

등가경사절삭 시스템에 의한 Inconel 718 엔드밀링 공정의 전단 및 마찰특성 해석 I

-상향 엔드밀링-

이영문*, 양승한*, 최원식**, 송태성***, 권오진***, 최봉환***

The Shear and Friction Characteristics Analysis of Inconel 718
during End-milling process using Equivalent Oblique Cutting System I

-Up Endmilling-

Y. M. Lee*, S. H. Yang*, W. S. Choi**, T. S. Song***, O. J. Kwon***, B. H. Choi***

ABSTRACT

In end milling process the undeformed chip thickness and the cutting force components vary periodically with phase change of the tool. In this study, up end milling process is transformed to the equivalent oblique cutting. The varying undeformed chip thickness and the cutting force components in end milling process are replaced with the equivalent average ones. Then it can be possible to analyze the chip-tool friction and shear process in the shear plane of the end milling process by the equivalent oblique cutting system.

According to this analysis, when cutting Inconel 718, 61, 64 and 55% of the total energy is consumed in the shear process with the helix angle 30°, 40° and 50° respectively, and the balance is consumed in the friction process. With the helix angle of 40° the specific cutting energy consumed is smaller than with the helix angle 30° and 50°.

Key Words : Up end milling (상향 엔드밀링), Oblique cutting (경사절삭), Helix angle (헬릭스각), Specific shear energy (비전단에너지), Specific friction energy (비마찰에너지), Specific cutting energy(비절삭에너지)

1. 서론

엔드밀링은 2개 이상의 절삭날로 구성된 공구

에 의해 이루어지는 단속절삭공정으로 주기적으로 미변형칩두께(undeformed chip thickness)가 변하며 대부분의 절삭조건하에서 여러 개의 절삭날이 동시

† 2001년 7월 4일 접수
* 경북대학교 기계공학부
** 밀양대학교 기계공학부
*** 경북대학교 대학원 기계공학과

에 절삭작용을 하기 때문에 절삭공정에 대한 해석이 미변형칩두께가 일정한 연속절삭공정에 비해 매우 복잡하다⁽¹⁻³⁾.

Thusty와 Macneil⁽²⁾은 2날 엔드밀에 의한 상향엔드밀링 공정에서 공구의 형상과 절삭조건에 따라 변화하는 미변형칩두께 사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형칩 단면적의 곱으로 나타내는 절삭력 예측 모델을 제시하고, 실제 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토한 바 있다.

그러나 모든 절삭과정은 칩 생성과정이며, 칩 생성은 전단역이라 불리는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다⁽⁴⁾.

따라서 절삭과정에 대한 해석은 전단역에서의 전단과정과 칩-공구 사이의 마찰과정에 대한 해석에 기초하고 있다. 실용적인 3차원 절삭가공공정의 전단 및 칩-공구 마찰과정 해석을 위하여 Shaw⁽⁵⁾는 외경선삭에 상당하는 경사절삭모델을 제시하였으며, 이등⁽⁶⁾은 절삭조건 및 공구노오즈 반경이 칩 흐름방향에 미치는 영향을 고려한 외경선삭공정의 등가경사절삭모델을 제시하고 SM45C 및 SS41강에 대한 해석결과를 보고한 바 있다. 또한 최근 최영준등⁽⁷⁾은 드릴링공정 해석을 위하여 경사절삭모델을 적용한 바 있다.

한편 지금까지 밀링가공공정을 위시하여 단속절삭공정에 대한 해석이 다각적으로 이루어지고 있으나, 아직 이의 전단특성과 칩-공구 마찰특성에 대한 해석은 이루어지지 않고 있다.

최근 이등⁽⁸⁾은 단속절삭공정인 엔드밀링공정에 상당하는 등가의 연속절삭공정인 경사절삭모델의 설정을 통하여 SM45C의 상향 엔드밀링시 전단 및 마찰특성 해석을 시도한 바 있다.

본 논문에서는 상기의 등가경사절삭모델에 기초하고, 개선된 비절삭저항의 결정과정을 통하여 Inconel 718의 상향 엔드밀링공정의 전단 및 칩-공구 마찰특성 해석을 시도하였다.

2. 등가 경사절삭모델

2.1 절삭 조건의 동일화

엔드밀링에 상당하는 등가의 경사절삭 모델을

설정하기 위해서는 엔드밀링의 가공조건을 경사절삭의 가공조건과 동일화시키는 과정이 필요하다.

Fig. 1(a)는 반경방향 절삭깊이 a , 축방향 절삭깊이 b , 헬릭스각 β 인 상향엔드밀링 절삭공정을 나타내고 있으며, Fig. 1(b)는 상향 엔드밀링에서의 미변형칩을 평면으로 전개시켜 놓았을 경우의 절삭모델을 나타낸 것이며, Fig. 1(c)는 이에 상당하는 등가 경사절삭모델을 나타낸 것이다.

경사절삭은 절삭날이 공구의 진행방향과 수직인 축 z 와 기울임각 (inclination angle), i 를 이루며 연속적으로 진행되는 절삭방식이다.

Fig. 1(b)와 (c)를 비교해 보면 공구의 진행방향에 대해 평면으로 전개된 엔드밀링모델에서도 날이 공구의 진행방향에 수직인 축 z 에 대해 헬릭스각 β 만큼 기울어져 있으며 이것은 경사절삭에 있어 기울임각 i 에 해당한다.

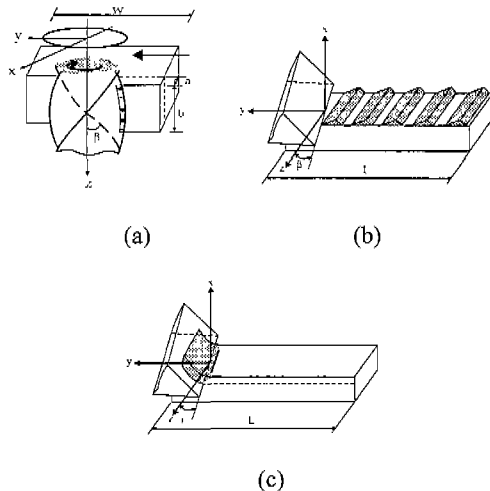


Fig. 1 Schematics of (a) end milling, (b) spread up end milling and (c) equivalent oblique cutting models

전개된 엔드밀링모델[Fig. 1(b)]에서 미변형칩요소의 단면을 살펴보면 한 날이 가공을 마친 후 다음 날이 가공을 시작하기 전까지 일정한 간격이 존재하므로 단속절삭이 이루어진다. 그러므로 엔드밀링을 경사절삭에 대응시키기 위해서는 일정한 절삭깊이를 갖는 연속절삭방식의 경사절삭으로 변환하는 것이 필요하다.

등가경사절삭의 전 절삭구간에 대한 평균절삭

깊이(미변형칩두께) h_{av} 는 엔드밀링에서 공작물 길이 w 와 반경방향 절삭깊이 a 의 곱으로 주어지는 단면적을 공구의 총 전개길이 L 로 나눈 값으로 주어진다. L 및 h_{av} 는 각각 식(1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = 2\pi r \frac{w}{S_t z} \quad (1)$$

$$h_{av} = \frac{a w}{L} \quad (2)$$

이때 r 은 엔드밀의 반경, S_t 는 날당이송, z 는 엔드밀공구의 절삭날 수이다.

Fig. 2는 공구의 진행방향으로 전개된 미변형칩의 총 단면적과 등가인 면적을 평균 절삭깊이 h_{av} 와 총 전개길이 L 로 변환시킨 등가 경사절삭 모델을 나타낸 것이다. L 과 h_{av} 가 결정되면, 엔드밀링 공정에 상당하는 경사절삭으로의 변환이 가능하게 된다.

Table 1에는 엔드밀링과 경사절삭의 절삭입력조건을 나타내었다.

경사절삭모델에서는 Table 1에 나타낸 입력조건에 의해 칩-공구 마찰특성과 전단면상에서의 전단 특성을 분리하여 해석할 수 있다.

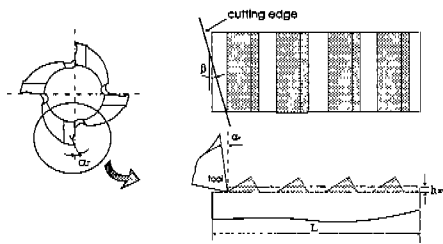


Fig. 2 Equivalent oblique cutting model

Table 1 Input conditions of cutting systems

End milling	Oblique cutting
Radial depth of cut, a	Depth of cut, t
Axial depth of cut, b	Width of cut, b
Cutting length, w	
Cutting velocity, V	Cutting velocity, V
Radial rake angle, α_r	Normal rake angle, α_n
Helix angle, β	Inclination angle, i
Number of tooth, z	
Feed per tooth, S_t	

이를 위해서는 주어진 엔드밀링 가공조건을 경사절삭의 가공조건들과 연관지어 필요가 있다. a 와 w 에 의해 결정된 공구의 반경방향 이송의 평균값 h_{av} 는 경사절삭의 절삭깊이(미변형칩두께) t 에 해당되며, 축방향 절삭깊이 b 와 절삭속도 V , 헬릭스각 β 는 각각 경사절삭에서의 절삭폭 b , 절삭속도 V 및 기울임각 i 와 같은 의미를 가진다. 그리고 엔드밀 공구의 반경방향 경사각 α_r 은 경사절삭에 있어 속도경사각 α_v 에 해당하며, 경사절삭에 있어 공구의 고유 경사각인 수직경사각 α_n 과 속도경사각 α_v 사이에는 식(3)의 관계가 성립한다⁽⁹⁾.

$$\tan \alpha_n = \cos i \tan \alpha_v \quad (3)$$

2.2 절삭력의 결정

Fig. 3은 엔드밀링 절삭시 한 날이 작용할 때 측정되는 절삭력 성분 F_x , F_y 및 F_z 를 나타내고 있다.

그러나 Fig. 1(b)와 같이 미변형칩을 공구의 진행방향에 대하여 평면으로 전개하였을 경우 경사절삭 모델에 있어 주분력은 공구의 진행방향의 힘으로 접선방향의 힘 F_t 에 해당되며, 경사절삭 모델의 이송분력 F_x 는 엔드밀링에 있어 반경방향의 힘 F_r 에 해당된다. 한편 F_z 는 경사절삭 모델에서의 배분력에 해당된다.

측정 가능한 절삭력 성분 F_x , F_y 와 접선방향의 절삭력 F_t , 반경방향의 F_r 사이에는 식(4)의 관계가 성립한다.

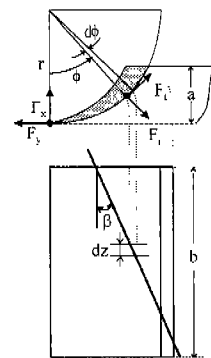


Fig. 3 Coordinate system for up end milling and cutting force components

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

연속적으로 변화하는 미변형칩의 반경방향의 이송(미변형칩두께) h 와 미소절삭폭 dz 의 곱으로 표현되는 미소절삭면적과 비절삭저항을 이용하여 접선방향 및 반경방향의 미소 절삭력 성분 dF_r , dF_t 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dF_r &= k_r dA = k_r h dz \\ dF_t &= k_t dA = k_t h dz \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 반경방향의 이송 h 의 결정을 위해 미변형칩의 단면을 Fig. 4와 같이 실제 미변형의 칩의 면적과 등가인 삼각형으로 가정하였다.

반경방향 이송 h 는 Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이 날이 기준 위치로부터 ϕ_1 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식(6)으로, Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 ϕ_1 에서 ϕ_2 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식(7)과 같은 비례식이 성립한다.

그리고 미소절삭면적의 높이 h 에 대한 절삭폭 dz 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

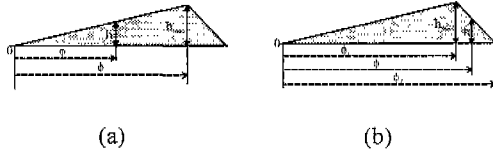


Fig. 4 Spread undeformed chip cross section

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

$$h = \frac{h_{\max} (\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \quad (7)$$

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

Fig. 5는 임의의 각 ϕ 에서 날의 위치에 따른 절삭날의 작용구간을 $[0, \phi_1]$, $[\phi_1, \phi_2]$, $[\phi_2, \phi_3]$, $[\phi_3, \phi_4]$ 및 $[\phi_4, \phi_5]$ 의 다섯 구간으로 나타낸 것이다.

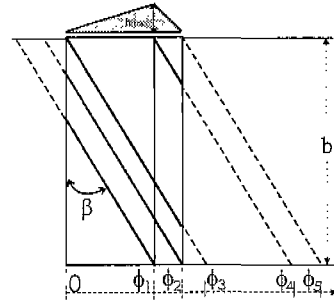


Fig. 5 Cutting edge length depends on cutting edge position

ϕ_3 는 식(9)로 표시할 수 있으며, $\phi_4 = \phi_3 + \phi_1$, $\phi_5 = \phi_3 + \phi_2$ 의 관계가 성립한다.

$$\phi_3 = \frac{b \tan\beta}{r} \quad (9)$$

식(6), (7), (8)을 식(5)에 대입한 후 이를 다시 식(4)에 대입하면 날의 위치에 따른 절삭력을 다음과 같이 표시할 수 있다.

[0, ϕ_1] 구간

$$\begin{aligned} F_x &= -k_r \int_0^\phi \cos\phi \frac{h_{\max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \\ &\quad + k_t \int_0^\phi \sin\phi \frac{h_{\max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \\ F_y &= -k_r \int_0^\phi \sin\phi \frac{h_{\max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \\ &\quad - k_t \int_0^\phi \cos\phi \frac{h_{\max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \end{aligned} \quad (10)$$

[ϕ_1, ϕ_2] 구간

$$\begin{aligned} F_x &= \int_{\phi_1}^\phi (-k_r \cos\phi + k_t \sin\phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \\ &\quad + \int_0^{\phi_1} (-k_r \cos\phi + k_t \sin\phi) \frac{h_{\max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \\ F_y &= \int_{\phi_1}^\phi (-k_r \sin\phi - k_t \cos\phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \\ &\quad + \int_0^{\phi_1} (-k_r \sin\phi - k_t \cos\phi) \frac{h_{\max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi \end{aligned} \quad (11)$$

$[\phi_2, \phi_3]$ 구지

$$\begin{aligned}
 F_x &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 &+ \int_0^{\phi_1} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) \frac{h_{\max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 F_y &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 &+ \int_0^{\phi_1} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) \frac{h_{\max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

$[\phi_3, \phi_4]$ 구지

$$\begin{aligned}
 F_x &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 &+ \int_{\phi_3 - \phi_1}^{\phi_1} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) \frac{h_{\max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 F_y &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 &+ \int_{\phi_3 - \phi_1}^{\phi_1} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) \frac{h_{\max}}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

$[\phi_4, \phi_5]$ 구지

$$\begin{aligned}
 F_x &= \int_{\phi_3 - \phi_1}^{\phi_2} (-k_r \cos \phi + k_t \sin \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \\
 F_y &= \int_{\phi_3 - \phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin \phi - k_t \cos \phi) \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

공구 동력계로부터 측정된 절삭력성분들을 위의 식들에 대입함으로써 비절삭저항 k_r , k_t 를 결정할 수가 있으며, 결정된 비절삭저항을 식(5)에 대입함으로써 접선방향과 반경방향의 절삭력 F_t 및 F_r 을 구할 수 있다.

3. 절삭 실험

절삭실험에 사용하기 위하여 지름 8mm, 날수 4, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀 공구를 제작하였으며 공구의 성능을 개선하기 위하여 TiAlN 코팅을 하였다. 피삭재로는 난삭재인 Inconel 718을 최대회전수 6000rpm, 주축 동력이 20마력인 Yamage Techno사의 머시닝 센터를 사용하여 가공하였다. 절삭실험 조건은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 2 Cutting conditions

Radial depth of cut, a (mm)	1.0
Axial depth of cut, b (mm)	12
Cutting velocity, V (m/min)	30
Radial rake angle, α_r (°)	8
Helix angle, β (°)	30, 40, 50
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, S _t (mm)	0.06

절삭력 성분을 구하기 위해서 공구동력계 (Kistler, 9273)에서 나오는 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 A/D 변환기(Data translation, DT3831-G)로 보내어 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어패키지 (Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

절삭실험시 공작기계의 주축회전속도는 1194rpm (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.

한편 각 절삭조건에서 생성된 칩을 회수하였으며, 공구현미경(Mitutoyo, TF-510FW)을 사용하여 칩의 두께를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Table 3은 절삭실험에서 얻어진 절삭력성분의 평균값을 나타낸 것이며, Table 4에는 측정된 최대 칩두께 t_{c-max} 와 평균 칩두께 t_{c-av} , 최대 미변형칩두께 h_{max} 및 평균 미변형칩두께 h_{av} 를 나타내었다.

Table 3 Average cutting forces (measured)

	30°	40°	50°
F_x (N)	-91.67	-65.38	-80.67
F_y (N)	-292.60	-260.06	-292.38
F_z (N)	-44.37	-63.53	-89.97

Table 5는 측정 절삭력성분을 식(10)~(14)에 대입하여 계산된 반경방향 및 접선방향의 비절삭저항 k_r 및 k_t 의 평균값을 나타낸 것이다.

Table 4 Chip thicknesses and undeformed chip thicknesses

	30°	40°	50°
$t_{c-max}(measured)$	0.122	0.112	0.094
$t_{c-av}(calculated)$	0.029	0.027	0.023
$h_{max}(calculated)$	0.0394	0.0394	0.0394
$h_{av}(calculated)$	0.0095	0.0095	0.0095

Table 5 Average specific cutting resistances (calculated)

	30°	40°	50°
k_r (MPa)	2049	1700	1937
k_t (MPa)	2072	1932	2099

k_r 및 k_t 를 결정함에 있어 절삭력 F_x 및 F_y 가 측정된 각 순간의 절삭단면적 크기를 모르기 때문에 임의의 한 위치에서의 절삭력값을 이용하여 임의의 위치의 절삭단면적에 대한 비절삭저항값을 계산한 다음 순차적으로 임의의 위치로부터 0.4883ms(공구회전각으로는 3.497°)후의 절삭력값을 이용하여 동일한 위치의 절삭단면적에 대한 비절삭저항값을 구한다. 각 데이터의 간격이 3.497°이므로 공구 1회전시 낱당 회전각인 90°의 구간에서는 동일한 위치에 대해 대략 26개 그룹의 비절삭저항값을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 이들 26개 그룹의 비절삭저항값들의 표준편차를 구해 표준편차가 가장 작은 그룹의 위치에서의 비절삭저항값을 사용하여 절삭력 F_x 및 F_y 를 예측하였다.

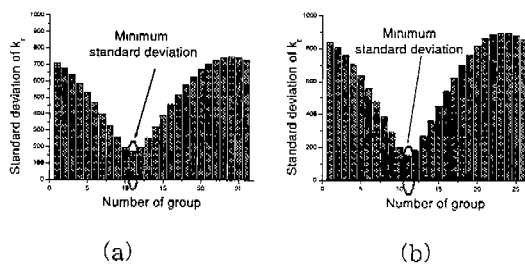
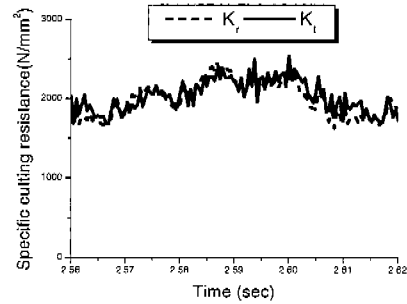


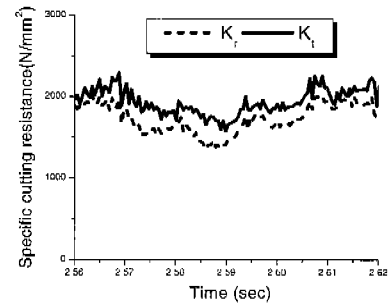
Fig. 6 Standard deviations of specific cutting resistances (a) k_r and (b) k_t of 26 consecutive groups

Fig. 7은 샘플링되는 각 순간에서 구해진 비절삭저항 k_r 및 k_t 를 나타낸 것이다.

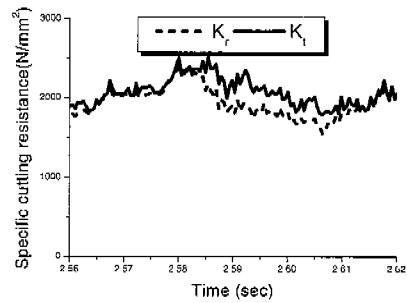
그림에서 보는 바와 같이 비절삭저항은 절삭위치에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 이는 절삭에서의 치수효과⁽¹⁰⁾ 및 획득된 절삭력 성분 자체의 편차에 기인한다고 판단된다.



(a) H.A. 30°

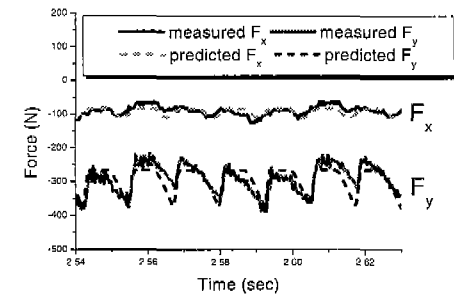


(b) H.A. 40°

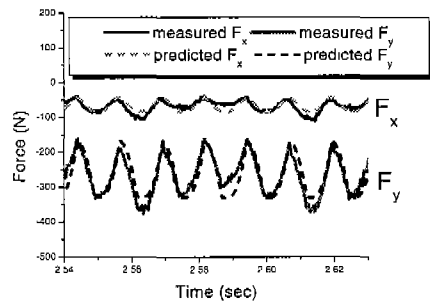


(c) H.A. 50°

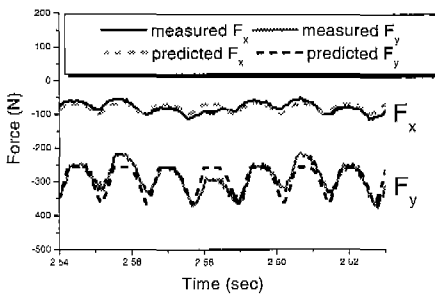
Fig. 7 Specific cutting resistances(N/mm²)



(a) H.A. 30°



(b) H.A. 40°



(c) H.A. 50°

Fig. 8 Comparison of measured and predicted cutting forces (N)

Fig. 8은 구해진 비절삭저항값의 검증을 위하여 Table 5에 나타난 비절삭저항값의 평균값을 식 (10)~(14)에 대입하여 계산되는 예측 절삭력 F_x 와 F_y 와 측정된 절삭력 F_x 와 F_y 를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 예측절삭력과 측정절삭력은 거의 잘 일치하고 있다.

한편 Table 6은 경사절삭시 이송분력에 해당하

는 엔드밀링시의 반경방향의 힘 F_r , 주분력에 해당하는 접선방향의 힘 F_t , 배분력 F_z 의 평균값을 나타낸 것이다.

Table 6에 나타낸 F_r , F_t 및 F_z 를 경사절삭모델⁽⁹⁾의 해당되는 절삭력성분 값으로 대입하면 Table 7에 나타낸 바와 같은 등가경사절삭시스템에서의 칩-공구 마찰특성, 전단특성 및 절삭특성을 나타내는 인자들을 얻을 수 있다.

Table 6 Average transformed cutting forces F_r , F_t and cutting force F_z

	30°	40°	50°
Radial cutting forces, F_{r-av} (N)	218.6	179.3	208.6
Tangential cutting forces, F_{t-av} (N)	221.5	204.5	226.0
Axial cutting forces, F_{z-av} (N)	-44.4	-63.5	-90.0

Table 7 Output values

	30°	40°	50°
Friction Characteristics			
Friction force, F_c (N)	269.0	223.9	263.7
Normal force to the rake face, F_{cn} (N)	183.2	178.3	189.2
Coefficient of friction, μ	1.42	1.19	1.27
Specific friction energy, u_f (Mpa)	748.3	657.1	870.8
Shear Characteristics			
Shear force, F_s (N)	145.1	148.9	155.9
Normal force to the shear plane, F_{sn} (N)	291.2	244.4	284.7
Shear strain, γ	3.37	3.38	3.19
Shear stress, τ (Mpa)	349.3	339.6	335.6
Normal stress, σ (Mpa)	709.3	660.8	630.2
Specific shear energy, u_s (Mpa)	1176.8	1146.7	1070.1
Cutting Characteristics			
Specific cutting energy, u (Mpa)	1925.1	1803.8	1940.9
u_f/u	0.39	0.36	0.45
u_s/u	0.61	0.64	0.55

표에서 보는 바와 같이 헬릭스 각 40°의 경우 비절삭에너지 u 는 1803.8MPa로 헬릭스 각 30°(1925.1MPa) 및 50°(1940.9MPa)에 비해 낮은 값을 나타내고 있다.

이는 일차적으로 헬릭스 각 40°일 때 소모되는 낮은 비마찰에너지에 기인하며, 이때 비절삭에너지중 마찰에 소모되는 비율도 가장 낮게 나타나고 있다.

5. 결론

등가 정사절삭시스템에 의한 Inconel 718의 상향 엔드밀링공정의 전단 및 칩-공구 마찰특성 해석 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비절삭에너지는 헬릭스각 30°, 40° 및 50°에 대해 각각 1925.1, 1803.8 및 1940.96MPa로 40°인 경우 가장 작은 값을 나타내었다.
2. 소모된 전체 에너지중 마찰과정에 소모된 에너지는 헬릭스각 30°, 40° 및 50°에 대해 각각 39%, 36% 및 45%이었으며, 마찰과정에 소모된 에너지 비율이 가장 작은 40°의 경우 가장 낮은 비마찰에너지와 비절삭에너지를 나타내었다.
3. 소모된 전체 에너지중 전단과정에 소모된 에너지는 헬릭스각 30°, 40° 및 50°에 대하여 각각 61%, 64% 및 55%이었으며, 전단과정에 소모된 에너지의 비율이 가장 큰 40°의 경우 가장 낮은 비절삭에너지를 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, pp. 21-25, 1975.
- 3 Fussell, B. K. and Srinivasan, K., "An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions," Trans of ASME, Vol. 111, pp. 27~36, 1989.
- 4 Zorev, N.N., "Interrelationship Between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting," Pro. Inter. Res. Prod. Conf., Carnegie Inst. of Tech., pp. 42-49, 1963.
- 5 Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles, 3rd ed.," The MIT Press, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 13-18~13-29, 1957.
- 6 이영문, 송태성, 박태준, 장은실, "3차원 절삭시 칩-공구 마찰 및 전단특성 해석," 한국정밀공학회지, 제 16권, 제 6호, pp. 190-196, 1999.

- 7 최영준, 주종남, "마모를 고려한 절삭력 예측모델," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1042 ~1047, 2001.
- 8 이영문, 송태성, 심보경, "엔드밀링의 전단특성 및 마찰특성해석," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 724-729, 2000.
- 9 Shaw, M.C., "Metal Cutting Principles," Clarendon Press, oxford, pp. 428-438, 1984.
- 10 Shaw, M.C., and Finnie, I., "The Shear Stress in Metal Cutting," Trans. of the ASME, Vol. 77, pp. 115~125, 1955.