

## Inconel 718 상향 엔드밀링시 절삭력에 미치는 공구형상오차의 영향

이영문\*, 양승한<sup>+</sup>, 장승일<sup>++</sup>, 백승기<sup>++</sup>, 김선일<sup>++</sup>, 이동식<sup>++</sup>

(논문접수일 2002. 7. 9, 심사완료일 2002. 8. 30)

### Effects of Cutter Runout on Cutting Forces in Up-endmilling of Inconel 718

Young-Moon Lee\*, Seung-Han Yang<sup>+</sup>, Seung-Il Jang<sup>++</sup>, Seung-Ki Baek<sup>++</sup>, Sun-Il Kim<sup>++</sup>, Dong-Sik Lee<sup>++</sup>

#### Abstract

In an end milling process, the undeformed chip section area and cutting forces vary periodically with the phase change of the tool. However, the real undeformed chip section area deviates from the geometrically ideal one owing to the cutter runout and tool shape error. In the current study, a method of estimating the real undeformed chip section area which reflects the cutter runout and tool shape error is presented during up-end milling processes of Inconel 718. The specific cutting forces,  $K_r$  and  $K_t$  are defined as the radial and tangential cutting forces divided by the modified chip section area, respectively. Both of the  $K_r$  and  $K_t$  values become smaller as the helix angle increases from  $30^\circ$  to  $40^\circ$ . Whereas they become larger as the helix angle increases from  $40^\circ$  to  $50^\circ$ . The  $K_r$  and  $K_t$  values show a tendency to decrease with increase of the modified chip section area.

**Key Words :** Up-end milling(상향 엔드밀링), Cutter runout(공구 런아웃), Size effect(치수효과), Undeformed chip section area(미변형 칩단면적), Specific cutting force(비절삭력)

### 1. 서론

공구의 런아웃은 다인공구에 의한 절삭공정에서 나타나는 일반적인 현상이며, 특히 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되

고 있는 단속절삭공정인 밀링가공시 제품의 정밀도, 표면 거칠기 및 절삭특성을 저하시킨다.

Martellotti는 밀링가공면의 이론적인 표면거칠기 모델을 제시하였으나 실제 가공표면에서는 공구형상오차에 기인한

\* 주저자, 경북대학교 기계공학부 (ymlee@knu.ac.kr)  
주소: 702-701 대구시 북구 산격동 1370번지, Tel: 053-950-5574  
+ 경북대학교 기계공학부  
++ 경북대학교 대학원 기계공학과

불규칙한 표면거칠기 특성이 나타나고 있음을 보인다 있다<sup>(1)</sup>. National Twist Drill사에서는 밀링가공에 대한 폭넓은 연구를 통하여 바람직한 가공이 이루어지기 위해서는 런아웃의 최대값이 0.001 in 이하로 제한되어야함을 강조하였다<sup>(2)</sup>.

밀링공정에서의 절삭력에 대한 기하학적 모델제시와 절삭력에 미치는 런아웃의 영향을 밝히려는 연구가 보고된 바 있으나 대부분의 연구에서는 공구 자체의 오차와 공구 홀더 및 스피들 오차 등 복합적 작용에 대한 해석의 어려움으로 인해 공구 런아웃을 배제한 절삭력 예측 모델제시와 이에 대한 해석이 이루어지고 있는 실정이다<sup>(3-5)(6)</sup>.

본 논문에서는 상향 엔드밀링 공정시 공구 런아웃을 고려한 절삭력 모델을 제시하고, Inconel 718에 대한 절삭실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토하였다.

## 2. 상향 엔드밀링모델

Fig. 1은 4날 엔드밀에 의한 상향 엔드밀링 절삭시 공구 축에 수직인 단면을 나타낸 것으로 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구가 절삭날당  $S_t$ 만큼 이송하면서 회전할 때의 공구와 피삭재 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 음영부는 한 개의 절삭날에 의해 제거되는 미변형칩의 단면을 나타낸 것으로  $\phi$ 는 기준 위치(O)로부터 공구의 회전각을 나타내고,  $h$ 는 회전각  $\phi$ 일 때 절삭날 경로 사이의 반경방향 길이차로서 미변형칩두께를 나타낸다.

식 (1)은 절삭날 경로상의 최대 미변형 칩두께  $h_{max}$ 를, 식 (2)는 그 때의 회전각  $\phi_1$ 을 나타내며, 식(3)은 한 날이 회전각 0으로 부터 시작하여 피삭재에서 벗어날 때의 회전각  $\phi_2$ 를 나타내고 있다. 여기서  $r$ 은 공구반경이며,  $a$ 는 반경방향 절삭깊이를 나타낸다.

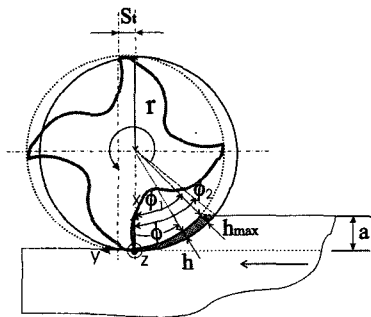


Fig. 1 Cutting model of up end milling

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

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

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

Fig. 2는 상향 엔드밀링시 작용 절삭력성분을 나타내고있다. 그림에서  $F_r$ 과  $F_t$ 는 각각 반경방향과 접선방향 절삭력 성분을 나타내고 있으며, 식 (4)와 같이 반경방향 비절삭력  $K_r$  및 접선방향 비절삭력  $K_t$ 와 미변형 칩단면적  $A$ 의 곱으로 나타낼 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$\begin{aligned} F_r &= K_r \cdot A \\ F_t &= K_t \cdot A \end{aligned} \quad (3)$$

또한 미소 미변형칩 단면적  $dA$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dA = h dz \quad (4)$$

식 (5)에서  $dz$ 는 미소절삭폭을 나타내며, 그림에서  $b$ 는 축방향 절삭깊이,  $\beta$ 는 헬릭스각을 나타낸다.

본 논문에서는 절삭날 경로에 따라 달라지는 미변형 칩두께  $h$ 의 결정을 위하여 Fig. 1의 음영부와 등가인 삼각형을 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 설정하였다. 미변형 칩두께  $h$ 는 Fig. 3(a)에서와 같이 날이 기준 위치(O)로부터  $\phi_1$ 사이의 임의의 각도일 때는 식 (6)으로,  $\phi_1$ 에서  $\phi_2$ 사이일 때는 식

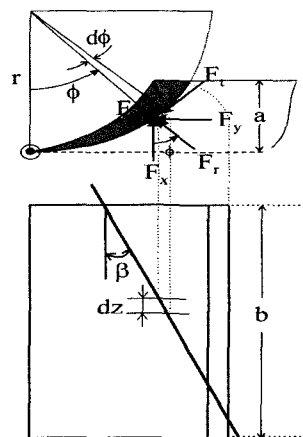


Fig. 2 Cutting force components in up-end milling

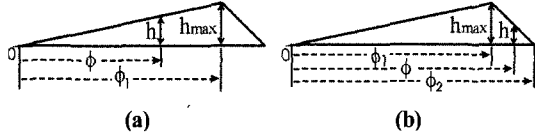


Fig. 3 Spread undeformed chip cross section

(7)과 같이 나타낼수 있다(Fig. 3(b)). 한편 절삭폭 dz는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{h_{\max}}{\phi_1} \phi \quad (5)$$

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

$$dz = \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (7)$$

Fig. 4는 임의의 각  $\phi$ 에서 날의 위치에 따른 절삭날 작용 구간을  $[0, \phi_1]$ ,  $[\phi_2, \phi_3]$ ,  $[\phi_2, \phi_3]$ ,  $[\phi_3, \phi_4]$  및  $[\phi_4, \phi_5]$ 의 다섯 구간으로 나타낸 것이다.

$\phi_3, \phi_4$  및  $\phi_5$ 는 식 (9)와 같이 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \frac{b \tan \beta}{r} \\ \phi_4 &= \phi_3 + \phi_1 \\ \phi_5 &= \phi_3 + \phi_2 \end{aligned} \quad (8)$$

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

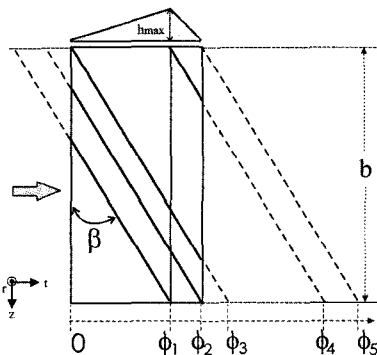


Fig. 4 Cutting edge length depends on cutting edge position

$[0, \phi_1]$ 구간

$$A = \int_0^{\phi} \frac{h_{\max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (8-1)$$

$[\phi_1, \phi_2]$ 구간

$$\begin{aligned} A &= \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\ &+ \int_0^{\phi_1} \frac{h_{\max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \end{aligned} \quad (8-2)$$

$[\phi_2, \phi_3]$ 구간

$$\begin{aligned} A &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\ &+ \int_0^{\phi_1} \frac{h_{\max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \end{aligned} \quad (8-3)$$

$[\phi_3, \phi_4]$ 구간

$$\begin{aligned} A &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\ &+ \int_{\phi - \phi_3}^{\phi_1} \frac{h_{\max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \end{aligned} \quad (8-4)$$

$[\phi_4, \phi_5]$ 구간

$$A = \int_{\phi - \phi_3}^{\phi_2} \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (8-5)$$

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

그림에서 보는 바와 같이 개개의 날에 의한 미변형칩 단면적의 변화는 30°인 경우가 가장 크며, 40°, 50° 순으로 작아지지만 Table 1에 나타낸 절삭조건 하에서, 각 날의 중첩

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, $\beta$ (°)	30, 40, 50
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, St (mm)	0.06

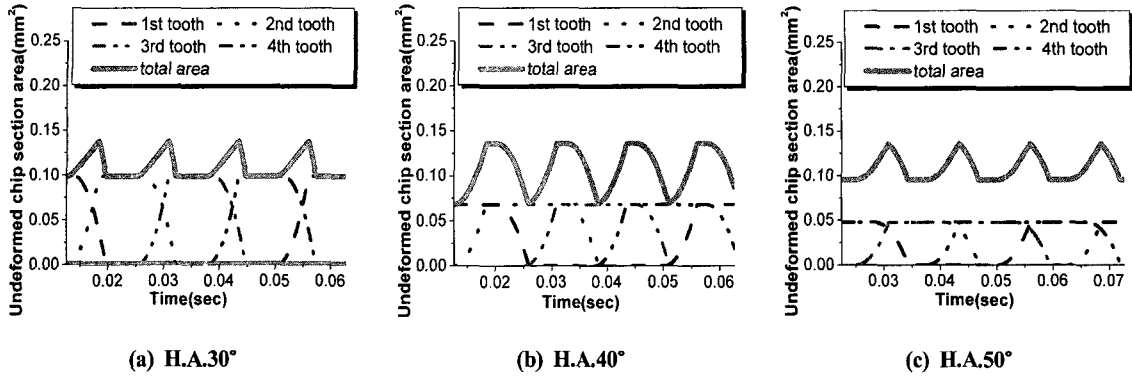


Fig. 5 Undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) depending on time

Table 2 Undeformed chip area(mm<sup>2</sup>)

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

에 의한 절삭단면적의 변화는 헬릭스각 40°인 경우 진폭이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 증첩된 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 증첩을 고려한 최대 미변형칩 단면적을 나타낸 것이다.

### 3. 절삭실험

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

절삭력 성분을 구하기 위해서 공구동력계(Kistler, 9273)로부터 측정된 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, A/D변환기(Data translation, DT3831-G)를 거쳐 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

절삭실험시 공작기계의 주축회전속도는 1194 rpm(절삭속도 30m/min)이었으며, 절삭력 성분은 샘플링 주파수 2048Hz 로 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. 6은 공구 형상과 절삭조건에 의해 계산되는 이상적인 미변형칩 단면적(Fig. 5)과 공구동력계로부터 측정된 절삭력 성분(F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>)들을 각 주기의 최대값 및 최저값을 쉽게 찾을 수 있도록 500Hz low pass filter로 여과한 후 반경방향(F<sub>r</sub>)과 접선방향(F<sub>t</sub>)의 힘으로 변환하여 절삭시간에 따라 나타낸 것이다.

절삭력과 절삭에 참여하는 미변형칩단면적이 비례관계에 있다고 가정하면, 이상적인 경우 획득된 절삭력의 주기와 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 절삭단면적사이에 불가피하게 발생하는 차이에 기인한 것으로 추정된다.

Kline 과 Devor는 이와 같은 차이가 주로 머시닝센터에서 공구홀더 중심과 엔드밀 중심의 불일치로 인해 발생하는 편심에 따른 런아웃에 기인한다고 보고한 바 있다<sup>(5)</sup>.

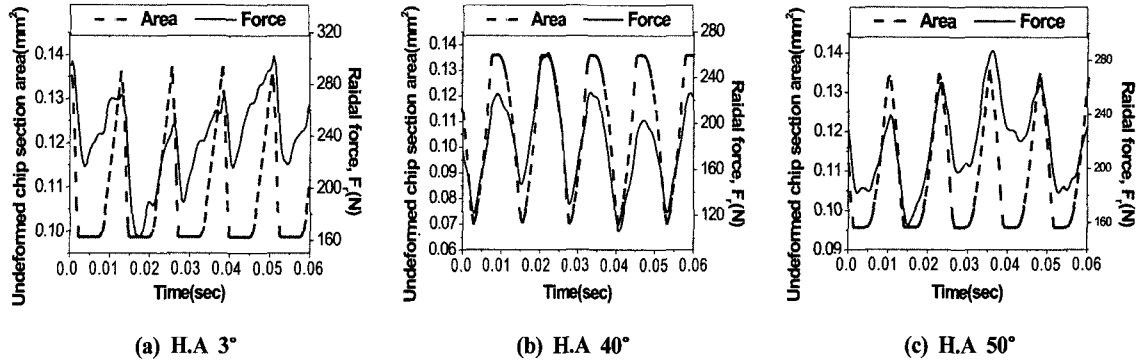


Fig. 6-1 Undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) and radial cutting force, F<sub>r</sub>(N) depending on time

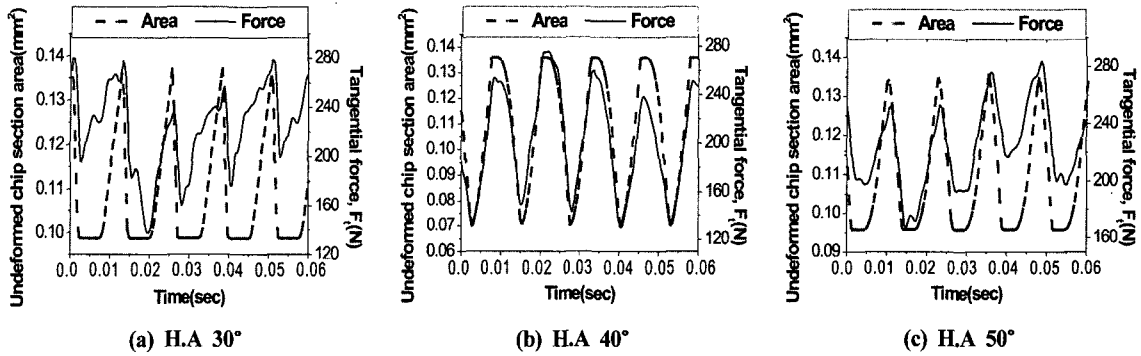


Fig. 6-2 Undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) and tangential cutting force, F<sub>t</sub>(N) depending on time

#### 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.

수정 미변형칩 단면적을 구하는 절차는 실험에서 측정된 주절삭력 성분을 한 주기에 대해서 최고점과 최저점 각각 4개의 평균값을 구하고 최고, 최저점들이 각각의 평균점에서 떨어져있는 정도를 이상적인 미변형칩 단면적에 비례하여 반영시킴으로써 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. 이는 제시된 모델의 타당성을 나타내는 것으로 판단된다.

한편 비절삭력 특성을 구하기 위해 계산된 반경방향과 접선방향 절삭력 성분을 본 논문에서 결정된 수정 미변형칩

단면적으로 나누어 비절삭력  $K_r$ 과  $K_t$ 를 구하였다.

Fig. 8은 측정된 주절삭력 성분을 수정 미변형칩 단면적으로 나누어 구해지는 비절삭력  $K_r$ 과  $K_t$ 를 나타낸 것으로, 비교적 그 값의 분포가 크을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 자료를 사용하여 수정 미변형칩 단면적 크기에 따른 비절삭력  $K_r$ 과  $K_t$ 의 변화특성을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 반경방향 비절삭력  $K_r$ 은 수정 미변형칩 단면적이 커짐에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있으며, 헬릭스각이 작아질수록 이 경향은 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 절삭에서의 치수효과에 기인한 것으로 판단된다<sup>(7)</sup>.

Table 3은 비절삭력  $K_r$ 과  $K_t$ 를 헬릭스각도에 따라 나타낸 것이다.

표에서 보는 바와 같이 비절삭력  $K_t$ 의 평균값은 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각이 50°에서 다시 증가하고 있다.

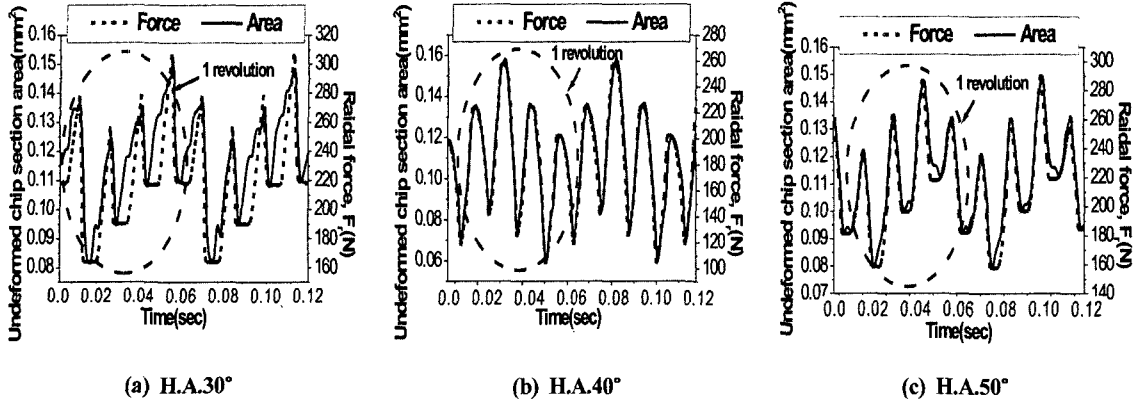


Fig. 7-1 Modified undeformed chip section area( $\text{mm}^2$ ) and radial cutting force,  $F_r(\text{N})$  depending on time

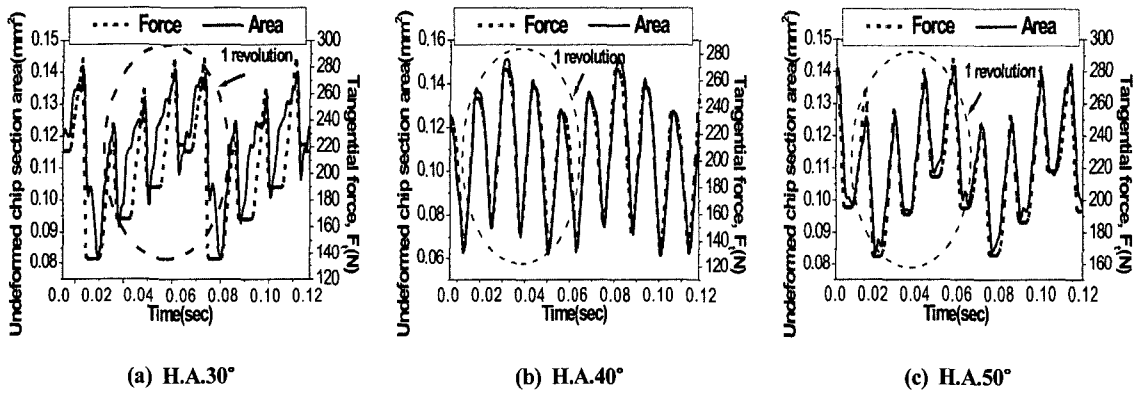


Fig. 7-2 Modified undeformed chip section area( $\text{mm}^2$ ) and tangential cutting force,  $F_t(\text{N})$  depending on time

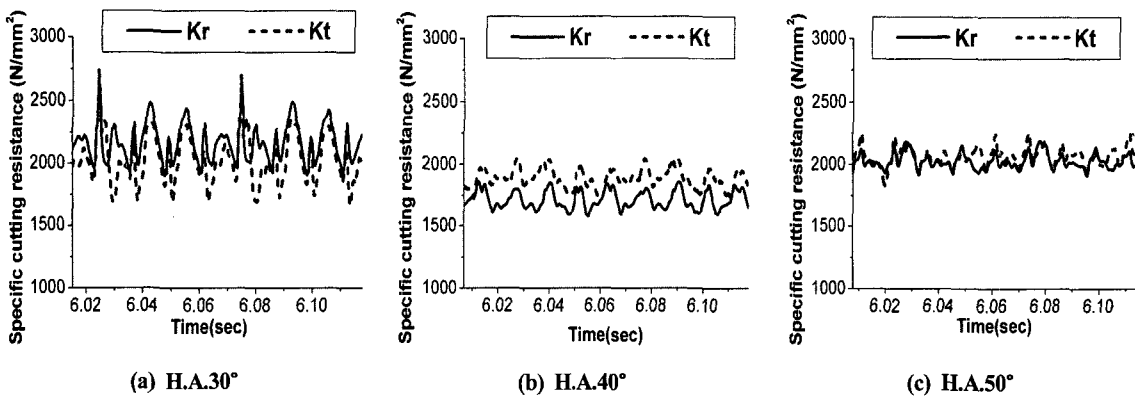


Fig. 8 Specific cutting forces,  $K_r, K_t(\text{N}/\text{mm}^2)$  depending on time

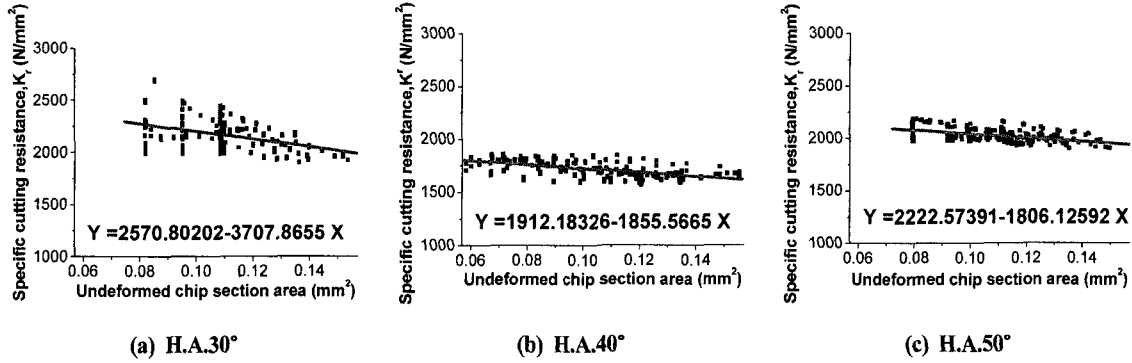


Fig. 9-1 Modified undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>)vs. radial sepcific cutting force,  $K_r(N/mm^2)$

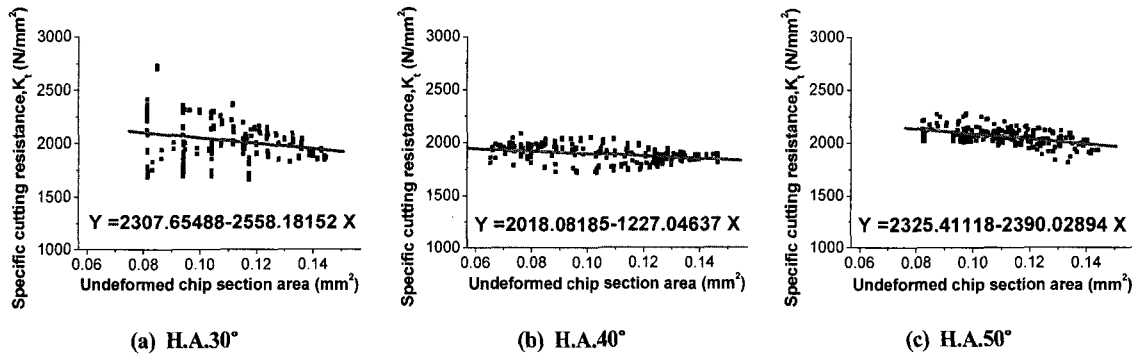


Fig. 9-2 Modified undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) vs. tangential sepcific cutting force,  $K_t(N/mm^2)$

Table 3 Specific cutting forces

Helix angle (°)		30	40	50
$K_r$ (N/mm <sup>2</sup> )	Max.	2701.12	1862.88	2182.22
	Avg.	2205.83	1706.24	1994.87
	Min.	1899.87	1568.66	1901.45
$K_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	Max.	2735.55	2052.30	2260.93
	Avg.	2071.09	1875.53	2062.11
	Min.	1964.70	1718.06	1816.40

### 5. 결론

본 논문에서는 Inconel 718의 상향 엔드밀링시 한 개의 절삭날에 의해 제거되는 미변형칩 단면(端面)과 등가인 삼각형을 도입하여 절삭시간에 따라 주기적으로 변화하는 이상적인 미변형칩 단면적을 구하였다.

측정된 주절삭력 성분을 이용하여 반경방향과 접선방향의 힘을 구하였으며 공구 런아웃을 고려한 수정 미변형칩 단면적을 정의하고, 이를 이용해 비절삭력  $K_r$ 과  $K_t$ 를 구하였다.

$K_r$ 과  $K_t$ 의 평균값은 헬릭스각 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 증가하였다.

$K_r$ 과  $K_t$ 는 수정 미변형칩 단면적이 커짐에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있다.

### 기호설명

- $\Phi$  = rotation angle of tool
- $\beta$  = 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 force
- $K_t$  = tangential specific cutting force

### 참 고 문 헌

- (1) Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. ASME, Vol. 63, pp. 677~700, 1941.
- (2) "Accuracy of Milled Surfaces. Part 1 : Effect of Cutter Diameter, Number of Teeth, Runout and Feed," Metal Cuttings, Vol. 9, No. 1, Jan. 1961.
- (3) Tlusty, J. and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21~25, 1975.
- (4) Lazoglu, I and Liang, S. Y., "Modeling of Ball-End Milling Forces with Cutter Axis Inclination," Trans. ASME, Vol. 122, pp. 3~11, 2000.
- (5) 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, pp. 123~140, 1983.
- (6) Fussel, B. K. and Srinivasan, K. S., "An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions," Trans. ASME, Vol. 111, pp. 27~36, 1989.
- (7) Shaw, M. C. and Finnie, I., "The Shear Stress in Metal Cutting," Trans. ASME, Vol. 77, pp. 115~125, 1955.
- (8) 이영문, 이선호, 태원익, "엔드밀의 상향절삭시 절삭력 예측," 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 3~7, 2000.