

Insert Tip용 End Mill Body의 5-축 가공에 관한 연구.

조현덕*, 박영원**

A Study on the 5-Axis Machining of End Mill Body with Insert Tip

Hyun-Deog Cho*, Young-Won Park**

Abstract

This study describes the geometric characteristic and the 5-axis machining method of end mill body with insert tip. The geometry of end mill body is consisted of the flute part and the insert tip part. Thus, this study defines the flute part as ruled surface with constant helix angle and the insert tip part as rectangular plane on general direction. The geometric algorithm and the 5-axis NC part program were calculated by our programmed software and a sampled end mill body was machined on 5-axis machining center equipped with two index tables. The machined end mill body with insert tip was very agreeable to the designed end mill body with insert tip. Thus, the method proposed in this study may be very useful for the machining of end mill body with insert tip.

Keywords : end mill body(엔드 밀 몸체), insert tip(인서트 팁), flute part(플루트 부), ruled surface(룰드 곡면)

* 경일대학교 기계공학부

** 경일대학교 기계공학부 대학원

1. 서론

가공산업은 CAD/CAM의 적용이 매우 효과적인 산업중 하나이며 CIM 및 공장자동화가 우선적으로 실현될 수 있는 산업분야라고도 할 수 있다⁽⁶⁾. 이러한 자동화 실현을 위해 정밀하면서 긴 수명을 갖는 공구의 개발이 중요한 문제로 대두된다고 할 수 있다. 효율적인 가공, 난삭재의 가공 및 긴 공구수명을 추구하기 위해 공구재료의 개발과 더불어 꾸준히 발전되어 왔으며 또한 다양한 형상의 공구를 필요로 하고 있다⁽⁶⁾. 이는 CNC 공작기계와 전용기의 발달과 더불어 가공생산성 향상을 위해 툴링(tooling) 문제 또한 매우 중요한 요인이 되기 때문이다. 그러나 일반적으로 정밀한 가공을 위한 연구, 복잡한 형상 가공을 위한 연구, 절삭성능 향상 등에 대해서는 많이 연구되어 왔으나 공구의 효율적 제작에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이며 산업체에서의 경험적 기술이 대부분인 것 같다.

중 절삭용 엔드 밀은 선박분야의 대형 가공물이나 금형의 깊은 홈 가공 등 황삭용으로 많이 사용되나, 대형 공구일수록 제품 가공 시 마모에 의한 재연삭 및 파손에 의한 공구교체에 드는 비용이 크다. 그래서, 대형인 경우 인서트 팁이 부착된 엔드 밀 공구를 사용하지만 정밀도에 대한 신뢰성이 떨어져 정삭용으로는 사용되지 않는 경향이 있다. 일반적으로 정삭용으로는 보링 바

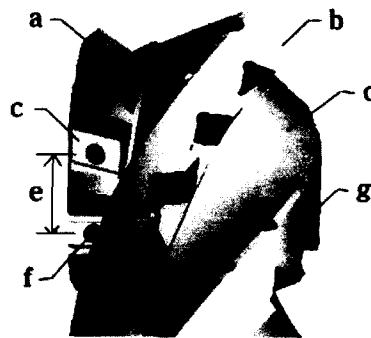
(boring bar)를 많이 사용하고 있는데 이는 인서트 팁용 엔드 밀이 가공성은 우수하지만 정밀도가 떨어지고 다양한 가공직경으로의 치수 조절이 불가능한데 비하여 비용이 비싸기 때문이다. 그래서 본 연구에서는 다양한 치수의 인서트 타입 밀링 공구를 신속하게 설계 및 제작할 수 있는 소프트웨어 개발을 위하여 기하학적 알고리즘을 규명하고 가공을 위한 포스트 프로세싱(post processing)방법을 규명하고자 한다. 국내의 인서트 타입 밀링 공구 제작은 메이커에서 표준화된 범위를 설정하여 시행착오와 경험으로 제작하여 재고를 공급하고 있으며, 간혹 새로운 형상 및 직경에 대한 주문은 제작에 많은 시간이 소요되고 또한 불량률이 많이 유발되기 때문에 공구 메이커에서도 원치 않은 것으로 알려져 있다. 그런데, 황삭가공의 능력을 향상시키고 크게 정밀하지 않은 경우에는 정상가공용으로도 많이 사용되며 인서트 팁의 교체로 반영구적인 공구수명을 갖기 때문에 수요가 증가하는 추세에 있으나 현실적으로 가격이 비싼 단점을 갖고 있다.

본 연구에서의 엔드 밀 몸체(body) 제작을 위한 가공공정은 헬릭스(helix)홈 가공, 엔드 밀의 인선부에 해당하는 인서트 팁이 놓일 자리 가공, 인서트 팁의 체결을 위한 구멍가공 및 텡 가공 등으로 나누어진다. 헬릭스 홈은 동일한 두 개의 곡선에 대한 룰드 곡면(ruled surface)으로 정의하였으며 각각의 곡선은 일정한 헬릭스 각을 갖도록 모델링하였으며, 가공은 4-축 가공이 되도록 하였다. 인서트 팁의 자리부 가공은 2면 지지형식과 3면 지지형식으로 구분하여 모델링하였으며 역시 4-축 가공을 필요로 한다. 즉, 본 연구에서는 원하는 크기와 형상의 인서트 팁용 엔드 밀 몸체를 제작하기 위한 모델링 및 가공 방법을 정립하였으며, 몸체 설계와 가공을 일괄적으로 처리할 수 있는 소프트웨어를 개발하였으며, 실제 샘플을 선정하여 가공실험을 거쳐 제조한 결과 기하학적 알고리즘의 정립과 가공방법을 확인할

수 있었다.

2. 모델링

본 연구의 대상이 되는 인서트 팁용 엔드 밀 공구는 Fig.1에서 보는 바와 같이, 헬릭스 홈, 날(flute)의 수, 상단 인서트 팁 자리, 하단 인서트 팁 자리부, 인서트 팁 조립을 위한 구멍으로 구성된다. 그리고 상단 인서트 팁 자리는 2가지 타입으로 나누어지며 각각 축 방향 경사각(axial angle)과 반경방향 경사각(radial angle)을 갖고, 하단 인서트 팁 자리는 축 방향 경사각을 가지며 일정간격으로 배열된다.



- a : 상단 인서트 팁 A (insert tip of A type)
- b : 상단 인서트 팁 B (insert tip of B type)
- c : 하단 인서트 팁 (beneath insert tip)
- d : 헬릭스 홈 (helix groove)
- e : 일정간격 배열 너비 (array width of space)
- f : hole
- g : flute

Fig.1 End mill body with insert tip

Fig.2는 헬릭스 홈의 가공을 위한 헬릭스 곡선을 펼친 전개도를 표현하는 것으로 헬릭스 각(helix angle)을 θ 라고 하고, xy-평면에서의 각을 ϕ 라고 하였는데 ϕ 의 범위는 $-2\pi < \phi \leq 0$ 로 하였고, 헬릭스 곡선상의 임의의 점을 P_i 라고 하고, 원점을 P_0 라고 하며 좌표값 $(0,0,0)$ 이 되고,

Y축 중심에서 헬릭스 곡선 시작점까지의 높이를 Y_H 라고 하고, 제작하고자 하는 엔드 밀 몸체의 반경을 R이라 하면, 헬릭스 곡선은 독립변수 ϕ 의 변화로 나타낼 수 있으며 임의의 위치 벡터 P_i 의 좌표값은 다음 식으로 구할 수 있다.

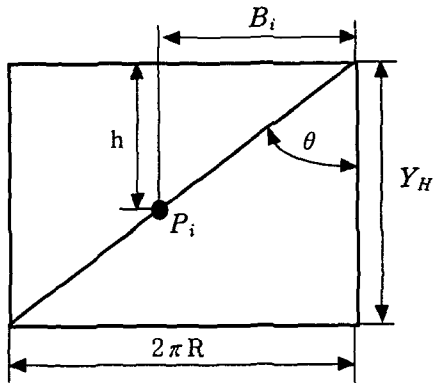


Fig.2 Helix curve of end mill body

$$P_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad (1)$$

$$= (R \sin \phi, Y_H - R \phi \tan \theta, R \cos \phi)$$

본 연구에서는 인서트 자리는 헬릭스 곡선 위의 평면으로 정의하였으며, 평면은 기준 점 P_i 를 설정하여 기하학적인 묘사를 하였는데, 인서트 팁의 측면 형상은 Fig.3과 같이 된다. 인서트 팁의 기하학적인 정의는 기준 점인 동시에 중심이 되는 P_i 와 모서리 끝점 $P_{\bar{n}}, P_{\bar{r}}, P_{\bar{\beta}}, P_{\bar{\alpha}}$ 로 나타내는데 각 점들의 좌표 값은 (2), (3), (4), (5) 식으로 표현된다. 여기서 α 는 인서트 팁의 측면 경사각이고, T_L 은 인서트 팁의 길이이고, T_w 는 인서트 팁의 폭이며 A_i 는 측면 경사각에 의한 바닥 면의 길이 변화 값으로 $T_i \tan \alpha$ 이 되며, P_i 는 (1)식으로 구할 수 있으며 이는 인서트 팁을 배치하고자 하는 점으로 지정할 수 있다.

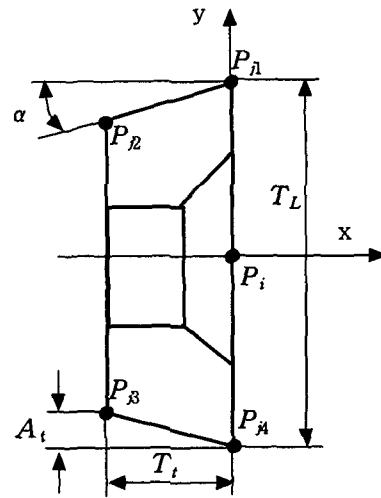


Fig.3 Modeling of insert tip

$$P_{\bar{n}} = (X_i, Y_i + \frac{T_L}{2}, Z_i) \quad (2)$$

$$P_{\bar{r}} = (X_i - T_i, Y_i + \frac{T_L}{2} - A_i, Z_i) \quad (3)$$

$$P_{\bar{\beta}} = (X_i - T_i, Y_i + \frac{T_L}{2} + A_i, Z_i) \quad (4)$$

$$P_{\bar{\alpha}} = (X_i, Y_i - \frac{T_L}{2}, Z_i) \quad (5)$$

3. 가공

엔드 밀 몸체 가공을 위해 사용된 5-축 기계는 TCH-45 모델의 수평 3-축 공작기계에 2개의 부가 축 A, B를 갖는 로터리 테이블(rotary table)을 설치하여 동시 5-축 제어가 가능하도록 구성된 것이며, 공작물이 고정되고 공구가 움직이는 것으로 좌표계를 표현하면 Fig.4와 같이 된다.

Fig.5는 헬릭스 홈 가공을 위한 공구 위치와

방향을 표현하는 것으로 홈의 측면 형상은 Fig.1의 헬릭스 곡선을 기준으로 Y-축에 수직이면서 몸체 중심 축과 만나는 직선들로 이루어지는 롤드 곡면으로 정의하였다. 따라서 Fig.5에서와 같이 공구의 방향은 Y-축을 중심으로 움직이는 B-축의 변화만으로 가공이 가능하게 된다.

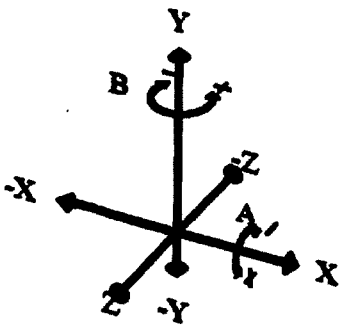


Fig.4 Coordinates of 5-axis machining center

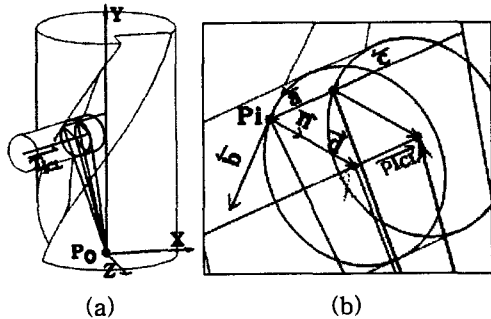


Fig.5 Cutter axis position for helix machining

Fig.5에서 \vec{a} 는 헬릭스 곡면을 이루는 직선 벡터로 가공이 이루어지는 부분이며 크기는 엔드 밀 몸체의 반경 R이고, \vec{c} 의 방향은 \vec{a} 와 같고 크기가 T_w 만큼 작은 인서트 팁의 폭만큼 안쪽으로 들어간 벡터이고, \vec{b} 는 헬릭스 곡선의 접선 벡터이며, \vec{d} 는 \vec{a} 와 \vec{b} 에 수직이며 크기가 r인 벡터이고, 여기서 r은 가공을 위한 공구의 반경이

다. 따라서 공구의 CL 점은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{a} = (-R \sin \phi, 0, R \cos \phi) \quad (6)$$

$$\vec{b} = (-\sin \theta \cos \phi, -\cos \theta, -\sin \theta \sin \phi) \quad (7)$$

$$\vec{c} = (-(R - T_w) \cos \phi, 0, (R - T_w) \cos \phi) \quad (8)$$

$$\vec{d} = r \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \quad (9)$$

$$\vec{P}_{iCL} = \vec{P}_i + \vec{d} + \vec{c} - \vec{a} \quad (10)$$

몸체의 헬릭스 홈 가공을 위한 임의의 위치에서의 공구위치 벡터는 (10)식이 되고 이 때 공구의 방향 벡터는 B-축이 ϕ 만큼 회전한 방향이 된다. 따라서, NC-code상의 A는 0이고 B는 ϕ 가 되며, (10)식의 좌표값을 (X_{CL}, Y_{CL}, Z_{CL}) 라고 하면 NC-code상의 위치 벡터(X, Y, Z)는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{CL} \\ Y_{CL} \\ Z_{CL} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

인서트 팁 자리는 Fig.6과 같으며 공구 축 방향은 XZ-평면과 평행한 임의의 평면 내에 놓이게 되며, 인서트 팁 자리가 결정되면 이 위치에서 평면이 정의되고 2차원 가공을 수행하는 것으로 하였다. 그런데, 인서트의 고정상태에 따라 절삭성에 영향을 미치는 공구의 경사각이 달라지게 되므로 본 연구에서는 이를 고려하였다. 따라서 반경 방향 경사각(radial rake angle) δ 를 고려한 인서트 팁 자리 가공의 공구 축 방향 벡터는 헬릭스 홈 가공보다 $-\delta$ 만큼 더 회전하면 된다. 즉, B-축의 각도는 $\phi - \delta$ 가 되고, 공구의 위치 벡터는 (11)식에서 ϕ 대신 $(\phi - \delta)$ 를 대입하면 된다. 그러나 헬릭스 홈의 깊이와 인서트 팁 자리의 깊

이가 다를 경우에는 공구 위치 벡터를 수정하여야 하며, 본 연구에서의 반경 방향 경사각의 정의는 인서트 팁의 기준 점 P_i 에 대하여 상부와 하부의 형상오차가 비대칭이 되도록 하는 원인이 되나 그 오차가 아주 작기 때문에 본 연구에서는 무시하였다.

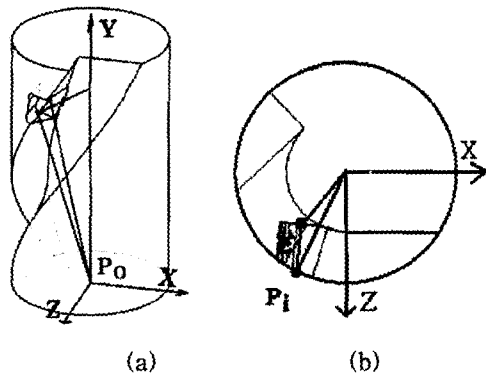


Fig.6 Cutter axis position for insert tip plane machining

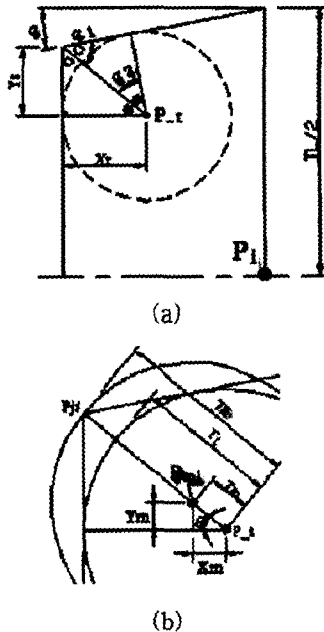


Fig.7 Tool path point for insert tip plane machining

Fig.7(a)는 인서트 팁의 자리 가공을 위한 공구 경로를 산출하는데 필요한 기하학적 조건은 표시하며, α_1 은 $(90^\circ + \alpha)/2$ 가 되고 α_2 는 $(90^\circ - \alpha_1)$ 이 되며, P_i 를 공구의 중심이라 하면 X_i 는 공구의 반경 r_i 가 되며 Y_i 는 (12)식으로 표현된다. Fig.7(b)는 인서트 팁 자리 가공에 있어 공구의 반경 r_i 를 고려한 경로산출 후 미 절삭부분인 안쪽 모서리 부분을 가공하기 위한 공구경로 산출에 필요한 기하학적 관계를 나타내고 있다. 따라서 Fig.7(b)에 나타난 치수의 계산 결과는 (13)과 (14)식과 같다.

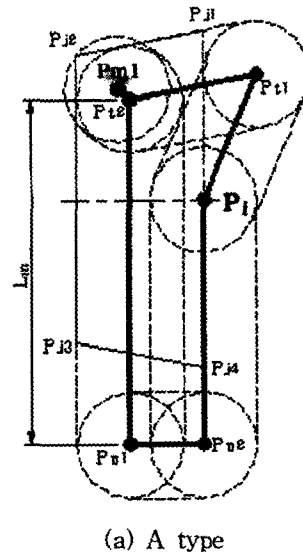
$$Y_i = X_i \tan \alpha_2 \quad (12)$$

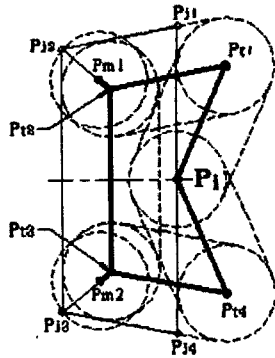
$$X_m = T_m \cos \alpha_2 \quad (13)$$

$$Y_m = T_m \sin \alpha_2 \quad (14)$$

여기서, $T_m = TI - r_t$

$$TI = \frac{r_t}{\cos \alpha_2} \quad \text{이다.}$$





(b) B type

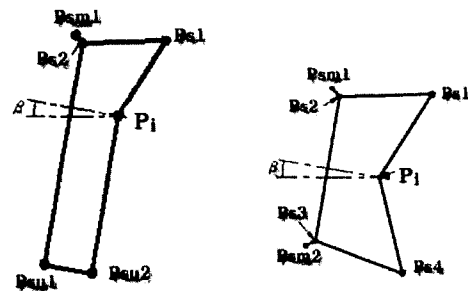
Fig.8 Tool path for insert tip plane machining

인서트 팁 자리 가공을 위한 공구 경로를 전체적으로 표현하면 Fig.8과 같다. Fig.8(a)와 같은 공구경로는 인서트 팁을 고정하는데 있어서 이웃하는 두 면이 지지할 수 있도록 가공하기 위한 것이며 Fig.8(b)는 3면에서 지지할 수 있도록 가공하기 위해서이다. 따라서 공구경로를 표현하는 모든 위치 점은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \vec{P}_{a1} &= \vec{P}_{a1} + (X_t, -Y_t) \\
 \vec{P}_{e2} &= \vec{P}_{e2} + (X_t, -Y_t) \\
 \vec{P}_{b3} &= \vec{P}_{b3} + (X_t, Y_t) \\
 \vec{P}_{h4} &= \vec{P}_{h4} + (X_t, Y_t) \\
 \vec{P}_{m1} &= \vec{P}_{e2} + (-X_m, Y_m) \\
 \vec{P}_{m2} &= \vec{P}_{b3} + (-X_m, -Y_m) \\
 \vec{P}_{u1} &= \vec{P}_{e2} + (0, -L_m) \\
 \vec{P}_{u2} &= \vec{P}_{a1} + (T_t, -r_t, 0)
 \end{aligned} \tag{15}$$

그리고, 제작하고자 하는 엔드 밀 공구의 공구인선이 3차원 가공상태가 되도록 축 방향 경사

각 β 를 적용하면 Fig.9와 같은 공구 경로가 되며 (15)식의 모든 위치 점을 Z-축을 기준으로 회전한 좌표 값으로 변환된다. 즉, (15)식의 모든 위치 점은 (16)식의 변환행렬에 의하여 변환된 좌표 값이 된다.

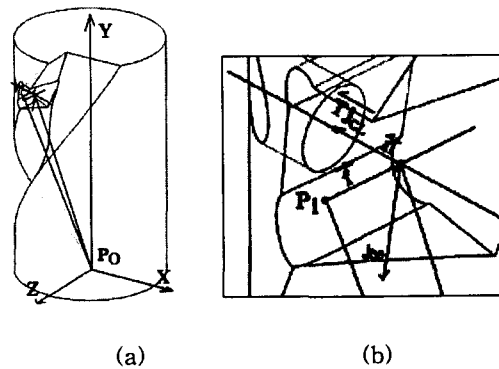


(a) A type

(b) B type

Fig.9 Tool path considering to axial rake angle for insert tip plane machining

$$T(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \tag{16}$$



(a)

(b)

Fig.10 Cutter position for hole machining

최종적으로 인서트 팁의 고정을 위한 볼트 구멍과 팁 가공의 좌표계는 Fig.10과 같고, 공구 축 방향 벡터 \vec{T}_H 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{T}_H = \frac{\vec{f} \times \vec{g}}{|\vec{f}| |\vec{g}|} = (T_{Hx}, T_{Hy}, T_{Hz}) \quad (17)$$

여기서,

$$\vec{f} = (-\sin(\phi - \delta), 0, \cos(\phi - \delta))$$

$$\vec{g} = (-\sin\beta\cos\phi, -\cos\beta, -\sin\beta\sin\phi)$$

이다. 그리고, 공구의 위치 벡터 \vec{P}_H 는 다음과 같다.

$$\vec{P}_H = \vec{P}_i + \frac{T_W}{2} \frac{\vec{f}}{|\vec{f}|} = (P_{Hx}, P_{Hy}, P_{Hz}) \quad (18)$$

따라서, 본 연구에 사용된 5-축 공작기계의 로터리 테이블의 회전각 A와 B는 다음과 같이 된다.

$$A = -\tan^{-1}\left(\frac{T_{Hy}}{T_{Hz}}\right) \quad (19)$$

$$B = \tan^{-1}\left(\frac{T_{Hx}}{\sqrt{T_{Hy}^2 + T_{Hz}^2}}\right) \quad (20)$$

그리고 공구 축 방향 벡터를 실제 기계의 Z-축과 일치시키는데 필요한 좌표축 기준에서의 좌표 변환을 위하여 X-축에 대한 회전을 θ_x 라하고 Y-축에 대한 회전을 θ_y 라고 하면 θ_x 와 θ_y 는 (21)과 (22)식으로 되고 구멍의 가공 시작점의 공구 위치 벡터 (P_x, P_y, P_z) 는 (23)식으로 구할 수 있다⁽¹⁾.

$$\theta_x = -\tan^{-1}\left(\frac{T_{Hy}}{T_{Hz}}\right) \quad (21)$$

$$\theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{T_{Hx}}{T_{Hz}}\right) \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = M(\theta_x)N(\theta_y) \begin{pmatrix} P_{Hx} \\ P_{Hy} \\ P_{Hz} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

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

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

4. 결과

본 연구에서 연구된 몸체 설계와 가공을 위하여 처리 소프트웨어를 개발하여 실제 가공 실험을 하였는데, Fig.11은 엔드 밀 몸체 가공을 위해 별도로 프로그램한 소프트웨어의 화면을 보여준다.

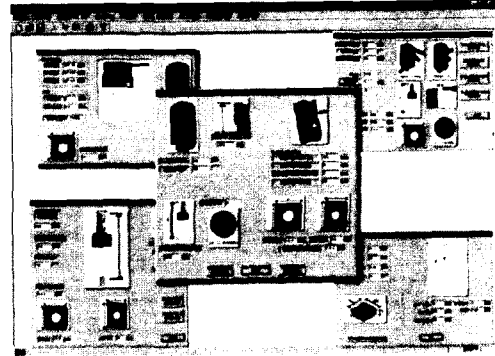


Fig.11 Developed software for design and machining

Fig.11의 소프트웨어를 통하여 가공한 결과를 Fig.12에서 보여주는데, 여기서 엔드 밀 몸체의 반경 R은 35mm, 헬릭스 홈 가공을 위한 공구의 반경 r은 8mm, 인서트 팁 자리 가공에 사용된 공구의 반경 r_t 는 2mm, 인서트 팁고정을 위한 구멍의 탭은 M5로 제작되었고, 몸체부의 재료는 S45C를 사용하였으며 가공에 사용된 공구는 초경공구를 사용하였다. Fig.12(a)는 인서트 팁 자리 가공을 위한 공구 경로 A 타입이며 Fig.12(b)는 공구 경로 B타입에 의해 가공된 결과를 보여

준다.



(a) A type



(b) B type

Fig.12 Machined end mill body

법과 가공 방법은 제작 결과와 비교하여 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 일괄 처리 소프트웨어에 의한 제작은 수요자가 원하는 치수와 형상의 설계와 가공을 능률적으로 할 수 있다. 그러나, 절삭조건을 고려한 형상 모델링 방법에 대한 추가 연구가 필요하고 절삭성 및 정밀도 실험 등을 추가 연구할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) 조현덕 외 5, "Ruled Surface로 형성된 임펠러 블레이드 5-축 가공에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계학술대회, 2000
- (2) S.H.Suh, J.J.Lee and S.G.Kim "Flank milling of Ruled surfaces by the Additional-Axis Machining Method," ASME J. of Manufact. Systems, Vol.18, No.1, 1999
- (3) Cho H.D., "A Study on 5-Axis Precision Machining for Sculptured Surfaces", Ph.D thesis, KAIST, 1993
- (4) SANDVIK Coromant, "Modern Metal Cutting" A practical handbook, pp500-591, 2000
- (5) Edward G. Hoffman, "Fundamentals of Tool Design", Society of Manufacturing Engineers Publications, pp101-104, 1984
- (6) Ibrahim Zeid, "CAD/CAM Theory and Practice", McGraw-Hill, pp179-203, 1991

5. 결 론

본 연구에서 개발된 엔드 밀 몸체의 설계 방