

## 3 차원 절삭시 칩-공구 마찰 및 전단 특성 해석

이영문\*, 최원식\*\*, 송태성\*\*, 박태준\*\*, 장은실\*\*

### Analysis of Chip-Tool Friction and Shear Characteristics in 3-D Cutting Process

Young Moon Lee\*, Won Sik Choi\*\*, Tae Seong Song\*\*, Tae Joon Park\*\* and Eun Sil Jang\*\*

#### ABSTRACT

In this study, a procedure for analyzing chip-tool friction and shear processes in 3-D cutting with a single point tool has been established. The edge of a single point tool including circular nose is modified to the equivalent straight edge, then 3-D cutting with a single point tool is reduced to equivalent oblique cutting. Transforming the conventional coordinate systems and using the measured three component of cutting forces, force components on the rake face and the shear plane of the equivalent oblique cutting system can be obtained. And it can be possible to assess the chip-tool friction and shear characteristics in 3-D cutting with a single point tool.

**Key Words :** Single point tool (단인공구), Oblique cutting (경사절삭), Inclination angle (기울임각), Side cutting edge angle (측면절삭날각), Chip flow angle (칩흐름각), Specific friction energy (비마찰에너지), Specific shear energy (비전단에너지), Specific cutting energy (비절삭에너지)

#### 1. 서론

절삭과정은 그 본질에 있어 칩 생성과정이며, 대부분의 금속절삭시 칩 생성은 전단역이라 불리는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구 경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다.

절삭상태는 전단소성변형의 크기, 속도 및 저항과 칩-공구 경사면의 마찰계수, 마찰속도 및 마찰저항 등에 따라 크게 달라지며, 이들 절삭변수에 의해 특징지어지는 전단과정과 마찰과정은 독립적으로 일어나지 않으며 서로 영향을 미치면서

절삭과정의 근간을 이룬다<sup>(1)</sup>.

따라서 금속절삭연구에 있어 가장 기초적인 문제는 상기한 전단소성변형 거동과 칩-공구 경사면의 마찰거동에 미치는 절삭조건, 피삭재와 공구의 재질 및 형상 등 절삭입력조건에 영향을 밝히는 것이다.

절삭과정은 공구와 피삭재의 기하학적 및 운동학적인 관계에 의해 2차원 절삭과 3차원 절삭으로 구분되어지며, 절삭이론이 정립되는 과정에서 대부분의 금속절삭연구에서는 기하학적인 복잡성을 배제함으로써 절삭현상에 대한 해석의 간편함과 절삭변수사이의 보다 명료한 상호관계를 찾기 위하여 2차원 절삭을 연구대상으로 하였다.

\* 경북대학교 기계공학부

\*\* 경북대학교 대학원

실제 대부분의 절삭가공은 3 차원적으로 이루어지며, 3 차원 절삭에서는 피삭재의 변형이 3 차원적으로 일어나기 때문에 절삭기구가 대단히 복잡해지고 절삭현상에 대한 해석이 매우 어렵게 된다.

3 차원 절삭에 대한 최초의 연구는 기울임각을 갖는 직선절삭날에 의한 가장 단순한 형태의 3 차원 절삭인 경사절삭(oblique cutting)에 대한 것으로 Merchant<sup>(2)</sup>는 경사절삭에서의 속도 및 힘의 평형관계를 정립하였다. 또한 Shaw 등<sup>(3)</sup>은 경사절삭에서의 전단 및 칩-공구 마찰특성을 해석하였다.

Zorev<sup>(4)</sup>등은 두 개의 직선날로 구성된 단인공구에 의한 3 차원 절삭에서의 칩 생성기구 및 힘의 평형관계를 해석하였다. Usui<sup>(5)</sup>등은 2 차원 절삭 데이터를 이용하여 에너지법에 의해 두 개의 직선날로 구성된 단인공구에 의한 3 차원 절삭시 절삭 저항 예측을 시도하였다.

선삭, 평삭, 형삭 등 실제 거의 대부분의 단인공구에 의한 절삭은 원호의 노오즈부를 포함하는 절삭날에 의해 이루어지는 3 차원 절삭이다.

본 논문에서는 이러한 실제의 단인공구에 의한 3 차원 절삭에서의 칩-공구 경사면의 마찰거동과 전단소성변형 특성 해석을 위하여 실제적인 3 차원 절삭과정에 상당하는 등가경사절삭 모델을 설정하고, 공구 경사면 및 전단면에 작용하는 절삭력 성분에 대한 해석을 행하였다.

또한 이러한 3 차원 절삭 해석법을 SM45C 및 SS41 강에 대한 외경선삭 실험결과에 적용하여 절삭조건에 따른 칩-공구 마찰 특성 및 전단 특성의 변화를 고찰하였다.

### 2.3 차원 절삭

#### 2.1 기울임각(inclination angle), $i$

2 차원 절삭은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 직선 절삭날이 절삭속도 벡터와 수직인 관계를 유지하면서 이루어지는 절삭방식으로 정의된다. 한편 Fig. 1(b) 및 (c)에 나타낸 바와 같이 절삭날이 절삭속도벡터와 직각을 이루지 않으면 2 차원 절삭 상태에서 벗어나게 된다. 절삭속도벡터에 수직인 방향과 절삭날이 이루는 각을 기울임각(inclination angle)이라 한다. 기울임각은 2 차원 절삭과 3 차원 절삭을 구별짓는 뚜렷한 차이점이며, 2 차원 절삭과의 차이점이 단지 기울임각  $i$  만을 갖는 가장 단순한 형태의 3 차원 절삭을 경사절삭(oblique

cutting)이라 한다. 본 논문에서는 등가경사절삭에 대한 역학적 해석을 위하여 기울임각  $i$ 의 부호를 설정된 축에 따라 '+', 또는 '-' 값으로 정의하였다.

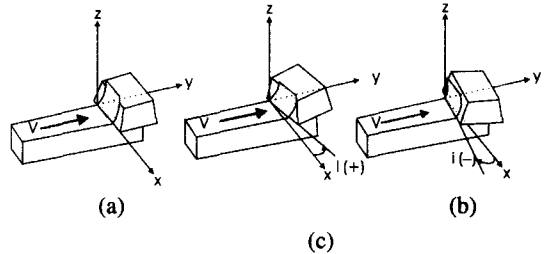


Fig. 1 Comparison orthogonal (a), and oblique(b), (c) cutting operations

#### 2.2 등가경사절삭(equivalent oblique cutting)

칩과 공구 경사면 사이의 마찰 및 전단면상에서의 전단과정을 해석하기 위하여 본 논문에서는 단인공구에 의해 이루어지는 3 차원 절삭과정에 상당하는 등가경사절삭모델을 설정하였다.

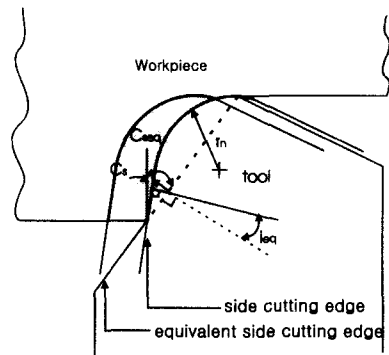


Fig. 2 Definition of  $C_{seq}$  in tool face

Fig. 2는 실제 3 차원 절삭가공법 중 대표적인 외경선삭가공상태를 나타낸 것으로, 절삭은 측면 절삭날과 앞날을 연결하는 원호의 공구 노오즈부를 포함하는 절삭날에 의해 이루어진다. 이에 대한 등가경사절삭 시스템을 유도하기 위해서는 우선 실제 절삭날에 상당하는 직선의 등가측면절삭날(equivalent side cutting edge)의 설정이 필요하다. 이영문등<sup>(6)</sup>은 선삭시 칩흐름각 해석을 위하여 등가측면절삭날과 공구축이 이루는 각을 등가측면절

삭날각(equivalent side cutting edge angle),  $C_{seq}$ 로 정의하였다.

한편, 등가측면절삭날각,  $C_{seq}$ 와 실제 공구의 측면경사각,  $\alpha_s$  및 후방경사각  $\alpha_b$ 가 주어지면 Shaw<sup>(7)</sup>에 의해 제시된 방법으로 등가기울임각,  $i_{eq}$ , 등가속도경사각,  $\alpha_{veq}$ 를 식(1) 및 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan i_{eq} = \tan \alpha_b \cos C_{seq} - \tan \alpha_s \sin C_{seq} \quad (1)$$

$$\tan \alpha_{veq} = \tan \alpha_s \cos C_{seq} + \tan \alpha_b \sin C_{seq} \quad (2)$$

식(1), (2)와 칩흐름각,  $\eta_c$ 로부터 경사절삭에서의 수직경사각,  $\alpha_n$ , 유효경사각,  $\alpha_e$ , 수직전단각,  $\phi_n$ , 전단흐름각,  $\eta_s$  및 유효전단각,  $\phi_e$ 에 상당하는 등가경사절삭 시스템에서의 등가의 각들은 각각 식(3)~(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \alpha_{neq} = \cos i_{eq} \tan \alpha_{veq} \quad (3)$$

$$\sin \alpha_{eeq} = \sin \eta_c \sin i_{eq} + \cos \eta_c \cos i_{eq} \sin \alpha_{neq} \quad (4)$$

$$\tan \phi_{neq} = \frac{t/t_c \cos \alpha_{neq}}{1 - t/t_c \sin \alpha_{neq}} \quad (5)$$

$$\tan(-\eta_s) = \frac{\tan i_{eq} \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq}) - \tan \eta_c \sin \phi_{neq}}{\cos \alpha_{neq}} \quad (6)$$

$$\sin \phi_{eeq} = \frac{\cos \eta_s \cos \alpha_{eeq} \sin \phi_{neq}}{\cos \eta_c \cos \alpha_{neq}} \quad (7)$$

### 3. 절삭력 해석

#### 3.1 공구 경사면에 작용하는 절삭력 성분

3 차원 절삭을 평가하기 위해서는 3 개의 직교하는 절삭력성분을 결정할 필요가 있다. 외경선삭의 경우 3 개의 직교하는 절삭력 성분은 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 오른손 좌표계,  $xyz$ 에 의해 주절삭 분력  $F_y$ ( $y$  축 방향의 절삭저항), 이송분력  $F_z$ ( $z$  축 방향의 절삭저항) 및 배분력  $F_x$  ( $x$  축 방향의 절삭저항)으로 나타낼 수 있으며 공구 동력계를 사용하여 측정할 수 있다. 그러나 칩과 공구 경사면 사이의 마찰 상태를 해석하기 위해서는 공구인선을 원점으로 하고 주절삭날에 해당하는 등가측면절삭날 방향  $x_3$ , 공구 경사면 상에서 절삭날에 수직한 방향  $z_3$  및 공구 경사면에 수직한 방향

$y_3$ 으로 이루어지는 새로운 오른손 좌표계,  $x_3y_3z_3$ 를 설정하여 상기의 3 개 절삭력 성분을  $F_{Rx}$ ,  $F_{Ry}$ ,  $F_{Rz}$ 로 나타내는 것이 필요하다.  $xyz$  좌표계를 새로운 좌표계  $x_3y_3z_3$ 로 변환시키기 위해서는 그림에서 나타낸 바와 같이  $y$  축을 중심으로 등가측면절삭날 각  $C_{seq}$ 만큼 회전시키고, 새로운  $z_1$  축을 중심으로 등가기울임각  $i_{eq}$ 만큼 회전시킨 후,  $x_2$  축을 중심으로 등가수직경사각  $\alpha_{neq}$ 만큼 회전시킨다. 이 때의 좌표 변환행렬은 식(8)에 나타낸 바와 같다<sup>(8)</sup>.

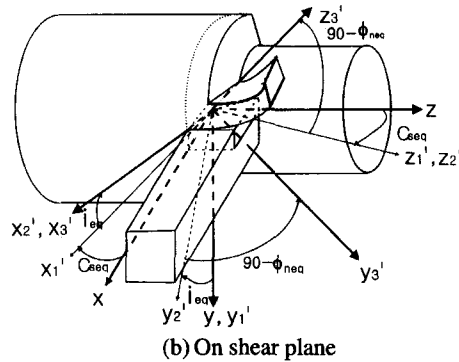
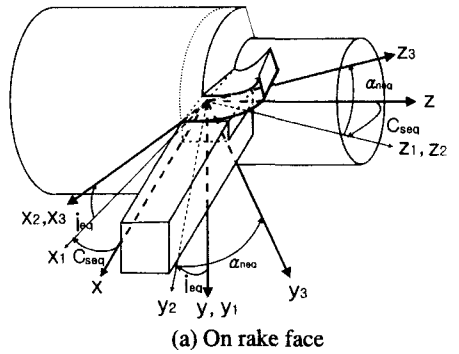


Fig. 3 Coordinate system in turning

마찰계수  $\mu$ 는 일반적으로 마찰력을 수직분력으로 나눈 값으로 정의된다. 그러나 공구 경사면에 작용하는 접선력  $F_c$ 가 작용하는 방향과 칩흐름 방향이 이루는 각이  $\rho_c$ 라 하면, 공구 경사면상의 마찰계수  $\mu$ 는 식(9)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_{Rx} \\ F_{Ry} \\ F_{Rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos i_{eq} \cos C_{seq} & \sin i_{eq} & -\cos i_{eq} \sin C_{seq} \\ -\cos \alpha_{neq} \sin i_{eq} \cos C_{seq} - \sin \alpha_{neq} \sin C_{seq} & \cos \alpha_{neq} \cos i_{eq} & \cos \alpha_{neq} \sin i_{eq} \sin C_{seq} - \sin \alpha_{neq} \cos C_{seq} \\ -\sin i_{eq} \sin \alpha_{neq} \cos C_{seq} + \cos \alpha_{neq} \sin C_{seq} & \sin \alpha_{neq} \cos i_{eq} & \sin i_{eq} \sin \alpha_{neq} \sin C_{seq} + \cos \alpha_{neq} \cos C_{seq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} F_{Sx} \\ F_{Sy} \\ F_{Sz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos i_{eq} \cos C_{seq} & \sin i_{eq} & -\cos i_{eq} \sin C_{seq} \\ -\cos(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \cos C_{seq} + \sin \phi_{neq} \sin C_{seq} & \cos(90 - \phi_{neq}) \cos i_{eq} & \cos(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \cos C_{seq} + \sin(90 - \phi_{neq}) \cos C_{seq} \\ \sin(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \cos C_{seq} + \cos(90 - \phi_{neq}) \sin C_{seq} & -\sin(90 - \phi_{neq}) \cos i_{eq} & -\sin(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \sin C_{seq} + \cos(90 - \phi_{neq}) \cos C_{seq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Rz}^2} \cos \rho_c}{F_{Ry}} \quad (9)$$

$$\frac{V_c}{V} = \frac{\cos i_{eq} \sin \phi_{neq}}{\cos \eta_c \sin(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (14)$$

### 3.2 전단면에서 작용하는 절삭력 성분

전단과정을 해석하기 위해서는 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 절삭날 방향( $x_3'$  축 방향), 전단면 상에서 절삭날에 수직인 방향  $z_3'$  및 전단면 상에 수직인 방향  $y_3'$  으로 이루어지는 새로운 오른손 좌표계,  $x_3' y_3' z_3'$  를 결정하는 것이 필요하다. xyz 좌표계를 새로운 좌표계,  $x_3' y_3' z_3'$  로 변환하기 위해서는 y 축을 중심으로 등가측면절삭날각,  $C_{seq}$  만큼 회전시키고, 새로운  $z_1'$  축을 중심으로 등가기울임각,  $i_{eq}$  만큼 회전시킨 후,  $x_2'$  축을 중심으로 등가수직전단각의 여각,  $(90 - \phi_{neq})$  만큼 회전시켜야 한다. 변환 행렬은 식(10)에 나타낸 바와 같다<sup>(8)</sup>.

전단면상에서 전단흐름각  $\eta_s$  와 전단면상에서의 합력  $F_s = \sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sz}^2}$  의 방향이 이루는 각을  $\rho_s$  라 하면, 전단면에 작용하는 전단응력,  $\tau$  및 전단변형률,  $\gamma$  는 각각 식(11) 및 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{F_s}{fd} \sin \phi_{neq} \cos i_{eq} \cos \rho_s \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\cot \phi_{neq} + \tan(\phi_{neq} - \alpha_{neq})}{\cos \eta_s} \quad (12)$$

### 3.3 절삭에너지

절삭시 소용되는 에너지는 대부분 칩생성과정인 전단소성변형과 생성된 칩이 외부로 배출될 때 공구 경사면과의 마찰과정에서 소모된다<sup>(9)</sup>.

#### 3.3.1 비마찰에너지(specific friction energy), $u_f$

단위 체적당 소모되는 마찰에너지로 정의되는 비마찰에너지,  $u_f$  는 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_f = \frac{\sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Rz}^2} \cos \rho_c V_c}{fdV} \quad (13)$$

여기서,  $V_c$  는 칩의 마찰 속도,  $V$  는 절삭속도이며 이들 사이에는 식(14)의 관계가 성립한다.

식(14)와 Stabler의 칩흐름 법칙<sup>(10)</sup>으로부터 마찰에너지,  $u_f$  에 관한 식(13)은 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_f = \frac{\sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Rz}^2} \cos \rho_c \sin \phi_{neq}}{fd \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (15)$$

#### 3.3.2 비전단에너지(specific shear energy), $u_s$

단위체적당 소모되는 전단에너지를 비전단에너지  $u_s$  라 하며 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_s = \frac{\sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sz}^2} \cos \rho_s V_s}{fdV} \quad (16)$$

여기서,  $V_s$  는 전단속도이며, 절삭속도( $V$ )와는 식(17)의 관계가 성립한다.

$$\frac{V_s}{V} = \frac{\cos i_{eq} \cos \alpha_{neq}}{\cos \eta_s \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (17)$$

식(17)로부터 단위 체적당 전단에너지  $u_s$  에 관한 식(16)은 식(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_s = \frac{\sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sz}^2} \cos \rho_s \cos i_{eq} \cos \alpha_{neq}}{fd \cos \eta_s \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (18)$$

#### 3.3.3 비절삭에너지(specific cutting energy), $u$

단위체적당 소모되는 절삭에너지를 비절삭에너지,  $u$  라 하며 외경선삭의 경우 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{F_y}{fd} \quad (19)$$

여기서,  $u$  는 비절삭에너지( $N/mm^2$ ),  $F_y$  는 주절삭분력( $N$ ),  $f$  는 이송속도( $mm/rev$ ),  $d$  는 절삭깊이( $mm$ )이다.

## 4. 절삭실험

3 차원 절삭시 마찰 특성과 전단 특성을 해석

하기 위하여 선반에서 외경선삭실험을 행하여 3차원 절삭이 이루어지도록 하였다.

#### 4.1 피삭재

피삭재는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 외경 90mm인 SM45C와 SS41 강봉의 흑피를 제거하고, 길이를 220mm로 절단한 후 절삭깊이 2mm, 이송속도 0.067, 0.148, 0.296, 0.444 및 0.641mm/rev에 대해 절삭속도가 각각 100m/min 및 200m/min인 조건으로 단일실험을 행하였다.

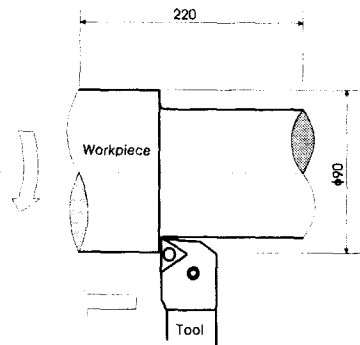


Fig. 4 Workpiece geometry and dimension

절삭력 해석은 공구동력계(Kistler, 9257A)에서 나온 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 데이터레코드에 저장한 후 신호분석기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Grobal Lab)를 사용하여 분석하였다.

Table 1에는 피삭재의 화학성분을 나타내었다.

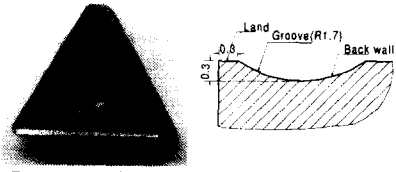
Table 1 Chemical composition(wt%) of SM45C and SS41

	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.427	0.218	0.679	0.011	0.010
SS41	0.160	0.210	0.562	0.013	0.015

#### 4.2 절삭공구

절삭실험에 사용한 공구는 상업용으로 개발된 대표적인 공구 형상인 홈형(groove type, TMNG) 공구에 의한 절삭실험을 행하였다. 사용한 공구홀더는 PTGNLM16이었다.

Fig. 5는 실험에 사용한 공구의 사진과 공구의 단면형상을 나타낸 것이다.



(a) Groove type insert (b) section view of insert (TNMG)

Fig. 5 Photograph and section view of the insert used

### 5. 실험결과 및 고찰

절삭실험에서 얻어진 칩두께와 절삭 3분력의 측정결과에 대한 해석을 통하여 칩과 공구의 마찰 특성, 전단면에서의 전단특성 및 전체적인 절삭특성의 변화에 기인하는 단위절삭량당 소요되는 비마찰에너지,  $u_f$ , 비전단에너지,  $u_s$  및 비절삭에너지,  $u$ 의 변화를 비교·고찰하였다.

#### 5.1 비마찰에너지, $u_f$

Fig. 6은 단위 체적당 소요되는 마찰에너지로 정의되는 비마찰에너지,  $u_f$ 의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 비마찰에너지,  $u_f$ 는 SM45C 및 SS41 강사이의 큰 차이를 나타내지 않으며, 이송속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 절삭에서의 치수효과<sup>(11)</sup>와 이송속도가 증가함에 따라 공구경사면에 작용하는 접선력  $F_t$ 와 칩흐름방향이 이루는 각  $\rho_c$ 가 커짐에 따라 마찰력 성분이 감소하기 때문으로 판단된다.

대부분의 절삭조건에서 절삭속도가 200m/min인 경우, 100m/min인 경우에 비해 비마찰에너지가 작게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 2차원 절삭실험결과에서와 같이 절삭속도가 증가하면 칩-공구 마찰길이의 감소에 따른 소요 마찰에너지 감소에 기인한다고 판단된다<sup>(12)</sup>.

#### 5.2 비전단에너지, $u_s$

Fig. 7은 절삭조건에 따른 비전단에너지,  $u_s$ 의 변화를 나타낸 것이다.

SS41 강을 절삭속도 200m/min( $\Delta$ 표시)인 조건에서 절삭하는 경우를 제외하곤 낮은 이송속도인 조건에서는 비교적 높은 값을 나타내며 이송속도가 0.296mm/rev 이상에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

SM45C 및 SS41 강 모두 절삭속도 100m/min 인 경우가 절삭속도 200m/min 경우보다 높은 비전단 에너지값을 나타낸다. 이러한 차이는 절삭속도의 증가에 따른 전단변형을 감소에 기인한다.

### 5.3 비절삭에너지, $u$

비절삭에너지,  $u$  는 절삭입력조건에 따른 절삭 특성평가를 위해서 가장 일반적으로 채택되는 파라미터이다<sup>(13)</sup>.

Fig. 8 은 전체적인 절삭특성을 비교하기 위하여 식(19)에서 정의한 비절삭에너지,  $u$  를 절삭조건에 따라 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 비절삭에너지,  $u$  는 이송속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 실험결과는 절삭에서의 치수효과<sup>(11)</sup>를 나타내는 것으로 설명되어질 수 있다.

또한 절삭속도 200m/min 인 경우 100m/min 의 경우보다 낮은 비절삭에너지값을 나타낸다. 이러한 실험결과는 절삭시 소모되는 에너지의 대부분이 전단과정과 마찰과정에서 소모되기 때문에 절삭조건에 따른 절삭에너지의 변화양상은 근본적으로 전단과정과 마찰과정에서 소모되는 에너지의 변화양상에 직접적인 영향을 받기 때문이라고 할 수 있다.

한편, SS41 강의 경우 SM45C 강에 비해 전반적으로 낮은 비절삭에너지 값을 나타내고 있다. 이러한 차이는 Table 1 에서 보는 바와 같이 SS41 강의 경우 SM45C 강보다 탄소함유량이 낮아 보다 낮은 비절삭에너지 값을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 9 는 비절삭에너지,  $u$  에서 차지하는 비마찰 에너지,  $u_f$  및 비전단에너지,  $u_s$  의 비를 나타낸 것이다.  $u_f/u$  및  $u_s/u$  의 값은 SM45C 및 SS41 강사이엔 큰 차이를 나타내지 않으며,  $u_f/u$  값은 낮은 이송속도 조건에서는 비교적 큰 0.4 정도이며, 이송속도가 커짐에 따라 작아져 높은 이송영역에서는 0.2 정도의 값을 나타낸다.

한편,  $u_s/u$  값은 낮은 이송속도 조건에서는 비교적 작은 0.6 정도이며, 이송속도가 큰 영역에서는 0.8 정도의 큰 값을 나타낸다. 이러한 실험결과는 2 차원 절삭<sup>(14)</sup> 및 경사절삭<sup>(3)</sup>에 대한 실험결과와 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 단인공구에 의한 3 차원 절삭시 칩과 공구 경사면 사이의 마찰 특성과 전단 특성 해석을 위하여 등가경사절삭 모델을 설정하였다.

또한 새로운 등가경사절삭 모델을 외경선삭 과정에 적용하여 절삭조건에 따른 칩-공구 마찰, 전단 및 절삭특성 해석을 수행하였다.

외경선삭실험결과에 대한 해석결과, 절삭조건에 따른 칩-공구 마찰 및 전단 특성은 기존 2 차원 절삭 및 경사절삭실험결과에 대한 해석결과와 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

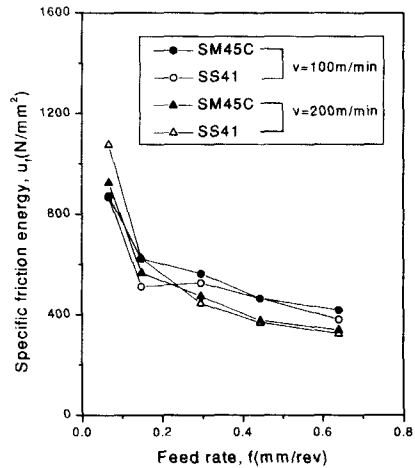


Fig. 6 Specific friction energy,  $u_f$

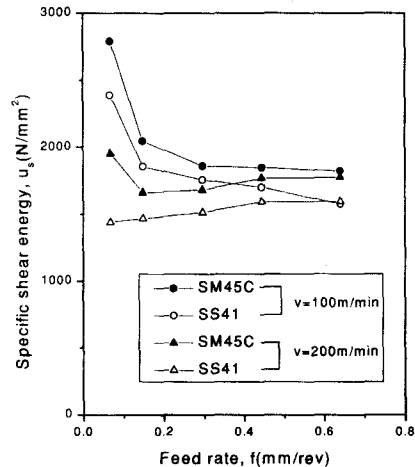


Fig. 7 Specific Shear energy,  $u_s$

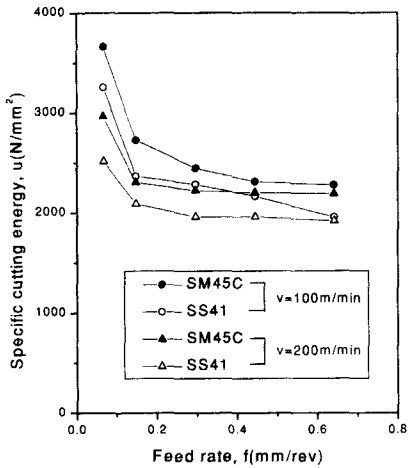


Fig. 8 Specific cutting energy,  $u$

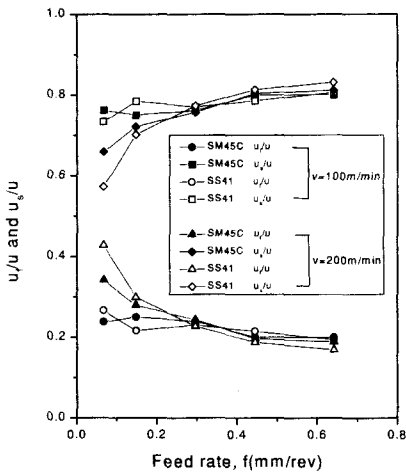


Fig. 9 Ratio of specific friction energy to specific cutting energy,  $u_f/u$  and specific shear energy to specific cutting energy,  $u_s/u$

### 참고문헌

1. N. N. Zorev, "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.
2. M. E. Merchant, "Basic Mechanics of the Metal-Cutting Process," Journal of Applied Mechanics, TRANS. ASME. Vol. 66, pp. A-168-175, 1944.

3. M. C. Shaw, N. H. Cook, and P. A. Smith, "The Mechanics of Three Dimensional Cutting Operation," TRANS, ASME, Vol. 74, pp. 1055-1064, 1952.
4. N. N. Zorev, "Metal Cutting Mechanics," Pergamon Press, Oxford, pp. 348-377, 1966.
5. E. Usui, A. Hirota, and M. Masuko, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process," Journal of Engineering for Industry, TRANS. ASME, Vol. 100, pp. 222-228, 1978.
6. 이영문, 최수준, 우덕진, "선삭가공의 칩 형상 해석(1) : 칩흐름각 해석," 대한 기계학회 논문집 제 15 권 제 1 호, pp. 139-144, 1991.
7. M. C. Shaw, "Metal Cutting Principles," Oxford Univ. Press, New York, pp. 428-450, 1984.
8. J. J. Tuma, "Dynamics," Quantum Publisher, Inc. New York, pp. 178-197, 1974.
9. M. C. Shaw, "Metal Cutting Principles," Oxford Univ. Press, New York, pp. 30-36, 1984.
10. G. V. Stabler, "The Chip Flow Law and Its Consequences," Pro. 5th. Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., Birmingham, pp. 243-251, 1964.
11. M. C. Shaw, and I. Finnie, "The Shear Stress in Metal Cutting," Transactions of the ASME, vol. 77, pp. 115-125, 1955.
12. E. M. Trent, "Metal Cutting," Butterworths, pp. 31-48, 1977.
13. I. S. Jawahir, N. Qureshi, and J. A. Arsecularatne, "On the Interrelationships of some Machinability Parameters in Finish Turning with Cermet Chip Forming Tool Inserts," Int. J. Mach Tools Manufact. Vol. 32/5, pp. 709-723, 1992.
14. M. E. Merchant, "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip," Journal of Applied Physics, Vol. 16, pp. 267-275, 1945.