

## 하향엔드밀링시 헬릭스각에 따른 전단 및 마찰특성변화

이영문\*, 장승일<sup>+</sup>, 서민교<sup>++</sup>, 손정우<sup>++</sup>

(논문접수일 2003. 10. 27, 심사완료일 2004. 1. 2)

### Shear and Friction Characteristics in Down-End Milling with Different Helix Angles

Y. M. Lee\*, S. I. Chang<sup>+</sup>, M. K. Seo<sup>++</sup>, J. W. Son<sup>++</sup>

#### Abstract

In end milling process, undeformed chip thickness and cutting forces vary periodically with phase change of the tool. Recently, a model has been proposed to simulate the shear and friction characteristics of an up-end milling process in terms of the equivalent oblique cutting to this. In the current study, a down-end milling process has been replaced with the equivalent oblique cutting process. And shear and tool-chip friction characteristics variation of SM45C steel has been studied using the end-mills of different helix angles. The specific shear and friction energy consumed with helix angle of 50° is somewhat larger than those of 30° and 40°. The specific shear energy consumed is about 76-77% of the specific cutting energy regardless the helix angles.

**Key Words :** Down-End Milling(하향 엔드밀링), Equivalent Oblique Cutting(등가경사절삭), Shear(전단), Chip-Tool Friction(칩-공구 마찰), Undeformed Chip Section Area(미변형칩 단면적), Specific Cutting Energy(비절삭에너지)

## 1. 서론

엔드밀링 절삭공정은 복잡한 형상의 제품가공시 높은 생산성과 고정밀도를 얻을 수 있어 항공기 부재 가공 및 자동차 산업에 필요한 금형제작 등 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되고 있다. 엔드밀링공정은 공구가 회전운동을 하는 동시에 공작물이 공구의 축방향에 수직하게 이동되면서 이

루어지는 공정으로 미변형 칩두께(undeformed chip thickness)가 변화하며 이에 따라 절삭력도 주기적으로 변하는 단속절삭 공정이다. 또한, 공구와 공작물의 상대운동에 따라 상향과 하향 절삭방식으로 나눌 수 있다. Martellotti<sup>(1,2)</sup>는 공구와 피삭재의 기하학적 및 운동학적인 관계에 대한 고찰을 통하여 상향 및 하향 밀링공정에서의 공구경로에 따른 미변형칩두께 변화에 대한 이론적인 관계를 정립하

\* 주저자, 경북대학교 기계공학부 (ymlee@knu.ac.kr)

주소: 702-701 대구시 북구 산격동 1370

+ 경북대 기계공학부

++ 경북대 대학원 기계공학과

였다. Tlusty와 Macneil<sup>(3)</sup>은 상향 엔드밀링 공정에서 공구의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따라 변하는 미변형칩두께 사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형칩 단면적의 곱으로 나타내는 절삭력 예측 모델을 제시하였고, 실제 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토하였다. 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<sup>(4)</sup>.

지금까지 밀링가공공정을 위시하여, 단속절삭공정에 대한 해석이 다각적으로 이루어지고 있으나, 이의 전단특성과 칩-공구 마찰특성에 대한 연구는 시작단계에 있다. 최근 이동<sup>(5-7)</sup>은 단속절삭공정인 엔드밀링공정에 상당하는 연속절삭공정인 등가경사절삭모델의 설정을 통하여 SM45C 및 인코넬718의 가공시 상향엔드밀링공정에서의 전단 및 칩-공구 마찰특성의 해석을 시도한 바 있다. 본 연구에서는 하향엔드밀링공정에 상당하는 등가경사절삭모델을 설정하고, SM45C의 절삭시 헬릭스각 변화에 따른 전단 및 칩-공구 마찰 특성변화에 대해 상향엔드밀링과 비교·고찰하였다.

## 2. 하향 엔드밀링 모델

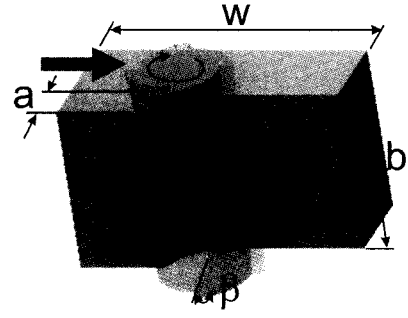
### 2.1 미변형칩 두께

Fig. 1(a)은 하향 엔드밀링 절삭시 공구와 피삭재의 관계를 나타낸 것으로 엔드밀은 축방향으로  $b$ , 반경방향으로  $a$ 의 절삭깊이를 가지며, 옆날이 축방향에 대하여  $\beta$ 만큼의 헬릭스각을 이룬다.

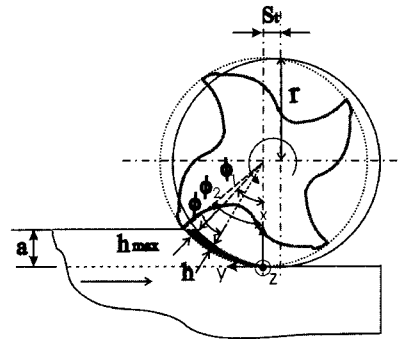
Fig. 1(b)는 4날 엔드밀에 의한 엔드밀링 절삭시 공작물의 이송을 대신하여 공구가 절삭날당  $S_t$ 만큼 이송하면서 회전할 때의 공구축에 수직인 단면을 나타낸 것이다. 하향 절삭시 미변형칩두께  $h$ 는 절삭을 개시하여 급격하게 증가하여 최대치  $h_{max}$ 에 이른 후, 서서히 감소하여 0에 이른다.

이때 절삭날 경로상의 최대 미변형 칩두께  $h_{max}$ 는 식 (1)로, 그 때의 회전각  $\phi_1$ 은 식 (2)로, 한 날이 회전각 0으로부터 시작하여 피삭재에서 벗어날 때까지의 회전각  $\phi_2$ 는 식 (3)으로 나타낼 수 있다. 여기서  $r$ 은 공구반경,  $a$ 는 반경방향 절삭깊이,  $S_t$ 는 날당 이송량이다.

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



(a) cutting model



(b) cross section view

Fig. 1 Schematic of down end-milling process

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

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

### 2.2 절삭력의 결정

Fig. 2는 하향 엔드밀링시 절삭력성분의 관계를 나타낸 것으로  $F_x$  및  $F_y$ 는 공구동력계에서 측정된 힘이며  $F_r$  및  $F_t$ 는 임의의 순간에서의 반경방향과 접선방향 절삭력성분을 나타낸 것이다.

미소 절삭력성분  $dF_x$  및  $dF_y$ 와 접선방향의 미소 절삭력  $dF_t$ , 반경방향의  $dF_r$  사이에는 식 (4)의 좌표변환 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi) & \sin(\phi_2 - \phi) & 0 \\ -\sin(\phi_2 - \phi) & \cos(\phi_2 - \phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

반경방향 및 접선방향 미소절삭력성분은 비절삭력과 미소단면적의 곱으로 표시되며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 반경방향의 미소 절삭력성분은 반경방향 비절삭력  $k_r$ 과 미소 단면적  $dA$ 의 곱으로 표시할 수 있고, 접선방향의 미소절삭력  $dF_t$ 는 접선방향 비절삭력  $k_t$ 와 미소단면적  $dA$ 의 곱으로 표시할 수 있다. 또한 미소절삭폭  $d_z$ 는 식 (6)과 같이 표시할 수 있다.

$$dF_r = k_r dA = k_r h dz$$

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

$$dz = \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (6)$$

Fig. 3은 절삭날 경로에 따라 달라지는 미변형 칩두께  $h$ 의 결정을 위하여 Fig. 2의 음영부로 나타낸 실제 절삭 단면적을 밀변이 직선인 등가의 면적으로 나타낸 것이다.  $h$ 는  $\phi$ 가 기준 위치로부터  $\phi_2 - \phi_1$ 사이의 임의의 각도일 때( $0 < \phi < \phi_2 - \phi_1$ )는 식 (7)과 같이  $\phi_2 - \phi_1$ 에서  $\phi_2$ 사이의 임의의 각도일 때( $\phi_2 - \phi_1 < \phi < \phi_2$ )는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = r \left[ 1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right] \quad (7)$$

$$h = s_t r \sin(\phi_2 - \phi) \quad (8)$$

Fig. 4는 임의의 순간에서 날의 위치를 나타낸 것으로

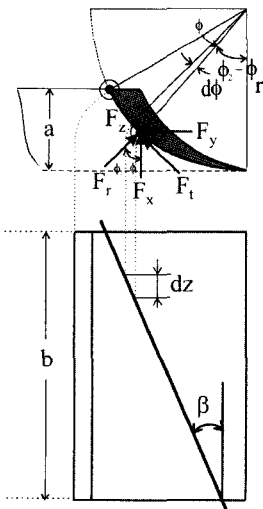


Fig. 2 Coordinate system for cutting force components

하향 엔드밀링 절삭시  $[0, \phi_2 - \phi_1]$ ,  $[\phi_2 - \phi_1, \phi_2]$ ,  $[\phi_2, \phi_3]$ ,  $[\phi_3, \phi_4]$  및  $[\phi_4, \phi_5]$ 로 각각 다섯 구간으로 구분할 수 있다.

여기서,  $\phi_3, \phi_4$ 와  $\phi_5$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_3 = \frac{b \tan \beta}{r}, \phi_4 = \phi_3 + (\phi_2 - \phi_1), \phi_5 = \phi_3 + \phi_2 \quad (9)$$

식 (6), (7) 및 (8)을 식 (5)에 대입한 후 식 (4)와 결합시키면 하향 절삭시 날의 위치에 따른 절삭력을 식 (10-1)~(10-5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[0, \phi_2 - \phi_1] \text{ interval} \quad (10-1)$$

$$F_x = \int_0^{\phi} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi))$$

$$r \left( 1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_0^{\phi} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi))$$

$$r \left( 1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)} \right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

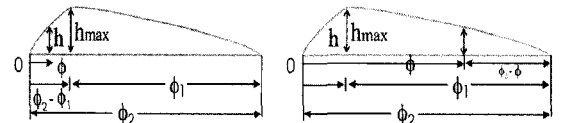


Fig. 3 Spread underformed chip crosssections

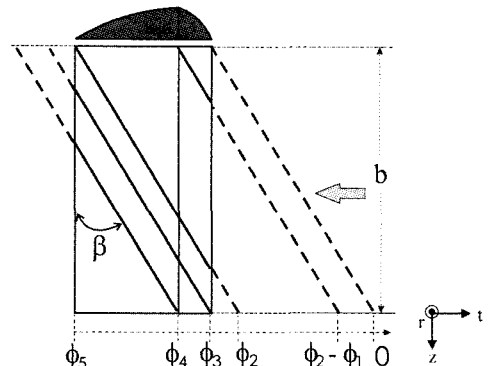


Fig. 4 Relative position of cutting edge in down-end milling

$$[\phi_2 - \phi_1, \phi_2] \text{ interval} \quad (10-2)$$

$$F_x = \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$[\phi_2, \phi_3] \text{ interval} \quad (10-3)$$

$$F_x = \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi_2} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_0^{\phi_2 - \phi_1} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$[\phi_3, \phi_4] \text{ interval} \quad (10-4)$$

$$F_x = \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi_2} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_{\phi - \phi_3}^{\phi_2 - \phi_1} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi_2 - \phi_1}^{\phi_2} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$+ \int_{\phi - \phi_3}^{\phi_2 - \phi_1} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) r \left(1 - \frac{\cos \phi_2}{\cos(\phi_2 - \phi)}\right) \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$[\phi_4, \phi_5] \text{ interval} \quad (10-5)$$

$$F_x = \int_{\phi - \phi_3}^{\phi_2} (k_r \cos(\phi_2 - \phi) + k_t \sin(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$F_y = \int_{\phi - \phi_3}^{\phi_2} (-k_r \sin(\phi_2 - \phi) + k_t \cos(\phi_2 - \phi)) \sin(\phi_2 - \phi) s_t \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

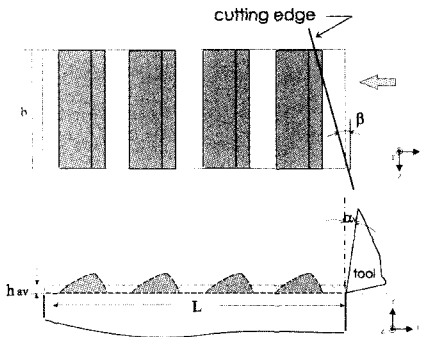
### 2.3 등가경사절삭모델

엔드밀링에 상당하는 등가의 경사절삭모델을 설정하기 위해서는 엔드밀링과 경사절삭을 비교함으로써 엔드밀링의 가공조건을 경사절삭모델의 가공조건과 동일화시키는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 이 등이<sup>(5)</sup> 제시한 4날 상향 엔드밀링 모델을 하향엔드밀링 모델에 적용하여 하향엔드밀링의 경사절삭모델을 설정하였다. Fig. 5는 엔드밀링에서의 미변형칩을 공구의 진행방향으로 전개시켜 놓았을 경우의 하향엔드밀링에 상당하는 경사절삭모델을 나타낸 것이다.

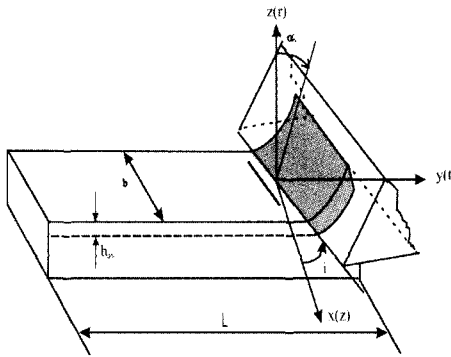
### 3. 절삭실험

절삭실험에 사용한 공구는 날수 4개, 지름이 8mm, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀을, 피삭재는 기계구조용강인 SM45C를 사용하였으며, 머시닝 센터에서 절삭실험하였다. 절삭실험조건은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Fig. 6은 엔드밀링 실험의 개략도를 나타낸 것으로 절삭력 성분을 구하기 위해서 공구동력계(Kistler, 9273)로부터



(a) spread down-end milling model



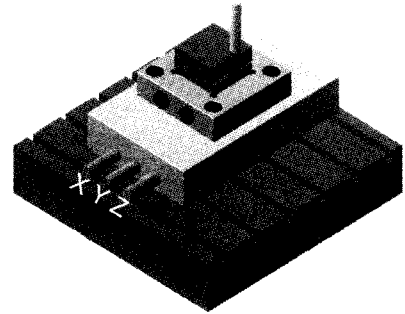
(b) equivalent cutting model to down-end milling

Fig. 5 Transformation of spread down-end milling to equivalent oblique cutting model

Table 1 Cutting conditions

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| Radial depth of cut, a (mm)          | 1.5        |
| Axial depth of cut, b (mm)           | 12         |
| Cutting velocity, V (m/min)          | 30         |
| Radial rake angle, $\alpha_r$ (deg.) | 8          |
| Helix angle, $\beta$ (deg.)          | 30, 40, 50 |
| Number of tooth, z                   | 4          |
| Feed per tooth, $S_t$ (mm)           | 0.06       |

측정된 절삭력 신호를 전하증폭기를 통해 증폭시키고, A/D 변환기를 거쳐 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어패키지를 사용하여 분석하였다. 엔드밀링시 회수된 칩의 두께는 공구현미경(Mitutoyo, TF-510FW)을 사용하여 측정하였다.



Tool Dynamometer  
(Kistler 9273)

Charge AMP  
(Kistler 5807A)

A/D Converter  
(Data translation DT3831-G)

PC & Monitor  
(Global Lab)

Fig. 6 Schematic of cutting experiment

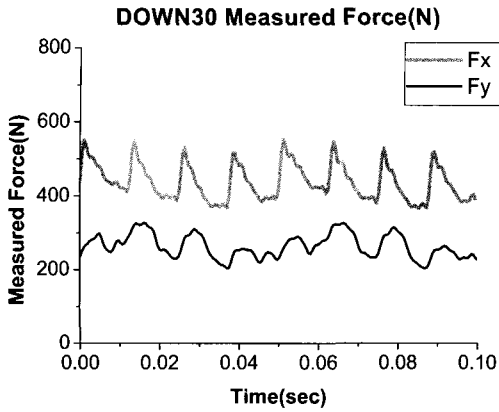
## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 절삭력의 측정

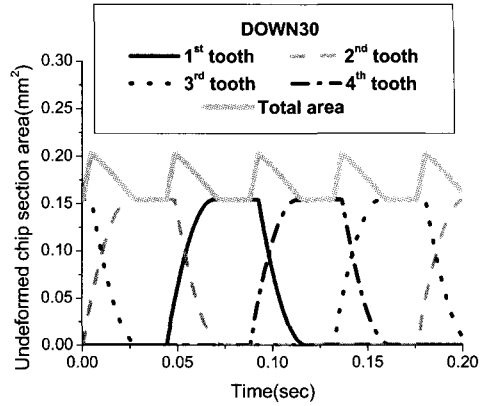
절삭실험에서 측정된 절삭력 성분  $F_x$ ,  $F_y$  및  $F_z$ 를 Fig. 7에 나타내었다.  $F_x$ ,  $F_y$  및  $F_z$ 는 헬릭스각이 증가할수록 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다.

### 4.2 미변형칩 단면적

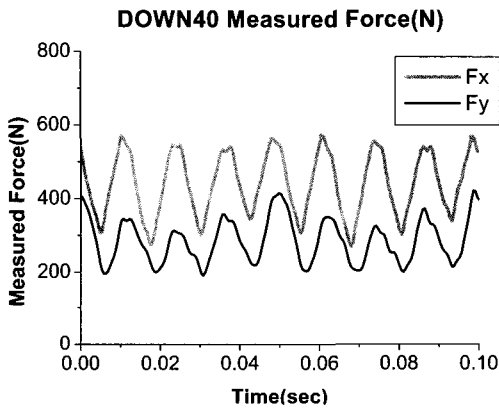
Fig. 8은 수식에 의해서 구해진 하향 엔드밀링시 이상적인 미변형칩 단면적의 변화를 절삭시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 하향에서의 미변형칩의 변화는 선행연구<sup>(5)</sup>인 상향 엔드밀링의 미변형칩과는 반대의 형상을 보여주고 있으며 개개의 날에 의한 미변형칩 단면적의 변화는 30°인 경우가 가장 크며, 40°, 50° 순으로 작아지지만 Table 1에 나타낸 절삭조건 하에서, 각 날의 중첩에 의한 절삭 단면적의 변화는 헬릭스각 40°인 경우 진폭이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 중첩된 절삭단면적이 헬릭스각 뿐만 아니라 절삭조건인 축방향 절삭깊이, 반



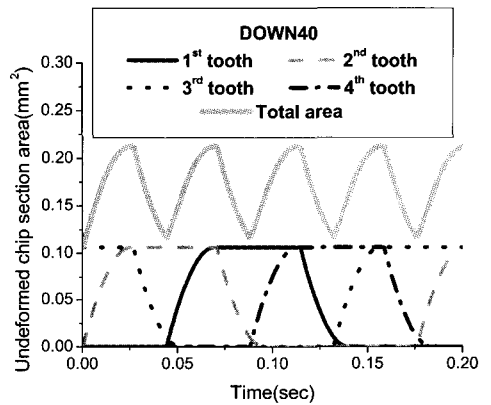
(a) down end-milling, helix angle 30°



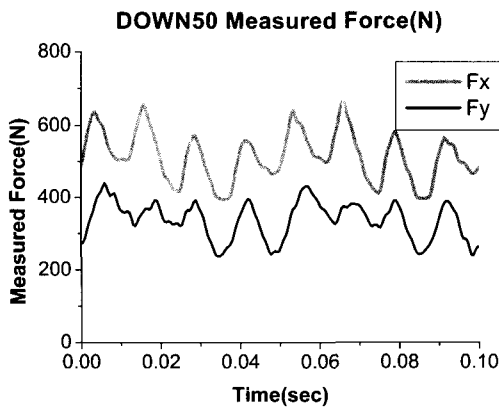
(a) down end-milling, helix angle 30°



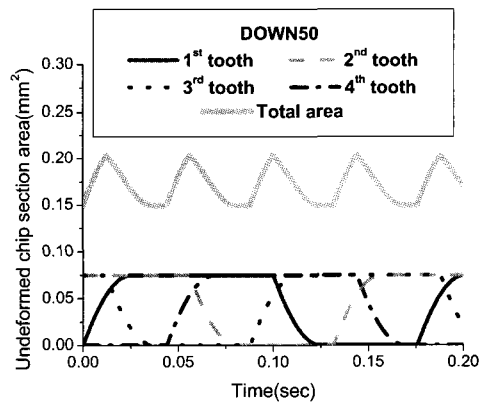
(b) down end-milling, helix angle 40°



(b) down end-milling, helix angle 40°



(c) down end-milling, helix angle 50°



(c) down end-milling, helix angle 50°

Fig. 7 Measured cutting forces

Fig. 8 Undeformed chip section area vs. cutting time

경방향 절삭깊이, 절삭날당 이송 등의 복합작용에 의해 결정되어지기 때문이다.

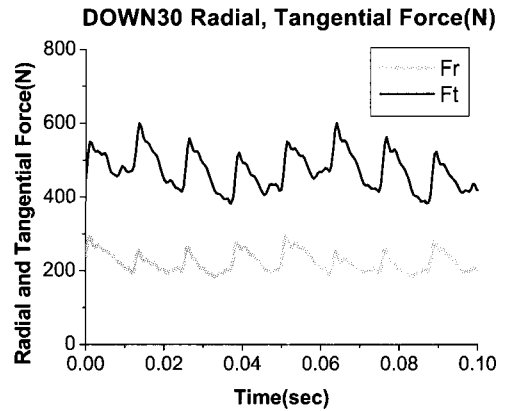
### 4.3 반경방향과 접선방향절삭력

변경방향 및 접선방향 절삭력성분인  $F_r$  및  $F_t$ 를 결합함에 있어 절삭력  $F_x$  및  $F_y$ 가 측정된 각 순간의 절삭 단면적의 크기를 모르기 때문에 절삭력과 절삭단면적의 주기를 일치시킨 후 절삭력을 구하였다. 측정된 절삭력 데이터들을 식 (10)에 공구의 위상에 따른 구간별로 대입한 후 미변형칩의 단면적과 상관관계를 고려하여 비절삭저항을 계산한 후 미변형칩의 단면적과 곱함으로써  $F_r$ 와  $F_t$ 를 결정할 수 있으며, Fig. 9에 나타내었다. 반경방향 절삭력,  $F_r$ 은 하향절삭보다는 상향절삭시 크게 나타났으며, 접선방향 절삭력,  $F_t$ 는 하향절삭의 값이 큰 경향을 보여주고 있다<sup>(5)</sup>.

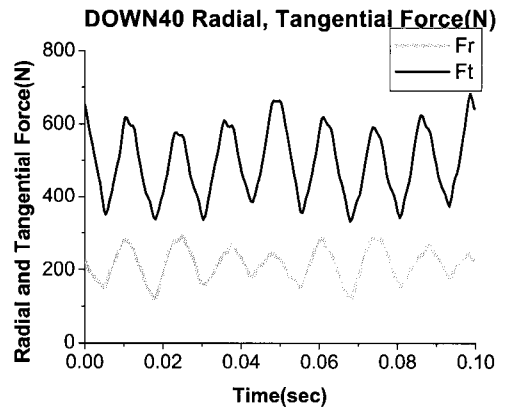
### 4.4 절삭특성

Fig. 9에서 구해진 힘들과 각 절삭조건에서의 측정된 칩 두께를 이 등<sup>(7)</sup>이 제시한 방법에 대입함으로써 Table 2에 나타난 전단면 및 칩-공구 마찰면상의 절삭특성 값들을 구할 수 있었다. 상향 절삭시 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 비마찰에너지가 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 다시 증가하는 경향을 보였으나, 하향 절삭시에는 Table 2에서 보는 바와 같이 헬릭스각이 30°와 40°에서 비슷한 값을 나타내나 헬릭스각 50°에서 크게 증가함을 볼 수 있다<sup>(5)</sup>. 이는 주어진 절삭조건에서 헬릭스각이 커짐에 따른 절삭날길이의 증가와 칩의 유동저항증대에 기인한 것으로 판단된다.

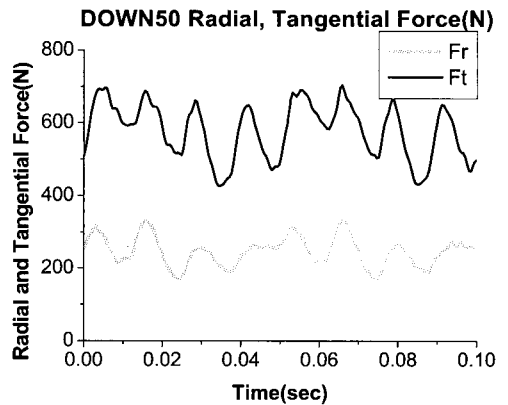
비전단에너지는 상향 절삭시에는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가시 감소하였지만 하향 절삭시에는 헬릭스각이 증가할수록 계속 증가함을 볼 수 있다. 이는 상향과 하향 절삭시 절삭 방향 및 칩두께 등의 차이에 기인한 것이라 판단된다. 비절삭에너지는 상향절삭시보다 하향 절삭시에 그 값이 상대적으로 크게 나타났으며 헬릭스각이 30°에서 40°로 커지면 약간 증가하지만 헬릭스각이 40°에서 50°로 커지면 크게 증가하고 있다. 절삭에 소요된 에너지중 전단과정에 소요된 에너지는 헬릭스각에 관계없이 76-77%로 거의 일정한 비율로 나타났으며, 나머지는 칩-공구 마찰과정에 소요되었다.



(a) down end-milling, helix angle 30°



(b) down end-milling, helix angle 40°



(c) down end-milling, helix angle 50°

Fig. 9 Tangential and radial cutting forces

Table 2 Shear, friction and cutting characteristics

|   | DOWN   |        |        |
|---|--------|--------|--------|
|   | 30°    | 40°    | 50°    |
| Friction Characteristics                      |        |        |        |
| Friction force, $F_c$ (N)                     | 315.7  | 335.8  | 437.3  |
| Normal force to the rake face, $F_{cn}$ (N)   | 430.3  | 444.0  | 485.4  |
| Coefficient of friction, $\mu$                | 0.73   | 0.76   | 0.90   |
| Specific friction energy, $u_f$ (MPa)         | 648.8  | 649.3  | 772.0  |
| Shear Characteristics                         |        |        |        |
| Shear force, $F_s$ (N)                        | 385.1  | 428.0  | 526.7  |
| Normal force to the shear plane, $F_{sn}$ (N) | 369.4  | 355.9  | 386.7  |
| Shear strain, $\gamma$                        | 3.15   | 3.59   | 4.43   |
| Shear stress, $\tau$ (MPa)                    | 667.2  | 618.7  | 584.5  |
| Normal stress, $\sigma$ (MPa)                 | 640.6  | 514.5  | 429.2  |
| Specific shear energy, $u_s$ (Mpa)            | 2104.8 | 2218.8 | 2587.4 |
| Cutting Characteristics                       |        |        |        |
| Specific cutting energy, $u$ (MPa)            | 2753.6 | 2868.1 | 3359.4 |
| $u_f/u$                                       | 0.24   | 0.23   | 0.23   |
| $u_s/u$                                       | 0.76   | 0.77   | 0.77   |

## 5. 결론

등가 경사절삭시스템에 의한 SM45C강의 하향엔드밀링 공정의 전단 및 칩-공구 마찰특성 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비마찰에너지는 헬릭스각 30° 및 40°인 경우 거의 같은 값을 나타내나 50°인 경우 헬릭스각이 커짐에 따른 절삭날길이의 증가 때문에 크게 증가하였다.
- (2) 전단과정과 마찰과정은 서로 영향을 미치며 때문에 비전단에너지도 비마찰에너지의 경향과 같이 헬릭스각이 50°인 경우 크게 증가하였다.
- (3) 절삭에 소요된 에너지 중 전단에 소요된 에너지는 헬릭스각에 관계없이 76~77%이며 나머지는 칩-공구 마찰에 소요되었다.

## 참고 문헌

(1) Martellotti, M. E., 1941, "An Analysis of the Milling Process", *Trans. of ASME*, Vol. 63, pp. 677~700.

(2) Martellotti, M. E., 1945, "An Analysis of The Milling Process:Part II - Down Milling", *Trans. of ASME*, Vol. 74, pp. 233~251.

(3) Tlusty, J., and Macneil, P., 1975, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", *Annals of CIRP*, Vol. 24, pp. 21~25.

(4) Zorev, N. N., 1963, "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.

(5) Lee, Y. M., Song, T. S., and Shim, B. K., 2001, "Analysis of Shear and Friction Characteristics in End-Milling", *KSM&A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1520~1527.

(6) Lee, Y. M., Yang, S. H., Jang, S. I., Baek, S. K., Kim, S. I., and Lee, D. S., 2002, "Effect of Cutter Runout on Cutting Force in Up-end milling of Inconel 718", *KSMTE*, Vol. 11, No. 5, pp. 45~52.

(7) Lee, Y. M., Yang, S. H., and Jang, S. I., 2003, "Shear and Friction Process in Intermittent Cutting", *IJMPB*, Vol. 17, No. 8 & 9, pp. 1395~1400.