

인코넬 718의 상향 및 하향 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭력 변화

이영문*, 이선호**, 태원익***, 권오진***, 최봉환***

Cutting Force Variation of Inconel 718 in Up and Down Endmilling with Different Helix Angles.

Young Moon Lee*, Sun Ho Lee**, Won Ik Tae***, O Jin Kwon***, Bong Hwan Choi***

ABSTRACT

In this study, a mechanistic model of cutting force components in up and down end milling process is presented. Using this cutting force model of 4-tooth endmills with various helix angles, cutting force variation of Inconel 718 has been predicted. Predicted values of cutting force components are coincide well with the measured ones. As helix angle increases, overlapping effects of the active cutting edges increase. In up endmilling the magnitudes of radial and feed cutting force componts F_x and F_y are lowest when the helix angle is 40° , but in down endmilling the magnitudes of these values increase slightly as helix angle becomes large.

Key Words : Undeformed chip thickness(미변형 칩두께), Helix angle(헬릭스각) Up endmilling(상향엔드밀링), Down endmilling(하향엔드밀링), Specific cutting resistance(비절삭저항)

1. 서론

엔드밀링 절삭공정은 공구가 회전운동을 하는 동시에 공작물이 공구의 축방향에 수직하게 이송되면서 이루어지는 가공공정으로 금형 등 비교적 복잡한 형상의 제품 가공시 생산성과 경제성이 뛰어나 항공기 부재가공 및 자동차 산업에 필요한 금형 제작등 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되고 있다.^(1,2)

엔드밀링 절삭공정은 일정한 절삭깊이로 진행되는 절삭방식과는 달리 미변형칩두께(undeformed chip thickness)가 변화하며 이에 따라 절삭력도 주기적으로 변하는 단속절삭이며, 한 개 이상의 절삭

날이 동시에 작용하는 경우가 많아 그 실제적인 해석이 간단하지 않다.

밀링절삭공정에 대한 체계적인 연구는 Martellot⁽³⁾에 의해 수행된 공구의 진행경로에 따른 미변형 칩두께의 변화에 대한 연구로부터 시작되었으며, Tlusty와 Macneil⁽⁴⁾은 상향엔드밀링(up endmilling)시 공구의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따라 연속적으로 변하는 미변형칩두께사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형칩의 단면적의 곱으로 나타내어 실제 측정 절삭력과 비교하였다. 엔드밀의 형상인자중 절삭특성에 큰 영향을 주는 것으로는 헬릭스각(helix angle), 날 수, 절삭날 각 등을 들 수 있으며 헬릭스각의 경우 30° 정도의

2001년 2월 26일 접수

* 경북대학교 기계공학부

** 대한중석초경 주식회사

*** 경북대학교 대학원 기계공학과

것이 일반적으로 가장 널리 사용되거나 난삭재 가공 등 특수한 용도로 50°정도의 큰 경우도 종종 사용되고 있다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 Tlusty등⁽²⁾에 의해 제시된 2날 엔드밀에 의한 상향 엔드밀링의 절삭력 모델에 기초하여 4날 엔드밀에 의한 상향 및 하향엔드밀링 절삭공정에 대한 절삭력모델을 설정하였다. 또한 이를 적용하여 항공기 엔진부품, 가스터빈 및 터보엔진 부품 재료로서 난삭재로 분류되고 있는 인코넬 718합금의 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭력변화 특성을 고찰하였다.

2. 절삭력 모델

엔드밀링 절삭가공시, 실제 대부분의 절삭은 옆날에 의해 이루어지며, 절삭력해석도 옆날의 작용에 국한하고 있다.^(4,6-8)

엔드밀링의 절삭력 모델을 설정하기 위해서는 공구의 기하학적인 형상과 이에 따라 달라지는 현상에 대한 이해가 필요하다. Fig. 1은 4날 엔드밀에 의한 엔드밀링 절삭시 공구와 피삭재의 운동, 반경방향 절삭깊이 a 와 축방향 절삭깊이 b 를 나타내었다. 본 논문에서는 절삭실험시 절삭력해석과 절삭실험의 일관성을 유지하기 위하여 그림에서 보는 바와 같이 절삭 깊이 b 아래에 홈을 만들어 엔드밀 공구의 밑날부에 의한 절삭이 이루어지지 않도록 하였다. 그림에서 (a)는 상향절삭을 나타내며, (b)는 하향절삭을 나타낸다.

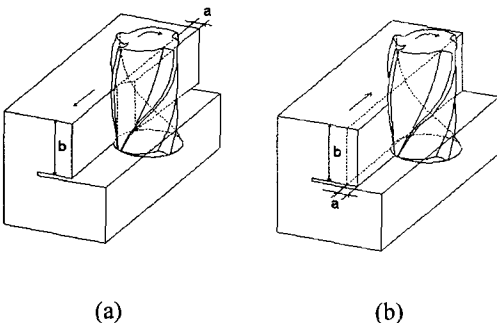


Fig. 1 Endmilling (a)Up endmilling, (b)Down endmilling

Fig. 2는 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구가 절삭날당 s_t 만큼 이송하면서 회전할 때의 공구

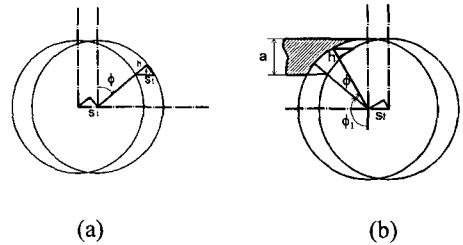


Fig. 2 Radial feed, h (a)Up endmilling, (b)Down endmilling

와 피삭재사이의 관계를 도식한 것이고, 상향 엔드밀링시 공구경로사이의 반경방향 길이의 차이, 즉 반경방향의 이송량 h 는 식(1)-(a)에 나타낸 바와 같이 $s_t \sin \phi$ 이다. 그러나 하향 엔드밀링시 반경방향 이송량 h 는 ϕ 의 증가와 함께 감소하므로 식(1)-(b)와 같게 된다.

$$h = s_t \sin \phi \quad (1)-(a)$$

$$h = s_t \sin(\phi + \phi_1) \quad (1)-(b)$$

여기서, s_t 는 절삭날 당 공작물의 이송량이며 ϕ 는 공구의 회전각, ϕ_1 는 기준위치로부터 절삭이 시작될 때까지의 회전각이다.

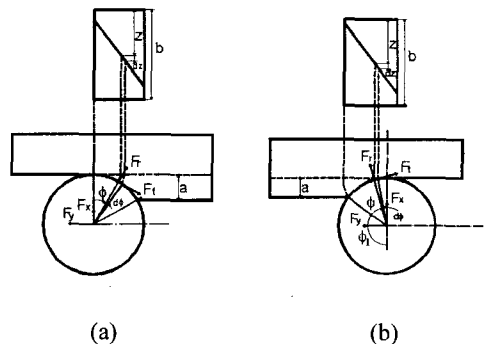


Fig. 3 The cutting force component (a)Up endmilling, (b)Down endmilling

Fig. 3은 엔드밀 공구의 인선부와 피삭재 사이의 절삭력 성분을 접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력으로 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 상향절삭시 절삭력을 나타내며, (b)는 하향절삭시 절삭력을 나타낸다.

이들 절삭력 성분은 식(2)와 (3)에 나타낸 바와 같이 연속적으로 변화하는 미변형칩의 두께와 절삭폭의 곱인 미변형칩의 단면적($b \cdot h$)과 비절삭저항 (specific cutting resistance, K)과의 곱으로 표현할 수 있다.

$$F_t = K_t b h \quad (2)$$

$$F_r = K_r b h \quad (3)$$

여기서 F_t 는 접선방향 절삭력, F_r 는 반경방향 절삭력, K_t 와 K_r 는 각각의 비절삭저항, b 는 축방향 절삭깊이, h 는 반경방향 이송량이다.

$$dz = \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (4)$$

미소 절입깊이와 미소 회전각 사이의 관계는 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 r 은 엔드밀공구의 반경이며, β 는 헬리스각이다

또한 반경 절삭깊이 방향을 X축으로 테이블 이송방향을 Y축으로 설정하면 상,하향절삭방식에 따라 설정된 방향의 미소절삭력 성분 dF_x , dF_y 는 좌표변환을 통하여 각각 식(5)-(a)와 (5)-(b)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\frac{3\pi}{2} - \phi) & -\sin(\frac{3\pi}{2} - \phi) \\ \sin(\frac{3\pi}{2} - \phi) & \cos(\frac{3\pi}{2} - \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\sin \phi & \cos \phi \\ -\cos \phi & -\sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \end{bmatrix} \quad (5)-(a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 + \phi - \frac{\pi}{2}) & \sin(\phi_1 + \phi - \frac{\pi}{2}) \\ -\sin(\phi_1 + \phi - \frac{\pi}{2}) & \cos(\phi_1 + \phi - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sin(\phi_1 + \phi) & -\cos(\phi_1 + \phi) \\ \cos(\phi_1 + \phi) & \sin(\phi_1 + \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \end{bmatrix} \quad (5)-(b) \end{aligned}$$

식(1)-(a), (1)-(b), (2), (3), (4)를 각각 식(5)-(a), (5)-(b)에 대입시켜 정리하면 상·하향절삭의 미소 절삭력 dF_x 와 dF_y 는 식(6)-(a), (6)-(b)와 같이 나타낼 수 있다

$$\begin{aligned} dF_x &= (-\frac{K_t s_t r}{\tan \beta} \sin^2 \phi + \frac{K_r s_t r}{\tan \beta} \sin \phi \cos \phi) d\phi \\ dF_y &= (-\frac{K_t s_t r}{\tan \beta} \sin \phi \cos \phi - \frac{K_r s_t r}{\tan \beta} \sin^2 \phi) d\phi \quad (6)-(a) \end{aligned}$$

$$dF_x = [\frac{K_t s_t r}{\tan \beta} \sin^2(\phi + \phi_1) - \frac{K_r s_t r}{\tan \beta} \sin(\phi + \phi_1)$$

$$\begin{aligned} &\cos(\phi + \phi_1)] d\phi \\ dF_y &= [-\frac{K_t s_t r}{\tan \beta} \sin(\phi + \phi_1) \cos(\phi + \phi_1) + \frac{K_r s_t r}{\tan \beta} \\ &\sin^2(\phi + \phi_1)] d\phi \quad (6)-(b) \end{aligned}$$

Fig. 4는 절삭날이 운동하면서 연속적으로 생성되는 표면을 나타내며, A영역에서 실제 절삭작용을 하는 절삭날의 길이는 0에서 $r\phi_2 \text{cosec}\beta$ 까지 증가하며, B영역에서는 $r\phi_2 \text{cosec}\beta$ 로 일정하다가, C영역에서는 $r\phi_2 \text{cosec}\beta$ 에서 0까지 감소하게 된다. 여기서 δ 는 절삭날이 축방향 절삭깊이 b , 전구간에 걸쳐 절삭할 경우에 대한 공구의 회전각이며, ϕ_2 는 절삭날이 절삭개시(즉, 반경방향 절삭깊이가 0일때)로부터 반경방향 절삭깊이 a 만큼 절삭할 때까지의 공구의 회전각이다.

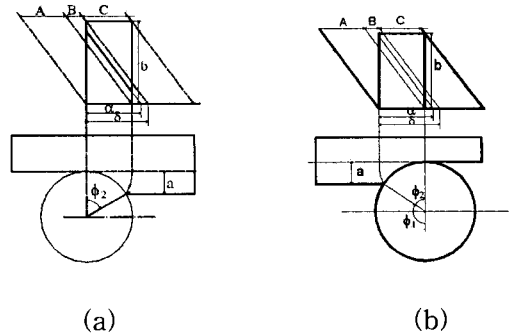


Fig. 4 Contact length of cutting edge at cutting position (a)Up endmilling, (b)Down endmilling

절삭날의 임의의 위치에 따른 각 α 의 범위는 각각 A[0, ϕ_2], B[ϕ_2 , δ] 및 C[δ , $\delta + \phi_2$]가 된다. 그러나 A, B, C영역에서 절삭날의 범위는 A[0, α], B[0, ϕ_2] 및 C[$\alpha - \delta$, ϕ_2]와 같이 된다. 따라서 미소 절삭날에 따른 절삭력을 위의 범위에 따라 적분하면 상,하향절삭에 따른 각 영역에서의 절삭력은 각각 식(7)-(a) 및 (7)-(b)와 같이 나타낼 수 있다.

A

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} (K_t \alpha - \frac{K_t}{2} \sin 2\alpha - \frac{K_r}{2} \alpha + \frac{K_r}{2} \cos 2\alpha) \\ F_y &= \frac{s_t r}{2 \tan \beta} (-\frac{K_t}{2} \cos 2\alpha - \frac{K_t}{2} - K_r \alpha + \frac{K_r}{2} \sin 2\alpha) \end{aligned}$$

B

$$F_x = \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} (K_t \phi_2 - \frac{K_t}{2} \sin 2\phi_2 - \frac{K_r}{2} \alpha + \frac{K_r}{2} \cos 2\phi_2)$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left(-\frac{K_t}{2} \cos 2 \phi_2 - \frac{K_t}{2} - K_r \phi_2 + \frac{K_r}{2} \sin 2 \phi_2 \right)$$

C

$$F_x = \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} \left[K_t (\phi_2 - \alpha + \delta) - \frac{K_t}{2} \sin 2 \phi_2 + \frac{K_t}{2} \sin 2 (\alpha - \delta) + \frac{K_r}{2} \cos 2 \phi_2 - \frac{K_r}{2} \cos 2 (\alpha - \delta) \right]$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left[\frac{K_t}{2} \cos 2 \phi_2 - \frac{K_t}{2} \cos 2 (\alpha - \delta) - K_r (\phi_2 - \alpha + \delta) + \frac{K_r}{2} \sin 2 \phi_2 - \frac{K_r}{2} \sin 2 (\alpha - \delta) \right] \quad (7)\text{-}(a)$$

A

$$F_x = \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} \left[-K_t \alpha + \frac{K_t}{2} \sin 2 (\alpha + \phi_1) - \frac{K_r}{2} \sin 2 \phi_1 - \frac{K_r}{2} \cos 2 (\alpha + \phi_1) + \frac{K_r}{2} \cos 2 \phi_1 \right]$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left[-\frac{K_t}{2} \cos 2 (\alpha + \phi_1) + \frac{K_t}{2} \cos 2 \phi_1 + K_r \alpha - \frac{K_r}{2} \sin 2 (\alpha + \phi_1) + \frac{K_r}{2} \sin 2 \alpha \right]$$

B

$$F_x = \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} \left[-K_t \phi_2 - \frac{K_t}{2} \sin 2 \phi_1 + \frac{K_r}{2} + \frac{K_r}{2} \cos 2 \phi_1 \right]$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left[-\frac{K_t}{2} \cos 2 (\phi_2 + \phi_1) + \frac{K_t}{2} \cos 2 \phi_1 + K_r \phi_2 + \frac{K_r}{2} \sin 2 \phi_2 \right]$$

C

$$F_x = \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} \left[-K_t (\phi_2 - \alpha + \delta) - \frac{K_t}{2} \sin 2 (\alpha - \delta + \phi_1) + \frac{K_r}{2} + \frac{K_r}{2} \cos 2 (\alpha - \delta + \phi_1) \right]$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left[\frac{K_t}{2} - \frac{K_t}{2} \cos 2 (\alpha - \delta + \phi_1) + K_r (\phi_2 - \alpha + \delta) + \frac{K_r}{2} \sin 2 (\alpha - \delta + \phi_1) \right] \quad (7)\text{-}(b)$$

3. 절삭 실험

실험에 사용된 공구는 TiAlN코팅이 되어있는 초경공구로 지름 8mm, 날수 4개, 헬릭스각이 각각 30°, 40°, 및 50°로 제작하였다. 피삭재로는 Inconel 718을 사용하였으며 Table 1에 그 화학적 조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%) of inconel 718

Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	C
52	19	17	5	3	0.5	0.08

공작기계는 최대 회전수 6000rpm인 머시닝 센터(YAMAGE TECHNO)를 사용하였다.

절삭실험조건은 절삭속도 30m/min, 절삭날당 이송거리 0.06mm/tooth, 축방향 절삭깊이 12mm, 반지름방향 절삭깊이 1mm로 하였다.

절삭력 성분을 구하기 위하여 공구동력계(Kistler, 9273)에서 나오는 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 변환시키고, 이것을 AD 변환기를 통해 PC에서 신호분석기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Global lab)를 사용하여 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

공구동력계로 부터 얻어지는 절삭력신호의 샘플링주파수는 2048Hz이며, 공작기계 주축의 회전속도는 1194rpm(V=30m/min)이므로 절삭력신호는 공구의 회전 3.497°마다 얻어진다.

Table 2에는 측정된 절삭력의 평균값을 나타내었다. 상향절삭의 반경방향 절삭력 F_x 및 이송방향 절삭력 성분 F_y 의 절대값은 헬릭스각 40°인 경우가 가장 작게 나타나고 있다. 한편 하향절삭의 반경방향 절삭력 F_x 및 이송방향 절삭력 성분 F_y 의 절대값은 헬릭스각이 클수록 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. 축방향 평균 절삭력 F_z 의 절대값은 상·하향절삭 모두 헬릭스각이 증가할수록 크게 나타나고 있다.

Table 2-(a) Average cutting forces in upmilling

	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$
H.A=30°	-94.1	-294.3	-44.9
H.A=40°	-65.5	-263.4	-64.3
H.A=50°	-71.6	-282.1	-87.9

Table 2-(b) Average cutting forces in downmilling

	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$
H.A=30°	-249.4	-126.3	-52.5
H.A=40°	-261.3	-126.7	-67.6
H.A=50°	-267.5	-134.9	-94.8

한편 접선방향 및 반경방향의 비절삭저항 K_t 및 K_r 은 측정된 평균 절삭력 F_x 및 F_y 를 식(7)-(a) 및 (7)-(b)에 대입하여 얻어지는 연립방정식으로 부터 구하였으며, Table 3-(a) 및 3-(b)는 각각 상향 및 하향 엔드밀링시의 비절삭저항 값을 나타낸 것이다.

Table 3-(a) K_t and K_r in upmilling

	K_t (MPa)	K_r (MPa)
H.A=30°	1890	1810
H.A=40°	1850	1730
H.A=50°	1530	1310

Table 3-(b) K_t and K_r in downmilling

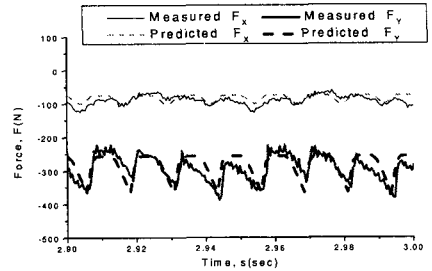
	K_t (MPa)	K_r (MPa)
H.A=30°	1960	1310
H.A=40°	1910	1410
H.A=50°	2140	1590

상향절삭시 접선방향의 비절삭저항(K_t)은 1530~1890MPa의 범위를 가지며 반경방향의 비절삭저항(K_r)은 1310~1810MPa의 범위를 나타낸다. 하향절삭시 접선방향의 비절삭저항은 1910~2140MPa의 범위를 가지며 반경방향의 비절삭저항은 1310~1590MPa의 범위를 나타낸다. 상향절삭시 비절삭저항 K_t 및 K_r 모두 헬릭스각이 50°일 경우 가장 작게 나타나고 하향절삭시 K_t 는 헬릭스각이 40°, K_r 은 30°일 경우가 가장 작게 나타난다. 한편 Tlustý⁽²⁾의 경우 반경방향 비절삭저항의 크기가 접선방향 비절삭저항에 대해 30%정도로 가정하였지만 상향절삭시 Inconel 718의 반경방향 비절삭저항은 접선방향 비절삭저항에 대해 86~96%의 비교적 큰 값을 나타내며, 하향절삭시 반경방향 비절삭저항은 접선방향 비절삭저항에 대해 67~74%의 값을 나타내고 있다.

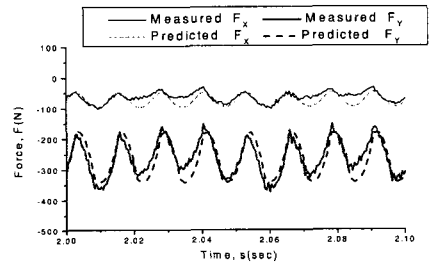
Fig. 5는 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 공구에 의한 상향 및 하향 절삭시 측정된 평균 절삭력 F_x 및 F_y (그림에서 —로 표시)와 예측절삭력 F_x 및 F_y (그림에서 - - -로 표시)를 나타낸 것이다. 예측절삭력 F_x 및 F_y 는 Table 3-(a) 및 (b)에 나타난 평균 비절삭저항 K_t 및 K_r 값을 식(7)-(a) 및 (7)-(b)에 대입하여 구하였다.

실험적으로 구한 측정 절삭력의 진폭이 다소 불규칙하지만 대체로 예측 절삭력의 경향과 일치함을

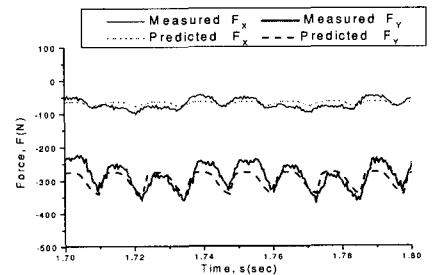
알 수 있다.



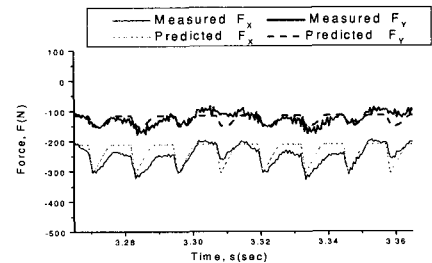
(a) Helix Angle 30°, Up Endmilling



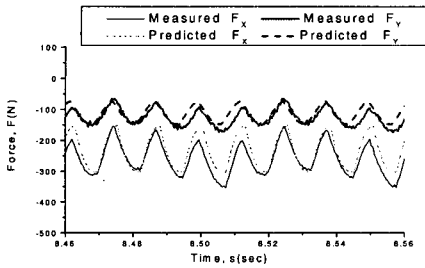
(b) Helix Angle 40°, Up Endmilling



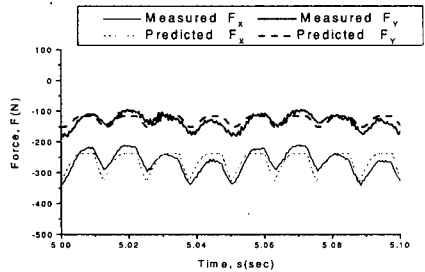
(c) Helix Angle 50°, Up Endmilling



(d) Helix Angle 30°, Down Endmilling



(e) Helix Angle 40°, Down Endmilling



(f) Helix Angle 50°, Down Endmilling

Fig. 5 Measured and Predicted Cutting Forces

실험적으로 측정된 절삭력과 비절삭저항을 이용한 예측 절삭력사이의 차이는 공구의 기하학적인 형상의 불균일로 인한 런아웃(runout), 공구의 처짐 등의 영향이 작용하였기 때문이라고 판단된다.⁽⁹⁾

5. 결론

헬릭스각이 30°, 40° 및 50°인 엔드밀 공구에 의한 Inconel 718의 상·하향엔드밀링 절삭시 측정된 절삭력과 비절삭저항(K)을 이용한 예측 절삭력값에 대한 분석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 절삭실험에서 구해진 측정 절삭력과 비절삭저항(K) 및 절삭단면적(bh)을 이용해서 구한 예측 절삭력값이 거의 일치하였다.

(2) 헬릭스각이 증가하면서 작용절삭날의 중첩의 영향이 커지며, 상향절삭시 반경방향 절삭력과 이송방향 절삭력, F_x 와 F_y 의 절대값은 40°인 경우가 -65.5N과 -263.4N으로 가장 작게 나타났으며 접선방향 비절삭저항과 반경방향 비절삭저항, K_t 와 K_r 값은 50°인 경우가 1530MPa과 1310MPa로 가장 낮

게 나타났다. 또한 하향절삭시 절삭력, F_x 와 F_y 의 절대값은 30°인 경우가 -249.4N과 -126.3N으로 가장 낮게 나타났으며 비절삭저항, K_t 값은 40°인 경우가 1910MPa, K_r 값은 30°인 경우가 1310MPa로 가장 낮게 나타났다.

(3) 상향절삭시 반경방향 비절삭저항, K_r 의 범위는 1310~1810MPa이며 접선방향 비절삭저항, K_t (1530~1890MPa)의 86~96%의 값을 나타내었고 하향절삭시 반경방향 비절삭저항, K_r 의 범위는 1310~1590MPa이며 접선방향 비절삭저항, K_t (1910~2140MPa)의 67~74%정도를 나타내었다.

참고문헌

1. 김찬봉, 양민양, "엔드밀링의 효과적인 절삭력 모델과 NC 검증시스템으로의 응용," 대한기계학회, 제19권, 제7호, pp. 1555-1562, 1995.
2. M. A. Mannan, B. Lindström, "Performance for End Mill Made of Different Tool Materials with Regards to Tool Life and Stability," Annals of the CIRP, Vol. 33, pp. 37-40, 1986.
3. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
4. Tlusty, J., and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21-25, 1975.
5. Taegu Tec Ltd, "Taegu Tec Cutting Tools," pp. D4~D5, 1999.
6. Kline, W. A. et al, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No.1, pp. 7-22, 1982.
7. Matsubara, T. et al, "Study on Accuracy in End Mill Operations(1st Report)," J. of Japan Soc. Prec. Engg., Vol. 21, No.2, pp. 95-100, 1989.
8. Fussell, B. K., and Srinivasan, K., "An Investigation of the End Milling Process under Varing Machining Condition," Trans of ASME, Vol. 111, pp. 27-36, 1989.
9. 이상림, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제16권, 제4호, pp. 229-236, 1999.