

적층 성형 과정에서 고립 체적의 효율적 계산

김진영*, 이건우*, 정용호**

Efficient Calculation of Trapped Volumes in Layered Manufacturing Process

Jin Young Kim*, Kunwoo Lee*, Yoong Ho Jung**

ABSTRACT

Prototypes of a design are always needed for the purpose of visualization and evaluation in the aspect of manufacturability, functionality, and aesthetic appearance. Since the prototyping process requires a significant amount of cost and time, various rapid prototyping processes are recently being introduced in the process. However, it is usually necessary for a part built up by a rapid prototyping system to be refined by a post-processing process, in which the stair steps on the surfaces, the support structures (if they exist), and the unprocessed material are eliminated. This post-processing is usually done manually and is a time-consuming task. Especially, eliminating the trapped volumes, the volume of the unprocessed material entrapped by the solidified portion, is sometimes impossible in some processes. This study provides a designer with a tool to detect the existence and to calculate the quantity of the trapped volumes at the given build-up direction, so that the proper build-up direction is chosen or the part is built by pieces to avoid the problems caused by the trapped volumes in advance. Since the proposed algorithm can efficiently calculate the amount of the trapped volumes at any build-up direction, it has the potential of such application as optimizing the build-up direction to minimize the trapped volumes.

Key Words : Trapped volume(고립체적), Rapid prototyping(신속시작), Voxelization(복셀화), Spilling process(배수과정), Optimal part orientation(최적적층방향)

1. 서론

일반적으로 제품을 개발할 때 대량 생산 과정에서 발견하게 되는 설계상의 오류를 조기에 발견하기 위해, 생산 단계 이전에 시작품(prototype)을 제작하게 된다. 그러

나 시작품을 제작하는 일은 많은 시간과 경비를 필요로 하므로 이를 효율적이고 경제적으로 제작하는 방법이 필요하다. 이러한 요구를 충족하기 위해 최근에 신속 시작 체계(rapid prototyping system)라는 기술이 시도되고 있다^(1,2). 이러한 방식으로 제작된 시작품은 중간 과정 없

* 서울대학교 기계설계학과
 ** 부산대학교 기계공학부 (기계기술연구소)

이 CAD 모델 데이터로부터 직접 제작되므로, 시작품의 제작 시간을 현저히 감소시킬 뿐만 아니라 수작업으로 제작할 때 작업자가 도면을 오독함으로 인한 문제가 없고 그 정밀도가 우수한 장점을 가진다. 뿐만 아니라 이 기술은 최근 소재의 개발에 힘입어 모델 데이터로부터 곧바로 정밀 주조나 금형을 생산하려는 방법에도 사용되고 있다⁽³⁾.

이러한 신속 시작 기술을 구현하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 대부분 제작하고자 하는 모델을 특정 방향에 대한 여러 개의 단면의 집합으로 표시하고 각 단면을 순서대로 층별 가공(layer-by-layer manufacturing)하여 원래의 형상을 제작하게 된다^(4,5). 그런데 층별 가공 방법으로 성형하면 성형 방향에 대해 경사진 면이 계단 모양으로 생성되므로, 이를 성형 후 매끈하게 해 주는 작업과 성형을 위해 사용한 지지 구조물이나 불필요하게 생성된 부분을 제거하기 위한 후처리 과정(postprocessing)이 필요하게 된다. 이는 대부분 수작업으로 수행되므로 많은 시간을 요하며, 특히 성형 과정에서 고형화된 부분에 의해 간혀진 영역인 '고립 체적(trapped volume)'은 성형 과정을 방해하기도 하며 어떤 경우에는 이를 제거하는 것이 불가능할 때도 있다. 따라서 물체의 성형 방향은 성형 시간과 성형된 물체의 정밀도, 그리고 후처리 과정이 필요한 정도 등에 많은 영향을 미친다. Asberg등⁽⁶⁾은 Stereolithography 기법을 사용할 때 물체가 성형될 수 있는 모든 가능한 방향을 제시하였으며, Frank 와 Padel⁽⁷⁾은 전문가 시스템의 방식으로 보다 좋은 성형 방향을 제시하였다. Po-Ting Lan등⁽⁸⁾은 표면의 정도, 성형 시간, 그리고 지지 구조물 등 세가지 사항들을 고려하고 기하학적인 관점에서 좋은 성형 방향을 결정하기 위한 조건 식을 제안하였지만, 고립 체적의 문제를 고려하지는 않았다. 따라서 설계자는 고립 체적의 문제를 최소화하거나 이를 피하기 위한 성형 방향을 결정하기 위해, 먼저 고립 체적이 발생하는지를 판단하고 그 양을 계산하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 고립 체적과 관련한 문제를 다루고, 이를 계산할 수 있는 효율적인 방안을 제시하였다.

2. 고립 체적 (Trapped Volumes)

고립 체적에 관한 문제를 설명하기 위해 먼저 Stereolithography (SL) 과정을 다루겠다. SL 과정은 광중합 경화 방식을 이용하여 Fig. 1과 같은 구성품들로 이루어지며, 그 작동 원리를 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼

저, 한 층이 경화된 후 승강기(elevator)가 한 층의 두께 만큼 내려가면 액체 수지가 플랫폼(platform) 위로 흘러 들어오게 되는데, 이때 수지의 점성 등의 영향으로 수지의 표면이 평탄해 질 때까지는 시간이 걸린다. 이러한 시간을 줄이기 위해 리코팅 과정(recoating process)을 거치게 되는데, 이 작업은 물체를 먼저 충분히 깊게 침수시켜 수지를 충분히 채운 후, 다시 물체를 수지면 위로 드러낸 다음 쓸개(wiper)를 사용하여 정해진 층의 두께를 넘는 수지를 제거하고 다음 단계의 경화를 위한 최종 위치로 이동한다. 그 다음, 물체의 CAD 데이터로부터 각 단면의 윤곽을 따라 레이저를 수지 면에 조사하면 기존의 성형된 윗면에 한 층이 더 성형된다. 이러한 방법으로 물체의 바닥 면으로부터 윗면 방향으로 한 층씩 쌓아 나가면 원하는 시작품이 생성된다.

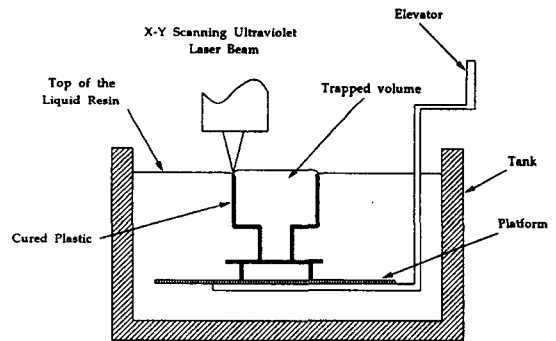


Fig. 1 Operation of stereolithography apparatus

그런데 실제 SL 과정에서 자주 발생하는 문제는 고립 체적과 관련한 경우인데, 이는 커피 컵과 같이 아주 간단한 형상을 제작하고자 할 때도 발생한다. SL 기법으로 커피 컵을 제작할 때, 컵을 엮어놓은 상태로 제작하면 고립 체적의 문제는 발생하지 않지만, 컵의 밑바닥을 지지하기 위한 구조물을 고려하여 제작하여야 하는데, 이것 또한 설계자에게는 귀찮고 시간이 많이 소요된다. 뿐만 아니라 제작 후 지지 구조물을 제거하여야 하는 번거로움과 함께 제거된 위치의 표면의 정도를 개선하기 위한 추가 작업이 수행되어야 한다. 이러한 문제를 깔끔히 제거할 수 있는 방법은 컵을 바로 세운 상태에서 바닥 면에서부터 SL 과정을 수행하는 것이다. 그런데 이러한 방향으로 성형하면, 성형 중에 컵의 내부에 수지가 고이게 되는데 이를 고립 체적이라고 한다.

고립 체적의 문제를 해결하기 위해 몇 가지 방법이 제시되고 있는데, 먼저 고립 체적이 발생하지 않도록 모델을 분리해서 성형한 다음 재결합하는 것인데, 이 방법은 성형 후 시작품의 치수의 정확도와 기계적 특성을 보장하기 어려운 단점이 있다. 또 다른 방법은 성형할 때 물체 상에 수지를 배출할 수 있는 구멍을 미리 뚫어 놓은 다음 성형 후에 이를 막는 방법이 있는데, 이 방법은 이론적으로는 고립 체적의 문제를 완전히 해결할 수 있는 것처럼 보이지만, 실제 성형의 경우 항상 잘 적용되지 않는 것으로 보고되고 있다⁹⁾. 따라서 이러한 고립 체적과 관련한 문제를 극복하기 위해서는 성형을 시작하기 전에, 먼저 성형하고자 하는 방향에서 고립 체적이 발생하는 지의 여부와 그 양을 계산할 수 있으면, 설계자는 다른 성형 방향을 찾거나 적절한 조치를 취할 수 있겠다. 다음 장에서는 주어진 성형 방향에서 고립 체적의 양을 계산하기 위해 본 연구에서 제안한 효율적인 방법을 설명하겠다.

3. 고립 체적의 계산

CAD시스템이 생성한 삼차원 형상 데이터가 주어졌을 때, 주어진 성형 방향에 대하여 고립 체적을 계산하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 단계들로 이루어진 알고리즘을 제안하였다.

- (i) 주어진 형상 데이터로부터 고립 가능 체적(tentative trapped volume, TTV)을 추출해 낸다.
- (ii) 각 TTV를 복셀(voxel)로 표현한다.
- (iii) 복셀과 함께 물체를 성형하고자 하는 위치까지 기여 불필요한 수지를 제거하는 과정을 모사한다.
- (iv) 고립 체적이 연결된 경우를 보정한다.
- (v) 남은 복셀의 개수를 구하여 고립 체적의 존재 여부와 그 양을 계산한다.

즉, 제안된 방법은 다음과 같은 생각을 구현한 것이다. 먼저 주어진 삼차원의 CAD 모델로부터 모든 오목한 영역(TTV)을 구하고, 두 번째 단계에서 그 영역을 복셀로 채운다. 이것은 물체의 모든 오목한 영역을 액체 수지로 충전하는 과정과 유사하다. 그 다음, 본 연구에서 제안되는 '배수 조건(spilling criterion)'을 모든 복셀에 적용하여 주어진 성형 방향에서 고립 체적의 수면보다 위쪽에 있는 복셀들은 모두 제거하면 나머지 복셀들은 고립 체적을 나타내게 된다. 이 과정은 물리적으로 마치 고립 체적

에 고이게 되는 액체의 수면 보다 높은 곳에 있는 수지를 부어 내는 과정과 유사하다. 그런데 고립 체적이 U-튜브와 같이 서로 연결되어 수면이 둘 이상인 경우, 앞에서 언급한 '배수 조건'만으로 고립 체적을 형성하면 하나의 고립 체적에 대해 수면의 높이들이 서로 다른 고립 체적이 형성될 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 네 번째 단계에서 수면의 높이가 다른 경우를 보정하게 되는데, 이는 마치 곡관에 대기압이 작용하여 수면의 높이들이 같게 되는 현상과 유사하다. 이러한 과정을 모두 수행한 후, 남아 있는 복셀의 수를 구하면 원하는 고립 체적의 양을 구할 수 있다.

이상과 같이 제안된 본 연구의 방법을 사용하여 고립 체적을 계산할 때, 첫 두 단계만 수행해 두면, 성형 방향이 달라지는 경우에도 첫 두 단계를 다시 수행할 필요없이 세 번째 단계부터 다시 수행하면 된다. 이러한 특징은 고립 체적을 고려한 최적의 성형 방향을 찾는 문제와 같이 성형 방향이 달라질 때마다 매번 계산해야 하는 경우에 계산 시간을 줄일 수 있는 장점이다. 각 단계에 대한 상세한 설명은 다음의 소절에서 소개된다.

3.1 고립 가능 체적 (TTV)의 구성

앞에서 언급한 바와 같이 물체의 오목한 부분은 고립 체적이 될 가능성이 높기 때문에, 본 연구에서는 주어진 물체의 CAD 데이터로부터 모든 오목한 부분을 먼저 구한다. 이를 위해 주어진 물체의 모델을 포함하는 볼록 껍질(convex hull)을 구한 후, 그 볼록 껍질의 체적으로부터 원래의 물체를 불리안 차집합(boolean subtraction)한 체적을 구하여 '고립 가능 체적 (TTV)'이라고 정의한다. 이러한 TTV는 SL 과정을 위한 어떤 성형 방향에 대해서도 물체의 오목한 부분이 포함되기 때문에, 구하고자 하는 고립 체적 또한 이로부터 구할 수 있다. TTV 개념의 도입은 물체 상에 생길 수 있는 고립 체적이 어떠한 경우에도 TTV 보다 클 수 없다는 물리적 의미를 가질 뿐 아니라, 여러 개의 오목한 부분들을 가지는 모델에 대해서는 이를 자동으로 분할하여 고립 체적의 탐색을 효과적으로 수행할 수 있게 해준다. Fig. 2에 원래의 모델로부터 TTV를 구하는 과정을 보였으며, Fig. 3에는 볼록 껍질을 이용한 TTV가 자동으로 오목한 부분들을 분할해 주는 경우를 보여준다.

본 연구에서는 곡면으로 이루어진 물체에 대해서도 볼록 껍질을 구하기 위해, Appel의 알고리즘¹⁰⁾을 이용하였다. Appel의 방법은 주어진 물체를 적절히 나타내는 점

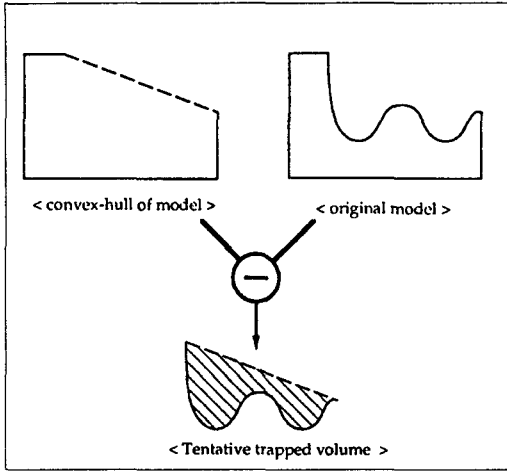


Fig. 2 TTV generation from the original solid model and its convex hull

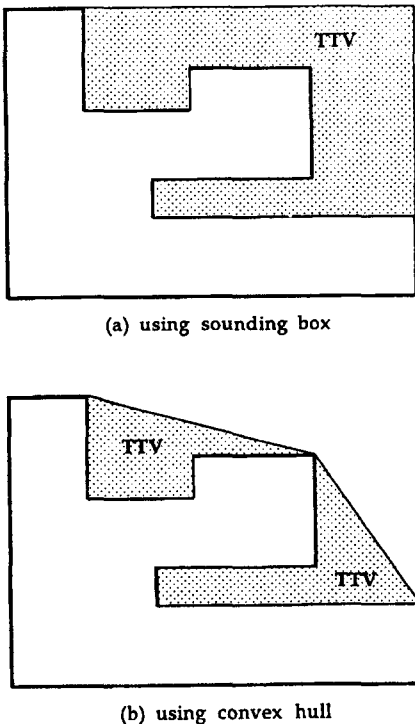


Fig. 3 Localization of TTV by grouping candidate regions

의 집합이 주어졌을 때, 이로부터 볼록 껍질을 자동으로 생성하는 알고리즘이다. 본 연구에서는 일반적인 SL 시스템의 표준 입력으로 사용되는 CAD모델의 .STL 파일로부터 물체를 잘 나타내는 적절한 점의 집합을 취하였다.

3.2 복셀을 이용한 TTV의 표시

주어진 모델로부터 TTV가 구해졌을 때, 본 연구에서 제안한 배수 과정을 모사하기 앞서 이를 유한개의 작은 복셀로 나타내어야 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 TTV는 다수가 생성될 수 있으므로, 복셀로 분할하는 과정은 각각의 TTV에 대해 수행된다. 복셀로 나타내는 과정은 다음과 같다. 즉, 먼저 구해진 TTV 모델을 둘러싸는 최소한의 상자(enclosing box)를 구하고 상자의 내부를 균일한 간격을 가지는 삼차원의 격자로 채운다. 이때 각 격자점은 각 복셀의 중심 위치를 나타내며, 복셀의 높이와 폭, 그리고 깊이는 모두 복셀의 간격과 같은 크기이므로 복셀을 구성하는 여덟 개의 꼭지점의 좌표값은 복셀의 크기와 중심점의 좌표값을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

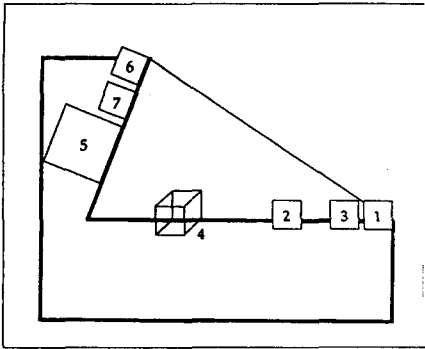
그 다음, 각 복셀을 TTV에 대한 상대적인 위치에 따라 '액체'(fluid), '벽면'(wall), '수면'(sr_on), '외부'(out)로 분류한다. 여기서 복셀의 종류는 다음의 소절에서 설명되는 배수 과정을 모사할 때 중요한 역할을 하게 된다. 각 복셀을 분류하는 방법은, 그 계산 시간을 줄이기 위하여 복셀의 여덟 개의 꼭지점들의 위치를 이용한다. 즉, 복셀의 여덟 개의 꼭지점들이 TTV와 볼록 껍질의 각각에 대해 갖는 상대적인 위치로써 판별하는데, 이러한 위치 관계는 다음과 같은 다섯 가지로 분류될 수 있다.

- in : 여덟 개의 꼭지점이 모두 물체의 내부에 있을 때
- in_on : 일부는 경계에 있고 나머지는 물체의 내부에 있을 때
- on : 일부는 물체의 내부에 있고 나머지는 물체의 외부에 있을 때
- out_on : 일부는 경계에 있고 나머지는 물체의 외부에 있을 때
- out : 여덟 개의 꼭지점이 모두 물체의 외부에 있을 때

TTV와 볼록 껍질에 대해 구한 한 쌍의 위치 정보가 구해졌을 때, Fig. 4에 나타난 판단 기준을 이용하여 각 복셀을 네 가지로 분류한다. 각 위치 정보는 다섯 가지의 경우가 있으므로 총 25가지의 경우가 있으나, 이중 열가지의 경우만이 고려의 대상이 된다. Fig. 5에 이차원 문제의 경우 복셀을 분류하는 예를 보였다.

3.3 배수 과정

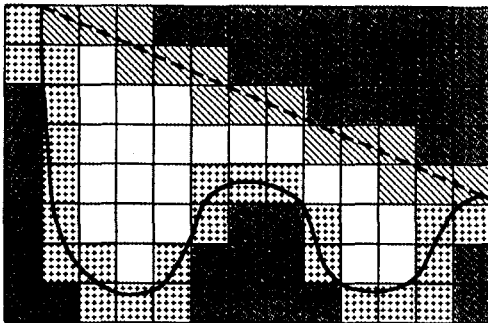
앞에서 언급한 과정까지 수행하면 물체의 모든 오목한 영역이 복셀로 채워지게 된다. 이제, 복셀로 채워진 고립



TTV	convex hull	classified type	example
in	-	fluid	
in_on	-	fluid	
on	on	sr_on	1
on	in	wall	2
on	in_on	wall	3
on	out_on	impossible	
on	out	impossible	
out_on	out_on	sr_on	4
out_on	in_on	wall	5
out_on	on	wall	6
out_on	in	wall	7
out_on	out	impossible	
out	-	out	

- : irrelevant to the relation w.r.t. convex hull

Fig. 4 Voxel classification strategy



- : fluid type voxel
- : wall type voxel
- : sr_on type voxel
- : out type voxel

Fig. 5 Two-dimensional result of voxel classification

가능 체적을 복셀과 함께 주어진 성형 방향까지 기울였을 때 고립 체적의 수면보다 위쪽에 있게 되는 수지들을 제거하는 배수 과정을 적용한다. 이는 마치 액체가 가득 채워진 용기를 기울여 액체를 부어 내는 과정과 유사하다. 본 소절에서는 이러한 배수 과정을 Fig. 6과 같이 이차원의 예제에 대해 먼저 설명하고 이를 삼차원에 대해 확장 하겠다.

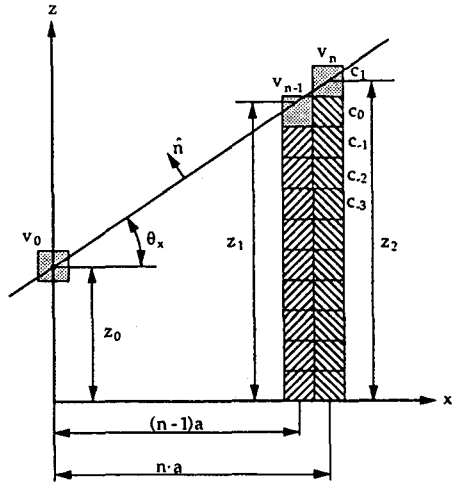


Fig. 6 Spilling criterion

배수 과정을 적용하기 위해서는 먼저 TTV를 나타내는 복셀들 중 '액체'로 분류된 각 복셀이 제거되어야 하는 복셀인지 아닌지를 판단하는 '배수조건'이 정의되어야 한다. Fig. 6은 물체의 적층 방향이 z 축 방향과 일치한 최초의 상태에서 TTV를 크기가 'a'인 복셀로 나타낸 것을 보이고 있으며, 벡터 \hat{n} 은 현재의 물체의 적층 방향을 나타내는데 이는 수지의 수면과 수직이다. 이때, 만약 복셀 V_0 가 제거되어야 할 복셀이라면 V_0 을 지나고 \hat{n} 에 수직인 직선과 접치는 모든 복셀들은 제거되어야 한다. 따라서, 어떤 기준 복셀 V_0 가 주어졌을 때, 제거되어야 할 복셀들을 찾아야 한다. 이를 위해 기준 복셀은 주어진 적층 방향에서 높이가 가장 낮은 '수면' 형태의 복셀이어야 한다.

예를 들어 $V_{n,i}$ 이 z 축으로부터 $a(n-1)$ 만큼 떨어져 있고 물체의 적층 방향을 따라 V_0 와 같은 높이에 있다면, V_0 와 $V_{n,i}$ 은 모두 제거되어야 할 복셀들이다.

따라서, V_0 와 $V_{n,i}$ 을 알고 있을 때, z 축으로부터 $a \cdot n$ 만큼 떨어져 있고 수면과 접치는 복셀인 V_n 을 찾는 과정을 보이겠다. 이를 위해 임의의 복셀 V_n 에 대한 배수 조건 값은 다음과 같은 식 (1)에 의해 정의된다.

$$C.V(V_n) = C_k \quad (1)$$

where

$$k = \text{int}\left(\frac{Z_2}{a}\right) - \text{int}\left(\frac{Z_1}{a}\right)$$

$$Z_1 = a \cdot (n-1) \cdot \tan \theta_x + Z_0$$

$$Z_2 = a \cdot n \cdot \tan \theta_x + Z_0$$

식 (1)에서 V_n 은 z 축 방향으로 V_{n-1} 과 같은 높이에 있는 C_0 로부터 위쪽으로 k 번째에 있는 복셀이다. 식 (1)에서 그 복셀이 이미 방문되어 C_k 값이 계산된 적이 있거나, 그 복셀의 종류가 '벽면' 또는 '외부'일 때까지, n값을 1부터 증가시키거나 0부터 감소시켜 나가면 x 축을 따라 제거 되어야 할 모든 복셀들을 찾을 수 있다. θ_y 도 θ_x 처럼 \hat{n} 벡터로부터 계산 될 수 있으므로, 마찬가지로 y 축을 따라 V_0 와 같은 높이의 복셀들을 찾을 수 있다. 여기서 V_0 를 이미 알고 있는 것으로 가정하였는데, '벽면' 형태의 복셀들 중 어느 복셀이 V_0 가 될 지 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 모든 '벽면' 형태의 복셀들을 V_0 로 사용하여 앞에서 언급한 과정을 반복하여 적용한다. 이처럼 배수 조건을 반복하여 적용하는 과정을 본 연구에서는 '배수 전파(drainage propagation)'라고 하였다.

삼차원 배수 전파의 경우, 배수 조건은 x 축, y 축, 그리고 z 축의 순서로 각 축을 따라 반복 적용한다.

Fig. 7에 이차원의 경우 배수 전파 과정을 보다 자세히 나타내었다. 즉, 전파 과정은 주어진 적층 방향에서 가장 높이가 낮은 '벽면' 형태의 복셀인 X-6 에서부터 시작하여 가정된 적층 선을 따라 진행한다. 이때 배수 전파는 +x 축, -x 축, +y 축, -y 축, +z 축, 그 다음 -z 축 방향의 순서대로 전파되는데, 이 경우 X-6 에서 +x 방향으로의 전파는 더 이상 불가능하므로 전파는 -x 방향으로 진행하여 S-3 까지 전파된다. S-3 에서 배수 전파는 +z 방향으로 방향을 전환한다. 왜냐하면, S-3 에서는 R-3 가 '벽면' 형태이므로 더 이상 -x 방향으로의 진행이 불가능하다. 따라서 전파 과정은 S-3 에서 +z 방향으로 전환하게 된다. 이차원의 경우이므로 y 방향으로의 진행은 필요하지 않다. 여기서 수면의 방향이 x 축에 더 가까우므로 전파 과정은 y 축 보다는 x 축 방향으로 먼저 진행된다. 그 다음, S-4 가 새로운 '기준 복셀'로 선정되면 S-4 의 중심을 지나는 새로운 수면이 정의되고 이를 따라 전파 과정이 +x 방향으로 먼저 진행하고, R-4 는 나중에 재 방문된다. 왜냐하면, 실제로 프로그램에서는 전파 과정이 재귀적인 함수의 호출로 수행되므로, S-4에서 -x

방향으로의 진행은 +x 방향으로의 전파 과정이 완료된 후에 수행되기 때문이다. S-4 에서 R-8 까지 화살표를 따라가며 전파하면 R-8 는 S-4 와 같은 경우에 해당되는데, 이때 앞에서 언급한 바와 같이 +x 방향으로 먼저 진행하기 때문에 전파는 T-9 에서 중단하게 된다. 한편 재귀적인 함수 호출의 특성에 의해, R-8 에서 전파 과정의 방향이 바뀌게 되므로 Q-7 과 Q-8 이 방문된다. 이러한 방법으로 전파는 A-19 까지 진행한 다음, B-17, D-16, F-15, C-12, M-11, R-9 와 같은 복셀에서 방향을 전환하여 모든 복셀을 방문하여 전파 과정을 종료하게 된다.

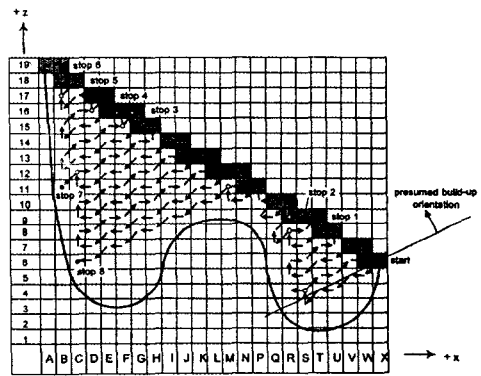


Fig. 7 Removal of all excess voxels given part orientation

3.4 이차 배수 과정

앞에서 설명한 알고리즘은 주어진 물체의 TTV 내에서 하나 이상의 고립 체적이 존재하는 경우에도 잘 적용되지만, Fig. 8 과 같이 TTV 가 U-튜브의 형상일 경우에는 만족스럽지 못한 결과가 생길 수 있다. Fig. 8에는 '수

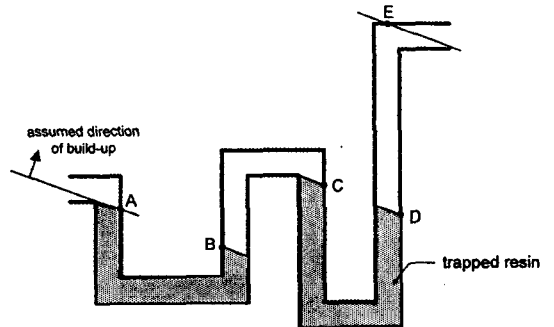


Fig. 8 U-shaped tube example for additional drainage propagation

면' 형태의 복셀들로 이루어진 고립체적의 수면이 다수 존재한다. 즉, 앞에서 설명한 배수 전파가 각 수면에 적용되어도 하나의 체적에 수면의 높이가 서로 다른, 물리적으로 허용되지 않는 결과가 발생한다. 이러한 결과는 앞에서 설명한 배수 전파 과정이 '벽면', 또는 '외부'로 분류된 복셀을 만났을 때 전파 과정을 중지하기 때문에 기인한다. 따라서 서로 연결된 액체의 경우 대기 압력의 효과를 모사하기 위해서는 최저 수면 이상의 모든 액체는 제거되어야 하는데, 이러한 과정은 다음에 설명되는 이차 배수 과정에 의해 수행된다.

이차 배수 과정은 앞에서 설명한 배수 과정이 수행된 후 남은 액체 수지의 수면상에 있는 '벽면' 형태의 복셀들 중의 하나에서부터 시작하는데, 이러한 복셀을 '시작' 복셀이라고 한다. 그 다음 튜브의 벽면을 따라가면서 '시작' 복셀과 이웃하는 '벽면' 형태의 복셀을 순차적으로 방문하여, 방문된 복셀이 현재의 적층 방향에서 '시작' 복셀의 수면 높이와 같은지를 검사한다. 만약 같으면, 그 복셀을 '기준' 복셀로 취하고 앞에서 설명한 배수 전파 과정을 다시 적용하여 불필요한 복셀들을 제거한다. 만약 같지 않으면 방문 과정을 계속하는데, 이러한 과정을 더 이상의 전파 과정이 불가능 할 때까지 반복한다.

Fig. 8 은 최초의 배수 전파와 이차 배수 과정이 적용된 결과를 나타내고 있다. 즉, Fig. 8 에서 초기의 배수 전파가 A 와 E 에서 중단된 후, A 에서부터 시작하여 벽면을 따라서 '벽면' 형태의 모든 복셀들을 검사한다. 현재의 적층 방향에서 만약 A 와 같은 높이의 '벽면' 형태의 복셀인 B 가 찾아 지면, B 에서부터 이차 배수 과정을 시작하여 C 까지 전파된다. C에서 다시 이차 배수를 위한 '벽면' 형태의 복셀들을 검사하여 D 가 이차 배수를 위한 '시작' 복셀로 선택되어 이차 배수 과정이 E 까지 전파되어 전체 과정을 종결하게 된다.

4. 적용 예

본 연구에서 개발한 알고리즘을 실제 문제에 적용한 결과를 보이기 위해 Fig. 9 (a)와 같은 소형 엔진의 실린더를 예제로 채택하였다. 먼저 Fig. 9 (a)와 같은 입체형상 모델이 주어졌을 때, Appel의 알고리즘을 사용하여 Fig. 9 (b)와 같은 블록 집질이 생성되었고, 이로부터 주어진 모델의 불리안 차 집합을 구하면 Fig. 9(c)와 같은 고립 가능 체적이 생성된다. 그 다음, 최초의 위치로부터 x축을 중심으로 -70° 기울였을 때 구해진 고립 체적을

Fig. 10에 보였다. Fig. 11(a)는 초기에 배수 전파가 적용되었지만, 엔진 실린더의 아래쪽 구면을 통해 오른쪽과 왼쪽 고립 체적이 서로 연결되어 있음에도 불구하고 높이가 서로 다른 수면이 존재하는 경우를 보이고 있고, Fig. 11 (b)는 이러한 경우에 이차 배수 전파가 적용된 후를 나타낸다.

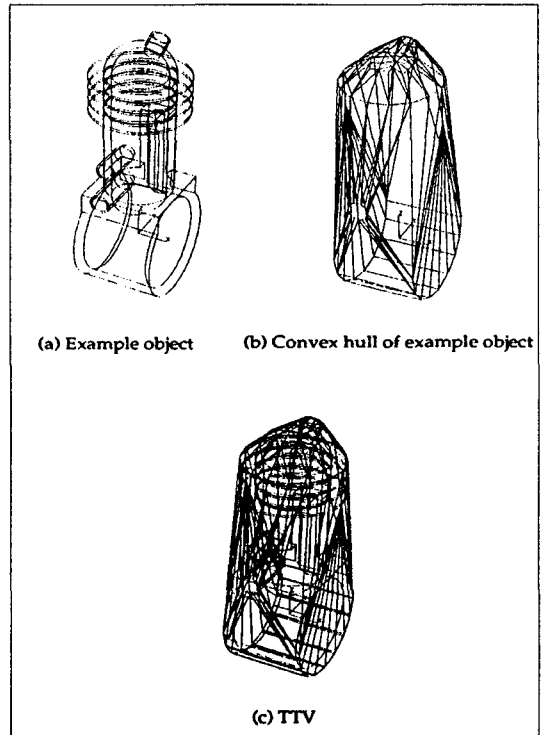


Fig. 9 Example object and TTV

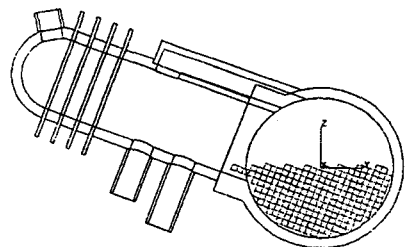


Fig. 10 Resulted trapped volume

5. 결론

본 연구에서는 시작품을 제작하려는 부품의 입체형상 모델이 주어졌을 때, 이로부터 직접 고립 체적을 구하는

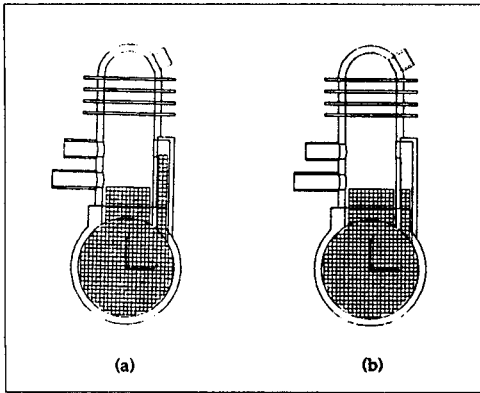


Fig. 11 Example of adjusting trapped volume

효율적인 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 고립 가능 체적을 복셀로 구현하기 때문에 물체의 기하학적 형상이 복잡한 경우에도 제한을 받지 않는다. 또한 제안된 방법은, 최초의 방향에 대해 고립 가능 체적을 복셀로 나타내 두면 이를 이용하여 임의의 방향이 주어졌을 때 복셀로 나타내는 과정을 다시 거치지 않고 고립 체적을 구할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 이러한 특징은 고립 체적으로 인한 문제를 해결하기 위해 최적의 적층 방향을 찾는 문제의 경우에 매우 효율적이다. 특히 최적 해를 구하기 위한 도구로서 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 방법을 사용할 경우, 목적 함수를 여러 개의 가능한 방향에 대해 매번 계산해야 하는데, 이때 본 연구에서 제안한 방법은 그러한 계산을 줄일 수 있는 장점을 가진다.

뿐만 아니라, 제안된 방법은 SL 과정에 국한되지 않고, 고립 체적을 제거하는 것이 근본적으로 어렵거나 불가능한 적층 제조 과정(Laminated Object Manufacturing, LOM^(11,12)) 등에서 적층 방향을 구하는 데 특히 유용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Proceedings of SIGGRAPH 93, Anaheim, California, pp. 377-378, 1-6 August, 1993.
2. S. Ashley, "Rapid Prototyping Systems," Mechanical Engineering, 113 (4), pp.34-43, April 1991.
3. S. W. Thomas, "Stereolithography Simplifies Tooling for Reinforced Rubber Parts," Mechanical Engineering, pp. 62-66, July 1992.

4. E. Sachs, M. Cima, P. Williams, D. Brancazio, J. Cornie, "Three Dimensional Printing:Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 114, pp. 481-488, November 1992.
5. D. Deitz, "Stereolithography Automates Prototyping," Mechanical Engineering, 112(2), pp. 34-39, 1990.
6. B. Asberg, G. Blanco, P. Bose, et al., "Feasibility of design in stereolithography," Proceedings, 13th Conference Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, Bombay, pp.15-17, December 1993.
7. D. Frank, and G. Fadel, "Expert system based selection of the preferred direction of building for rapid prototyping," Proceedings, the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH, June 1994.
8. L. Po-Ting, C. Shuo-Yan, C. Lin-Lin, and G. Douglas, "Determining fabrication orientations of rapid prototyping with stereolithography apparatus," Computer-Aided Design, 29(1), pp. 53-62, 1997.
9. Rapid Prototyping Report, "Stereolithography Tips," CAD/CAM Publishing, Inc., 6(2), pp. 6, 1996.
10. A. Appel, and P. M. Will, "Determining the Three-Dimensional convex Hull of a Polyhedron," IBM J. Res. Develop., pp. 590-601, November 1976.
11. M. Feygin, B. Hsieh, and M.A. Melkanoff, "Laminated Object Manufacturing LOM) : A new tool in the CIM world," Proceedings, Eight International PROLAMAT Conference, Man in CIM, Tokyo, Japan, pp.457-464, 24-26 June, 1992.
12. D. Klosterman, R. Chartoff, and G. Graves, "Laminated Object Manufacturing, a New Process for the direct Manufacture of Monolithic Ceramics and Continuous Fiber CMCs," Ceramic engineering and science proceedings, 18(4), pp. 113-120, 1997.