

엔드밀링의 전단특성 및 마찰특성 해석

이영문[†] · 송태성* · 심보경*
(2000년 10월 17일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

The Shear and Friction Characteristics Analysis of End-Milling

Young-Moon Lee, Tae-Seong Song and Bo-Kyoung Shim

Key Words: Up End Milling(상향 엔드밀링), Oblique Cutting(경사절삭), Helix Angle(헬릭스각), Specific Shear Energy(비전단에너지), Specific Friction Energy(비마찰에너지), Specific Cutting Energy(비절삭에너지)

Abstract

In end milling process the undeformed chip thickness and the cutting force components vary periodically with phase change of the tool. In this study, up end milling process is transformed to the equivalent oblique cutting. The varying undeformed chip thickness and the cutting force components in end milling process are replaced with the equivalent average ones. Then it can be possible to analyze the chip-tool friction and shear process in the shear plane of the end milling process by the equivalent oblique cutting model. According to this analysis, when cutting SM45C steel, 72% of the total energy is consumed in the shear process and the balance is consumed in the friction process.

1. 서론

최근 공구 제어기술의 발달과 함께 엔드밀링 절삭공정은 금형의 윤곽가공 등 복잡한 형상의 제품가공시 높은 생산성과 고정밀도를 얻을 수 있어 항공기 부재 가공 및 자동차 산업에 필요한 금형제작 등 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되고 있다.⁽¹⁾

엔드밀링 공정은 일정한 절삭깊이로 진행되는 연속절삭 방식과는 달리 미변형칩두께(undeformed chip thickness)가 변화하며 이에 따라 절삭력도 주기적으로 변하는 단속절삭이며, 여러개의 절삭 날이 동시에 작용하는 가공이므로 그 실제적인 해석이 간단하지 않다.

밀링공정 해석에 대한 연구는 Martellotti⁽²⁾가 공구와 피삭재의 기하학적 및 운동학적인 관계에 대한 고찰을 통하여 상향 및 하향 밀링공정에서의 공구경로에 따른 미변형칩 두께 변화에 대한 이론적인 관계를 정립한 이후, Tlusty와 Macneil 등⁽³⁾은 상향 엔드밀링 공정에서 공구의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따라 변하는 미변형칩두께 사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형칩 단면적의 곱으로 나타내는 절삭력 예측 모델을 제시하고, 실제 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토하였다.

절삭과정은 칩 생성과정이며, 칩생성은 전단역이라 불리우는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다.

따라서 절삭과정에 대한 해석은 전단역에서의 전단과정과 칩-공구 마찰과정에 대한 해석에 기초하고 있다.

밀링공정에 대한 해석이 다각적으로 이루어져

[†] 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : ymlee@knu.ac.kr

TEL : (053)950-5574 FAX : (053)950-6550

* 경북대학교 대학원 기계공학과

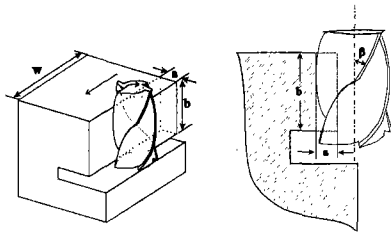


Fig. 1 Schematic diagram of up end milling process

왔으나 아직까지 이의 전단특성과 칩-공구 마찰 특성에 대한 해석은 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 단속절삭 공정인 엔드밀링 공정에 상당하는 등가의 경사절삭 모델을 설정하고 이에 의거한 엔드밀링 공정의 전단특성 및 칩-공구 마찰특성의 해석을 시도하였다.

2. 절삭 모델

2.1 엔드밀링 모델

엔드밀링에 상당하는 등가의 경사절삭 모델을 설정하기 위해서는 엔드밀링 공정의 기하학에 대한 이해가 필요하다.

엔드밀링 절삭가공시 실제 대부분의 절삭은 옆날에 의해 이루어지며, 절삭력해석도 옆날의 작용에 국한하고 있다.^(3~5)

Fig. 1은 4날 엔드밀에 의한 상향 엔드밀링 절삭시 공구와 피삭재의 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 그림에서와 같이 피삭재에 홈가공을 하여 밀날의 작용을 배제하였으며, 엔드밀 하단부로부터 1mm 떨어진 위치로부터 절삭이 이루어지도록 하였다. 이 경우 엔드밀은 축방향으로 b, 반경방향으로 a의 절삭깊이를 가지며, 옆날이 축 방향에 대하여 β만큼의 헬릭스각을 이룬다.

Fig. 2는 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구가 절삭날당 S만큼 이송하면서 회전할 때의 공구와 피삭재 사이의 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 φ는 기준 위치로부터 공구의 회전각을 나타내고, h는 회전각 φ일 때 절삭날 경로 사이의 반경방향 길이차로서 절삭공구의 반경방향 이송량을 의미한다. h는 기준위치의 0에서부터 점점 증가하여 최대값 h_{max}에 이른 후 다시 급격히 감소하여 0에 이른다.

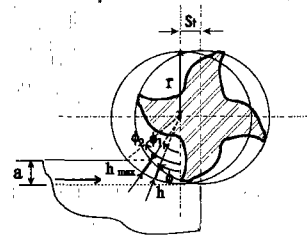


Fig. 2 Cutting model of up end milling

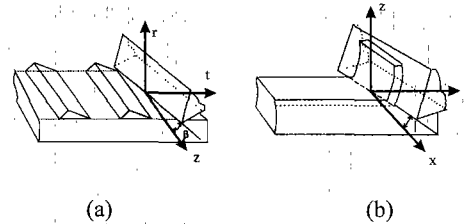


Fig. 3 Schematics of (a) spread end milling and (b) oblique cutting models

식 (1)은 h_{max}를, 식 (2)는 그 때의 회전각 φ₁을 나타내며, 식 (3)은 한 날이 회전각 0으로 부터 시작하여 피삭재에서 벗어날 때의 회전각 φ₂를 나타내고 있다. 여기서 r은 공구반경을 나타낸다.

$$h_{max} = r - \sqrt{(r-a)^2 + [\sqrt{r^2 - (r-a)^2} - s_t]^2} \quad (1)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r-a}{r-h_{max}}\right) \quad (2)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{r-a}{r}\right) \quad (3)$$

2.2 등가 경사절삭 모델

2.2.1 절삭 조건의 동일화

엔드밀링을 경사절삭에 대응시키기 위해서는 엔드밀링과 경사절삭의 비교를 통해 엔드밀링의 가공조건을 경사절삭의 조건으로 동일화시키는 과정이 필요하다.

Fig. 3(a)는 엔드밀링에서의 미변형칩을 공구의 진행방향으로 전개시켜 놓았을 경우의 절삭모델을 나타낸 것이다.

Fig. 3(b)는, 경사절삭 모델⁽⁶⁾을 나타내고 있다. 경사절삭은 절삭날이 공구의 진행방향과 수직인 축 x와 기울임각 (inclination angle), i를 이루며 진행되는 절삭방식이다. Fig. 3(a)와 (b)를 비교해 보면 공구의 진행방향에 대해 전개된 엔드밀링

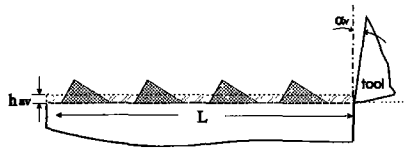


Fig. 4 Equivalent oblique cutting model

모델에서도 날이 공구의 진행방향에 수직인 축z에 대해 헬릭스각 β 만큼 기울어져 있으며 이것은 경사절삭에 있어 기울임각 i 에 해당한다.

그러나 전개된 엔드밀링 모델에서는 Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 반경방향 절삭깊이 a 가 공구의 반경보다 작은 경우 한날이 가공을 마친후 다음 날이 가공을 시작하기 전까지 일정한 간격이 존재하므로 단속절삭이 이루어진다. 그러므로 단속절삭인 엔드밀링을 연속절삭인 경사절삭에 대응시키기 위해서는 변화되는 절삭깊이(미변형칩두께)와 절삭길이를 평균 미변형칩의 두께⁽⁵⁾ 및 절삭길이의 개념을 도입하여 일정한 절삭깊이(미변형칩두께)와 연속적인 절삭길이를 변환하는 것이 필요하다.

전 구간에 대한 평균 절삭깊이(미변형칩두께)를 결정하기 위해 공작물 길이인 w 와 반경방향 절삭깊이 a 의 곱으로 주어지는 공작물의 측면면적을 공구의 총 전개길이 L 로 나누어, 공구의 반경방향 이송량의 평균값인 h_{av} 를 평균 절삭깊이로 결정하였다. L 은 식 (4)로부터 구할 수 있으며, h_{av} 는 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$L = 2\pi \frac{w}{S_t z} \quad (4)$$

$$h_{av} = \frac{aw}{L} \quad (5)$$

Fig. 4는 공구의 진행방향으로 전개된 미변형칩의 총 단면적과 등가인 면적을 평균 절삭깊이 h_{av} 와 총 전개길이 L 로 변환시킨 등가 경사절삭 모델을 나타낸 것이다.

L 과 h_{av} 가 결정되면, 엔드밀링 공정에 상당하는 일정한 절삭깊이로 연속절삭이 이루어지는 경사절삭으로의 변환이 가능하게 된다. Table 1에는 엔드밀링과 경사절삭의 입력항을 나타내었다.

경사절삭 모델에서는 Table 1에 나타낸 입력항에 의해 칩 생성시 전단면상에서의 전단특성과

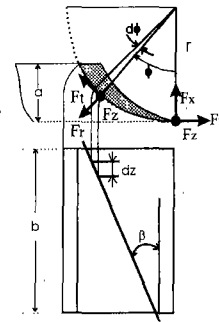


Fig. 5 Coordinate system for up end-milling and cutting force components

Table 1 Input items of cutting systems

End milling	Oblique cutting
Radial depth of cut, a	Depth of cut, t
Axial depth of cut, b	
Cutting length, w	Width of cut, b
Cutting velocity, V	Cutting velocity, V
Radial rake angle, α_r	Normal rake angle, α_n
Helix angle, β	
Number of tooth, z	Inclination angle, i
Feed per tooth, S_t	

공구면상의 마찰특성을 분리하여 해석할 수 있다. 이를 위해서는 주어진 엔드밀링 가공조건을 경사절삭의 가공조건들과 연관지어 생각할 필요가 있다.

a 와 w 에 의해 결정된 공구의 반경방향 이송량의 평균값 h_{av} 는 경사절삭의 절삭깊이 t 에 해당되며, 축방향 절삭깊이와 절삭속도, 헬릭스각은 각각 경사절삭에서의 절삭폭, 절삭속도, 기울임각과 같은 의미를 가진다. 그리고 엔드밀 공구의 반경방향 경사각 α_r 은 경사절삭에 있어 속도경사각 α_v 에 해당하며, 경사절삭에 있어 공구의 고유 경사각인 수직경사각 α_n 과 속도경사각 α_v 사이에는 식 (6)의 관계가 성립한다.⁽⁶⁾

$$\tan \alpha_n = \cos i \tan \alpha_v \quad (6)$$

2.2.2 절삭력의 결정

Fig. 5는 엔드밀링 절삭시 한 날이 작용할 때

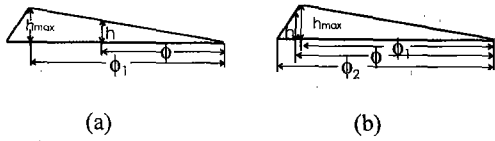


Fig. 6 Spread undeformed chip side section

측정되는 절삭력 성분 F_x, F_y, F_z 를 나타내고 있다. 그러나 Fig. 3(a)와 같이 미변형칩을 공구의 진행방향에 대하여 전개하였을 경우 공구의 진행방향의 힘(경사절삭 모델에서의 주분력 F_y)은 접선방향의 힘 F_t 에 해당되며, 경사절삭 모델에서의 이송분력 F_z 는 엔드밀링의 반경방향 힘의 성분 F_r 에 해당된다. 또한 Fig. 5에서의 F_z 는 경사절삭 모델에서의 배분력 F_x 에 해당된다. 따라서 측정 절삭력 성분 F_x, F_y 를 식 (7)과 같이 좌표변환 시킴으로써 접선방향의 힘 F_t , 반경방향의 힘 F_r 을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & -\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (8)은 식 (7)을 역변환 시킨 것이다.

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & -\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \end{bmatrix} \quad (8)$$

연속적으로 변화하는 미변형칩의 반경방향의 이송량 h 와 미소절삭폭 dz 의 곱으로 표현되는 순간 미소절삭면적과 비절삭저항을 이용하여 접선방향 및 반경방향의 미소절삭력 성분 dF_x, dF_t 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dF_r &= k_r dA = k_r h dz \\ dF_t &= k_t dA = k_t h dz \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 반경방향의 이송량 h 의 결정을 위해 미변형칩의 측단면을 Fig. 6과 같이 실제 미변형 칩의 면적과 등가인 삼각형으로 가정하였다.

반경방향 이송량 h 는 Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 날이 기준 위치로부터 ϕ_1 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식 (10)으로, Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 ϕ_1 에서 ϕ_2 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식 (11)과 같은 비례식이 성립한다. 그리고 미소 절

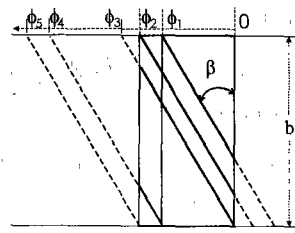


Fig. 7 Cutting edge length depends on cutting edge position

삭폭 dz 는 식 (12)로 표시할 수 있다.

$$h = \frac{h_{max}}{\phi_1} \phi \quad (10)$$

$$h = \frac{h_{max} (\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \quad (11)$$

$$dz = \frac{r}{\tan\beta} d\phi \quad (12)$$

Fig. 7은 임의의 각 ϕ 에서 날의 위치에 따른 작용날의 길이를 $[0, \phi_1], [\phi_1, \phi_2], [\phi_2, \phi_3], [\phi_3, \phi_4], [\phi_4, \phi_5]$ 의 다섯 구간으로 분류한 것이다.

ϕ_3 는 식 (13)으로 표시할 수 있으며, ϕ_4 는 ϕ_3 와 ϕ_1 의 합, ϕ_5 는 ϕ_3 와 ϕ_2 의 합과 같다.

$$\phi_3 = \frac{b \tan\beta}{r} \quad (13)$$

식 (10), (11), (12)를 식 (9)에 대입한 후 다시 식 (8)에 대입하면 날의 위치에 따른 절삭력을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$[0, \phi_1]$ 구간

$$F_x = -k_r \int_0^\phi \cos\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi + k_t \int_0^\phi \sin\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi$$

$$F_y = -k_r \int_0^\phi \sin\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi - k_t \int_0^\phi \cos\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi$$

여기서, $\frac{h_{max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} = F_1$ 이라고 하면,

$$\begin{aligned} F_x &= (-k_r \int_0^\phi \cos\phi d\phi + k_t \int_0^\phi \sin\phi d\phi) F_1 \\ &= [-k_r (\sin\phi + \cos\phi - 1) + k_t (-\cos\phi + \sin\phi)] F_1 \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} F_y &= (-k_r \int_0^\phi \sin\phi d\phi - k_t \int_0^\phi \cos\phi d\phi) F_1 \\ &= [-k_r (-\cos\phi + \sin\phi) - k_t (\sin\phi + \cos\phi - 1)] F_1 \end{aligned}$$

[ϕ_1, ϕ_2] 구간

$$F_x = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_1} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) F_1 d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_1} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) F_1 d\phi$$

여기서, $\frac{h_{\max}}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} = F_2$ 라고 하면

$$F_x = [-k_r \phi_2 A + k_t B + k_r \phi_2 C - k_t D] F_2 + [-k_r E + k_t F] F_1 \quad (14b)$$

$$F_y = [-k_r \phi_2 C + k_t D - k_r \phi_2 A + k_t B] F_2 + [-k_r F - k_t E] F_1$$

$$A = \sin \phi_2 - \sin \phi_1$$

$$B = \sin \phi_2 \cos \phi_1 - \sin \phi_1 \cos \phi_2$$

$$C = -\cos \phi_2 + \cos \phi_1$$

$$D = -\cos \phi_2 \cos \phi_1 + \sin \phi_2 - \sin \phi_1$$

$$E = \sin \phi_1 \phi_1 + \cos \phi_1 - 1$$

$$F = -\cos \phi_1 \phi_1 + \sin \phi_1$$

[ϕ_2, ϕ_3] 구간

$$F_x = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) (\phi_2 - \phi) F_2 d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_1} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) F_1 d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) (\phi_2 - \phi) F_2 d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_1} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) F_1 d\phi$$

$$F_x = [-k_r \phi_2 A' + k_t B' + k_r \phi_2 C' - k_t D'] F_2 + [-k_r E' + k_t F'] F_1 \quad (14c)$$

$$F_y = [-k_r C' \phi_2 + k_t D' - k_r \phi_2 A' + k_t B'] F_2 + [-k_r F' - k_t E'] F_1$$

$$A' = \sin \phi_2 - \sin \phi_1$$

$$B' = \sin \phi_2 \cos \phi_1 - \sin \phi_1 \cos \phi_2$$

$$C' = -\cos \phi_2 + \cos \phi_1$$

$$D' = -\cos \phi_2 \cos \phi_1 + \sin \phi_2 - \sin \phi_1$$

[ϕ_3, ϕ_4] 구간

$$F_x = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) (\phi_2 - \phi) F_2 d\phi$$

$$+ \int_{\phi_2}^{\phi_3} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) F_1 d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) (\phi_2 - \phi) F_2 d\phi$$

$$+ \int_{\phi_2}^{\phi_3} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) F_1 d\phi$$

$$F_x = [-k_r \phi_2 A'' + k_t B'' + k_r \phi_2 C'' - k_t D''] F_2 + [-k_r E'' + k_t F''] F_1 \quad (14d)$$

$$F_y = [-k_r C'' \phi_2 + k_t D'' - k_r \phi_2 A'' + k_t B''] F_2 + [-k_r F'' - k_t E''] F_1$$

$$E'' = \sin \phi_1 \phi_1 - \sin(\phi_2 - \phi_3)(\phi_2 - \phi_3)$$

$$+ \cos \phi_1 - \cos(\phi_2 - \phi_3)$$

$$F'' = -\cos \phi_1 \phi_1 + \cos(\phi_2 - \phi_3)(\phi_2 - \phi_3)$$

$$+ \sin \phi_1 - \sin(\phi_2 - \phi_3)$$

[ϕ_4, ϕ_5] 구간

$$F_x = \int_{\phi_2}^{\phi_3} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) (\phi_2 - \phi) F_2 d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_2}^{\phi_3} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) (\phi_2 - \phi) F_2 d\phi$$

$$F_x = [-k_r \phi_2 A''' + k_t B''' + k_r \phi_2 C''' - k_t D'''] F_2$$

$$F_y = [-k_r \phi_2 C''' + k_t D''' - k_r \phi_2 A''' + k_t B'''] F_2$$

$$A''' = \sin \phi_2 - \sin(\phi_2 - \phi_3)$$

$$B''' = \sin \phi_2 \cos \phi_2 - \sin(\phi_2 - \phi_3)(\phi_2 - \phi_3)$$

$$+ \cos \phi_2 - \cos(\phi_2 - \phi_3)$$

$$C''' = -\cos \phi_2 + \cos(\phi_2 - \phi_3)$$

$$D''' = -\cos \phi_2 \cos \phi_2 + \cos(\phi_2 - \phi_3)(\phi_2 - \phi_3)$$

$$+ \sin \phi_2 - \sin(\phi_2 - \phi_3)$$

공구 동력계로 측정된 절삭력을 위의 식들에 대입함으로써 비절삭저항 k_r, k_t 를 결정할 수가 있으며, 이렇게 결정된 비절삭저항을 식 (15)에 대입함으로써 접선방향과 반경방향의 절삭력을 구할 수 있다.

$$F_t = k_r A$$

$$F_r = k_t A \quad (15)$$

2.3 경사절삭

경사절삭에서는 Table 1에 나타낸 입력항과 측정 절삭력, 그리고 생성된 칩의 두께측정에 의해 칩-공구경사면상의 마찰과 전단면상의 특성을 나타내는 인자들을 구할 수 있다.

2.3.1 칩-공구 마찰특성

공구경사면에 평행한 방향의 힘인 마찰력 F_c 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = \{ (F_x \cos i + F_y \sin i)^2 + (F_x \sin \alpha_n \sin i - F_y \sin \alpha_n \cos i + F_z \cos \alpha_n)^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

칩흐름방향과 공구면상의 힘 F_c 가 작용하는 방향이 이루는 각을 ρ_c 라 하면 칩흐름방향으로 작용하는 마찰력성분은 $F_c \cos \rho_c$ 가 된다. 따라서 비마찰에너지 u_f 는 식 (17)과 같이 구할 수 있다. 여기서, V_c 는 칩의 마찰속도이다.

$$u_f = \frac{F_c \cos \rho_c V_c}{btV} = \frac{F_c \cos \rho_c \cos i \sin \phi_n}{bt \cos \eta_c \cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (17)$$

2.3.2 전단특성

전단면상에 평행한 힘인 전단력 F_s 는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \{ (F_x \cos i + F_y \sin i)^2 + (-F_x \sin \phi_n \sin i + F_y \sin \phi_n \cos i + F_z \sin \phi_n)^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

여기서 ϕ_n 은 수직전단각으로, 식 (19)와 같이 나타낼 수 있으며, 전단변형률 γ 는 식 (20)과 같

이 주어진다.

$$\tan \phi_n = \frac{\frac{t}{t_c} \cos \alpha_n}{1 - \frac{t}{t_c} \sin \alpha_n} \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{\cot \phi_n + \tan(\phi_n - \alpha_n)}{\cos \eta_s} = \frac{\cos \alpha_n}{\sin \phi_n \cos(\phi_n - \alpha_n) \cos \eta_s} \quad (20)$$

여기서 η_s 는 전단흐름각으로, 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \eta_s = \frac{\tan i \cos(\phi_n - \alpha_n) - \tan \eta_c \sin \phi_n}{\cos \alpha_n} \quad (21)$$

식 (21)의 η_c 는 칩흐름각(chip flow angle)으로 본 논문에서는 Stabler의 칩흐름법칙⁽⁷⁾에 의해 기울임각 i 와 같다고 가정하였다. 전단면에 작용하는 전단응력 τ 는 식 (22)에 의해 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{F_s}{bt} \sin \phi_n \cos i \cos \rho_s \quad (22)$$

전단방향과 전단면상의 힘 F_s 가 이루는 각이 ρ_s 일 때, 전단면상의 전단흐름방향으로 작용하는 전단력은 $F_s \cos \rho_s$ 이므로 비전단에너지 u_s 는 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 V_s 는 전단속도이다.

$$u_s = \frac{F_s \cos \rho_s V_s}{btV} = \frac{F_s \cos \rho_s \cos i \cos \alpha_n}{bt \cos \eta_s \cos(\phi_n - \alpha_n)} = \tau \gamma \quad (23)$$

식 (23)에서 보는 바와 같이 경사절삭시의 비전단에너지 u_s 는 2차원 절삭⁽⁸⁾에서와 같이 전단응력 τ 와 전단변형률 γ 의 곱으로 나타내진다.

2.3.3 비절삭에너지

경사절삭시에도 단위 체적당 작용하는 절삭에너지 즉, 비절삭에너지 u 는 2차원절삭⁽⁸⁾에서와 같이 비마찰에너지 u_f 와 비전단에너지 u_s 의 합으로 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$u = u_f + u_s = \frac{F_y V}{btV} = \frac{F_y}{bt} \quad (24)$$

Table 2 Cutting conditions

Radial depth of cut, a (mm)	1.5
Axial depth of cut, b (mm)	12
Cutting velocity, V (m/min)	90
Radial rake angle, α_r (°)	8
Helix angle, β (°)	30, 40, 50
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, S _t (mm)	0.06

3. 절삭 실험

절삭실험에 사용하기 위하여 지름 8mm, 날수 4개이고, 헬릭스각이 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀 공구를 제작하였으며 공구의 성능을 개선하기 위하여 TiAlN 코팅을 하였다. 피삭재로는 기계구조용강 SM45C를 최대회전수 6000rpm, 주축 동력이 20마력인 Yamage Techno사의 머시닝 센터를 사용하여 가공하였다. 절삭실험조건은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

절삭력성분을 구하기위해서 공구동력계(Kistler, 9273)에서 나오는 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 A/D변환기(Data translation, DT3831-G)로 보내어 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

절삭실험시 공작기계 주축의 회전속도는 3581 rpm(절삭속도 90m/min)이었으며, 절삭력 성분은 공구동력계로부터 샘플링 주파수 2048Hz로 획득되었다. 따라서 샘플링되는 시간간격은 0.4883ms, 이에 대응하는 공구회전각은 10.49°이며 공구 1회 전당 획득되는 데이터의 수는 대략 35개이었다.

절삭실험시 얻어진 칩의 두께측정을 위하여 공구현미경(Mitutoyo, TF-510FW)을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 공구에 의한 절삭 실험에서 생성된 칩의 최대두께 t_{c-max} 와 측정된 절삭력 성분 F_x , F_y 및 F_z 의 평균값을 Table 3에 나타내었다.

Table 4는 측정절삭력성분을 식 (14a)~(14e)

Table 3 Measured items

	30°	40°	50°
$t_{c,max}$ (mm)	0.141	0.132	0.131
F_x (N)	13.4	8.9	15.3
F_y (N)	284.5	241.7	256.3
F_z (N)	47.1	66.2	100.5

Table 4 Calculated items

	30°	40°	50°
k_t (N/mm ²)	799	727	780
k_r (N/mm ²)	1384	1265	1460

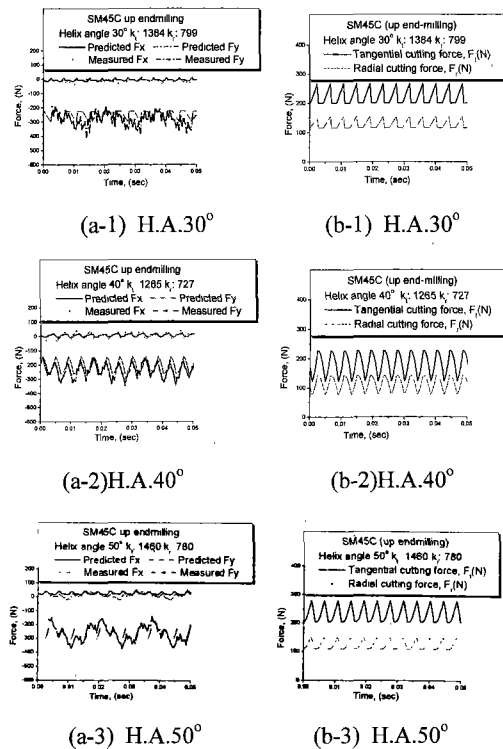


Fig. 8 Measured and predicted forces along x-y direction (a-1~3) and force components along the tangential and radial direction (b-1~3)

에 대입하여 계산된 반경방향 및 접선방향의 비절삭저항 k_r 및 k_t 의 평균값을 나타낸 것이다.

k_r 및 k_t 를 결정함에 있어 절삭력 F_x 및 F_y 가 측정된 각 순간의 절삭단면적의 크기를 모르기 때문에 임의의 위치에서의 측정 절삭력값을 임의의

위치의 절삭단면적에 대입하여 식 (14a)~ (14e)를 이용하여 비절삭저항값을 계산한 다음 상기한 임의의 위치로부터 0.4883ms (공구회전각으로는 10.49°) 후의 측정 절삭력값을 동일한 위치의 절삭단면적에 대입하여 같은 방법으로 비절삭저항을 구한다. 이와 같이 동일한 위치의 절삭단면적에 대한 비절삭저항값을 공구 1회전시 날당 회전각인 90°구간에 대해 10.49°(시간으로 0.4883ms)간격으로 구하면 대략 9개 그룹의 비절삭저항값을 구할 수 있다.

본 논문에서는 이들 그룹중 가장 작은 표준편차를 나타내는 비절삭저항값을 해당 순간의 비절삭저항값으로 결정하였다.

이상적인 경우 k_r 및 k_t 값은 절삭이 이루어지는 동안 일정한 값으로 나타나는 것이지만 본 논문에서는 헬릭스각 30°, 40° 및 50°에 대해 k_t 의 경우 각각 60.7, 74.5 및 68.7MPa, k_r 의 경우 각각 67.3, 88.9 및 95.6MPa의 최소 표준편차를 나타내었다.

이는 절삭에서의 치수효과⁽¹⁰⁾ 및 절삭력성분 자체의 편차에 기인한다고 판단된다.

비절삭저항이 결정되면 공구의 위상에 따른 미변형칩단면적의 변화에 의해 절삭력을 예측할 수 있으며 이를 실제 측정된 절삭력과 함께 나타낸 것이 Fig. 8(a-1~3)이다. 이와 함께 Fig. 8(b-1~3)에는 미변형칩의 단면적과 비절삭저항의 곱으로 주어지는 반경방향의 힘 F_r , 접선방향 힘 F_t 가 시간에 따라 변화되는 경향을 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 8(b-1~3)에서 보는 바와 같이 절삭시간에 따른 F_r 및 F_t 의 변동진폭은 헬릭스각 40°의 경우가 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 결과는 주어진 절삭조건하에서 절삭시간에 따라 절삭되는 미변형칩단면적의 변화에 기인한 것으로 각 순간의 절삭단면적의 크기가 헬릭스각 뿐만 아니라 절삭날 수, 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이 및 날당 이송등의 복합작용에 의해 결정되기 때문이다.

한편 Fig. 8(b-1~3)으로부터 반경방향의 힘 F_r 과 접선방향의 힘 F_t 의 평균값을 구할 수 있으며 이렇게 구한 값들을 Table 5에 나타내었다.

Table 5의 힘들을 Fig. 3(b)의 경사절삭 모델에 있어 동일한 방향의 힘에 대입함으로써 Table 6에 나타낸 바와 같은 전단특성, 칩-공구 마찰특성 및 절삭특성을 나타내는 인자들을 얻을 수 있다.

표에서 보는 바와 같이 비절삭에너지 중 전단과정에 소모된 에너지는 약 70~73% 정도이며, 칩-공구마찰과정에서는 약 27~30%정도가 소모되었다.

Table 5 Average radial and tangential force

	30°	40°	50°
Tangential force, F_t (N)	220.9	202.0	255.1
Radial force, F_r (N)	127.5	116.1	124.6
Axial force, F_z (N)	47.1	66.2	100.5

Table 6 Output value

	30°	40°	50°
Friction force, F_f (N)	167.7	157.1	184.1
Shear force, F_s (N)	172.0	162.1	200.6
Shear strain, γ	3.126	3.153	3.460
Shear stress, τ (Mpa)	300.2	264.4	275.7
Specific friction energy, u_f (Mpa)	346.9	341.5	402.0
Specific shear energy, u_s (Mpa)	938.4	833.7	953.9
Specific cutting energy, u_c (Mpa)	1285.3	1175.2	1355.9
u_f/u_c	0.270	0.290	0.296
u_s/u_c	0.730	0.710	0.704

Shaw⁽⁶⁾는 기울임각 0° (2차원절삭), 15° 및 30° 인 경사절삭 실험을 통하여 기울임각이 증가함에 따라 진단변형률과 비절삭에너지가 감소함을 보인 바 있으나, Table 6에 나타난 실험 결과에서는 기울임각에 해당하는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 비절삭에너지가 감소하였지만, 헬릭스각이 40°에서 50°로 증가함에 따라 비절삭에너지가 다시 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 상향 엔드밀링 공정에 상당하는 등가의 경사절삭 모델을 설정하였다. 이를 통해 진단특성 및 칩-공구 마찰특성을 분리하여 해석할 수 있었다.

피삭재로 기계구조용강 SM45C를 헬릭스각이 30°, 40° 및 50°인 날수 4개의 초경엔드밀 공구를 제작하여 실험한 결과 평균적으로 절삭에너지 중에서 진단과정에서 약 72%가 소모되었으며, 칩-공구 마찰과정에서는 약 28%가 소모된 것으로 나타났으며 이러한 실험해석 결과는 2차원 절삭 실험,^(8,11) 경사절삭실험⁽⁶⁾ 및 외경선삭실험⁽¹²⁾의 해

석결과와 일치하는 경향을 나타내고 있다.

비절삭에너지는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

- (1) 이기영, 강명창, 김정석, 1996, “엔드밀 가공시 동적절삭력 모델에 의한 표면 형상 예측,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 605~609.
- (2) Martellotti, M.E., 1941, “An Analysis of the Milling Process,” *Trans. of ASME*, Vol. 63, pp. 677~700.
- (3) Thusty, J. and Macneil, P., 1975, “Dynamics of Cutting Forces in End Milling,” *Annals of CIRP*, Vol. 24, No. 1, pp. 21~25.
- (4) Fussell, B. K. and Srinivasan, K., 1989, “An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions,” *Trans of ASME*, Vol. 111, pp. 27~36.
- (5) Beddoes, J. and Bibby, M. J., 1999, “Principles of Metal Manufacturing Processes,” Arnold Press, New York, pp. 199~202.
- (6) Shaw, M.C., 1984, “Metal Cutting Principles,” Clarendon Press, Oxford, pp. 428~439.
- (7) Stabler, G.V., 1964, “The Chip Flow Law and its Consequences,” *Pro. 5th. Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., Birmingham*, pp. 243~251.
- (8) Merchant, M.E., 1945, “Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip,” *J. of Applied Physics*, Vol. 16, pp. 267~275.
- (9) Lee, Y.M., Choi, W.S. and Song, T.S., 2000, “Analysis of 3-D Cutting Process with Single Point Tool,” *Int. J. KSPE*, vol. 1, No. 1, pp. 15~21.
- (10) Shaw, M.C., and Finnie, I., 1955, “The Shear Stress in Metal Cutting,” *Trans. of the ASME*, Vol. 77, pp. 115~125.
- (11) 이영문, 송지복, 1988, “2차원 절삭시 칩-공구 마찰상태에 따른 진단각 변화,” 대한기계학회논문집, 제12, 제2호, pp. 252~261.
- (12) 이영문, 최원식, 송태성, 박태준, 장은실, 1999, “3차원 절삭시 칩-공구마찰 및 진단특성 해석,” 한국정밀공학회지, 제16권 제6호, pp. 190~196.