한국공작기계학회논문집 Vol.10 No.6 2001. 12.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

고속 볼 엔드밀링의 가공면 특성에 관한 연구

최종근*, 양민양**, 윤재웅***

A Study on the Characteristic of Machined Surface by High Speed Ball End Milling

Choi, Jong Geun*. Yang, Min Yang**, Youn, Jae-woong***

Abstract

Recently, high productivity and cost reduction becomes the most important target of industries due to the worldwide economic competition. One of these efforts is High Speed Machining(HSM), which reduces machining time with the increase of machining speed such as cutting speed and feedrate. It is very important, especially in case that the portion of machining time in production cost is high. This research suggests optimum cutting conditions to reduce cutting time with minimizing form error. For this study, a comprehensive model representing the texture of machining surface is developed, including rubbing phenomenon on the tip of ball end mill and expanded rubbing zone trajectory caused by tool deflection. Experiments show that the suggested set of feed and pick feed is optimum for maintaining the surface roughness identified by rubbing and low cutting speed in minimum.

Key Words : Ball end mill(볼 엔드밀), High speed machining(고속가공), Pick feed(경로간 이송), Rubbing(러빙), Surface roughness(표면 거칠기), Tool deflection(공구 처짐)

1. 서 론

근래 볼 엔드밀에 의한 고속가공은 고속, 고 능률 공작기계의 보편화로 금형산업을 비롯한 여러 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 볼 엔드밀에 의한 고속가공은 효율성을 중요시하는 고 능률 가공과 가공 표면의 정밀성을 추구하는 고 품위 가공으로 대별될 수 있다.[1,2] 고 능률 가공은 공구의 고속회전을 이용 이송(feed)를 증가시켜 가공시간을 단축시키는 방법이며, 고 품위 가공은 공구경로 사이의 간격을 줄여 가공면의 표면정도를 향상시키는 방법이다.[3,4] 볼 엔드밀에 의한 가공은 공구 형상의 복잡성에 기인하여 절삭날 위치에 따라 다양한 절입형태와 각기 다른

* 순천대학교 기계자동차공학부
(jgchoi@sunchon.ac.kr)
** 한국과학기술원 기계공학과
*** 대구대학교 자동차 산업 기계공학부

절삭속도를 갖게 된다. 여기에 고속가공의 중요 특성인 빠른 이송속도 때문에 절삭상태는 더욱 복잡하게 된다. 또한, 가공 효율과 가공 정밀도는 곡면의 가공방법, 절삭조건 등에 의해 크게 달라지므로, 적절한 가공조건의 선정을 위해서는 이의 적절한 해석과 판단이 요구된다.

이에 관한 연구로서 Kishinami 등[5]은 볼 엔드밀의 절삭속도에 따르는 절삭 메커니즘을 규명하였으며, Shinichi Miyazawa 등[6]은 볼 엔드밀 가공에 의한 표면 생성시 표면 거칠기의 지배인자에 관하여 연구하였다. 또한, 곡면가공 중 가공면 최적화를 위한 절삭조건 부여에 관한 연구는 주로 공구처짐에 의한 형상오차를 최소화하는 방향으로 행하여져 왔으며,[7,8] 볼 엔드밀에 의한 고속, 고 이송 밀링가공 시 표면 생성 특성은 Kunio 등[9]에 의하여 연구된 바 있다.

본 연구에서는 고속 볼 엔드밀 가공에서의 가공면 생성 원리를 해석적으로 규명하고, 실험을 통하여 그 특성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 볼 엔드밀의 절삭날 위치에 따른 가공조건을 정의하고, 이들 각각의 절삭부위가 갖는 절삭속도, 절입상태 등의 절삭특성을 분석하였다. 또한, 이송속도와 이송경로사이의 간격(pick feed)이 가공면의 표면 조도에 미치는 영향을 해석하고, 이의 개선을 위한 가공조건을 제시하였다. 해석결과와 제시된 최적가공조건의 적절성을 검증하기 위해 여러 가공조건에서의 가공면 특성을 조사하였다.

2. 고속 볼 엔드밀 가공의 절삭 특성

고속 볼 엔드밀 가공에서의 절삭날과 가공소재사이의 실질적인 절삭속도는 공구의 고속 회전 뿐만 아니라, 빠른 이송속도에 의하여도 큰 영향을 받는다. 특히 볼 엔드밀의 선단 부근에서는 회전반경의 감소로 공구의 고속 회전에도 불구하고 절삭날의 선속도는 매우 작게 된다. 그 결과로 일반 절삭가공에서 보여지는 정상 가공상태가 더 이상 유지되지 못하고 압입(penetration), 러빙(rubbing)과 같은 이상 절삭현상이 나타날 수 있다. 러빙이란 절삭날의 여유면이 경사면보다 먼저 피삭재에 닿아 절삭하지 못하고 가공소재를 문지르는 경우를 말하며, 이는 고속가공 중 가공표면의 거칠기를 일반 예측 값과 다르게 만드는 주요 원

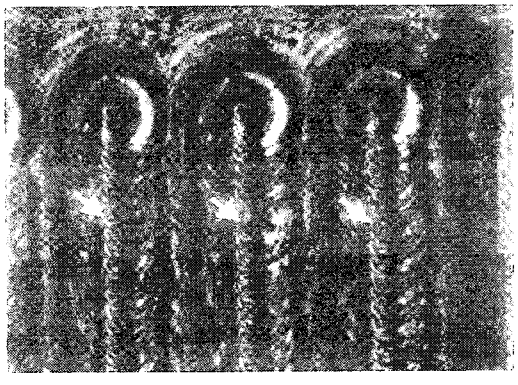


Fig. 1 Rubbing marks on the machined surface by the high speed ball end milling (Arrows indicate rubbing marks, HSS ball end mill and SKD11 workpiece)

Table 1. Cutting characteristics with respect to velocity components of a cutting edge

절삭 특성	경사면 수직 속도 성분	여유면 수직 속도 성분
절삭(Cutting)	+	-
압입(Engage)	+	+
이탈(Disengage)	-	-
러빙(Rubbing)	-	+

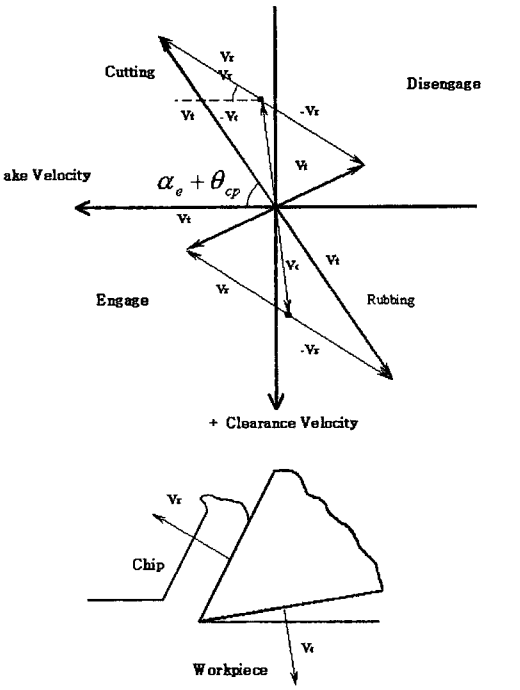


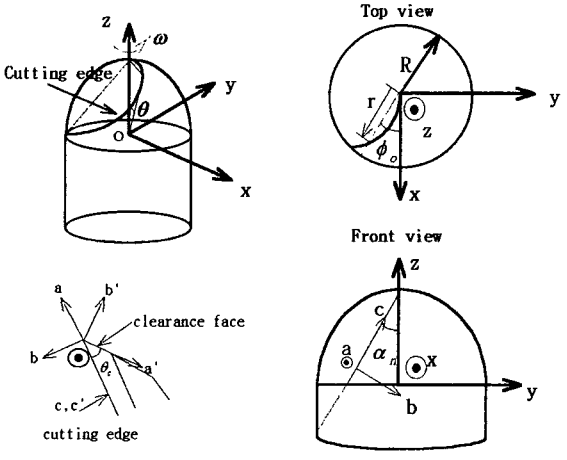
Fig. 2 Velocity diagram according to behavior of the rake and the clearance faces of a cutting edge

인이 된다. Fig. 1은 볼 엔드밀 가공에서 이러한 절삭특성에 의한 러빙자국을 보여 준다.

볼 엔드밀 가공에서 가공속도, 절입량 등 여러 절삭인자는 절삭날의 위치에 따라 다르게 되므로 하나의 절삭날(flute)을 다수의 미소 절삭날로 나누어 생각하는 것이 편리하다. 이 때 분리된 절삭날들이 갖는 가공특성은 이들에 대한 경사면(rake face)과 여유면(clearance face)의 운동속도를 조사함으로써 예측할 수 있다. 이렇게 하면 이들 속도의 양과 음에 따라 Table 1 과 같이 절삭(cutting), 압입(engage), 이탈(disengage), 러빙의 4가지 절삭특성으로 대별할 수 있다. Fig. 2는 3차원 볼 엔드밀 가공을 2차원화한 가공 형태에서 이들의 발생조건을 보여준다.

Fig. 2에서 Vr은 경사면의 수직 속도성분이며, Vc는 여유면의 수직 속도성분이다. 따라서 각 미소 절삭날의 속도성분을 분석함으로써 각각의 절삭날들이 어느 가공상태에 있는지 알 수 있다. 이제 볼 엔드밀의 형상과 설정된 좌표를 나타내는 Fig. 3을 참고하여 각각의 절삭날이 갖는 속도성분을 정량화한다. 그림에서 α_r 은 x-y면 상의 경사각(radial rake angle)이며, θ_c 는 여유면과 경사면사이의 각으로 정의되는 날끝각이다.

절삭날 상의 a-b-c 좌표계를 볼 엔드밀 상의 x-y-z 좌표



o-xyz : Rotating coordinate fixed on ball end mill with the origin at the center ball

o-abc : Moving coordinate fixed on a cutting edge with a-axis parallel to x-axis and b-axis perpendicular to rake face

Fig. 3 The cutting edge of a ball end mill and its coordinate system

계와 피삭재에 고정된 X-Y-Z 좌표계간의 좌표변환을 이용하면 피삭재에 대한 공구면의 속도를 구할 수 있다. 속도 좌표계의 변환 상호관계는 식(1)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \xleftarrow{M_0} \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \xleftarrow{M_1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \xleftarrow{M_2} \begin{bmatrix} V_{a'} \\ V_{b'} \\ V_{c'} \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서,

$$M_0 = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_n) & -\sin(\alpha_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_c) & \sin(\theta_c) & 0 \\ -\sin(\theta_c) & -\cos(\theta_c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이고, ω 는 공구의 회전 각속도이다. 피삭재에 대한 볼 엔드밀의 절삭날 위치를 식(2)와 같이 구하고, 이로부터 속도요소를 구하면 식(3)으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_0 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \frac{\omega t}{2\pi} \begin{bmatrix} f_X \\ f_Y \\ f_Z \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & -\cos(\omega t) & 0 \\ \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \frac{\omega}{2\pi} \begin{bmatrix} f_X \\ f_Y \\ f_Z \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서, 는 f_X, f_Y, f_Z의 각 방향에 대한 이송성분[mm/rev]이다. 또한, 좌표변환에 의해 각각의 속도 성분은 다음 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = M_1 \cdot M_0^T \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}$$

$$= M_1 \cdot M_0^T \left[\omega \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & -\cos(\omega t) & 0 \\ \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \frac{\omega}{2\pi} \begin{bmatrix} f_X \\ f_Y \\ f_Z \end{bmatrix} \right] \quad (4)$$

한편, 절삭 날의 위치에 따른 x-y-z 성분은 식(5), 식(6), 식(7)로 표현된다.

$$x = R\ \cos(\alpha_n)\sin(\theta) \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{2} R\ \sin(2\alpha_n)[\cos(\theta) - 1] \quad (6)$$

$$z = R[\cos^2(\alpha_n \cdot \cos(\theta) + \sin^2(\alpha_n)] \quad (7)$$

여기서 θ 는 절삭날의 위치를 나타내는 것으로서 z축과 이루는 각도이다. 따라서 경사면 수직 속도성분은 식(8)로 계산될 수 있다.

$$V_b = \omega\{\cos(\alpha_n) \cdot [R\ \sin(\theta)\ \cos(\alpha_n)] - \frac{f_X}{2\pi}\cos(\alpha_n) \cdot \sin(\omega t) + \frac{f_Y}{2\pi}\cos(\alpha_n) \cdot \cos(\omega t) - \frac{f_Z}{2\pi}\sin(\alpha_n)\} \quad (8)$$

한편, 여유면 수직 속도성분 $V_{a'}$, $V_{b'}$, $V_{c'}$는 Fig. 3에서 설정한 여유면 좌표계와 식(1)을 이용하면 다음 식(9)로 유도된다.

$$V_{b'} = \omega\sin(\theta_c)\left\{\frac{1}{2}R\sin(2\alpha_n)[\cos(\theta) - 1] - \cos(\omega t)\frac{f_X}{2\pi} - \sin(\omega t)\frac{f_Y}{2\pi}\right\} - \omega\cos(\theta_c)\left\{\begin{array}{l} \cos(\alpha_n) \cdot [R\sin(\theta)\cos(\alpha_n) - \frac{f_X}{2\pi}\cos(\alpha_n) \cdot \sin(\omega t)] \\ + \frac{f_Y}{2\pi}\cos(\alpha_n) \cdot \cos(\omega t) - \frac{f_Z}{2\pi}\sin(\alpha_n) \end{array}\right\} \quad (9)$$

또한 Fig. 2와 Fig. 3을 비교하면 경사면 수직 속도성분과 여유면 수직 속도성분은 식(10)의 관계가 있음을 알 수 있다.

$$V_r = V_b$$
$$V_c = V_{b'} \quad (10)$$

따라서 이들로부터 러빙영역을 절삭조건에 따라 예측할 수 있으며, $V_b > 0$, $V_{b'} < 0$ 가 되는 임계절삭영역의 위치를 절삭날 상의 정점으로부터 구할 수 있다. 공구의 회전속도가 커지면 속도성분 V_r, V_c 의 전체 크기가 비슷한 비율로 커지게 되므로, 특정 절삭속도에서 러빙 발생위치를 크게 바꾸지는 못한다. 그러나 러빙이 일어나는 시간간격은 회전주기의 감소로 인하여 짧아진다. 각 방향 이송속도 f_X, f_Y, f_Z의 경우 각 방향 러빙영역의 크기에 영향을 주므로 러빙현상은 이와 직접적인 연관이 있다. 동일 절삭조건에 대하여 볼 엔드밀 형상에 의한 러빙발생의 특성은 α_n이 클수록 θ_c가 작을수록 감소한다. 그러므로 볼 엔드밀 절삭날의 기하학적 형상과 절삭조건의 특성에 따른 러빙이 발생한다.

공구 절삭날과 여유면 상의 속도요소 해석 시 절삭속도는 엔드밀부의 절삭속도인 $R\omega$로 무차원화하여 한 주기에 대하여 표현한다. 무 차원화된 절삭속도는 식(11), 식(12)와 같다.

$$V_{bnorm} = \frac{V_b}{R\omega} \quad (11)$$

$$V_{b'norm} = \frac{V_b}{R\omega} \quad (12)$$

여유면에 의한 러빙지역은 z축과 이루는 각 θ 를 0로부

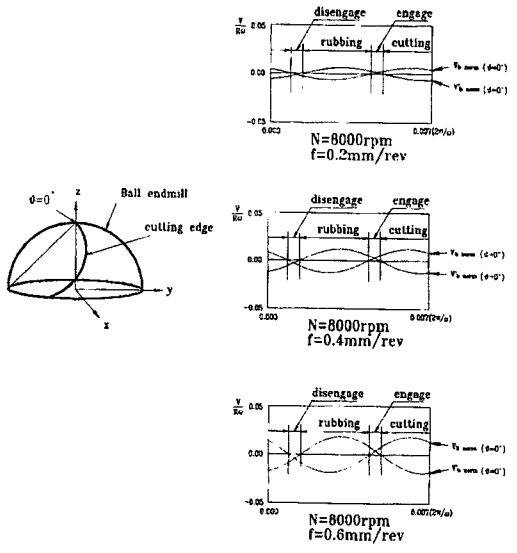


Fig. 4 Rubbing region according to change of the normal velocities of the rake and the clearance faces

터 증가시킬 때, θ가 어느 특정 각도에서 $V_{b\,norm}$이 모두 양수가 되고 $V_{b\,norm}$이 모두 음수가 될 때의 영역이 된다. 몇몇 가공조건에서의 이에 대한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다.

Fig. 5는 속도 요소해석에 의한 임계 러빙영역을 표현한 것이다. 그림에서 반경방향 임계 러빙영역 Rub_r과 공구 축방향 임계 러빙영역 Rub_a는 절삭날을 따라서 다음 식 (13), 식(14)로 표현된다.

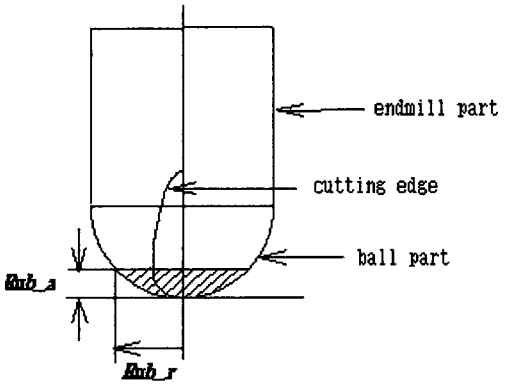


Fig. 5 Rubbing zone on the rigid ball end mill

$$Rub_r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{13}$$

$$Rub_a = R - z \tag{14}$$

Table 2는 주어진 공구속도에서 이러한 임계 러빙영역에 대한 속도요소 해석 결과의 예이다.

볼 엔드밀 상의 러빙은 강체(rigid body)공구로 가정한 볼 엔드밀의 정점지역인 Rub_a, Rub_r 지역에서 발생한다. 이러한 러빙지역은 공구를 강체가 아닌 유연(flexible) 공구로 볼 경우 가공 중 공구처짐에 의하여 확대된다. Fig. 6은 이러한 러빙영역의 확대를 가공면 상에서 표현한 것이다.

Table 2. Rubbing zone on the rigid ball end mill

feed (mm/rev)	Rub_r()	Rub_a()
0.2	69	0.6
0.4	138	2.3
0.6	206	5.3

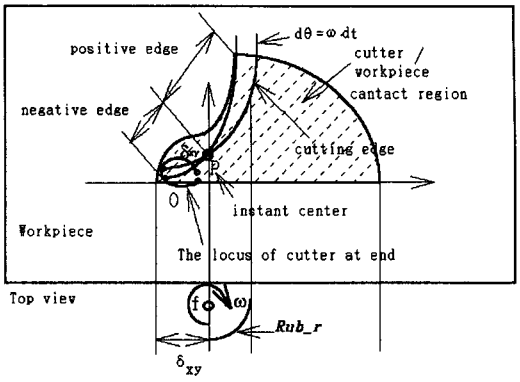


Fig. 6 Rubbing zone induced by tool deflection

그림에서 점 P는 공구가 처짐에 의하여 순간회전 및 이송중심이 되므로 점 P를 중심으로 절삭날 상의 속도분포에 의한 러빙영역 이외의 추가적인 러빙영역이 발생함을 알 수 있다. 따라서 전체 러빙영역은 순간중심에 공구중심이 위치한 강체 볼 엔드밀 상의 러빙영역과 공구처짐에 의한 러빙영역의 합이 된다. 공구가 회전할 때 강체공구라면 점 P와 점 O가 일치하며, 가공면 상에는 Rub_r만이 러빙영역으로 남게 된다. 그러나 유연공구의 경우 회전중심과 이송의 중심이 그림의 점 P로 표시되는 반면, 정점부는 점 P 아래에 위치하여 추가적인 러빙현상을 유발한다. 한편, Fig. 7은 이러한 처짐에 의한 러빙효과를 도식적으로 보여준다.

그림에서 피삭재 상에 나타나는 최대 러빙영역의 변화는 X-Y면에서 정점의 이동 δ_{XY}에 러빙영역의 이동 δ_o을 더한 값이 된다. 이러한 궤적은 다음 식(15)와 같이 표현

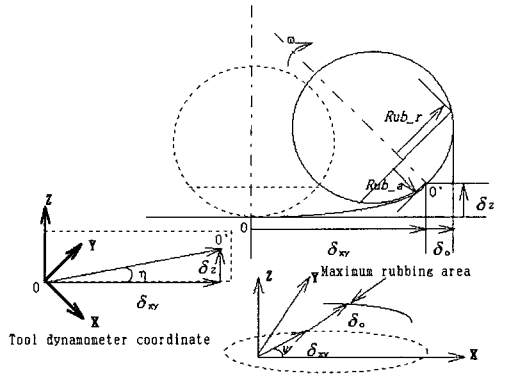


Fig. 7 Rubbing zone trajectory

될 수 있다.

$$Rubbing\ \ Zone\ \ Trajectory = \delta_{XY} + \delta_o \qquad (15)$$

또한, Fig. 7에서 보여지는 기하학적 관계에서 다음 관계가 있다.

$$\eta = \tan\left(\frac{\delta_Z}{\delta_{XY}}\right) \qquad (16)$$

$$\delta_o = Rub_r \cdot \cos(\eta) - Rub_a \cdot \sin(\eta) \qquad (17)$$

볼 엔드밀의 X-Y면에서 절삭력에 의한 공구처짐은 흔히 등가 강성에 의한 외팔보의 처짐으로 근사화된다.[8] 이 때 Z 방향으로의 처짐은 X-Y면의 처짐에 비하여 무시할 수 있는 크기이다. 따라서 이러한 가정으로부터 $\eta \approx 0$라 할 수 있고, 다음 식(18)의 표현이 가능하다.

$$Rubbing\ \ Zone\ \ Trajectory \approx \delta_{XY} + Rub_r \qquad (18)$$

Fig. 8은 실제 볼 엔드밀 가공에서 얻어지는 공구처짐 궤적을 공구 회전각 Ψ에 대하여 극좌표로 표현한 것

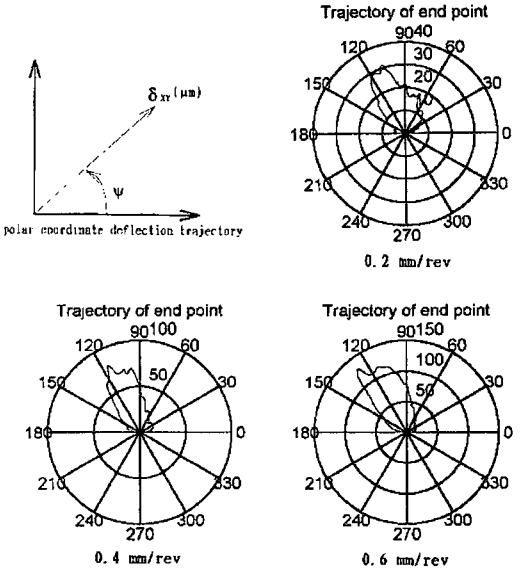


Fig. 8 Loci of cutter center with straight down milling, dry cut, the same pick feed with the feed, 0.4mm axial depth of cut, 8000rpm, and 50mm tool overhang length

Table 3. Rubbing zone by tool deflection, resultant, and measured

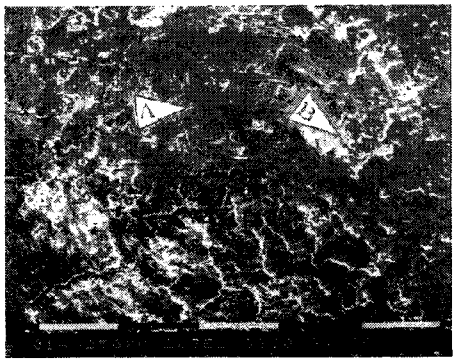
feed (mm/rev)	Maximum tool deflection(㎛)	Resultant(㎛)	Measured(㎛)
0.2	31	100	80-150
0.4	80	218	200-250
0.6	130	336	300-350

이다.

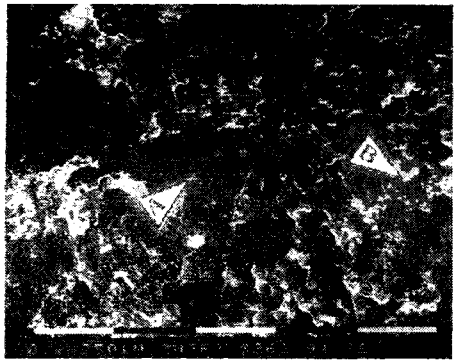
한편, Table 3은 이러한 공구처짐에 의한 러빙영역의 크기를 표시한다. 또한 앞서 설명한 강체모델에서의 러빙영역과의 합으로 나타나는 전체 러빙영역, 그리고 실제 실험에 의한 측정 값을 비교한다.

그 결과에서 최대의 러빙영역은 대략 공구의 날당 이송량 정도의 크기임을 알 수 있고, 이송방향의 공구마크 거의 전 부분에 걸쳐 러빙이 발생했음을 알 수 있다. 이러한 러빙현상은 가공면의 표면 거칠기가 이상적인 경우와 큰

(a) Feed : 0.2 mm/rev



(b) Feed : 0.4 mm/rev



(c) feed : 0.6 mm/rev

Fig. 9 SEM photographs of machined surfaces by rubbing and low cutting speed at 8000rpm (A: Rubbing mark, B: Low cutting speed zone)

차이를 갖게 하는 원인이 된다.

한편, 볼 엔드밀 가공시 정점부의 가공특성은 지금까지 설명한 러빙현상 이외의 저속절삭에 의한 가공면상의 버(burr) 발생이 문제가 된다. 그러나 고속 볼 엔드밀 가공의 경우 일반 속도에 의한 절삭가공시 정점부에서 발생하는 저속 절삭현상과는 달리 그 악 영향이 줄어든다. 이는 평균 절삭력이 감소하고 공구의 고속회전에 따른 원활한 칩 배출에 기인한다.[10] Fig. 9는 고속 볼 엔드밀 가공의 결과로 얻어진 가공표면에 대한 주사현미경(SEM) 사진이다. 그림에서 절삭영역과 러빙영역이 확연히 구분된다. 절삭면은 러빙으로 인한 러빙자국과 일부 저속 절삭으로 인한 영향을 보여준다.

3. 고속 볼 엔드밀 가공의 표면 특성

고 품위를 위한 고속가공에서는 경로간 이송(pick feed)을 충분히 작게 하여 커습(cusp)의 높이를 최소화하게 되며, 이와 같은 경우 이송자국과 경로간 이송자국(pick feed mark)은 거의 같은 크기가 된다. 따라서, 기하학적 표면거칠기는 커습에 의한 거칠기와 이송자국에 의한 거칠기의 중첩으로 식(19)과 같이 표현된다.

$$R_{\max} = R_p + R_f \tag{19}$$

여기서 R_p 는 경로간 이송방향의 거칠기이며, R_f 는 이송방향의 표면거칠기이다. 이러한 거칠기 이론이 곡면에 적용될 경우 각 방향의 곡률을 고려해야 하며, 최종적인 결과식은 다음 식(20)과 같다.[6]

$$R_{\max} = \frac{p^2}{8R}\left(1-\frac{R}{R+\rho_{pick}}\right)+\frac{p^2}{8R}\left(1-\frac{R}{R+\rho_{feed}}\right) \tag{20}$$

여기서 ρ_{feed} 는 이송방향 곡률반경이며, ρ_{pick} 은 경로간 이송방향 곡률반경이다. 이러한 기하학적 거칠기는 정성적인 경향을 의미하며, 실제의 가공면의 표면 거칠기는 공작기계의 정밀도, 공구의 동적현상(진동 및 처짐), 러빙특성 등의 불확정 인자에 의하여 영향을 받는다. 그러므로 실제의 표면거칠기는 식(20)에 의한 예측치 보다 나쁘게 되며, 이 경우 표면 거칠기는 설명한 양방향 표면 거칠기에 불확정 성분을 중첩시킨 식(21)로 나타낼 수 있다.

$$R_{\max}|_{real} = \frac{p^2}{8R}\left(1-\frac{R}{R+\rho_{pick}}\right)+\frac{f^2}{8R}\left(1-\frac{R}{R+\rho_{pick}}\right)+R_{physical} \tag{21}$$

여기서 $R_{physical}$ 은 불확정 성분의 값이다. 불확정 성분의 값은 공작기계의 정밀도가 일정할 경우 주로 절삭조건에 의하여 지배를 받는다. 중첩이론에 의하여 곡면을 가공할 경우 경로간 이송과 이송 등의 절삭조건이 중요하다. 여기서 가공면의 표면 거칠기는 가공표면에 남아있는 최대 표면거칠기로 표현되므로, 가능한 이를 일정하게 유지하는 경우가 효율적인 가공방법이 된다. 따라서 최종 가공면의 표면거칠기는 양방향의 등방성(non directional)이 될수록 유리하며, 이론적인 최적의 가공조건은 다음 식(22)와 같이 정의될 수 있다.

$$R_p \approx R_f \tag{22}$$

이러한 등방성과 중첩이론은 고 품위 고속가공의 표면생성의 이론적 근거가 된다. 그러나 앞서 지적한 데로 고속가공에서 정점부의 저속 절삭(low cutting speed) 특성은 개선되나 러빙의 영향은 확대되므로, 실제 표면거칠기는 어느 정도 달라지게 된다.

절삭조건에 따른 실제 가공면 표면거칠기의 변화를 관찰하기 위해 몇가지 실험을 하였다. 실험은 특정절삭 속도에 대하여 이송방향은 일반 절삭 이송(f=0.027[mm/

tooth])과 고속 이송(0.1mm/tooth)의 두 경우에 대하여 행하였으며, 경로간 이송은 기하학적 이론 조도 10 ㎛ R_{max} 이하를 만족 시키는 0.5mm로 일정하게 유지시켰다. 공구 마멸의 영향을 배제하기 위해 각 경우에 대하여 새 공구를 사용하였다. Fig. 10, Fig. 11은 각각의 두 이송량에 대

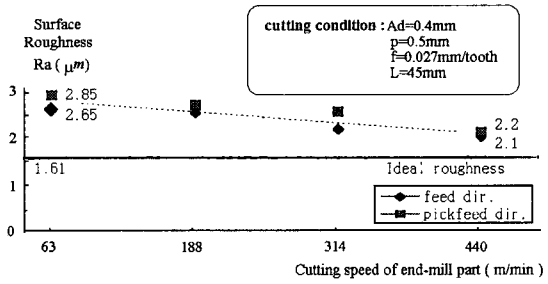


Fig. 10 Change of the surface roughness with respect to cutting speed at 0.027mm/tooth feed

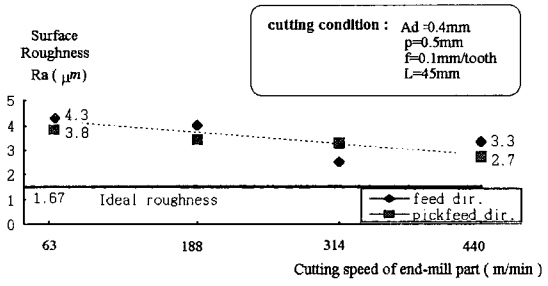


Fig. 11 Change of the surface roughness with respect to cutting speed at 0.1mm/tooth feed

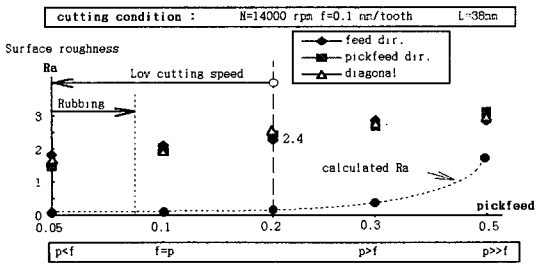


Fig. 12 Surface roughness with respect to pick feed

한 가공면 거칠기의 측정 결과이다.

그 결과에서 절삭속도를 증가시키는 경우, 경로간 이송 및 절삭 이송 방향의 표면 거칠기는 두 경우 모두 개선되었다. 절삭 이송이 0.027[mm/tooth]일때 보다 0.1[mm/tooth]일때의 표면거칠기는 이론에 의한 증가량(0.06 ㎛ Ra)보다 더욱 악화되고 있다. 이는 이송방향으로 러빙 및 저 절삭 현상이 나타나고, 그 영향이 절삭 이송 및 경로간 이송방향으로 미치고 있기 때문이다. 따라서, 특정한 절삭속도에 대하여 원하는 표면조도를 얻을 수 있는 절삭 이송과 경로간 이송의 적절한 조합이 존재한다.

한편, Fig. 12는 공구 처짐에 의한 러빙을 최소화하기 위하여 공구길이를 짧게 하여 경로간 이송의 변화에 따른 표면 조도의 변화를 관찰한 결과이다. 그림에서 가공면의 거칠기는 경로간 이송이 절삭 이송보다 적은 경우 이론조도와 큰 차이가 발생하며, 경로간 이송이 커지면 가공면 조도는 예측치와 비슷해진다. 이는 앞서 지적한 데로 러빙과 저속절삭에 의한 가공면의 희손 때문이다. 또한 경로간 이송이 적은 경우 절삭 이송방향의 평균거칠기가 경로간 이송방향보다 악화되는데 이는 러빙과 저 절삭특성으로 규명할 수 있다. 절삭 이송을 0.1[mm/tooth]로 하고 경로간 이송을 0.2[mm] 정도로 가공하는 경우, 정점부의 가공면 거칠기는 약 2.4[㎛]Ra 또는 10[㎛]Rmax이내로 근접한다. 그러므로, 최적의 가공면을 얻기 위한 절삭 이송 및 경로간 이송의 조합은 무수히 많으나, 대략 가공특성을 고려하여, 본 실험에서 사용된 초경공구의 경우 14000rpm에 절삭 이송 및 경로간 이송의 조합을 0.1[mm/tooth]와 0.2[mm] 정도로 가공하는 경우 가공면 거칠기를 2.5[㎛]Ra 이하로 조절이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 볼 엔드밀에 의한 고속가공에서의 절삭조건과 가공면 표면거칠기와의 관계를 규명하고자 하였다. 이를 위해 볼 엔드밀 가공의 특성인 러빙현상을 이론적, 실험적으로 고찰하였다. 또한 러빙 발생을 억제하여 표면조도를 향상시키기 위한 절삭 이송 및 경로간 이송의 조합을 제시하였다. 이러한 일련의 실험과 고찰을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 고속 회전과 고속 이송이 이루어지는 공구의 경사면과 여유면 상에서 속도분포에 의해 유도되는 러빙현상은 가공 중 공구의 처짐에 의한 정점부의 이

동에 의해 그 영역이 확대된다. 이는 곡면을 가공할 때, 곡면상의 거칠기를 기하학적 거칠기와 다르게 하는 주된 원인이 된다.

(2) 고속가공의 경우 공구 정점부의 저속에 의한 저 절삭면은 어느 정도 개선되나, 절삭이송의 증가는 절삭이송 방향 및 경로간 이송방향의 가공면 거칠기를 악화시킨다. 따라서 효율적인 조도 향상을 위해서는 절삭이송과 경로간 이송의 적절한 조합이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 박사후 연수 지원프로그램으로 지원된 과제에 의해서 수행되었음.

참고문헌

(1) J.F.Kahles, M.Field and S.M.Harvey, "High Speed Machining Possibilities and Needs", CIRP Vol. 27/2/1978 pp 551-560

(2) R.Komanduri, "High Speed Machining", Mechanical Engineering, December 1985, pp 64-76

(3) Herbert Schulz, Toshimichi Moriwaki, "High-Speed Machining", CIRP Vol. 41/2/1992 pp 637-643

(4) R.Komanduri, J.McGee, R.A.Thompson, "On a Methodology for Establishing the Machine Tool System Requirements for High-Speed Machining/ High-Throughput Machining", ASME Vol. 107, November 1985, pp 316-324

(5) Milton C. Shaw, Metal Cutting Principles, 1986

(6) P.Mathew and P.L.B.Oxley, "Predicting the Effects of Very High Cutting Speeds on Cutting Forces, etc.", CIRP Vol. 31/1/1982, pp 49-52

(7) J.R.Jaeschke, R.D.Zimmerly and S.M.Wu, "Automatic Cutting Tool Temperature Control", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 15, 1975 pp195

(8) J.Tlusty, "High-Speed Machining", CIRP Vol. 42/2/1993, pp 733-738

(9) R.Ippolito, S.Tornincasa, R.Levi, "High Speed Machining: Tool Performance and Surface Finish in Steel Turning", CIRP Vol. 37/1/1988, pp 105-108

(10) J.C.Hamann, f.Le Maitre, D. Guillot, "Selective Transfer Built-up Layer Displacement in High-Speed Machining Consequences on Tool Wear and Cutting Forces", CIRP Vol. 43/1/1994, pp 69-72

(11) 왕덕현, 박희철, "곡면가공시 경사위치각 변화에 따른 공구변형과 형상정밀도", 한국공작기계학회 Vol.10, No.4, 2001.8 pp.55-64