

단속형 가변 적층 쾌속 조형 공정(VLM-ST)을 위한 정밀도 향상에 관한 연구 및 실험적 검증

최홍석*, 안동규**, 이상호**, 양동열**

Accuracy Improvement in Transfer-Type Variable Lamination Manufacturing Process using Expandable Polystyrene Foam and Experimental Verification

Hong Seok Choi*, Dong Gyu Ahn**, Sang Ho Lee**, Dong Yol Yang**

ABSTRACT

The use of rapid prototyping (RP) has reduced time to market, cut total costs and improved product quality by giving design and manufacturing teams the opportunity to verify and fine tune designs before committing them to expensive tooling and fabrication. In order to improve their unique characteristics according to the working principles, Variable Lamination Manufacturing process (VLM-ST) and corresponding CAD/CAM software (VLM-Slicer) is developed. The objective of this study is to improve the accuracy of VLM-ST process, and it can be done by offset for cutting error correction, cutting path overrun for sharp edge and reference shape generation for off-line stacking. It has been shown that, through the verification experiments for given practical shapes, the proposed algorithms are effective for diverse categories of three-dimensional shapes.

Key Words : Rapid Prototyping (쾌속 조형 공정), Variable Lamination Manufacturing (가변 적층 쾌속 조형 공정), Accuracy Improvement (정밀도 향상), Offset (오프셋), Overrun (오버런), Reference shape (적층 기준형상)

1. 서론

제품의 시작과 생산에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위한 한 가지 대안으로 새로운 시작품 제작 공정인 쾌속조형공정(Rapid Prototyping : RP)이 도입되었다. 쾌속 조형 공정을 이용해서 시작품을 빠른 시간 내에 제작할 수 있으므로 디자인 검증과 조립성의 평가 등을 설계 초기단계에서 수행하여 오차를 수정할 수 있으므로 시행착오가 줄게 되고, 제품의 시작과 생산에 드는 시간과 비용을

절감할 수 있다. 1986 년에 미국에서 개발된 ‘광조형법(SLA : StereoLithography Appatatus)’ 공정을 필두로 하여 다양한 공정들이 개발되어 현재는 20 여가지 이상의 공정들이 상용화되었다. 국내에서도 조형 시간을 획기적으로 단축시키고, 장비 가격 및 유지비가 현저히 저렴하며, 후처리 공정이 거의 요구되지 않는 새로운 개념의 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정 (Variable Lamination Manufacturing using Expendable Polystyrene Foam : VLM-S)이 제안된 바 있다^[2].

☞ 2002 년 1 월 16 일 접수

* 국방과학연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

VLM-S 의 경우 재료를 롤에 감아 연속적으로 공급시키며 절단/적층하는 연속형(Progressive Type : VLM-SP)과 정해진 규격의 재료를 단속적으로 공급하며 자동 절단과 오프라인에서 반자동으로 적층하는 단속형(Transfer Type : VLM-ST) 두 가지로 개발되고 있다^[3]. 특히 단속형 공정은 단일 폐경로로 이루어지고, 반자동 적층을 위한 적층 기준형상이 추가된 단위 형상 층(Unit Shape Layer : USL)의 개념을 이용하여 한 층을 한 번에 절단하여 적층하므로 연속형 공정에 비해 조형속도가 현저히 향상되었다.

그리고 이와 함께 개발된 VLM-S 용 소프트웨어는 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 입력 파일 형식은 현재 패속 조형 산업의 표준으로 자리 잡은 STL 파일이다. 둘째, PC 기반의 Windows 상에서 작동하도록 C++과 Visual C++ 6.0 컴파일러를 사용한다. 셋째, 각각의 모듈의 가시화는 OpenGL 그래픽 라이브러리를 사용하였다^[4]. VLM-S 용 CAD/CAM 소프트웨어는 연속형 공정과 단속형 공정의 공통점과 차이점을 감안하여 두 가지 버전으로 개발되고 있다. 연속형 공정을 위해서는 VLM-Slicer Version P 1.0 이 개발되었고, 단속형 공정을 위해서는 VLM-Slicer Version T 1.0 이 개발되었다.

패속 조형 파트를 단순한 형상 확인용을 벗어나서 기능성 파트로 사용하기에는 정밀도, 강도 등이 충분하지 않으므로 이에 관련하여 많은 연구가 진행되었다. 이 중 강도에 관한 연구는 공정에 사용되는 재료에 의해 좌우되므로 공정의 개선에 관한 연구는 대부분이 정밀도 향상에 관한 것이다. VLM-ST 공정에서도 정밀도 향상을 위해 개선되어야 할 부분이 존재한다.

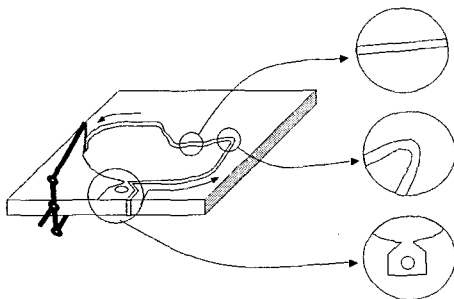


Fig. 1 Accuracy problems in VLM-ST

Fig. 1 은 VLM-ST 공정의 열선 절단 공정과 그

특성에 따른 정밀도 향상 문제를 나타낸 것이다. 열선을 이용하여 폼 재료를 절단하므로 맨 위의 그림과 같이 절단 중에 열에 의해 녹아서 원하는 치수를 얻을 수 없게 되며, 가운데 그림과 같이 뾰족한 모서리 부분에서는 열이 집중되어 모서리 끝부분의 뾰족한 형상을 정확하게 절단할 수 없다. 그리고 오프라인 적층을 하기 때문에 맨 아래 그림과 같은 적층 기준 형상을 만들고자 하는 형상에 부가해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 오프셋, 절단 경로의 오버런, 적층 기준형상의 생성 알고리즘을 각각 제안하고 구현한 다음, 공정 개발과정에서 행해진 실험을 통해 결정된 변수값들을 적용하여 실제 공정에서의 적용 하여 정밀도가 향상되는 것을 확인할 것이다.

2. 절단 경로의 오프셋

2.1 오프셋 알고리즘

열선에 의하여 형상을 생성할 때 재료와 열선과의 접촉에 의해서 절단되는 것이 아니라 열선에서 발생하는 열에 의해서 재료가 녹으면서 절단이 발생하기 때문에 요구되는 치수를 얻기 위해서 고려해야 할 것은 열선 자체의 직경과 발생한 열에 의해서 녹는 부분의 넓이 등이 있다. 따라서 절단 경로를 생성할 때 이들을 고려해서 생성해야 원하는 치수를 얻을 수 있다.

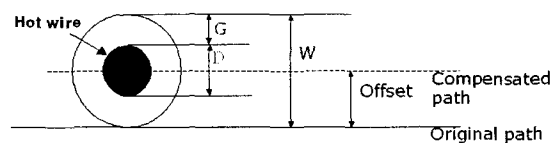


Fig. 2 Cutting groove width

Fig. 2 는 가공확대 영역(Cutting Groove Width : CGW)을 나타낸 것으로 가공 확대 영역의 1/2 만 큼이 오프셋 값이 된다. 여기서 열선의 직경 D 는 결정된 값이지만, 절단시에 발생하는 간극 G 는 여러 가지 요소들에 의해 영향을 받는 값으로 그 정확한 값을 구할 수 는 없다. 따라서 간극이 포함된 가공확대 영역의 폭은 공정 개발과정에서의 실험결과를 바탕으로 구하여야 한다. 오프셋 경로의 생성에는 다각형의 Voronoi 선도를 사용하였다. Voronoi 선도는 평면을 분할하는 방법으로 다각형

에 대해서는 이웃한 변들이 이루는 각의 이동분선을 이용하면 쉽게 구할 수 있다^[5].

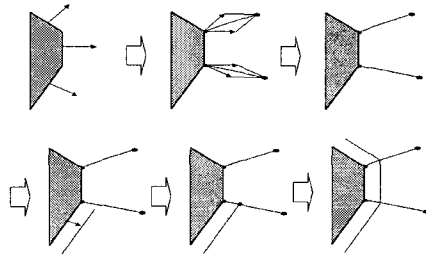


Fig. 3 Procedure of edge offset

Fig. 3 은 오프셋 과정을 나타낸 것이다. 각의 이동분선을 구하기 위하여 먼저, 절단 경로상의 각 직선(edge)이 가지고 있는 공간상의 법선벡터를 2 차원 평면상으로 투영한 뒤, 벡터들이 길이가 서로 같아지도록 단위 벡터로 만든다. 서로 인접한 단위 벡터들의 합 방향이 각의 이동분선이 된다. 모든 각에 대해서 이동분선을 구한 후 직선을 하나씩 오프셋 하여 각의 이동분선과의 교점을 구하게 되면 절단경로를 오프셋 할 수 있다. 이 때 오프셋 값은 입력 받을 수 있도록 하였다.

2.2 오프셋 값의 결정

오프셋 알고리즘을 실제 공정에 적용하기 위해서는 앞에서 언급한 가공확대 영역의 반이 되는 오프셋 값을 알면 된다. 오프셋 값은 안동규 등에 의해 제안된^[6] 실험 결과를 이용하였다. 이 실험에서는 절단 오프셋(Cutting offset: ζ)을 식 (1)과 같이 정의하고 Fig. 4 와 같이 단위 길이 당 열 입력에 대해서 속도별로 나타내었다.

$$\zeta = (W - W_c) / D - 1.0 \tag{1}$$

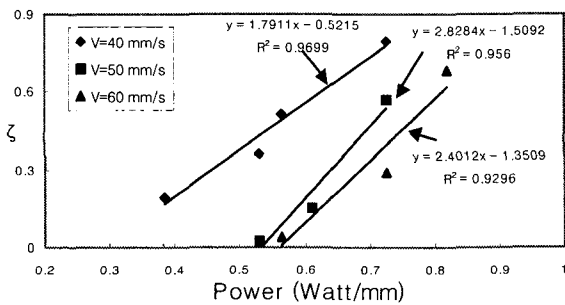


Fig. 4 Cutting offset

여기서 W 는 원래 의도한 폭, W_c 는 실제 절단 후의 폭, 그리고 D 는 열선의 직경이다. 위 식에서 $W - W_c$ 는 본 연구에서 정의한 가공 확대 영역과 같은 것이며 공정에 적용하기 위한 오프셋 값 ε 은 그 반인 $(W - W_c) / 2$ 가 되고 절단 오프셋과 열선의 직경으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\varepsilon = (W - W_c) / 2 = D(\zeta + 1) / 2 \tag{2}$$

따라서 가공 조건이 결정되어 열선의 단위 길이 당 열 입력을 알게 되면 절단 오프셋으로부터 실제 공정에 적용될 오프셋 값을 구할 수 있다.

2.3 오프셋 알고리즘 적용 예

본 절에서는 기어 형상에 대해서 오프셋 알고리즘을 적용하였다. 가공 조건은 Table 1 과 같이 두 가지로 결정하였다.

Table 1 Cutting conditions

	Current (A)	Voltage (V)	Velocity (mm/s)	Offset (mm)
Case 1	3.4	2.6	40	0.2
Case 2	3.7	2.8	40	0.22

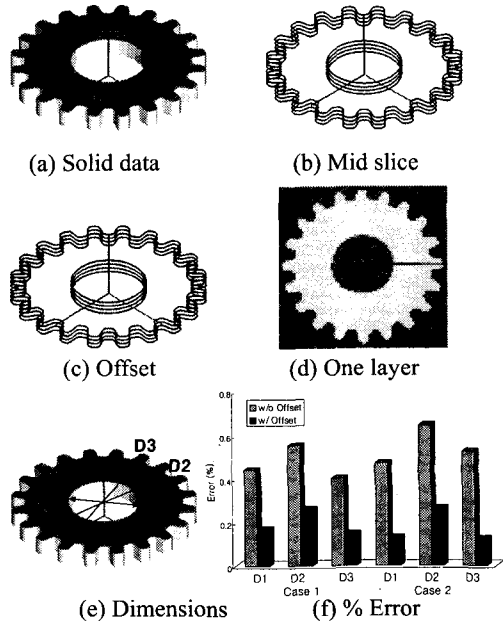


Fig. 5 Offset of gear

Fig. 5 는 기어 형상에 오프셋 알고리즘을 적용한 것이다. 기어 형상의 외부는 그림과 같이 부드러운 곡면으로 이루어져 있고 내부에는 빈 공간이 있어서 오프셋의 방향을 테스트 하기에 좋은 예제이다. 오프셋 을 적용한 결과로부터 외부의 복잡한 곡선에 대해서 바깥쪽으로 오프셋이 잘 적용되었으며, 내부의 형상에 대해서는 안쪽으로 오프셋이 적용되어 중간 단면 정보의 법선 벡터 방향으로 올바르게 오프셋이 적용되고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(e)에 나타난 부분의 치수를 측정하여 알고리즘 적용 전후의 오차를 비교한 Fig. 5(f)를 살펴보면 프로그램 상에서 확인한 것과 같이 올바른 방향으로 오프셋이 적용되어 오프셋 적용전의 반 이하의 오차를 가지도록 정밀도가 향상되는 것을 알 수 있다. 기어 형상은 클로버 펀치 형상에 비해 전체적인 치수가 크기 때문에 오프셋 적용 전후의 오차가 전체적으로 더 작은 값을 가진다. 본 절에서는 다양한 형상의 예제들에 대해서 오프셋 알고리즘을 적용해 보았다. 각 형상의 특징과 그에 따른 오프셋의 특징을 알아보고, 실제 공정에서의 적용을 통해서 오프셋 알고리즘이 적용되어 정밀도가 향상됨을 확인하였다.

3. 절단 경로의 오버런

3.1 오버런 알고리즘

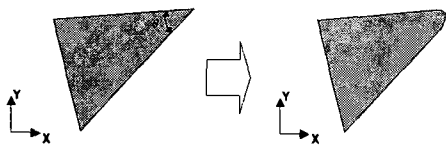


Fig. 6 Rounding of sharp edge

Fig. 6 과 같이 끝이 뾰족한 형상에서는 θ 가 감소함에 따라 열선의 이동 속도에 따른 열 집중이 과도하게 되어 형상의 끝부분이 열에 의해 녹아서 원하는 형상을 얻을 수 없고, 국부적인 발포로 인해서 재료가 부분적으로 두꺼워지게 되어 적층 과정에서도 좋지 않은 영향을 미친다. 따라서 열선을 형상의 바깥쪽으로 더 지나가도록 오버런(Overrun) 하여 열의 집중을 막아야 한다.

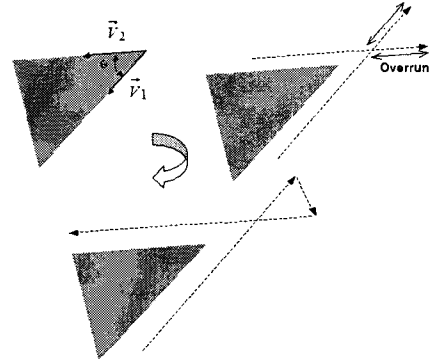


Fig. 7 Procedure of cutting path overrun

먼저 형상의 각 변이 이루는 각 θ 를 벡터의 외적을 이용해서 구한 다음, θ 가 어떤 임계각(θ_{CR}) 이하인지를 판별하여 임계각 이상($\theta > \theta_{CR}$)이면 절단경로를 수정하지 않고, 임계각 이하($\theta < \theta_{CR}$)이면 Fig. 7 과 같이 입력받은 오버런 값 만큼 절단경로를 바깥쪽으로 돌아가도록 해서 단시간에 국부적으로 열이 집중되는 것을 막는다. 이 때 임계각은 실험적 방법을 통해서 구할 수 있으며, 소프트웨어 상에서는 입력 받을 수 있도록 하였다.

3.2 임계각, 오버런 값의 결정

오버런 알고리즘을 공정에 적용하기 위해서는 임계각과 오버런 값이 결정되어야 한다. 임계각과 오버런 값은 공정 개발 과정에서 선행된 실험의 결과를 이용하여 결정하였다. 이 실험에서는 여러 가공 조건에 대해 오버런 값이 변할 때 뾰족한 모서리 끝의 녹아 없어진 부분의 넓이를 삼각형으로 근사하여 모서리 부분의 각도에 따라 나타내었다.

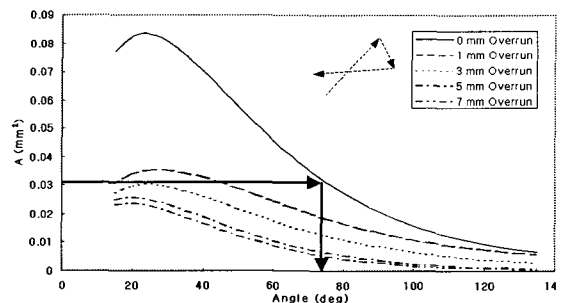


Fig. 8 Lost area for variable angle and overrun in case of 3.5A, 2.7V, 40mm/s

Fig. 8 을 관찰해 보면 오버런 값이 5 mm 이상 이 되면 그 값이 증가하여도 넓이는 크게 감소하 지 않는다. 따라서 오버런 값은 5 mm 이하의 값 으로 정하는 것이 바람직하다. 오버런 값이 결정 되면 각 오버런 값에 대해서 손상된 영역의 넓이 가 최대값을 가지는 것을 이용해서 임계각을 구할 수 있다. 경로 수정을 하지 않았을 때의 그래프에서 결정된 오버런 값에서의 손상된 영역의 넓이의 최대값과 같은 값을 가지는 각을 찾아서 그 각도 이하에서 경로수정을 하게 되면 결정된 오버런 값 에서의 최대 오차 이하의 오차를 보장할 수 있다. 예를 들어 Fig. 8 의 조건에서 오버런 값을 3 mm 로 결정하였다면 경로 수정을 하지 않은 그래프가 3 mm 오버런에서의 최대값과 같은 값을 가지는 75° 가 임계각이 된다.

3.3 오버런 알고리즘 적용 예

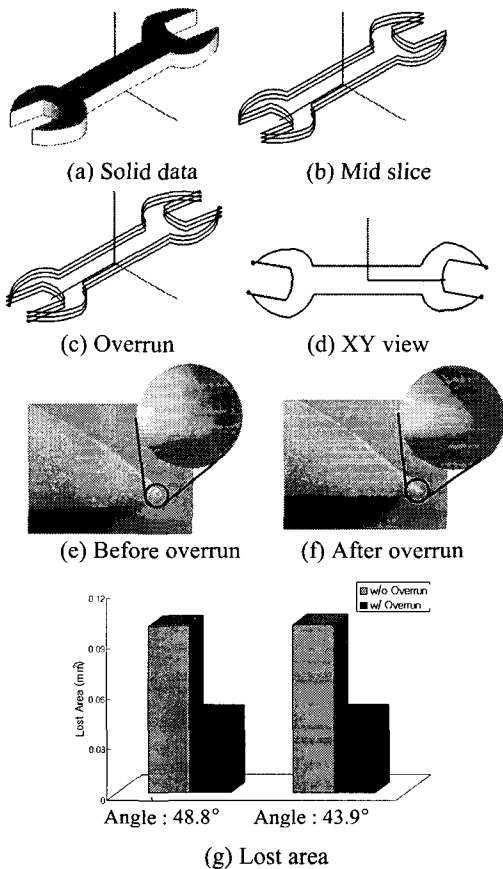


Fig. 9 Overrun of spanner

Fig. 9 는 스패너에 대해서 절단 경로 수정 알고리즘을 적용한 것이다. 3.5 A, 2.7 V, 40 mm/s 의 가공 조건을 적용하였고, 오버런 값을 3 mm 로 하면 Fig. 8 의 그래프에서 75° 의 임계각을 찾을 수 있다. 경로의 오버런을 실행한 결과는 Fig. 9(c)와 같다. 스패너의 경우에는 4 개의 뾰족한 모서리 중에서 2 개씩 서로 같은 형상을 지니는데, 그 끝부분의 각도는 각각 48.8° 와 43.9° 이므로 이 부분에서 경로 수정이 일어나게 된다. 실제 절단 후 서로 비교해 보면 Fig. 9(e), (f)와 같이 육안으로 확인해 보아도 경로 수정 후의 형상이 더 뾰족한 것을 관찰할 수 있으며 100 배 확대한 사진을 보면 확실히 관찰할 수 있다. Fig. 9(g)에는 관찰된 차이를 수치화 하여 나타내었다. 손실된 넓이가 반 이하로 줄어들어 정밀도가 향상된 것을 알 수 있다. 따라서 오버런을 하면 CAD 형상에 더 근접한 형상을 얻게 되어 정밀도가 향상되었음을 알 수 있었고, 이를 수치적으로도 서로 비교하여 정밀도 향상을 확인하였다.

4. 적층 기준형상 생성

4.1 적층 기준형상 생성 알고리즘

VLM-ST 공정에서는 장치에서 절단 만을 수행하고 적층은 오프라인에서 하도록 되어있다. 각 층별로 항상 일정한 곳에 구멍이 있다면 그것을 기준으로 이용할 수 있고 이를 파일럿 홀이라고 한다. 이들을 파일럿 핀에 꽂아주면 만들고자 하는 대상의 형상을 잘 모르더라도 쉽게 적층해 나갈 수 있다.

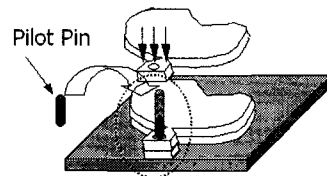


Fig. 10 Pilot pin and Stacking process

Fig. 10 은 파일럿 핀을 포함한 적층 보조 장치이다. 파일럿 핀을 활용하여 적층을 하기 위해서는 파일럿 핀과 결합될 홀이 위치하게 될 부분이 부가적으로 필요하게 되고, 이 부분은 적층 기준형상(Reference shape : RS)이라 정의한다. 따라서 VLM-Slicer 에서는 원래의 형상에 이 부분을 추가

해 주어야 한다.

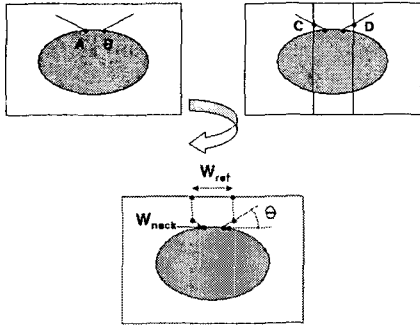


Fig. 11 Procedure of Reference shape generation

적층 기준형상을 생성할 때는 원래 형상과 연결되는 목 부분이 중요하다. 절단, 적층 시에는 자중에 의해 부러지지 않아야 하고, 적층 후 제거 시에는 약한 힘을 가해서 쉽게 제거 가능해야 하기 때문이다. 따라서 Fig. 11 에서와 같이 목 부분부터 형상을 만들어 간다. 적층 기준형상의 폭 W_{ref} 는 고정된 값이며, 목의 폭 W_{neck} , 도입각 θ 는 입력받을 수 있도록 하였다. 앞의 세 변수를 이용해서 Fig. 11 과 같이 6 개의 점을 추가하면 적층 기준형상을 생성할 수 있다.

4.2 목의 폭과 도입각 결정

제안된 알고리즘을 적용하기 위해서는 목의 폭 W_{neck} 과 도입각 θ 의 값 또는 범위를 결정하여야 한다. 본 절에서는 해석적인 방법을 사용하여 변수의 범위를 결정하였다. 해석은 IDEAS Master Series 8 을 이용하였고, Fig. 12 와 같이 현재 장치의 최대 절단 영역인 한 변이 180 mm 인 정사각형에 대해 다양한 목의 폭과 도입각을 가지는 적층 기준형상을 부가하여 해석하였다. 판의 두께는 현재 공정에서 사용되는 재료와 같은 3.9 mm 로 하였고, 유한요소 격자는 육면체 요소를 사용하였다.

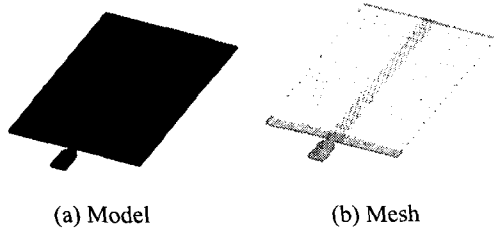
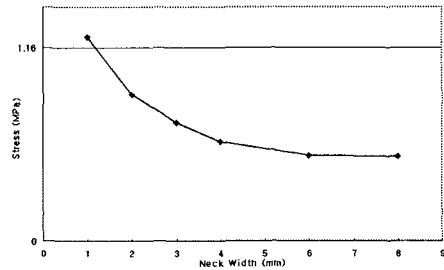


Fig. 12 FE model for analysis

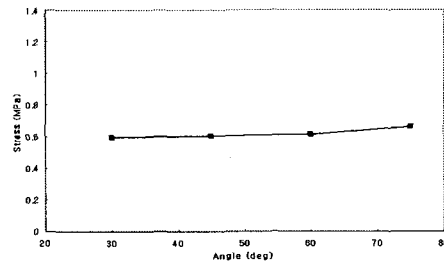
적층 기준형상이 만족하여야 할 조건에 맞게 두 가지의 경계 조건을 적용하였다. 첫째는 도입각 부분을 제외한 적층 기준형상의 측면을 구속하고 중력가속도를 적용하여 자중에 의하여 목 부분이 부러지는가를 판단하기 위한 것이며, 둘째는 정사각형의 윗면과 아래면을 구속하고 적층 기준형상의 끝부분에 힘을 가하여 적층 후 힘을 가하여 부러뜨릴 수 있는지를 판단하기 위한 것이다. 적층 후 기준형상을 제거하는 방법을 두 가지로 모사할 수 있는데, 수직 방향과 수평 방향으로 힘을 가해서 부러뜨리는 것이다. 가해질 힘은 사람이 손가락 하나로 밀거나 끌 수 있는 최대 힘^[7]인 8 lb(=35.484 N)를 적용하였다. 해석에 사용된 발포 폴리스티렌 폼의 물성치는 Table. 2 와 같다^[8]. VLM-ST 공정에 사용되고 있는 발포 폴리스티렌 폼 판재는 롤링을 통해서 제작되었기 때문에 롤링 방향의 물성과 롤링에 수직인 방향의 물성이 서로 다르다. 실제 공정에서는 X 축 방향이 롤링 방향이므로 방향성에 맞게 물성치를 적용하였다.

Table 2 Material properties

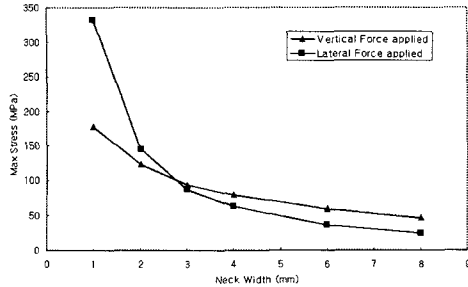
Density (g/mm ³)	Poisson' s Ratio	Modulus of Elasticity (MPa)		Yield Strength (MPa)	
		RD	TD	RD	TD
6.26*10 ⁻⁵	0.43	40.41	18.57	1.727	1.163



(a) Maximum stress with variable neck width



(b) Maximum stress with variable angles



(c) Maximum stress with variable neck width when force applied

Fig. 13 Result of analysis

Fig. 13 은 해석결과를 나타낸 것이다. 모든 경우 목 부분에서 최대하중이 발생하였고, 이 최대하중을 정리하였다. Fig. 13(a)는 자중을 가한 경우 목의 폭만 변화하였을 때의 결과이다. 목의 폭이 2 mm 이상이면 항복이 일어나지 않는다. Fig. 13(b)는 도입각을 변화시킨 결과인데 최대 하중은 크게 변하지 않는다. 따라서 도입각은 목부분의 최대하중에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였다. Fig. 13(c)는 두 번째 경계조건에 대해 목의 폭만을 변화하며 해석한 결과이다. 모든 경우에 대해서 항복이 발생한다. 앞의 세 가지 결과를 종합해 보면 도입각과는 무관하게 목의 폭을 2 mm 이상으로 유지하면 적층시에 부러지지 않고, 적층 후에 쉽게 제거할 수 있는 적층 기준형상을 생성할 수 있으며, 도입각은 원래 형상과 적층 기준형상의 간섭을 피하기 위해 변화시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

4.3 적층 기준형상 생성 알고리즘 적용 예

Fig. 14 는 두상에 적층 기준형상을 적용하여 적층한 것이다. 목의 폭은 2.5 mm 로 하고 도입각은 45° 를 적용하였다. 두상은 전체 형상의 높이도 높고(49 층), 전반적으로 복잡한 자유 곡면들이 조합된 형태이기 때문에 적층 기준형상을 이용하여 측면이 연속적인 원하는 형상을 얻을 수 있었다. 본 절에서는 해석 결과에서 적절할 것으로 판단되는 범위 내의 목의 폭을 적용하고, 형상과의 간섭을 피하기 위해 도입각을 변경하면서 적용하였다. 그 결과 적층 과정에서는 부러지지 않고 적층 기준의 역할을 하고, 적층 후에는 쉽게 제거할 수 있는 적층 기준 형상이 생성됨을 확인하였다.

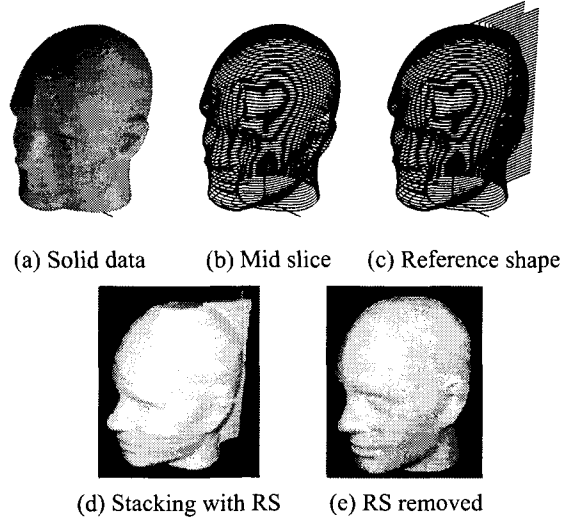


Fig. 14 Reference shape generation of head

5. 정밀도 향상 알고리즘 적용 예

본 장에서는 냉각핀이 달린 원통형 튜브 형상의 예제에 대해 제안된 알고리즘을 순서대로 적용하여 절단 경로를 생성하여 실제 공정에 적용하였다.

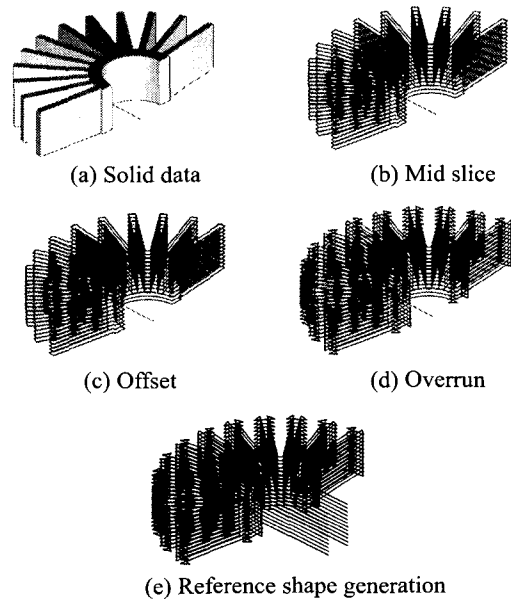


Fig. 15 Algorithms applied to one example

가공 조건은 3.8 A, 2.9 V, 40 mm/s 의 전류, 전압, 속도이고, 오프셋 값은 0.23 mm, 오버런을 5 mm 로 하면 임계각은 100° 로 결정되고, 적층 기준형상의 목의 폭은 2.5 mm 로 하였다. Fig. 15 는 위의 변수들이 적용되는 과정을 보여주고 있다.

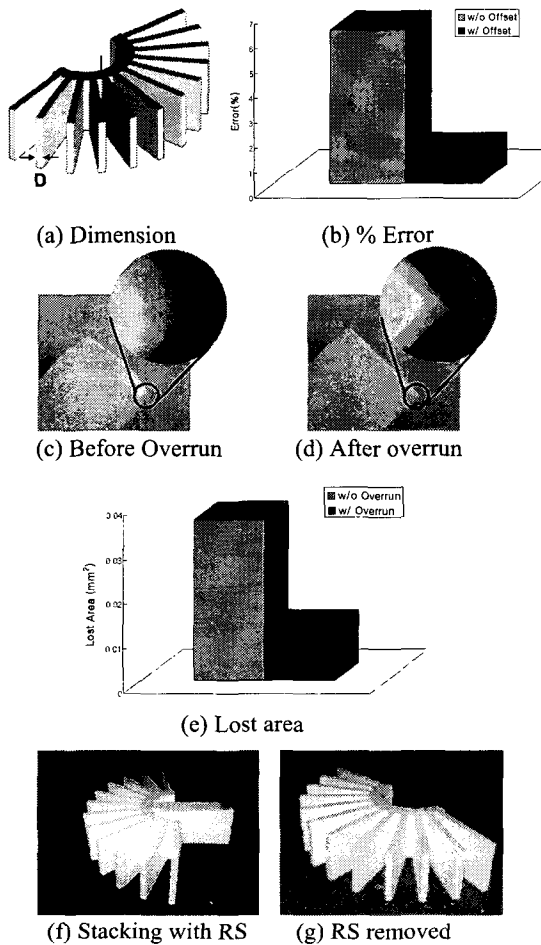


Fig. 16 Algorithms applied to cube with cooling pins

Fig. 16 은 각 알고리즘에 대해 적용 전후를 비교하여 정밀도가 향상됨을 보여주는 그림이다. 오프셋 값이 적용되고, 오버런 알고리즘을 통해 뾰족한 부분의 형상도 구현되었으며 적층 기준형상을 이용하여 쉽게 적용할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 최근 개발된 패속조형 공정인 VLM-ST 공정의 정밀도를 향상하기 위한 방법으로 절단도중 녹는 부분을 보정하기 위한 절단 경로의 오프셋과 뾰족한 모서리 부분의 형상을 구현하기 위한 절단경로의 오버런, 오프라인 적층을 돕기 위한 적층 기준형상 생성을 위한 알고리즘을 제시하고 구현하여 공정에 적용하였다. 그 결과 각 알고리즘에서 의도한 대로 정밀도가 향상되는 것을 확인할 수 있었고, 제안된 알고리즘을 순차적으로 예제에 적용해 봄으로써 알고리즘의 효용성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가중점사업인 주문적 용형 패속 제품 개발 시스템 사업단의 연구 결과의 일부입니다.

참고문헌

1. P. F. Jacobs, "Stercolithography and other RP&M Technologies," Society of Manufacturing Engineers, 1996.
2. 안동규, 이상호, 양동열 외 3 인 "발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 패속 조형 공정 설계 및 개발," 한국정밀공학회, 제 18 권, 제 8 호, pp. 54-62, 2001.
3. "선형 열절단 시스템을 이용한 단속적 재료 공급식 가변 적층 패속 조형 공정 및 장치," 특허 2001-0040212, 2001.
4. 이상호, 김태화, 안동규, 양동열, 채희창, "가변 적층 패속 조형 공정 개발을 위한 단위형상조각 자동 생성 소프트웨어 개발 및 적용 예," 한국정밀공학회, 제 18 권, 제 8 호, pp. 64-70, 2001.
5. M. Held, "Voronoi diagrams and offset curves of curvilinear polygons," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 4, pp. 287-300, 1998.
6. 안동규, 이상호, 양동열, 신보성, 이용일, "가변 적층 패속 조형 공정 개발을 위한 발포 폴리스티렌폼의 선형 열선 절단시스템 절단 특성 및 접착강도 특성에 대한 연구," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 185-194, 2000.
7. W.E. Woodson, B. Tillman, P. Tillman, Human

- factors design handbook, McGraw-Hill, pp. 772-788, 1992.
8. D.G. Ahn, S.H. Lee, D.Y. Yang, "Mechanical properties and anisotropy of expanded polystyrene foam sheet for the VLM-S rapid prototyping process," *Journal of Material Science Letters*, Accepted to be published, 2001.