

## 볼엔드밀링 윤곽가공에서 가공 정밀도에 관한 연구

류호철\*(고려대학교 대학원 기계공학과),  
최우천\*\*, 홍대희\*\*(고려대학교 기계공학과)

### Study on Machining Precision in Ball End Mill Contouring Machining

Ho Cheol Ryu(Mecha. Eng. Dept., Graduate School, Korea University),  
Woo Chun Choi, Daehie Hong (Mecha. Eng. Dept. Korea University),

#### ABSTRACT

Ball end milling is widely used in machining free surfaces. It is important to predict machining forces in this machining. In this study, cutting forces are predicted for different machining conditions in ball end mill contouring machining. These cutting forces influence tool deflection. In this study tool deflection is calculated for various cutting conditions. The model developed in this study can be used to predict machining accuracy in contouring machining.

**Key Words** : 볼엔드밀(Ball End Mill), 절삭력(Cutting Force), 절삭두께(Cutting Thickness), 정밀도(Precision)

#### 1. 서론

볼엔드밀링은 금형, 터빈, 프로펠러, 항공기 부품 등과 같은 자유곡면을 만드는 데 있어 광범위하게 사용되고 있다. 특히 항공기 부품 중에 터빈 블레이드나 압축기 같은 부품은 금속제거율이 높은 볼엔드 절삭기를 이용하여 정확한 가공을 한다. 이러한 가공을 하기 위해서 중요한 점은 절삭력에 대해 미리 아는 것이다. 절삭력 예측은 공구의 마모나 파손을 방지하고 무엇보다 가공된 표면의 완성도를 줄이는데 필요한 공구의 변형을 줄이고 적절한 절삭조건 선택에 도움을 준다.

역학적인 기본 접근 방법은 측정된 평균 절삭력에 대한 실험 결과로부터 절삭 계수를 구하고, 절삭력을 예측하는데 사용된다.[1] Yucesan 과 Altintas (1996)[2]는 나선형 볼엔드밀의 레이크 면과 플랭크 면에서의 전단력과 마찰력을 예측하는 역학적 모델링을 제시하였다. 이전 연구로 Smith 와 Tlusty[3]에 의해서 재확인되고 원통 나선형의 엔드밀에 역학적 모델링을 제시하였다. Budak 등[4]은 원통 나선형의 엔드밀에 대한 절삭력 계수를 예측하는데 절삭력 접근에 대한 단일화된 기계학을 보여주었다. Fussell 등(2001)[5]은 날에 의해서 손실되는 질량을 고려할 때 동등한 공구 반지름을 이용하여 공구의 면적모멘트를 계산하였다. Shirase 와 Altintas(2001)[6,7]는 공구와 공작물의 시스템에서 축의 절삭 깊이와 같은 인자가 변화하는 것에 대해서 일반적인 모델링

을 보여주어 다양한 원인에 발생하는 동적인 영향에 한 해석을 하였다.

이 논문에서는 Yucesan 과 Altintas[1,2]의 절삭력 모델을 기초로 하여 기존에 연구되었던 볼엔드체로 공작물을 가공하여 절삭력을 예측하는 것과 다르게 본 연구에서는 볼엔드밀 윤곽가공에서 가공 깊이와 절삭두께에 따른 절삭 조건의 변화에 대한 절삭력을 구하였다. 제안된 모델은 윤곽가공에서 가공정밀도 예측에 사용될 수 있다.

#### 2. 이론적 해석

볼엔드밀링 절삭공구의 기하학은 Fig. 1 과 같다. 볼엔드밀에 대한 해석은 Yucesan 와 Altintas(1996)[2]에서 유도한 방식을 사용하였다. 각각의 날은 일정한 헬릭스 리드를 가지면서 반구의 면에 있다. 날은 공작물의 윗면과 만나는 볼부분과 볼엔드밀의 볼 끝부분과 이루는 헬릭스 각도  $\beta_0$  를 갖는다. Z 축 방향에서, x-y 면 볼 끝의 반지름의 감소로 인해서 절삭날을 따라 국부적인 헬릭스 각도  $\beta(z)$  는 헬릭스 리드에 대해 값이 변한다.

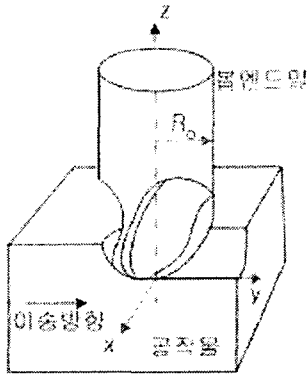


Fig. 1 Ball end mill geometry

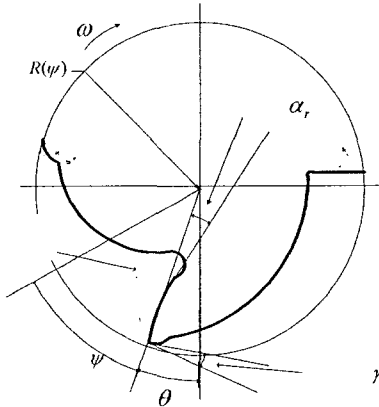


Fig. 2 plan (x-y) view of the cutter at elevation z

$$\tan \beta_0 = \frac{2\pi R_0}{L_p}, \tan \beta(z) = \frac{2\pi R(z)}{L_p} \quad (1)$$

$$R(z)d(\psi) \cot \beta(z) = R_0 d(\psi) \cot \beta_0 \quad (2)$$

볼의 끝점과 헬릭스 플루트의 점과 이루는 래그 각도에 따라 x-y 면에서 절삭공구의 반지름은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(\psi) = R_0 \sqrt{1 - (\psi \cot \beta_0 - 1)^2} \quad (3)$$

절삭날의 접선방향 벡터  $\tau$  는 다음과 표현된다.

$$\tau = \frac{dr}{\|dr\|} = \tau_x i + \tau_y j + \tau_z k \quad (4)$$

여기서  $\tau_x, \tau_y, \tau_z$  는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_x &= \frac{1}{\|dr\|} [-R(\psi) \sin(\psi + \theta) + R'(\psi) \cos(\psi + \theta)] \\ \tau_y &= \frac{1}{\|dr\|} [R(\psi) \cos(\psi + \theta) + R'(\psi) \sin(\psi + \theta)] \\ \tau_z &= \frac{R_0 \cot \beta_0}{\|dr\|} \end{aligned} \quad (5)$$

가공시 절삭력은 레이크면과 플랭크면에서 발생하는 압력과 마찰에 의해 발생한다. 압력계수와 마

찰계수를 이용하여 절삭력을 다양한 절삭조건에 대해 구한다.  $F_n, F_f, F_{nf}, F_{ff}$  를 레이크와 플랭크 접촉면에 작용하는 압력 및 마찰 부하라고 하면, 총 절삭력은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} F(\theta) &= F_n(\theta) + F_f(\theta) + F_{nf}(\theta) + F_{ff}(\theta) \\ &= \int_{\psi_1(\theta)}^{\psi_2(\theta)} K_n [-n(\psi + \theta) + K_f T_c(\psi + \theta)] dA_t + \\ &\quad \int_{\psi_1(\theta)}^{\psi_2(\theta)} K_{nf} [-n_f(\psi + \theta) + K_{ff} \tau_f(\psi + \theta)] dA_f \end{aligned} \quad (6)$$

실제 가공은 볼엔드밀을 수직방향으로 설치하고 깊이 b 로 날의 일부를 공작물에 넣어서 윤곽가공을 수행한다.

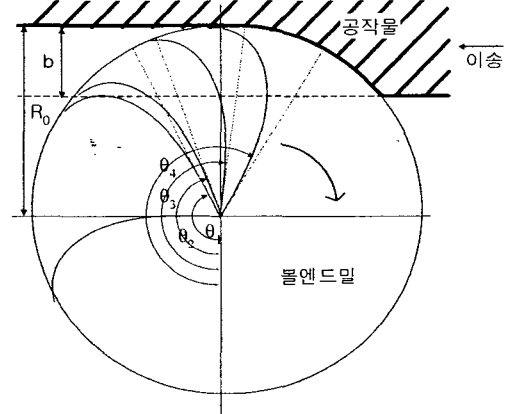


Fig. 3 plan (x-y) view of cutting flutes for rotating angle

b 의 깊이만큼 절삭하는 경우, 공구의 회전각도에 따라 날이 가공되는 정도가 달라진다. ( Fig. 3 참조 ) 이 경우를 5 개의 영역으로 고려하였다. 절삭날이 절삭을 시작하는 각도를  $\theta_1$ , 절삭날의 끝부분도 절삭하기 시작하는 각도를  $\theta_2$ , 절삭날이 윗부분을 절삭하기 시작하는 각도를  $\theta_3$ , 절삭날이 떠나는 각도를  $\theta_4$  라고 두었다. 이러한 각도는 기하학을 통하여 구할 수 있다.

공구의 회전각에 따라  $\psi$  의 적분구간을 구하였고, 그 결과를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 integral limits for ball end milling

구간	$\theta$ 범위	Lower limit, $\psi_1$	upper limit, $\psi_2$
1	$\theta < \theta_1$	0	0
2	$\theta_1 \leq \theta < \theta_2$	$\psi_1$	$\psi_2$
3	$\theta_2 \leq \theta < \theta_3$	$\psi_1$	$\psi_a$
4	$\theta_3 \leq \theta < \theta_4$	$\psi_1$	$\psi_a$
5	$\theta_4 \leq \theta$	0	0

볼엔드밀의 구조적인 동역학 모델은  $M\ddot{x} + C\dot{x}$

$+Kx = F$  적용하여 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_x \\ \ddot{q}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

절삭두께에 따라서 절삭력이 판이하게 달라지는데, 여기서는 그 절삭두께가 달라짐에 따라서 절삭력이 어떻게 변하는지를 구해보았다. (11)의 일반식에서  $m, k$ 는 일정하기 때문에 그에 따른 힘은 일정하기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 \\ 0 & I_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_x \\ \ddot{\theta}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa_x & 0 \\ 0 & \kappa_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (13)$$

볼엔드밀은 비틀림 스프링을 갖는 콜릿과 결합되어 있는 외팔보로 고려하여 모델링하였다. 상대적으로  $\delta, \theta$ 는 스프링 변위에 의해서 콜릿 경계에서 축오프셋이나 경사각으로 표현된다. 공구에 대한 기본적인 가정은 강체로 생각을 하였고, 툴 홀더나 스피indle에 대해서는 변형이 없다고 가정하였다.

볼엔드밀의 양측은 좌우 대칭이기 때문에  $I_x = I_y, \kappa_x = \kappa_y$ 로 볼 수 있고 이에 따라서  $\kappa$ 를 구할 수 있다.

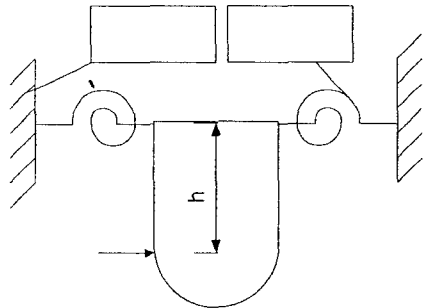


Fig. 4 deflection model for ball end milling

$$M = \kappa\theta = Fh, \tan\theta = \theta = \frac{\delta}{h}, h = L \quad (14)$$

$$\kappa = \frac{3EI}{L} \quad (15)$$

### 3. 결과 및 고찰

절삭 두께가 다른 여러 개의 절삭 공구 형상에 대해서 절삭력을 구하고 공구 변형을 예측하였다. 공작물 재료는 티타늄 합금  $Ti_6Al_4$  이고, 볼엔드 밀은 HSS 재료를 사용하였다. 레이크 각도  $\alpha_r = 30^\circ$ , 나선 각도  $\beta_0 = 30^\circ$ , 볼 반지름  $R_0 = 6mm$ 의 특성을 가진 2 개의 날을 가진 볼엔드밀을 사용하였다. Fig. 5 에 (a)-(c)는 이송속도  $f_a = 0.005mm/rev$ , 틸 새각도  $\gamma = 13^\circ$ 의 조건일 때, 다양한 절삭두께에

대해서 예측되어진 값들이다. 절삭두께  $b$ 가 증가함에 따라서 절삭력의 크기  $|F|$ 가 커지는 것을 알 수 있다.

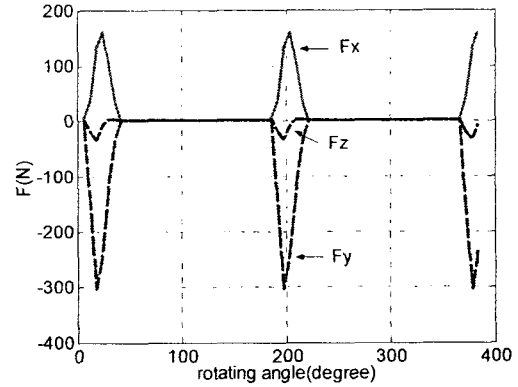


Fig. 5 (a) cutting thickness  $b = 1mm$

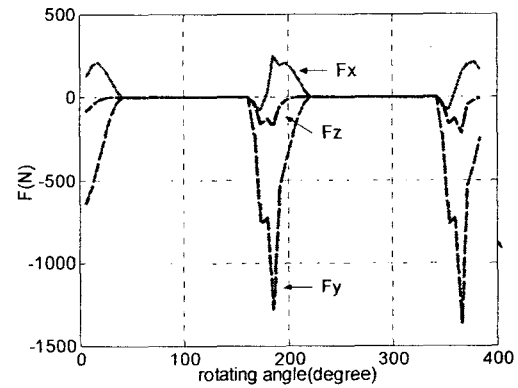


Fig. 5 (b) cutting thickness  $b = 3mm$

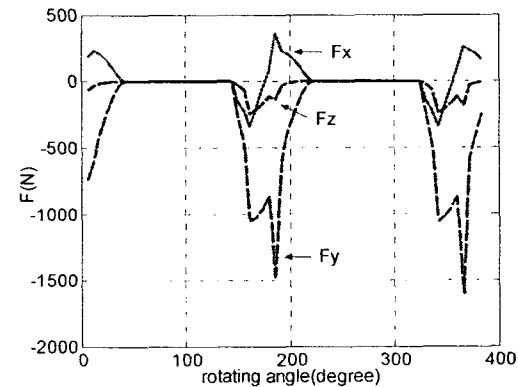


Fig. 5 (c) cutting thickness  $b = 5mm$

Fig. 6 과 Fig. 7 은 회전각에 따라서 절삭 두께의 변화와 변형 각도에 대해서 구하였다. 공구의 변형으로 인한 절삭 두께 변화의 크기는  $1\mu m$

이고, 절삭 두께와 변형 각도는 반비례 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 이 구해진 값을 통하여 위치별로 발생하는 오차를 정확하게 보정할 수 있기 때문에 절삭 정밀도에 직접적인 영향을 미친다.

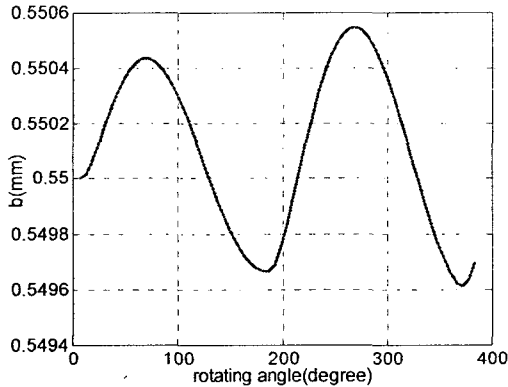


Fig. 6 cutting thickness for rotating angle (b)

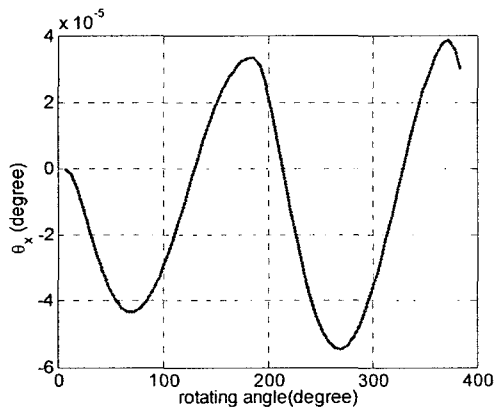


Fig. 7 deflection angle for rotating angle ( $\theta_x$ )

#### 4. 결론

볼엔드밀에서 절삭깊이 변화에 따른 절삭력의 변화를 보여주었다. 공구나 공작물의 형상에 따라 다양한 절삭 두께에 따른 절삭력을 곡선으로 표현함으로써 곡선을 통해서 알고자 하는 절삭력이나 두께에 대한 값들을 쉽게 알 수 있을 뿐만 아니라 절삭 깊이 변화에 대한 값을 알고 있으므로 정확한 절삭력을 예측할 수 있다. 기존 모델에 비해서 가공이 공작물을 공구 전체가 가공하는 것에 비해 공작물을 윤곽가공하는 부분가공의 모델을 통해서 공구 변형을 예측할 수 있다. 예측된 절삭력, 절삭두께 그리고 변형각도에 의해서 정확한 가공 오차 모델을 세우고, 이것을 이용하여 공작물의 가공 정밀도를 구할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 과학재단 특정기초과제(R01-2002-000-00419-0) 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. G. Yucesan, and Y. Altintas, "Prediction Of Ball End Milling Forces", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 118, pp 95-103, 1996.
2. P. Lee and Y. Altintas, Prediction Of Ball-End Milling Forces From Orthogonal Cutting Data, Int. J. Mach. Tools. Manufact. Vol. 36, pp. 1059-1072, 1996.
3. S. Smith, and J. Tlustý, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, No. 2, pp. 169-175, 1991.
4. E. Budak, Y. Altintas and E. J. A. Armarego, "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data? Trans. ASME J. Engng Ind. (in press).
5. B.K. Fussell, R. B. Jerard, J. G. Hemmett, "Robust Feedrate Selection for 3-Axis NC Machining Using Discrete Models? Transactions of the ASME, Vol.123, 2001.
6. B. Balachandran, "Nonlinear dynamics of milling processes", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 2001.