

VLM-S 용 선형열선절단기의 회전각 계산과 적용예

이상호*(KAIST 대학원), 안동규(KAIST 대학원), 최홍석(KAIST 대학원), 양동열(KAIST)

Calculation of rotational angle of the Linear Hotwire Cutting System for VLM-S

S. H. Lee(Graduate School, KAIST), D. G. Ahn(Graduate School, KAIST),

H. S. Choi(Graduate School, KAIST), D. Y. Yang(KAIST)

ABSTRACT

In all Rapid Prototyping (RP) processes, a CAD solid model is sliced into thin layers of uniform, but not necessarily constant, thickness in the building direction. Each cross-sectional layer is successively deposited and, at the same time, bonded onto the previous layer; the stacked layers form a physical part of the model. The objective of this study is to develop a method for calculating the rotational angle (θ_x, θ_y) of the linear hotwire cutting system in the three-dimensional space for the Variable Lamination Manufacturing process using expandable polystyrene foam sheet (VLM-S). In order to examine the applicability of the developed method to VLM-S, various three-dimensional shapes, such as a screw, an extruded cross, and a figure of Sonokong, were made using the data obtained from the method.

Key Words : Rapid Prototyping(패속조형), Variable Lamination Manufacturing(가변 적층 패속조형), linear hotwire cutting system(선형열선절단기), rotational angle(회전각)

1. 서론

패속 조형법의 기본 개념은 다음과 같다. 먼저, 제작하려는 제품을 3 차원 CAD 를 이용하여 모델링 한다. 설계된 3 차원 CAD 데이터를 각 층마다 절단하여 2 차원 슬라이스(slice) 데이터를 얻는다. 이 슬라이스 데이터를 사용하여 여러 가지 방법으로 각 층마다 얇은 층을 만들고 이것을 순차적으로 적층해 감으로써 CAD 데이터와 같은 층상의 입체형상을 얻을 수 있다. 바꾸어 말하면 등고선상을 따라 자른 두꺼운 종이를 겹쳐 입체 지도를 만드는 것과 같은 방법이다. 즉, 3 차원의 형상을 2 차원의 얇은 판의 집합으로 변환하여 순차적으로 한 층씩 적층해 나가는 공정이 패속 조형법인 것이다. 이와 같은 패속 조형법의 특징으로 복잡한 형상의 제품도 쉽게 제작할 수 있다.

이와 같은 패속 조형법은 초기에는 광 빔(beam)에 의해 형상이 만들어진다고 하여 광조형법이라고 불렸다. 그 후 시작품(Prototype)을 신속(Rapid)하게 제작할 수 있다는 사실로부터 'Rapid Prototyping' 또

는 '패속 조형법' 이라고 불리게 되었다. 더욱이 이 명칭에서는 절삭 가공이나 방전 가공도 포함된다. 이는 점과, 용도가 시작품 제작에만 한정되지 않는 것도 있어서 보다 일반적인 명칭으로 적층 조형법(Layered Manufacturing), 자유 형상 조형법(Solid Freeform Fabrication) 이라고 하는 명칭이 사용되게 되었다^[1,2].

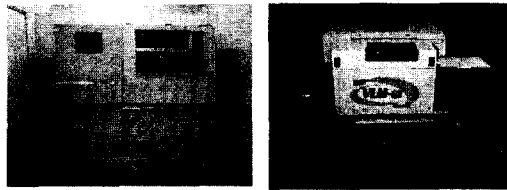
기존의 패속조형 시스템들은 아주 얇은 층을 적층하여 3 차원 형상을 제작하였다. 이러한 이유로 인하여 조형하고자 하는 모델의 높이가 큰 경우에는 전체 조형 시간이 급격히 증가하게 된다.

기존의 패속 조형 공정의 문제점을 극복하기 위하여 새로운 개념의 가변 적층 패속 조형 공정이 개발중에 있다. 현재 개발되고 있는 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 패속 조형 공정(VLM-S)^[3,4]은 두꺼운 두께를 가진 판재를 4 자유도를 가진 선형 열선 절단 시스템으로 경사를 포함하는 절단 가공 경로 데이터에 따라 3 차원 형상을 절단하여 겹착/적층함으로써 일체화된 3 차원 형상의 제품을 빠른 시간에 제작할 수 있는 패속 조형 공정이

다.

VLM-S 공정은 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 연속형 장치인 VLM-SP 와 단속형 장치인 VLM-ST 로 분류된다. VLM-SP 는 절단파트고정기를 이용한 자동 적층 방식인 반면에 VLM-ST 는 파이롯 핀과 적층 보드를 이용한 반자동 적층방식이다.

VLM-S 공정에서는 두꺼운 두께의 재료를 사용하여 조형시간을 단축시킴과 동시에 측면에 경사를 줌으로서 계단형상의 단차를 제거하여 정밀도를 향상 시키고자 하는 것이다. 이에 본 연구에서는 현재 개발 중에 있는 VLM-S 공정을 위한 3 차원 공간에서의 선형열선절단기의 회전각을 계산하는 방법을 제안하고, 이를 C++로 구현하여 다양한 3 차원 CAD 모델에 적용하여 제안된 방법의 타당성을 검증하고자 한다.



(a) VLM-SP (b) VLM-ST

Fig. 1 VLM-S apparatus

2. VLM-S CAD/CAM 시스템 개요

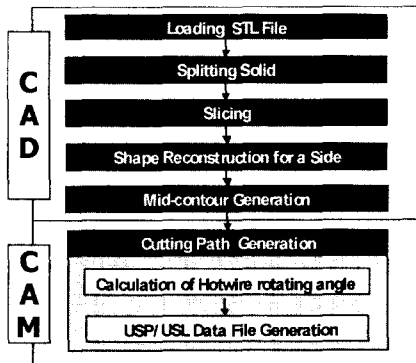


Fig. 2 Flowchart of the VLM-S CAD system

VLM-S CAD/CAM 시스템^[5]은 입력된 3 차원 CAD 모델 데이터로부터 현재 개발중인 VLM-S 장비의 절단가공경로데이터를 자동 생성하는 CAD/CAM 시스템으로서 VLM-Slicer 로 명명한다. 여기서 절단 가공 경로 데이터는 두꺼운 재료를 사용함으로써 나타날 수 있는 계단 효과를 최소화하기 위하여 3 차원 CAD 모델의 2 차원 단면데이터는 물론이고, 측면 경사각 데이터를 포함한다.

VLM-Slicer 는 Fig. 2 에 나타낸 흐름도와 같이

크게 5 가지 모듈로 구성된다.

- 가. STL 파일 로딩(Loading) 모듈
- 나. 슬라이싱(Slicing) 모듈
- 다. 측면 형상 재구성(shape reconstruction) 모듈
- 라. 중간 단면 생성 모듈
- 마. 절단 가공 경로 생성 모듈

다음절에서는 중간단면 데이터에서 주어진 단면 정보와 법선벡터를 이용하여 선형열선절단기의 회전각을 계산하는 방법에 대하여 기술한다.

3. 선형 열선 절단기

Fig. 3 는 선형열선절단기^[3,4]를 이용한 절단 공정에 대한 개념도이다.

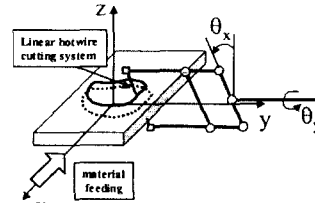


Fig. 3 Linear hotwire cutting system

선형열선절단기는 공급된 발포 폴리스티렌 폼을 절단 가공 경로 정보(위치와 각도)에 따라 3 차원 CAD 모델의 각층에 해당되는 부분을 생성한다. VLM-S 공정의 특징인 측면 경사를 구현하기 위하여 4 축 선형열선절단기를 설계/제작 하였다. 4 축 선형열선절단기는 4 개의 스텝핑 모터에 의하여 제어되고, 평행사변형 링크 메커니즘을 사용하여 주어진 절단가공경로를 따라서 절단할 때 열선의 길이를 항상 일정하게 유지하며, 열선 절단기의 수직 방향 중심은 회전시에도 중간 단면 위치와 항상 일치하도록 설계하였다. 선형열선절단기의 최대회전각은 θ_x, θ_y 모두 65° 이다.

4. 선형 열선 절단기의 회전각 계산

VLM-S 는 조형시간을 단축하기 위하여 두꺼운 재료를 사용하고, 계단효과를 줄이기 위해 측면에 경사를 주어서 선형열선절단기로 절단하는 개념을 가지고 있다. 이때 선형열선절단기의 회전각 θ_x, θ_y 는 3 차원 CAD 데이터를 슬라이싱한 상하면의 데이터를 이용하여 구한 중간 단면과 이 중간단면을 이루는 모서리가 포함된 표면 삼각형(facet)의 법선벡터로부터 계산할 수 있다. 이렇게 구한 회전각은 삼각형 자체가 하나의 평면이기 때문에 삼각형이 기울어진 방향으로 재료를 절단하면 형상의 기울기

와 거의 근사하게 재료를 절단할 수 있다.

4.1 선형열선절단기의 기구학적 묘사

직교좌표계에 대한 선형열선절단기의 회전각은 Fig. 4 와 같이 정의된다. 회전각 θ_x, θ_y 는 모두 오른손법칙에 따라서 회전방향의 양(+)과 음(-)을 판정한다. Fig. 4 에 표시된 방향이 각각 θ_x, θ_y 가 양(+)인 방향이다.

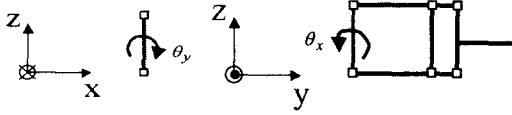


Fig. 4 Definition of Rotational angle

또한, 각각의 회전각 θ_x, θ_y 의 이론적인 각도 범위는 다음과 같다.

$$-90^\circ < \theta_x < 90^\circ, -90^\circ < \theta_y < 90^\circ \quad (1)$$

초기 절단시작위치에서 선형열선절단기의 자세를 단위법선벡터와 단위접선벡터는 다음과 같다.

$$\vec{T}_{origin} = (0,0,1), \vec{N}_{origin} = (0,1,0) \quad (2)$$

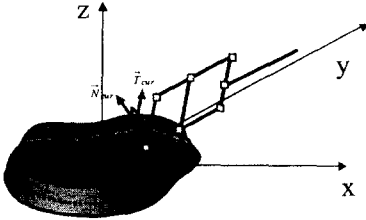


Fig. 5 Definition of unit tangential vector

Fig. 5 에 나타난 바와 같이 절단가공경로를 따라서 이송중인 선형열선절단기의 열선은 단위접선벡터의 방향과 항상 일치한다. 이때, 이 단위접선벡터는 해당 모서리를 포함하는 삼각형의 단위 법선벡터와 모서리의 끝점에서 시작점을 뺀 벡터를 정규화(normalizing)한 현재 모서리의 단위 방향벡터의 외적(outer product)으로 정의된다. 즉,

$$\vec{T}_{cur} = \vec{N}_{cur} \times \vec{U}_{edge} \quad (3)$$

or

$$\vec{T}_{cur} = (N_y U_z - N_z U_y, -(N_x U_z - N_z U_x), N_x U_y - N_y U_x)$$

$$\text{where } \vec{T}_{cur} = (T_x, T_y, T_z)$$

$$\vec{N}_{cur} = (N_x, N_y, N_z)$$

$$\vec{U}_{edge} = (U_x, U_y, U_z)$$

이고, \vec{U}_{edge} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\vec{U}_{edge} = \frac{\vec{P}_{end} - \vec{P}_{start}}{\|\vec{P}_{end} - \vec{P}_{start}\|} \quad (4)$$

$$\text{where } \vec{P}_{start} = (X_{start}, Y_{start}, Z_{start})$$

$$\vec{P}_{end} = (X_{end}, Y_{end}, Z_{end})$$

$$\|\bullet\| = \text{벡터의 크기}$$

4.2 역운동학적 방법을 이용한 회전각 계산

앞서 정의한 \vec{T}_{cur} 는 \vec{T}_{origin} 을 회전행렬 $[R]_x, [R]_y$ 에 의하여 회전변환하여 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\vec{T}_{cur} = [R]_x [R]_y \vec{T}_{origin} \quad (5)$$

$$\text{where } [R]_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}$$

$$[R]_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix}$$

이다.

식(2)에 주어진 \vec{T}_{origin} 값을 식(5)에 대입해서 정리하면,

$$\vec{T}_{cur} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = [R]_x [R]_y \vec{T}_{origin} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x \cos \theta_y \\ \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix}$$

이다. 이 식을 앞서 구한 식 (3)과 같게 놓으면 본 연구에서 계산하고자 하는 선형열선절단기의 회전각 θ_x, θ_y 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{T}_{cur} = [R]_x [R]_y \vec{T}_{origin} = \vec{N}_{cur} \times \vec{U}_{edge} \quad (7)$$

or

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x \cos \theta_y \\ \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_y U_z - N_z U_y \\ -(N_x U_z - N_z U_x) \\ N_x U_y - N_y U_x \end{bmatrix}$$

즉, 선형열선절단기의 회전각 θ_x, θ_y 은

$$\theta_y = \sin^{-1} \left(\frac{N_y U_z - N_z U_y}{N_x U_z - N_z U_x} \right) \quad (8)$$

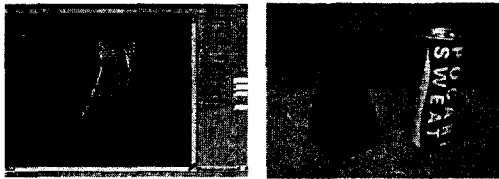
$$\theta_x = \sin^{-1} \left(\frac{N_x U_z - N_z U_x}{\cos \theta_y} \right)$$

으로 구해진다. 여기서 두 각도 범위가 식(1)에 주어진 것처럼 $-90^\circ < \theta_x < 90^\circ, -90^\circ < \theta_y < 90^\circ$ 이므로 sine 을 취하여 각도를 계산하였다.

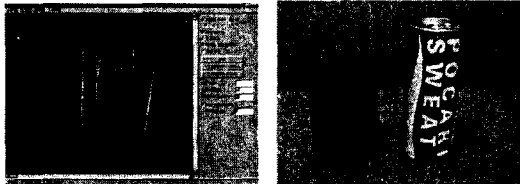
이상으로 회전행렬을 이용한 가장 단순한 역운동학적 방법을 적용하여 3 차원 공간에서 선형열선절단기의 회전각을 계산하는 일반적인 관계식을 도출하였다. 다음절에서 실제 이렇게 도출된 식을 현재 개발 중인 VLM-Slicer 의 선형열선절단기의 회전각 계산 모듈에 삽입하여 실질적인 3 차원 형상에 적용해 보고자 한다.

5. 적용 예

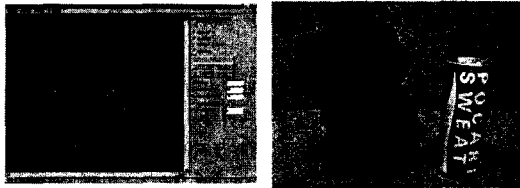
위에서 제안한 선형열선절단기의 회전각을 계산하는 방법을 C++로 구현하여 정사각형 단면을 가진 스크루 형상과 환봉으로부터 압출되는 십자가 형상, 그리고 아주 일반적인 3 차원 형상인 손오공 모형에 대하여 적용하여 절단가공경로 데이터를 생성하였다. 회전각 계산 관계식이 실제 시작품 제작에서 잘 적용 되는지를 검증하기 위하여 VLM-S 장치를 이용하여 실제 시작품을 제작하였다. Fig. 6 은 제어 입력 데이터와 실제로 제작된 시작품을 나타내었다. 본 연구에서 계산된 선형 열선 절단기의 회전각에 관한 관계식을 적용하여 측면의 계단 형상이 거의 제거된 임의의 3 차원 형상을 조형할 수 있었다.



(a) Screw(35 layers)



(b) Extruded cross(26 layers)



(c) Son-o-kong(47 layers)

Fig. 6 Fabricated part

6. 결론

VLM-S 공정에서는 두꺼운 두께의 재료를 사용하여 조형시간을 단축시킴과 동시에 측면에 경사를 줌으로서 계단형상의 단차를 제거하여 정밀도를 향상 시키고자 한다. 이에 본 논문에서는 다음과 같은 연구가 수행되었다.

첫째, 현재 개발 중에 있는 VLM-S 공정을 위한 3 차원 공간에서의 선형열선절단기의 회전각에 관한 관계식을 다음과 같이 도출하였다.

$$\begin{aligned} \theta_y &= \sin^{-1} \left\{ \frac{N_y U_z - N_z U_y}{N_x U_z - N_z U_x} \right\} \\ \theta_x &= \sin^{-1} \left\{ \frac{N_x U_z - N_z U_x}{\cos \theta_y} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

둘째, 이러한 관계식을 C++로 구현하여 정사각형 단면을 가진 스크루 형상과 환봉으로부터 압출되는 십자가 형상, 그리고 아주 일반적인 3 차원 형상인 손오공 모형에 대하여 회전각(θ_x, θ_y)과 절단 경로(x, y)를 포함하는 절단 경로 데이터를 생성하였다.

셋째, VLM-S 장치를 이용하여 각각의 모델을 실제로 측면의 계단 형상이 거의 없이 제작하여 제안된 선형열선절단기의 회전각을 계산하는 일반적인 관계식의 타당성을 검증하였다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가중점사업인 주면적응형 패속 제품 개발 시스템 사업단의 “가변 용착/적층에 의한 직접식 패속 조형 공정 및 응용 기술 개발” 연구 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Paul F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press, 1996.
2. 정해도, 직층 조형 시스템 3 차원 카피기술의 신전개, 성안당, 1998.
3. 양동열, 안동규, 이상호, 최홍석, 박승교, “선형 열절단 시스템을 이용한 단속적 재료 공급식 가변적층 패속조형 공정 및 장치,” 특허 출원 번호 제 2001-0040212 호, 2001.
4. 안동규, 이상호, 양동열 외 3 인 “발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 패속 조형 공정 및 장치 개발” 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 8 호 pp. 54-63, 2001.
5. 이상호, 김태화, 안동규, 양동열, 채희창, “가변적층 패속 조형공정 개발을 위한 단위형상조각 자동 생성 소프트웨어 개발 및 적용 예,” 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 8 호, pp. 64-70, 2001.