

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME96-E-22)에 의하여 연구되었음

## 고속 볼엔드밀링에서 공구마모를 고려한 공구의 가공경사각 선정

고 태 조\*\*, 정 훈\*, 김 희 술\*\*

### Selection of Machining Inclination Angle of Tool Considering Tool Wear in High Speed Ball End Milling

Tae Jo Ko\*\*, Hoon Jeong\*, Hee Sool Kim\*\*

#### ABSTRACT

High speed machining is a key issue in die and mold manufacturing recently. Even though this technology has great potential of high productivity, tool wear accelerated by high cutting speed to the hardened materials is other barrier. In this research, we attempted to reduce tool wear by considering tool inclination angle between tool and workpiece. The boundary lines describing machined sculptured surfaces were represented by both of cutting envelop condition and the geometric relationship of successive tool paths. Chip cross section, and cutting length could be obtained from the calculated cutting edge and the rotational engagement angle. From the simulation results, machining inclination angle of tool of 15° was good enough from the point of tool wear and cutting force, and this value was verified through the cutting experiment of high speed ball end milling.

**Key Words** : High Speed Machining(고속가공), Ball End Milling(볼 엔드밀링), Tool wear (공구마모), Envelope Condition(포락조건), Machining Inclination Angle(가공경사각)

#### 1. 서 론

고속가공은 절삭속도와 이송속도 자체의 고속화로 인한 가공시간의 단축, 가공된 표면품위의 향상으로 수작업인 폴리싱이나 래핑시간의 단축에 의한 생산성 향상 때문에 몰드나 다이를 만드는 금형산업에 있어서 많은 관심의 대상이 되고 있다<sup>(1)</sup>. 고속가공은 현재 정확히 정의할 수는

없으나 절삭속도 300m/min, 이송속도 10m/min 이상으로 가공하는 경우이며, 이를 뒷받침하기 위하여 주축속도 100,000rpm, 이송속도 50m/min인 고속공작기계가 상용화되어 있다<sup>(1)(2)</sup>. 고속가공을 실현하기 위해서는 주축 및 이송계의 고속화, 제어시스템, 가공데이터의 전송, 공구경로결정, 절삭공구 등 많은 문제를 해결하여야 하며 그 중에서 가공공구가 가장 많은 문제점을 가지고 있다<sup>(1)(3)(4)(5)</sup>.

\* 영남대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 영남대학교 기계공학부

고속가공은 이미 항공기산업 등에서 경금속 절삭의 경우에 많은 효능을 나타내고 있으나, 현재는 대부분의 경우 열처리 경화된 금형강을 가공하는 경우가 많으며, 이 경우 기존의 저속가공이나 방전가공 등에 비해 큰 경쟁력을 가지고 있다. 경화된 금형강의 고속가공에서는 비록 절삭깊이를 적게 할지라도 고속과 고경도라는 특성 때문에 공구의 마모가 큰 문제가 되고 있으며, 이를 위해 최근에는 TiAlN 피복공구 또는 CBN 공구를 이용한 고속가공에 대하여 많은 연구를 하고 있다<sup>(6)(7)</sup>.

한편, 자유곡면을 많이 갖는 금형의 절삭가공에서는 볼 앤드밀을 이용하여 밀링가공을 주로 한다. 이 경우 공구는 절삭방향 또는 가공되어지는 표면과 공구의 접촉각인 공구표면법선의 각도에 따라서 절삭특성이 달라지게 된다. 즉, 평면을 볼 앤드밀링할 때에는 공구의 선단은 절삭속도가 0이 되기 때문에 절삭이 이루어지지 않게 되고, 따라서 공구의 치핑이나 마모가 빨리 발생하게 되며 가공물의 표면품질 등에 영향을 미치게 된다.

상기와 같은 관점에서 Schulz와 Hock는 고속가공에서의 절삭조건 연구에서 공구의 가공경사각에 대하여 고찰을 하였다<sup>(8)</sup>. 그들은 볼 앤드밀이 공작물을 절삭가공할 때 포락조건을 이용하여 절삭이 일어나게 되는 공구의 기하학적 각도인 절삭날각과 공구회전각에 대한 관계를 구하였다. 그리고 절삭조건에 따른 기하학적 관계로부터 절삭깊이, 절삭칩 단면적 등을 구하여 공구마모를 가장 적게 일어나게 하는 가공경사각을 이론적으로 결정하였다.

본 연구에서는 Schulz와 Hock가 제안한 가공 경계면 표현법<sup>(10)</sup>을 이용하여 고속절삭에서 공구마모를 가장 적게 발생시키는 가공경사각도를 이론적으로 재확인 하였다. 그리고는 실제로 금형의 재료로 많이 사용이 되는 금형강인 STD11에 대하여 고경도로 열처리를 한 후, 가공면에 대하여 경사각도를 계속하여 변경하면서 공구마모를 가장 적게 일으키는 경사각도를 실험적으로 검증하였다. 실험결과, 이론적으로 시뮬레이션에서 구한 최적의 가공경사각인 15°에서 공구마모가 가장 적게 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. 공구의 가공경사각과 절삭 파라미터

자유곡면을 가공하는데 적용하는 볼 앤드밀링 가공에서는 절삭날의 접촉위치에 따라서 절삭속도가 변하게 되며, 공구의 중심에서는 절삭속도가 0이 된다. 따라서 절삭면에 대해 공구축이 수직이 되면 절삭속도의 영향에 의해

가공면이 거칠어지고 공구의 치핑이나 마모를 심화시키게 된다. 이때 Fig. 1과 같이 경사절삭을 하면 공구의 수명이나 가공면의 표면거칠기 개선을 기대할 수가 있다. 이 경우 Fig. 1에서와 같이 공구가 기울어진 각, 즉 3축 공작기계에서는 공작물이 기운 가공경사각  $\beta$ 에 따라서 전진절삭(plunge cut)과 역절삭(reverse cut)으로 나누어지게 된다.

Fig. 1에서  $V_f$ 는 공작물의 이송속도이며,  $\beta_f$ 는 이송방향과 같은 방향으로 기울어진 가공경사각을 나타내고,  $\beta_n$ 은 이송방향에 대해 수직인 방향으로 기울어진 가공경사각을 뜻한다. 또한,  $a_p$ 는 절삭면에 대해 수직방향으로의 절삭깊이이며,  $b_r$ 은 step over를 나타내는 경로간 이송(pick feed)을 나타낸다.  $\beta_f$ 와  $\beta_n$ 이 각각 양의 값을 갖는 방향으로 가공되는 것을 역절삭이라고 하고, 음의 값을 갖고서 반대방향으로 기울어져 가공하는 것을 전진절삭이라고 정의한다. 일반적으로 금형과 같이 자유곡면을 갖는 가공면을 절삭할 때에는 이와 같은 절삭방식이 계속하여 반복된다.

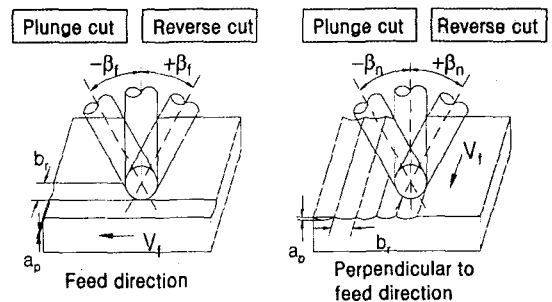


Fig. 1 Definition of cutting method

한편, Fig. 2는 공구가 가공경사각을 갖고서 절삭할 때 절삭에 직접 영향을 미치는 절삭 파라미터를 나타낸 그림이다. 여기서  $\kappa$ 는 공구의 정점으로부터 임의의 절삭날까지를 나타내는 절삭날각이고,  $\phi$ 는 절삭날이 회전한 절삭회전각이다. 공구가 경사져 있을 때 실제 절삭에 참여하는 절삭날각은  $\kappa_c(\phi, \beta)$ 이며, 이 각은 절삭되어지는 부분의 가장 높은 절삭날 각  $\kappa_a(\phi, \beta)$ 에서 가장 낮은 절삭날 각  $\kappa_r(\phi, \beta)$ 를 뺀 각이다. 또, 절삭이 처음 이루어져서 칩이 생성되어지는 시작부분까지의 절삭회전각을  $\phi_r(\kappa, \beta)$ 이라 하고, 끝나는 부분까지의 절삭회전각을  $\phi_a(\kappa, \beta)$ 라고 할 때 실제 절삭하는 절삭회전각은

이들 절삭회전각의 차로 나타낼 수 있으며  $\varphi_c(\kappa, \beta)$  라고 정의한다. 임의의 절삭회전각에 대한 절삭날각의 변화에 따른 절삭두께를  $h(\varphi, \kappa, \beta)$  라고 할 때, 이 절삭두께를 실제 절삭날각  $\kappa_c(\varphi, \beta)$ 에 대해 적분하면 절삭에 있어서 중요한 영향을 미치는 절삭단면적  $A(\varphi, \beta)$ 가 얻어진다. 한편, 절삭두께는 절삭회전각에 따라서 크기가 변하기 때문에 절삭회전각에 대해 평균하여  $h_m(\kappa, \beta)$ 으로 표현하였다. 또한,  $l_c$ 는 절삭길이로서 실제 절삭회전각  $\varphi_c(\kappa, \beta)$ 에 대한 칩의 원주길이이다.

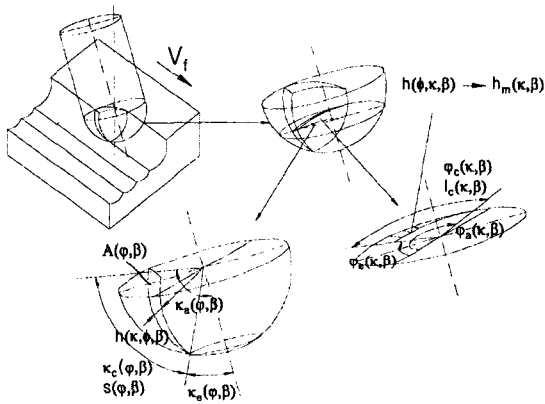


Fig. 2 Cutting parameters used in ball end mill with tilt angle

### 3. 가공면 경계선의 결정<sup>(8)</sup>

#### 3.1 공구의 기하학적 표현

Fig. 3은 Fig. 2에서 정의한 변수로 나타낸 볼 엔드밀 공구의 기하학적 형상이다. 반지름  $R_k$ 를 가진 볼 엔드밀 위의 한 점은 반지름의 단위벡터인  $\bar{u}$ , 절삭날각  $\kappa$ , 절삭회전각  $\varphi$ 의 함수로써 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 단, 회전각은 좌표계의  $y$ 축에서부터 시작하며 절삭날 각은 공구의 선단에서부터 시작된다.

$$\bar{u} = \begin{Bmatrix} \sin \kappa \sin \varphi \\ \sin \kappa \cos \varphi \\ \cos \kappa \end{Bmatrix}, \quad \bar{K} = R_k \cdot \bar{u}, \quad 0 \leq \kappa \leq \frac{\pi}{2},$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (1)$$

이때 만약 가공경사각에 의해 공구가 Fig. 1과 같이 기울어지면 회전매트릭스인 식 (2)를 식 (1)에 곱함으로써

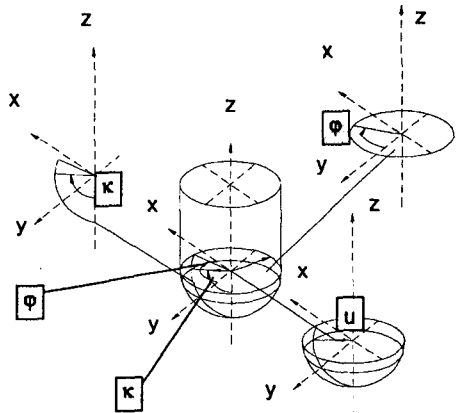


Fig. 3 Tool geometry

위치벡터를 결정할 수가 있다. 즉, 식 (1)과 식 (2)에 의해 기울어진 볼 엔드밀 공구의 기하학적 표현은 식 (3)과 같다.

$$D = \begin{pmatrix} \cos \beta_f & \sin \beta_f \sin \beta_n & \sin \beta_f \cos \beta_n \\ 0 & \cos \beta_n & -\sin \beta_n \\ -\sin \beta_f & \cos \beta_f \sin \beta_n & \cos \beta_f \cos \beta_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{K}_a = D \cdot \bar{K} \quad (3)$$

여기서  $\beta_f$ 는 이송방향의 전후로 기울어진 가공경사각이고,  $\beta_n$ 는 이송방향의 좌우로 기울어진 가공경사각이다.

#### 3.2 포락(Envelope)조건에 의한 가공면 생성 절삭공구 변수의 결정

가공경사각이 있을 때 실제 가공에 참여하게 되는 절삭공구의 변수는 공구와 공작물사이의 가공면 생성 포락조건에 의해 결정을 할 수가 있다. 즉, 볼 엔드밀 한 날이 공작물을 절삭하게 되는 포락조건은 절삭날 표면의 법선벡터  $\bar{n}$ 과 공작물의 이송방향  $\bar{f}$ 가 수직일 경우이다. 따라서 법선벡터와 이송방향의 내적을 0으로 하면 식 (4)와 같이 표현 된다.

$$\bar{n} \cdot \bar{f} = \left( \frac{\partial \bar{K}_a}{\partial \varphi} \times \frac{\partial \bar{K}_a}{\partial \kappa} \right) \cdot \bar{f} = 0 \quad (4)$$

여기서, 이송방향  $\vec{f}$  는 Fig. 4에서 보는 것과 같이  $x$  방향과 일치한다. 공구위의 한 점을 나타내는 식 (1)을 식 (4)에 대입하면, 임의의 절삭회전각  $\varphi$  에 대하여 공작물과 절삭이 일어나는 순간적인 절삭날각  $\kappa$  는 식 (5)와 같이 된다.

$$\kappa_r(\varphi) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \beta_f \cos \beta_n}{\sin \varphi \cos \beta_f + \cos \varphi \sin \beta_f \sin \beta_n} \right) \quad (5)$$

이 절삭날각은 결국 가공면의 경계선을 생성하는 절삭날각이 되며, 따라서 식 (5)를 식 (3)에 대입하게 되면 가공면 윤곽선인  $F_{k,a}(\phi)$  를 얻을 수가 있다. 한편, 식 (5)에서 절삭날각  $\kappa$  를 알고 있으면 실제 표면을 가공하게 되는 공구의 절삭회전각  $\varphi_r$  을 역으로 구할 수도 있다.

### 3.3 가공면의 경계선을 결정하는 절삭변수의 계산

볼 엔드밀이 공작물을 가공하게 되면 가공되어지는 면의 형상은 Fig. 4와 같이 3개의 곡선으로 가공면 경계선을 형성하게 되며, 이들 경계곡선은 공구의 구면 좌표계를 이용하여 실제 절삭하는 부분에 해당하는 절삭회전각  $\varphi$  와 절삭날각  $\kappa$  로 나타낼 수가 있다.

경계곡선 1-2 에서 절삭이 시작되는 절삭날각과 끝나는 절삭날각  $\kappa_1, \kappa_2$  는 공구의 기하학적 표현  $\bar{K}$  와 포락 조건에서 얻어진 공작물의 가공면 윤곽선  $F_{k,a}(\phi)$  의 위치벡터를 비교하여 구할 수가 있다. 따라서 주어진 각  $\varphi$  에 대한 절삭날 각 1, 2는 아래의 식 (6)과 같이 구할 수가 있다.

$$y(\bar{K}_a(\kappa_{1,2})) = y(\bar{F}_{k,a}(\varphi_r)) + b_r \quad (6)$$

$$z(\bar{K}_a(\kappa_{1,2})) = z(\bar{F}_{k,a}(\varphi_r))$$

또, 경계곡선 2-3은 공작물의 평면상에 존재하므로 곡선의  $z$ 점들은 모두 일정하며, 따라서 절삭날 각  $\kappa_2, \kappa_3$  을 얻기 위한 조건은 식 (7)과 같다.

$$z(\bar{K}_a(\kappa_{2,3})) = a_p - R_K \quad (7)$$

경계곡선 1-3은 공구가 날당 이송량  $f_z$  에 의해 진행을 한다면 현재 절삭을 하는 날과 이송되기전의 공구가 서로 만나서 생성되는 곡선이다. 따라서 주어진 실제 절삭하는 절삭회전각  $\varphi$  에 대한 경계곡선 1-3을 생성하는 절삭날 각  $\kappa_1, \kappa_3$  는 아래의 식 (8)로 구할 수가 있다.

$$x(\bar{K}_a(\kappa_{1,3})) = x(\bar{K}_a(\varphi_v, \kappa_v)) - f_z$$

$$y(\bar{K}_a(\kappa_{1,3})) = y(\bar{K}_a(\varphi_v, \kappa_v)) \quad (8)$$

$$z(\bar{K}_a(\kappa_{1,3})) = z(\bar{K}_a(\varphi_v, \kappa_v))$$

식 (6), (7), (8)에서 얻어진  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  는 무수히 많으나 식 (6)과 식 (7)에서 경계곡선이 만나는 점의 절삭날 각  $\kappa_2$  를, 식 (7)과 식 (8)에서  $\kappa_3$  를, 식 (6)과 식 (8)에서  $\kappa_1$  을 각각 구하여 폐곡면을 형성할 수가 있다. 또, 절삭회전각  $\varphi_c$  는 주어진 절삭날각  $\kappa$  에 대하여 시작 절삭회전각  $\varphi_s$  와 끝 절삭회전각  $\varphi_e$  의 차로 나타낼 수 있으며 식 (9)와 같다. 그리고, Fig. 2에서 보는 것과 같이 공구수명에 영향을 미치는 절삭경로  $l_c$  는 아래의 식(9)와 같이 실제 절삭회전각  $\varphi_c$  의 함수로 표현할 수 있다.

$$\varphi_c = \varphi_s(\kappa) - \varphi_e(\kappa) \quad (9)$$

$$l_c = R_K \cdot \sin \kappa \cdot \varphi_c(\kappa)$$

한편, 주어진 절삭날각  $\kappa$  와 절삭회전각  $\varphi$  에 대한 절삭두께  $h$  는 식 (1)의 공구반경 단위 벡터  $u$  의 변화에 의해서 얻어질 수 있다. 그때의  $u$  를 얻기 위한 식은

$$x(\bar{K}_a(u)) = x(\bar{K}_a(\varphi_v, \kappa_v)) - f_z$$

$$y(\bar{K}_a(u)) = y(\bar{K}_a(\varphi_v, \kappa_v)) \quad (10)$$

$$z(\bar{K}_a(u)) = z(\bar{K}_a(\varphi_v, \kappa_v))$$

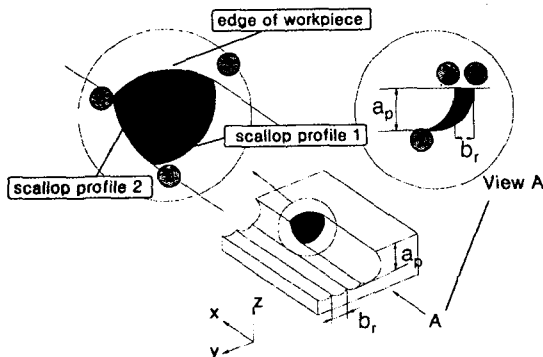


Fig. 4 The parametric boundary curves of the workpiece

과 같이 된다. 여기서 구한  $u$ 에 대한 절삭 두께  $h$ 는 절삭날 각  $\kappa$ 와 회전각  $\varphi$ 에 따라서 변하고, 그에 대한 평균 절삭 두께  $h_m(\kappa)$ 는 식 (11)과 같이 어느 절삭회전각  $\varphi$ 에 대해 이산값으로 표현가능하기 때문에 적분하여 나타낸다.

$$h_m(\kappa) = \frac{1}{\varphi_c} \int_{\varphi_c}^{\varphi_a} h(\varphi) d\varphi \quad (11)$$

그리고, 회전각  $\varphi$ 에 대한 절삭단면적은 식 (12)와 같다.

$$A(\varphi) = \int_{\kappa_c}^{\kappa_a} h \cdot R_\kappa \cdot d\kappa \quad (12)$$

#### 4. 시뮬레이션에 의한 가공경사각 선정

##### 4.1 가공면의 경계영역

가공면의 경계선을 결정하는 절삭변수를 시뮬레이션을 통하여 계산하기 위한 가공조건으로 가공경사각을  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 7가지로 고려하였으며, 공구의 직경은  $6mm$ , 절삭깊이는  $0.3mm$ , 피크이송은  $0.22mm$ , 이송속도는  $0.1mm/tooth$ 로 하였다. Fig. 5는 가공경사각이  $15^\circ$ 일 때 식 (7), (8), (9)에 절삭조건을 적용하여 얻은 가공면의 경계영역을 나타내는 변수범위로서, 가로축은 공구의 절삭회전각이고 세로축은 공구의

절삭날각이다. ①②③으로 둘러 쌓인 폐곡선 부분이 공구가 실제로 가공을 할 수 있는 절삭변수의 경계부분으로 이 내부의 범위각도에서는 실제 절삭이 이루어짐을 뜻한다. 즉, 임의의 절삭날각  $\kappa$ 가 주어졌을 때, Fig. 5에서와 같이 곡선 ①②, ①③에 의해  $\varphi_c$ ,  $\varphi_a$ 가 결정이 되며, 이 두각의 차이는 절삭영역의 실제 절삭회전각  $\varphi_c$ 가 된다. 이때 절삭회전각  $\varphi_c$ 는 식 (11)에서와 같이 평균절삭두께  $h_m$ 을 구하는데 이용되고, 이 평균절삭두께로부터 식 (12)를 이용하여 절삭단면적을 구할 수 있다.

##### 4.2 가공경사각에 대한 절삭단면적, 절삭길이, 절삭날부하

Fig. 5와 같이 고려대상인 모든 공구 가공경사각에 대한 절삭가능한 변수범위의 결과를 이용하여 절삭력을 결정하게 하는 칩의 단면적인 절삭단면적  $A$ 를 공구회전각  $\varphi$ 에 대하여 나타낸 그림이 Fig. 6이다. 이 경우 가공경사각에 따라서 범위는 틀리겠으나 pick feed가  $0.22mm$ 인 경우 공구회전각이  $60^\circ$ 에서  $160^\circ$ 사이에서 절삭이 이루어짐을 알 수가 있다. 가공경사각이 증가할수록 절삭단면적은 감소하고 실제 절삭을 하게 되는 공구회전각의 범위도 좁아진다. 한편 가공경사각이  $15^\circ$ 까지는 절삭단면적의 크기가 급히 줄다가 그 이후는 변화가 그렇게 크게 감소하지 않지만, 이는 회전각도 범위가 좁아지기 때문에 전체적인 면적은 상당히 줄어들음을 알 수가 있다. 즉, 절삭력의 측면에서는 가공경사각을 증가시키는 것이 절삭단면적이 줄어 공구에 가해지는 저항이 작게 되고 절삭에 유리함을 보여 주고 있다.

Fig. 7은 절삭날각  $\kappa$ 에 대하여 칩의 길이인 절삭길이  $l_c$ 를 나타낸 것이다. 그림에 의하면 가공경사각이 커질수록 절삭길이가 증가하는 것을 알 수 있다. 또, 공구가 기울어짐에 따라서 절삭날각도도 점점 커짐을 보이고 있으며, 이것은 절삭되어지는 부위가 공구선단에서 멀어지고 있음을 나타낸다. 이것은 가공경사각을 증가함에 따라 절삭이 공구선단에서 떨어진 위치에서 일어난다는 것을 의미하는 것이기 때문에 평면을 불 앤드밀로써 가공을 할 때 공구선단의 속도가 0이 되는 점을 보완할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 절삭길이가 크다는 것은 공구가 가공물과 접촉하는 길이가 길다는 것을 의미하고, 따라서 공구마모의 측면에서는 가공경사각이 작은 것이 유리함을 알 수가 있다. 그림에 의하면 절삭길이는 가공경사각이  $0^\circ$ 인 경우가 가장 작고 가공경사각이 증가할수록 커지게 되는데 이 경우도  $15^\circ$  근처에서 다시 공구의 절삭길이

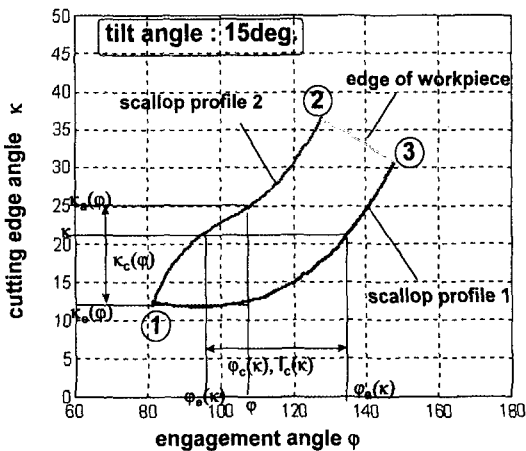


Fig. 5 Scallop range of cutting tool with tilt angle of  $15^\circ$  ( $\beta_r$ )

가 급격하게 길어지는 것을 보이고 있다.

이상의 결과에서 보면 절삭력의 측면에서는 절삭단면적이 작은 것이 유리하고, 공구마모의 측면에서는 절삭길이가 작은 것이 유리하다. 이러한 관점에서 가공경사각도는 절삭력의 측면에서는 큰 쪽이, 그리고 공구마모의 측면에서는 작은 쪽이 유리하다. 따라서 두 결과로부터 임계각도로 나타나고 있는 15°가 절삭가공효율 측면에서 가장 유리함을 알 수가 있다. 이 결과를 실험적으로 증명하기 위하여 5장에서는 절삭가공 실험을 하였다.

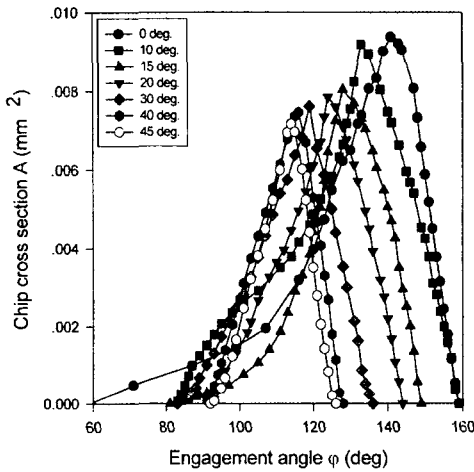


Fig. 6 Chip cross section according to the tilt angles of  $\beta_f$

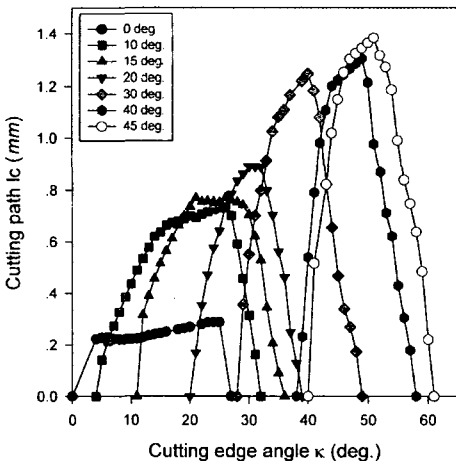


Fig. 7 Cutting path according to the tilt angles of  $\beta_f$

### 5. 실험장치 및 조건

실험은 고속가공에서 사용하는 일반적인 절삭조건으로 실험을 하였다. 이를 위해서 공작기계는 최고 주축 회전 속도 20,000rpm, 이송속도 50m/min인 고속가공기 (Makino, V-55)를 사용하였다. 절삭에 사용한 공구는 현재 고경도로 열처리된 금형강을 절삭하는데 있어서 널리 알려진 극미세분말 초경 엔드밀로서 TiAlN코팅이 되어 있으며, 두날 엔드밀로서 직경은 6mm이다. 절삭실험에 사용된 소재는 금형강인 STD11을 담금질 열처리하여 경도를  $HRC$  50-55의 범위로 하였다. 소재에는 실험에서 사용하는 경사각을 부여하기 위하여 경사바이스를 Fig. 8과 같이 사용하였으며, 경사각도는 10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 45°로 6가지로 하였다. 이러한 조건에서 공구마모를 실험하면 무수히 많은 공구경로를 작성하여야 하며, 이를 위해서 상업용 CAM 소프트웨어인 DUCT5를 이용하여 공구경로를 생성하였다. 생성된 공구경로는 NC 데이터로 바꾸어져서 근거리 통신망으로 고속 가공기 내의 data server에 전송하여 사용하였다.

한편 가공중에 발생하는 절삭상황을 체크하기 위하여 절삭력을 모니터링 하였으며, 절삭력은 공구동력계 (KISTLER, 9257)로부터 전하증폭기(KISTLER, 5019A)를 거쳐서 증폭이 된 후 DAT 레코더(TEAC, RD-135T)에 저장하였다. 이 아날로그 데이터는 A/D 변환기(DATA Translation, DT2831 board)를 통해 퍼스널 컴퓨터에 저장하였다. 이때 절삭력 데이터는

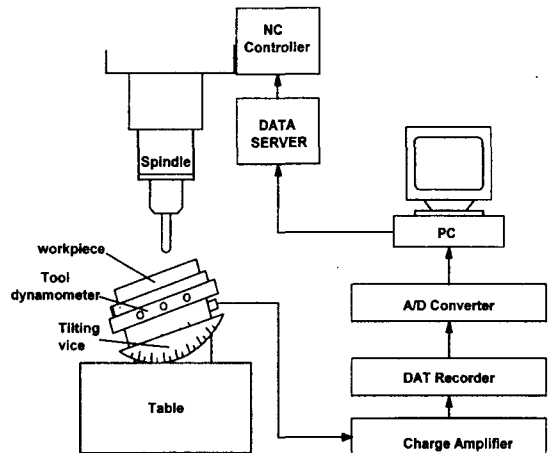


Fig. 8 experimental setup

Table 1 Cutting condition used in the experiment

Workpiece	STD11 (HRC 50)
Tool diameter (mm)	6
Tool material	Cemented Carbide UFB (TiAlN coating)
Spindle speed (rpm)	20000
Depth of cut (mm)	0.3
Pick feed (mm)	0.22
Feed rate (mm/min)	4000
Tilt angle to the feed direction $\beta_f$ (degree)	10,15,20,30,40,45
Tilt angle perpendicular to the feed direction $\beta_n$ (degree)	10,15,20,30,40,45

5kHz로 샘플링하였으며 1초동안 저장하였다. 또한, 절삭과정중 매 10m구간마다 공구홀더를 주축에서 빼낸 다음 공구현미경(Mitutoyo, TF-510F)으로 플랭크마모를 측정하였으며, 동시에 이에 상응하는 표면조도를 이동식 표면조도 측정기(Mitutoyo, Surftest 301)를 이용하여 측정하였으며 cutoff 길이는 0.8mm로 특정지역 3곳을 3번씩 측정하여 평균조도( $R_a$ )를 얻었다.

절삭조건으로서서는 시뮬레이션에서 사용한 절삭조건과 마찬가지로 절삭깊이는 경사진 공작물의 표면에 수직인 방향으로 0.3mm를 주었으며, 피크이송은 목표로 하는 표면조도  $R_{max}$  이 2 $\mu$ m가 될 수 있도록 계산하여 0.22mm로 설정하였다. 한편 이송속도는 4000mm/min로 각각 실험하였다.

## 6. 실험결과

### 6.1 가공경사각 $\beta_n$ 에 따른 공구마모, 표면거칠기, 절삭력

Fig. 9는 공작물을 이송방향에 직교한 방향으로 기울여 가면서 절삭하였을 때 TiAlN피복 극미세분말 초경공구의 공구마모 변화를 나타낸 그래프이다. 이 경우 절삭은 down milling으로 전진절삭을 하였다. 이 결과는 공구가 심한 마모나 또는 칩핑이 많이 발생하여 더 이상 절삭가공이 어려운 시점까지의 결과로서, 그림에 의하면 가공경사각이 15°일 때가 가장 공구수명이 긴 것으로 나타났다. 한편, 공구마모의 경향을 보면  $VB_{max}$  0.2mm를 수명의 기준으로 하였을 때, 30°, 40°, 45°의 각에서는 절삭

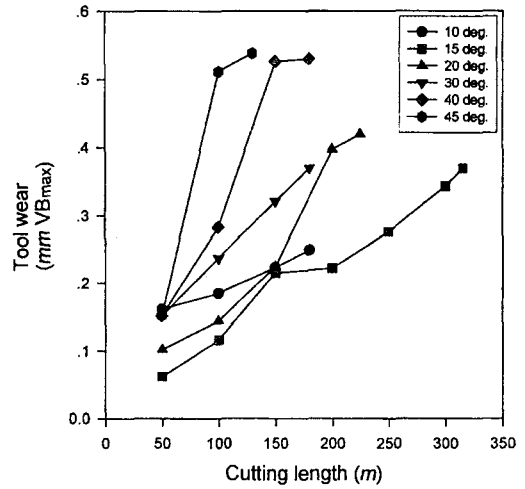


Fig. 9 Tool wear according to the tilt angle of  $\beta_n$

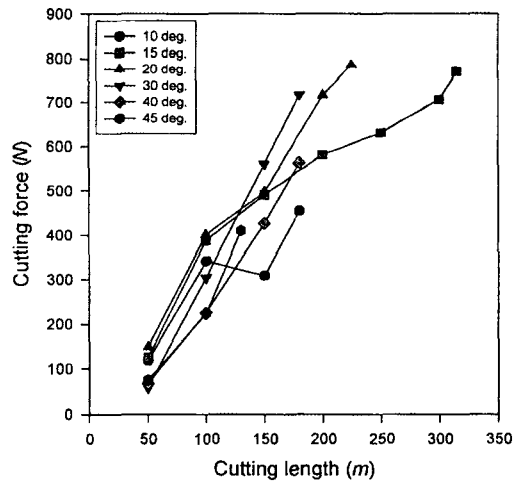


Fig. 10 Cutting force according to the tilt angle of  $\beta_n$

길이가 50 ~ 70m 범위에서 수명이 다 되었으며, 반대로 10°, 15°, 20°의 각도에서는 150m까지 절삭이 가능하여 3배 이상 공구수명이 우수한 조건임을 알 수 있다. 또한, 10°, 15°, 20°의 가공경각 중에서도 15°인 경우가 공구마모가 가장 작게 일어나고 있다.

한편, Fig. 10은 이 경우에 대한 절삭력의 결과이다. 그림에 의하면, 공구의 마모가 작은 절삭초기에는 가공경사각이 커질수록 절삭력이 작아지는데 그 이유는 Fig. 6의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 가공경사각의 증가에 따라서 절삭 단면적이 작아지기 때문일 것이다. 그러나

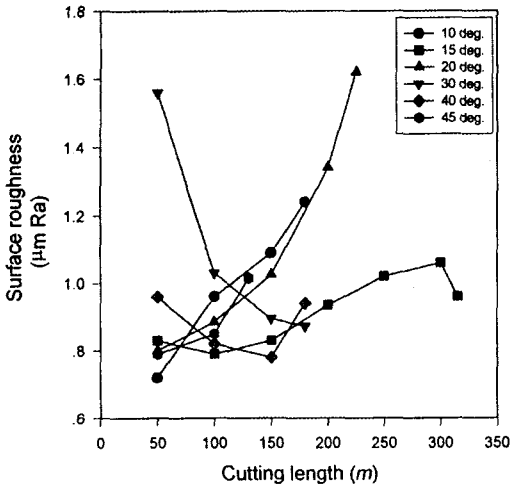


Fig. 11 Surface roughness according to the tilt angle of  $\beta_n$

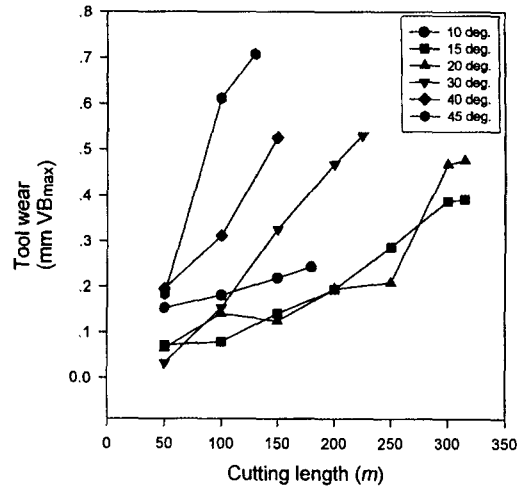


Fig. 12 Tool wear according to the tilt angle of  $\beta_f$

가공경사각이 큰 경우 절삭초기를 지나 일정한 절삭길이  
의 가공후에는 공구마모가 커져서 이로 인하여 절삭력이  
오히려 더 증가하는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 11의 표면 거칠기는 대체적으로 0.8 ~  
1.0  $\mu mRa$ 사이의 값으로 나타났는데, 이는 이론적으로  
2.0  $\mu mRmax$ 의 표면 거칠기를 내기 위하여 계산에서 구  
한 피크피드로 가공하였을 때와 거의 같은 값의 범위를  
나타내 보이고 있다<sup>(9)</sup>. 그리고 표면 거칠기 값이 작으면서  
랜덤한 분포를 나타냈기 때문에 어떤 경향은 발견해낼 수  
가 없었다. 그러나 가공경사각이 30°와 40°에서는 일정  
한 절삭길이 이후에 갑자기 표면 거칠기가 좋아지는 데,  
그것은 공구의 마모가 심하여 피삭재를 원활히 절삭하지  
못하고 표면을 문지르는 현상이 발생하여 표면 거칠기가  
매끄럽게 나타나 보이는 것으로 생각된다. 그러나 이러한  
가공에서는 표면품질(Surface Integrity)를 평가하여 보  
면 피삭재의 가공경화, 잔류응력 등에서 품질이 오히려  
나빠져 있을 것이다. 이러한 현상을 파악하기 위해서는  
추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 공구마모의 측면에서는 고속가공에  
적절한 가공경사각  $\beta_n$ 은 15°로 하는 것이 적당할 것이  
다.

## 6.2 가공경사각 $\beta_f$ 에 따른 공구마모, 표면거칠기, 절삭력

Fig. 12는 이송방향과 동일한 방향의 가공면 경사각  
 $\beta_f$ 에 대한 초경공구의 공구마모 실험결과이다. 이 경우

절삭은 downward milling, 전진절삭이다. Fig. 12에서  
15°와 20°의 가공경사각이 공구마모 측면에서 좋은 것으  
로 판명이 되고 있으며, VBmax 0.2mm를 기준으로 비  
교해 보면 경사각도 15°와 20°가 200m이상 가공할 수  
있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 13의 절삭력을 고찰하여 보면 먼저 가공면  
경사각  $\beta_n$ 의 실험에서 설명한 것과 같이 경사각도가 커  
지면 절삭단면적이 작아져서 절삭력이 작아지나 100m  
이후에는 그 반대로 절삭력이 커지고 있다. 이것 또한 가  
공경사각이 커질수록 공구마모가 빨리 일어나서 발생하

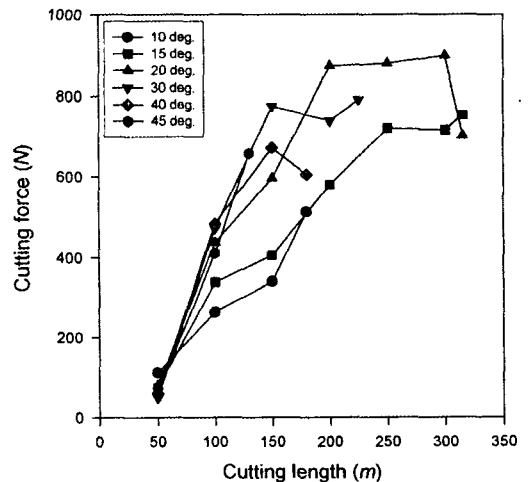


Fig. 13 Cutting force according to the tilt angle of  $\beta_n$



는 현상이라 할 수 있다.

한편 Fig. 14의 표면 거칠기에서는 별다른 구분을 할 수 없으나, 가공면 경사각 15°의 경우에는 공구마모가 상대적으로 작게 일어났기 때문에 가공면의 표면 거칠기가 서서히 나빠지는 것을 볼 수가 있다. 그러나 다른 각도의 경우는 특별한 양상을 나타내지는 않으나, 가공경사각  $\beta_n$ 의 경우보다는 표면 거칠기가 좋지 않다. 이것은 이미 알려진 대로 하향절삭보다는 상향절삭의 경우 공구의 직경이 작을 때는 동특성이 나빠서 진동이 발생하게 되고, 이로 인하여 가공면의 거칠기가 나빠지는 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 가공경사각  $\beta_n$ 의 경우와 마찬가지로 가공경사각  $\beta_f$ 에 대한 실험에서도 경사각도 15°가 적절하다.

이를 검증하기 위하여 열처리된 공작물을 다양하게 경사를 주면서 고속가공하여 그때 발생하는 공구마모, 표면 거칠기와 절삭력들을 고찰하였는데, 공구의 가공경사각이 15°일 때가 공구마모를 가장 작게 만들었다.

이상으로부터 이론적 시뮬레이션 및 실험을 통하여 고속가공을 할 때 공구마모의 측면에서 공구의 최적의 가공경사각을 결정할 수가 있었으며, 가공경계면 표현법은 절삭가공의 기하학적 현상을 분석하는데 있어서 유효한 방법임을 확인하였다.

추후로 이 가공경사각에 대하여 상방향, 하방향, 상향 및 하향 절삭이 복합적으로 구성되어 있는 공구경로 중 공구수명에 가장 작은 영향을 미치는 공구경로 방향을 선정하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. T. Majima, "Development of Ultra-high Speed Milling Machine," Proceedings of the 6th International Machine Tool Engineers Conference, Osaka, Japan, Oct. 31, pp. 61-83, 1994.
2. U. Heisel, M. Gringel, "Machine Tool Design Requirements for High-speed Machining," Annals of the CIRP, Vol. 45, No. 1, pp. 389-392, 1996.
3. E. D. Tung, M. Tomizuka, Y. Urushisaki, "High Speed End Milling Using a Feedforward Control Architecture," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 178-187, 1996.
4. J. Scherer, "High Speed, High-precision Machining with NURBS Interpolation," Proceedings of 2nd International Machining & Grinding Conference, Dearborn, USA, Sep. 8-11, pp. 709-716, 1997.
5. M. Layne, "Detecting and Correcting Unbalance in Toolholders," Proceedings of 2nd International Machining & Grinding Conference, Dearborn, USA, Sep. 8-11, pp. 381-404, 1997.
6. R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, "The Use of High Speed Machining for the Manufacture

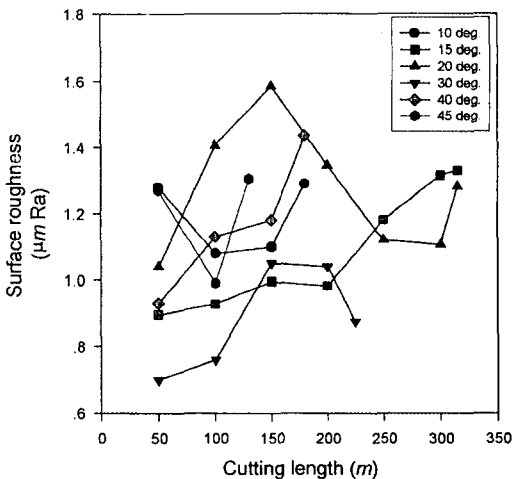


Fig. 14 Surface roughness according to the tilt angle of  $\beta_f$

### 7. 결 론

고속가공에서 공구마모를 가장 작게 할 수 있는 공구와 공작물 사이의 가공경사각을 선정하였다. 이를 위하여 이론적으로는 공작물이 가공이 되어져서 칩이 생성될 때의 스킵 형상을 이루는 가공면 형성 경계선을 포락조건을 이용한 수치해석적인 방법으로 구하였다. 이를 바탕으로 경사진 공작물을 가공할 때 공구에 영향을 주는 절삭 단면적, 절삭길이를 계산하였다. 이 2가지의 시뮬레이션 결과로부터 가공경사각은 공구마모의 측면에서 15°가 적합함을 알 수 있었다.

- of Hardened Steel Dies," Transactions of the NAMRI of SME, Vol. 25, pp. 21-26, 1996.
7. M. A. Elbestawi, L. Chen, C. E. Bece, T. I. Ei-Wardany, "High-speed Milling of Dies and Molds in Their Hardened State," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp. 57-62, 1997.
  8. H. Schulz, St. Hock, "High-speed Milling of Dies and Molds - Cutting Conditions and Technology," Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 35-38, 1995.
  9. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM시스템과 CNC절삭가공, 회중당, 1996.