

인코넬 718의 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭특성 변화 - (I) 상향엔드밀링

태원익(경북대학교 대학원), 이선호(대한중석초경), 최원식(밀양대학교),
양승한(경북대학교), 이영문*(경북대학교)

Cutting Characteristics Variation of Inconel 718 in End Milling with different Helix Angles - (I) Up End Milling

W. I. Tae(Graduate School, Kyungpook Univ), S. H. Lee(TaeguTec), W. S. Choi(Miryang Univ)
S. H. Yang(Kyungpook Univ), Y. M. Lee*(Kyungpook Univ)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the effect of the helix angle of endmilling cutter on the cutting characteristics of inconel 718 in up endmilling. To this end cutters with helix angle of 20°, 30°, 40° and 50° degree have been prepared. And a modified cutting force model in up end milling process is presented. Using this cutting force components of 4-tooth endmills with various helix angles have been predicted. Predicted values of cutting force components are well coincide with the measured ones. As helix angle increases overlapping effects of the active cutting edges increase.

Keywords : Up end milling(상향 엔드밀링), Helix angle(헬릭스각), Undeformed chip thickness(미변형칩두께)

1. 서론

엔드밀 절삭공정은 항공우주산업, 조선 및 자동차산업 분야에서 다양한 형태의 제품생산과 고정밀도 및 효율적인 생산성을 필요로 하는 정밀기계산업분야에서 널리 사용되고 있다. 엔드밀 절삭공정은 공구가 회전운동을 하는 동시에 공작물이 공구의 축방향에 수직하게 이송되면서 이루어지는 가공공정으로 일정한 절삭깊이로 진행되는 절삭방식과는 달리 미변형칩두께(undeformed chip thickness)가 연속적으로 변하는 단속절삭이며, 한 개 이상의 절삭날이 동시에 작용하는 가공이므로 그 실제적인 해석이 간단하지 않다.

이러한 엔드밀 절삭공정의 기하학적인 이해⁽¹⁾⁻⁽²⁾ 및 가공정밀도와 표면조도⁽³⁾에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으나 난삭재로 분류되는 내열, 내식 재료의 가공성, 특히 밀링가공에서의 피삭성에 관한 연구는 미비한

실정이다⁽⁴⁾.

난삭재 중 Inconel 718합금은 원자력 핵반응기나 항공기의 엔진부분 및 가스터빈이나 터보엔진 등에 사용되며 그 형상이 매우 복잡하고 고정밀도를 요구하는 분야에 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 Tlustý⁽¹⁾등이 제시한 절삭력 예측모델을 일부 수정하여 상향 및 하향 엔드밀링 절삭력 모델을 설정하였다. 설정된 예측모델과 절삭력측정실험을 통하여 Inconel 718의 절삭특성을 평가하였다.

2. 절삭력 모델

엔드밀의 절삭력 모델을 설정하기 위해서는 공구의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따라 달라지는 절삭부형상의 이해가 필요하다. Fig. 1에는 상향 엔드밀링 절삭시 공구와 피삭재의 운동, 반경방향 절삭깊이 a와 축방향 절삭깊이 b, 헬릭스각 β 를 나타내었으며 절삭력해석

의 단순화를 위해 축방향 절삭깊이 b 아래에 해당하는 공작물에 홈을 만들어 엔드밀 공구의 밑날부에 의한 절삭을 배제하였다.

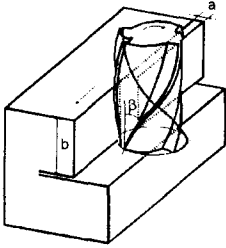


Fig. 1 Up endmilling

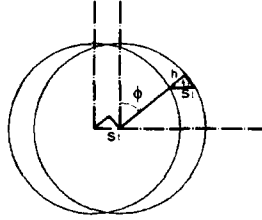


Fig. 2 Radial feed, h

Fig. 2는 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구가 절삭날당 s_r 만큼 이송하면서 회전할 때 나타나게 되는 공구와 피삭재사이의 관계를 도시한 것이고, 하나의 절삭날경로사이의 반경방향 길이의 차이, 즉 반경방향의 이송량 h 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = s_r \sin \phi \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 기준 위치로부터의 공구의 회전각이다.

Fig. 3 (a)는 엔드밀 공구의 절삭력 성분을 접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력으로 나타낸 것이다.

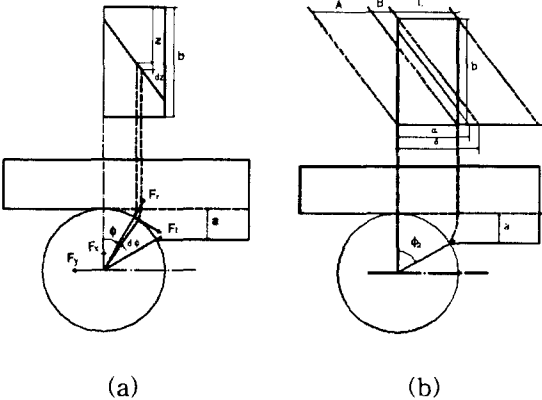


Fig. 3 (a) The cutting force components

(b) Contact length of cutting edge at cutting position

이들 절삭력 성분은 식 (2)와 (3)에 나타난 바와 같이 연속적으로 변화하는 미변형칩두께와 절삭폭의 곱인 칩 단면적($b \cdot h$)과 비절삭저항(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.

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

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

또한 반경 절삭깊이방향을 X축으로 테이블 이송방향을 Y축으로 설정하면 이들 방향의 절삭력 성분 dF_x 와 dF_y 는 좌표변환을 통하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (1),(2),(3),(4)를 식(5)에 대입시켜 정리하면 dF_x 와 dF_y 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

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

Fig. 3 (b)의 윗 부분은 절삭날이 운동하면서 연속적으로 생성하는 표면을 나타내며 ϕ_2 는 절삭날이 절삭개시(즉, 반경방향 절삭깊이가 0일때)로부터 반경방향 절삭깊이 a 만큼 절삭할 때까지의 공구의 회전각이며, δ 는 절삭날이 축방향 절삭깊이 b , 전구간에 걸쳐 절삭할 경우에 대한 공구의 회전각이다. 각 영역에서 절삭날의 임의의 위치에 따른 각 α 의 범위는 각각 $A[0, \phi_2]$, $B[\phi_2, \delta]$ 및 $C[\delta, \delta + \phi_2]$ 가 된다. 한편 A, B, C영역에서 절삭날의 범위는 $A[0, a]$, $B[0, \phi_2]$ 및 $C[a - \delta, \phi_2]$ 와 같이 된다. 따라서 미소절삭날에 따른 절삭력을 위의 범위에 따라 적분하면, 각 영역에서의 절삭력은 식(7)과 같이 구할 수 있다.

A

$$F_x = \frac{-s_r r}{2 \tan \beta} \left(K_t a - \frac{K_t}{2} \sin 2a - \frac{K_r}{2} a + \frac{K_r}{2} \cos 2a \right)$$

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

B

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

$$F_Y = \frac{s_1 r}{2 \tan \beta} \left(\frac{K_t}{2} \cos 2 \phi_2 - \frac{K_t}{2} - K_r \phi_2 + \frac{K_r}{2} \sin 2 \phi_2 \right)$$

C

$$F_X = \frac{-s_1 r}{2 \tan \beta} \left[K_t (\phi_2 - \alpha + \delta) - \frac{K_t}{2} \sin 2 \phi_2 + \frac{K_t}{2} \sin 2(\alpha - \delta) - \delta \right] + \frac{K_r}{2} \cos 2 \phi_2 - \frac{K_r}{2} \cos 2(\alpha - \delta)$$

$$F_Y = \frac{s_1 r}{2 \tan \beta} \left[-\frac{K_t}{2} \cos 2 \phi_2 - \frac{K_t}{2} \cos 2(\alpha - \delta) - K_r (\phi_2 - \alpha + \delta) + \frac{K_r}{2} \sin 2 \phi_2 - \frac{K_r}{2} \sin 2(\alpha - \delta) \right] \quad (7)$$

3. 절삭실험

절삭실험에 사용하기 위하여 지름 8mm, 날수 4개이고, 헬릭스각이 각각 20°, 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀 공구를 제작하였고 공구의 성능을 개선하기 위하여 TiAlN코팅을 하였다. 피삭재로는 Inconel 718를 소재로 Fig. 1에 나타낸 형상으로 제작하여 절삭실험하였다.

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 증폭시키고, 이것을 AD변환기를 통해 PC에서 신호분석기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Global lab)를 사용하여 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

측정된 절삭력의 평균값은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 반경방향의 평균 절삭력 성분 F_x , 이송방향의 평균 절삭력 성분 F_y 모두 헬릭스각이 40°인 경우가 가장 작게 나타나며 축방향의 평균 절삭력 성분 F_z 의 경우 헬릭스각이 증가할수록 크게 나타나고 있다.

Table 1 Average cutting force, F(N).

	F_x	F_y	F_z	F
H.A=20°	-89.4	-274.6	-28.1	290.2
H.A=30°	-94.1	-294.3	-44.9	312.2
H.A=40°	-65.5	-263.4	-64.3	279.0
H.A=50°	-71.6	-282.1	-87.9	304.0

실험결과로부터 K_t 와 K_r 를 Table 2와 같이 구할 수 있

다. K_t 와 K_r 는 식(7)에 실제로 측정된 절삭력 F_x 와 F_y 를 대입하여 만들어진 연립방정식으로부터 구해질 수 있다. 이들 K 값은 공구의 기하학적인 형상과 재질, 절삭 조건, 피삭재의 재질에 영향을 받는다.

Table 2 K_t and K_r (N/mm²)

	K_t	K_r
H.A=20°	1920	1870
H.A=30°	1890	1810
H.A=40°	1850	1730
H.A=50°	1530	1310

비절삭저항, K_t 와 K_r 가 구해지면 절삭시간에 따른 예측 절삭력은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 공구의 회전과 피삭재의 이송으로 인하여 미변형칩두께가 주기적으로 변하고 이에 따라 절삭력이 증가하다가 일정해지고 감소하는 동일한 형태가 반복하게 되며 하나의 절삭날이 절입한 후 또 다른 절삭날이 절입해 들어와 중첩이 일어나게 된다. 또한 헬릭스각이 커질수록 중첩의 경향이 크게 나타나게 된다. 접선방향의 비절삭저항은 1530~1920MPa의 범위를 가지며 반경방향의 비절삭저항은 1310~1870MPa의 범위를 가진다. 한편 Tlustý⁽¹⁾에 의해 제시된 접선과 반경방향 비절삭저항의 비가 3:1이었지만 Inconel 718의 반경방향 비절삭저항은 접선방향 비절삭저항에 대해 86~97%의 값을 나타내고 있다.

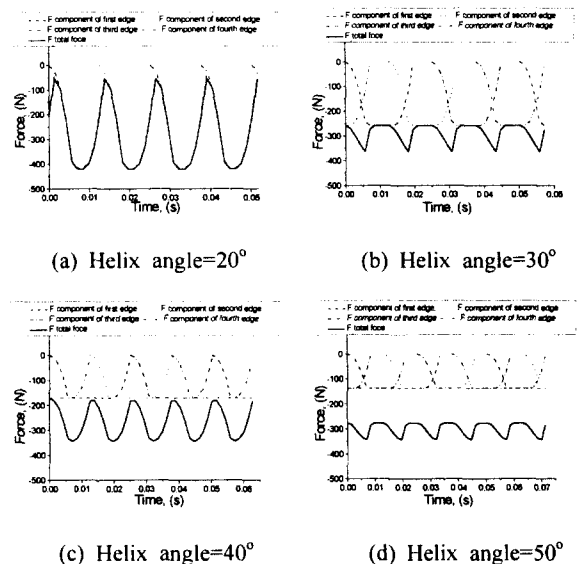
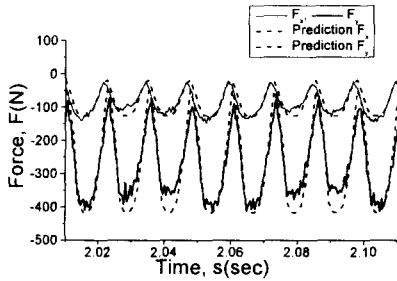


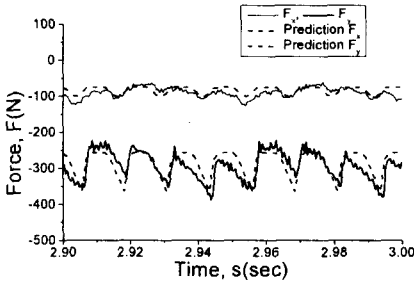
Fig. 4 Predicted cutting forces

그림에서 보는 바와 같이 헬릭스각이 30°일 경우가 20°일 경우보다도 절삭력의 진폭이 감소함을 알 수 있고 헬릭스각이 증가하여 40°일 경우가 되면 다시 진폭은 증

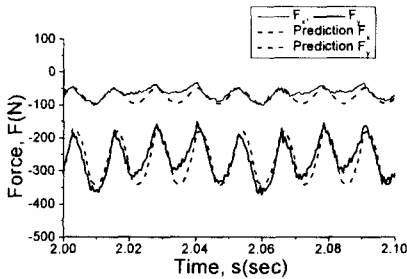
가하게 되고 50°일 경우가 되면 감소하게됨을 알 수 있다. 이러한 절삭력의 진폭정도는 축방향절삭깊이 a, 반경방향절삭깊이 b, 헬릭스각 β 의 영향을 받게 된다.



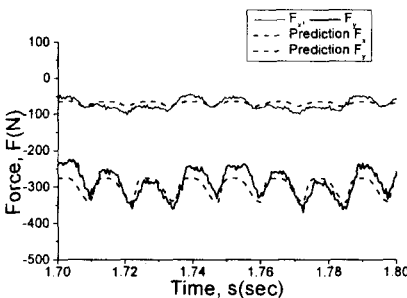
(a) Helix angle=20°



(b) Helix angle=30°



(c) Helix angle=40°



(d) Helix angle=50°

Fig. 5 Cutting force and predicted cutting force

Fig. 5는 절삭력 모델로부터 구한 절삭력과 실제 절삭력을 비교한 것이다. 두 값을 비교해 볼 때 실험적으로 구한 절삭력의 진폭이 불균칙하지만 대체로 진폭의 경향과 주기가 일치함을 알 수 있다. 실제 절삭력과 절삭력 모델로부터 구한 절삭력사이의 차이는 공구의 기하학적인 형상의 불균일로 인한 런아웃(runout), 공구의 처짐 등의 영향이 작용하였기 때문이라고 판단된다. 공구의 형상오차인 런아웃은 중심부에서 날부까지의 반경차이로 생기며 이로인해 칩의 두께가 변하고 절삭력에도 영향을 끼치게 된다.⁽⁵⁾

5. 결론

Inconel 718의 상향엔드밀 가공시 측정된 절삭력과 비절삭저항(K)을 이용한 절삭력 예측값에 대한 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

(2) 헬릭스각이 증가하면서 작용절삭날의 중첩의 영향이 커지며, 반경방향과 이송방향 절삭력의 경우 40°인 경우가 가장 작게 나타났으며 비절삭저항, K_x 와 K_y 값은 50°인 경우가 가장 낮게 나타났다.

(3) Inconel 718의 접선방향 비절삭저항의 범위는 1530~1920MPa이며 반경방향 비절삭저항의 범위는 1310~1810MPa로 나타났고 반경방향 비절삭저항은 접선방향 비절삭저항의 86~97%의 값을 나타내었다.

참고문헌

1. J. Tlustý and P. Macneil, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21-25, 1975.
2. Montgomery, D., and Altintas, Y., "Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling", Trans of ASME, Vol. 113, pp. 160-168, 1991.
3. W. A. Kline and R. E. Devor and I. A. Shareef, "Prediction of Surface Accuracy in End Milling", Trans of ASME, Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
4. 狩野勝吉, "難削材의 切削加工技術", 기술정보 편집부, pp. 186-205.
5. 이상림, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형상 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제16권, 제4호, pp. 229-236, 1999.