

볼 엔드밀 가공의 유연 절삭력 모델에 관한 연구

최종근*, 강윤구+, 이재종⁺⁺

(논문접수일 2003. 1. 13, 심사완료일 2003. 3. 4)

A Study on the Flexible Cutting Force Model in the Ball End Milling Process

Jong-Geun Choi*, Youn-Ku Kang⁺, Jae-Jong Lee⁺⁺

Abstract

This research suggests a cutting force model for the ball end milling processes. This model includes the effect of tool run out and tool deflection. In the proposed model, the flutes of ball end mills are considered as series of infinitesimal elements and each cutting edge is assumed to be straight for the analysis of the oblique cutting process, in which the small cutting edge element has been analyzed as an orthogonal cutting process in the plane including the cutting velocity and the chip-flow vector. Therefore, the cutting forces can be calculated through the model using the orthogonal cutting data obtained from the orthogonal cutting test. In order to enhance the performance of the model, the flutes of ball end mill are defined to keep geometric consistency at the peak of the ball part and the junction with the end mill part. The divided infinitesimal cutting edges are regulated to be even lengths. Some experiments show the validity of the developed model in the various cutting conditions.

Key Words : Ball end milling(볼 엔드밀 가공), Tool deflection(공구 처짐), Tool run out(공구 런 아웃), Force model(절삭력 모델), Infinitesimal cutting edge(미소절삭날)

1. 서론

근래 CNC 공작기계 및 자동 프로그래밍 소프트웨어의 발달과 가전, 항공기, 자동차 등의 많은 분야에서 제품의 고

급화로 3차원 자유곡면이 많이 사용되고 있다. 이러한 3차원 자유곡면을 얻기 위한 방법으로 볼 엔드밀(Ball end mill) 가공이 많이 사용된다.

지금까지 제시되어 온 볼 엔드밀 가공의 절삭력 모델은

* 주저자, 순천대학교 자동차공학과 (jgchoi@sunchon.ac.kr)

주소: 540-742 전남 순천시 매곡동 315번지

+ 순천대학교 기계공학과

++ 한국기계연구원

크게 강체모델(Rigid model)과 유연 절삭력모델(Flexible model)로 구별할 수 있다. 강체 모델은 흔히 정적모델(Static model)이라고도 하며, 공구 처짐에 의한 절입량의 변화를 무시한 모델로 상대적으로 길이가 짧거나 고강성의 볼 엔드밀에 적용할 수 있다. 반면, 유연 절삭력 모델은 흔히 동적모델(Dynamic model)이라고도 하며, 공구의 처짐으로 인한 절입량의 변화를 반영한 모델이다. 근래에는 그 정확성을 높이기 위해 주로 후자 형태의 연구결과가 발표되고 있다. 밀링 가공의 절삭력 예측에 관한 연구들을 보면, Devor⁽¹⁾ 등은 엔드밀에 대해서 미소절삭날 개념을 도입하여 절삭 전 칩 단면과 실험 계수로부터 미소절삭날에 작용하는 절삭력을 구하여 전체 절삭력을 산출하는 방법을 제시하였다. 이후 Yang과 Park⁽²⁾이 볼 엔드밀 가공에서 절삭날을 세분화하여 2차원 절삭이론을 적용할 수 있음을 보였다. Lee와 Altintas⁽³⁾는 헬리컬 볼 엔드밀을 미소절삭날로 세분화한 후 이를 2차원 실험식에 적용하여 절삭력을 예측하였으며, Feng와 Meng⁽⁵⁾은 볼 엔드밀에 대해 기존의 강체 모델에서 벗어나 절삭력과 공구 처짐을 고려한 유연 절삭력 모델로 절삭력을 예측하였다.

볼 엔드밀 가공에서 절삭날(Flute) 형상은 절삭력의 크기와 방향에 많은 영향을 주므로 우수한 예측 모델을 위해서는 구면위에 형성된 절삭날에 대한 정확한 정의가 필요하다. 또한 2차원 절삭이론을 적용하기 위한 절삭날의 세분화가 적절히 이루어져야 한다. 본 연구는 볼 엔드밀 절삭날의 기하학적 형상을 정확히 정의하고 이를 기반으로 미소절삭날 세분화를 최적화 하고자 하였다.

2. 2차원 절삭 모델

2차원 절삭(Orthogonal cutting)이란 공구 인선과 절삭속도 벡터가 수직을 이루는 경우를 일컫는 반면, 3차원 절삭(Oblique cutting)의 경우에는 공구 인선과 칩 유동 속도 벡터가 수직이 아닌 경우를 말한다. 2차원 절삭 가공은 절삭속도 벡터와 칩 유동 속도 벡터가 이루는 평면에서 역학적 해석이 가능하지만, 3차원 절삭의 경우에는 공간적인 관점에서 역학적 접근이 요구되므로 해석이 어렵다. 많은 경우 복잡한 3차원 절삭과정에 대한 역학적 해석이 필요할 때, 2차원 절삭 해석으로부터 기본적인 결과를 얻은 다음, 그 결과를 3차원 절삭으로 확대하여 원하는 결과를 얻는 시도가 가능하다. 대표적인 3차원 가공의 하나인 볼 엔드밀 가공의 해석에 있어서도 이는 유용한 수단이 될 수 있다. 본 연구에서는 2차원 절삭 실험을 통해 식 (1)과 식 (2)로 주어

Table 1 Orthogonal cutting test conditions

Item	Conditions
Cutting velocity(m/min)	0.5, 1.0, 3.0, 12.9, 24.4, 46.0
Feed(mm/rev)	0.01, 0.03, 0.06, 0.075, 0.105, 0.15
Rake angle(°)	0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36

Table 2 Coefficients for the 2D model

	a	b	c	d	e
F_t	20	4430	0.720	0.0004	-0.0361
F_r	10	6162	0.707	0.0173	-0.734

지는 실험식을 사용하였다.

$$F_t = (a_t + b_t \cdot f^{c_t} \cdot v^{d_t} \cdot a^{e_t}) \cdot doc \quad (1)$$

$$F_r = (a_r + b_r \cdot f^{c_r} \cdot v^{d_r} \cdot a^{e_r}) \cdot doc \quad (2)$$

여기서 F_t 는 절삭속도 방향의 힘이고 F_r 는 절삭속도 방향에 수직인 힘이다. 그리고 f 는 공구 혹은 피삭재 1회 전당 이송량이며 v 는 절삭속도, a 는 공구 경사각, doc 는 절입 깊이이며 a, b, c, d, e 는 실험 계수이다.

모델에 사용되는 실험 계수를 구하기 위해 직경이 90.0mm인 원통소재를 선삭 가공하여 2차원 절삭을 근사하였다. 여기서 소재는 SKD 61종을 사용했으며, 선삭 공구는 볼 엔드밀 공구 재질과 같은 고속도강(High speed steel) 공구를 사용하였다. 가공조건은 Table 1과 같으며, 이를 이용하여 최소자승법으로 구한 절삭상수는 Table 2와 같다.

3. 볼 엔드밀 가공 모델

3.1 볼 엔드밀 형상의 정의

볼 엔드밀 날의 복잡한 형상을 적절히 정의하고 모델에 적용하기 위해 Fig. 1에서 보여지는 3가지 좌표계를 사용한다. $a-b-c$ 상대 좌표계는 미소절삭날(Infinitesimal cutting edge)의 형상을 정의하기 위해 사용하며, $x-y-z$ 상대 좌표계는 미소절삭날의 위치를 정의하기 위해 사용한다. 그리고 $X-Y-Z$ 절대 좌표계는 절삭력 방향을 정의하기 위해 사용한다.

볼 엔드밀 절삭날의 세분화는 곡선의 절삭날을 미소 단위의 직선 절삭날로 가정할 수 있게 하여 2차원 절삭이론을

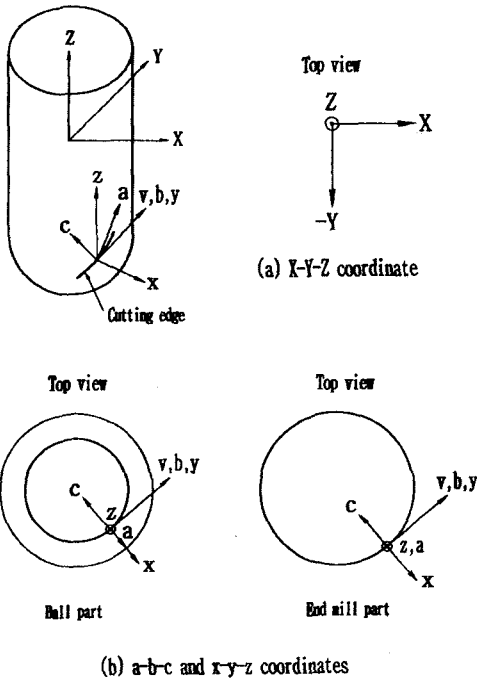


Fig. 1 Coordinate systems for the ball end milling model

적용할 수 있도록 한다. 지금까지의 많은 연구에서는 구 부분과 엔드밀 부분 모두를 Z축 방향의 일정한 높이로 세분화하였다(Lee and Altintas, 1996). 이렇게 세분화했을 경우 구 정점(Apex) 부분은 세분화된 날의 길이가 크게 되는 반면 엔드밀 부분으로 갈수록 날의 길이가 상대적으로 작게 된다. 균일하지 못한 날 길이와 구 부분에서 날 형상의 변화가 심하다는 점을 고려하면 이와 같은 방법은 모델의 신뢰성을 저하시킨다고 볼 수 있다. 따라서 가장 이상적인 세분화 방법은 미소절삭날의 길이를 일정하게 하는 것이라 할 수 있다. 공구 축방향 절입 깊이가 da 일때 본 연구에서는 구 부분은 일정한 각도($\Delta\phi$)로 세분화하고 엔드밀 부분은 일정한 높이(Δz)로 세분화한다. 이렇게 함으로써 각각의 미소절삭날의 크기를 균등하게 해줄 수 있으며 Fig. 2는 이를 도식화한 예이다.

세분화된 미소절삭날의 위치를 결정하기 위해 원통 좌표계(Cylindrical coordinate)를 사용한다. ϕ 를 공구 축으로부터 측정된 절삭날의 각 위치라 할 때, 세분화된 i 번째 미소절삭날의 Z축 높이는 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$\text{구 부분} : e_z = R(1 - \cos \phi) \quad (3)$$

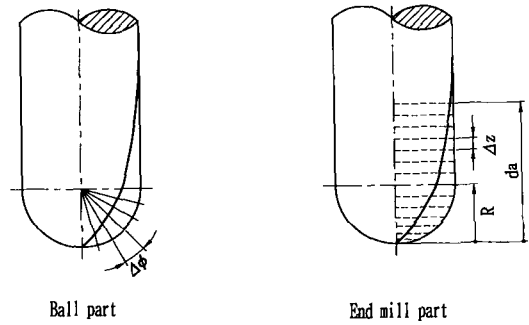


Fig. 2 Division of the ball end mill

$$\text{엔드밀 부분} : e_z = R + (N_i - N_b - 0.5)\Delta z \quad (4)$$

여기서 N_i 는 관심 미소절삭날까지의 미소절삭날 개수이며, N_b 는 구 부분의 미소절삭날의 개수이다. 공구 바닥으로부터 관심 미소절삭날까지의 높이가 e_z 일 때 미소절삭날의 반경 R_2 는 다음 식 (5)로 주어진다.

$$R_2 = \sqrt{2R \cdot e_z - e_z^2} \quad (5)$$

or $= R \cdot \sin \phi$

미소절삭날의 각 위치(Angular position)를 결정하기 위해 먼저 구 부분의 날 형상을 정의할 필요가 있다. Fig. 3을 참고하면 구 정점에서의 절삭날은 양 방향으로 대칭이 되는 것을 알 수 있으므로 공구 기울임 각은 0° 로 시작되어야 한다. 또한 ϕ 가 증가할 때 기울임 각은 점차 증가하여 구 부분과 엔드밀 부분이 만나는 점에서 엔드밀의 비틀림 각(Helix angle)과 같게 되어야 하며, 구 부분과 엔드밀 부분이 만나는 점에서는 절삭날의 비틀림이 연속이 되어야 한다. 이상의 조건을 만족시킬 수 있는 절삭날 형상에 대한 모델을 가정하면 다음 식 (6), 식 (7)로 표현된다.

$$i = \frac{8\alpha_h}{\pi^2} \phi^2 \quad 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

$$i = \alpha_h - \frac{8\alpha_h}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)^2 \quad \frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Fig.3에서 보여주는 실선은 식 (6), 식 (7)로 얻어진 결과로 실제 절삭날의 형상과 거의 일치함을 알 수 있다. 한편, 엔드밀 부분의 미소절삭날에 대한 공구 기울임각 i 는 모든 위치에서 공구의 비틀림 각(α_h)과 같다.

이제 구면상의 공구 형상에서 미소절삭날에 대한 각 위치



Fig. 3 Feature of the flute at the ball part

를 정의하기 위해 구 형상의 기준점(Reference flute bottom)에서 관심 미소절삭날까지의 각도를 θ 라 정의한다. Fig. 4를 참고하면 구 부분에서의 θ 는 식 (8), 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 이때 S는 그림에 나타난 바와 같이 기준점으로부터 관심 미소절삭날까지의 구 표면에서의 거리이다.

$0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{4}$ 일 때

$$\begin{aligned} S &= ds_1 + ds_2 + \dots + ds_n \\ &= R \cdot d\phi (i_1 + i_2 + \dots + i_n) \\ &= \frac{8 \alpha_h R}{3\pi^2} \phi^3 \\ \theta &= \frac{S}{R_z} = \frac{\frac{8 \alpha_h R}{3\pi^2} \phi^3}{R \cdot \sin \phi} = \frac{8 \alpha_h \phi^3}{3\pi^2 \sin \phi} \end{aligned} \quad (8)$$

$\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$ 일 때

$$\theta = \frac{\alpha_h \cdot \left[\phi - \frac{\pi}{4} + \frac{8}{3\pi^2} \left(\left(\frac{\pi}{2} - \phi \right)^3 - \frac{\pi^3}{64} \right) + \frac{\pi}{24} \right]}{\sin \phi} \quad (9)$$

이 결과로부터 구 부분과 엔드밀 부분이 만나는 점의 θ 는 다음 식 (10)으로 구해진다.

$$\theta = \frac{\pi \alpha_h}{4} \quad (10)$$

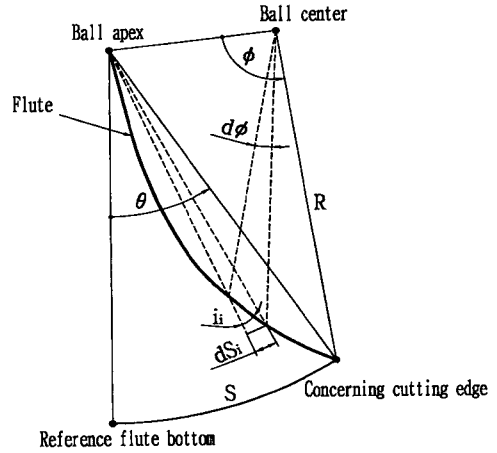


Fig. 4 Angular position of an infinitesimal cutting edge

한편, 엔드밀 부분에서의 미소절삭날에 대한 각 위치는 절삭날의 비틀림각이 일정하므로 다음 식 (11)로 표현된다.

$$\theta = (N_i - N_b) \frac{\Delta z \cdot \tan \alpha_h}{R} + \frac{\pi \alpha_h}{4} \quad (11)$$

절대 좌표계에서 미소절삭날의 각 위치를 결정하기 위해 -Y축에서 관심 미소절삭날까지의 각도를 β 라 정의하면 식 (12)로 나타난다.

$$\beta = \theta + \varepsilon \quad (12)$$

여기서 ε 는 공구가 회전함에 따라 절대 좌표계 -Y축에서 구 형상의 임의의 기준점까지의 각도이다.

3.2 강체 절삭력 모델

강체 절삭력 모델(Rigid cutting force model)이란 공작기계, 공구 등 가공 시스템 전체를 강체로 보고 절삭력에 의한 시스템의 변형이 없다고 가정된 모델이다. 이 경우 절삭력에 의한 공구의 처짐을 고려하지 않으므로 단순히 볼 엔드밀의 기하학적 해석만을 통해 절삭력을 계산하게 된다. 2차원 절삭이론을 3차원 볼 엔드밀 모델에 적용하기 위해서는 미소절삭날에서 이루어지는 유효 경사각, 절삭속도, 절입 깊이가 그리고 등가 이송량을 구해야 한다.

유효 경사각(Effective rake angle) α_e 는 절삭속도 벡터와 칩 유동 속도 벡터가 이루는 평면상에서 절삭속도 벡터의 수선과 칩 유동 속도 벡터 사이의 각으로 Fig. 5를 참고하고 공구 기울임각과 칩 유동각이 같다는 스테블러

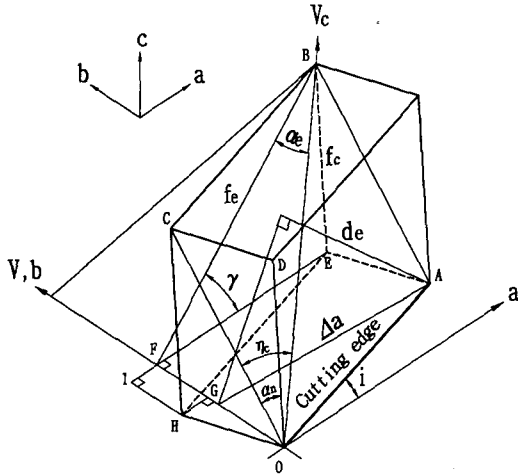


Fig. 5 Cutting model for infinitesimal cutting edge

(Stabler)의 가정을 적용하면 다음 식 (13)과 같다.

$$\sin \alpha_e = \sin^2 i + \cos^2 i \cdot \sin \alpha_n \quad (13)$$

절삭속도 V 는 공구와 피삭재 사이의 상대 속도로서 공구 런아웃(Run out)의 영향을 받는다. 런아웃은 공구 형상 오차와 셋팅(Settng) 오차 등의 이유로 발생하며, 공구의 기하학적 중심과 회전 중심 사이의 편차를 의미한다. 공구 런아웃을 고려한 관심 미소절삭날의 회전반경 R_d 는 Fig. 6을 참고하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_d = \sqrt{R_z^2 + \rho^2 + 2R_z \cdot \rho \cdot \cos \eta} \quad (14)$$

여기서 $\eta = \theta - (\phi_0 - \epsilon_0)$ 이며, ϕ_0 는 공구 장착 후 측정한 각으로 $-Y$ 축과 회전중심으로부터 공구 중심을 이은 선사이의 각도이다. 또한 ϵ_0 는 공구 장착시 $-Y$ 축과 임의의 절삭날 정점에 해당하는 공구 기준점사이의 각이다. 회전반경이 R_d 일 때 미소절삭날의 절삭속도는 다음 식 (15)로 표현된다.

$$V = \frac{2\pi \cdot R_d \cdot \text{rpm}}{1000} [m/\text{min}] \quad (15)$$

등가 절입 깊이(Equivalent depth of cut) d_e 란 $V-V_c$ 평면에 수직인 절입 깊이이다. 세분화된 각각의 미소절삭날에 대한 등가 절입 깊이는 비틀림 각의 변화에 따라 달라진다. Fig. 5를 참고하면 다음과 같이 구할 수 있다.

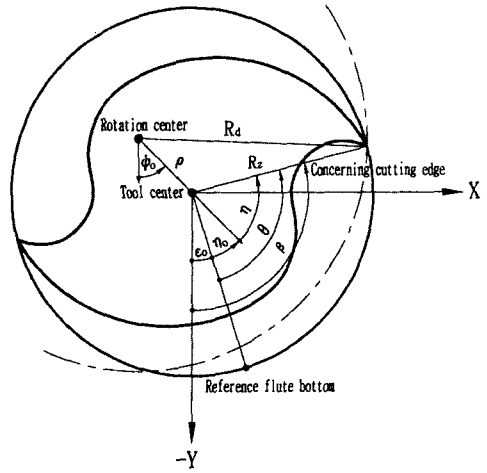


Fig. 6 Tool run out

구 부분 : $d_e = R \cdot \Delta\phi \cdot \sin \gamma \quad (16)$

엔드밀 부분 : $d_e = \Delta z \cdot \sin \gamma \quad (17)$

여기서 γ 는 $V-V_c$ 평면과 $a-b$ 평면이 이루는 각으로 Fig. 5를 참고하고 다시 스테블러 가정을 적용하면 다음 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$\cos \gamma = \frac{\sin i \cdot \cos i \cdot (1 - \sin \alpha_n)}{\cos \alpha_e} \quad (18)$$

공구의 회전 속도가 공구 이송량보다 충분히 클 경우 공구가 1회전하는 동안 이송은 정지된 것으로 가정할 수 있다. 따라서 공구의 임의 회전각도에서 x 방향의 이송량 f_x 을 다음 식 (19)로 근사할 수 있다.

$$f_x \approx f_m \cdot \sin \beta \quad (19)$$

그리고 구 중심을 향하는 c 방향으로의 이송량 f_c 는 다음 식 (20)과 같다

$$f_c = f_x \cdot \sin \xi \quad (20)$$

여기서 ξ 는 $x-y$ 평면과 $a-b$ 평면사이의 각으로 다음과 같다.

구 부분 : $\xi = \phi \quad (21)$

엔드밀 부분 : $\xi = \frac{\pi}{2} \quad (22)$

등가 이송(Equivalent feed) f_e 는 $V-V_c$ 평면에서 절삭속도에 수직인 방향의 절입량이다. 유효 이송량 f_e 는 Fig. 5를 참고하면 다음 식 (23)으로 된다.

$$f_e = \frac{f_c}{\sin \gamma} \quad (23)$$

3.3 유연 절삭력 모델

유연 절삭력 모델(Flexible cutting force model)은 절삭력에 의한 공구 처짐의 영향을 고려한 것으로 순간피드백(Instantaneous feedback)과 재생피드백(Regenerative feedback)으로 나누어 적용할 수 있다. 절입이 이루어지는 과정에서 절삭부하에 의해 공구 처짐이 발생하고, 이 처짐에 따른 공구 복원력이 발생한다. 순간 피드백이란 이러한 두 힘이 평형을 이루는 상태에서 실제 절입량이 결정된다고 가정하는 것이다. 한편, 재생피드백은 선행 절삭날에 의해 형성된 가공면 형상이 새로이 절삭에 참여하는 절삭날의 절입량에 미치는 영향을 고려한 것이다.

유연 절삭력 모델에서 공구 런 아웃을 포함한 재생피드백의 영향을 고려하기 위하여 세분화된 미소절삭날에 대한 절입량을 생각한다. Fig. 7을 참고하여 i 번째 원판요소, j 번째 공구 각 위치, k 차 절삭날의 절입량은 다음 식 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$f_x(i, j, k) = \max \langle 0, \min [m f_m \cdot \sin \beta(i, j, k) + \{ R_d(i, k) - R_d(i, k-m) \} + \{ \delta_x(i, j) - \delta_x(i, n) \} \cdot \sin \beta(i, j, k) - \{ \delta_y(i, j) - \delta_y(i, n) \} \cdot \cos \beta(i, j, k)] \rangle$$

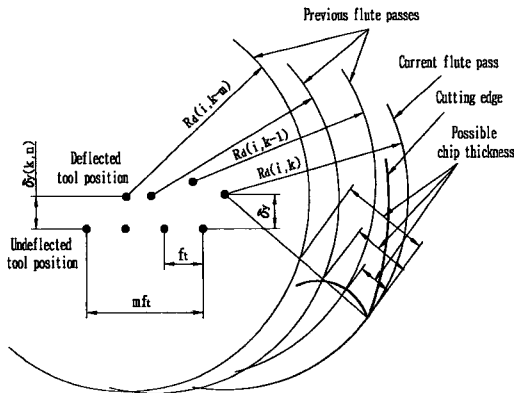


Fig. 7 Cutting engagement in the flexible model

where $m = 1, 2, \dots, N_f$ $n = j - m - \frac{2\pi}{N_f} \frac{1}{\Delta\alpha}$ (24)

여기서 첫째 항은 이송에 의한 영향이고, 둘째 항은 절삭날의 길이 변화에 의한 영향이며, 셋째 항과 넷째 항은 각각 공구의 이송방향과 이송 수직방향의 공구 처짐의 영향을 나타낸다.

어느 한 점에서의 공구 처짐은 볼 엔드밀을 외팔보(Cantilever beam)로 간주하여 각 미소절삭날에 작용하는 절삭력에 의한 공구 처짐을 중첩(Superposition)의 원리를 적용함으로써 구할 수 있다. 이를 위해 i 번째 원판요소, j 번째 공구 각 위치, k 차 절삭날에 대한 공구 처짐을 생각한다. N_i 개의 원판요소와 N_f 개의 날을 가진 볼 엔드밀에 대한 처짐은 Fig. 8을 참고하면 다음 식 (25)와 같이 구할 수 있다.

$$\delta(i, j, k) = \sum_{m=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_f} G(i, j, k) \quad (25)$$

$$G(i, j, k) = \begin{cases} \frac{dF L_f^2(m, k)}{6EI} [3 L_d(i) - L_f(m, k)], & 0 \leq L_f < L_d \\ \frac{dF L_d^2(i)}{6EI} [3 L_f(m, k) - L_d(i)], & L_d \leq L_f < L_e \end{cases}$$

여기서 L_e 는 공구 돌출길이(Over hang length)이며, L_f 는 공구 홀더(Tool holder) 선단으로부터 미소절삭력의 작용점까지의 길이이다. L_d 는 다시 공구 홀더 선단으로부터 관심 미소절삭날까지의 거리이다.

실제 가공에서 모든 미소절삭날이 절삭에 참여하는 것은 아니며, 실제 절입 여부는 공구 축방향 절입 깊이(da)와

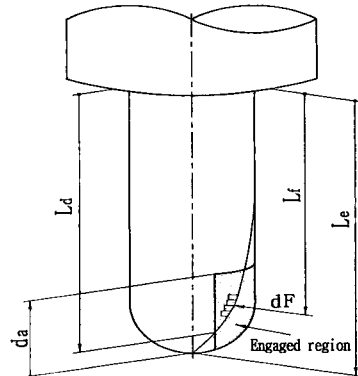


Fig. 8 Tool deflection

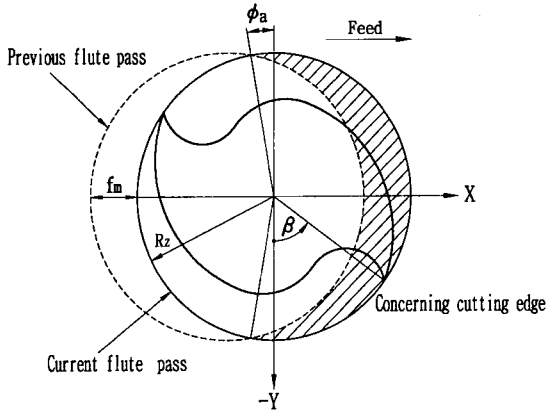


Fig. 9 Engagement test on X-axis

공구 경로 간 이송(f), 그리고 주어진 순간에 관심 미소절삭날의 위치에 따라 결정된다. 미소절삭날의 절삭 참여 여부는 다음 X, Y, Z 의 세 방향으로 분리하여 판단하는 것이 편리하다. Z 방향에서의 참여 여부는 미소절삭날의 높이가 공구 축방향 절입 깊이보다 낮아야 절입에 참여하게 된다. 그리고 X 방향에서의 참여 여부는 공구의 이송에 의해 공구 이송방향의 전면에 있는 절삭날만 절삭에 참여하게 된다. 그런데 공구가 정지 회전을 하는 것이 아니라 이송방향으로 진행하면서 가공하기 때문에 Fig. 9에 나타난 바와 같이 ϕ_a 만큼 뒤쳐진 영역에서도 절삭에 참여하게 된다. 여기서 판별에 필요한 처짐 영역은 다음 식 (26)으로부터 얻을 수 있다.

$$\phi_a = \sin^{-1}\left(\frac{f_m}{2R_z}\right) \quad (26)$$

Y 방향은 상향 절삭(Up milling)과 하향 절삭(Down milling)에 따라 계산식이 달라지는데, 이는 절삭방법에 따라 공구의 위치가 피삭재의 오른쪽과 왼쪽으로 달라지기 때문이다. 하향 절삭의 경우 절삭공구가 피삭재의 왼쪽에 존재하는데 미소절삭날의 Y 방향 위치가 가공 경제보다 오른쪽에 위치하면 절삭에 참여한다.

3.4 절삭력 계산

2차원 절삭 모델에 의해 $V-V_c$ 평면에서 구한 미소절삭력 dF_t, dF_r 는 미소절삭날의 위치에 따라 방향이 다르다. 따라서 이들 결과를 일관된 방향에 따른 성분으로 분리한 후 이를 통합함으로써 볼 엔드밀에 작용하는 절삭력을

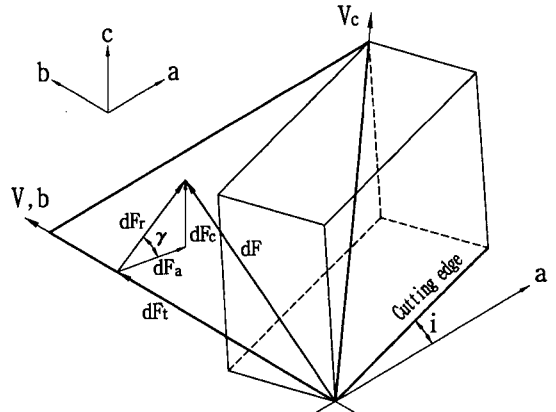


Fig. 10 Cutting forces in $V-V_c$ plane

구할 수 있다.

$$\begin{aligned} dF_a &= dF_r \cdot \cos \gamma \\ dF_b &= dF_t \\ dF_c &= dF_r \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} dF_x &= dF_a \cdot \cos \zeta - dF_c \cdot \sin \zeta \\ dF_y &= dF_b \\ dF_z &= dF_a \cdot \sin \zeta + dF_c \cdot \cos \zeta \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} dF_X &= dF_x \cdot \sin \beta + dF_y \cdot \cos \beta \\ dF_Y &= -dF_x \cdot \cos \beta + dF_y \cdot \sin \beta \\ dF_Z &= dF_z \end{aligned} \quad (29)$$

공구의 j 차 회전 각 위치에서 전체 볼 엔드밀에 작용하는 절삭력은 각각의 미소절삭날에 작용하는 미소절삭력을 중첩하여 다음 식 (30)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_X &= \sum_{i=1}^j \sum_{k=1}^k dF_X \\ F_Y &= \sum_{i=1}^j \sum_{k=1}^k dF_Y \\ F_Z &= \sum_{i=1}^j \sum_{k=1}^k dF_Z \end{aligned} \quad (30)$$

4. 가공실험 및 고찰

제시된 절삭력 모델의 타당성을 검증하기 위해 실제 볼 엔드밀 가공에서 발생하는 절삭력을 측정하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

실험 장비는 Table 3과 같으며, 컴퓨터 인테페이스를 통하여 초당 2,000개의 데이터를 획득하였다. 피삭재는 2차원 절삭 실험 때와 같으며 사용된 공구의 규격 및 제원은 Table 4와 같다.

Fig. 11은 시뮬레이션 해석(Simulation analysis)을 위한

Table 3 Specifications of the experimental equipments

Equipment	Description and specification
Machining center	- Daewoo heavy industry - Model : ACE-V500
Lathe	- Hwacheon machinery works co. - Mode : WL-380B
Tool dynamometer	- Kistler - Model : 9257B
Charge amplifier	- Kistler - Model : 5019B

Table 4 Specification of the ball end mill

Diameter	Material	No. of flutes	Over hang length	Helix angle	Normal rake angle
φ10mm	High speed steel	2	40mm	30°	14°

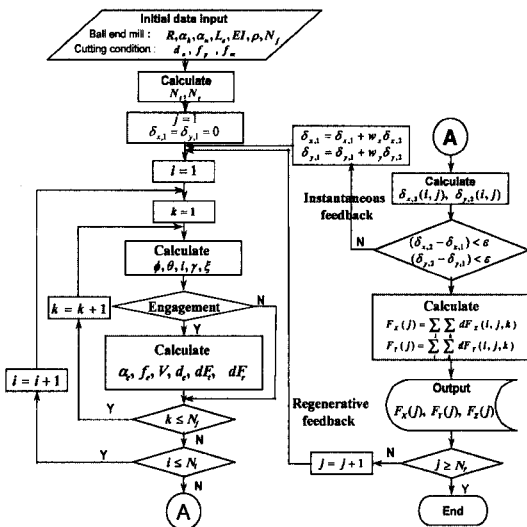


Fig. 11 Flow chart of the simulation model for the ball end mill cutting process

프로그램의 순서도(Flow chart)이다. Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14는 실험을 통해 얻은 절삭력과 유연 절삭력 모델에 의해 계산한 값을 비교한 그래프이다.

모든 결과에서 전개된 모델에 의한 결과가 공구의 유연성과 런 아웃에 의한 절삭력 변동의 영향을 적절히 반영하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 볼 엔드밀의 절삭현상을 해석적으로 접근하여 절삭력을 예측할 수 있는 모델을 제시하였으며 많은 실험을

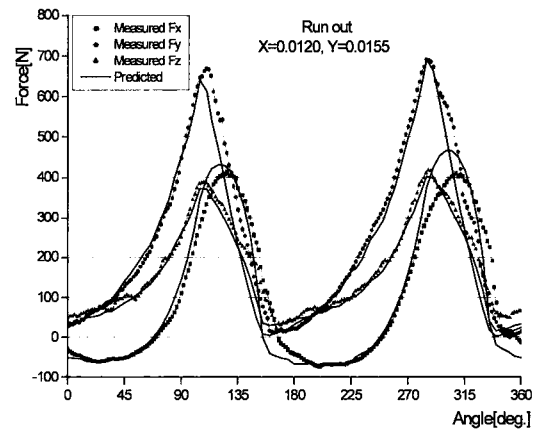


Fig. 12 Comparison of the predicted and measured cutting force (da=2.0mm, fp=2.0mm, feed=0.1mm/rev)

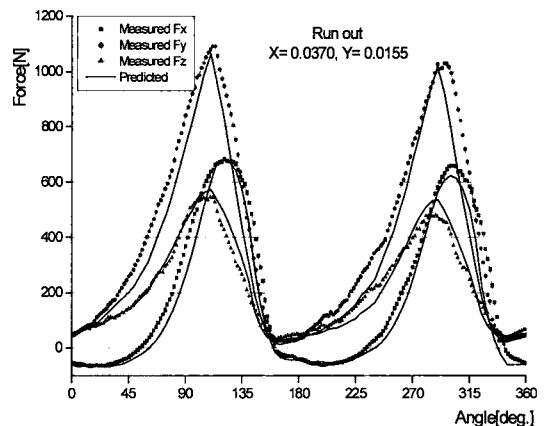


Fig. 13 Comparison of the predicted and measured cutting force (da=5.0mm, fp=2.0mm, feed=0.1mm/rev)

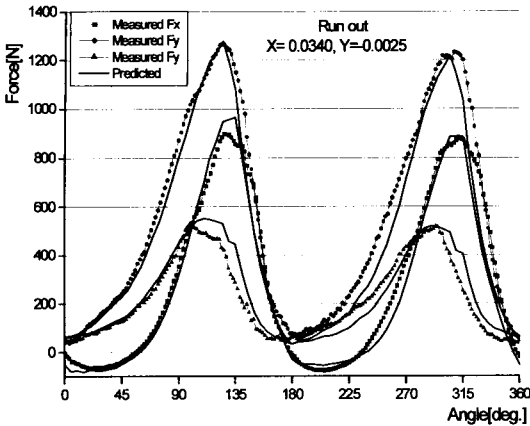


Fig. 14 Comparison of the predicted and measured cutting force ($d_a=8.0\text{mm}$, $f_p=2.0\text{mm}$, $feed=0.1\text{mm/rev}$)

통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 복잡한 형상의 볼 엔드밀 절삭날을 미소절삭날로 세분화하여 2차원 절삭이론을 적용함으로써 3차원 볼 엔드밀 가공의 해석이 가능하였다.
- (2) 볼 엔드밀 절삭날의 세분화 방법으로 구 부분은 일정 각도로 세분하고 엔드밀 부분은 일정 높이로 세분함으로써 균일한 절삭날 길이를 얻을 수 있어 절삭력의 예측에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다.
- (3) 절삭날의 연속성을 보장하기 위해 구 부분의 절삭날을 2차원 연속 비틀림으로 가정함으로써 미소절삭날의 공간상 위치를 좀더 정확하게 얻을 수 있었다.
- (4) 제시된 모델로 계산한 절삭력은 실제 가공에서 얻어진 절삭력과 잘 일치함을 보였다.

후 기

본 연구는 2002년도 순천대학교 공과대학 학술재단 및 BK21사업단의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kline, W. A., Devor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 22, pp. 7~22.
- (2) Yang, M. and Park, H., 1991, "The Prediction of Cutting Force in Ball End Milling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 31, No. 1, pp. 45~54.
- (3) Lee, P. and Altintas, Y., 1996, "Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36, No. 9, pp. 1059~1072.
- (4) Yucesan, G. and Altintas, Y., 1996, "Prediction of Ball End Milling Forces", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 95~103.
- (5) Feng, H. Y. and Menq, C. H., 1996, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction", *Journal of Manufacture Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 461~469.
- (6) Lee, Y. M., Lee, S. H. and Tae, W. I., 2000, "Prediction of Cutting Force in up End Milling", *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 3~7.
- (7) Kim, S. C., Lee, E. S. and Kim, H. G., 2000, "A Study on the Modeling for Cutting Force", *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 58~65.
- (8) Kim, B. H., 2001, "Precision Machining Characteristics in Ball-End Milling of Sculptured Surfaces", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 78~87.
- (9) Wang, D. H. and Park, H. C., 2001, "Tool Deflection and Geometric Accuracy to the Change Position Angle during Machining Sculptured Surface", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 55~64.
- (10) Choi, J. G., Yang, M. Y. and Youn, J. W., 2001, "A Study on the Characteristic of Machined Surface by High Speed Ball End Milling", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 6, pp. 126~134.