

하향엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭특성변화

이영문*, 장승일+, 서민교**

Cutting Characteristics in Down-End Milling with Different Helix Angles

Y .M. Lee*, S .I Chang⁺, M .K. Seo^{**}

Abstract

In end milling process, undeformed chip thickness and cutting force vary periodically with phase change of the tool. Recently, a model has been proposed to simulate the shear and friction characteristics of an up-end milling process in terms of the equivalent oblique cutting to this. In the current study, the varying undeformed chip thickness and the cutting forces in a down-end milling process have been replaced with the equivalent ones of oblique cutting.

And, the down-end milling characteristics of SM45C has been compared with that of the up-end milling previously presented with different helix angles.

Key Words : Down-end milling (하향 엔드밀링), Equivalent oblique cutting (등가경사절삭), Size effect (치수효과), Undeformed chip section area (미변형칩 단면적), Specific cutting energy (비절삭에너지)

1. 서론

엔드밀링 절삭공정은 복잡한 형상의 제품가공시 높은 생산성과 고정밀도를 얻을 수 있어 항공기 부재 가공 및 자동차 산업에 필요한 금형제작 등 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되고 있다. 엔드밀링공정은 공구가 회전운동을 하는 동시에 공작물이 공구의 축방향에 수직하게 이송되면서 이루어지는 공정으로 일정한 절삭깊이로 진행되는 연속 절삭 방식과는 달리 미변형 칩두께(undeformed chip thickness)가 변화하며 이에 따라 절삭력도 주기적으로 변하는 단속절삭이며, 2개 이상의 절삭날이 동시에 절삭작용을 하기 때문에 실제적인 해석이 간단하지 않다.

또한, 공구와 공작물의 상대운동에 따라 상향과 하향 절삭방식으로 나눌 수 있다.

Martellotti^(1,2)는 공구와 피삭재의 기하학적 및 운동학적인 관계에 대한 고찰을 통하여 상향 및 하향 밀링공정에서의 공구경로에 따른 미변형 칩두께 변화에 대한 이론적인 관계를 정립하였다. Tlusty와 Macneil⁽³⁾은 상향 엔드밀링 공정에서 공구의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따라 변하는 미변형 칩두께 사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형 칩 단면적의 곱으로 나타내는 절삭력 예측 모델을 제시하였고, 실제 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토하였다.

* 이영문, 경북대학교 기계공학부 (ymlee@knu.ac.kr)
주소: 702-701 대구시 북구 산격동 1370
+ 경북대 기계공학부
++ 경북대 대학원 기계공학과

금속절삭시 칩 생성은 전단역이라 불리는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다. 최근 추⁽⁴⁾등은 단속절삭 공정의 전단 및 마찰 특성을 분석하기 위해 단속 절삭 공정에 상당하는 등가경사절삭모형을 제시하였고, 실험적으로 검증한 바 있다.

따라서, 본 논문에서는 하향 엔드밀링공정에 상당하는 등가경사절삭모형을 설정하여 헬릭스각에 따른 하향 엔드밀링공정의 전단특성 및 칩-공구 마찰특성을 해석하였으며, 선행연구⁽⁵⁾에서 수행한 상향엔드밀링시 절삭특성과 비교 분석하였다.

2. 하향 엔드밀링 모델

2.1 미변형칩 두께

Fig. 1(a)은 하향 엔드밀링 절삭시 공구와 피삭재의 관계를 나타낸 것으로 엔드밀은 축방향으로 b , 반경방향으로 a 의 절삭깊이를 가지며, 옆날이 축방향에 대하여 β 만큼의 헬릭스각을 이룬다.

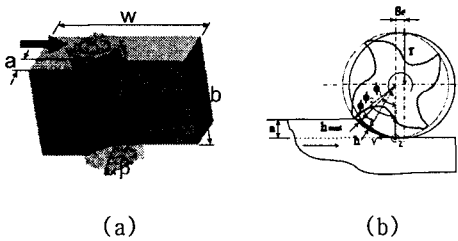


Fig.1 Schematic of down end-milling process

Fig. 1(b)는 4날 엔드밀에 의한 엔드밀링 절삭시 공작물의 이송을 대신하여 공구가 절삭날당 S_t 만큼 이송하면서 회전할 때의 공구축에 수직한 단면을 나타낸 것이다. 하향 절삭시 미변형칩두께, h 는 절삭을 개시하여 급격하게 증가하여 최대치, h_{max} 에 이른 후, 서서히 감소하여 0에 이른다.

이때 절삭날 경로상의 최대 미변형 칩두께 h_{max} 는 식(1)로, 그 때의 회전각 ϕ_1 은 식(2)로, 한 날이 회전각 0으로 부터 시작하여 피삭재에서 벗

어날 때까지의 회전각 ϕ_2 는 식(3)으로 나타낼 수 있다. 여기서 r 은 공구반경, a 는 반경방향 절삭깊이, S_t 는 날당 이송량이다.

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

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

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

2.2 절삭력의 결정

Fig. 2는 하향 엔드밀링시 절삭력성분의 관계를 나타낸 것으로 F_x 및 F_y 는 공구동력계에서 측정된 힘이며 F_r 및 F_t 는 임의의 순간에서의 반경방향과 접선방향 절삭력성분을 나타낸 것이다.

미소 절삭력성분 dF_x 및 dF_y 와 접선방향의 미소 절삭력 dF_t , 반경방향의 dF_r 사이에는 식(4)의 좌표변환 관계가 성립한다

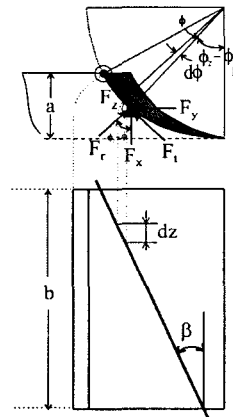


Fig.2 Coordinate system for cutting force components

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi) & \sin(\phi_2 - \phi) & 0 \\ -\sin(\phi_2 - \phi) & \cos(\phi_2 - \phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

미소 반경방향 및 접선방향 절삭력성분은 비절삭력과 미소단면적의 곱으로 표시되며 반경방향과 접선방향의 미소 절삭력성분은 식(5)와 같이

나타낼 수 있다. 반경방향의 미소 절삭력성분은 반경방향 비절삭력 k_r 에 미소 단면적 dA 의 곱으로 표시할 수 있고, 접선방향의 미소절삭력 dF_t 는 접선방향 비절삭력 k_t 에 미소단면적 dA 의 곱으로 표시할 수 있다. 또한 미소절삭폭 d_z 는 식(6)으로 표시할 수 있다.

$$dF_r = k_r dA = k_r h dz \quad (5)$$

$$dF_t = k_t dA = k_t h dz$$

$$dz = \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (6)$$

절삭날 경로에 따라 달라지는 미변형 칩두께 h 의 결정을 위하여 Fig. 2의 음영부의 실제 절삭 단면적을 밀변이 직선인 등가의 면적으로 Fig. 3(a)에 나타내었다. 하향 절삭시 기준 위치로부터 $\phi_2 - \phi_1$ 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때 ($0 < \phi < \phi_2 - \phi_1$)는 식(7)과 같이

$$h = r \left[1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right] \quad (7)$$

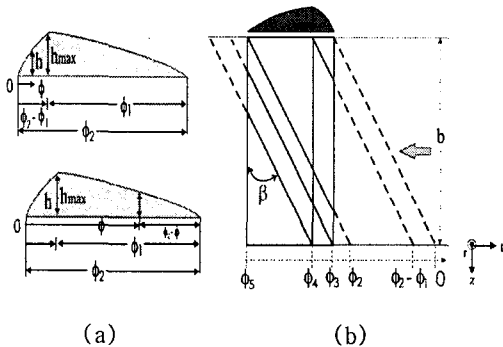


Fig.3 (a) Spread underformed chip cross-sections. (b) relative position of cutting edge in down-end milling.

$\phi_2 - \phi_1$ 에서 ϕ_2 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때 ($\phi_2 - \phi_1 < \phi < \phi_2$)는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. $[\phi_2 - \phi_1, \phi_2]$, $[\phi_2, \phi_3]$, $[\phi_3, \phi_4]$ 및 $[\phi_4, \phi_5]$ 로 각각 다섯 구간으로 구분할 수 있다.

$$h = s_t r \sin(\phi_2 - \phi) \quad (8)$$

Fig. 3(b)는 임의의 순간에서 날의 위치를 나타낸 것으로 하향 엔드밀링 절삭시 $[0, \phi_2 - \phi_1]$, 여기서, ϕ_3 , ϕ_4 와 ϕ_5 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_3 = \frac{b \tan \beta}{r}, \phi_4 = \phi_3 + (\phi_2 - \phi_1) \cos \beta = \phi_3 + \phi_2 \quad (9)$$

식(6), (7) 및(8)을 식(5)에 대입한 후 식(4)와 결합시키면 하향 절삭시 날의 위치에 따른 절삭력을 식(10-1)~(10-5)와 같이 구할 수 있다.

$$[0, \phi_2 - \phi_1] \text{interval}$$

$$F_x = \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (10-1)$$

$$[\phi_2 - \phi_1, \phi_2] \text{interval}$$

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

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

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

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (10-2)$$

$$[\phi_2, \phi_3] \text{interval}$$

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

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

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

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (10-3)$$

$$[\phi_3, \phi_4] \text{interval}$$

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

$$+ \int_{\phi_3}^{\phi_4} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

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

$$+ \int_{\phi_3}^{\phi_4} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (10-4)$$

$[\phi_4, \phi_5]$ interval

$$F_x = \int_{\phi_4}^{\phi_5} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_f \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_4}^{\phi_5} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_f \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

(10-5)

2.3 등가경사절삭모델

엔드밀링에 상당하는 등가의 경사절삭모델을 설정하기 위해서는 엔드밀링과 경사절삭을 비교 함으로써 엔드밀링의 가공조건을 경사절삭모델의 가공조건과 동일화시키는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 **이 등**이⁽⁵⁾ 제시한 4날 상향 엔드밀링 모델을 하향엔드밀링 모델에 적용하여 하향 엔드밀링의 경사절삭모델을 설정하였다.

Fig. 4는 엔드밀링에서의 미변형칩을 공구의 진행방향으로 전개시켜 놓았을 경우의 하향엔드밀링에 상당하는 경사절삭모델을 나타낸 것이다.

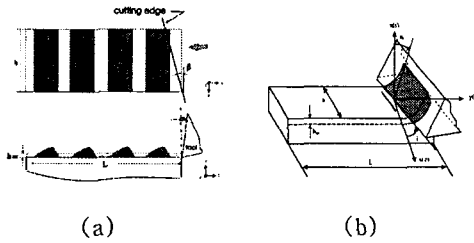


Fig.4 (a) Spread down-end milling model
(b) Oblique cutting model in down-end milling

3. 절삭실험

절삭실험에 사용한 공구는 날수 4개, 지름이 8mm, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경 엔드밀을 사용하였으며, 피삭재는 기계구조용강 SM45C를 머시닝 센터를 사용하여 가공하였다.

절삭실험 조건은 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1 Cutting conditions

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

Fig. 5은 엔드밀링 실험의 개략도를 나타낸 것으로 절삭력 성분을 구하기 위해서 공구동력계 (Kistler, 9273)로부터 측정된 절삭력 신호를 전하증폭기를 통해 증폭시키고, A/D변환기를 거쳐 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지를 사용하여 분석하였다. 엔드밀링시 회수된 칩은 공구현미경(Mitutoyo, TF-510FW)을 사용하여 두께를 측정하였다.

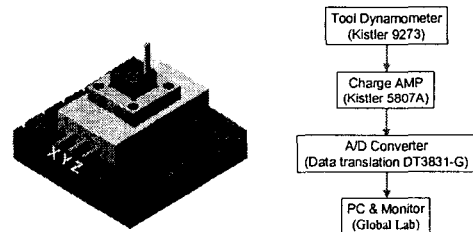


Fig.5 Schematic of cutting experiment

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭력의 측정

절삭실험에서 얻어진 절삭력성분은 Fig. 6과 같고 측정된 절삭력 F_x , F_y 및 F_z 가 헬릭스각이 증가 할수록 절삭력도 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다.

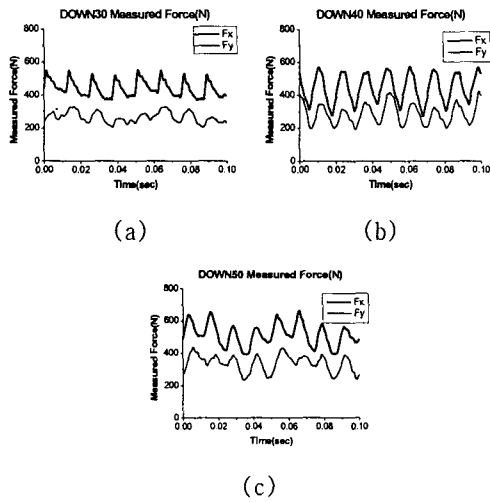


Fig.6 Measured cutting forces
 (a) down end-milling, helix angle 30°
 (b) down end-milling, helix angle 40°
 (c) down end-milling, helix angle 50°

4.2 미변형칩 단면적

Fig. 7는 Table 1에 주어진 절삭조건에 상응하는 하향 엔드밀링의 미변형칩 단면적의 변화를 절삭시간에 따라 나타낸 것이다.

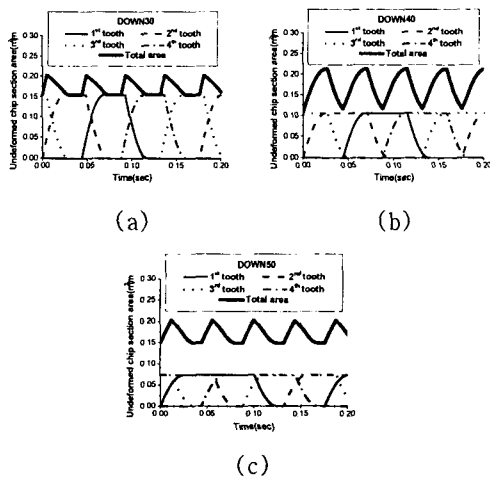


Fig.7 Undeformed chip section area
 (a) down end-milling, helix angle 30°
 (b) down end-milling, helix angle 40°
 (c) down end-milling, helix angle 50°

그림에서 보는 바와 같이 하향에서의 미변형칩은 선행연구⁽⁵⁾인 상향 엔드밀링의 미변형칩과는 반대의 형상을 보여주고 있으며 개개의 날에 의한 미변형칩 단면적의 변화는 30°인 경우가 가장 크며, 40°, 50° 순으로 작아지지만 Table 1에 나타난 절삭조건 하에서, 각 날의 중첩에 의한 절삭 단면적의 변화는 헬릭스각 40°인 경우 진폭이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 중첩된 절삭단면적이 헬릭스각 뿐만 아니라 절삭조건인 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이, 절삭날당 이송 등의 복합작용에 의해 결정되어지기 때문이다.

4.3 반경방향과 접선방향절삭력

F_r 및 F_t 를 결정함에 있어 절삭력 F_x 및 F_y 가 측정된 각 순간의 절삭 단면적 크기를 모르기 때문에 절삭력과 절삭단면적의 주기를 일치시킨 후 절삭력을 구하였다. 측정된 절삭력 데이터들을 식(10)에 공구의 위상에 따른 구간별로 대입한 후 미변형칩의 단면적과 상관관계를 고려하여 비절삭저항을 계산한 후 미변형칩의 단면적과 곱함으로써 접선방향의 힘 F_t 와, 반경방향의 힘 F_r 을 결정할 수 있으며, Fig. 8에 나타내었다.

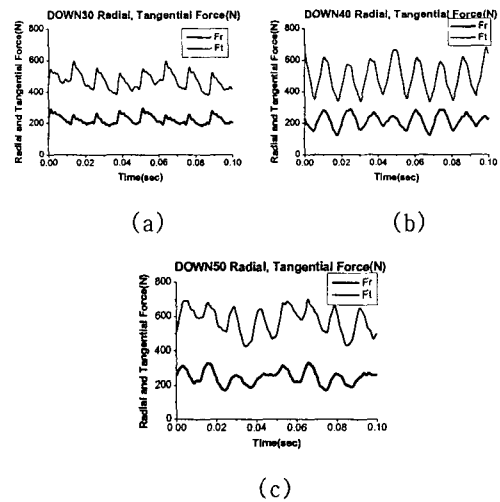


Fig.8 Tangential and radial cutting forces
 (a) down end-milling, helix angle 30°
 (b) down end-milling, helix angle 40°
 (c) down end-milling, helix angle 50°

반경방향 절삭력에서는 하향절삭보다는 선행연구인⁽⁵⁾ 상향절삭의 값이 크게 나타났으며, 접선방향 절삭력에서는 하향절삭의 값이 큰 경향을 보여주고 있다.

4.3 절삭특성

Fig. 8에서 구해진 힘들을 Lee 등⁽⁴⁾이 제시한 방법과 동일한 방향의 힘에 대입함으로써 Table 2의 전단면상 및 칩-공구 마찰면상의 절삭특성을 나타내는 값들을 구할 수 있다. Table 2의 계산된 결과로부터 칩-공구 마찰특성은 선행연구⁽⁵⁾의 상향 절삭에서는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 비마찰에너지가 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 다시 증가하는 경향을 보였으나, 하향 절삭시에는 헬릭스각이 30°와 40°에서 비슷한 값을 보여주고 있으나 헬릭스각 50°에서 다시 증가함을 볼 수 있다. 이는 주어진 절삭조건에서 절삭에 관여하는 절삭날의 총길이가 헬릭스각의 증가와 더불어 길어짐에 따른 마찰의 증가로 판단된다. 전단특성으로 비전단에너지는 상향 절삭시에는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가시 감소하였지만 하향 절삭시에는 헬릭스각이 증가할수록 계속 증가함을 볼 수 있다. 이는 상향과 하향 절삭시 절삭 방향 및 칩두께 등의 차이에 기인한 것이라 판단된다. 비절삭에너지는 상향절삭시보다 하향 절삭시에 그 값이 상대적으로 크게 나타났으며 헬릭스각에 따라 값도 다르게 나타났다. 상향 절삭에서는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 다시 증가하는 경향을 나타내었으나 하향 절삭에서는 헬릭스각이 증가함에 따라 비절삭에너지도 증가하였다.

5. 결론

등가 경사절삭시스템에 의한 SM45C강의 하향 엔드밀링공정의 전단 및 칩-공구 마찰특성해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 헬릭스각 30°와 40°의 경우 비마찰에너지 및 비전단에너지값은 40°인 경우 약간 큰 값을

나타내었다.

2. 헬릭스각 50°인 경우는 40°의 경우보다 비마찰에너지 및 비전단에너지가 크게 증가하였다.
3. 헬릭스각에 관계없이 절삭에 소요된 에너지는 76~77%이며 나머지는 칩-공구 마찰에 소요되었다.

Table 2 Output values

	UP			DOWN		
	30°	40°	50°	30°	40°	50°
Friction Characteristics						
Friction force, F_f (N)	416.5	404.8	476.9	315.7	335.8	437.3
Normal force to the rake face, F_n (N)	404.5	355.8	406.4	430.3	444.0	485.4
Coefficient of friction, μ	1.01	1.06	1.08	0.73	0.76	0.90
Specific friction energy, u (MPa)	773.2	687.1	796.9	648.8	649.3	772.0
Shear Characteristics						
Shear force, F_s (N)	343.7	301.3	374.2	385.1	428.0	526.7
Normal force to the shear plane, F_{sn} (N)	468.0	446.9	502.6	369.4	356.9	386.7
Shear strain, γ	3.41	3.82	4.30	3.15	3.59	4.43
Shear stress, τ (MPa)	551.5	410.1	425.0	667.2	618.7	584.5
Normal stress, σ (MPa)	751.4	609.6	571.8	640.6	514.5	429.2
Specific shear energy, u_s (MPa)	1879.0	1564.5	1828.9	2104.8	2218.8	2587.4
Cutting Characteristics						
Specific cutting energy, u_c (MPa)	2652.2	2251.6	2625.8	2753.5	2668.1	3359.4
u/u_c	0.29	0.31	0.30	0.24	0.23	0.23
μ/μ_c	0.71	0.69	0.70	0.76	0.77	0.77

참고문헌

1. Martellotti, M.E., 1941, "An Analysis of the Milling Process." Trans of ASME, Vol.63, pp. 677-700.
2. Martellotti, M.E., 1945, "An Analysis of the Milling Process : Part II - down milling," Trans. of ASME, Vol.74, pp. 233-251.
3. Tlustý, J. and Macneil, P., 1975, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling." Annals of CIRP, Vol. 24, pp.21-25.
4. Lee, Y.M., Yang, S.H., and Jang, S.I., 2003, "Shear and friction process in intermittent cutting.", IJMPB, Vol.17, Nos.8 & 9, pp.1395-1400.
5. Lee, Y.M., Song, T.S., Shim, B.K., 2001, "Analysis of shear and friction characteristics in end milling.", KSME A., Vol.25., No.10., pp.1520-1527.