

Inconel 718 하향 엔드밀링시 절삭력에 미치는 공구형상오차

이영문(경북대학교), 양승한(경북대학교), 장승일(경북대학교 대학원),
백승기(경북대학교 대학원), 이동식(경북대학교 대학원)

Effects of cutter runout on cutting forces during down-endmilling of Inconel718

Y. M. Lee(Kyungpook Univ), S. H. Yang(Kyungpook Univ), S. I. Jang(Graduate School,
Kyungpook Univ), S. K. Baek(Graduate School, Kyungpook Univ), D. S. Lee(Graduate
School, Kyungpook Univ)

ABSTRACT

In end milling process, the undeformed chip section area and cutting forces vary periodically with phase change of the tool. However, the real undeformed chip section area deviates from the geometrically ideal one owing to cutter runout and tool shape error. In this study, a method of estimating the real undeformed chip section area which reflects cutter runout and tool shape error was presented during down end-milling of Inconel 718 using measure cutting forces. Contrary to the up-end milling the value of radial specific cutting resistance, K_r , becomes larger as the helix angle increases from 30° to 40° and it shows almost same value at 50° . The value of tangential specific cutting resistance, K_t , becomes larger as the helix angle increases same as in up-end milling, the K_r and K_t values show a tendency to decrease with increase of the modified chip section area and this tendency is distinct with helix angle 40° .

Key Words : Down-end milling (하향 엔드밀링), Cutter runout (공구 런아웃), Size effect (치수효과), Undeformed chip section area (미변형칩 단면적), Specific cutting resistance (비절삭 저항)

기호설명

ϕ = instantaneous rotation angle of tool
 β = helix angle
 S_t = feed per tooth
 r = radius of tool
 a = radial depth of cut
 b = axial depth of cut
 h = undeformed chip thickness
 F_r = radial cutting force component
 F_t = tangential cutting force component
 K_r = radial specific cutting resistance
 K_t = tangential specific cutting resistance

1. 서론

엔드밀링에서의 하향절삭은 공구의 회전방향과 테이블의 이송방향이 같은 것으로 칩형성 과정이 상향절삭과 반대이다.⁽¹⁾

상향절삭에서는 절삭초기 미변형칩 두께가 매우 작기 때문에 절삭이 즉시 이루어지지 않고 미끄럼이 발생하며 미변형칩 두께가 최소절삭깊이 이상되었을 때 비로소 절삭이 이루어지나 하향절삭은 가공물을 누르면서 절삭하므로 미끄럼 없이 즉시 절삭이 이루어진다.

이러한 절삭과정의 특성으로 하향절삭은 상향절삭에 비해 절삭저항이 작고, 우수한 표면조도를 얻을 수 있어 최근 하향절삭 방식이 선호되고 있다.⁽²⁾

엔드밀 가공은 금형가공 등 다양한 형상가공에 유용하며 고정밀도의 가공이 이루어져야 하나 공구의 런아웃으로 이로 인해 칩의 두께가 변하고 절삭력에도 영향을 끼치게 되므로 정밀도에 큰 영향을 미친다.

Kline과 Devor⁽²⁾는 커터와 공작물 휨을 고려한 절삭력 예측모델을 제시하였으며, 스펀들의 회전중심과 공구의 회전 중심이 일치하지 않는 편심을 고려한 절삭력 예측 모델을 제시하였다.

본 논문에서는 앞서 제시된 상향 엔드밀링 절삭에 대한 연구⁽⁴⁾와 같은 방법으로 하향 엔드밀링 절삭시 공구 중심부에서 날부까지의 반경차로 생기는 공구런아웃의 영향을 고려한 수정 미변형칩 단면적을 이용해 비절삭저항값의 특성을 알아보고자 한다.

2. 하향 엔드밀링모델

Fig. 1은 4날 엔드밀에 의한 하향 엔드밀링 절삭시 공구축에 수직인 단면을 나타낸 것으로 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구가 절삭날 당 S_t 만큼 이송하면서 회전할 때의 공구와 피삭재 사이의 기하학 관계에 의해 한 개의 절삭날에 의해 제거되는 미변형칩의 단면을 나타낸 것으로 그림에서 ϕ 는 기준 위치(O)로부터 공구의 회전각을 나타내고, h 는 회전각 ϕ 일 때 절삭날 경로의 반경방향 길이차로서 절삭공구의 반경방향 이송량 즉, 미변형칩 두께를 나타낸다.

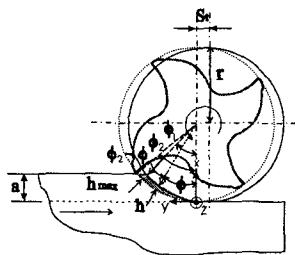


Fig. 1 Cutting model of down-end milling

식(1)은 h_{max} 를, 식(2)는 그 때의 회전각 ϕ_1 을 나타내며, 식(3)은 한 날이 회전각 0으로 부터 시작하여 피삭재에서 벗어날 때의 회전각 ϕ_2 를 나타내고 있다. 여기서 r 은 공구반경이다.

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

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

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

절삭력은 비절삭저항과 미변형칩 단면적의 곱으로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾ 여기서 F_r 과 F_t 는 절삭력성분을 K_r 과 K_t 는 비절삭저항을, A 는 미변형칩 단면적을 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_r &= K_r \cdot A \\ F_t &= K_t \cdot A \end{aligned} \quad (4)$$

한편 미소 미변형칩 단면적은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

Fig. 2는 미변형칩 단면적을 구하기 위한 미변형칩 두께 h 와 미소절삭폭 dz 를 나타낸 것이다. 그림에서 b 는 축방향 절삭깊이, β 는 엔드밀의 헬릭스각을 나타낸다.

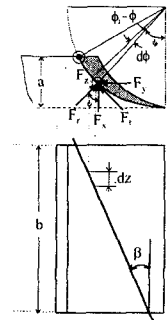


Fig. 2 Coordinate system for down-end milling

미변형칩두께 h 의 결정을 위해 미변형칩의 단면을 Fig. 3과 같이 실제 미변형의 칩의 면적과 등가인 삼각형으로 가정하여 반경방향 이송 h 는 Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 날이 기준 위치로부터 $\phi_2 - \phi_1$ 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식(6)으로, Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 $\phi_2 - \phi_1$ 에서 ϕ_2 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식(7)과 같은 비례식이 성립한다. 또한 미소절삭면적의 높이 h 에 대한 절삭폭 dz 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

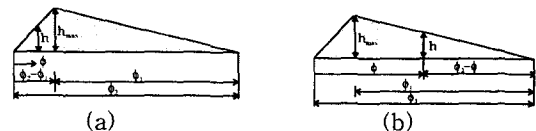


Fig. 3 Spread undeformed chip cross section

$$h = \frac{h_{max}}{\phi_2 - \phi_1} \phi \quad (6)$$

$$h = \frac{h_{\max}(\Phi_2 - \Phi)}{(\Phi_1)} \quad (7)$$

$$dz = \frac{r}{\tan\beta} d\Phi \quad (8)$$

Fig. 4는 임의의 각 Φ 에서 날의 위치에 따른 절삭날 작용구간을 $[0, \Phi_2 - \Phi_1]$, $[\Phi_2 - \Phi_1, \Phi_2]$, $[\Phi_2, \Phi_3]$, $[\Phi_3, \Phi_4]$ 및 $[\Phi_4, \Phi_5]$ 의 다섯 구간으로 나타낸 것이다.

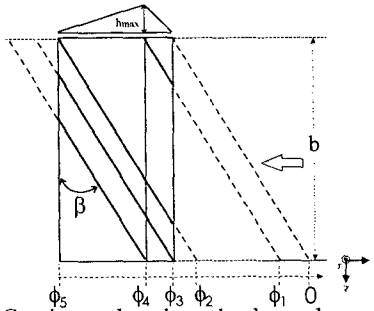


Fig. 4 Cutting edge length depends on cutting edge position

Φ_3 는 식(9)로 표시할 수 있으며, $\Phi_4 = \Phi_3 + \Phi_2 - \Phi_1$, $\Phi_5 = \Phi_3 + \Phi_2$ 의 관계가 성립한다.

$$\Phi_3 = \frac{b \tan\beta}{r} \quad (9)$$

식(6), (7), (8)을 식(5)에 대입하면 날의 위치에 따른 미변형칩 단면적을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$[0, \Phi_2 - \Phi_1]$ 구간

$$A = \int_0^{\Phi} \frac{h_{\max}\Phi}{\Phi_2 - \Phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi \quad (10-1)$$

$[\Phi_2 - \Phi_1, \Phi_2]$ 구간

$$A = \int_{\Phi_2 - \Phi_1}^{\Phi} \frac{h_{\max}(\Phi_2 - \Phi)}{\Phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi + \int_0^{\Phi_2 - \Phi_1} \frac{h_{\max}\Phi}{(\Phi_2 - \Phi_1)} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi \quad (10-2)$$

$[\Phi_2, \Phi_3]$ 구간

$$A = \int_{\Phi_2 - \Phi_1}^{\Phi_2} \frac{h_{\max}(\Phi_2 - \Phi)}{\Phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi + \int_0^{\Phi_2 - \Phi_1} \frac{h_{\max}\Phi}{(\Phi_2 - \Phi_1)} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi \quad (10-3)$$

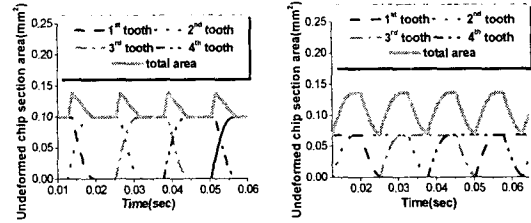
$[\Phi_3, \Phi_4]$ 구간

$$A = \int_{\Phi_2 - \Phi_1}^{\Phi_2} \frac{h_{\max}(\Phi_2 - \Phi)}{\Phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi + \int_0^{\Phi_2 - \Phi_1} \frac{h_{\max}\Phi}{(\Phi_2 - \Phi_1)} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi \quad (10-4)$$

$[\Phi_4, \Phi_5]$ 구간

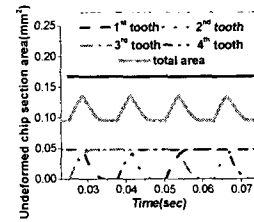
$$A = \int_{\Phi - \Phi_3}^{\Phi_2} \frac{h_{\max}(\Phi_2 - \Phi)}{\Phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\Phi \quad (10-5)$$

Fig. 5는 식(10-1)~(10-5)를 이용하여 Table 1에 주어진 절삭조건에 상응하는 미변형칩 단면적의 변화를 나타낸 것이다.



(a) H.A.30°

(b) H.A.40°



(c) H.A.50°

Fig. 5 Undeformed chip section area(mm²) for down-end milling

Table 1. Cutting conditions

Diameter of tool (mm)	8
Radial depth of cut, a (mm)	1
Axial depth of cut, b (mm)	12
Cutting velocity, V (m/min)	30
Helix angle, β (°)	30, 40, 50
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, S _t (mm)	0.06

그림에서 보는 바와 같이 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 그림에서 보는 바와 같이 헬릭스각 40°인 경우 진폭이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 중첩된 절삭단면적이 헬릭스각뿐만 아니라 절삭조건인 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이, 절삭날당 이송등의 복합작용에 의해 결정되어지기 때문이다.

Table 2는 하나의 절삭날이 작용해서 생성되는 최대 미변형칩 단면적과 네 개의 절삭날이 모두 작용하였을 때 생기는 중첩을 고려한 최대 미변형칩 단면적을 나타낸 것이다.

Table 2. Undeformed chip area(mm²)

Helix angle (°)	30	40	50
Max Area (one tooth)	0.0919	0.0679	0.0478
Max Area (total)	0.1378	0.1358	0.1357

3. 절삭실험

절삭실험에 사용한 공구는 날수 4, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀이었으며, 피삭재는 Inconel 718 이었다. 절삭실험 조건은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

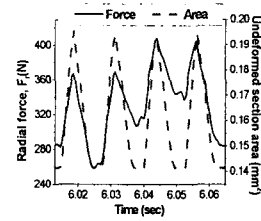
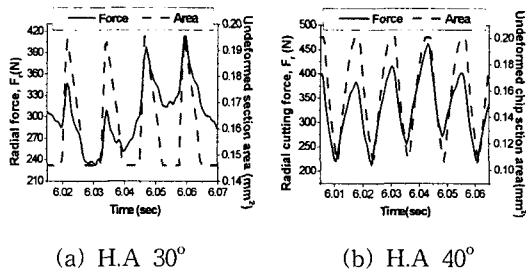
절삭력 성분을 구하기 위해서 공구동력계(Kistler, 9273)로부터 측정된 절삭력 신호를 전하 증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 A/D변환기(Data translation, DT3831-G)로 보내어 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

절삭실험시 공작기계의 주축회전속도는 1194 rpm (절삭속도 30m/min)이었으며, 절삭력 성분은 샘플링 주파수 2048Hz로 획득되었다. 따라서 샘플링 시간간격은 0.4883ms이며, 이에 대응되는 공구의 회전각은 3.497°이며 공구 1회전당 획득되는 데이터의 수는 대략 103개이었다.

4. 수정 미변형칩 단면적의 결정

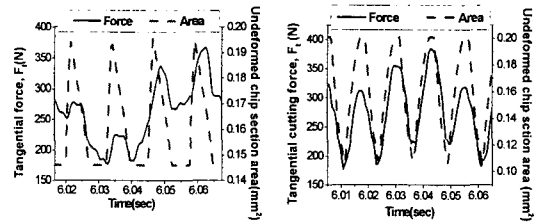
4.1 공구 런아웃의 영향을 배제한 이상적인 미변형칩 단면적의 변화

Fig. 6 (a), (b) 및 (c)는 공구 형상과 절삭조건에 의해 계산되는 이상적인 미변형칩 단면적(Fig. 5)과 공구동력계로부터 측정된 절삭력 성분(F_x , F_y)들을 각 주기의 최대값 및 최저값을 쉽게 찾을 수 있도록 500Hz low pass filter로 여과한 후 반경방향(F_r)과 접선방향(F_t)의 힘으로 변환하여 시간과 함께 나타낸 것이다.



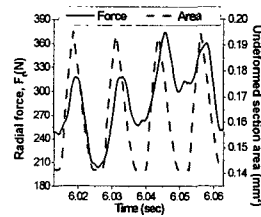
(c) H.A 50°

Fig. 6-1 Undeformed chip section area(mm²) and radial cutting force, F_r (N)



(a) H.A 30°

(b) H.A 40°



(c) H.A 50°

Fig. 6-2 Undeformed chip section area(mm²) and tangential cutting force, F_t (N)

절삭력과 절삭에 참여하는 미변형칩단면적이 비례관계에 있다고 가정하면, 이상적인 경우 획득된 절삭력의 주기와 변동 진폭이 일정한 절삭력을 상상할 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 절삭력의 주기와 기하학적인 미변형칩단면적의 변동주기는 비교적 잘 일치하고 있으나 각 날에 대한 절삭력의 크기는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 절삭에 참여하는 실제 절삭단면적과 기하학적으로 계산되는 이상적인 절삭단면적 사이에 불가피하게 존재하는 차이에 기인한 것으로 추정된다.

Kline 과 Devor⁽²⁾는 이와 같은 차이가 주로 머시닝센터에서 공구홀더 중심과 엔드밀 중심의 불일치로 인해 발생하는 편심에 따른 런아웃에 기인한다고 보고한 바있다.

4.2 공구 런아웃의 영향을 고려한 미변형칩 단면적의 변화

Fig. 7은 여과된 절삭력과 그 파형을 기하학적으로 계산되는 미변형칩 단면적을 반영하여 수정된 미변형칩 단면적을 나타낸 것이다.

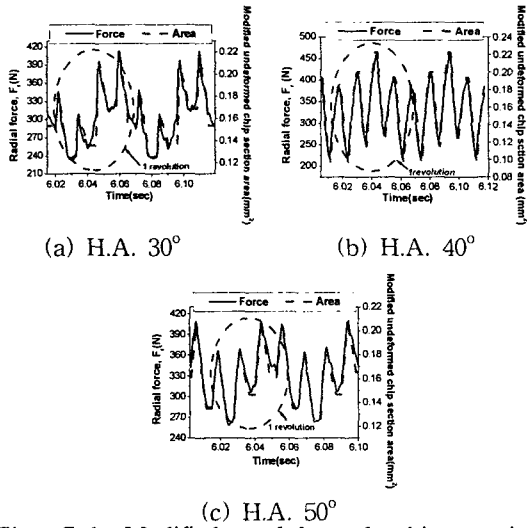


Fig. 7-1 Modified undeformed chip section area(mm²) and radial cutting force, F_r(N)

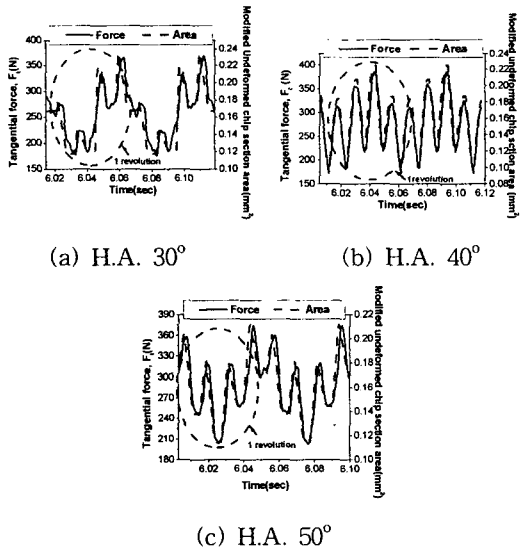


Fig. 7-2 Modified undeformed chip section area(mm²) and tangential cutting force, F_t(N)

수정 미변형칩 단면적을 구하는 절차는 실험에서 측정된 주절삭력 성분을 한 주기에 대해서 최고점과 최저점 각각 4개의 평균값을 구하고 최

고, 최저점들이 각각의 평균점에서 떨어져있는 정도를 이상적인 미변형칩 단면적에 그대로 적용 시킴으로써 수정 미변형칩 단면적을 구하였다.

그림에서 보는 바와 같이 1회전에 대해 공구 형상오차 및 공구 런아웃이 고려된 수정 미변형칩 단면적의 면적변화는 다음회전에 대해서도 거의 같은 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 수정 미변형칩 단면적을 사용하였을 경우 훨씬 더 절삭력의 주기와 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 비절삭저항 특성을 구하기 위해 계산된 반경방향과 접선방향 절삭력 성분을 본 논문에서 결정된 수정 미변형칩 단면적으로 나누어 비절삭저항 K_r과 K_t를 구하였다.

Fig. 8은 측정된 주절삭력 성분을 수정 미변형칩 단면적으로 나누어 구해지는 비절삭저항 K_r과 K_t를 나타낸 것으로, 비교적 그 값의 분포가 큼을 알 수 있다.

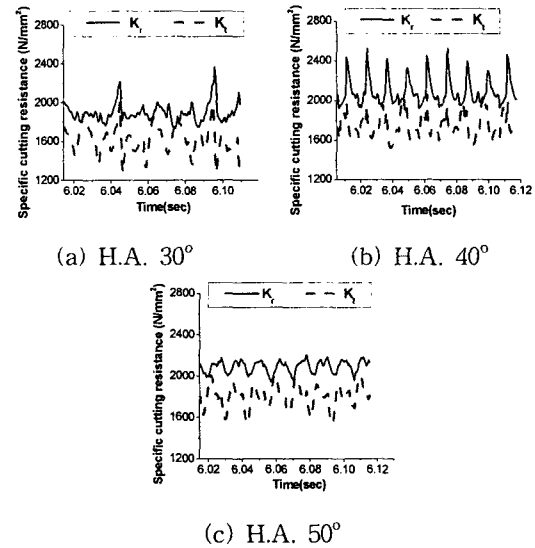
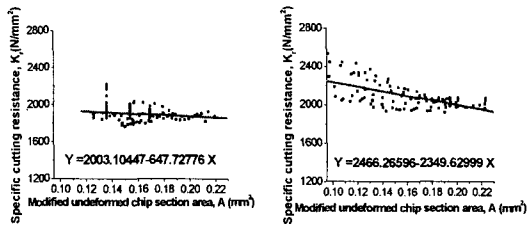


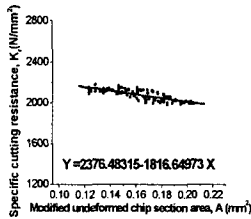
Fig.8 Specific cutting resistance, K_r&K_t(N/mm²)

Fig. 9는 Fig. 8의 자료를 사용하여 수정 미변형칩 단면적 크기에 따른 비절삭저항 K_r과 K_t의 변화특성을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 비절삭저항 K_r, K_t는 수정 미변형칩 단면적이 커짐에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있으며, 헬릭스각이 작아질수록 이 경향은 크게 나타나고 있으며, 헬릭스각이 40° 일때 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 절삭에서의 치수효과에 기인한 것으로 판단된다.

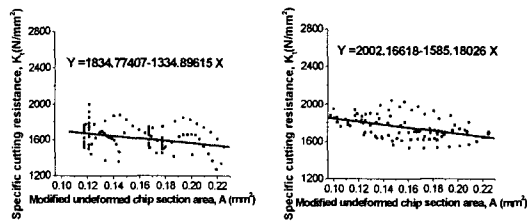


(a) H.A. 30° (b) H.A. 40°

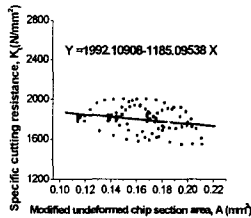


(c) H.A. 50°

Fig. 9-1 Modified undeformed chip section area(mm²)vs. radial sepcific cutting resistance, Kr(N/mm²)



(a) H.A. 30° (b) H.A. 40°



(c) H.A. 50°

Fig. 9-2 Modified undeformed chip section area(mm²) vs. tangential sepcific cutting resistance, Kt(N/mm²)

Table 3은 비절삭저항 Kr과 Kt를 헬릭스각도에 따라 나타낸 것이다.

Table 3 Specific cutting resistance

Helix angle (°)		30	40	50
Kr (N/mm ²)	Max.	2220.18	2527.62	2176.89
	Avg.	1898.83	2088.25	2084.69
	Min.	1765.54	1918.00	1987.93
Kt (N/mm ²)	Max.	1997.92	2041.99	2003.52
	Avg.	1619.86	1747.11	1801.38
	Min.	1271.82	1525.88	1550.53

표에서 보는 바와 같이 비절삭저항 Kr의 평균값은 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 증가하였다가 헬릭스각이 50°에선 비슷한 값을 보여주고 있으며 Kt의 평균값은 헬릭스각이 30°에서 40°, 50°로 증가함에 따라 값이 증가하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Inconel718의 하향 엔드밀링 시 한 개의 절삭날에 의해 제거되는 미변형칩 단면(端面)과 등가인 삼각형을 도입하여 절삭시간에 따라 주기적으로 변화하는 이상적인 미변형칩 단면적(斷面積)을 구하였다.

측정된 주절삭력 성분을 이용하여 반경방향과 접선방향의 힘을 구하였으며 공구 런아웃을 고려한 수정 미변형칩 단면적을 정의하고, 이를 이용해 비절삭저항 Kr과 Kt를 구하였다.

비절삭저항 Kr의 평균값은 상향 엔드밀링과는 달리 헬릭스각 30°에서 40°로 커짐에 따라 증가하였고 50°의 경우는 거의 40°와 같았으며, 전반적으로 상향 엔드밀링과 비슷한 값을 나타내었다. 한편 Kt의 평균값은 상향엔드밀링에 비해 전반적으로 낮으며, 헬릭스각이 커짐에 따라 증가하였다.

비절삭저항 Kr과 Kt는 수정 미변형칩 단면적이 커짐에 따라 작아지는 경향을 나타내며 40°에서 이러한 경향이 크게 나타나고 있다.

참고문헌

1. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of the ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
2. Kline, W. A. and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23 No. 2/3, pp123-140, 1983.
3. Wang, J. J and Liang, S. Y., "Chip Load Kinematics in Milling with Radial Cutter Runout," J. ASME, Vol. 118, pp. 111-116, 1996.
4. 이영문, 양승한, 장승일, 백승기, 김선일, "Inconel 718 상향 엔드밀링시 절삭력에 미치는 공구형상오차," 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, 2002.