

〈論 文〉

5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구(I)

공구축 방향 벡터와 포스트 프로세싱

조현덕* · 전용태** · 양민양*

(1993년 2월 12일 접수)

A Study on the Machining of Sculptured Surfaces

by 5-Axis CNC Milling (I)

Cutter Axis Direction Vector and Post-Processing

H. D. Cho, Y. T. Jun and M. Y. Yang

Key Words : 5-Axis CNC Milling(5-축 CNC 밀링), Cusp(커셉), Cutter Axis Direction(공구축 방향), End Mill(엔드밀), Sculptured Surface(자유곡면)

Abstract

This study deals with the machining of sculptured surfaces on 5-axis CNC milling machine with end mill cutter. The study (I) has the following contents. In 5-axis CNC milling, CL-data consist of CC-data and cutter axis direction vector at the CC-point. Thus, in machining of the sculptured surface on 5-axis CNC milling machine, determination of the direction vector of the milling cutter is very important. The direction vector is obtained by the fact that bottom plane of the milling cutter must not interfere with the free-form surface being machined. The interference is checked by the z-map method which can be applied in all geometric types of the sculptured surfaces. After generating NC part programs from 5-axis post-processing algorithms, sculptured surfaces were machined with 5-axis CNC milling machine (CINCINNATI MILACRON, 20V-80). From these machining tests, it was shown that the machining of the free-form surfaces on 5-axis CNC milling machine with the end mill has smaller cusp heights and shorter cutting time than on 3-axis CNC milling machine with the ball-end mill. Thus, 5-axis CNC end milling was effective machining method for sculptured surfaces. The study (II) deals with the prediction of cusp height and the determination of tool path interval for the 5-axis machining of sculptured surfaces on the basis of study (I).

기 호 설 명

$O^{(i,j)}$: 곡면과 커터의 접촉점(cc-point)에 대한 위치 벡터

$T_w^{(i,j)} - T_f^{(i,j)} - T_a^{(i,j)}$: 접촉점에서 국부 좌표계

$X - Y - Z$: 고정 좌표계

$P_{wfa}^{(i,j)}$: 국부 좌표계로 표현된 엔드밀 밀면의 위치 벡터

$P_{XYZ}^{(i,j)}$: 고정 좌표계로 표현된 엔드밀 밀면의 위치 벡터

$\alpha_x^{(i,j)}$: X축을 중심으로한 국부 좌표계의

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구실

	회전각
$\alpha_f^{(i,j)}$: $T_f^{(i,j)}$ 축을 중심으로 회전한 국부 좌표계의 회전각
${}^u T_w^{(i,j)}, {}^\mu T_f^{(i,j)}$: X-Y-Z 좌표계에 대한 $T_w^{(i,j)}$ 축과 $T_f^{(i,j)}$ 축의 방향 단위 벡터
${}^u T_a^{(i,j)}$: X-Y-Z 좌표계에 대한 공구축 방향 벡터
$N^{(i,j)}$: 접촉점에서의 곡면의 법선 단위 벡터
$P_v^{(i,j)}$: 피벗점의 위치 벡터
A, B	: NC 코드에서 공구축의 회전각
R	: 공구 반경(mm)
L_t	: 공구 길이(mm)
L_p	: 게이지 선으로부터 피벗 점까지의 거리(mm)
f	: 접촉점에서의 이송 속도(mm/min)
SL_p	: NC 코드의 한 블록에 의한 피벗점의 직선 이동 거리(mm)
FRN	: NC 코드에 입력되는 피벗점에서의 이송 속도(1/sec)
$U^{(k)}$: 선형 보간중 k 단계에서의 공구축 방향 벡터
$\Delta S^{(i)}$: k 단계의 미소 구간
S	: 선형 보간을 위한 전체 구간
δ_{sm}	: 선형 보간의 전체 구간에서의 최대 유효 오차
$\delta_{sm}^{(k)}$: k 단계의 미소 구간에서의 최대 오차
$\delta_r^{(k)}$: k 단계의 미소 구간에서의 공구 회전에 의한 오차
δ_a	: 허용 가공 오차

1. 서 론

금형 제작은 일반적으로 생산성이 낮고, 기하학적 복잡성에 따라 그 차이는 더욱 크게 된다. 따라서 생산성과 정밀도를 높이기 위해 최적의 가공방법을 선택할 필요가 있다. 금형은 일반적으로 선삭, 밀링, 연삭, 방전가공(EDM) 등으로 가공된다. 이들 중, CAD/CAM의 발달로 밀링 가공은 금형 가공에서 가장 유리한 가공으로 되고 있다.

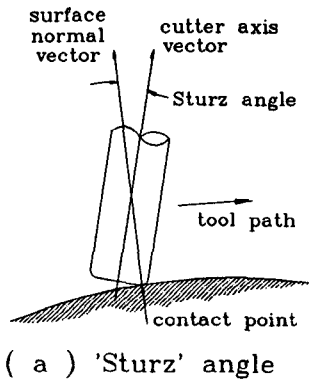
CNC 기계와 소프트웨어 기술의 발달로 자유곡면 가공이 가능하게 되었는데, 이것은 볼 엔드밀

공구에 의존한 가공이었다. 볼 엔드밀에 의한 가공은 커셉(cusp)을 반드시 발생시킨다. 따라서 커셉을 줄이기 위해서는 공구경로 폭을 작게해야 하므로 가공시간이 많이 걸리고, 또 폴리싱(polishing)과 같은 후가공에도 많은 시간이 소요된다. 최근 후가공의 능률을 높이기 위하여 로봇에 의한 자동 폴리싱을 수행하는데, 이때에도 큰 커셉을 제거하는데는 많은 시간과 복잡한 공정이 필요하며 장치비용이 비싸다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 엔드밀 공구를 사용한 5-축 CNC 밀링에 의한 자유곡면 가공이 시도되고 있다. 그래서 본 연구는 엔드밀을 사용한 5-축 CNC 밀링에 의한 자유곡면 가공방법을 개발한다.

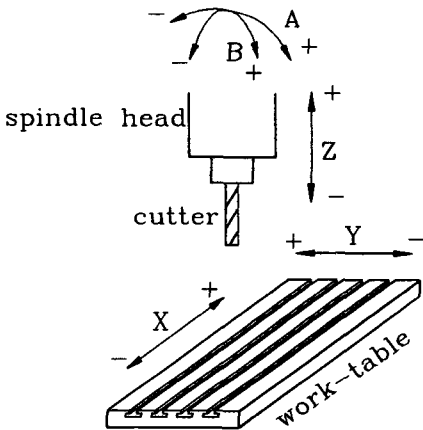
엔드밀 공구를 사용한 5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공을 위해서는 공구축의 방향 벡터를 결정해야 한다. 공구축 방향 벡터는 틸팅 각과 회전각으로 구성된다. 완만한 곡면의 5-축 가공에서는 곡면 위 CC점에서의 곡률로 공구축 방향을 결정할 수가 있다.⁽¹⁾ 그러나 CC점 이외의 엔드밀 바닥면에서 간섭이 생길 수 있으므로 일반적인 자유곡면이나 정밀가공을 위해서는 적절한 방법이 아니다. 그리고 공구축 방향의 미소한 오차라도 큰 가공오차를 발생시킨다. 따라서 지금까지 5-축 CNC 기계로 가공된 곡면은 주로 블록면과 아주 완만한 오목면이었다. 본 연구에서는 일반적인 자유곡면을 가공하기 위해, 접촉점을 기준으로 엔드밀 바닥면이 자유곡면에 간섭(interference)을 일으키지 않는 최소 방향각을 공구축 방향 벡터로 결정하였다. 즉, CC 점에서 곡면과 접촉하는 디스크(disk)가 자유곡면과 최근접하여 움직이는 상황으로 구성된다. 이때 간섭 체크는 곡면과 엔드밀 바닥면의 Z-value를 비교하는 Z-map 방법을 사용하였다. 공구축 방향 벡터가 결정되면, 5-축 가공에 필요한 포스트 프로세싱을 수행하여 NC 파트 프로그램을 얻을 수 있다. 가공 실험을 위한 곡면의 샘플은 블록면, 오목면, 안장면(saddle type surface), 자유곡면을 선택하였다. 이러한 곡면들은 3-축 CNC 볼 엔드 밀링과 5-축 CNC 엔드 밀링으로 동일한 가공조건에 대하여 가공되었다. 커셉에 의한 가공면의 기하학적인 형상에 대해 비교한 결과, 5-축 CNC 엔드 밀링에 의한 자유곡면 가공은 매우 효율적이었다.

5-축 CNC 밀링은 스트르즈 밀링(sturz milling)이라고도 하며, 피이드(feed) 방향과 가공폭 방향으

로 주축을 기울여서 가공한다. 가공면의 법선과 주축이 이루는 각을 스트르즈 각(Sturz angle)이라고 하며,⁽³⁾ 피이드 방향으로 기울어진 각을 틸팅 각(tilting angle), 가공폭 방향으로 회전한 각을 회전각(rotation angle)이라고 한다. 본 연구에서 사용한 신시네티 밀리크론사(Cincinnati Milacron Co.)의 5-축 CNC 머시인 센타(machining center)는 스피들 캐리어(spindle carrier)가 정밀한 랙과 피니언(precision rack and pinion)에 의해 두 방향으로 회전하는 타입(type)이다. X 축에 대한 회전각을 A, Y 축에 대한 회전각을 B라고 하며, 모두 오른나사의 전진 방향이 양(+)이 된다.⁽⁴⁾ Fig. 1은 스트르즈 각과 본 연구에서 사용한 5-축 CNC 밀링의 기계운동 방향을 보여 준다.



(a) 'Sturz' angle



(b) 5-axis machine movements

Fig. 1 Sturz angle and 5-axis machine movements

2. 본 론

2.1 공구축 방향 벡터

자유곡면의 5-축 가공에 있어서 공구축 방향 벡터는 가공 후 커셉 높이를 최소로 하며, 허용 회전 운동 범위를 벗어나지 않아야 한다. Fig. 2는 자유곡면 가공에서의 CC 점, 밀링 커터의 밀면의 위치, 커터 축 방향을 각각 보여 준다. 본 연구에서, 공구경로는 Y-Z 평면에 평행한 평면내에 있으며, X 축은 공구경로 방향과 수직이다. Fig. 2(a)에서와 같이 픽피드(pick feed)에 대한 파라메타를 i , 공구경로내의 미소 증분에 따른 파라메타를 j 라고 하면 임의의 CC 점은 $O^{(i,j)}$ 로, CC 점의 위치 벡터는 $O^{(i,j)}$ 로 된다. 여기서 X-Y-Z 좌표는 고정 좌표계(global coordinate)이다. Fig. 2(b)에서의 $P_{wfa}^{(i,j)}$ 는 $T_w^{(i,j)} - T_f^{(i,j)} - T_a^{(i,j)}$ 좌표에 대한 엔드밀 바닥면을 묘사하는 확장된 위치 벡터(extended position vector)이다. 따라서 $P_{wfa}^{(i,j)}$ 는 (1)식으로 표현할 수 있다.

$$P_{wfa}^{(i,j)} = \begin{bmatrix} r \sin \theta \\ R - r \cos \theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 R 은 공구반경이며, r 은 0에서 R 범위 내에 있고, θ 는 0° 에서 360° 범위에 있다. $T_w^{(i,j)} - T_f^{(i,j)} - T_a^{(i,j)}$ 좌표계는 X-Y-Z 좌표계로부터 $\alpha_x^{(i,j)}$ 와 $\alpha_y^{(i,j)}$ 의 각에 대해 회전이동되었으므로, 밀링 커터 바닥면의 확장된 위치 벡터는 (2)식과 같은 관계를 갖는다.

$$P_{XYZ}^{(i,j)} = M \cdot P_{wfa}^{(i,j)} \quad (2)$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X^{(i,j)} \\ 0 & \cos G & -\sin G & Y^{(i,j)} \\ 0 & \sin G & \cos G & Z^{(i,j)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H & 0 & \sin H & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin H & 0 & \cos H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G = \alpha_x^{(i,j)}, H = \alpha_y^{(i,j)} \quad (4)$$

$$O^{(i,j)T} = (X^{(i,j)}, Y^{(i,j)}, Z^{(i,j)}, 1) \quad (5)$$

Fig. 2(c)에서와 같이, $\alpha_x^{(i,j)}$ 는 X축 주위를 반시계 방향으로 회전할 때 Y축으로 부터의 $T_f^{(i,j)}$ 축의 각 위치이고, $\alpha_y^{(i,j)}$ 는 $T_f^{(i,j)}$ 축 주위를 반시계 방향으로

회전할 때 X축으로부터의 $T_w^{(i,j)}$ 축의 각 위치이다.

공구축의 방향 벡터를 결정하는 $\alpha_x^{(i,j)}$, $\alpha_y^{(i,j)}$ 는 자유곡면과 공구 바닥면 사이에서 간섭이 발생하지

않고 커셋 높이가 최소가 되는 각(angle)이어야 한다. 따라서 $P_{XYZ}^{(i,j)}$ 벡터의 위치 좌표값을 (P_x , P_y , P_z)라고 하고, (P_x , P_y) 위치에서 자유곡면의 Z 값을 $Z(P_x, P_y)$ 라 하면, 간섭을 피하기 위해서는 (6)식과 같은 관계를 갖는다.

$$P_z \geq Z(P_x, P_y) \quad (6)$$

$\alpha_x^{(i,j)}$ 와 $\alpha_y^{(i,j)}$ 는 다음과 같은 순서로 밀링 커터의 방향을 조절함으로써 효과적으로 얻을 수 있다.

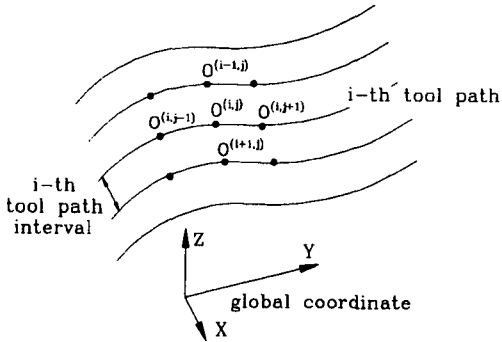
1단계 : Fig. 3에서와 같이, 밀링 커터 바닥면이 CC 점에서의 공구경로 방향에 대해 대칭으로 놓이게 하고 CC 점에서 가장 멀리 떨어진 위치점과 곡면이 만나도록 하는 공구축의 초기 틸팅 각 $\alpha_x^{(i,j)}$ 를 설정한다. 이때 초기 회전각 $\alpha_y^{(i,j)}$ 는 영(0°)으로 한다.

2단계 : 밀링 커터 바닥면의 좌측에서만 간섭이 발생하면 $\alpha_y^{(i,j)}$ 를 양의 방향(positive direction)으로 조절한다.

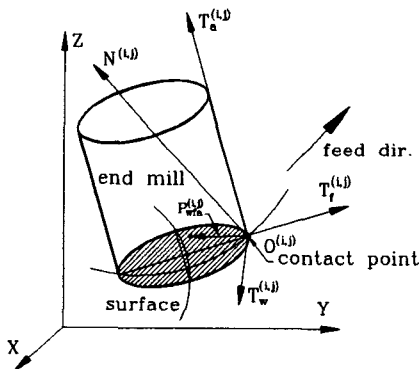
3단계 : 밀링 커터 바닥면의 우측에서만 간섭이 발생하면 $\alpha_y^{(i,j)}$ 를 음의 방향(negative direction)으로 조절한다.

4단계 : 밀링 커터 바닥면의 양측에서 동시에 간섭이 발생하면 $\alpha_x^{(i,j)}$ 를 음의 방향(negative direction)으로 조절한다.

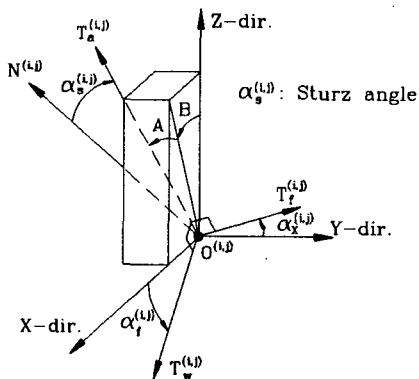
5단계 : 2, 3, 4단계를 되풀이하여 간섭이 발생하지 않을 때 계산을 중지하고, 최소의 방향값을 결정한다.



(a) CC-point on sculptured surface



(b) The position of the milling cutter



(c) The direction vector of the milling cutter

Fig. 2 Cutter contact point and the direction of the milling cutter in machining of the sculptured surfaces on five-axis CNC milling machine

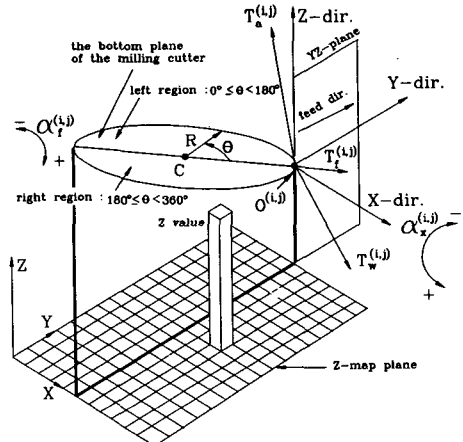


Fig. 3 Adjustment of the milling cutter direction using Z-map

여기서, 좌우측에서의 간섭감지는 (6)식으로 할 수 있고, 각 단계에서의 각도 조절을 위해 초기 증분각을 0.1°로 하였으며 미지해를 구하기 위해 Newton method가 사용되었기 때문에 미소 증분각은 0.1° 이하가 된다. 이때, 공구선택이 적절하다면, $\alpha_x^{(i,j)}$ 각의 조절로써 수렴은 반드시 보장되나, 기계 회전각의 구속조건을 벗어나는 때는 2.2절의 내용으로 해결할 수 있다.

따라서 공구자세를 묘사하는 공구축의 방향 단위 벡터 ${}^uT_a^{(i,j)}$ 와 $T_w^{(i,j)}$, $T_f^{(i,j)}$ 축의 방향 단위 벡터 ${}^uT_w^{(i,j)}$, ${}^uT_f^{(i,j)}$ 는 다음과 같다.

$${}^uT_w^{(i,j)T} = (\cos H, \sin G \cdot \sin H, -\cos H \cdot \sin H) \quad (7)$$

$${}^uT_f^{(i,j)T} = (0, \cos G, \sin G) \quad (8)$$

$${}^uT_a^{(i,j)T} = (\sin H, -\sin G \cdot \cos H, \cos G \cdot \cos H) \quad (9)$$

2.2 회전각과 구속 조건에 따른 보정

공구축 방향 벡터로 주축의 틸팅 각과 회전각을 알 수 있는데, 본 연구에 사용된 5-축 CNC 밀링기는 Fig. 2(c)에서와 같이, Y축을 중심으로 하여 B가 회전할 때 틸팅 각 A는 공구축과 Y축이 이루는 평면에 수직하는 중심으로 회전한다.⁽⁴⁾ 따라서 틸팅 각과 회전각 A, B는 Fig. 2(c)로 표현되며, (10)식과 (11)식으로 나타난다.

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{-\sin \alpha_x^{(i,j)} \cos \alpha_f^{(i,j)}}{\sqrt{\sin^2 \alpha_f^{(i,j)} + \cos^2 \alpha_x^{(i,j)} \cos^2 \alpha_f^{(i,j)}}} \right) \quad (10)$$

$$B = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_f^{(i,j)}}{\cos \alpha_x^{(i,j)} \cos \alpha_f^{(i,j)}} \right) \quad (11)$$

모든 5-축 기계는 기계 운동(machine movement)에 대한 구속 조건을 갖는데, 본 연구에 사용된 밀링기의 회전 운동 A, B는 -25°와 25°범위 내에 존재해야 한다. (10)식과 (11)식에 의하여 구해진 A, B가 기계운동의 구속조건을 벗어나면 원하는 형태의 가공이 불가능하게 된다. 그래서, A, B가 기계운동의 구속조건을 만족할 때까지 접촉점 $O^{(i,j)}$ 의 Z 값을 미소하게 증가시키면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 이때, 새로운 접촉점의 위치 좌표는 다음과 같다.

$$O^{(i,j)T} = (X^{(i,j)}, Y^{(i,j)}, Z^{(i,j)} + n \cdot \Delta Z^{(i,j)}) \quad (12)$$

여기서 n은 A와 B가 기계 운동의 구속 조건 내에 존재할 때까지의 반복계산 횟수이며, $\Delta Z^{(i,j)}$ 는 Z

값의 미소 증분값이다. 물론, 이러한 문제를 해결하기 위해 직경이 작은 새로운 공구로 교체할 수도 있고 공구경로를 바꿀 수도 있다. 이러한 방법의 해결책은 공구 선택과 공구경로 결정 측면에서 더 연구할 필요가 있다. 본 연구에서 CC 점의 Z 값 증분방법은 주어진 공구와 공구경로에서 기계 회전 운동의 제한에 대한 해결책이다.

2.3 포스트 프로세싱

(1) 피벗 점의 위치 좌표

5-축 NC 파트 프로그램에서 공구 위치(X, Y, Z)는 피벗 점의 위치이며, 공구축 방향(A, B)는 피벗 점을 원점으로 한 주축 회전각이다.⁽⁴⁾ Fig. 4는 피벗 점의 위치 좌표를 나타낸다. 피벗 점의 위치 좌표는 벡터 합으로 구할 수 있는데, (13) 식으로 나타낸다.

$$P_v^{(i,j)} = O^{(i,j)} - R \cdot {}^uT_f^{(i,j)} + (L_t + L_p) \cdot {}^uT_a^{(i,j)} \quad (13)$$

따라서 (13)식에 의한 피벗 점의 위치값과 (10), (11)식에 의한 회전각으로 5-축 기계의 NC 코드(NC-code)를 얻을 수 있다.

(2) 이송비의 조절

3-축 CNC 밀링에서와 같이 일정한 이송비(feed rate)를 5-축 CNC 밀링기에 입력하면 가공 속도가 매우 느려지는 것을 경험할 수 있다. 이것은 5-축 CNC 밀링기의 이송비가 피벗 점(pivot point)의 선형 이동(linear movement)과 회전 이동(swivel movement)에 대한 이송 속도로 되므로 실제 가공에 관여하는 공구끝(tool tip)의 이송비와 큰 차이가 생기기 때문이다. 본 연구에 사용된 신시네티 5-축 CNC 밀링기의 컨트롤러 A950에서 이송

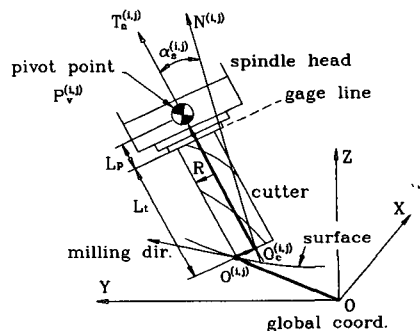


Fig. 4 The position of the pivot point

속도는 피벗 점에 대한 벡터 궤적(vector path)에 대하여 계산하도록 되어 있다.⁽⁴⁾ 두 점간의 벡터 궤적 SL_p [mm]는 (14)식과 같이 계산된다.

$$SL_p = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2 + \mu(L_p + L_t)\Delta A + \mu(L_p + L_t)\Delta B} \quad (14)$$

여기서 μ 는 단위 환산계수로 (0.01745×25.4)이며, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 는 두 피벗 점간의 선형 이동 변위[mm], $\Delta A, \Delta B$ 는 두 피벗 점간의 회전 변위[degree]이다. 따라서 신시네티 5-축 CNC 밀링기에서, 이송비 표현 방법의 하나인 G93(1/T: inverse time)으로 표현하면 (15)식과 같이 이송비 FRN[1/sec]을 구할 수 있다.

$$FRN = \frac{f}{60SL_p} \quad (15)$$

여기서 f 는 가공에 직접 영향을 주는 공구 끝점의 이송비[mm/min]이다. NC 파트 프로그램에 FRN을 입력하면 실제 가공에 참여하는 공구 끝점에서는 이송비 f 로 일정한 가공이 진행된다.

(3) 공구의 회전 속도 조절

Fig. 5에서와 같이, 5-축 CNC 엔드 밀링은 에지 모양(edge shape)의 가공면을 남긴다. 에지의 높이는 공구축의 방향과 이송 및 회전속도에 좌우된다. 따라서, 주어진 표면거칠기 R_{max} 에 대하여 공구의 회전속도는 (16)식으로 조절할 수 있다.

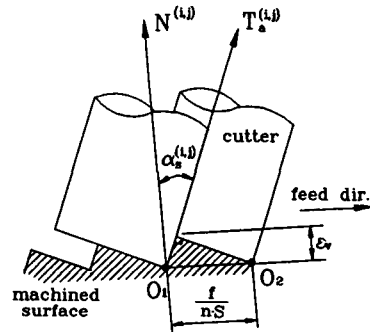
$$\epsilon_v = \frac{f}{2nS} \sin(2\alpha_s^{(i,j)}) \quad (16)$$

여기서 f 는 CC 점에서의 이송속도[mm/rev], n 는 엔드밀 커터의 날 수, $\alpha_s^{(i,j)}$ 는 스트르즈(sturz) 각 $^\circ$, ϵ_v 는 이송방향의 표면조도[R_{max}]이다. Fig. 6은 3-축 볼 엔드 밀링과 5-축 엔드 밀링에 의한 직선가공에서의 이송방향의 표면조도를 보여주는데, 공구의 회전속도를 S 보다 크게 지정하면 주어진 이송방향의 표면조도를 얻을 수 있다.

(4) 공구 경로의 선형화(linearization)

공구축의 회전각이 서로 다른 직선가공에서는 피벗 점의 직선운동과 함께 공구의 회전이 발생하므로 과절삭(over cut)이 생긴다. 이러한 결함을 피하기 위하여 허용 가공오차에 대한 공구경로의 선형화가 필요하다. 즉 피벗 점의 궤적이 원호에 접근하도록 하면 가공에 관여하는 공구 끝점의 궤적은 직선이 된다.^(6,7)

Fig. 7은 NC 코드의 한 블록에 대한 선형보간



f: feedrate at cc-point(mm/min)
n: the number of cutting edge
S: speed(rpm)
 $\alpha_s^{(i,j)}$: Sturz angle
 ϵ_v : machining error according to rotation speed

Fig. 5 The relation between feeding length and machining error according to one revolution of the end mill within $O^{(i,j)}O^{(i,j+1)}$

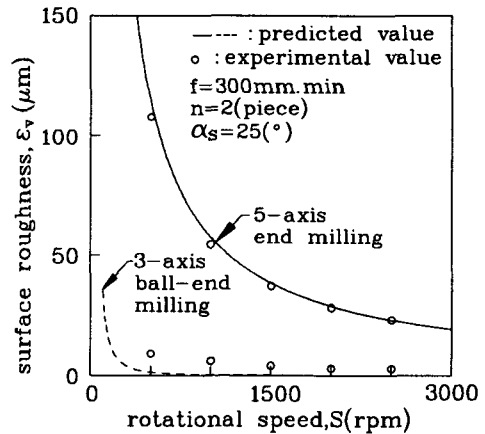


Fig. 6 Surface roughness ϵ_v with various rotational speed S in 5-axis end milling and 3-axis ball-end milling process

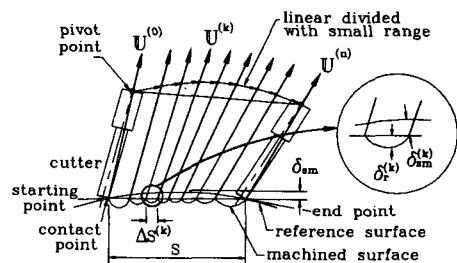


Fig. 7 Linearization for 5-axis machining of the sculptured surface

구간내에서의 공구축의 방향의 변화를 보여 준다. 허용 가공오차에 대한 전체 선형보간 구간(total interval of linear interpolation)을 3-축 가공에서와 같은 방법으로 구하며, 두 끝점에서의 공구축 방향 단위 벡터($U^{(0)}, U^{(n)}$)를 계산한다. 이때 선형보간 구간인 두 점사이에서 공구축의 방향은 선형변화를 갖는다. 그리고 공구축 방향의 변화에 따른 가공오차가 제한된 범위를 넘지 않도록 미소 가공 길이를 구한다. 여기서 두 끝점에 의한 직선과 자유곡면사이의 가공오차를 δ_{sm} , 미소 직선가공 구간 k 에서 직선과 곡면과의 최대 가공오차를 $\delta_{sm}^{(k)}$, 미소 구간에서의 공구회전에 의한 오차를 $\delta_r^{(k)}$ 라고 하면 허용오차 δ_a 와의 관계는 다음과 같다.

$$\delta_{sm} < \delta_a \tag{17}$$

$$\delta_{sm}^{(k)} + \delta_r^{(k)} \leq \delta_a \tag{18}$$

그리고 접촉점에서 피벗점으로 향하는 방향 단위 벡터 $U^{(k)}$ 는 다음과 같다.

$$U^{(k)} = V^{(k)} / |V^{(k)}| \tag{19}$$

여기서

$$V^{(k)} = U^{(0)} + (U^{(n)} - U^{(0)}) \sum_{i=1}^k \frac{\Delta S^{(i)}}{S} \tag{20}$$

그런데, 과절삭 오차 $\delta_r^{(k)}$ 와 공구축 방향 변화 $\Delta\theta^{(k)}$ 사이의 관계는 (21)식으로 근사화 할 수 있다.

$$\delta_r^{(k)} \cong \sqrt{(L_t + L_p)^2 + R^2} \left(1 - \cos \frac{\Delta\theta^{(k)}}{2} \right) \tag{21}$$

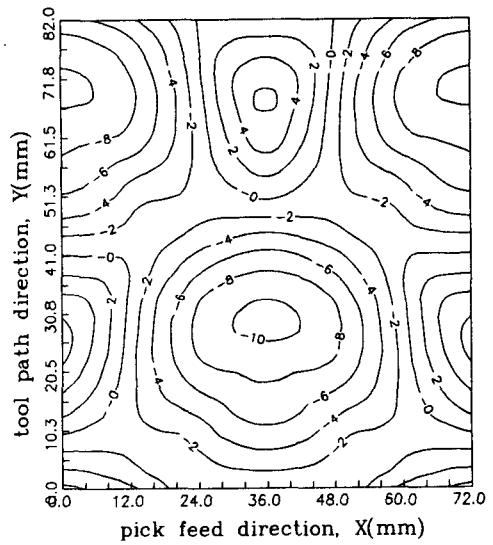
여기서 $\Delta\theta^{(k)}$ 는 $\cos^{-1}(U^{(k-1)} \cdot U^{(k)})$ 이다. 따라서, 미소 구간은 주어진 δ_{sm} 와 δ_a 에 대하여 (18)식과 (21)식으로부터 구해 진다.

3. 실험

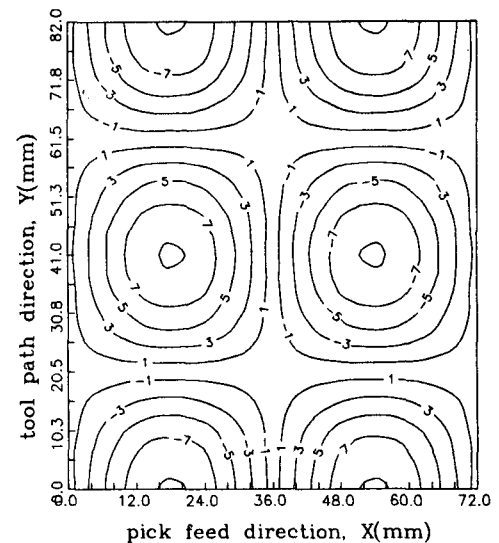
측정 데이터가 주어지면 곡면 모델(surface model)에 의한 자유곡면이 표현되고, 본 연구의 공구축 방향 결정과 포스트 프로세싱으로 5-축 NC 파트 프로그램을 얻을 수 있다. 가공 실험을 위해 볼록면, 오목면, 안장면, 자유곡면을 선택하였다. 이러한 샘플은 볼 엔드밀 커터에 의한 3-축 가공과 엔드밀 커터에 의한 5-축 가공을 각각 수행하여 가공면의 커섭을 비교하였다. 3-축 가공과 5-축 가공에 대한 절삭 조건은 Table 1과 같으며, 두 가공 방법은 동일한 가공 조건이 선택되었다. 이때 자유곡

Table 1 Cutting conditions

	5-axis	3-axis
tool with 2 flutes	end mill	ball end mill
V(rpm)	800	800
f(mm/min)	200	200
R(mm)	8	8
d(mm)[$X^{(i+1,j)} - X^{(i,j)}$]	4	4
tool : HSS	workpiece : bakelight	



(a) Tilting angle A(°)



(b) Rotation angle B(°)

Fig. 8 Swivel movements for 5-axis machining of the sculptured surface

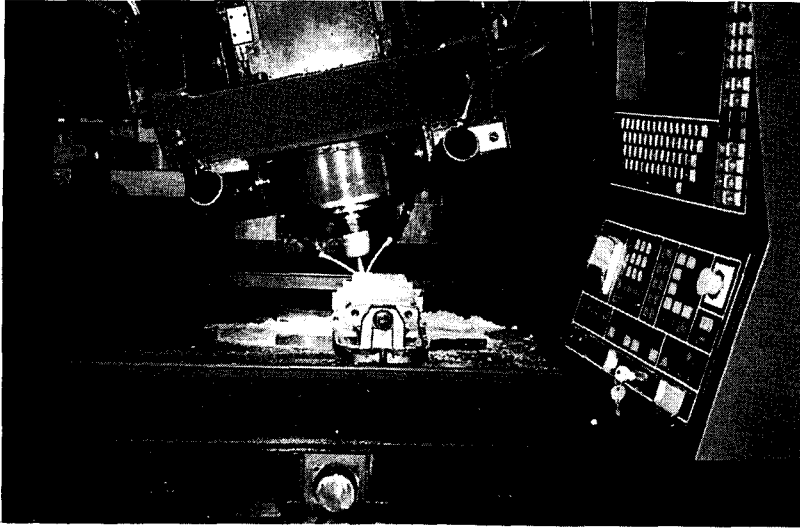


Fig. 9 In 5-axis CNC milling machining

면을 5-축 가공하기 위한 틸팅 각 A 와 회전각 B 를 계산하여 등고선으로 표현하면 Fig. 8과 같이 된다. Fig. 9은 본 연구에서 사용한 신시네티 밀라크론(CINCINNATI MILACRON)사의 모델명 20 V-80인 5-축 CNC 밀링 기계에 의한 가공 상황을 보여 준다. 그리고, 레이저 스케너를 갖는 3차원 CMM(3-dimensional coordinate measuring machine, WEGU Messtechnik, model MMC 800)으로 가공면의 스켈럼을 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 10은 샘플 곡면들에 대해 엔드밀 커터로 5-축 CNC 밀링을 수행한 후의 가공 결과를 보여 준다. 5-축 CNC 밀링 가공과 비교하기 위하여 자유곡면의 일반적인 가공인 볼 엔드밀 커터로 3-축 CNC 밀링을 수행한 후의 가공 결과는 Fig. 11로 되었다. Fig. 12는 3-축 볼 엔드 밀링과 5-축 엔드 밀링 가공후의 자유곡면의 볼록면 단면과 오목면 단면에 대해 스켈럼을 보여 준다. Fig. 12에서는 5-축 엔드 밀링에 의한 가공면이 3-축 볼 엔드 밀링에 의한 가공면 보다 약 10배 이상 작은 커섭을 발생시켰다.

엔드밀에 의한 5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에서 커섭의 크기는 곡면 형태, 공구 크기, 공구경로 폭에 따라 차이가 있다. 그러나 5-축 엔드

밀링 가공에서 3-축 볼 엔드 밀링에서보다 커섭이 매우 작게 생기므로, 기계가공 시간과 폴리싱 시간을 크게 줄일 수 있다. 그리고, 허용 가공오차에 따라 연마 공정을 생략할 정도로 고운 표면을 얻을 수 있다.

엔드밀 공구를 사용한 5-축 CNC 밀링에 의한 자유곡면 가공의 잇점을 정량적으로 고찰하기 위해, 곡률반경 100 mm를 갖는 원호가 직선을 따라 스윙하는 오목한 곡면에 대하여 커섭⁽⁵⁾과 공구경로 폭을 3-축 가공과 비교하면 Table 2, Table 3과 같다. 본 연구에 의해 구해진 공구축 방향을 나타내는 스트즈 각(Sturz angle)은 4.6° 로 모든 공구 경로에서 일정하다. Table 2에서와 같이, 동일한 공구경로 폭에 대하여 커섭의 크기는 5-축 가공에서 3-축 가공보다 100배 이상 작게 나타났다. 이것은 동일한 가공 시간으로의 작업에 대해 폴리싱 시간의 단축 비를 의미한다. 그리고 Table 3에서와 같이, 허용 커섭에 대한 공구경로 폭은 10배 이상 크게 나타났는데, 이는 동일한 폴리싱 시간을 위한 가공시간의 단축을 의미한다. 따라서 적용된 예의 5-축 엔드 밀링은 정밀한 가공을 하는 동시에 가공 시간을 크게 줄일 수 있음을 의미한다. 그리고 더욱 정밀한 가공을 원할 수록 공구경로 폭의 비는 더욱 크게 되었다. 따라서 본 연구에서 공구축 방향 결정은 곡면 가공에 매우 유리하며, 가공물의 형태에 따라 커섭이 거의 없는 완전한 가공도 가능하며, 가공시간도 크게 단축됨을 알았다.

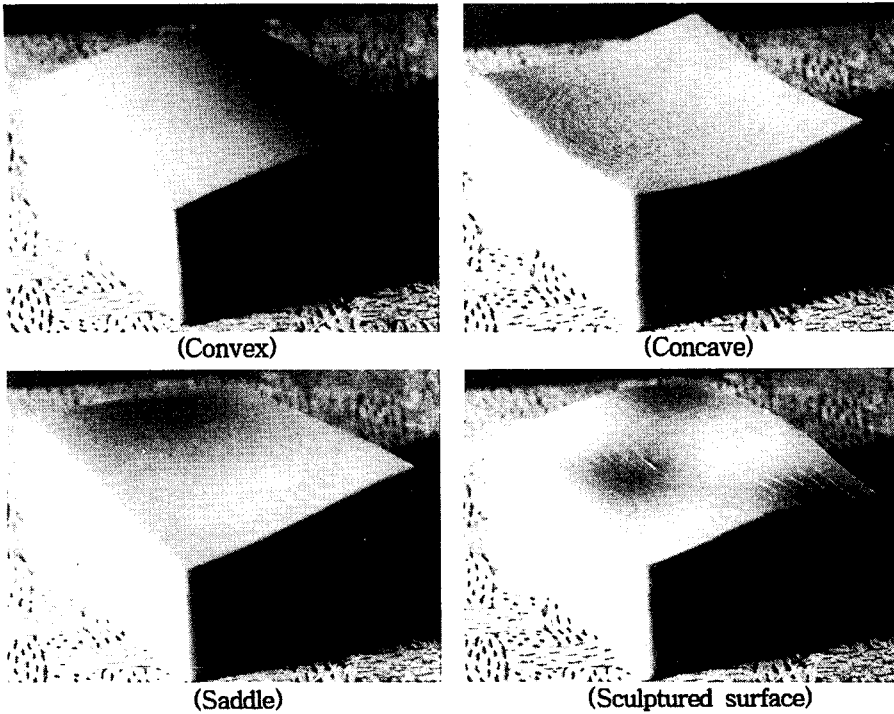


Fig. 10 Convex, concave, saddle and sculptured surface machined by 5-axis CNC milling machine with the end mill

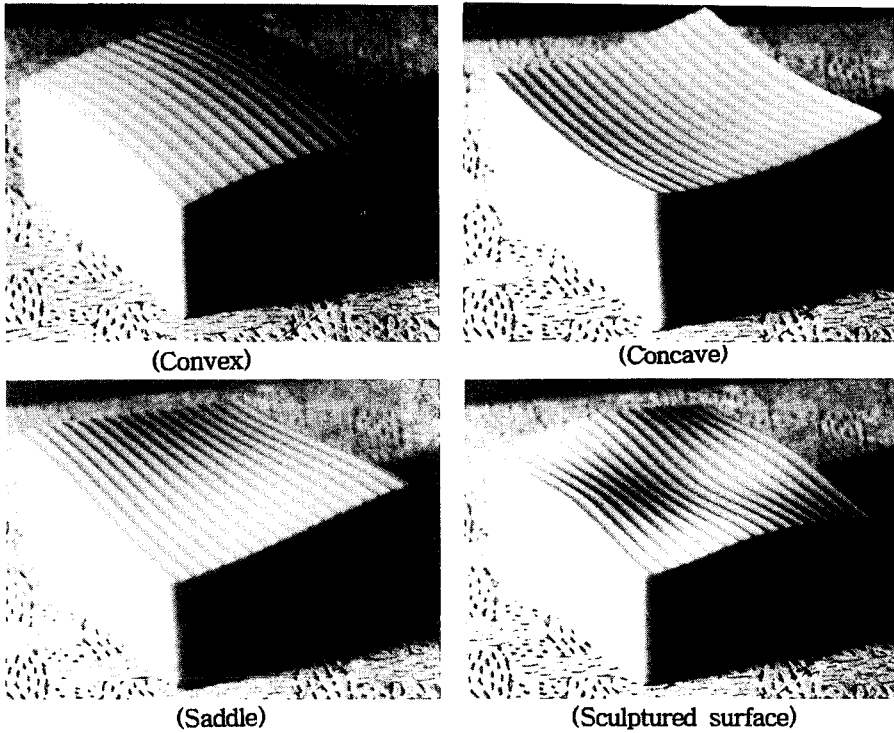
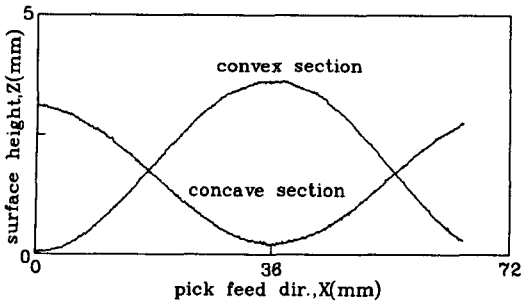
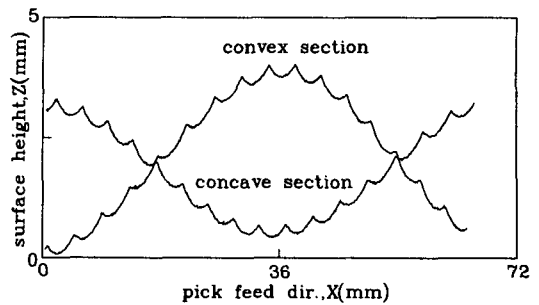


Fig. 11 Convex, concave, saddle and sculptured surface machined by 3-axis CNC milling machine with the ball-end mill



(a) By 5-axis machining



(b) By 3-axis machining

Fig. 12 Representation of surface scallop measured by 3-dimensional CMM with laser scanner in convex section part and concave section part of the sculptured surface type

Table 2 Cusp heights(or polishing time, t_p) of cylindrical concave surface

machining representation		cusp representation	equation representation
			$\rho = 100\text{mm}$ $R = 8\text{mm}$ $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{2\rho}\right)$ α_s : Sturz angle (4.6°) $T_c = -(\rho - \epsilon_c) \sin \theta$ $N_c = \rho - (\rho - \epsilon_c) \cos \theta$ $\frac{T_c^2}{R^2} + \frac{(N_c - R \sin \alpha_s)^2}{R^2 \sin^2 \alpha_s} = 1$
5-axis (end mill)		3-axis (ball-end mill)	ratio
d (mm)	cusp (μm) or $t_p (\times C_p \text{ min})$	cusp (μm) or $t_p (\times C_p \text{ min})$	
10	15.7	1570	100
8	5.9	970	164
4	0.37	233	630
2	0.032	57.7	1800
1	0.004	14.39	3597
0.5	0	3.59	

Table 3 Tool path interval(or cutting time, t_c) for maintaining cusp height(or polishing time, t_p) of cylindrical concave surface to constant

	5-axis	3-axis	ratio
	cusp (μm)	d (mm) or $t_c (\times C_c \text{ min})$	d (mm) or $t_c (\times C_c \text{ min})$
15	9.907	1.021	9.7
10	9.040	0.834	10.8
5	7.686	0.590	13.0
1	5.170	0.264	19.6

5. 결론

자유곡면의 5-축 CNC 밀링에 관한 연구로 5-축 가공이 자유곡면 가공에 매우 유리함을 알았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엔드밀 공구에 의한 5-축 CNC 밀링을 이용한 자유곡면 가공에서 공구축 방향 벡터를 구하였다.

(2) 5-축 포스트 프로세싱으로 NC 파트 프로그램을 작성하였다.

(3) 5-축 밀링에 의한 자유곡면 가공으로 정밀한

가공면과 가공시간을 단축하는 효과를 기대할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Tönshoff, H.K. and Hernandez Camacho, 1989, "Die Manufacturing by 5-Axis and 3-Axis Milling (Influence of Surface Shape on Cutting Conditions)," J. of Mechanical Working Technology, Vol. 20, pp. 105~119.
- (2) Takeshi Idemura and Yoshimi Takeuchi, 1991, "Machining and Grinding by 5-Axis Control Machining Center -For the Workpiece with Convex Sculptured Surface—, JSPE, Vol. 57, No. 11, pp. 99~104.
- (3) Frederick Mason, 1991, "5×5 for High-productivity Airfoil Milling," American Machinist, November, pp. 37~39.
- (4) Programming Manual for CINCINNATI MILACRON 20V&30V Series Vertical 5-Axis Machines, 1989, Publication No. 6-RR-87192, Part No. 3359651, Cincinnati Milacron Marketing Company Printed in U.S.A.
- (5) Vickers, G.W. and Quan, K.W., 1989, "Ball-Mills Versus End-mills for Curved Surface Machining," Trans. of the ASME, Journal of Engg. for Industry, Vol. 111, February, pp. 22~26.
- (6) Yoshimi Takeuchi et al, 1990, "5-Axis Control Machining Based on Solid Model," JSPE, Vol. 56, No. 11, pp. 2063~2068.
- (7) Takeshi Kishinami, Tsukasa Kondo, Hiroyuki Sinjo and Hiroshi Nakahara, 1989, "Computer-Controlled 5-Axis Machine Tool Based on Trochoidal Interpolation," JSPE, Vol. 55, No. 3, pp. 557~562.