

플랫 엔드밀을 이용한 자유곡면 가공경로 생성

이건영*, 남원우*, 이상조**

The Toolpath Generation for Free-Formed Surface with the Flat Endmill

Gun Young Lee*, Won Woo Nam*, and Sang Jo Lee**

ABSTRACT

The toolpath generation for 3D shaped parts with adaptive isocurve is more precise than existing methods, and the machining time can be reduced. Whether adaptive isocurves are inserted or not is determined by the surface shape, but the number of curves inserted and the total path length vary with initial step lengths. In this paper, therefore, by introducing the concept of the scale factor into the initial path interval, toolpath was regenerated.

Key Words : toolpath(가공경로), adaptive isocurve(좌측 증정곡선), cusp(거듭), cutting error(가공오차), scale factor(비례 인자)

기호설명

$S(u, v)$: surface described as u, v parameter

$C(t)$: nurbs curve

H_{cusp} : 경로간격에 의한 거듭 높이

R : radius of a surface curvature

R_e : effective tool radius

H_{cusp} : surface roughness due to path interval

d : distance between two paths

α : lead angle

β : tilting angle

γ : rotating angle along the Z-axis

δ_{12} : initial path interval

δ_{12}' : path interval multiplied by scale factor

Δ_{12} : current path interval

Φ : rotating angle along the X-axis

Φ_i : $\angle OO_1H$, $\angle OO_2H$

Φ_i' : $\angle OO_1H$, $\angle OO_2H$

ρ : flat end mill corner radius

θ : $\angle O_1OO_2$

O : center of surface curvature

O_i : center of effective tool radius

1. 서론

복잡한 3차원 형상을 갖는 제품을 설계 제작하기 위해서 기존에는 고가의 워크스테이션 장비에서

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계전자공학부

CAD/CAM 시스템을 사용하여야 했으나 90년대 들어서부터 점차 PC의 고성능화와 Silicon Graphics 사의 OpenGL 등 대중화된 그래픽 라이브러리의 보급으로 인하여 PC에서도 사용자의 요구에 맞는 CAD/CAM 시스템을 개발할 수 있는 여건이 조성되었다. 이에 5축 머시닝 센터 및 병렬형 6축 공작기계를 위한 가공 System의 개발이 훨씬 용이하게 되었다. 따라서 가공성능 및 효율이 우수한 다축 공작기계의 개발을 위해서는 이를 이용한 절삭과정의 해석과, 가공에 적합한 CAD/CAM 시스템에 대한 연구가 필요하게 되었다.

제품의 제작에 있어서 점차 다양한 기술이 개발되고 있으나 아직 전통적인 절삭, 연삭이 주를 이루고 있으며 제품의 금형을 가공하는 머시닝 센터의 경우 고속, 고정밀화의 추세에 따라 높은 강성과 빠른 이송속도를 갖춘 공작기계가 나오고 있다. 밀링공정을 이용한 금형의 가공경로를 생성하는데 있어서는 크게 2가지 방법으로 분류할 수 있다. 첫째는 매개변수(parameter)로 표현이 되는 곡면을 균일하게 분포되어 있는 등경곡선(isocurve)을 따라서 생성하는 것이고, 둘째는 모델을 균일한 단면으로 나누어 윤곽을 따라서 생성하는 것이다. 그러나 두 번째 방법은 주로 3축가공에 적합하다.

따라서 다축 공작기계를 이용한 정삭 가공에서는 매개변수 표면으로 모델링된 형상을 가공하는데 등경곡선(isocurve)을 사용하여 가공한다. 가공경로 생성에 있어서는 우리가 원하는 표면거칠기 이내로 가공하기 위하여 공구 경로 간격과 직선 보간 길이를 설정해준다. 기존의 시스템에서 커스 높이와 가공시간을 고려하여 이 두 가지 값을 미리 선정해주지만 이러한 방식은 3차원 곡면을 갖는 모델을 가공하기엔 적합하지 않다. 왜냐하면 가공경로를 따라서 가공하는 중에 초기에 설정한 이 두 가지 변수가 각 위치에서 원하는 커스 높이를 유지시켜주지 못하며, 3축가공시와는 달리 5축 이상의 주축을 기울이는 타입의 가공은 다른 오차를 유발하기 때문이다.

여기서는 주축을 기울이는 타입의 밀링 가공시 발생하는 표면거칠기를 해석하였다. 이에 NURBS를 사용⁽⁸⁾하여 3차원 곡면 보간을 하고, 표면 가공에 중점을 두고 있는 등매개변수 경로 생성 방법으로 adaptive isocurve⁽⁶⁾를 이용하여 등매개변수 공간상에 균일한 분포를 갖는 부가경로를 생성하였다. 따라서 허용오차 이내로 표면거칠기를 유지하

며 불필요한 경로를 제거하였고, 또한 scale factor의 개념을 도입하여 동일한 형태의 가공경로 패턴에 대하여 최단 가공경로를 생성하였다.

2. 밀링 가공시 표면거칠기 해석

밀링 가공을 위한 경로 생성 시, 직선보간 길이와 경로간격의 설정에 따라 가공 시간과 오차의 정도가 결정된다.

5축 공작기계를 이용한 밀링 가공 시, 직선보간 길이에 의해 발생하는 가공오차는 Yeon-Ren Hwang and Cha-shong Liang⁽⁵⁾에 의해 다루어졌으며 lead angle의 변화에 따른 오차 해석 모델을 제시하였다. 경로간격에 따른 가공 오차는 여러 공구형상과 공구 기울임각에 대해 다루어져 왔으나 자유곡면 가공 시에는 가공 진행방향에 따라 경로간격이나 곡률 등이 계속 변화하므로 새로운 오차 해석 방법이 필요하다.

2.1 경로간격에 의한 표면거칠기

다축 공작기계를 이용하여 자유곡면을 가공할 때 공구는 곡면에 대한 각도를 가지고 절삭하기 때문에 경로간격으로 인한 타원형의 커스가 발생한다. 이러한 커스는 공구의 곡면에 대한 기울임각이 커질수록 커다란 영향을 받는다.

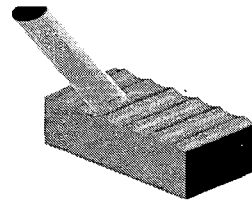


Fig. 1 Cusp generated by the toolpath interval

경사 가공 시 경로간격에 의해서 발생하는 커스는 공구 기울임각과 경로간격에 의해 수식화 될 수 있으며 공구 유효반경⁽²⁾을 이용하여 간단히 나타낼 수 있다.

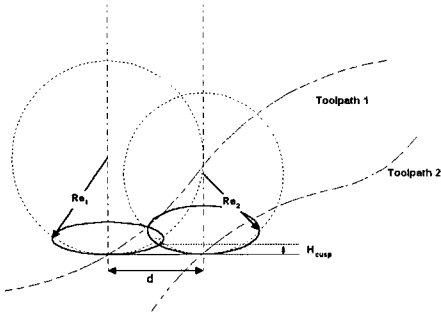


Fig. 2 Definition of cusp

Fig. 2에서 처럼 유효 공구 반경을 이용하여 경로 간격이 d 이고, 두 경로에서의 lead angle(가공 진행 방향의 공구 기울임각)이 각각 α_1, α_2 일 때 가공 후 표면에 생기는 커스프 높이를 계산하면 식(1)과 같다.

$$Re_1 = \frac{1 + \sin^2 \alpha_1}{2 \sin \alpha_1} R, \quad Re_2 = \frac{1 + \sin^2 \alpha_2}{2 \sin \alpha_2} R$$

$$H_{cusp} = \frac{d^2 [(Re_1 + Re_2) - \sqrt{-d^2 + Re_1 Re_2}]}{2 [d^2 + (Re_1 - Re_2)^2]} \quad (1)$$

2.2 3차원 형상을 고려한 커스프 높이

가공 중 공구가 접하고 있는 곳의 곡면 정보에 따라서 실제 경로 간격은 초기 평면에서보다 더 커지게 되며 결국 커스프 높이 또한 다른 값을 갖게 된다. 따라서 자유곡면상에서의 커스프 높이는 Fig. 3과 같이 3가지 형태로 구분하여 얻을 수 있다.

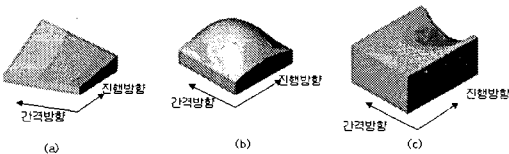


Fig. 3 3D shapes to consider for cusp height calculation

Fig. 3 (a)는 가공 진행 방향으로 가공할 때 초기 간격이 점차 더 길어지므로 식 (1)의 d 만 때 가공

순간마다 바뀌면 된다. 그러나 (b)와 (c)처럼 곡률이 변하는 경우의 커스프 높이는 경로간격만으로 구할 수 없으며 기하학적 형상을 고려하여 계산해야한다.

2.2.1 Convex shaped case

가공표면이 볼록한 형상을 갖게 되는 위치에서 두 개의 가공경로에 의한 커스프 높이를 구하기 위해서는 현재 가공중인 위치의 곡면 형상 정보를 알고 있어야 한다.

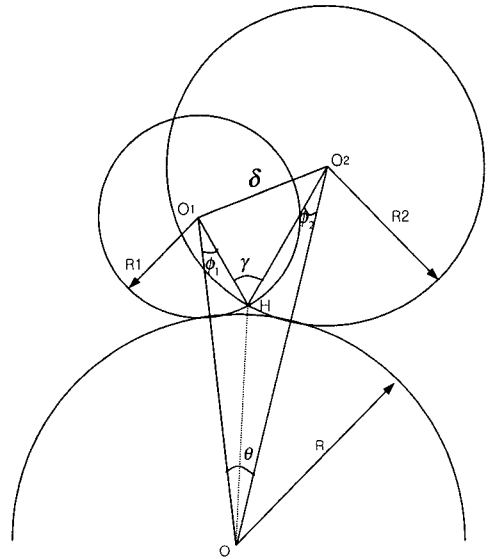


Fig. 4 The case which has a convex curve between two toolpath lines

인접한 두 개의 경로에서 곡면이 갖는 곡률반경이 R 이고 유효공구반경을 각각 R_1, R_2 , 그리고 tilting angle(가공 곡면상에서 공구 진행 방향과 수직방향으로의 공구 기울임각)이 β_1, β_2 이면 Fig. 4를 이용하여 커스프 높이를 계산한다.

Fig. 4에서 가공 표면의 곡률반경 중심(O)과 두 개의 유효공구반경 중심 O_1, O_2 가 이루는 각을 θ 라고 하고, 각 유효공구반경의 중심간의 거리를 δ , 커스프 높이의 끝점(H)에서 O_1, O_2 와 이루는 각을 γ , 그리고 $\angle OO_1H, \angle OO_2H$ 를 각각 ϕ_1, ϕ_2 라고 하면 다음과 같이 된다.

β_1 은 $\overrightarrow{OO_1}$ 방향으로 기울어져 있고 β_2 는 $\overrightarrow{OO_2}$ 방향으로 기울어져 있으므로

$$\theta = |\beta_2 - \beta_1| \quad (2)$$

$$\delta^2 = \frac{(R+R_1)^2 + (R+R_2)^2}{-2(R+R_1)(R+R_2)\cos\theta} \quad (3)$$

$$\cos\gamma = \frac{(R_1^2 + R_2^2) - \delta^2}{2R_1R_2} \quad (4)$$

$$\therefore \gamma = \text{Cos}^{-1}\left[\frac{(R_1^2 + R_2^2) - \delta^2}{2R_1R_2}\right] \quad (5)$$

$\triangle O_1HO_2$ 와 $\triangle O_1OO_2$ 의 내각에서

$$(\pi - \gamma) + \phi_1 + \phi_2 + \theta = \pi, \phi_2 = -\phi_1 - \theta + \gamma \quad (6)$$

$\triangle OO_1H$ 와 $\triangle OHO_2$ 에서 코사인 제2 법칙을 적용하면

$$\begin{aligned} R_1^2 + (R+R_1)^2 - 2R_1(R+R_1)\cos\phi_1 \\ = R_2^2 + (R+R_2)^2 - 2R_2(R+R_2)\cos\phi_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$a = R + R_1, b = R + R_2,$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = -\theta + \gamma \text{ 라고 하면}$$

$$\begin{aligned} R_1^2 + a^2 - 2aR_1\cos\phi_1 &= R_2^2 + b^2 - 2bR_2\cos\phi_2 \\ &= R_2^2 + b^2 + 2bR_2\cos(-\phi_1 + \phi) \\ &= R_2^2 + b^2 + 2bR_2(\cos\phi_1\cos\phi + \sin\phi_1\sin\phi) \end{aligned}$$

이므로

$$\sin\phi_1 = \frac{R_1^2 + a^2 - R_2^2 - b^2}{2bR_2\sin\phi} - \frac{aR_1 + bR_2\cos\phi}{bR_2\sin\phi} \cos\phi_1$$

$$\cos\phi_1 = \frac{AB \pm \sqrt{A^2B^2 - (1+B^2)(A^2-1)}}{-(1+B^2)}$$

$$A = \frac{R_1^2 + a^2 - R_2^2 - b^2}{2bR_2\sin\phi}, \quad B = -\frac{aR_1 + bR_2\cos\phi}{bR_2\sin\phi}$$

커스 높이를 H_{cusp} 이라고 하면, $\triangle OO_1H$ 에서

$$\therefore H_{cusp} = -R + \sqrt{a^2 + R_1^2 - 2aR_1\cos\phi_1} \quad (8)$$

2.2.2 concave shaped case

인접한 두 개의 경로 사이의 표면 형상이 오목한 경우도 역시 2.2.1절의 불룩한 경우와 마찬가지로 인접한 두 개의 경로에서 곡면이 갖는 곡률반경이 R 이고 유효공구반경을 각각 R_1, R_2 그리고

tilting angle이 β_1, β_2 이면 Fig. 5의 그림을 이용하여 커스 높이를 계산한다.

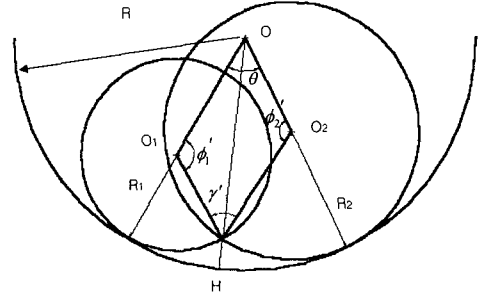


Fig. 5 The case which has a concave curve between two toolpath lines

가공표면 곡률반경의 중심을 O 각각의 유효공구반경의 중심이 O_1, O_2 라고 하고 $\angle O_1OO_2 = \theta$, $\angle O_1HO_2 = \gamma$, $\angle HO_1O = \phi_1'$, $\angle HO_2O = \phi_2'$, $\overline{OO_1} = c = R - R_1$, $\overline{OO_2} = d = R - R_2$ 라 하면 코사인 제 2법칙에 의해 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{O_1O_2} &= R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\gamma = c^2 + d^2 - 2cd\cos\theta \\ \cos\gamma &= \frac{c^2 + d^2 - R_1^2 - R_2^2 - 2cd\cos\theta}{-2R_1R_2} \\ \gamma &= \text{Cos}^{-1}\left[\frac{R_1^2 + R_2^2 - c^2 - d^2 + 2cd\cos\theta}{2R_1R_2}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \overline{OH} &= R_1^2 + c^2 - 2R_1c\cos\phi_1' \\ &= R_2^2 + d^2 - 2R_2d\cos\phi_2' \end{aligned} \quad (10)$$

사각형 HO_1OO_2 에서 $\phi_1' + \phi_2' + \theta + \gamma = 2\pi$ 이고 $\phi' = \theta + \gamma'$ 라 하면

$$\begin{aligned} \therefore \sin\phi_1' &= \frac{R_1^2 + c^2 - R_2^2 - d^2}{2R_2d\sin\phi'} \\ &\quad + \frac{2R_2d\cos\phi' - 2R_1c}{2R_2d\sin\phi'} \cos\phi_1' \\ \sin\phi_1' &= A' + B' \cos\phi_1' \\ A' &= \frac{R_1^2 + c^2 - R_2^2 - d^2}{2R_2d\sin\phi'}, B' = \frac{2R_2d\cos\phi' - 2R_1c}{2R_2d\sin\phi'} \end{aligned}$$

$$\cos \phi_1' = \frac{A'B' \pm \sqrt{A'^2 B'^2 - (1+B'^2)(A'^2-1)}}{-(1+B'^2)}$$

따라서 $\triangle HO_2O$ 에서

$$H_{cusp} = R - \sqrt{R_1^2 + c^2 - 2R_1 c \cos \phi_1'} \quad (11)$$

3. 가공경로 생성

가공경로를 생성하는 방식에는 크게 매개변수 (parametric) 방식과 카테시안(cartesian) 방식이 있다.

매개변수 방식인 경우는 곡면의 결을 따라서 가공하므로 가공품질이 우수한 반면에 가공 중 경로간의 간격이 일정하지 않은 단점이 있다. 또한 카테시안 방식은 공작물을 초기에 황삭하는 단계에 적합한 방식이다.

여기서는 매개변수 방식을 이용하여 곡면의 형상을 NURBS⁽⁸⁾로 보간하고 곡면형상에 의한 가공오차를 보정하였다. adaptive isocurve를 이용하여 불필요한 가공경로를 제거하고 곡률변화에 의해 국지적으로 발생하는 가공오차를 보정하였다. 또한 adaptive isocurve 삽입 시, 초기경로 간격 조절을 통해 최단 경로를 생성할 수 있도록 scale factor를 제시하였다.

3.1 Adaptive isocurve 삽입

매개변수 방식의 자유곡면 가공은 등경곡선을 따라서 공구 경로를 생성한다. 이 방식은 카테시안 평면에서 윤곽 가공(contour machining)을 하는 경우와는 달리 가공위치의 곡률에 따라서 커슴 높이가 달라진다. 이렇게 발생하는 가공 오차를 줄이기 위하여 가공 경로 간격을 줄이는 경우는 실제로 커슴 높이가 허용 오차 범위 이내인 불필요한 곳까지 중복 가공을 하게 되어 가공시간의 낭비를 초래한다. 또한 CC data와 CL data의 양이 많아지게 되어 이를 처리하는데 비효율성을 가져오게 된다.

따라서 매개변수로 표현되는 표면을 등경곡선을 따라 가공할 때, 각 경로 사이의 간격을 계산하여 얻고자 하는 허용 오차 범위를 초과하는 커슴이 발생하는 경우에는 그 사이에 새로운 등경곡선을 삽입하며 Gershon Elber & Elaine Cohen⁽⁶⁾은 이것을 adaptive isocurve라고 하였다. 본 논문에서는

Gershon Elber & Elaine Cohen이 제시한 adaptive isocurve 삽입 알고리즘을 적용하였다.

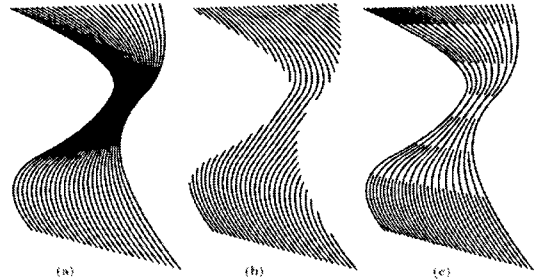


Fig. 6 Adaptive isocurve

Fig. 6의 (a)는 불필요한 경로가 반복되며 (b)는 비가공시간이 많이 발생한다. 따라서 (c)와 같이 간격이 허용범위를 벗어나는 경우에 한해서 adaptive isocurve를 삽입하면 가장 적은 경로로 동일한 표면 거칠기를 얻을 수 있다.

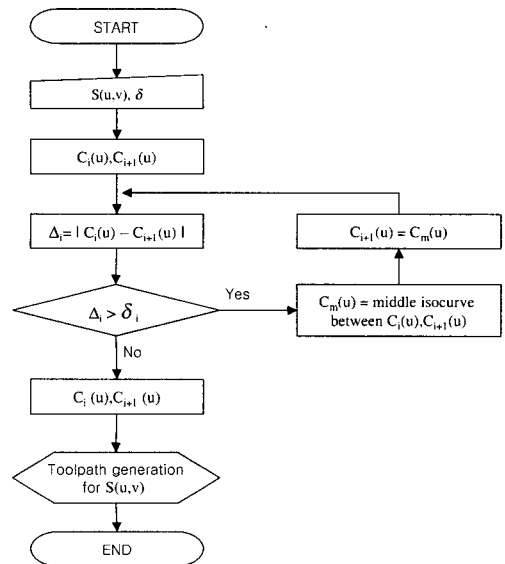


Fig. 7 Algorithm for adaptive isocurve insertion

Fig. 7은 NURBS로 보간된 곡면에서 2개의 인접한 곡선 사이에 adaptive isocurve를 삽입하는 알고리즘이다. NURBS로 보간된 곡면에 u v 방향으로 경로 생성 시 Fig. 7의 알고리즘에 따라 각각의 곡선 사이에서 가공오차가 허용범위를 벗어나는 곳에

adaptive isocurve를 삽입한다.

3.2 Scale factor

adaptive isocurve의 삽입은 곡면상의 두 가공 경로 사이 거리가 허용오차 이내로 커습 높이를 유지하지 못하는 경우에 발생한다. 이러한 adaptive isocurve의 삽입은 가공표면을 허용오차 이내로 유지시켜주지만 처음 생성된 가공경로보다 전체 가공 경로를 길게 만든다. 초기에 가공경로간의 간격을 일정배수 더 크게 하거나 작게 하면 adaptive isocurve가 더 많이 삽입될 수도 있고 더 적게 삽입될 수도 있다. 초기 경로 간격을 더 좁힐 경우, 삽입되는 adaptive isocurve의 길이가 줄어드는 대신 전체 가공경로가 길어질 수 있다. 하지만 상당히 작은 비율로 간격을 줄이면 원래의 가공경로에서 매개변수 라인은 추가되지 않으면서 삽입되는 adaptive isocurve의 길이는 줄일 수 있다.

따라서 이 비율을 어떻게 설정하는가에 따라 전체 가공시간을 변경할 수 있다. 이에 본 논문에서는 초기의 가공경로 간격에 임의의 배수를 곱하여 임의로 가공경로 간격을 조절할 수 있도록 scale factor를 제시한다.

커습의 높이를 허용오차 이내로 유지하기 위한 초기의 두 경로 사이의 간격을 δ_{12} , 경로 길이를 줄이기 위한 scale factor를 S_f 라고 하면 다음과 같다.

$$\delta_{12}' = S_f \times \delta_{12} \quad (12)$$

$$S_f = \frac{\delta_{12}'}{\delta_{12}} \quad (13)$$

이 scale factor를 사용하여 가공 경로를 생성하면 허용오차를 유지하면서 최단 거리의 가공경로를 생성할 수 있다.

3.3 Scale factor를 이용한 최단 가공경로 생성

Adaptive isocurve를 삽입하면 곡면의 변화에 따른 가공 오차를 줄일 수 있으나 전체 가공 경로는 더 길어지게 되지만 3.2절의 scale factor를 사용하여 경로 간격을 조절함으로써 가공 시간을 단축하면 더 경제적인 가공을 할 수 있다.

여기서는 아래와 같은 절삭조건에서 Fig 8

surface 1, surface 2에 대해 플랫폼드밀 가공을 위한 경로를 생성하고 scale factor를 조절하여 시뮬레이션을 통해 최단 경로 길이를 구한다. 유의할 점은 가공 중의 이송 속도와 비가공 중의 이송 속도는 다르므로 최단 경로가 생성되었더라도 가공 시간이 최단이 되는 것은 아니며 이송 속도의 설정에 따라서 최단 시간의 경로를 선택할 수 있다.

절삭조건

Tool Radius : 5 mm

Nose Radius : 0 mm

Tool Offset (공작물로부터 공구의 초기 높이) : 100 mm

Cutting Feedrate: 300 mm/min

Moving Feedrate: 3000 mm/min

Spindle Speed : 2000 rpm

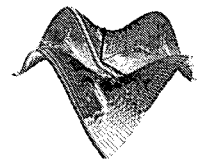
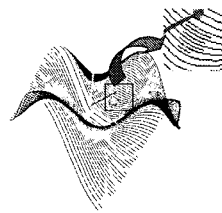
Depth of Cut : 1 mm

직선보간 길이 : 0.1 mm (surface 1)

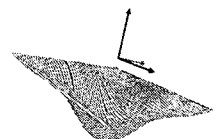
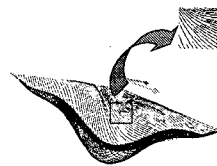
0.5 mm (surface 2)

경로간격 : 0.1 mm (surface 1)

0.5 mm (surface 2)



(a) Toolpath for surface 1 (b) Machined surface 1



(c) Toolpath for surface 2 (d) Machined surface 2

Fig. 8 Minimum toolpath & machined surface

아래 Fig. 9에서부터 Fig. 12까지는 Fig. 8의 자유곡면에 대하여 scale factor를 바꾸어 가면서 가공 경로를 생성하고 그에 따른 가공시간을 나타낸 도표이다. 여기서 cutting length는 가공 경로 중 절삭이 발생하는 경로의 길이를 나타내며 adaptive cutting path length는 cutting length 중 adaptive isocurve가 삽입된 경로 길이를 말한다. 또한 non-cutting path length는 공구 이송 등에 의한 비가공 발생 경로 길이이다.

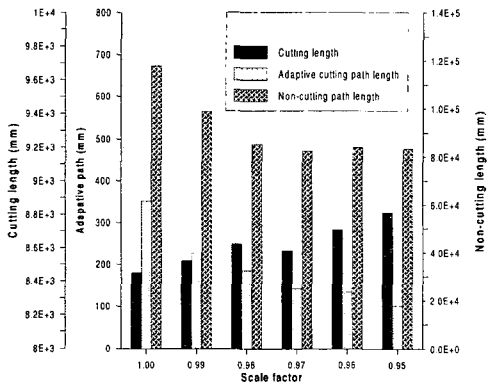


Fig. 9 Toolpath length change vs scale factor (surface 1, tilting axis)

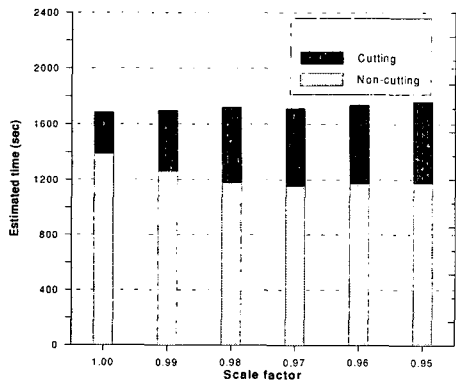


Fig. 10 Estimated machining time vs scale factor (surface 1, tilting axis)

Fig. 8의 surface 1에 대한 가공경로는 scale factor를 1부터 점차 줄어나감에 따라 삽입 되는 adaptive isocurve의 길이가 줄어들고 전체 가공경로의 길이도 줄어든다. 하지만 scale factor가 0.97이하로 떨어지면 가공경로의 밀도가 점차 높아져서 전체 가공경로의 길이는 증가하기 시작한다.

Surface 1에 대한 가공경로는 Fig. 9과 같이 scale factor가 0.97일 때 8558 mm로 가장 짧으며 가공시간도 3201초로 가장 짧다.

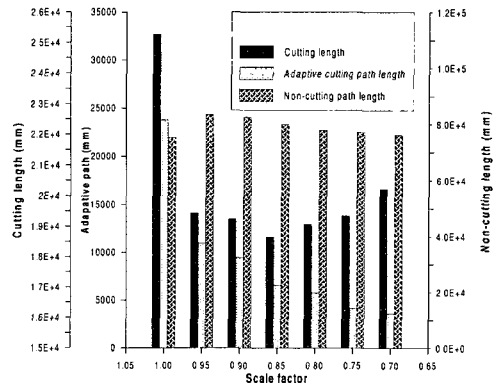


Fig. 11 Toolpath length change vs scale factor (surface 2, tilting axis)

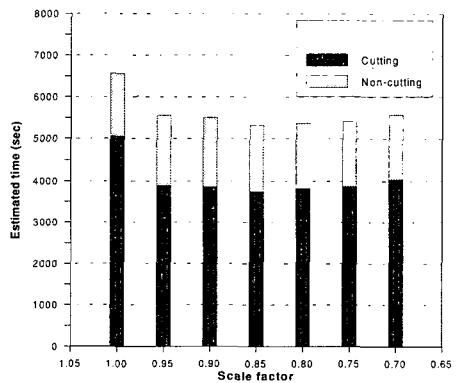


Fig. 12 Estimated machining time vs scale factor (surface 2, tilting axis)

Surface 2에서는 scale factor가 아주 작아질 때까지 가공 경로의 길이가 계속 감소하며 Fig. 11과

Fig. 12 처럼 scale factor가 0.85일 때 가공 경로 18642 mm, 가공 시간 5329 초로 가장 짧다. 반면에 비가공 경로의 길이는 경로 폭이 줄어들면서 새로운 가공 경로가 추가됨에 따라 오히려 처음의 길이보다 늘어난다.

4. 결론

본 논문은 주축을 기울여가며 가공하는 5축 이상의 공작기계를 이용한 자유곡면 가공 시 발생하는 가공오차에 대한 해석과 이를 기반으로 허용 오차 범위 내로 표면거칠기를 유지하고 최단 시간에 가공할 수 있는 최적 공구 경로 생성 프로그램 제작을 목표로 하였다. 가공경로 생성을 위한 프로그램은 STOPA⁽²⁾를 이용하였으며 자유곡면 가공을 위한 분할가공법⁽¹⁾을 이용하여 공구간섭이나 언더컷 등을 방지하였다. 가공오차는 중첩이론⁽²⁾을 이용하여 직선보간에 의한 가공오차⁽⁵⁾와 본 논문에서 제시한 경로간격에 의한 가공오차를 중첩하여 설정하였으며, adaptive isocurve의 삽입을 통해 가공 오차를 보정하고 scale factor를 이용하여 최단 가공경로를 생성하였다. 이에 따라 진행된 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 플랫 엔드밀을 사용한 자유곡면 가공 시 발생하는 커스 높이를 해석하기 위한 모델을 제시하였다.
2. 자유곡면 가공 시 곡률에 따른 가공 오차를 제거하기 위한 adaptive isocurve 알고리즘을 도입 가공 경로를 재생성 하였다.
3. Adaptive isocurve를 이용한 가공 경로 생성 시, scale factor를 도입하여 자유곡면을 최단 시간에 가공할 수 있는 가공 경로를 생성하였다.

후기

본 논문은 한국과학재단 지원으로 스텐더트 플랫폼형 공작기계를 위한 최적 가공 기술 개발과 관련하여 수행되었습니다. 관계자 여러분께 진심으로 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이태휘, 이상조 “분할가공법에 의한 자유곡면 가

공,” 대한기계학회논문집(A) 제21권 제12호 pp. 2114-2120, 1997.

2. 윤승용, “스튜어트 플랫폼형 공작기계를 이용한 표면형상예측 및 가공 시뮬레이터 개발,” 연세대학교 석사학위논문, 1998.
3. G.W.Vickers, K.W. Quan “Ball-Mills Versus End-Mills for curved Surface Machining,” Transactions of ASME Vol. 111, pp. 22-26, 1989.
4. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, “CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공,” 희중당
5. Yean-Ren Hwang and Cha-shong Liang "Cutting Errors Analysis for Spindle-Tilting Type 5-Axis NC Machines," Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, pp. 399-405, 1998.
6. Gershon Elber & Elaine Cohen "Toolpath generation for freeform surface models," Computer-Aided Design, Vol. 26, pp. 490-496, June, 1994.
7. H Grabowski and X Li "Coefficient formula and matrix of nonuniform B-spline functions," Computer-Aided Design, Vol. 24, pp. 637-642, December, 1992.
8. B K Choi, W S Yoo and C S Lee "Matrix representation for NURB curves and surfaces," Computer-Aided Design, Vol. 22, pp. 235-240, May, 1990.
9. E. Agson Gani, J.P. Kurth, P. Vanherck and B. Lauwers "A Geometrical Model of the Cut in Five-Axis Milling Accounting for the Influence of Tool Orientation," Int. J. Adv. Manuf. Technology, Vol. 13, pp. 677-684, 1997.
10. Y.N. Hu, W.C. Tse, Y.H. Chen and Z.D. Zhou "Tool-Path Planning for Rough Machining of a Cavity by Layer-Shape Analysis," Int. J. Adv. Manufacturing Technology, Vol. 14, pp. 321-329, 1998.
11. Catania .G., A computer-aided prototype system for NC rough milling of free-form shaped mechanical part-pieces. Computers in Industry, Vol. 20(2), pp. 275-393, 1991.