수 있다. Hole의 역할은 모델이 완성되면 경화되지 않은 내부에 갇힌 액체 상태의 재료를 제거하는 구멍이다. 액체 재료가 쉽게 제거 될 수 있도록 Hole 은 Fig. 4(e)와 같이 모델의 극소점(Lowest extreme point)에 형성될 수 있게 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서 솔리드 모델의 내부를 비우는 방법에 대한 포괄적 접근 방법을 설명하며, 3 장에서 내부 윤곽선을 계산하는 자세한 알고리즘을 제안한다. 4 장에서 적용효과를 다루며 마지막으로 5 장에서 소견을 말한다.

2. 솔리드 속비움을 위한 접근법

본 논문의 목적은 솔리드 파트의 내부를 비우되, 균일한 벽 두께를 갖도록 하여 RP 프로세스의 속도를 향상시키는 것이다. STL 모델, 벽 두께, 적

합한 벽두께 변동(variation), 추가되는 RP 재료 층 두께들이 본 문제의 투입 요소로 정의된다. 먼저, 외부 윤곽선과 내부 윤곽선의 조합으로 정의되는 각 층의 단면을 계산해야 한다. 외부 윤곽선은 본래 STL 모델을 얇게 잘라(slicing) 쉽게 계산 가능하지만, 균일한 벽 두께를 유지하는 내부 윤곽선 계산은 어렵다. 물론 오프셋 된 STL 모델을 얇게 잘라서 내부 윤곽선을 계산할 수 있지만, 본 논문에서는 자기교차(self-intersection)와 다수의 불필요한 삼각형 같은 STL 모델의 오프셋 작업의 어려움을 피할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 외부 윤곽선의 집합으로부터 내부 윤곽선을 직접적으로 계산하는 것이다. 외부 윤곽선은 Fig. 5(a)과 같이 본래 솔리드 모델을 “E-Layers”라고 불리는 균일하게 잘려진 평면으로 잘라서 얻을 수 있다. 만약 솔리드 모델의 오프셋 표면을 이용할 수 있다면, 이를 잘라서 간단하게 내부 윤곽선을 계산할 수 있다. 주어진 오프셋 거리 (t =벽 두께)를 이용해서 외부 윤곽선으로부터 오프셋 표면을 산출하는 것이 본 방법의 핵심이다. Fig. 5(b) 같이, 외부 윤곽선 법선 방향에 수직을 유지하면서 이를 따라 원과 그 원(반지름 = t)이 포함하는 평면이 움직인다. 각 외부 커브(external curve)에 대한 원의 자취 부피(circle swept volume)가 정의되는데, 이를 모든 외부 윤곽선에 적용하여 부피를 합하면 오프셋 표면을 얻을 수 있다. Fig. 5(c)에서 보이는 것 같이 원 자취 부피의 합은 내부와 외부 오프셋 표면을 정의할 수 있다. 그러나 이렇게 얻어진 오프셋 표면은 이 방법이 가지는 분리적 성질(discrete nature)때문에 정확성에 문제를 갖고 있다. 외부 윤곽선을 포함하는 E-Layer 간의 거리가 정확성의 결정요인인데, 이는 만들어질 prototype의 표면 요구품질(surface finish = acceptable variation in wall thickness)에 따라 결정된다. 이 거리는 NC 공작 경로간격과 꼭지점 높이 사이의 관계를 이용한 벽 두께 적정 변동(acceptable variation in wall thickness)으로부터 도출할 수 있다. Fig. 6(a)는 2 차 평면의 벽두께 적정 변동 (cusp height) 으로부터 간격 거리 (path interval) 를 도출하는 것을 보인다. 주어진 벽두께 t 라고 할 때, E-Layer 간의 간격 g 는 벽 두께 내의 변동(v)로 간단히 표현될 수 있다.

$$g = 2 \sqrt{v(2t - v)} \quad (1a)$$

Fig. 6(b) 같이 블록한 부분의 간격 (g)는 아래 식으로 계산할 수 있다.

$$g = \frac{\sqrt{4(R+t)^2(R+v)^2 - [R^2 + 2Rt + (R+v)^2]^2}}{|R+v|} \quad (1b)$$

식에서 R 은 곡면에 수직인 반지름, v 는 벽 두께 적정 변동, 그리고 t 는 벽 두께이다. 식 (1b)에서 v 와 t 는 항상 양수이고, R 은 블록한 부분에서 양수이며 오목한 부분에서는 음수의 값을 갖는다. 이상의 결과들은 주로 표면의 원형 근사(circular approximation of the surface)에 기초하며, 사용에 주의를 요한다.

일단 내부 오프셋 표면을 다룰 수 있다면, 내부 오프셋 표면을 S-Layer(slicing layer)로 잘라서 내부 윤곽선을 얻을 수 있다. 여기서 S-Layer는 RP 재료를 더해가는 층의 두께를 고려하여 결정된다. 위의 접근방법을 개략적으로 설명하면 아래와 같다.

- ① 벽 두께의 적정 변동(v)을 고려하여 E-Layer 간의 간격 거리(g)를 결정한다.
- ② 본래의 STL 모델을 E-Layer 로 자름으로써 외부 윤곽선을 계산한다.
- ③ 외부 윤곽선의 원 자취 부피의 합에 의해 내부 오프셋 표면을 계산한다.
- ④ RP 재료를 더해나갈 층의 두께를 고려하여 S-Layer를 결정한다.
- ⑤ 내부 오프셋 표면을 S-Layer 로 잘라서 내부 윤곽선을 계산한다.
- ⑥ 본래 STL 모델을 S-Layer 로 잘라서 외부 윤곽선을 계산한다.
- ⑦ 외부, 내부 윤곽선을 합하여 각 S-Layer에 대한 단면을 결정한다.

개념적으로 이 방법은 모델로부터 거리와 벽 두께가 서로 같은 내부 오프셋 표면을 절단하여 내부 윤곽선을 계산하는 것이기 때문에, 적정 변동을 갖는 균일한 벽 두께를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법의 실제 수행에는 두 가지 어려움이 있다. 1) 만약 외부 윤곽선의 모양이 충분히 단순하지 않다면, 원 자취의 부피가 많은 자기 간섭과 유효하지 않은 삼각형을 만든다. 2) 원 자취 부피의 합에 의해 정의되는 오프셋 표면은 이 원들의 부피 사이에서 수많은 간섭이 발생한다. 이는 정확한 내부 윤곽선을 계산하기 위한 절단과정

(slicing process)을 방해한다. 본 논문에서 이러한 어려움을 피하기 위해, 오프셋 표면과 원 자취의 부피를 계산하지 않고 내부 윤곽선을 도출할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 다음 장에서 이 알고리즘에 대한 자세한 설명을 하겠다.

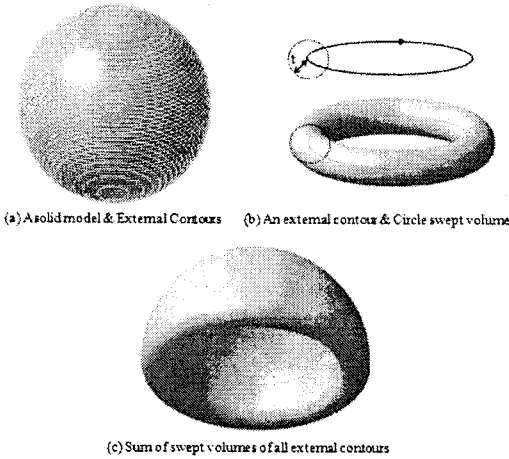


Fig. 5 Offset surface defined by the sum of circle swept volumes

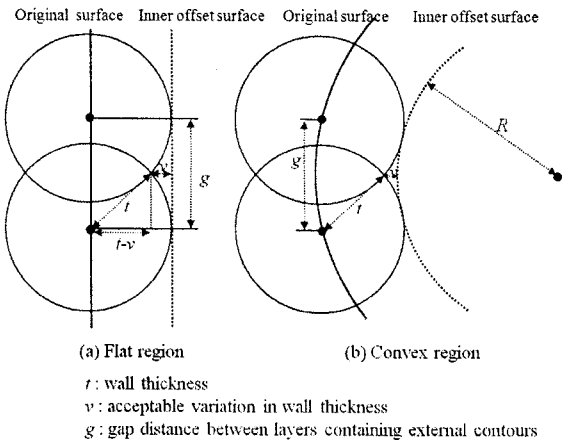


Fig. 6 Variation in wall thickness & gap distance between E-Layers

3. 내부 교차면 윤곽선의 계산

본 논문에서 제시한 기본 개념은 외부 윤곽선을 따라 형성된 원 자취 부피의 합이 오프셋 표면을 만들고, 이를 잘라서 내부 윤곽선을 도출하는 것이다. 이 과정 필요한 실제 오프셋 표면과 원 자

취 부피의 계산과정을 제거하는 것이 본 논문의 핵심이다. Fig. 7(a)는 외부 윤곽선 ($EC[i] = \text{an external contour on } L[i], 0 \leq i \leq 21$)을 포함하는 22개의 E-Layers ($L[i], 0 \leq i \leq 21$)를 갖는 예제의 옆면이다.

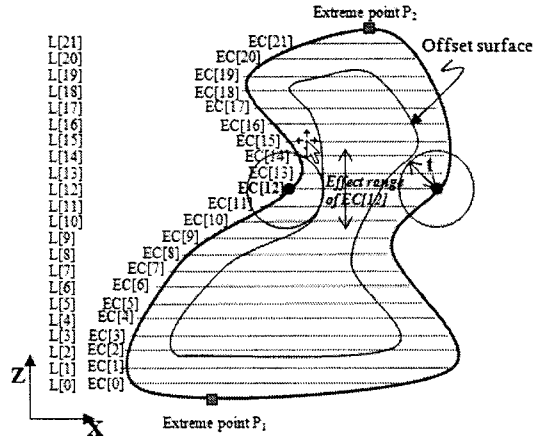


Fig. 7(a) Effect range of the circle swept volume of $EC[12]: L[10], L[11], L[12], L[13], L[14]$

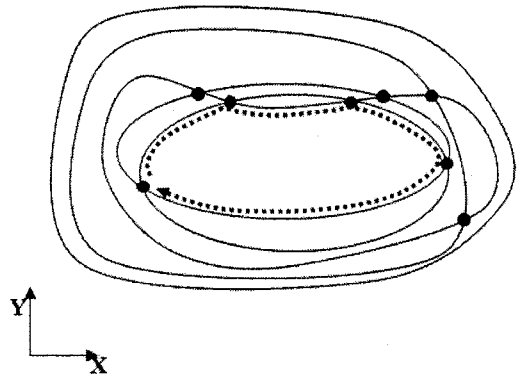


Fig. 7(b) Internal contour extraction

외부 윤곽선은 평면(E-Layer) 위에 놓여있기 때문에 이는 오프셋 표면에 대해 제한적 영역에 영향을 미친다. 예를 들어 Fig. 7(a)의 $EC[12]$ 는 $L[10], L[11], L[12], L[13]$ 와 $L[14]$ 를 포함하는 오프셋 표면의 제한된 부분에 잠재적으로 영향을 준다. 이는 $EC[10], EC[11], EC[12], EC[13]$ 와 $EC[14]$ 의 원 자취 부피를 고려함으로써 $L[12]$ 의 내부 윤곽선이 계산 가능함을 말한다. 오프셋 표면을 자르는 대신, $L[12]$ 평면으로 5개의 원 자취 부피를 자를 수

있다. 이 작업을 통해 L[12]위의 5 개의 잘려진 커브를 얻을 수 있다. 다음 단계는 이러한 잘려진 커브들 사이의 모든 교차점을 찾는 것이다. 커브들의 교차점 간의 관계를 고려하여 Fig. 7(b)같이 가장 안쪽의 커브를 찾아 L[12]의 내부 윤곽선을 구한다. 하지만 위에 제시된 방법은 내부 윤곽선이 존재하지 않는 (L[0], L[1], L[20], L[21] in Fig. 7(a))층에는 적용할 수 없다. L[0]의 내부 윤곽선 계산 수행을 가정하자. 이에 영향을 미치는 부피는 EC[0], EC[1], EC[2] 의 3 개의 원 자취 부피이며, 이는 내부윤곽선의 커브계산을 잘못된 방향으로 이끈다. 이 문제 해결을 위해 ‘극 값(extreme point)’의 개념을 소개한다. 본 논문에서 적층 방향은 z 축이며, STL 모델 Z 축 최대 및 최소값의 vertex 를 ‘extreme point’라고 가정한다. Fig. 7(a) 의 2 개의 극 값 (P₁, P₂) 은 내부 윤곽선의 유효성을 체크를 위해 사용된다. 예를 들어 L[0]와 P₁ 사이의 거리는 벽 두께 보다 작기 때문에 L[0]의 내부 윤곽선은 유효하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 L[0]는 어떠한 내부 윤곽선도 가지지 않으며, 이는 외부 윤곽선으로 정의된 전체 영역이 RP 재료로 채워져야 함을 의미한다. 원 자취 부피계산을 피하기 위해 외부 윤곽선과 절단 면(slicing layer)의 정보로부터 절단 커브(a sliced curve)를 직접 구할 수 있는 방법이 필요하다.

Fig. 8(a)는 E-Layer (L_i)의 윤곽선과 이의 원 자취 부피를 보여준다. Fig. 8(b)와 같이 원 자취 부피의 안쪽을 하나의 절단 층(S_j)로 잘라야 한다. L_i 와 S_j 사이의 거리(d) 는 원의 반지름과 같은 벽 두께(t) 보다 작아야 한다. 만약 두께보다 크면, 원 자취 부피와 S-Layer S_j 간의 교차가 생기지 않기 때문이다. Fig. 8(c)는 절단 커브를 계산하는 2 단계의 계산과정을 보여준다. 1) 외부윤곽선을 S-Layer 위에 놓기 위해, 외부 윤곽선을 거리 d 만큼 평행이동시킨다. 2) 거리 $\sqrt{t^2 - d^2}$ 만큼 안쪽 방향으로 2D 오프셋 한다. 이 결과 EC_i 의 원 자취 부피와 S-Layer S_j 사이의 교차 커브 즉, 절단 커브를 얻는다. Fig. 8(d) 와 같이, 실제 원 자취 부피 계산 없이 절단 커브를 얻을 수 있다.

Fig. 9(a) 는 3 개의 영역과 5 개의 잘려진 커브를 가지고 가장 안쪽의 커브를 추출하는 방법을 설명한 예이다. 예의 3 개 영역(Area₁, Area₂, Area₃) 이 특정 S-Layer 에 포함된다고 가정하자. Fig. 9(b) 같이 교차점 연결을 통해 기존 커브를 커브 조각(curve segment) 들로 쪼갤 수 있다. 후에 각 커브

조각이 다른 영역에 포함되는지 확인한다. 한 예로 seg7(area2 에 포함)은 area3 의 바깥에 위치하기 때문에 가장 안쪽의 커브가 될 수 없다. Fig. 8(d)와 같이 기존의 모든 커브들에 포함 되는 커브 조각들을 연결함으로써 내부 윤곽선을 쉽게 구할 수 있다.

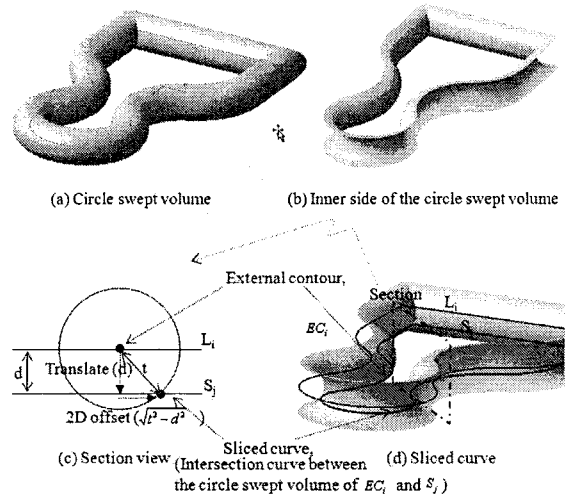


Fig. 8 Computing a sliced curve

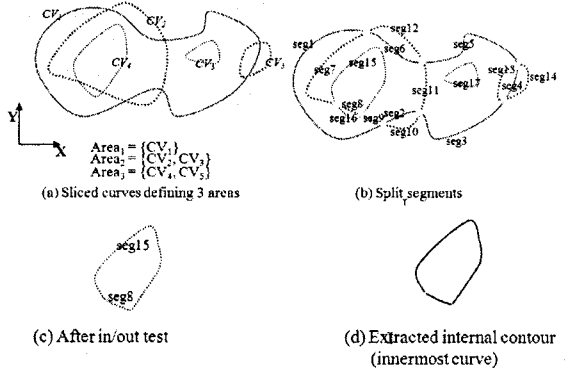


Fig. 9 Extracting innermost curves

본 논문의 제안 방법을 통해 오프셋 표면 또는 원 자취 부피의 계산 없이 외부 윤곽선으로부터 직접적으로 내부 윤곽선을 구할 수 있다. 본 알고리즘은 실제로 오프셋 표면을 자르지 않고, 2D 기하 알고리즘을 통해 오프셋 표면 절단을 수행했기 때문에, 내부 윤곽선이 균일한 벽 두께를 유지할 수 있었다.

4. 알고리즘의 평가

본 논문의 알고리즘을 Fig. 10 의 원기둥에 적용하여 효율을 계산하면 다음과 같다.

$$E_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_{1i}}{\sum_{i=1}^n (S_{1i} + S_{2i})} \times 100 \quad (2a)$$

$$E_v = \frac{\sum_{i=1}^n S_{1i}}{\sum_{i=1}^n (S_{1i} + S_{2i}) + v_{bottom} + v_{top}} \times 100 \quad (2b)$$

S_1 을 속을 비운 단면적, S_2 를 남아있는 단면적, v_{bottom} 를 바닥 층 부피, v_{top} 를 가장 위층의 부피로 할 때, E_s 는 기존의 단면적 대비 줄어든 단면적의 넓이 비율로써 RP 제작 소요시간의 감소비율을 나타낸다. 또 E_v 는 전체 부피 중 줄어든 부피의 비율을 나타내는 식이다.

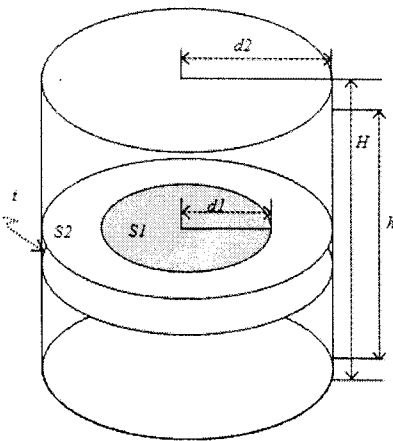


Fig. 10 Cylinder hollowing out assessment

$d1 = 10$, $d2 = 12$, $H = 40$, $h = 32$, $g = 2$ 인 원기둥에 적용하면 제작소요시간 단축 효율 및 부피 절감 효과는 $E_s = 69.44\%$, $E_v = 55.56\%$ 이다. 이는 기존에 RP 제작의 중요 고려요소인 소요시간 및 재료소모 부피를 획기적으로 절감시킨 결과이다.

5. 결론

본 논문은 RP 시스템의 파트 가공 속도 향상을 위해 솔리드 모델의 속을 비우는 절차를 제안하였다. 속이 빈 솔리드 모델을 위해서 RP 모델의 벽 두께를 균일하게 만드는 내부 윤곽선 산출이 우선

적으로 요구된다. 외부 윤곽선은 STL 모델을 잘라서 쉽게 얻을 수 있으나, 균일한 벽 두께를 위해 내부윤곽선은 오프셋 표면을 잘라서 산출 되어야 한다. 하지만 STL 모델의 오프셋은 여러 어려움을 가지고 있다. 포함되는 모든 자기 교차점을 찾는 것, 간격을 채우는 것, 행 오프셋 후에 유효하지 않은 삼각형들을 제거하는 것 등의 규칙상 어려움 때문에, STL 모델의 오프셋 모델의 정확한 계산은 어렵다. 올바른 오프셋 모델을 계산하기 위해 발생하는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 외부 윤곽선으로부터 내부 윤곽선을 직접적으로 산출시키는 절차를 제안하였다. 제안된 알고리즘의 기본 개념은 오프셋 모델을 표현하는 외부윤곽선의 원 자취 부피를 구하는 것이다. 이 부피가 영향을 미치는 층을 잘라, 층에 대한 내부 윤곽선을 계산하는 것은 가능하다. 하지만 2D 기하 작업(2D geometric operation)을 통해 쉽게 커브를 산출할 수 있기 때문에, 실제 원 자취 부피 계산의 필요성이 사라진다. 제안된 알고리즘이 잘 알려진 2D 기하 알고리즘에 기반하기 때문에, 효과적이고 사용하기 쉽다. 제안 알고리즘을 통해 가공된 속이 빈 시제품을 만듦으로써, 가공시간과 값 비싼 RP 재료의 소비를 줄일 수 있다.

참고문헌

1. Jacobs, P., "Rapid prototyping and manufacturing fundamentals of stereolithography," Society of Manufacturing Engineers, pp. 10-80, 1993.
2. Nyaluke, A. P., An, D., Leep, H. R. and Parsaei, H. R., "Rapid prototyping," Applications in academic institutions and Industry, Computers industrial Engineering, pp. 345-349, 1995.
3. Choi, B. K. and Park, S. C., "A pair-wise offset algorithm for 2D point-sequence curve," Computer-Aided Design, Vol. 31, No. 12, pp. 735-745, 1999.
4. Chiang, C. S. and Hoffman, C. M. and Lynch, R. E., "How to compute offsets without self-intersection," In SPIE Conf. Proc. Curves and Surfaces in Computer Vision and Graphics II, pp. 76-87, 1991.
5. Park, S. C. and Shin, H., "Polygonal chain Intersection," Computers & Graphics, Vol. 26, No. 2, pp. 341-350, 2002.
6. Park, S. C., "Polygonal extrusion," Visual Computer,

- Vol. 19, No. 1, pp. 38-49, 2003.
7. Chiu, W. K. and Tan, S. T., "Using dexels to make hollow models for rapid prototyping," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 539-547, 1998.
 8. Koc, B. and Lee, Y. S., "Non-uniform offsetting and hollowing objects by using biarcs fitting for rapid prototyping processes," *Computers in Industry*, Vol. 47, Issue 1, pp. 1-23, 2002.
 9. Li, C. L., Yu, K. M. and Lam, T. W., "Implementation and evaluation of thin-shell rapid prototype," *Computers in Industry*, Vol. 35, Issue 2, pp. 185-193, 1998.
 10. Lam, T. W., Yu, K. M., Cheung, K. M. and Li, C. L., "Octree reinforced thin-shell rapid prototyping," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, Issue 1, pp. 784-787, 1997.
 11. Alexander, P. and Dutta, D., "Layered manufacturing of surfaces with open contours using localized wall thickening," *Computer-Aided Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 175-189, 2000.
 12. Ganesan, M. and Fadel, G., "Hollowing rapid prototyping parts using offsetting techniques," in: *Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping*, pp. 10-12, 1994.
 13. Xiuzhi, Q. and Brent, S., "A 3D surface offset method for STL-format models," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 9, pp. 133-141, 2003.
 14. Maekawa, T., "An overview of offset curves and surfaces," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 165-173, 1999.
 15. Ahn, D. G. and Yang, D. Y., "Principle of Rapid Prototyping and Its Trends," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 10-22, 2005.
 16. Daniel, L. and Anderson, D. L., "Role of Rapid Prototyping in Preoperative Planning and Patient Specific Implant Generation," *Biomedical Engineering Conference*, Vol. 31, No. 2, pp. 558-559, 1996.