

< 논문 >

CL 면 변형 방법을 이용한 균일한 조도의 공구 경로 생성

김수진[†] · 양민양^{*}

(2004년 12월 23일 접수, 2005년 3월 30일 심사완료)

Uniform Scallop Height Tool Path Generation Using CL Surface Deformation

Su-Jin Kim and Min-Yang Yang

Key Words : Scallop Height(조도), Tool Path(공구 경로), Triangular Mesh(삼각망), Deformation(변형)

Abstract

In this paper, we present a cutter location (CL) surface deformation approach for constant scallop height tool path generation from triangular mesh. The triangular mesh model of the stereo lithography (STL) format is offset to the CL surface and then deformed in accordance with the deformation vectors, which are computed by the slope and the curvature of the CL surface. In addition, the tool path which is computed by slicing the deformed CL surface is inversely deformed by those same deformation vectors to a tool path with a constant scallop height. The proposed method is implemented, and a tool path generated by the proposed method is tested by simulation and by numerical control (NC) machining. The scallop height was found to be constant over the entire machined surface, demonstrating much better quality than that of mesh slicing, under the same constraints for machining time.

기호설명

- l : 경로간격
- ρ : 모델의 곡률반경
- r : 공구의 반경
- h : 가공면의 조도
- L : CL 면에서 경로간격
- R : CL 면의 곡률반경
- A : 수직 절단면들의 간격
- θ : CL 면의 기울기
- δ : 격자간격
- e : 변형을
- d : 변형벡터
- γ : 변형의 전단각

1. 서론

자유 곡면에서 생성되는 공구 경로는 크게 매개변수(Iso-parametric) 방법, 기준평면(Iso-plane) 방법 그리고 일정조도(Constant scallop height) 방법으로 나눌 수 있다.

매개변수 방법에서는 곡면의 매개변수를 일정하게 증가시켜 CC(공구접촉)점들을 계산하고, CC 점들을 곡면의 법선 방향으로 공구 반경만큼 옵셋 보정해 CL(공구위치)점들을 얻는다. 이 방법은 단일 곡면에서 정상 공구 경로를 얻는데 유용하지만 여러 곡면으로 이루어진 모델에서는 간섭 제거가 쉽지 않다.

기준평면 방법은 3-축 가공에서 가장 많이 쓰이는 공구경로 생성방법이다. 모델 또는 옵셋된 모델을 연속된 평면으로 잘라낸 교선을 공구경로로 사용하는 것으로, 기준평면이 수직면인 경우 일방향 또는 지그재그 경로라고 하며, 기준면이 수평면인 경우 등고선 가공경로라고 한다. 이 방

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : sujinkim@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3264

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

법을 이용할 경우 모델과 기준평면이 이루는 각에 따라 가공면의 조도가 크게 변화한다. 조도를 균일하게 하기 위해 기준평면의 간격을 변화시키거나 조도가 큰 부분에 기준평면을 추가하기도 한다.⁽¹⁻³⁾

일정조도의 공구경로 생성방법에서는 가공면의 조도를 일정하게 하고 가공 시간을 짧게 하기 위해서 경로간격을 조정한다.⁽⁴⁻¹³⁾ 기준이 되는 공구경로는 모델의 중심선이나 경계선으로 잡고 모델 위에서 지정된 조도를 위한 경로간격만큼 기준 경로를 읍셋해 다음 경로들을 생성한다. 이러한 방법을 상용 시스템에서는 3D 읍셋 공구경로라고 부르고 있다. 일정 조도의 공구경로는 주로 매개변수 곡면에서 생성되었는데, 복합 곡면인 경우에 간섭 제거에 어려움이 많다.

최근에 매개변수 곡면에 비해서 간섭 제거가 용이한 삼각형 망이 논문과 상용 CAM 시스템에서 공구경로 생성방법으로 이용되고 있다. 삼각형 망 모델의 대표적인 예로 STL 파일이 있다. 많은 CAD 시스템이 폐속조형, FEM 해석, NC 가공을 위해 STL 파일을 지원하고 있다. 기존 연구에서는 삼각형 망에서 다음 세 단계를 통해 일방향 공구경로를 생성하고 있다.^(14,15) 첫째로, 삼각형 망을 CL 면으로 읍셋 하는데 CL 면 역시 삼각형 망으로 표현되며 많은 불필요한 면들을 포함한다.^(14,16-18) 다음으로, 연속되는 평면들로 CL 면을 잘라 직선들을 계산한다. 마지막으로, 2 차원상의 직선들에서 불필요한 선들을 제거해 간섭이 없는 공구경로를 생성한다. 이 방법은 간섭이 없고 정밀한 공구경로를 생성하는데 아주 효과적이지만 경사면에서 조도가 급격히 나빠지는 문제점이 있다. 지금까지 삼각형 망에서 균일한 조도의 공구경로를 생성하기 위한 연구가 없었다. 삼각형 망의 곡률과 경사각의 계산 방법은 매개변수 곡면과 다르며 읍셋된 삼각망은 많은 불필요한 간섭 면들을 포함하고 있으므로 고려해야 할 것이 많다.

본 논문의 목적은 폐속조형과 NC 가공에 사용되고 있는 삼각형 망에서 균일한 조도의 공구경로를 생성하는 새로운 방법을 제시하는 것이다. 본 연구에서는 간섭이 없으며 정밀한 공구경로를 빠르게 생성할 수 있는 기존의 일방향 공구경로 생성방법을 그대로 이용하면서, 새로이 제안되는 CL 면 변형 방법을 추가해 삼각형 망에서 균일한 조도의 공구경로를 생성하고자 한다. 이 방법에서는 STL 파일을 읍셋해 생성된 CL 면을 변형하고, 변형된 CL 면에서 기존의 방법으로 생성된 일방향 공구경로를 역으로 변형하여 간섭이 없고

조도가 균일한 새로운 공구경로를 얻게 된다. 마지막으로 기존의 방법과 새로운 방법으로 생성된 공구경로를 이용해 NC 공작기계에서 가공실험을 하고 평가하였다.

2. CL 면 변형 방법

2.1 경로간격

가공면의 조도는 미가공 부분의 최대 두께를 의미하며, 경로간격(Side step)은 인접한 두 공구경로 사이의 거리를 말한다. 식 (1)과 같이 경로간격은 모델의 곡률반경, 공구의 반경, 가공면의 조도의 영향을 받는다.^(5,7) 여기서 곡률반경 ρ 는 볼록한 곡면에서는 양수이고 오목한 곡면에서는 음수이다.

$$l = \frac{|\rho| \sqrt{4(r+\rho)^2(h+\rho)^2 - [\rho^2 + 2r\rho + (h+\rho)^2]^2}}{(r+\rho)(h+\rho)} \quad (1)$$

l : 경로간격

ρ : 모델의 곡률반경

r : 공구의 반경

h : 가공면의 조도

공구의 반경보다 모델의 곡률 반경이 많이 큰 경우에는 인접한 공구경로 사이의 모델은 평면으로 근사할 수 있으며 경로간격은 식 (2)와 같이 간단해진다.

$$l = 2\sqrt{2rh - h^2}, \rho \gg r \quad (2)$$

정삭 가공처럼 가공면의 조도가 공구 반경보다 많이 작은 경우에는 식 (1)이 식 (3)과 같이 간단해진다.⁽¹²⁾ 이 식은 경로간격을 계산하는데 일반적으로 많이 사용되고 있다.

$$l = \sqrt{\frac{8hr\rho}{\rho+r}}, r \gg h \quad (3)$$

앞의 식들은 공구경로가 CC 면에서 생성될 때 이용된다. CL 면에서 공구경로를 생성할 때는 식 (4)와 같이 경로간격은 CL 면의 곡률반경으로부터 계산된다.

$$L = \sqrt{\frac{8hrR}{R-r}}, r \gg h \quad (4)$$

L : CL 면에서 경로간격

R : CL 면의 곡률반경

일반적으로 CL 면을 연속된 수직면으로 잘라 공구 경로를 생성하는데, 일정한 조도를 얻기 위해서는 식 (5)와 같이 수직면의 간격이 CL 면의 기울기의 영향을 받는다.⁽³⁾

$$\Delta = L \cos \theta = \cos \theta \sqrt{\frac{8hrR}{R-r}} \quad (5)$$

Δ : 수직 절단면들의 간격
 θ : CL 면의 기울기

공구반경은 일정하므로 균일한 조도를 가지는 가공면을 얻기 위해서는 수직 절단면의 간격이 CL 면의 곡률과 기울기에 따라서 바뀌어야 한다. 수직 절단면들의 간격은 경사면에서는 작아져야 하며 수평면에서는 커져야 한다. 일반적인 일방향 공구경로처럼 기준평면들의 간격이 일정한 경우에 수평면의 조도는 작고 경사면의 조도는 커지는 현상이 발생한다.

2.2 CL 면 변형방법

균일한 조도의 공구경로는 가공시간과 조도에 모두 유리하다. 일반적인 일정조도 공구경로 생성방법은 매개변수 곡면 위에서 기준 공구경로의 각 점들에서 계산된 경로간격만큼 읍셋된 공구경로를 계산하는 것이다. 그런데 매개변수 곡면에서 사용하던 경로간격 계산 방법과 읍셋 방법을 삼각형 망에 바로 적용하기는 곤란하다. 읍셋된 삼각형 망은 많은 불필요한 면들을 포함하게 되며 면들은 곡면이 아닌 작은 삼각형들의 집합이기 때문이다.

본 논문에서는 삼각형 망에서 균일한 조도의 공구경로를 생성하기 위해서 CL 면 변형 방법을 새로이 제안한다. 이 방법은 Fig. 2 와 같이 삼각형 망을 읍셋해 생성하는 CL 면을 경로간격 방향으로

변형하고 변형된 CL 면을 등간격의 수직 평면들로 잘라 만든 일방향 공구경로를 역변형하여 균일한 공구경로를 생성하는 것이다. 삼각망을 읍셋하고 일정한 간격의 수직면으로 잘라 만드는 일방향 공구경로의 표면 조도는 경사면에서는 커지고 수평면에서는 줄어들어 균일하지 않다. 경사면과 오목한 부분의 CL 면은 경로간격 방향으로 늘리고 수평면과 볼록한 부분은 조금 줄여 변형된 CL 면을 만든다. 여기서 각 부분의 변형률은 CL 면의 경로간격 방향의 경사각과 곡률에 따라서 계산된다. 변형된 CL 면에서 생성된 공구경로를 앞에서 사용된 변형률의 역수로 변형하면 변형 전 공간상의 공구경로가 된다. 이 공구경로는 모델의 경사와 곡률에 관계 없이 가공면의 조도가 균일한 공구경로가 된다.

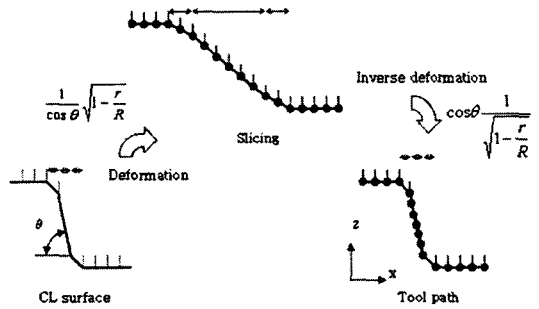


Fig. 2 CL surface deformation approach

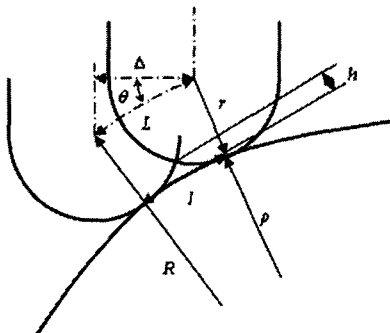


Fig. 1 The slope and curvature of model affect scallop height

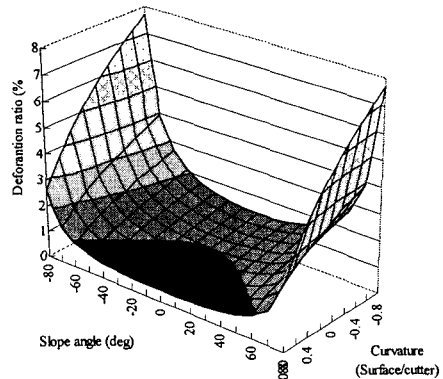


Fig. 3 Deformation ratio of the CL surface for a constant scallop height

먼저 X-축은 시중평면과 수직하도록 하며 Y-축은 평행 하도록 좌표를 설정한다. XY-평면에 격자를 만들고 격자의 각 점들에 CL 면의 경사와 곡률을 이용해 계산된 변형 벡터를 저장한다. 식 (6)과 식 (7)에서와 같이 삼각형 망에서 경사각과 곡률은 두 점 또는 세 점으로부터 근사한다.

$$\theta_{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2\delta_x} \right) \quad (6)$$

δ : 격자간격

$$R_{i,j} = \frac{2z_{i,j} - (z_{i-1,j} + z_{i+1,j})}{\delta_x^2} \quad (7)$$

경사각이 큰 곳은 경로간격 방향으로 $\cos(\theta)$ 에 반 비례해서 늘어나고, 오목한 곳은 공구반경과 CL 면의 곡률반경의 비율에 의해서 늘어난다. 변형률은 식 (8)과 같이 CL 면의 경로간격 방향 경사각과 곡률반경에 의해서 계산된다.

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{\cos \theta_{i,j}} \sqrt{1 - \frac{r}{R_{i,j}}} \quad (8)$$

ε : 변형률

Fig. 3 은 CL 면의 경로간격 방향 경사각과 곡률반경이 변형률에 미치는 영향을 보여준다.

삼각형 망에서는 경사각과 곡률이 부분적으로 크게 변할 수 있으므로 공구경로의 부드러운 이송을 위해서, 변형률을 식 (9)를 이용해 평준화한다.

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{\varepsilon_{i,j+1} + 2\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i,j-1}}{4} \quad (9)$$

변형 벡터의 크기가 0 이 되는 위치인 기준 곡선은 모델의 중간에 위치시킨다. 그러면 모델의 중간 부분은 변형이 작고 왼쪽과 오른쪽 가로 갈수록 변형이 커지게 된다. 여기서 변형 벡터는 식 (10)과 같이 변형률을 양쪽으로 누적해 나가면서 계산한다.

$$d_{i,j} = \begin{cases} -\sum_{k=i}^{m-1} d_x(\varepsilon_{k,j} - 1) & i < m \\ 0 & i = m \\ \sum_{k=m+1}^i d_x(\varepsilon_{k,j} - 1) & i > m \end{cases} \quad (10)$$

d : 변형벡터

지금까지 변형률은 공구경로의 이송 방향이 Y-축에 평행 하다는 가정하에 유도되었다. 하지만 균일한 조도를 가지는 공구경로는 Y-축 방향으로 이동하면서 동시에 경로 간격을 조정하기 위해 X-축 방향으로도 이동하게 된다. 이것은 CL 면의 전단 변형으로 표현 되는데, 전단 각은 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\gamma_{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{d_{i,j+1} - d_{i,j-1}}{2\delta_y} \right) \quad (11)$$

γ : 변형의 전단각

공구경로의 이송 방향이 가지는 전단각의 영향을 고려한 보정된 변형률은 식 (12)와 같이 X-축 방향의 변형률과 Y-축 방향의 변형률로 표현된다

$$\varepsilon_{i,j} = \varepsilon_{x,i,j} \cos \gamma_{i,j} + \varepsilon_{y,i,j} \sin \gamma_{i,j} \quad (12)$$

변형벡터는 식 (12)를 이용해 계산된 보정된 변형률을 누적해서 다시 계산된다.

이렇게 계산된 변형 벡터를 이용해 삼각망의 모든 꼭지점들을 이동해 CL 면을 변형하게 된다. 꼭지점이 격자 ij 에 위치한다면 식 (13)과 같이 인접한 세 변형 벡터를 이용해 꼭지점을 변형된 CL 면의 꼭지점으로 이동한다.

$$d_{sum} = d_{i,j}(x_{i+1} - v_x)(y_{j+1} - v_y) + d_{i+1,j}(v_x - x_i)(y_{j+1} - v_y) + d_{i,j+1}(x_{i+1} - v_x)(v_y - y_j) + d_{i+1,j+1}(v_x - x_i)(v_y - y_j) \quad (13)$$

$$v_x' = v_x + \frac{d_{sum}}{(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)}$$

이렇게 변형된 CL 면을 YZ-평면에 평행한 연속적인 수직면으로 잘라 공구경로를 생성한다. 겹침이 발생하는 공구 경로 중에서 가장 높은 것만을 선택해 연결하면 간섭이 제거 된 일방향 공구 경로를 얻게 된다.

변형된 공간상의 일방향 공구경로는 다시 변형 전의 공간으로 역변형 하여 균일한 조도를 가지는 공구경로로 바꾸게 된다. 변형된 공간에서 공구 경로의 한 점이 변형 된 격자의 ij 에 있다면 식 (14)와 같이 인접한 세 점의 변형 벡터를 이용해 원래 좌표 공간상으로 역변형한다.

$$d_{sum} = d_j(x_{ii} + d_{ii,ii} - p_x')(y_{jj} - p_y') + d_{ii,j}(p_x' - x_i - d_{ii,ii})(y_{jj} - p_y') + d_{ii,j}(x_{ii} + d_{ii,ii} - p_x')(p_y' - y_j) + d_{ii,j}(p_x' - x_i - d_{ii,ii})(p_y' - y_j) \quad (14)$$

$$p_x = p_x' \frac{d_{sum}}{(x_{ii} - x_i + 0.5(d_{ii,ii} + d_{ii,ii} - d_{ii} - d_{ii,ii}))(y_{jj} - y_j)}$$

Fig. 4 는 원래 공간과 변형된 공간상의 격자, 변형벡터, CL 면, 공구경로를 보여준다. CL 면을 이루는 삼각형 망은 변형벡터에 의해 변형되고, 변형된 공간에서 생성된 공구경로는 변형 벡터의 역방향으로 역변형된다.

2.3 시스템구성

제안된 CL 면 변형 방법을 이용하는 CAM 시스템을 C++언어와 OpenGL 을 이용해 구성하였다. 구현된 시스템은 STL 파일을 입력 받아 일반적인 일방향 공구경로와 균일한 조도를 가지는 공구경로를 생성한다. Fig. 5 는 CL 면 변형 방법을 이용하고 있는 공구경로 생성 시스템의 흐름을 보여준다. 다른 CAD 시스템에서 생성된 STL 파일이 새로 구현된 CAM 시스템으로 입력된다. 삼각형, 모서리, 꼭지점 간의 위상 관계가 만들어지고 꼭지점들의 법선 벡터들은 꼭지점을 둘러싸는 삼각형 들의 법선 벡터들로부터 계산된다. 삼각형 망들을 공구 반경만큼 솟보조정해서 CL 면을 생성한다.⁽¹⁾ 일반적인 일방향 공구경로를 생성하기 위해서는 이 CL 면을 등간격의 수직 평면들로 잘라 직선들을 얻고, 가장 높은 직선 들만을 선택해서 간섭을 제거한다.^(13,14)

균일한 조도를 가지는 공구경로를 생성하기 위해서는 공구경로를 생성하기 전에 CL 면을 변형하는 단계와 생성된 공구경로를 역변형하는 단계를 추가하면 된다. CL 면의 경사각과 곡률을 이용해 계산된 변형률을 누적함으로써 수평면의 격자에 변형 벡터들을 계산해 놓고, 변형 벡터들을 이용해 경사면과 오복한 영역은 늘리고 평면과 볼록한 영역은 조금 줄여 CL 면을 변형시킨다. 변형된 CL 면에서 생성된 일반적인 일방향 공구경로를 변형 벡터들의 역방향으로 역변형하면 균일한 조도를 가지는 공구경로가 된다. CL 면의 변형과 공구경로의 역변형 과정을 제외하면 기존의 일방향 공구경로 생성방법과 동일하므로, 기존의 방법이 가지고 있는 빠른 간섭제거 같은 장점들을 그대로 지니게 된다. 또한 변형률 계산 그리고 변형과 역변형의 복잡도는 선형이므로 연산 시간 역시 기존의 일방향 경로 계산보다 조금 길어지게 된다.

3. 가공실험

3.1 일방향 공구경로

가공실험에 이용될 모델은 상용 CAD 시스템을 이용해 디자인 하고 허용오차 0.02mm, 삼각형

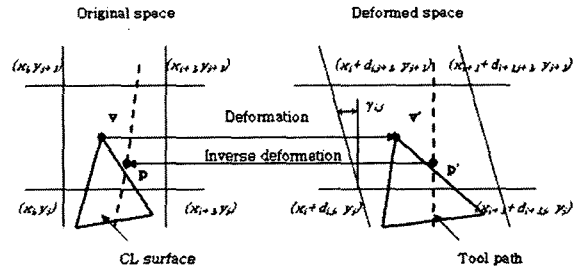


Fig. 4 Deformation of CL surface and inverse deformation of tool path

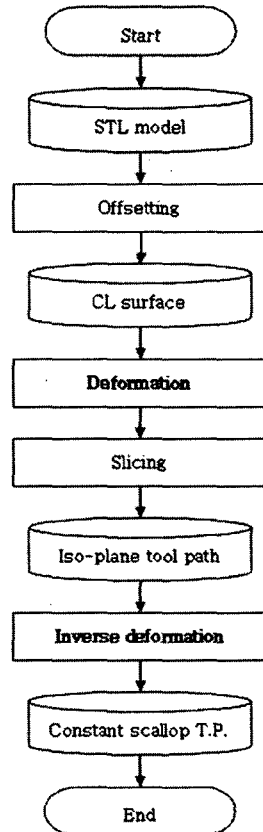


Fig. 5 Flow chart of new constant scallop tool path generation procedure

모서리의 최대 길이 2.0mm 로 삼각형 망을 생성 하였다. 이 삼각형 망을 STL 파일로 출력해 논문

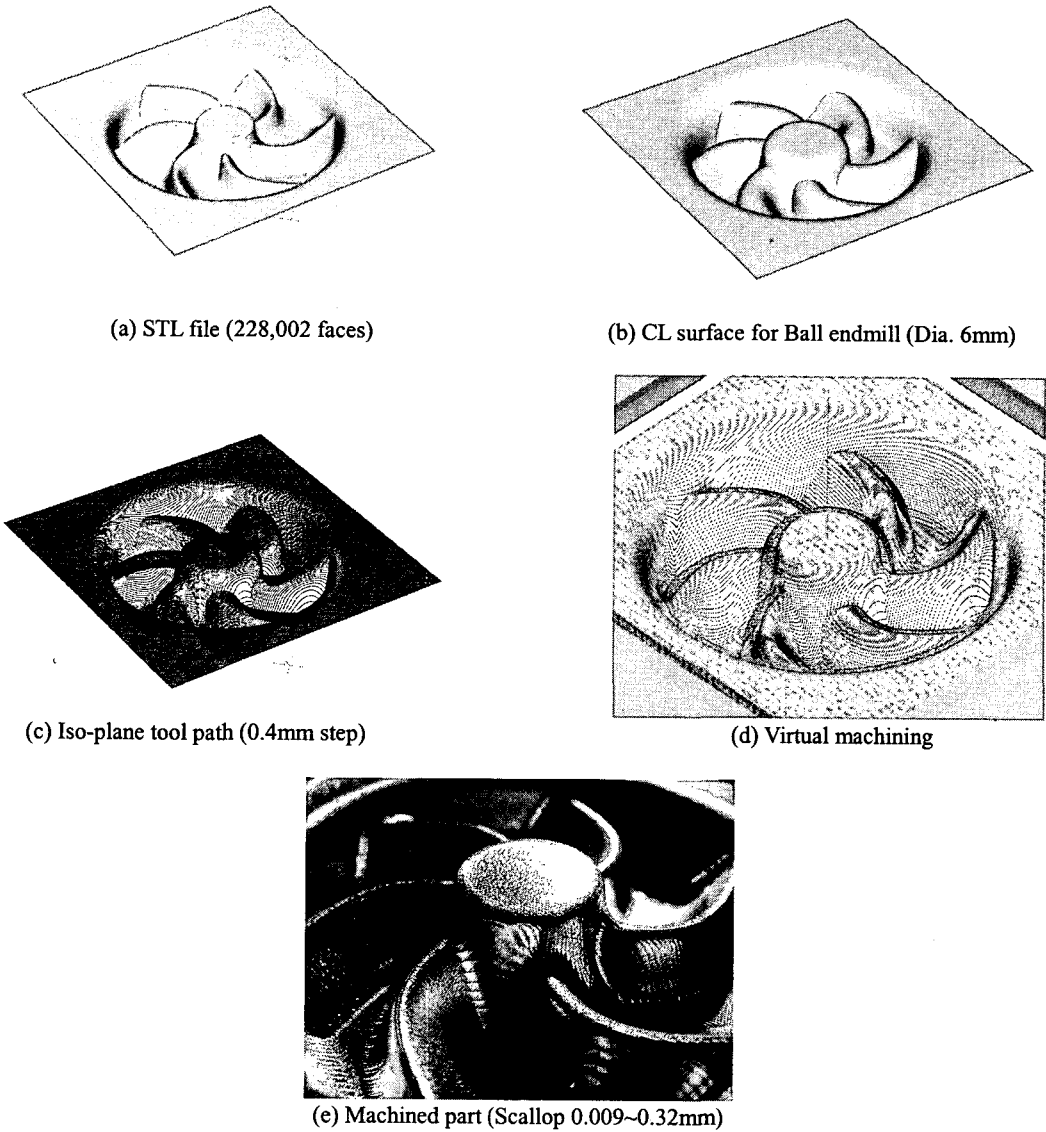


Fig. 6 Iso-plane tool path generation and NC machining

에서 구현된 시스템으로 입력하였다. Fig. 6(a)는 입력된 STL 파일을 보여주는데, 삼각형의 수는 228,002 개 이고 모델의 전체 크기는 가로 100mm, 세로 100mm, 높이 15mm 이다.

읍셋을 위해 꼭지점들의 법선 벡터들은 삼각형의 법선 벡터들을 이용해 계산 되었다. 삼각형망의 꼭지점들을 변선 벡터들 방향으로 공구 반경 만큼 이동해 읍셋 망을 생성한다. Fig. 6(b)는 직경이 6mm 인 볼엔드밀의 CL 면이다.

CL 면을 등간격의 수직면으로 잘라 생성한 일방향 공구경로는 Fig. 6(c)와 같다. 일방향 공구경로에서 X 좌표는 매 0.4mm 마다 고정되고 YZ-평면상에서 공구가 이동한다. 펜티엄 4 (2.4GHz CPU 512MB 메모리)에서 연산시간이 12.6 초 소요 되었다.

Z-map 기반의 가상 가공 시스템에서 Fig. 6(d)와 같이 생성된 공구경로를 시뮬레이션 하였고, NC 공작기계에서 알루미늄 소재를 Fig. 6(e)와 같이 가

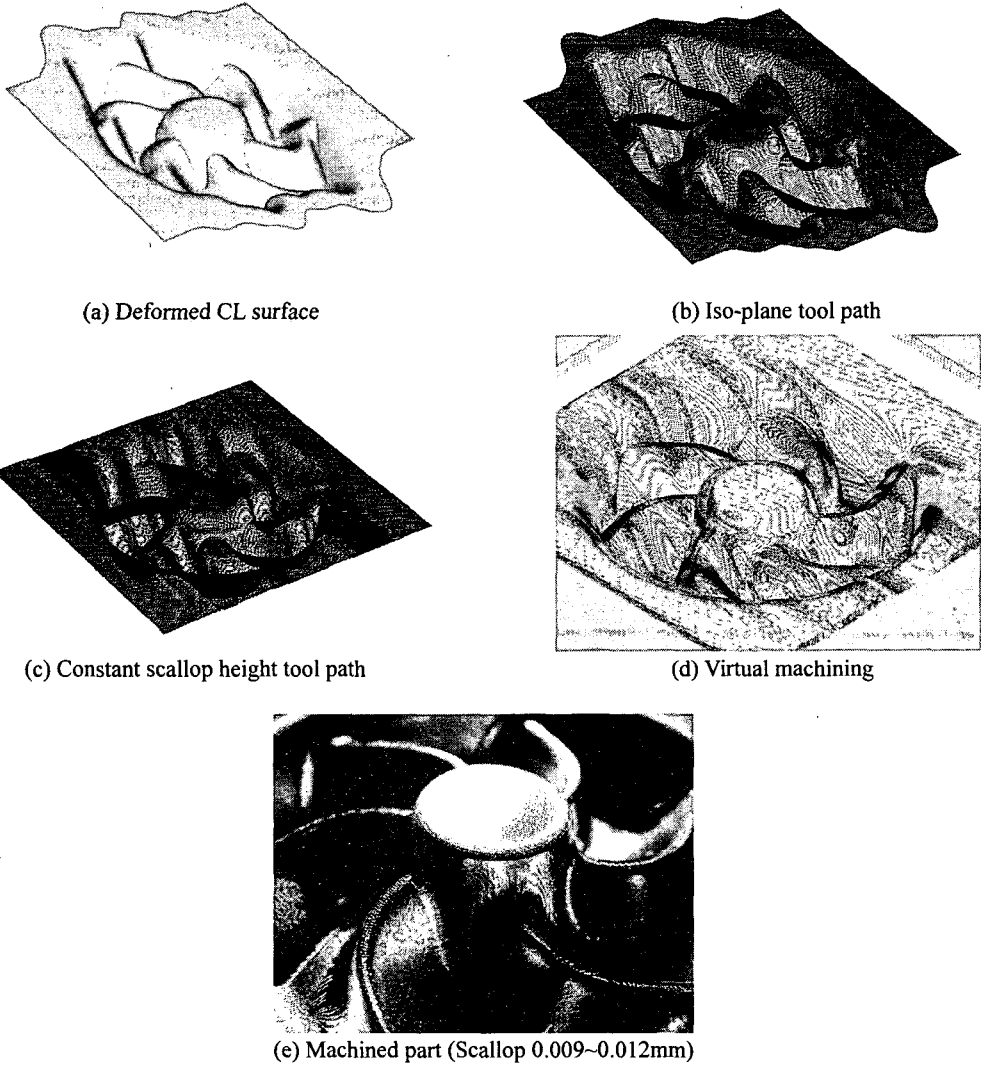


Fig. 7 Constant scallop height tool path and NC machining

공하였다. 공구경로의 길이는 32m 이고 가공시간은 약 21 분 소요 되었다. 측정된 가공면의 조도는 수평면에서 0.009mm 이고 날개의 경사면에서 0.32mm 로 일방향 공구경로를 이용해 가공할 경우 조도가 균일하지 못하다.

3.2 균일한 조도의 공구경로

균일한 조도의 공구경로를 생성하기 위해서 새로 고안된 CL 면 변형 방법을 적용하였다. 먼저 수평 격자 위에 변형 벡터들을 생성하고, 변형 벡터들을 이용해 CL 면을 변형하면 Fig. 7(a)와 같이 경사와 곡률에 따라 특정 부분들이 늘어나게

된다. 변형된 CL 면에서 앞에서와 같은 방법으로 일방향 공구경로를 생성하면 Fig. 7(b)와 같다. 변형된 공간의 공구경로를 원래 공간으로 역변형하면 Fig. 7(c)와 같이 균일한 조도의 공구경로가 된다. 새로운 공구경로에서는 균일한 조도를 유지하기 위해서 XYZ 좌표가 모두 변화 하면서 공구가 이동하게 된다. 총 연산 시간은 일방향 경로 보다 3 초 많은 15.6 초가 소요되었다.

가상가공 시스템에서 모의 가공한 결과는 Fig. 7 (d)와 같으며, 실제 NC 밀링에서 가공된 결과는 Fig. 7(e)와 같다. 총 가공경로의 길이는 46m 이고 가공 시간은 23 분 소요되었다. 이론적인 조

Table 1 CL surface based tool path generation methods from triangular mesh

	Conventional	CL surface deformation
Tool path type	iso-plane	constant scallop height
Computation time	12.6 s	15.6 s
Machining time	21 min	23 min
Scallop height	0.009-0.32 mm	0.009-0.012 mm

도는 0.006mm 이지만 실제 측정된 가공면의 조도는 수평면에서는 0.009mm 날개의 경사면에서는 0.012mm 로 절삭력에 의한 공구의 변형과 공구반경 보다 곡률 반경이 작은 코너에서의 미삭 등으로 차이가 있다. 더 균일한 조도의 가공을 위해서는 가공 양을 줄이고 곡률 반경이 작은 코너는 작은 공구로 미리 잔삭한 후 가공하는 것이 좋겠다.

3.3 결과 및 토의

새로 고안된 CL 면 변형 방법과 일방향 경로 생성방법을 이용해 가공된 결과를 Table 1 에 정리하였다. 두 방법 모두 STL 파일을 입력 받아 옵셋 함으로써 CL 면을 생성한다. 일방향 경로는 이 CL 면에서 바로 생성되며 균일한 조도의 공구 경로를 생성하기 위해서는 CL 면을 변형하고 변형된 면에서 생성된 공구 경로를 역변형한다. 결과적인 가공경로는 일방향 공구경로와 균일한 조도를 가지는 공구경로로써 Table 1 과 같은 차이를 보인다.

제안된 방법의 연산 시간은 기존 방법보다 약간 긴데 이것은 기존의 방법을 그대로 이용하면서 연산시간이 짧은 CL 면의 변형과 공구경로의 역변형 단계를 추가 하였기 때문이다. 제안된 방법의 가공 시간이 기존 방법보다 조금 긴 반면 가공면의 품질은 크게 개선되었다.

CL 면 변형 방법은 삼각형 망에서 일방향 공구 경로를 생성하는 이전 방법을 그대로 이용하고 있어서 기존 방법이 가지는 장점을 가지게 된다. 또한 그 동안 매개변수 곡면에서 기준 곡선의 옵셋 방법으로 계산하던 균일한 조도를 가지는 공구 경로를 삼각형 망에서 새로운 방법으로 생성할 수 있게 되었다.

그러나 이 방법이 가지는 단점은 이산화 된 삼각형 망 모델을 이용하므로 경사각과 곡률에 오차가 포함될 수 밖에 없기 때문에 이론적으로 모

든 면에서 오차 없이 일정한 조도의 공구 경로를 얻을 수는 없다는 것이다. 또한 깊은 경사벽이 반복적으로 나타나는 모델의 경우는 변형량이 지나치게 커져서 제안된 방법이 효율적이지 못할 수도 있다.

4. 결론

삼각형 망을 옵셋해서 CL 면을 만들고 이것을 등간격의 수직면들로 잘라 생성하는 공구 경로는 간섭 제거가 안정적이고, 빠르고, 정밀하지만 경로간격 방향의 곡률과 경사에 따라 가공면의 조도가 변화한다. 본 연구에서는 삼각형 망에서 균일한 조도의 공구 경로를 생성하기 위해 새로이 CL 면 변형 방법을 제안하였다. 이 방법은 삼각형 망을 공구 반경만큼 옵셋 보정하는 1 단계, 옵셋 보정된 CL 면을 경로간격의 경사와 곡률에 따라 계산된 변형률로 변형하는 2 단계, 변형된 CL 면을 등간격의 수직 평면들로 잘라 공구 경로를 생성하는 3 단계, 생성된 공구 경로를 역변형해 균일한 조도의 공구 경로를 얻는 4 단계로 구성된다. 고안된 방법으로 생성된 공구 경로와 이전 방법으로 생성된 공구 경로를 이용해 같은 모델을 가공한 결과, 같은 가공시간이 소요될 때 CL 면 변형 방법을 적용하기 전보다 적용 후 가공면의 조도가 더 균일함을 확인하였다. 그러나 이산화 된 삼각망에서 추측된 곡률과 경사를 이용해 계산된 변형률은 오차를 포함할 수 밖에 없으며 깊은 벽이 반복될 경우에는 변형률이 지나치게 커져서 효율적이지 못할 수도 있다.

참고문헌

- (1) Au, C.K., 2001, "A Path Interval Generation Algorithm in Sculptured Object Machining," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, pp. 558~561.
- (2) Chen, T. and Ye, P., 2002, "A Tool Path Generation Strategy for Sculptured Surfaces Machining," *Journal of Materials Processing Technology*, 127(3), pp. 369~373.
- (3) Ding, S., Mannan, M.A., Poo, A.N., Yang, D.C.H. and Han, Z., 2003, "Adaptive Iso-Planar Tool Path Generation for Machining of Free-Form Surfaces," *Computer-Aided Design*, 35(2), pp. 141~153.
- (4) Suresh, K. and Yang, D.C.H., 1994, "Constant Scallop-Height Machining of Free-Form Surfaces," *ASME, Journal of Engineering for Industry*, 116, pp. 253~259.
- (5) Lin, R.S. and Koren, Y., 1996, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces," *ASME*,

- Journal of Engineering for Industry*, 118, pp. 20~28.
- (6) Sarama, R. and Dutta, D., 1997, "The Geometry and Generation of NC Tool Paths," *ASME, Journal of Mechanical Design*, 119, pp. 253~258.
- (7) Choi, B.K., Lee, C.S., Hwang, J.S. and Jun, C.S., 1988, "Compound Surface Modeling and Machining," *Computer-Aided Design*, 20, pp. 127~136.
- (8) Feng, H.Y. and Su, N., 2000, "Integrated tool path and Feed Rate Optimization for the Finishing Machining of 3D Plane Surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 40, pp. 1557~1572.
- (9) Tournier, C. and Duc, E., 2002, "A Surface Based Approach for Constant Scallop Height Tool-Path Generation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, pp. 318~324.
- (10) Lee, S.G. and Yang, S.H., 2002, "CNC Tool-Path Planning for High-Speed High-Resolution Machining Using a New Tool-Path Calculation Algorithm," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, pp. 326~333.
- (11) Feng, H.Y. and Li, H.W., 2002, "Constant Scallop-Height Tool Path Generation for Three-Axis Sculptured Surface Machining," *Computer-Aided Design*, 34, pp. 647~645.
- (12) Lee, E.K., 2003, "Contour Offset Approach to Spiral Toolpath Generation with Constant Scallop Height," *Computer-Aided Design*, 35, pp. 511~518.
- (13) Koo, T.H. and Jee, S.C., 2003, "Real-Time Tool-Path Generation for 3-Axis CNC Machining of NURBS Surfaces," *Transaction of KSME (A)*, No. 27, Vol. 8, pp. 1418~1425.
- (14) Jun, C.S., Kim, D.S. and Park, S.H., 2002, "A New Curve-Based Approach to Triangle Machining," *Computer-Aided Design*, 34(5), pp. 379~389.
- (15) Park, S.C., 2004, "Sculptured Surface Machining Using Triangular Mesh Slicing," *Computer-Aided Design*, 36(3), pp. 279~288.
- (16) Koc, B.H. and Lee, Y.S., 2002, "Non-Uniform Offsetting and Hollowing Objects by Using Biarcs Fitting for Rapid Prototyping Process," *Computers in Industry*, 47, pp. 1~23.
- (17) Qu, X.Z. and Stucker, B., 2003, "A 3D Surface Offset Method for STL-Format Models," *Rapid Prototyping Journal*, 9(3), pp. 133~141.
- (18) Kim, S.J., Lee, D.Y. and Yang, M.Y., 2004, "Offset Triangular Mesh Using the Multiple Normal Vectors of a Vertex," *Computer-Aided Design and Applications*, 1(1-4), pp. 285~292.