

## Insert Tip-용 End Mill 공구의 형상정의와 5-축 가공에 관한 연구

조현덕\*, 박영원†

(논문접수일 2002. 8. 5, 심사완료일 2002. 10. 5)

### A Study on Geometric Definition and 5-Axis Machining of End Mill with Insert Tip

Hyun-Deog Cho\*, Young-Won Park†

#### Abstract

This study describes the geometric characteristics and the 5-axis machining method in order to make end mill cutter coming with insert tips. End mill geometry is consisted of flute part and insert tip part. Flute part modeled by using ruled surfaces with constant helix angle, and insert tip part modeled by rectangular planes containing tapped hole of specified direction in its center. In this study, the modeled insert tip part considered both of a radial rake angle and a axial rake angle, because they were important cutting conditions. In order to machining the virtual end mill defined from geometric characteristics, we programmed a special software to machining the end mill considered in this study. This software can generate NC-codes about following processes, end milling or ball end milling of flute part, end milling of rectangular plane, centering of hole, drilling of hole, and tapping of hole. And, sampled end mills were modeled and machined on 5-axis CNC machining center with two index tables. Since machined end mills were very agreeable to designed end mills, we saw that the method proposed in this study can be very useful for manufacturing of end mill body with insert tip.

**Key Words** : 5-축 CNC 머시닝 센터(5-axis CNC machining center), 5-축 가공(5-axis machining), 엔드 밀 공구(end mill cutter), 플루트 부(flute part), 인서트 팁 부(insert tip part)

### 1. 서론

CNC 공작기계 및 전용기 발달과 더불어 가공생산성 향상을 위해 툴링(tooling)의 중요성이 증가하고 있다. 특히,

가공산업은 CAD/CAM을 적용하는데 매우 효과적인 산업 중 하나이며 공장자동화를 실현하기 좋은 분야라고 할 수 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 자동화 실현을 위해서는 정밀도가 보장되면서 긴 수명을 갖는 공구가 필요하게 되는데, 가공성이 좋으면서

\* 주저자, 경일대학교 기계공학부 (hdcho@kiu.ac.kr)

주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33번지

† 경일대학교 기계공학부

공구수명이 긴 공구를 위해서 공구재료의 개발과 더불어 새로운 형상의 공구 개발이 꾸준히 수행되어 왔으나<sup>(2)</sup> 공구의 효율적 제작에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이며 산업체에서의 경험적 기술이 대부분인 것 같다<sup>(3)</sup>. 일반적으로 공구마모는 황삭가공에서 많이 발생하는데, 황삭에서의 긴 공구수명을 위한 대표적인 공구로 중절삭용 엔드 밀(end mill)을 들 수 있다. 중절삭용 엔드 밀은 인선부를 인서트 팁(insert tip)으로 대체하여 인서트 팁의 교환으로 공구의 재연삭 및 재구입에 드는 비용을 최소화할 수 있도록 설계된 공구이다. 현재 인서트 팁을 사용한 공구는 엔드 밀뿐만 아니라 드릴 등 다양하게 생산되고 있으며, 특히 항공 및 조선분야의 대형가공물과 금형 분야의 깊은 홈 가공 등 황삭 가공용으로 널리 사용된다. 중 절삭용 엔드 밀의 몸체(body)는 가공이 쉬우면서도 높은 강성을 갖고 열처리효과가 우수한 소재를 사용하며, 대부분 중소기업인 공구제작업체에서의 기존 가공 공정은 5-축 가공을 사용하나 표준화된 치수에 대하여 주로 오퍼레이터가 현장 맞춤식으로 NC 프로그램을 하고 있다. 엔드 밀 몸체의 형상은 사용되어질 인서트 팁의 종류에 따라 달라지며, 인서트 팁이 정해지면 헬릭스(helix)홈 형상과 인서트 팁이 놓일 자리의 형상에 대한 절삭현상이 고려되어 설계될 수 있다.

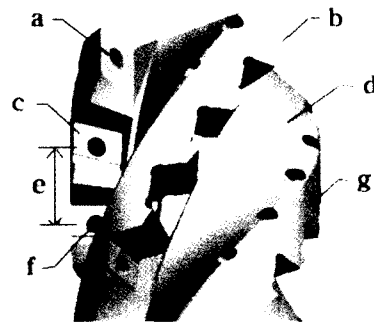
본 연구에서는 인서트 타입용 엔드 밀 공구 몸체의 형상을 정의하고 정의된 형상을 5-축 가공할 수 있는 모듈을 개발하여 몇 개의 변수 값의 변화에 대하여 다양한 치수의 인서트 타입용 엔드 밀 공구를 단시간에 제작할 수 있도록 한다. 본 연구에서 정의된 주요한 변수 값은 공구의 크기를 나타내는 지름, 인서트 팁 형상, 헬릭스 각 및 공구 경사각 등이 있다. 본 연구에서 고려된 엔드 밀의 형상은 크게 헬릭스 부와 인서트 팁 자리부로 나눌 수 있으며, 인서트 팁 자리부는 인서트 팁을 체결하는 부분으로 2면 지지형식과 3면 지지형식의 2가지 타입으로 구분하였다. 그리고, 상단부의 인서트 팁 자리부는 상단부에서는 날 끝 인선이 가공에 일부 참여하므로 끝 단면의 수평도와 측면의 수직도를 고려하여 축방향경사각을 배제하여 설계하였으며, 하단부는 절삭에 중요한 조건으로 작용하는 반경방향의 경사각(radial rake angle)과 공구축 방향의 경사각(axial rake angle)을 모두 고려하여 헬릭스 곡선에 따라 일정간격으로 배열하였다. 엔드 밀의 형상은 5-축 가공 원리와 연계하여 정의하였으며, 형상정의와 마찬가지로 가공공정도 가공영역별로 구분하여 구성하였다. 그리고 본 연구에서는 전체적으로 엔드 밀 몸체 설계와 가공을 일괄적으로 처리할 수 있도록 소프트웨어화를 시도하였으며, 본 소프트웨어를 운용하여 크기와 형상

이 다른 여러 개의 엔드 밀 샘플에 대하여 가공 데이터를 구하여 가공을 실행하였으며 형상정의와 5-축 가공에 대한 기하학의 타당성을 확인할 수 있었고 중 절삭용 엔드 밀 몸체의 가공에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 5-축 기계는 2개의 인덱스 테이블이 부가된 5-축 머시닝 센터(5-axis machining center)이다.

## 2. 형상 정의

본 연구에서 고려된 인서트 타입용 엔드 밀 공구는 Fig.1과 같이 헬릭스 홈부(helix groove), 상단 인서트 팁 자리부(upper insert tip place), 하단 인서트 팁 자리부(below insert tip place), 인서트 팁 조립을 위한 나사구멍(screw thread hole) 등으로 구성되며, 상단 인서트 팁 자리는 반경방향 경사각(radial rake angle)을 갖고 하단 인서트 팁 자리는 축 방향 경사각과 반경방향 경사각(radial angle)을 가지며 일정간격으로 배열되었다. Fig.1의 a와 b는 길이가 서로 다른 인서트 팁인 APMT와 SPMT 타입을 의미한다.

헬릭스 홈부 곡선은 Fig.2와 같이 헬릭스 각(helix angle)을  $\omega$ , 공구 축에 수직한 평면인 xz-평면 내에서의 임의의 위치까지의 각을  $\theta$ , 헬릭스 곡선 위의 임의의 점을  $P_i$ , 원점을  $P_0(0,0,0)$ , 헬릭스 곡선의 총 높이를  $Y_{Hf}$ , 몸체 반경을 R라고 하면 헬릭스 곡선을 표현하는 임의의 위치 벡터



- a : upper insert tip place for APMT type
- b : upper insert tip place for SPMT type
- c : below insert tip place
- d : helix groove
- e : pitch between below insert tips
- f : throw hole
- g : flute

Fig. 1 Geometry of the insert tip end mill

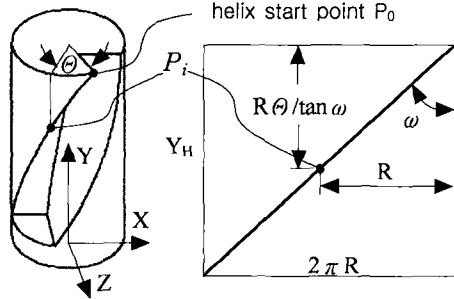


Fig. 2 Helix curve of end mill body

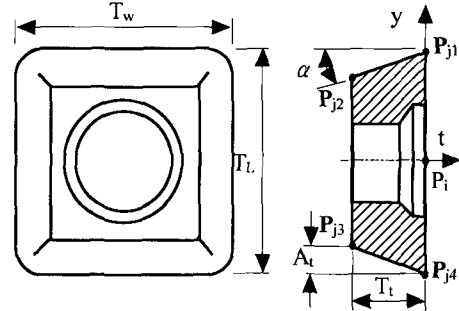


Fig. 3 Dimension define of insert tip

$P_i$ 는 독립변수  $\theta$ 로 나타낼 수 있으며 다음 식으로 된다.

$$P_i = (X_i, Y_i, Z_i) = (-R \sin \theta, Y_H - R \theta / \tan \omega, R \cos \theta) \quad (1)$$

인서트 팁 자리부는 헬릭스 곡선 위에 놓일 임의의 평면으로 정의하였으며, 그 평면은  $P_i$ 위에 존재하며 접선의 방향을 t-좌표축이라 하면, 본 연구에서의 인서트 팁의 정의는 Fig.3과 같이 기준 점인 동시에 중심이 되는  $P_i$ 와 모서리 끝점  $P_{j1}, P_{j2}, P_{j3}, P_{j4}$ 로 나타내는데 XYZ-고정좌표계에 대한 각 점들의 좌표 값은 (2)식으로 표현된다. 여기서  $\alpha$ 는 인서트 팁의 측면 경사각이고,  $T_L$ 은 인서트 팁의 길이이고,  $T_w$ 는 인서트 팁의 폭이며  $A_t$ 는 측면 경사각에 의한 바닥 면의 길이 변화 값으로  $T_t \tan \alpha$ 이며,  $P_i$ 는 (1) 식으로 구할 수 있으며 이는 인서트 팁을 배치하고자 하는 점으로 지정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{j1} &= (X_i, Y_i + \frac{T_L}{2}, Z_i) \\ P_{j2} &= (X_i - T_t \cos \alpha, Y_i + \frac{T_L}{2} - A_t, Z_i - T_t \sin \alpha) \\ P_{j3} &= (X_i - T_t \cos \alpha, Y_i - \frac{T_L}{2} + A_t, Z_i - T_t \sin \alpha) \\ P_{j4} &= (X_i, Y_i - \frac{T_L}{2}, Z_i) \end{aligned} \quad (2)$$

본 연구에서 인서트 팁의 배열은 상단부에 길이가 다른 SPMT와 APMT 인서트 팁을 사용하여 지그재그(zigzag)로 배열하였고, 하단부에서는 SPMT 인서트 팁을 사용하여 인근 플루트간의 배열차이를 인서트 팁간 거리의 절반만큼 엇갈리게 배열하였다. 본 연구에서 사용한 SPMT는 Fig.3

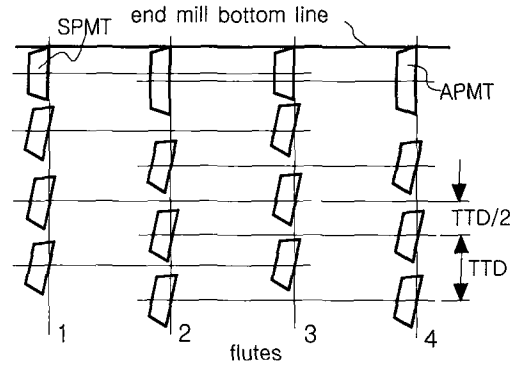


Fig. 4 Arrangement between insert tips

에서와 같이 정사각형의 형상( $T_L = T_w = 12.7$ )에 측면경사각이  $11^\circ$ 이고 형상 공차가  $\pm 0.013$ 이며 중앙에 구멍이 있는 형상이며, APMT는 내각이 각각  $89^\circ$ 와  $91^\circ$ 이며  $T_L$ 이 16mm인 평행사변형이고 다른 치수는 SPMT와 동일하다. Fig.4는 본 연구에서 설계 정의된 인서트 팁들의 배열을 나타내는 것으로 이웃하는 플루트(flute)간의 팁의 위치를 서로 엇갈리도록 정의하였다.

본 연구에서는 상용화되어 나오는 인서트 팁의 배열인 Fig.4와 같은 예에 대하여 고려하였으며, 상단부에서는 바닥부의 가공면을 평탄하게 하기 위하여 축방향 경사각을 고려하지 않았으나 중간 부분에서는 축방향 경사각을 고려하였는데, 축방향 경사각과 반경방향 경사각에 대한 기하학적 특성은 가공 공정정의에서 설명한다.

### 3. 가공공정 정의

가공공정은 헬릭스 곡선가공, 인서트 팁 자리부 가공, 드릴가공, 탭 가공으로 설정하였다. 헬릭스 곡선가공은 Fig.5와 같이 공구축 방향 벡터와 가공 위치를 결정하는 것으로,  $\vec{P}_i$ 는 Fig.2에서 정의된 헬릭스 곡선의 위치 벡터이며  $\vec{P}_{iCL}$ 는 엔드밀 공구의 CL(cutter location)점이며  $\vec{T}_{iCL}$ 는 공구축 방향벡터가 된다. 여기서,  $\vec{a}$ 는 Y-축으로부터  $\vec{P}_i$ 의 끝점까지의 벡터로 크기는 엔드 밀 몸체 반경 R이고,  $\vec{c}$ 의 방향은  $\vec{a}$ 와 같고 크기가  $R - T_w$ 로  $\vec{a}$  보다 인서트 팁의 폭만큼 안쪽으로 들어간 벡터이고,  $\vec{b}$ 는 헬릭스 곡선의 접선 벡터이며,  $\vec{a}$ 는  $\vec{a}$ 와  $\vec{b}$ 에 수직인 헬릭스 곡면의 법선 벡터로 크기는 가공공구의 반경 r이다. 따라서 공구의 CL점과 공구축 방향벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{a} = (-R \sin \theta, 0, R \cos \theta) \quad (3)$$

$$\vec{b} = (-\sin \omega \cos \theta, -\cos \omega, -\sin \omega \sin \theta) \quad (4)$$

$$\vec{c} = (-(R - T_w) \sin \theta, 0, (R - T_w) \cos \theta) \quad (5)$$

$$\vec{d} = r \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \quad (6)$$

$$\vec{P}_{iCL} = \vec{P}_i + \vec{d} + \vec{c} - \vec{a} \quad (7)$$

$$\vec{T}_{iCL} = \vec{a} \quad (8)$$

인서트 팁은 헬릭스 곡선을 따라 Fig.4와 같이 배열하였으며, 인서트 팁 자리부 가공을 위해 공구 축 방향을 XZ-평면과 평행한 임의의 평면 내에 놓이게 하였다. 즉, 인서트

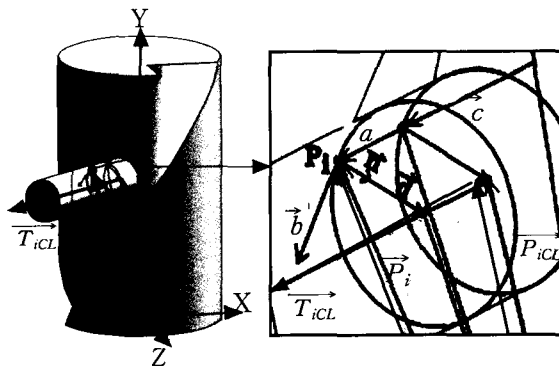


Fig. 5 Cutter position for helix curve machining

팁 자리가 결정되면 이 위치에서 평면이 정의되고 2차원 가공을 수행하는 것으로 하였다.

그리고, 본 연구에서는 Fig.6(b)와 같이 공구의 반경방향 경사각(radial rake angle)  $\delta$ 를 고려하였는데, 이 때 인서트 팁 자리부 가공의 공구 축 방향 벡터는 헬릭스 곡선 가공보다  $\delta$ 만큼 덜 회전하면 된다. 즉, B-축의 각도는  $\theta - \delta$ 가 되고 공구의 위치 벡터는  $\theta$  대신  $\theta - \delta$ 를 대입하면 된다. 그리고 반경방향경사각을 고려한 가공을 위한 공구 축 방향벡터의 기준위치는  $\delta x$ ,  $\delta y$ 만큼 이동된 위치가 되며  $x_\delta$ 와  $y_\delta$ 는 (9)식과 (10)식으로 된다.

$$x_\delta = R \sin \delta \quad (9)$$

$$y_\delta = R \cos \delta \quad (10)$$

본 연구에서 축 방향 경사각은 일종의 인서트 팁이 헬릭스 각의 방향으로 비스듬히 경사지는 것을 의미하며, 축 방향 경사각은 인서트 팁의 기준 점  $P_i$ 에 대하여 상부와 하부에서 과절삭이 발생되게 하나 절삭성을 좋게 하는 장점이 있다.

인서트 팁의 자리 가공을 위한 공구 경로는 Fig.7과 같으며, Fig.7(a)는 인서트 팁을 고정하는데 있어서 이웃하는 2면이 지지할 수 있도록 가공하기 위한 것이며 Fig.7(b)는 3면에서 지지할 수 있도록 가공하기 위해서이다. 이러한 공구경로를 표현하는 모든 위치들은 (11)식들로 나타낼 수 있다.

$$\vec{P}_d = \vec{P}_d + (t_x, -y_d)$$

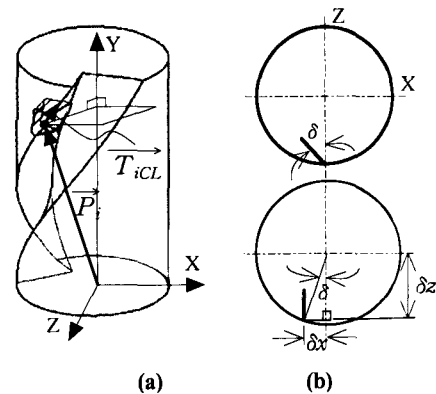


Fig. 6 The machining of insert tip place; (a) Cutter axis direction vector, (b) Radial rake angle



### 4. 프로그램 및 가공

본 연구에 사용된 5-축 공작기계<sup>(3)</sup>의 로터리 테이블의 회전각 A와 B는 (16)식 및 (17)식과 같이 공구 축 방향 벡터의 좌표 값으로 표현될 수 있으며<sup>(3)</sup>, 공구 축 방향 벡터를 실제 기계의 Z-축과 일치시키는데 필요한 좌표축 기준으로의 좌표변환을 위하여 X-축에 대한 회전을  $\theta_x$ 라하고 Y-축에 대한 회전을  $\theta_y$ 라하고 하면 공구의 CL 포인트 ( $P_x, P_y, P_z$ )는 (18)식으로 표현된다<sup>(3)</sup>. 여기서,  $T_{Hx}, T_{Hy}, T_{Hz}$ 는 공구축 방향벡터의 좌표성분이며,  $P_{Hx}, P_{Hy}, P_{Hz}$ 는 공구 위치벡터의 좌표성분이다.

$$A = -\tan^{-1}\left(\frac{T_{Hy}}{T_{Hz}}\right) \quad (16)$$

$$B = \tan^{-1}\left(\frac{T_{Hx}}{\sqrt{T_{Hy}^2 + T_{Hz}^2}}\right) \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = M(\theta_x)N(\theta_y) \begin{pmatrix} P_{Hx} \\ P_{Hy} \\ P_{Hz} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

여기서,  $\theta_x = -\tan^{-1}\left(\frac{T_{Hy}}{T_{Hz}}\right)$

$$\theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{T_{Hx}}{T_{Hz}}\right)$$

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x & 0 \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$N(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

따라서 인서트 팁용 엔드밀 공구의 제작은 가공 공정에 따른 공구축 방향벡터와 공구의 위치벡터를 사용하여 (16)식과 (17)식 및 (18)식을 적용함으로써 5-축 가공을 위한 NC 파트 프로그램을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 몸체 설계와 포스트 프로세싱을 편리하게 하기 위해 프로그램된 처리 소프트웨어는 헬릭스 홈을 위한 FLUTE MAIN과 인서트 팁의 자리부를 가공하는 INSERT MAIN과 인서트 팁 고정에 필요한 센터링과 드릴링을 위한 HOLE MAIN으로 구성되는데, Fig.10과 같다. FLUTE MAIN은 정면과 측면 헬릭스를 가공하는 서브 프로그램으로 구분되고, INSERT MAIN은 상단과 하단으로 구분하여 상단은 SPMT와 APMT의 두 종류의 팁 자리 가공을 할 수 있는 서브 프로그램을 포함하며 하단은 A타입과 B타입의

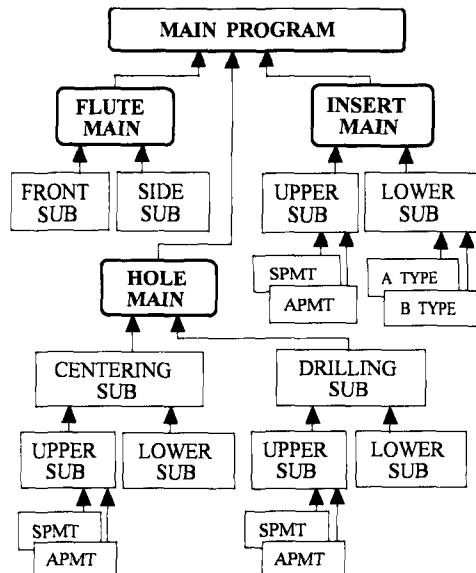


Fig. 10 Software structure

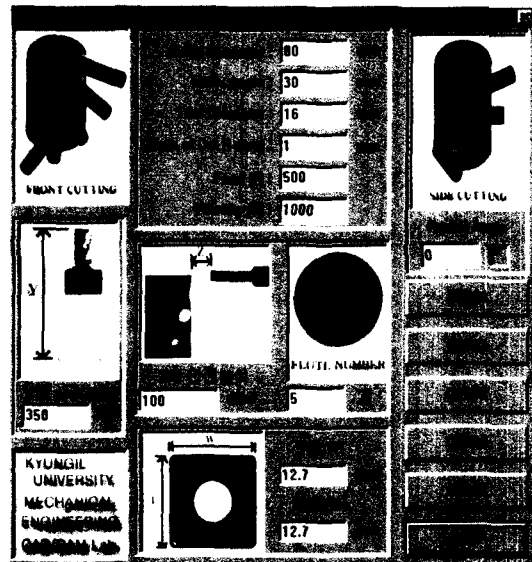


Fig. 11 FLUTE MAIN window

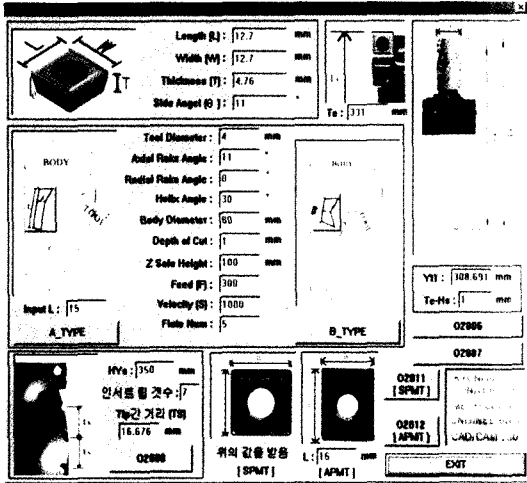


Fig. 12 INSERT MAIN window

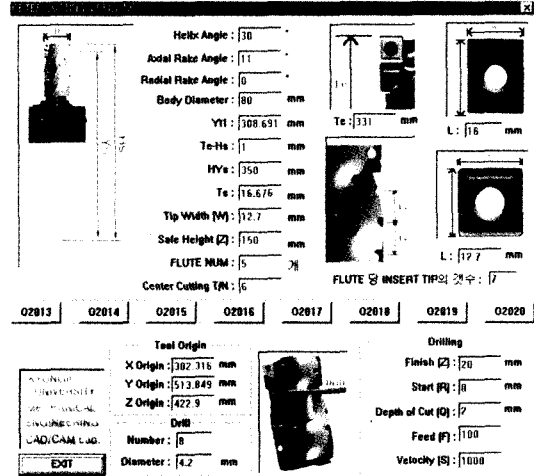


Fig. 13 HOLE MAIN window

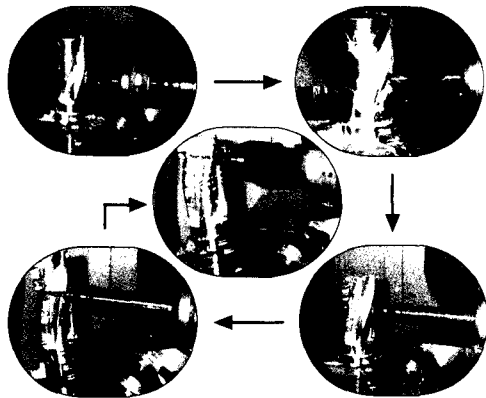


Fig. 14 Machining processes

인서트 자리를 가공할 수 있는 서브 프로그램으로 구분된다. 그리고 HOLE MAIN은 센터링과 드릴링으로 구분되며, 상단은 SPMT와 APMT의 두 종류의 팁 자리 가공을 할 수 있는 서브 프로그램으로 구성되며, 하단의 경우 A타입과 B타입에서 서로 구멍의 위치가 동일하기 때문에 구분되지 않았다.

Fig.11은 FLUTE MAIN, Fig.12는 INSERT MAIN, Fig.13은 HOLE MAIN에서의 입력조건들을 보여준다.

가공실험은 정면방향으로 헬릭스 홈 가공 후 측면방향으로 마무리가공을 하였고, 인서트 팁 자리부 측면가공, 구멍

Table 1 Design specifications for Fig.15

specifications(units)	values					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
body diameter(mm)	70	70	50	60	70	80
body height(mm)	96	96	86	112	160	155
flute number(ea)	4	4	4	4	4	5
helix angle(°)	35	35	25	25	25	30
axial rake angle(°)	5	5	15	15	11	11
radial rake angle(°)	0	0	0	0	5	0
material	S45C	S45C	brass	brass	MC-N.	MC-N.
type of insert place	A	B	A	A	A	A

을 뚫기 위한 센터작업 후 드릴링 작업을 수행하였는데, Fig.14는 각 공정에 따른 가공상황을 보여주고 있다. 본 연구에서 탭핑(tapping)은 수작업으로 수행하였다. Fig.15는 Table 1의 설계조건에 따라 몸체 직경 및 길이, 인서트 팁 자리의 축 방향 및 반경 방향 경사각, 인서트 팁간의 거리 및 개수, 플루트(flute)의 개수, 헬릭스 각도 등을 다양하게 하여 제작된 인서트 텡용 엔드밀 공구들을 보여 준다.

Fig.15의 가공결과는 설계된 형상에 따른 가공으로 인서트 텡을 쉽게 조립할 수 있었으며, 5-축 기계로의 일괄 가공에 의해 매끄러운 곡선을 얻을 수 있었고, 전용 프로그램에 의해 다양한 치수의 공구 제작을 위한 NC 파트 프로그램을

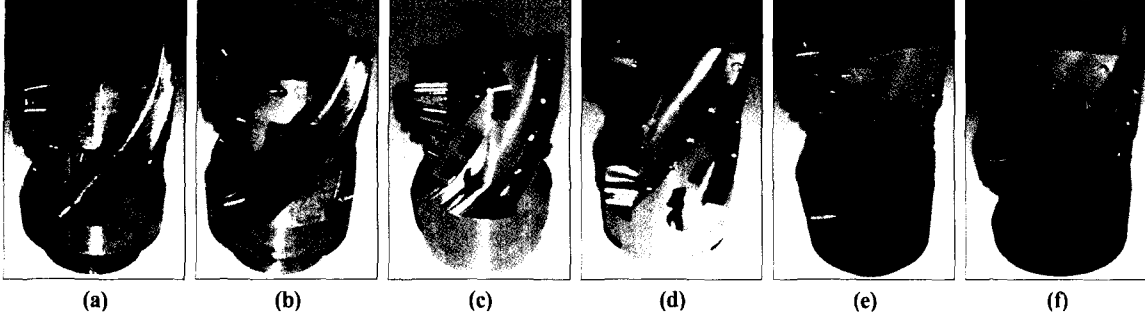


Fig. 15 Machined end mill cutters

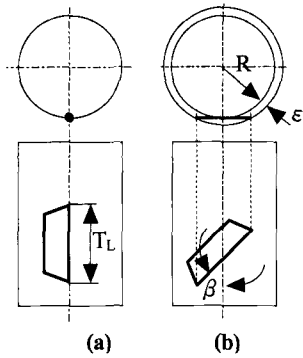


Fig. 16 Machining error by axial rake angle

신속하게 얻을 수 있었다.

일반적으로 인서트 팁의 날(edge)은 직선으로 되어 있기 때문에 축 방향의 경사각을 줄 경우에 제작 후 공구의 기하학적 형상에 의해 가공오차를 동반할 수 있는데, Fig.16의 (a)는 축 방향의 경사각이 없는 경우이고 (b)는 축 방향의 경사각이  $\beta$  인 경우이다. 축 방향의 경사각에 의해 생기는 공구의 형상오차는 (19)식과 같다.

$$\epsilon = \sqrt{R^2 + \left(\frac{T_L}{2} \sin \beta\right)^2} - R \quad (19)$$

Table 1의 각 형상에서는 공구의 끝단에서는 APMT 팁을 사용하고 축 방향 경사각을 모두 영으로 하였으므로 형상오차가 Fig.16(a)와 같이 생기지 않고 측면에서는 SPMT 팁을 사용하여 축 방향 경사각을 주었기 때문에 형상오차가 생기게 된다. Fig.16(b)와 같이 측면에서의 공구 형상오차는 Fig.15의 (a)와 (b)의 경우  $4.4 \mu\text{m}$ , (c)  $54.0 \mu\text{m}$ , (d)

$45.0 \mu\text{m}$ , (e)  $21.0 \mu\text{m}$ , (f)  $18.3 \mu\text{m}$ 가 되므로 축 방향 경사각을 크게 할 경우 형상오차가 급격하게 커지므로 정상으로의 사용은 곤란할 수 있으며 형상오차를 고려한 가공이 필요하게 된다. 따라서 정상에 사용할 경우에는 공구의 직경에 따라 축 방향 경사각을 작게 할 필요가 있음을 알 수 있다. 그리고, 5-축 가공 기법에 의한 인서트 팁의 곡선화와 본 연구의 5-축 가공에 의한 엔드밀 몸체 제작을 연계하면 정밀가공을 할 수 있는 인서트 팁용 엔드밀 공구를 제작할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 5-축 가공에 의한 엔드 밀 몸체의 제작 방법에 대하여 연구하였는데, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 제작된 엔드밀 몸체에 인서트 팁이 쉽게 조립되는 것으로 보아 설계형상과 가공결과가 거의 일치하였음을 알 수 있었고, 5-축 동시 제어 가공으로 매끄러운 곡선을 얻을 수 있었고, 전용 소프트웨어로 NC 파트 프로그램을 신속하게 얻을 수 있기 때문에 수요자가 원하는 치수의 다양한 인서트 팁용 엔드밀 공구를 신속하게 제작할 수 있다. 그리고, 인서트 팁의 곡선화를 실현하면 본 연구는 정상과 황삭 공용의 공구제작에도 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Ibrahim Zeid, "CAD/CAM Theory and Practice", McGraw-Hill, pp. 179~203, 1991.
- (2) Edward G. Hoffman, "Fundamentals of Tool Design", Society of Manufacturing Engineers Publications, pp. 101~104, 1984.



- (3) 조현덕, 박영원, "Insert Tip용 End Mill Body의 5-축 가공에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계학술대회, 2001.
- (4) 조현덕, 정대일, 윤문철, 최두선, 신보성, 이응숙, 董玉革, "Ruled-Surface로 형성된 임펠러 블레이드 전용 CAD/ CAM 시스템 개발 I(모델링에 관한 연구)", 한국공작기계학회, 제10권, 제6호, 2001.
- (5) 조현덕, 정대일, 윤문철, 최두선, 신보성, 이응숙, 董玉革, "Ruled-Surface로 형성된 임펠러 블레이드 전용 CAD/ CAM 시스템 개발 II(5-축 가공에 관한 연구)", 한국공작기계학회, 제11권, 제3호, 2002.
- (6) H.D.Cho, Y.T.Jun, and M.Y.Yang, "Five- Axis CNC Milling for Effective Machining of Sculptured Surfaces", Int. J. Prod. Res., Vol. 31, No. 11, 1993.
- (7) S.H.Suh, J.J.Lee, and S.G.Kim "Flank milling of Ruled surfaces by the Additional-Axis Machining Method," ASME J. of Manufacturing Systems, Vol. 18, No. 1, 1999.
- (8) E.L.J.Bohez, "Five-axis milling machine tool kinematics chain and analysis", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 505 ~ 520, 2002.
- (9) SANDVIK Coromant, "Modern Metal Cutting" A practical handbook, pp. 500 ~ 591, 2000.