

# 인코넬 718의 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭특성 변화

## - (II) 하향엔드밀링

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

### Cutting Characteristics Variation of Inconel 718 in End Milling with different Helix Angles

#### - (II) Down 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

This paper has two purposes. One is to investigate the effect of the helix angle of endmilling cutter on the cutting characteristics of inconel 718 in down endmilling. To this end a newly developed cutting force model in down 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. The other is to compare the down endmilling characteristics of Inconel 718 with those of the up milling previously presented. In up endmilling as the helix angle becomes larger the radial and tangential components of the specific cutting force( $K_r$  and  $K_t$ ) decrease. While in down milling  $K_r$  and  $K_t$  become smaller as the helix angle decrease.

**Keywords** :Undeformed chipthickness(미변형 칩두께), Up endmilling(상향엔드밀링), Down endmilling(하향엔드밀링)

### 1. 서론

엔드밀 절삭공정은 공작물의 이송방향에 따라 상향절삭과 하향절삭으로 나눌 수 있으며 상향과 하향절삭에 대한 체계적인 연구는 Martellotti<sup>(1)</sup>에 의해 시작되었으며, 가공방식의 차이점과 이로 인하여 생기는 절삭하중과 표면조도에 끼치는 영향에 대한 연구가 이루어졌다.

기존의 연구에 의하면 하향절삭시 표면조도는 상향절삭에 대해서 우수하게 나타나지만 피삭재에 따라 그 특성이 달라지며 공작기계에 가해지는 절삭동력 또한 하향절삭이 작게 나타나기 때문에 최근에는 하향절삭에 의한 가공방법이 널리 사용되고 있는 추세이다.

이러한 엔드밀 절삭공정의 기하학적인 이해와 측정된 절삭력을 통한 칩하중과 비절삭저항의 해석<sup>(2)-(3)</sup> 그리고 가공오차 및 표면조도<sup>(4)</sup>를 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

선행연구<sup>(5)</sup>에서는 Tlusty<sup>(2)</sup>에 의해 제시된 절삭력 모

델을 일부 수정하여 4날 엔드밀 상향절삭력 예측모델을 설정하였고 Inconel 718의 상향 절삭실험을 통한 절삭특성을 분석하였으며 본 논문에서는 하향 절삭력 예측모델을 설정하고 절삭실험에서 측정된 절삭력으로부터 구한 비절삭저항에 대한 고찰을 통하여 상향절삭과 하향절삭시 헬릭스각에 따른 절삭특성을 비교 분석하였다.

### 2. 절삭력 모델

Fig. 1은 하향 엔드밀링 절삭시 공구와 피삭재의 운동, 반경방향 절삭깊이 a와 축방향 절삭깊이 b, 헬릭스각  $\beta$ 를 나타내고 있으며 축방향 절삭깊이 b아래에 홈을 만들어 엔드밀 공구의 밀날부에 의한 절삭을 배제하였다. Fig. 2는 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구기 $s_1$ 만큼 이송하면서 회전할 때 나타나게 되는 공구와 피삭재사이의 관계를 도시한 것이고, 절삭날경로사이의 반경방향 길이의 차이, 즉 반경방향의 이송량 h는  $s_1 \sin$

이다. 그러나 하향 엔드밀링시 반경방향 이송량  $h$ 는  $\phi$ 의 증가와 함께 감소하므로 식(1)와 같이 나타낼 수 있다.

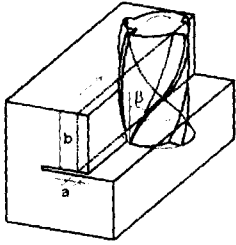


Fig. 1 Down endmilling

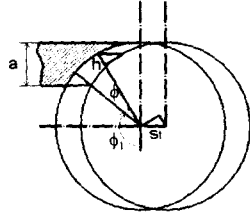


Fig. 2 Radial feed.  $h$

$$h = s_1 \sin(\phi + \phi_1) \quad (1)$$

여기서,  $s_1$ 는 실제 절삭날당 공작물의 이송량이며  $\phi$ 는 공구의 회전각,  $\phi_1$ 는 기준위치로부터 절삭이 시작될 때까지 회전한 각이다.

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

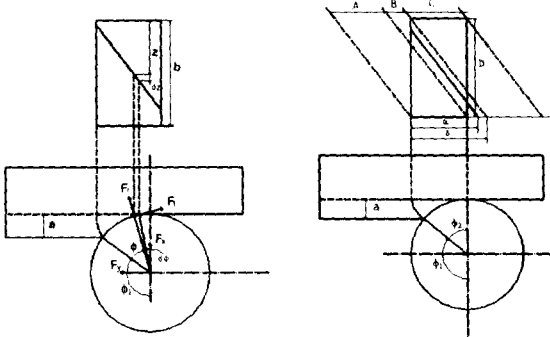


Fig. 3 (a) The cutting force component

(b) Contact length of cutting edge at cutting position

이들 절삭력 성분은 식(2)와 (3)에 나타낸 바와 같이 연속적으로 변화하는 미변형칩의 두께와 절삭폭의 굵은 칩단면적( $b \cdot h$ )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  $K_r$ 은 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,  $\beta$ 는 헬릭스각이다

또한 반경 절삭깊이 방향을 X축으로 테이블 이송방향을 Y축으로 설정하면 이들 방향의 미소절삭력 성분  $dF_x$ ,  $dF_y$ 는 좌표변환을 통하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$dF_x = \left[ \frac{K_s r}{\tan \beta} \sin^2(\phi + \phi_1) - \frac{K_2 s_1 r}{\tan \beta} \sin(\phi + \phi_1) \cos(\phi + \phi_1) \right] d\phi \\ dF_y = \left[ \frac{K_s r}{\tan \beta} \sin(\phi + \phi_1) \cos(\phi + \phi_1) + \frac{K_2 s_1 r}{\tan \beta} \sin^2(\phi + \phi_1) \right] d\phi \quad (6)$$

Fig. 3 (b)는 절삭날이 운동하면서 연속적으로 생성되는 표면을 나타내며  $\phi_2$ 는 절삭날이 절삭개시(즉, 반경방향 절삭깊이가 0일때)로부터 반경방향 절삭깊이  $a$ 만큼 절삭할때까지의 공구의 회전각이며,  $\delta$ 는 절삭날이 축방향 절삭깊이  $b$ , 전구간에 걸쳐 절삭할 경우에 대한 공구의 회전각이다. 절삭날의 임의의 위치에 따른 각  $\alpha$ 의 범위는 각각 A[0,  $\phi_2$ ], B[ $\phi_2$ ,  $\delta$ ] 및 C[ $\delta$ ,  $\delta + \phi_2$ ]가 된다. 그러나 A, B, C영역에서 절삭날의 범위는 A[0,  $a$ ], B[0,  $\phi_2$ ] 및 C[ $a - \delta$ ,  $\phi_2$ ]와 같이 된다. 따라서 절삭날에 따른 절삭력을 위의 범위에 따라 적분하면, 각 영역에서의 절삭력은 다음과 같이 구할 수 있다.

A

$$F_x = \frac{-s_1 r}{2 \tan \beta} \left[ -K a + \frac{K}{2} \sin 2(a + \phi_1) - \frac{K_1}{2} \sin 2 \phi_1 \right. \\ \left. - \frac{K_2}{2} \cos 2(a + \phi_1) + \frac{K_2}{2} \cos 2 \phi_1 \right]$$

$$F_y = \frac{s_1 r}{2 \tan \beta} \left[ -\frac{K}{2} \cos 2(a + \phi_1) + \frac{K}{2} \cos 2 \phi_1 + K_2 a \right. \\ \left. - \frac{K_2}{2} \sin 2(a + \phi_1) + \frac{K_2}{2} \sin 2 a \right]$$

B

$$F_x = \frac{-s_1 r}{2 \tan \beta} \left[ -K \phi_2 - \frac{K}{2} \sin 2 \phi_1 + \frac{K_2}{2} + \frac{K_2}{2} \cos 2 \phi_1 \right]$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left[ -\frac{K}{2} \cos 2(\phi_2 + \phi_1) + \frac{K}{2} \cos 2\phi_1 + K_2 \phi_2 + \frac{K_2}{2} \sin 2\phi_2 \right]$$

C

$$F_x = \frac{-s_t r}{2 \tan \beta} \left[ -K(\phi_2 - \alpha + \delta) - \frac{K}{2} \sin 2(\alpha - \delta + \phi_1) + \frac{K_2}{2} + \frac{K_2}{2} \cos 2(\alpha - \delta + \phi_1) \right]$$

$$F_y = \frac{s_t r}{2 \tan \beta} \left[ \frac{K}{2} - \frac{K}{2} \cos 2(\alpha - \delta + \phi_1) + K_2(\phi_2 - \alpha + \delta) + \frac{K_2}{2} \sin 2(\alpha - \delta + \phi_1) \right] \quad (7)$$

### 3. 절삭실험

절삭실험에 사용하기 위하여 지름 8mm, 날수 4개이고 헬릭스각이 각각 20°, 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀 공구를 제작하였고 공구의 성능을 개선하기 위하여 TiAlN 코팅을 하였으며 피삭재로는 Inconel 718을 소재하였다.

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

절삭실험조건으로는 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. 반경방향 절삭력  $F_x$ 의 경우 헬릭스각이 증가할수록 크게 나타나며, 이송방향 절삭력 성분  $F_1$ 와 축방향 절삭력  $F_2$ 도 동일하게 나타난다.

Table 1 Average cutting force, F(N)

	$F_x$	$F_y$	$F_z$	F
H.A=20°	-166.9	-107.9	-25.4	200.4
H.A=30°	-249.4	-126.3	-52.5	284.4
H.A=40°	-261.3	-126.7	-67.6	298.2
H.A=50°	-267.5	-134.9	-94.8	314.2

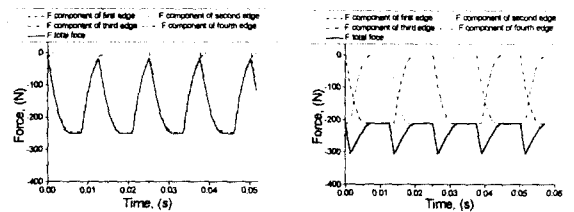
실험결과로부터  $K_t$ 와  $K_r$ 을 Table 2와 같이 구할 수 있다.  $K_t$ 와  $K_r$ 은 식(7)에 실제로 측정된 절삭력  $F_x$ 와  $F_y$ 를 대입하여 만들어진 연립방정식으로부터 구해질 수 있

다. 이들 K값은 공구의 기하학적인 형상과 재질, 절삭 조건, 피삭재의 재질에 영향을 받는다. 선행연구<sup>(5)</sup>에서 상향절삭시 접선방향과 반경방향 비절삭저항은 헬릭스각에 따라 감소하는 경향을 나타내는 반면 하향절삭시 비절삭저항은 증가하는 경향을 나타내며 상향절삭시 접선방향과 반경방향의 비절삭저항 값 사이에 큰 차이가 없는 반면 하향절삭시는 접선방향의 비절삭저항 값이 반경방향 비절삭저항 값의 59~74%범위의 값을 나타내었다.

Table 2  $K_t$  and  $K_r$  (N/mm<sup>2</sup>)

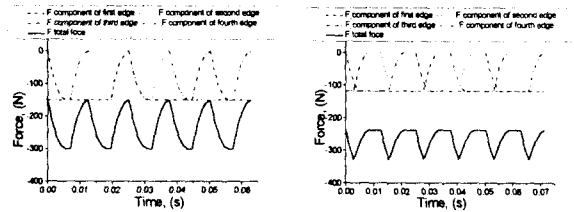
	$K_t$	$K_r$
H.A=20°	1550	910
H.A=30°	1960	1310
H.A=40°	1910	1410
H.A=50°	2140	1590

비절삭저항,  $K_t$ 와  $K_r$ 가 구해지면 절삭 시간에 따라 예측 절삭력은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 공구의 회전과 피삭재의 이송으로 인하여 미면형침두께가 주기적으로 변하고 이에 따라 절삭력이 증가하다가 일정해지고 감소하는 동일한 형태가 반복하게 되며 하나의 절삭날이 절입한 후 또 다른 절삭날이 절입해 들어와 중첩이 일어나게 된다.



(a) Helix angle=20°

(b) Helix angle=30°



(c) Helix angle=40°

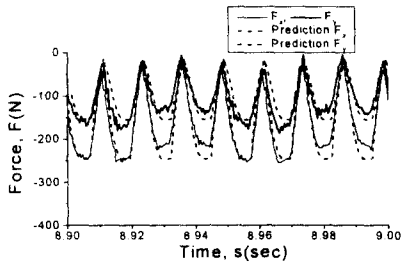
(d) Helix angle=50°

Fig. 4 Predicted cutting forces

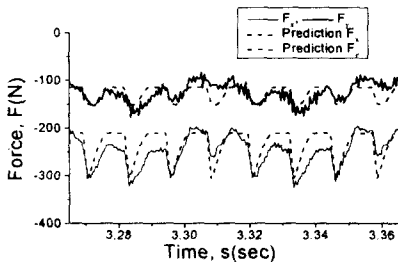
그림에서 보는 바와 같이 헬릭스각이 30°일 경우 20°일 경우보다 절삭력의 진폭이 감소함을 알 수 있다. 헬릭스각이 증가하여 40°일 경우가 되면 다시 진폭은 조금 증가하게 되고 50°일 경우가 되면 감소함을 알 수 있다. 이러한 절삭력의 진폭 정도는 축방향 절삭깊이 a,

경방향절삭깊이  $b$ , 헬릭스각  $\beta$ 에 따라 변하게 된다.

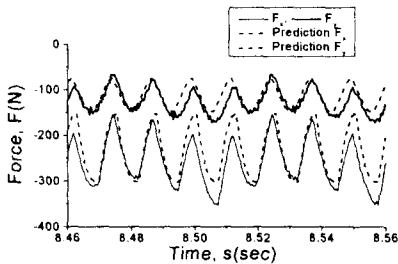
Fig. 5는 절삭력 모델로부터 구한 절삭력과 실제 절삭



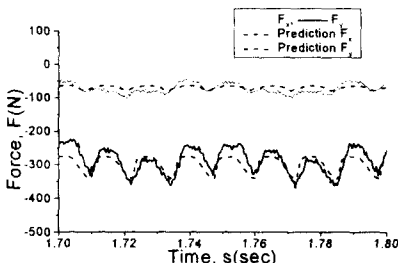
(a) Helix angle=20°



(b) Helix angle=30°



(c) Helix angle=40°



(d) Helix angle=50°

Fig. 5 Cutting force and Predicted cutting force

력을 비교한 것이다. 두 값을 비교해 볼 때 실험에서 구한 절삭력의 진폭이 불규칙하지만 대체로 진폭의 경향과 주기가 일치함을 알 수 있다. 실제 절삭력과 절삭력 모델로부터 구한 절삭력사이의 차이는 공구의 기하

학적인 형상의 불균일로 인한 런아웃(runout), 공구의 처짐 등의 영향이 작용하였기 때문이라고 판단된다. 공구의 형상오차인 런아웃은 중심부에서 날부까지의 반경 차이로 생기며 이로인해 칩의 두께가 변하고 절삭력에도 영향을 끼치게 된다.<sup>(6)</sup>

## 5. 결론

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

(1) 절삭실험으로부터 얻어진 절삭력과 비절삭저항(K) 및 절삭단면적(bh)을 이용한 예측 절삭력값은 거의 일치하였고 헬릭스각이 증가하면서 작용절삭날의 중첩의 영향이 커짐을 알 수 있었다.

(2) 상향절삭시 헬릭스각이 50°에서 접선방향과 반경방향의 비절삭저항이 1530과 1310MPa로 가장 작은 반면 하향절삭시 헬릭스각이 20°에서 접선방향과 반경방향의 비절삭저항이 1550과 910MPa로 가장 작게 나타났다.

(3) Tlusty<sup>(2)</sup>는 접선과 반경방향 비절삭저항의 비를 3:1로 가정하였지만 Inconel 718의 반경방향은 접선방향 비절삭저항에 대해 59~74%의 값을 나타내었다.

## 참고문헌

1. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
2. Tlusty, J., and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21-25, 1975.
3. Montgomery, D., and Altintas, Y., "Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling", Trans of ASME, Vol. 113, pp. 160-168, 1991.
4. Kline, W. A., and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling", Int. J. Mach Tools Des. Res, Vol. 23, No. 2, pp. 123-140, 1983.
5. 이영문, 양승한, 최원식, 이선희, 태원의 "인코넬 718의 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭특성 변화 -I) 상향엔드밀링", 한국정밀공학회, 2000.
6. 이상림, 고성림, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제 16권, 제4호, pp. 229-236, 1999.