

열린 STL 모델의 오프셋 방법

김수진*, 양민양#

Offset of STL Model Generated from Multiple Surfaces

Su-Jin Kim* and Min-Yang Yang#

ABSTRACT

This paper introduces and illustrates the results of a new method for offsetting the triangular mesh generated from multiple surfaces. The meshes generated from each surface are separated each other and normal directions are different. The face normal vectors are flipped to upward and the lower faces covered by upper faces are deleted. The virtual normal vectors are introduced and used to offset boundary. It was shown that new method is better than previous methods in offsetting the triangular meshes generated from multiple surfaces. The introduced offset method was applied for 3-axis tool path generation system and tested by NC machining.

Key Words : STL model (삼각 망), Offset (오프셋), Virtual normal vector (가상 법선 벡터), Tool path (공구 경로), NC machining (수치제어 가공)

기호설명

V_i = vertex of triangular mesh

v_i = multiple normal vector of a vertex

v_i = virtual normal vector of boundary vertex

생성할 수 있다.¹

삼각 면들로 모델의 경계를 표현하는 STL 파일은 FEM 해석, 역 공학, 폐속조형, NC 가공에 이용되고 있으며,²⁻¹¹ 대부분의 CAD 시스템에서 지원하고 있다.

1. 서론

3D 모델의 오프셋은 내부와 외부로 나누는 경계면을 법선 방향으로 일정한 거리만큼 이동하는 것으로 NC 공구 경로 생성, 폐속조형, 내부가 빈 모델의 디자인 등에 이용된다. 특히 3D 모델의 NC 가공에서 모델을 공구반경만큼 오프셋한 CL 면을 이용함으로써 간섭이 없는 공구 경로를 효율적으로

1.1 솔리드 STL 모델 오프셋

이렇게 많이 사용되는 STL 모델을 제품의 제조 데이터 생성에 이용하기 위해서 효율적인 오프셋 방법이 요구되고 있다.

정밀한 오프셋 모델이 필요한 NC 가공을 위해서는 면을 법선 방향으로 오프셋 거리만큼 이동하는 면 오프셋 방법이 이용되고 있다.⁴ 이 방법은 아주 정밀하지만 데이터 크기가 많이 증가할 수 있다.

☞ 접수일: 2006년 1월 3일; 게재승인일: 2006년 5월 12일

* 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원

E-mail sujinkim@gnu.ac.kr Tel. (055) 751-6075

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

데이터의 크기가 작고 각 삼각 면이 균일해야 하는 FEM 해석이나 폐속조형에서는 꼭지점을 법선 방향으로 이동하는 오프셋 방법이 이용되고 있다.^{5, 6} 꼭지점 오프셋방법은 꼭지점과 모서리에서 간격이 발생하지 않으며 겹침이 발생하는 경우도 적으므로 데이터 크기가 증가하지 않고 삼각형의 크기 또한 원본과 비슷하지만 각진 모서리와 꼭지점 부분에서 오차가 커질 수 있다.

두 방법을 보완할 수 있는 오프셋 방법으로 꼭지점들을 면의 법선벡터로부터 계산된 꼭지점의 다중법선벡터(Multiple normal vectors of a vertex) 방향으로 이동하는 방법이 제안되었다.^{7, 8} 같은 면에서 생성된 꼭지점과 모서리에는 공간이 생기지 않으며 각진 모서리와 꼭지점은 면의 법선 방향으로 오프셋되고 여기서 생기는 공간은 새로운 삼각 망으로 연결됨으로 오프셋 오차와 데이터 증가량을 제어할 수 있다. 따라서 부드러운 곡면과 각진 모서리를 동시에 가지는 솔리드 모델에서 생성된 STL 파일에서 폐속조형과 NC 가공을 위한 데이터를 생성하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 하지만, 제안된 오프셋 방법은 꼭지점의 다중법선벡터와 공간을 채우는 삼각 망의 계산에서 면, 모서리, 꼭지점의 위상관계를 이용함으로써 완전한 솔리드를 이루는 STL 모델에만 적용할 수 있다.

1.2 열린 STL 모델

NURBS 기반의 3D 모델에서 삼각 망을 생성하는 방법은 많이 연구되어 왔으며,¹² 현재 대부분의 상용 CAD 시스템이 모델을 STL 파일로 변환해 출력하는 기능을 가지고 있다. STL 파일이 해석이나 가공에 이용되려면 완전한 솔리드를 이루어야 하는데, 곡면 모델에서 생성된 경우와 불완전한 솔리드 모델에서 생성된 STL 모델은 솔리드를 이루지 못하는 경우가 많다. 삼각 망 생성 알고리즘이 솔리드 STL 모델을 만들지 못하는 원인이기도 하다. 각각의 곡면에서 삼각 망을 생성하게 되면 두 곡면과 곡면이 만나는 경계에서는 꼭지점과 꼭지점 또는 모서리와 모서리가 일치하지 않게 된다. 이 논문에서는 곡면 모델에서 만들어져 면의 내부와 외부가 명확하지 않고 곡면의 가장자리에서 생성된 삼각형의 모서리가 인접한 삼각형의 모서리와 만나지 않는 경우 열린 STL 모델이라 부른다.

두 가지 STL 모델을 얻기 위해 솔리드 모델과 곡면 모델로 모델링하고 STL 파일로 바꾸어 저장

하였다. 솔리드 모델에서 생성된 STL 모델은 모든 꼭지점이 서로 만나고 모서리가 서로 만나며 Fig. 1(a)와 같이 이전 연구에서 제안된 꼭지점의 다중법선벡터를 이용한 오프셋방법으로 오프셋 된다.^{7, 8} 그러나 곡면 모델에서 생성된 STL 파일은 내부와 외부 구분이 없고 삼각형의 모서리가 인접한 삼각형의 모서리와 일치하지 않는 부분이 있어서 이전 방법으로 오프셋 하면 Fig. 1(b)와 같이 면의 오프셋 방향이 불 균일하고 모서리 사이에 공간이 커지는 문제가 발생한다.

곡면 모델에서 생성된 STL 파일을 완전한 솔리드 STL 파일로 변환하기도 하지만, 별도의 프로그램과 긴 변환 시간이 요구된다. 따라서 모든 STL 모델에서 NC 데이터를 생성하기 위해서 열린 STL 파일을 직접 오프셋 할 수 있는 새로운 알고리즘이 요구된다.

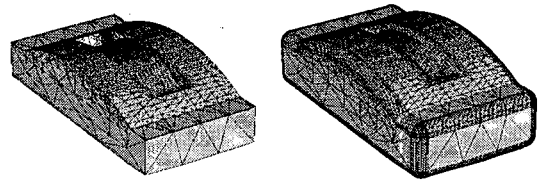


Fig. 1(a) Offset of solid STL model

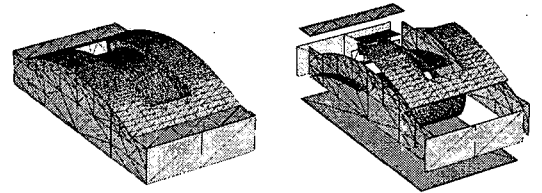


Fig. 1(b) Offset of STL model generated from multiple surfaces

본 연구에서는 곡면 모델에서 생성된 열린 STL 모델을 직접 오프셋 하는 알고리즘을 제안하고 구현하고자 한다. 3 축 NC 가공경로 생성에 적용하기 위해서 불필요한 수직면을 제거하고 면의 법선벡터는 윗면을 향하도록 한다. 서로 다른 곡면에서 생성된 면들이 연결되지 않아 생기는 문제를 해결하기 위해서 가장자리(Boundary) 꼭지점에 가상법선벡터(Virtual multiple normal vector)를 추가하는 새로운 방법을 제안하고 구현하고자 한다. 마지막으로 오프셋결과에서 NC 가공경로를 생성해 실

제 가공에 적용해보고자 한다.

2. 열린 STL 모델의 읍셋

2.1 읍셋 방향 정렬

곡면 모델의 면은 모델의 내부와 외부로 구분하지 않기 때문에, 곡면 모델에서 생성된 STL 파일 역시 면의 법선벡터가 모델의 외부 방향을 의미하지 않는다. 그래서 솔리드 STL 모델을 읍셋하는 기존의 알고리즘으로 열린 STL 모델을 읍셋할 경우 Fig. 1(b)와 같이 적합하지 않은 결과를 얻게 된다. 따라서 열린 STL 모델은 읍셋 방향을 목적에 맞게 변경할 필요가 있다.

3 축 NC 가공에서 공구는 윗면에서 보이는 면만을 가공할 수 있기 때문에 CL(Cutter location)면은 모델의 위쪽에만 있게 된다. 논문에서는 CL 면을 얻기 위해서 읍셋 방향이 면의 윗면이 되도록 한다. 이 방법에서 법선벡터의 z 요소가 양의 값이면 그 방향이 읍셋 방향이고, 음의 값이면 법선벡터 방향을 바꾸어 읍셋하며, 값이 0 에 가까우면 수직면이므로 삭제한다. 그리고 윗면에 완전히 포함된 아랫면은 삭제한다.

STL 모델을 이루는 삼각 면의 법선벡터의 z 성분이 양이면 흰색 음이면 검은색 수직면은 회색으로 Fig. 2 에 표시하였다. 수직면과 다른 면의 아래에 존재하는 면을 제거하고, 법선벡터의 z 성분이 음인 경우 방향을 바꾸면 Fig. 2 의 오른쪽과 같이 읍셋 방향이 정렬되고 불필요한 면이 제거된 모델로 바뀐다.

2.2 경계모서리 읍셋

곡면 모델에서 생성된 STL 파일을 입력받아 삼각형의 모서리와 꼭지점들의 연결관계를 구해보면 곡면의 경계에서 만들어진 모서리는 다른 곡면에서 만들어진 모서리와 서로 맞지 않게 되는데 이러한 모서리를 경계모서리라 한다. 두 삼각 면과 만나는 모서리는 곡면의 내부에서 생성된 정상적인 모서리 이고, 한 삼각 면과 만나는 모서리는 곡면의 가장자리에서 생성된 경계모서리다.

열린 STL 모델을 솔리드 STL 모델의 읍셋방법을 이용해 읍셋할 경우 경계모서리 사이에 공간이 생겨 공구 경로가 빠질 수 있다. 따라서 경계모서리에 생기는 공간을 매울 삼각 망을 추가하는 알고리즘이 필요하다.

2.2.1 가상법선벡터를 이용한 읍셋

솔리드 STL 모델의 읍셋 방법에서 꼭지점의 다중법선벡터를 이용한 것과 같이, 열린 STL 모델의 읍셋을 위해서는 경계꼭지점의 가상법선벡터를 새로이 제안하고 이것을 이용해 경계모서리와 꼭지점의 읍셋 삼각 망을 만들고자 한다. 가상법선벡터는 Fig. 3(a)와 같이 경계모서리의 꼭지점에서 수평으로 외부 방향을 향하는 가상의 벡터로 정의 된다.

경계모서리의 두 꼭지점 V_1, V_2 의 가상법선벡터 v_1, v_2 는 식 (1)과 같이 모서리와 Z 축에 수직하도록 초기화한다.

$$v_1 = \frac{V_2 - V_1}{|V_2 - V_1|} \times z \quad (1)$$

가상법선벡터가 삼각 면의 내부를 향하면 외부 방향을 향하도록 식 (2)와 같이 방향을 바꾸어 준다.

$$\text{if } (V_3 - V_1) \cdot v_1 > 0, \text{ then } v_1 = -v_1 \quad (2)$$

위와 같은 방법으로 계산된 가상법선벡터는 하나의 경계모서리에 두 개씩 만들어진다. 다음으로, 식 (3)과 같이 차이가 작은 두 가상법선벡터 v_2, v_4 를 하나의 벡터 v_{24} 로 통합한다.

$$\text{if } |v_2 - v_4| < \delta, \text{ then } v_{24} = \frac{v_2 + v_4}{|v_2 + v_4|} \quad (3)$$

경계모서리의 다중법선벡터와 가상법선벡터를 이용해 블렌딩 삼각 망을 계산하고, 경계꼭지점의 읍셋 삼각 망 역시 다중법선벡터와 가상법선벡터를 이용해 계산한다. 블렌딩 삼각 망을 계산하는 방법은 솔리드 STL 모델의 각진 모서리와 꼭지점의 읍셋 삼각 망을 계산하는 방법과 같다.^{7,8}

Fig. 3(b)의 왼쪽 그림은 경계모서리를 보여주며, 오른쪽은 제안된 방법으로 경계꼭지점에 추가된 가상법선벡터를 일반적인 꼭지점의 법선벡터와 함께 보여주고 있다. Fig. 3(c)는 가상법선벡터를 이용한 읍셋 결과를 보여준다. 곡면의 내부에서 생성된 삼각 망은 꼭지점의 다중법선벡터에 의해 읍셋 되고 곡면의 경계에서 생성된 경계모서리와 꼭지점은 가상법선벡터에 의해 읍셋 된다.

2.2.2 경계모서리 읍셋방법 비교

경계모서리에서 생기는 공간을 채우는 가장 직관적인 방법으로 경계모서리에 반 원통을 추가하고 꼭지점에 반구를 추가하는 방법이 있다.⁹ 이 방법은 간단하지만 불필요한 삼각형을 많이 추가해 데이터크기가 커지게 하고 NC 데이터 생성 시간도 길어지게 한다.

모서리를 일반적인 Z-map 으로 읍셋하고 다른 읍셋 면보다 높은 데이터를 삼각 망으로 바꾸어 경계모서리 사이에 공간을 매울 수 있다. 불필요한 삼각형이 없어 실린더와 구를 추가하는 경우보다는 데이터가 작지만 수평 방향 오차가 Z-map 의 격자 간격에 의존하므로 경사면의 오차가 크다는 단점이 있다.

새로이 제안된 꼭지점의 가상법선벡터를 이용한 읍셋방법은 데이터 증가를 줄이고 읍셋 오차가 방향에 관계없이 균일하도록 한다. 경계꼭지점의 가상법선벡터와 꼭지점의 다중법선벡터는 서로 같은 자료구조이며 읍셋 망을 계산하는 방법 역시 호환되므로 솔리드 STL 모델과 열린 STL 모델의 읍셋 알고리즘이 잘 호환된다.

열린 STL 모델의 경계모서리 읍셋 방법들을 구현하고 읍셋시간, 삼각 면의 개수, 읍셋 정밀도를 비교하는 실험해 Table 1 에 나타내었다. STL 파일의 면의 개수는 4,284 개이고 경계모서리는 1,012 개이다. 이용된 PC 는 Pentium 4 CPU 2.4GHz 이고 메모리는 512MB 이다. 세 가지 방법들 중에서 가상법선벡터를 이용한 읍셋 방법이 가장 빠르고 적은 메모리를 요구하며 비교적 정밀함을 알 수 있다.

Table 1 Compare boundary edge offset methods

Methods	Offset time(s)	Number of faces	Precision (mm)
Cylinder	1.46	336,064	0.01
Z-map	2.39	233,716	0.1
Virtual normal	0.89	73,517	0.01

2.3 공구 경로 생성 및 NC 가공 실험

열린 STL 모델의 읍셋방법으로 만들어진 CL 면에서 생성된 공구 경로를 NC 가공에 적용해 제

안된 알고리즘을 검증하였다. 읍셋 및 공구 경로 생성은 C++ 언어로 구현하였고 가공 시뮬레이션은 OpenGL 을 이용해 개발하였다. 제안된 읍셋 방법으로 만들어진 CL 면을 연속된 수직 평면으로 잘라 가장 높은 직선들만을 연결하면 Fig. 4(a)와 같이 간섭이 없는 NC 공구 경로를 얻게 된다.^{10, 11} 생성된 공구 경로를 NC 가공하기 전에 가상 가공 프로그램으로 검증하였다.¹³ 가상 가공 프로그램은 소재 크기, 공구 형상 그리고 NC 데이터를 입력 받아 시뮬레이션하고 Fig. 4(b)와 같이 가공 결과를 미리 그래픽으로 보여준다. Fig. 4(c)는 알루미늄 소재를 구현된 시스템에서 생성된 NC 데이터로 실제로 가공한 결과를 보여준다. 위 가공 실험으로 제안된 읍셋 방법으로 생성된 CL 면이 3 축 NC 가공 경로 생성에 적용 가능함을 보였다.

2.4 STL 모델 읍셋방법 비교

본 연구에서는 다중곡면에서 생성되어 객체 간에 연결되지 않은 STL 데이터를 직접 읍셋하는 방법을 기술하였다. 제안된 방법은 솔리드 STL 모델만을 읍셋 대상으로 했던 기존 연구와 비교할 때 열린 STL 모델도 안정적으로 읍셋 할 수 있다는 장점이 있다.

기존 알고리즘을 적용할 경우 Fig. 1(b)와 같은 결과를 얻게 되지만, 법선벡터의 방향을 변경하고 경계모서리에 가상법선벡터를 추가한 후 읍셋 하는 새로운 방법을 적용할 경우 Fig. 3(c)와 같이 3 축 NC 가공에 적용 가능한 CL 면을 얻을 수 있다.

기존 알고리즘과 새로운 알고리즘을 다른 곡면 모델에서 생성된 STL 모델에도 적용해 비교하였다. Fig. 5(a)는 곡면모델에서 생성된 STL 파일로 각 곡면에서 생성된 객체 간에 연결이 되어있지 않아, 기존 읍셋 방법을 적용할 경우 Fig. 5(b)와 같이 NC 가공에 적용할 수 없는 CL 면이 생성된다. 새로운 알고리즘을 적용한 Fig. 5(c)의 경우에 다른 면의 아래에 있는 면이 삭제되고 읍셋 방향이 윗면 방향으로 정렬되며 경계모서리의 열린 공간에 읍셋 면이 추가되어 NC 가공에 적용할 수 있는 CL 면이 생성된다.

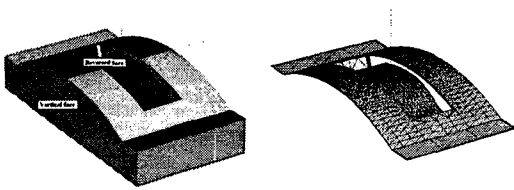


Fig. 2 Correction face orientation error of STL model

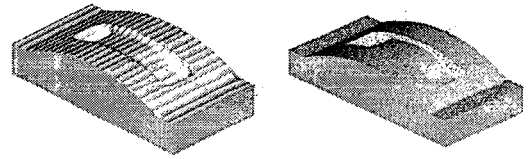


Fig. 4(b) Cutting simulation

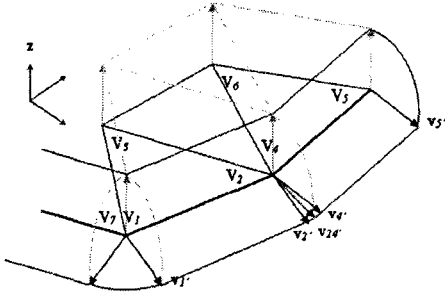


Fig. 3(a) Offset boundaries by the virtual multiple normal vectors

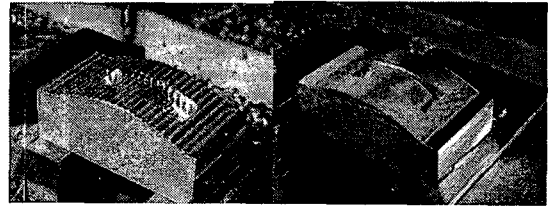


Fig. 4(c) NC machining

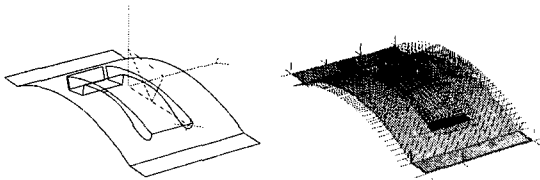


Fig. 3(b) Boundary edges of STL model(1,012) and virtual multiple normal vectors

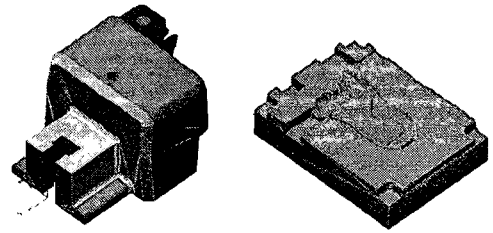


Fig. 5(a) STL model generated from multiple surfaces

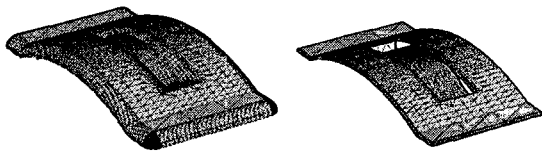


Fig. 3(c) Offset boundaries by the virtual normal vectors

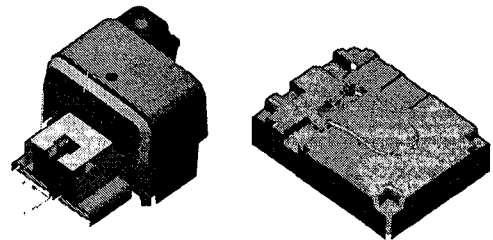


Fig. 5(b) Offset by solid STL model offset method

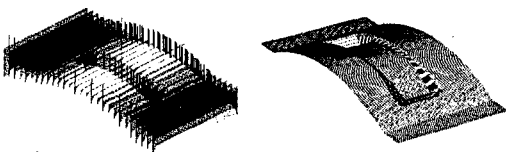


Fig. 4(a) Tool path

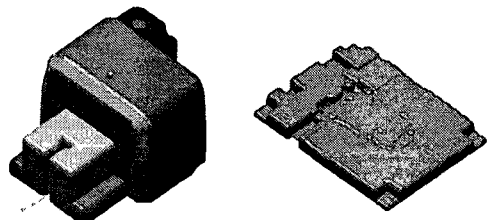


Fig. 5(c) Offset by proposed STL model offset method

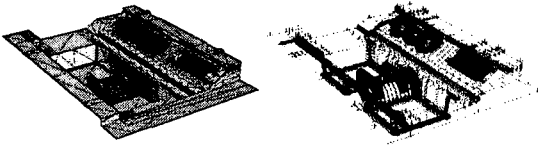


Fig. 6(a) STL model(90,997 faces) and normal vectors on boundary edges

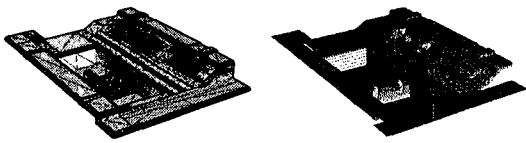


Fig. 6(b) Offset to CL surface and finishing tool path generation(side step 0.4 mm)

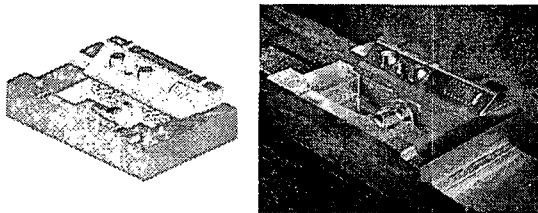


Fig. 6(c) Virtual machining and real NC machining result

3. 금형의 NC 가공에 적용

구현된 시스템으로 금형 가공 회사에서 제공한 사출금형 모델을 가공하는데 적용하였다. 사출 금형의 IGES 파일은 대부분 곡면 모델로 STL 파일로 변환했을 때 면의 방향이 일정하지 않으며 모서리가 서로 만나지 않는 경계모서리가 많이 존재한다.

Fig. 6(a)는 크기가 380mm*200mm*100mm 인 사출금형 IGES 데이터를 상용 CAD 시스템에서 허용 오차 0.01 mm 의 삼각 망으로 바꾸어 STL 파일로 출력한 것이다. STL 모델은 90,997 개의 삼각 면으로 구성되어있으며 곡면 모델에서 생성되었기 때문에 26,774 개의 경계모서리가 존재한다. 읍셋에 이용될 꼭지점의 다중법선벡터와 가상법선벡터를 경계모서리와 함께 Fig. 6(a)에서 볼 수 있다. 솔리드 STL 모델의 읍셋을 위해 개발된 방법을 이용할 경우 열린 STL 모델에서 읍셋 면을 얻기 어려웠지만, 제안된 방법을 이용해 Fig. 6(b)과 같이 열린

STL 모델을 읍셋해 이용 가능한 CL 면을 생성하고 0.4 mm 간격의 수직평면들과의 교선을 계산해 공구 경로를 생성할 수 있었다. 생성된 공구 경로를 Fig. 6(c)와 같이 가상가공 시스템으로 검증해 이상이 없음을 확인하고 금형의 정상 가공에 성공적으로 적용하였다. 이 실험으로 제안된 알고리즘이 향후 일반적인 금형의 NC 가공에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 솔리드 STL 모델의 읍셋 방법의 단점을 보완하는 열린 STL 모델의 읍셋방법을 제안하고 C++ 언어로 구현해 열린 STL 모델에서도 3 축 NC 가공 경로 생성에 적합한 읍셋 면을 직접 생성할 수 있음을 보였다.

3 축 가공에 적합하도록 삼각 면의 법선 방향을 변경하고, 경계모서리에 가상법선벡터를 추가해 읍셋 후 발생하는 공간을 효과적으로 제거하였다. 기존 방법에서 읍셋할 수 없었던, 곡면 모델에서 생성된 열린 STL 모델을 제안된 알고리즘으로 읍셋해 비교하였다.

제안된 읍셋 방법으로 생성된 CL 면에서 가공 경로를 생성하도록 프로그램을 개발해 알루미늄 샘플과 실제 금형의 NC 가공에 성공적으로 적용하였다.

상용 CAD 시스템에서 출력되는 STL 파일의 일부는 완전한 솔리드 모델 이지만 일부는 객체가 서로 만나지 않는 열린 STL 모델이다. 따라서 본 연구는 솔리드 STL 모델의 읍셋 방법과 함께 NC 가공 경로 생성에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Choi, B. K., Kim, D. H. and Jerad, R. B., "C-Space approach to tool path generation for die and mold machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 3, pp. 657-669, 1997.
2. Cho, S. H., Cho, M. W. and Kim, J. D., "Reverse Engineering of 3D Compound Shapes using Delaunay Triangulation," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 181-188, 2000.

3. Lee, S. H., Ahn, D. G. and Yang, D. Y., "Surface Reconstrction for Cutting Path Generation on VLM-Slicer," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 71-79, 2002.
4. Jun, C. S., Kim, D. S. and Park, S. H., "A new curve-based approach to triangle machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 5, pp. 379-389, 2002.
5. Koc, B. and Lee, Y. S., "Non-uniform offsetting and hollowing objects by using biarcs fitting for rapid prototyping process," *Computers in Industry*, Vol. 47, pp. 1-23, 2002.
6. Qu, X. and Stucker, B., "A 3D surface offset method for STL-format models," *Rapid prototyping journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 133-141, 2003.
7. Kim, S. J., Lee, D. Y. and Yang, M. Y., "Offset triangular mesh using the multiple normal vectors of a vertex," *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 1, No. 1-4, pp. 285-292, 2004.
8. Kim, S. J. and Yang, M. Y., "Offset of STL Model Generated from Solid Model," *Journal of Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 202-211, 2005.
9. Lee, D. Y., Kim, S. J., Lee, S. G. and Yang, M. Y., "Incomplete 2-manifold mesh based tool path generation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 797-803, 2006.
10. Park, S. C., "Sculptured surface machining using triangular mesh slicing," *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 3, pp. 279-288, 2004.
11. Kim, S. J. and Yang, M. Y., "Uniform Scallop Height Tool Path Generation Using CL Surface Deformation," *Transactions of the KSME A*, Vol. 29, No. 6, pp. 895-903, 2005.
12. Piegl, L. A. and Riechard, A. M., "Tessellating trimmed NURBS surfaces," *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 1, pp. 16-26, 1995.
13. Park, J. W., Chung, Y. C. and Choi, B. K., "Precision shape modeling by z-map model," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 3, No. 1, pp. 49-56, 2002.