

〈論 文〉

5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구(II)

커셉 높이 예측과 공구경로 결정

조현덕* · 전용태** · 양민양*

(1993년 2월 12일 접수)

A Study on the Machining of Sculptured Surfaces by 5-Axis CNC Milling (II)

The Prediction of Cusp Heights and the Determination of Tool Path Interval

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

Key Words : 5-Axis CNC Milling(5축 CNC 밀링), Cusp Height(커셉 높이), End Mill(엔드 밀), Milling Cutter Direction(공구축 방향), Sculptured Surfaces(자유곡면), Tool Path(공구경로)

Abstract

For the machining of the sculptured surfaces on 5-axis CNC milling machine, the milling cutter direction vector was determined in the study (I) with 5-axis post-processing. Thus, it was possible to cut the sculptured surfaces on five-axis CNC milling machine with the end mill cutter. Then, for smooth machined surfaces in five-axis machining of free-form surfaces, this study develops an algorithm for prediction of cusp heights. Also, it generates tool path such that the cusp heights are constrained to a constant value or under a certain value. For prediction of the cusp height between two basis points, a common plane, containing the line crossing two basis points and the summation vector of two normal vectors at two basis points, is defined. The cusp height is the maximum value of scallops on the common plane after end mill cutter passes through the common plane. Sculptured surfaces were machined with CINCINNATI MILACRON 5-axis machining center, model 20V-80, using end mill cutter. Cusp heights were verified by 3-dimensional measuring machine with laser scanner, WEGU Messtechnik GmbH.

— 기 호 설 명 —

$O^{(i,j)}$: 접촉점(cc-point)의 위치 벡터
 $T_w^{(i,j)}-T_j^{(i,j)}-T_i^{(i,j)}$: 접촉점에서의 국부 좌표계
 $X-Y-Z$: 고정 좌표계
 $O_l^{(i,j)}-O_j^{(i,j)}-O_n^{(i,j)}$: 접촉점에서 $O_n^{(i,j)}-O_l^{(i,j)}$ 평면을
 공통평면으로 하는 국부 좌표계
 $P_{wfa}^{(i,j)}, P_{x'z'}^{(i,j)}$: 국부 좌표계와 고정 좌표계로 표

현된 엔드밀 밀면의 위치 벡터
 $a_x^{(i,j)}, a_f^{(i,j)}$: $T_w^{(i,j)}-T_j^{(i,j)}-T_i^{(i,j)}$ 좌표계와 X
 $-Y-Z$ 좌표계 사이의 회전각
 $uT_w^{(i,j)}, uT_j^{(i,j)}$: $T_w^{(i,j)}$ 축과 $T_j^{(i,j)}$ 축의 방향 단위
 벡터
 $uT_a^{(i,j)}$: 공구축 방향 벡터
 $N^{(i,j)}$: 접촉점에서의 곡면의 법선 단위
 벡터
 f, f_g : 접촉점에서의 이송 속도(mm/min)

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구실

	와 공구 회전 속도(mm/min)
$uO_n^{(i,j)}$: (i, j) 위치에서의 법선 벡터와 $(i+1, j)$ 위치에서의 법선 벡터와의 합 단위 벡터
$O_i^{(i,j)}$: (i, j) 위치에서 $(i+1, j)$ 위치까지의 벡터
$P^{(i,j)}$: 공통평면의 위치 벡터
t_{p1}, t_{p2}	: 매개 변수
$O_n^{(i,j)}$: $O_i^{(i,j)}$ 벡터에 수직하는 공통평면 위의 벡터
$C_{XZ}^{(i,j+k)}(\theta),$ $C_{XYZ}^{(i,j+k)}(\theta)$: $O_i^{(i,j)} - O_j^{(i,j)} - O_n^{(i,j)}$ 좌표계와 $X-Y-Z$ 좌표계에 대하여, 공구가 (i, j) 위치의 공통평면을 지나갈 때 매개 변수 θ 에 따른 공통평면과 공구가 교차하는 위치 벡터
$\beta_i^{(i,j)}, \beta_j^{(i,j)}$: $O_i^{(i,j)} - O_j^{(i,j)} - O_n^{(i,j)}$ 좌표계와 $X-Y-Z$ 좌표계 사이의 회전각
e	: 공구가 공통평면을 완전히 지나칠 때까지의 미소 구간 수
$S_{XZ}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)}),$ $S_{XYZ}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)})$: $O_i^{(i,j)} - O_j^{(i,j)} - O_n^{(i,j)}$ 좌표계와 $X-Y-Z$ 좌표계에 대하여, $\frac{O_i^{(i,j)} O_j^{(i,j+k)}}{O_i^{(i,j)} O_j^{(i,j+k)}}$ 내에서 (i, j) 위치의 공통평면 위에 생기는 스텝업의 위치 벡터
$\epsilon_c^{(i,j)}$: (i, j) 위치와 $(i+1, j)$ 위치사이의 커셉 높이(mm)
$W_X^{(i,j)}$: $(i-1, j)$ 위치에서의 공구경로 폭(mm)
$L_c^{(i,j)}$: $(i, j-1)$ 위치에서 (i, j) 위치까지의 직선 보간 길이(mm)
T_c	: 가공 시간(min)

1. 서 론

5-축 CNC 밀링에서는 공구끝이 연속적으로 이동하면서 축의 방향도 연속적으로 바뀔 수 있다. 따라서 가공면에 따라 공구 선택을 다양하게 할 수 있으며, 적절한 공구의 선택과 공구경로의 결정으로 가공면을 완전하게 가공할 수도 있다.^(2,6) 자유곡면 가공에서도 엔드밀 공구와 함께 5-축 CNC 밀링을 사용하면 더욱 정밀가공이 가능하고, 밀링 가공과 후가공 시간이 단축되며, 후가공에 따른 가공오차도 줄일 수 있다. 그리고 공구날의 경사각을

크게 할 수 있으므로 경한 재료의 가공이 용이하고, 플런저(plunge)가공에서도 칩과 가공면과의 마찰 면적이 작으므로 연한 재료의 가공에서도 양호한 표면을 얻을 수 있다. 이러한 5-축 가공의 특징은 잘 알려져 있지만 구체적인 가공 메커니즘(machanism)에 대한 연구 발표는 많지 않다. 그중 하나로 연구(1)에서 자유곡면 가공을 위한 공구축 방향 벡터의 결정과 5-축 가공을 위한 포스트 프로세싱에 대하여 연구되었다.⁽¹⁾

엔드밀과 5-축 CNC 밀링에 의한 자유곡면 가공에서는 표면과 공구의 접촉점의 위치에 따라 공구축 방향 벡터가 변하게 되며, 공구축 방향은 커셉에 큰 영향을 미친다. 따라서 원하는 표면을 얻기 위해서는 먼저 커셉이 예측되어야 하고, 이러한 예측된 커셉으로부터 공구경로가 결정된다. 그런데 5-축 CNC 가공에서 공구경로 방향으로 공구 밀면의 투영에 의한 두 타원이 만나는 위치에서 가공면까지의 수직거리로 커셉을 예측한 연구가 있으나, 이는 공구경로가 직선에 가까운 제한된 곡면 가공에서만 적용이 가능했다.⁽⁶⁾ 그래서 본 연구에서는, 엔드밀 공구에 의한 5-축 자유곡면 가공후의 커셉을 가공 진행에 따라 정의된 공통평면 위에 나타나는 절삭 흔적을 수학적으로 모델링 함으로써 예측하였다. 5-축 밀링에 의한 가공면은 3-축에 비해 아주 낮은 커셉을 갖기 때문에 연삭 과정을 생략하고 폴리싱 단계로 넘어 갈 수 있다. 그래서 균일한 커셉을 갖는 표면이 필요하고 특히 로봇을 이용한 자동 폴리싱을 수행하고자 할 때는 폴리싱에 의한 형상변화를 줄이기 위해 더욱 균일 곡면이 필요하다. 그러나 수작업으로 폴리싱을 수행할 때는 직선으로의 공구경로가 용이할 수도 있다. 본 연구에서는 공구경로를 위의 두 경우에 대해 구하고 실험을 수행하였다. 즉, 상용되는 공구에 대해 허용 커셉으로 균일한 가공면을 갖는 공구경로와 주어진 커셉이하의 직교방식의 공구경로를 결정하였다. 사용된 밀링기는 신시네티 밀라크론의 5-축 머싱 센터(20V-80)이며, 공구는 밀링 커터이다. 그리고 주어진 공구 크기에 대하여 가공시간을 비교함으로써 적절한 공구를 선택할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 커셉 예측

5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에서는 엔

드밀 공구가 사용되었으며, 이때 공구와 곡면의 접촉점에 대하여 공구축 방향은 밀링 커터 바닥면과 곡면과의 간섭이 없고 커섭이 최소가 되도록 결정되었다.⁽¹⁾ 따라서 CL-데이터는 CC-데이터와 공구축 방향 벡터로 결정되어 5-축 CNC 엔드 밀링으로의 곡면가공이 가능하다. 이러한 가공에서 커섭을 정량화하기 위해 공통평면을 정의하고, 공통 평면에 생기는 공구의 스킨랩(scallop)을 수학적으로 모델링함으로써 커섭 높이를 구할 수 있다.

(1) 공통평면(common plane)

한 공구경로내의 공구와 가공면의 접촉점을 $O^{(i,j)}$ 라고 하고, 공구경로 폭 방향으로 한 단계 증가된 공구경로내의 접촉점을 $O^{(i+1,j)}$ 라고 한다. Fig. 1(a)와 같이 두 접촉 위치에서의 법선 벡터는 서로 일치하지 않으므로 스킨랩을 묘사하는데 어려움이 있다. 그래서 두 접촉점에 대하여 스킨랩을 정량화하기 위해 공통평면을 정의했으며, 공통평면은 두 접촉 위치를 포함하는 직선과 두 법선 벡터의 합 벡터를 지나는 직선이 이루는 평면으로 결정하였다.

두 단위 법선 벡터의 중심을 지나는 단위 벡터 ${}^uO_m^{(i,j)}$ 와 두 접촉점을 지나는 벡터 $O_t^{(i,j)}$ 는 다음과 같다.

$${}^uO_m^{(i,j)} = \frac{N^{(i,j)} + N^{(i+1,j)}}{|N^{(i,j)} + N^{(i+1,j)}|} \quad (1)$$

$$O_t^{(i,j)} = O^{(i+1,j)} - O^{(i,j)} \quad (2)$$

여기서 $N^{(i,j)}$, $N^{(i+1,j)}$ 는 $O^{(i,j)}$, $O^{(i+1,j)}$ 점에서 가공물 표면의 단위 법선 벡터이다. 따라서 두 접촉점 사이의 스킨랩을 묘사하는 공통평면의 위치 벡터 $P^{(i,j)}$ 는 다음과 같다.

$$P^{(i,j)} = O^{(i,j)} + t_{p1} \cdot O_t^{(i,j)} + t_{p2} \cdot {}^uO_m^{(i,j)} \quad (3)$$

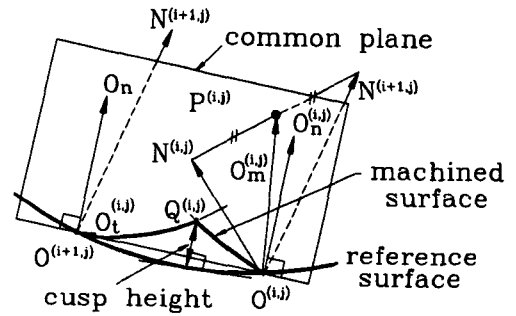
여기서 t_{p1} , t_{p2} 는 매개 변수이다. 그리고 공통평면 내에서 $O_t^{(i,j)}$ 벡터에 수직하는 벡터 $O_n^{(i,j)}$ 는 다음과 같다.

$$O_n^{(i,j)} = O_t^{(i,j)} - \frac{|O_t^{(i,j)}|^2}{O_t^{(i,j)} \cdot {}^uO_m^{(i,j)}} \cdot {}^uO_m^{(i,j)} \quad (4)$$

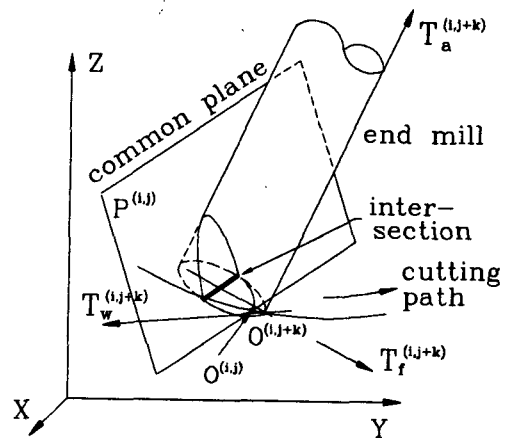
여기서 5-축 CNC 밀링 기계의 구축된 운동범위에 의하여 자유곡면의 가공가능 영역이 윗면이므로, $O_n^{(i,j)}$ 의 Z값이 양(+)의 방향이 되어야 한다.

(2) 스킨랩(scallop)

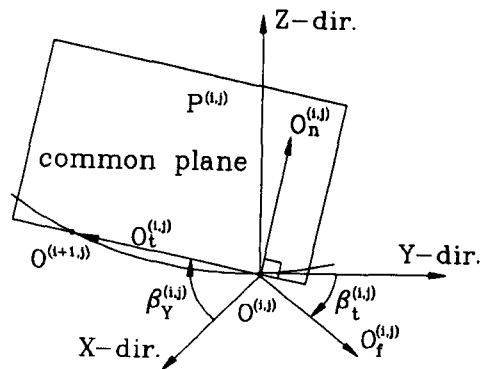
접촉점 $O^{(i,j+k)}$ 에서의 공구축 방향 벡터들은 연구(I)에서의 uT_w , uT_f , uT_a 가 되며, 여기서는



(a) Common plane and cusp height



(b) Intersection at an instant



(c) Relation between X-Y-Z and $O_t^{(i,j)} - O_f^{(i,j)} - O_n^{(i,j)}$

Fig. 1 Common plane and cusp height

${}^uT_w^{(i,j+k)}$, ${}^uT_f^{(i,j+k)}$, ${}^uT_a^{(i,j+k)}$ 으로 표기된다. $O^{(i,j+k)}$ 를 원점으로 하는 $T_w^{(i,j+k)} - T_f^{(i+1,j)} - T_a^{(i,j+k)}$ 좌표에 대한 엔드밀 밀면의 위치 벡터 $P_{w/a}^{(i,j+k)}$ 와 X

-Y-Z 좌표에 대한 엔드밀 밀면의 위치 벡터 $\mathbf{P}^{(i,j+k)}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{P}_{wfa}^{(i,j+k)} = \begin{bmatrix} r \sin \theta \\ R - r \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{xyz}^{(i,j+k)} = \mathbf{M}_1(a_x^{(i,j+k)}) \cdot \mathbf{P}_{wfa}^{(i,j+k)} + \mathbf{O}^{(i,j+k)} \quad (6)$$

여기서

$$\mathbf{M}_1(a_x^{(i,j+k)}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_x^{(i,j+k)} & -\sin a_x^{(i,j+k)} \\ 0 & \sin a_x^{(i,j+k)} & \cos a_x^{(i,j+k)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_2(a_f^{(i,j+k)}) = \begin{bmatrix} \cos a_f^{(i,j+k)} & 0 & \sin a_f^{(i,j+k)} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a_f^{(i,j+k)} & 0 & \cos a_f^{(i,j+k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

R 은 공구 반경이며, r 은 0에서 R 내의 범위인 변수, θ 는 0° 에서 360° 내의 범위인 변수이다. $a_f^{(i,j+k)}$ 와 $a_x^{(i,j+k)}$ 는 연구(I)에서와 같이 접촉점 $O^{(i,j+k)}$ 에서의 공구축 방향을 결정하는 각이다.

공통평면 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ 와 엔드밀 밀면 $\mathbf{P}_{xyz}^{(i,j+k)}$ 가 서로 만나는 곳의 위치 좌표가 임의의 가공 진행 순간에서의 공통평면 내에 놓이는 가공형상이 된다. 따라서 공통평면 위의 커터 흔적은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\mathbf{P}^{(i,j)} = \mathbf{P}_{xyz}^{(i,j+k)} \quad (9)$$

임의의 θ 에 대하여 (9)식으로 얻어진 위치 벡터들을 $\mathbf{C}_{xyz}^{(i,j+k)}(\theta)$ 라고 하면, $\mathbf{C}_{xyz}^{(i,j+k)}(\theta)$ 를 $O_i^{(i,j)} - O_n^{(i,j)}$ 좌표계로 표현한 $\mathbf{C}_{yn}^{(i,j+k)}(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_{yn}^{(i,j+k)}(\theta) = \mathbf{M}_1(\beta_i^{(i,j)}) \mathbf{M}_2(\beta_f^{(i,j)}) (\mathbf{C}_{xyz}^{(i,j+k)}(\theta) - \mathbf{O}^{(i,j)}) \quad (10)$$

여기서 $\beta_i^{(i,j)}$, $\beta_f^{(i,j)}$ 는 Fig. 1(c)와 같이, $O_i - O_f - O_n$ 좌표계와 $X - Y - Z$ 좌표계가 이루는 회전 각이다.

따라서 가공후 공통평면에 남게 되는 커터의 흔적은 $O_i^{(i,j)}$ 에 대하여 가공 시작점부터 가공 끝점까지 걸쳐 $\mathbf{C}_{yn}^{(i,j+k)}(\theta)$ 의 $O_n^{(i,j)}$ 좌표값이 최소인 위치가 되며, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{S}_{yn}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)}) = \min(O_n^{(i,j)}) \prod_{k=0}^{k=e} (\mathbf{C}_{yn}^{(i,j+k)}(\theta)) \quad (11)$$

(11)식에서, $\mathbf{S}_{yn}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)})$ 는 주어진 $O_i^{(i,j)}$ 에 대하여 $k=0$ 에서 $k=e$ 까지 $\mathbf{C}_{yn}^{(i,j+k)}(\theta)$ 의 $O_n^{(i,j)}$ 값이 최소

인 좌표값을 의미한다. 여기서 e 는 엔드밀 밀면이 공통평면을 완전히 벗어날 때까지의 계산을 위한 미소 요소의 개수이다. 따라서 $\mathbf{S}_{yn}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)})$ 가 접촉점 $O^{(i,j)}$ 를 통과하는 공구경로 i 에 대하여 공통평면에 남게 되는 스�কে럽이 된다. 그리고 접촉점 $O^{(i+1,j)}$ 을 통과하는 공구경로 $i+1$ 에 대하여 공통평면에 남게 되는 스�কে럽 $\mathbf{S}_{yn}^{(i+1,j)}(O_i^{(i,j)})$ 도 동일한 방법으로 구할 수 있다.

따라서 $\overline{O^{(i,j)}O^{(i+1,j)}}$ 내에서 공통 평면 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ 에 생기는 스�কে럽은 (12)식으로 되며, $X - Y - Z$ 좌표계에 대한 $\mathbf{S}_{xyz}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)})$ 는 식(13)으로 된다.

$$\mathbf{S}_{yn}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)}) = \min(O_n^{(i,j)}) \prod_{c=0}^{c=1} (\mathbf{S}_{yn}^{(i,c+j)}(O_i^{(i,j)})) \quad (12)$$

$$\mathbf{S}_{xyz}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)}) = \mathbf{M}_2(-\beta_f^{(i,j)}) \cdot \mathbf{M}_1(-\beta_i^{(i,j)}) \mathbf{S}_{yn}^{(i,j)}(O_i^{(i,j)}) + \mathbf{O}^{(i,j)} \quad (13)$$

따라서 주어진 두 점 $O^{(i,j)}$ 와 $O^{(i+1,j)}$ 사이에 존재하는 커셉(cusp)은 스�কে럽의 위치 점에서 공통평면과 자유곡면이 만나는 곡선에 대한 최대 수직거리가 된다. 따라서 커셉 $\varepsilon^{(i,j)}$ 가 예측될 수 있다.

2.2 공구경로와 엔드밀 크기

(1) 공구경로

금형의 NC 가공에서 공구경로는 가공 정밀도를 높이기 위해 결정되기도 하고 가공 효율을 높이기 위해 결정되기도 하는데, 본 연구에서는 일반적인 방법인 가공정밀도를 기준으로 공구경로를 결정하였다. 앞에서 예측된 커셉 높이를 허용 정밀도로 간주하여 지정된 커셉 높이가 남게 되는 곡면으로 가공되게 공구경로를 결정한다. 엔드밀 공구를 사용한 5-축 CNC 밀링에 의한 자유곡면 가공에서는 볼 엔드 밀링에 비해 아주 낮은 커셉이 발생하므로 연마과정이 불필요하여 폴리싱으로 바로 후처리를 마칠 수 있다. 그래서 폴리싱 후처리의 방법에 따라 두 가지 방식으로 공구경로를 결정하였다. 숙련된 작업자에 의해 직선운동으로 폴리싱 할 때와 로보트나 작업자에 의해 모든 표면을 균일하게 나선형으로 폴리싱하는 경우에 대하여 직선으로의 공구경로와 모든 경로에서 균일한 커셉 높이를 갖는 공구경로의 결정이다. 이들 두 가지 방법 모두, 공구경로를 $X - Y$ 평면에 투영했을 때 Y 축과 평행한 직선을 초기 공구경로로 지정하였다. 그리고, 직선으로의 공구경로는 초기 공구경로와 Fig. 2(a)와

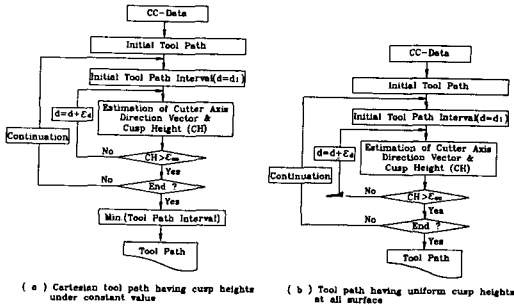


Fig. 2 The flow-chart for tool path generation

같이 미소증분(ϵ_d)된 2번째 공구경로에 대하여 커셋 높이를 구하여 주어진 커셋 높이가 될 때까지 공구경로 폭을 증가시켜 최종적인 공구경로 폭을 구한다. 이러한 계산은 전체 초기 공구경로에 대하여 수행되고, 최소의 공구경로 폭을 갖는 Y축에 평행한 직선이 2번째 공구경로가 된다. 따라서 직선인 (i) 번째 공구경로에 대하여 직선인 $(i+1)$ 번째 공구경로를 구할 수 있다. 또, 균일한 커셋 높이를 갖는 공구경로의 결정은 직선으로의 공구경로 결정과는 달리 직선인 초기 공구경로에 대하여 주어진 커셋 높이를 갖는 공구경로 폭들이 이루는 곡선으로 2번째 공구경로로 하며, 곡선인 (i) 번째 공구경로에 대하여 곡선인 $(i+1)$ 번째 공구경로가 구해지는데 이러한 계산방법은 Fig. 2(b)와 같다.

(2) 커터 크기에 따른 가공시간

공구 선택에 고려되는 주된 인자는 가공할 표면의 형상과 공작기계의 운동 특성이며, 또 요구되는 표면정도를 유지하면서 가공시간을 단축하는 가공효율의 향상을 위한 선택도 필요하다. 본 연구에서는 일정한 커셋을 남기는 공구경로에 대하여, 접촉점에서 일정 속도로 이송하는 상용되는 몇 개의 엔드밀 커터의 가공시간을 계산함으로써 주어진 곡면에서 적당한 커터 크기를 알아 보았다.

초기의 공구경로 $(0, j)$ 에 대하여 허용 커셋 ϵ_{ca} 를 발생하는 공구경로 폭을 $W_x^{(i,j)}$ [mm]라고 하면, 초기의 공구경로에 대하여 순차적인 계산으로 $i-1$ 번째 공구경로에서 공구경로 폭 $W_x^{(i,j)}$ [mm]를 구할 수 있다. 그리고 i 공구경로 내에서 $j-1$ 과 j 사이의 미소 직선 보간 길이를 $L_c^{(i,j)}$ [mm]이라고 하고, i 파라미터가 0에서 m 까지 이며, j 파라미터가 0에서 n 까지 라면, 한쪽 방향으로의 가공방식(one way cutting method)에서 총 가공시간 T_c [min]와 $L_c^{(i,j)}$ 는 다음과 같다.

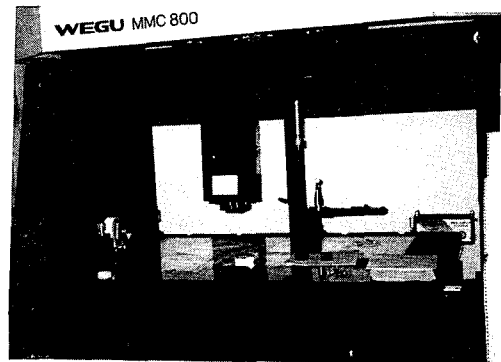
$$T_c = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \frac{L_c^{(i,j)}}{f} + \sum_{i=1}^m \frac{|O^{(i,n)} - O^{(i+1,1)}|}{f_q} \quad (14)$$

$$L_c^{(i,j)} = |O^{(i,j+1)} - O^{(i,j)}| \quad (15)$$

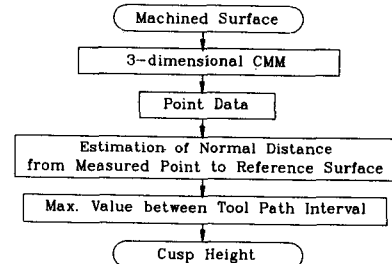
여기서 f 는 접촉점의 이송비[mm/min]이며, f_q 는 공구 회전속도[mm/min]이다. 공구의 크기에 따라 커셋의 크기가 변하여 공구경로 폭과 공구경로의 길이가 달라지므로 가공시간이 변하게 된다. 공구 반경 $R(e)$ 에서의 가공시간을 $T_c(R(e))$ 라고 하면, 적절한 공구반경 R_0 는 가공시간이 최소로 되는 공구의 반경이 된다.

3. 실험

자유곡면 가공은 엔드밀 공구와 함께 신시네틱 밀라크론사의 5-축 CNC 머싱 센터(Cincinnati Milacron, model 20V-80)로 수행하였다. 5-축 NC 코드는 연구(1)의 공구축 방향 벡터 결정과 5-축 포스트 프로세싱을 거쳐 작성되었다. 가공면은 연구(1)과 같이 볼록면, 오목면, 안장면(saddle



(a) 3-dimensional CMM



(b) Schematic diagram for calculation of cusp heights from measurement data

Fig. 3 3-dimensional CMM and schematic diagram for the calculation of cusp heights from measurement data

type surface), 자유곡면을 선택하였다. 절삭조건도 연구(I)과 동일하게 선택하였다. 균일한 가공 오차를 갖는 공구경로와 허용 가공오차내에서 직교 방식의 공구경로를 결정하여 가공실험을 수행하였다.

가공후 곡면의 커섭을 직접 측정하여 예측된 커섭을 확인하였다. 측정 방법은 레이저 스캐너를 갖는 비접촉식 3차원 측정기(model WEGU Messtechnik GmbH)를 사용하여 위치 데이터를 얻었으며, 이들 데이터에서 곡면까지의 수직 거리가 가공 오차이며, 공구경로 폭사이에서의 최대 가공 오차가 커섭이 된다. Fig. 3은 3차원 측정기와 측정 데이터로부터 커섭 산출방법을 나타낸 것이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연구(I)의 적용(application)

연구(I)의 내용을 바탕으로 전화 수화기를 5-축 엔드 밀링으로 가공하였는데, Fig. 4가 그 가공물이다. 이 부품은 설계된 여러개의 곡면을 조합하여 모델링하였으며, 위쪽 곡면은 연구(I)과 같이 엔드밀 공구의 바닥면에 의하여 형성된 가공면이다. 그리고 바깥 곡면은 엔드밀의 측면에 의해 형성된 가공면이다. 이 때의 공구축 방향 벡터는 CC 점에서의 법선 벡터와 공구경로가 이루는 평면과 수직을 이루며 바깥을 향하는 법선방향으로 공구 반경 R만큼 떨어진 곳에 위치하고, 또 엔드밀

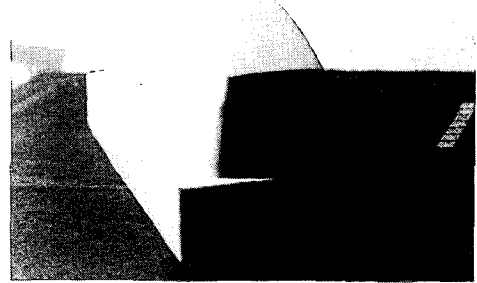


Fig. 4 Telephone receiver machined by 5-axis end milling

공구의 바닥면이 이루는 평면은 CC 점으로부터 5 mm(임의로 지정된 것임) 아래쪽에 위치하도록 하였다. 따라서, Fig. 4의 부품은 $\varnothing 16$ mm인 한 개의 엔드밀 공구가 사용되어 전체가 가공된 것이다. 일반적으로 기존의 가공방법인 볼 엔드 밀링에서의 공구경로 폭에 비해 큰 공구경로 폭으로 가공한데도, 가공 결과는 연삭처리를 생략할 수 있을 정도로 커섭이 시각적으로 제로(zero)인 아주 매끈한 면을 얻을 수 있었다. 따라서 기계 가공시간과 후가공 시간을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

4.2 커섭(cusp)

3-축 볼 엔드 밀링과 5-축 엔드 밀링에 의한 볼록면, 오목면, 안장면, 자유곡면 가공 후의 커섭을 예측하였더니 Fig. 5의 결과를 얻었다. 5-축 가공

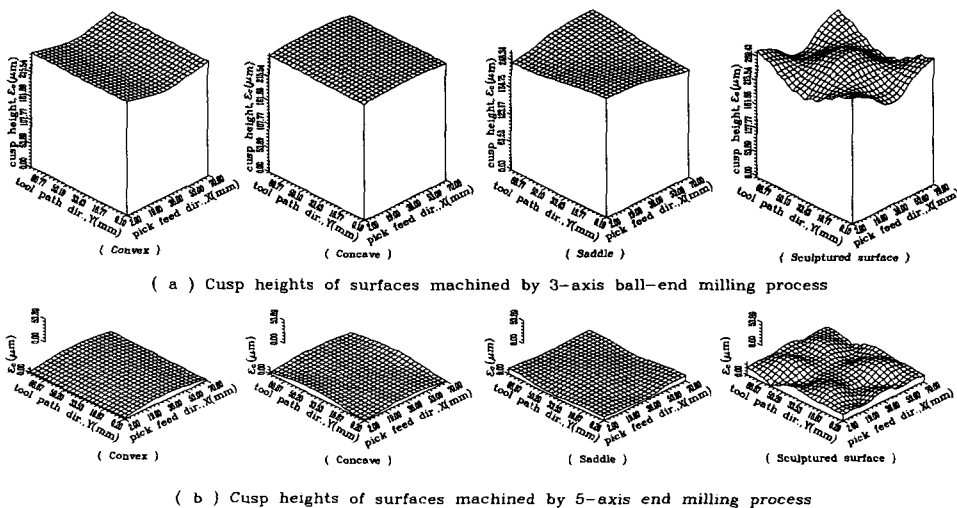


Fig. 5 Predicted cusp heights of surfaces machined by 3-axis and 5-axis CNC milling process

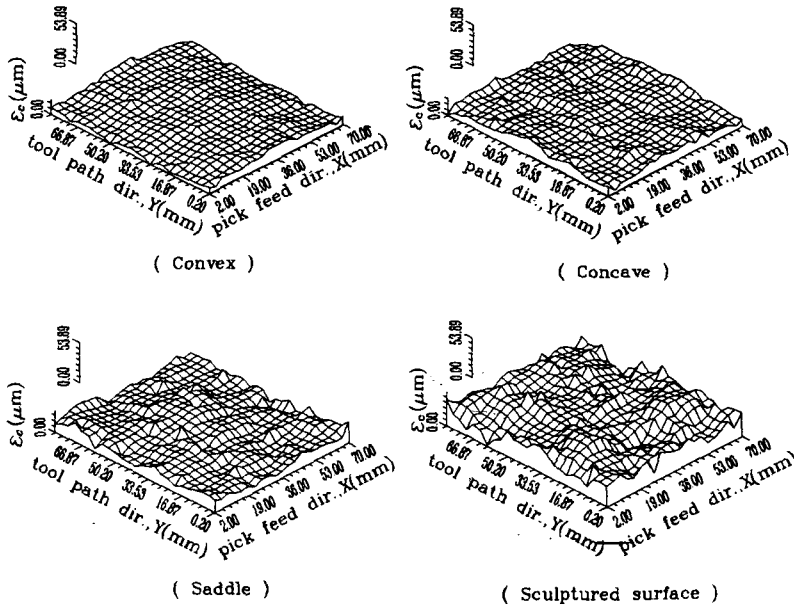


Fig. 6 Measured cusp heights of surfaces machined by 5-axis CNC milling process

에 의한 가공면의 3-차원 측정에 의한 커셉 결과는 Fig. 6과 같았다. 여기서 예측 결과와 실험 결과가 잘 일치하는 것은 예측 알고리즘을 사실적으로 모델링 하였기 때문이다. 따라서 본 연구의 5-축 엔드 밀링에 의한 자유곡면 가공에서의 커셉 예측 방법은 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구의 모든 곡면들에 대하여 커셉은 3-축 가공보다 5-축 가공에서 10배 이상 정밀한 결과를 얻었다. 따라서 연구(I)에서 결정된 공구축 방향 벡터는 볼록면 뿐만 아니라 오목면과 자유곡면에서도 유용하게 적용될 수 있었다.

4.3 공구경로

3-축 볼 엔드 밀링에서는 곡면의 형태에 대하여 공구경로 폭이 같으면 커셉의 변화율이 작지만, 5-축 엔드 밀링에서는 곡면의 형태에 따라 커셉의 변화율은 매우 크다. 즉, 5-축 엔드 밀링에서는 일정한 커셉을 위한 공구경로는 매우 불규칙적으로 결정된다. 따라서 3-축 볼 엔드 밀링에서는 공구경로의 배열을 규칙적으로 결정해도 커셉이 거의 일정하므로 수작업에 의한 연마 후처리 가공이 편리하다. 그러나 본 연구에 의한 5-축 엔드 밀링 가공에서는 커셉 자체가 연마 과정을 생략할 정도로 아주 작아서 후처리 가공에 많은 노력이 불필요하고,

균일한 커셉으로의 불규칙적인 공구경로에 대해서도 폴리싱에 큰 어려움이 없다. 오히려 일정한 커셉을 갖는 경우에 나선형의 균일한 운동으로 폴리싱 가공 공정을 수행함에 있어서 곡면 형상의 기하

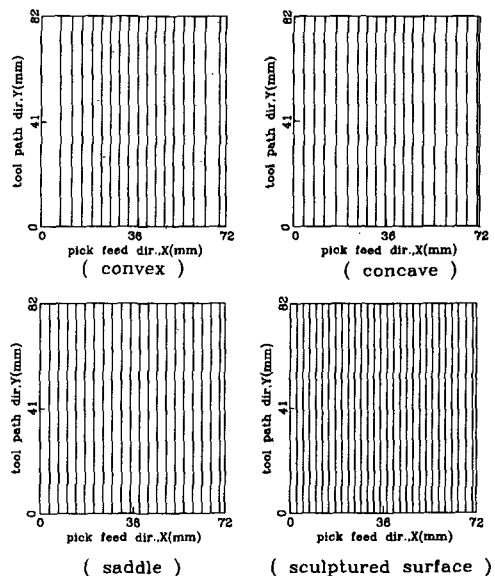
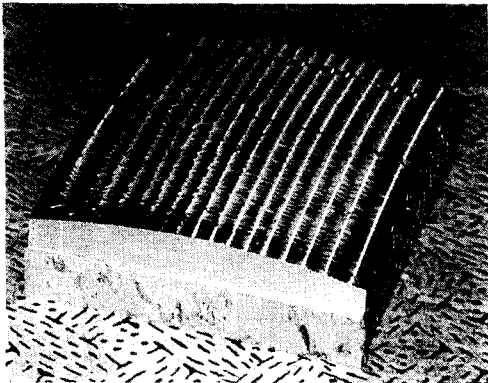
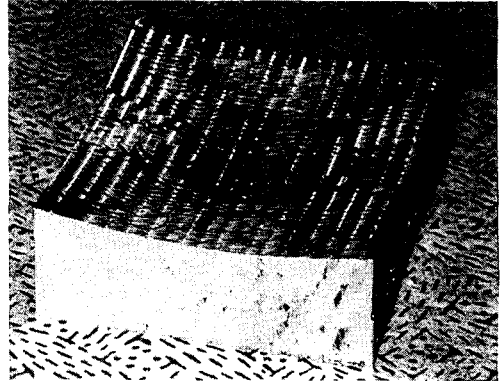


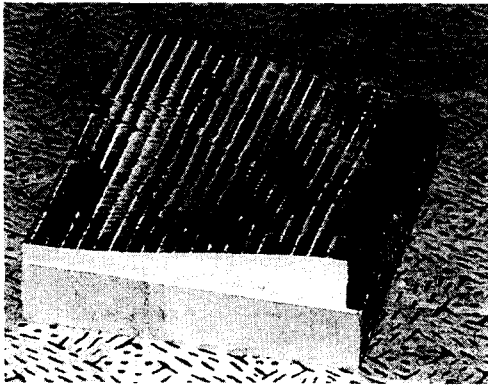
Fig. 7 Cartesian tool path having cusp heights under 10 μm



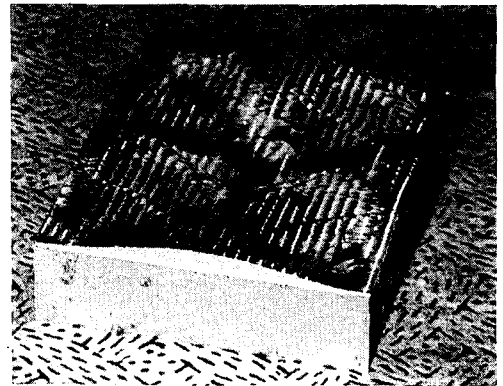
(Convex)



(Concave)



(Saddle)



(Sculptured surface)

Fig. 8 Surfaces machined with the tool path of Fig. 7

학적인 가공오차 감소를 위해 더욱 유리하다. 그래서 5-축 엔드 밀링 가공에서 허용 정밀도 내로 커셋을 유지하는 직교방식의 공구경로 결정과 허용 정밀도로 일정한 커셋을 갖도록 하는 공구경로 결정을 하였다.

공구 크기 $\phi 16\text{ mm}$, 허용 커셋 $10\ \mu\text{m}$, 초기의 공구경로는 X 값이 0인 Y 축을 따라 가공되는 것으로 설정하였다. 이때 연구(I)의 볼록면, 오목면, 안장면, 자유곡면에 대하여 허용 정밀도내의 직교방식의 공구경로를 접촉점의 $X-Y$ 좌표값으로 나타내면 Fig. 7과 같이 되며, 이 공구경로에 대한 5-축 가공된 시편은 Fig. 8과 같다. 그리고 커셋이 균일한 곡면의 가공을 위한 공구경로는 Fig. 9와 같고, 가공후의 곡면은 Fig. 10과 같다. 따라서 본 연구의 5-축 엔드 밀링에 의한 자유곡면 가공의 커셋 예측을 통하여 커셋 높이에 따른 공구경로를 결정할 수 있었다.

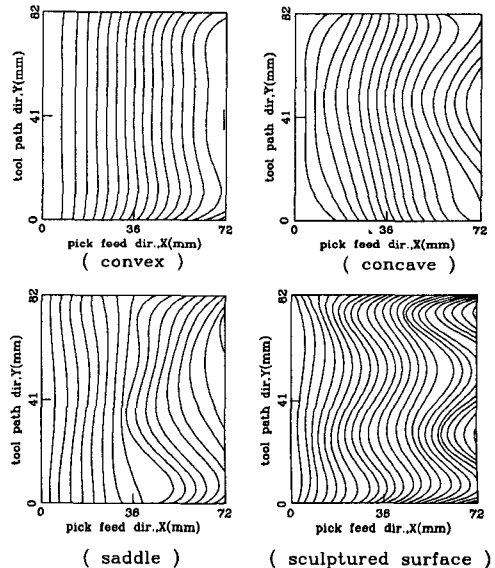


Fig. 9 Tool path maintaining cusp heights to $10\ \mu\text{m}$

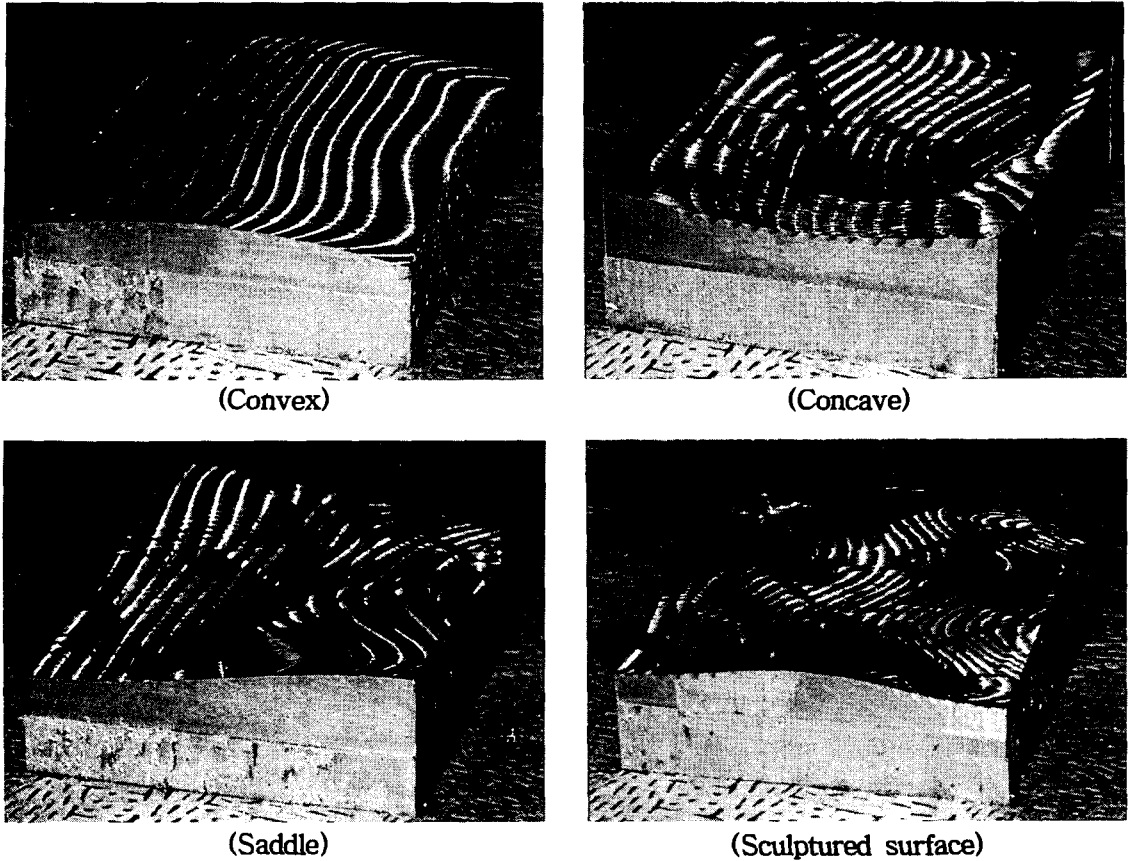


Fig. 10 Surfaces machined with the tool path of Fig. 9

4.4 커터 크기에 따른 가공시간

엔드밀과 볼 엔드밀로 샘플 곡면들을 가공할 때, 커셋 10 μm 로 균일한 곡면으로 가공하는 공구경로에서 가공시간을 공구의 크기에 따라 계산한 결과는 표 1과 같다. 이때 공구의 크기는 많이 상용되는 $\Phi 8\text{ mm}$, $\Phi 10\text{ mm}$, $\Phi 12\text{ mm}$, $\Phi 16\text{ mm}$, $\Phi 20\text{ mm}$ 로 선택하였고, 접촉점에서의 이송비는 200 m/min, 급속 귀환 속도는 5000 mm/min로 하였다. 이 결과로 본 연구에서 선택된 곡면들은 5-축 엔드밀링에 의해 소요되는 가공시간이 3-축 볼 엔드 밀링에 의해 소요되는 가공시간보다 약 3배이상 단축됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 곡면의 형태에 따라 차이가 있지만, 엔드밀 공구를 사용한 5-축 CNC 밀링에 의한 자유곡면 가공은 3-축 볼 엔드 밀링에 비해 가공시간을 크게 단축시킬 수 있음을 의미한다.

최근, 3-축 볼 엔드 밀링으로의 고속가공스핀들

회전속도 기준으로, 20000 rpm이상) 기술에 관한 연구는 고효율 가공으로의 성과가 있었다. 그러나 고속회전 중 정밀도를 유지하면서 큰 절삭력에 견딜 수 있는 공구축 설계는 연구단계에 있으며, 아직 상용화되지는 않았다. 그래서 알루미늄 및 드랄루민(duralumin)과 같이 절삭력이 작게 걸리는 재료의 가공에 상용되고 중절삭에는 제약이 있다. 일반적으로 5000 rpm이하에서 작은 공구경로 폭으로 가공면의 표면을 양호하게 하여 마무리 다듬질에 소요시간을 줄이기 위한 강재가공에 적용되나 기계 가공에 소요되는 시간은 오히려 일반가공보다 많이 걸린다. 그런데 5-축 엔드 밀링은 중절삭으로 가공시간과 후처리 시간을 동시에 줄일 수 있는 효과를 갖음을 알 수 있다.

Table 1의 결과로 5-축 가공에서의 엔드밀 크기는 볼록면에서는 $\Phi 10\text{ mm}$, 오목면에서는 $\Phi 8\text{ mm}$, 안장면에서는 $\Phi 8\text{ mm}$, 자유곡면에서는 $\Phi 20\text{ mm}$ 인

Table 1 Machining time along with cutter radius R for maintaining cusp heights to 10 μm about the given surfaces: 1(convex), 2(concave), 3(saddle), 4(free-form)

R(mm)	surface	time(min)		ratio 3-a/5-a
		3-axis	5-axis	
4	1	52.181	7.839	6.657
	2	52.181	7.400	7.051
	3	52.065	7.441	6.997
	4	52.512	13.677	3.839
5	1	47.903	7.808	6.135
	2	47.903	9.981	4.799
	3	47.796	8.911	5.364
	4	47.825	11.409	4.192
6	1	43.198	7.850	5.503
	2	44.481	11.928	3.729
	3	44.401	11.341	3.915
	4	44.477	11.683	3.807
8	1	37.614	8.412	4.471
	2	39.323	8.688	4.526
	3	38.427	9.346	4.112
	4	38.015	13.281	2.862
10	1	33.787	8.498	3.976
	2	34.643	9.904	3.498
	3	34.590	9.761	3.544
	4	34.643	11.090	3.124

공구를 선택하여 가공하는 것이 적절했다. 이러한 결과는 5-축 엔드 밀링에 의한 자유곡면 가공에서는 곡면과 공구 크기가 어떤 관계를 갖는지 예측하기 어려움을 의미하며, 이것은 접촉점에 따라 공구 축 방향 벡터가 변하여 커셉에 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서 5-축 엔드 밀링에서의 공구 선택은 전체적인 공구경로에 대해 소요시간을 예측하여 결정하는 것이 좋았다. 볼 엔드밀은 모든 곡면에서 $\phi 20\text{ mm}$ 가 가장 최적으로 나타났는데, 이것은 공구가 클수록 커셉이 작아져서 공구경로 폭이 커졌음을 의미하며, 곡면에 대해 공구 크기는 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 볼 엔드밀에 의한 자유곡면 가공에서는 공구 간섭이 발생하지 않는 범위에서 큰 직경을 선택하는 것이 좋았다.

5. 결 론

5-축 CNC 밀링에 의한 곡면의 커셉 예측과 공구경로에 관한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 5-축 엔드 밀링으로 자유곡면의 가공이 가능했고 기존의 곡면가공 방법에 비해 커셉이 현저히 줄어들었다.

(2) 5-축 엔드 밀링으로의 자유곡면 가공에서 커셉을 예측하였고, 본 연구의 예측결과와 실험결과와 잘 일치하였다.

(3) 5-축 밀링에 의한 자유곡면 가공에서 허용 가공오차를 갖는 가공면을 위한 공구경로를 결정할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 조현덕, 전용태, 양민양, 1993, "5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구(I) (공구축 방향 벡터와 포스트 프로세싱)" 대한기계학회논문집, 제17권, 제 8 호, pp. 2001~2011.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Frederick Mason, 1991, "5×5 for High-productivity Airfoil Milling," American Machinist, November, pp. 37~39.
- (5) Programming Manual for CINCINNATI MILACRON 29V & 30V Series Vertical 5-Axis Machines, Publication No. 6-RR-87192, Part No. 3359651, Cincinnati Milacron Marketing Company Printed in U.S.A, 1989.
- (6) 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.
- (7) Yoshimi Takeuchi et al, 1990 "5-Axis Control

- Machining Based on Solid Model,” JSPE, Vol. 56, No. 11, pp. 2063~2068.
- (8) 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.