

# 3차원 절삭가공시 절삭력 예측에 관한 연구

## A Study On Prediction Of Three Dimensional Cutting Forces According To The Cutting Conditions

신근하\*, 손승요\*, 신규호\*\*  
 (\*:AJOU UNIV, \*\*:KMEC)

**Key Words:** Inclination Angle, Chip Flow Angle, Shear Energy, Friction Energy

**ABSTRACT :** In Turning, It is good selection of cutting condition and cutting tools that influence upon the accuracy of dimension, manufacturing efficiency and extension of tool life. Among them, especially, the identification of cutting force due to the change of cutting conditions, which exerts a great influence on the turning, is very important. In this study, the cutting resistance due to the change of cutting conditions was calculated by using the energy method, and good agreement in shown between theoretical and experimental results, which were tested for the cutting resistance at the cemented carbide cutting tools with workpieces of SM20C and SM45C.

### 1 서론

기계가공분야에서 제품의 정밀도와 생산성의 향상은 매우 중요한 문제이다. 그러므로 절삭작업중 절삭조건, 가공물의 물리적 성질, 공구의 상태를 정확히 이해하여야만 원하는 제품을 얻을수 있다. 그 중 절삭시 발생하는 절삭저항은 제품과 절삭공구에 가장 중요한 영향을 주고 있으며 이에 대한 연구가 계속되어 왔으나 아직 만족할만한 결론이 없으리만큼 절삭저항을 예측하기란 매우 어려운 문제이다. 대부분의 절삭해석의 접근 방법은 절삭날과 절삭속도 벡터가 수직인 2차원적 해석이 대부분이었으나 실제의 절삭은 절삭속도에 대해  $i$ 만큼 기울어진 3차원적 절삭 형태를 취하고 있다. 3차원 절삭은 M. C. Shaw<sup>[1]</sup>가  $\phi_0, a_0, V_c, V$ 를 이용하여 처음으로 해석하였으며 Merchant<sup>[2]</sup>, Stabler<sup>[3]</sup>, Brown<sup>[4]</sup>, Armarego<sup>[5]</sup>, Zorev<sup>[6]</sup>, 그리고 최근에 兒井英治, 益子正巳<sup>[7]</sup>등이 많은 연구를 하였다. M. C. Shaw, N. H. Cook 및 P. A. Smith<sup>[1]</sup>는 Stabler가 제안한 절삭속도벡터와 칩유동속도벡터가 포함되는 평면에서 유효경사각  $\alpha_0$ 를 이용하여, 3차원 절삭의 해석을 2차원 실험결과에 의하여 할수 있음을 제안하였으며, 칩 유출각에 대한 Stabler의 제안( $\eta_c=i$ )이 근사적으로 일치함을 밝혔다. 또한 double cutting edge를 갖는 공구에 대하여 E. J. Armarego<sup>[8]</sup>가 3차원 절삭의 2차원적 해석을 시도하였으며 그 결과 그는 2차원 절삭 실험을 거치지 않고서는 3차원 절삭의 해석은 불가능하다고 하였다. 그리고 E. Usui, A. Hirota, M. Masuko<sup>[9]</sup> 등이 절삭력을 전단에너지와 마찰에너지로 구분한 에너지법<sup>[1,2,10,11,12]</sup>을 이용하여 double cutting edge를 갖는 절삭공구의 칩 유동각  $\eta_c$ 를 최소에너지법으로 구한후 2차원절삭을 이용하여 3차원 절삭력을 구하였다.

즉 현재까지의 3차원 절삭의 해석방법은 2차원 절삭 실험을 행한후 그 자료를 이용하여 3차원적 접근을 시도하였으나 본 연구에서는 피삭재의 기계적 성질 (인장강도, 항복강도)과 절삭조건만을 이용하여 3차원 절삭가공시 그 절삭력을 예측하는 방법을 제시하고 이를 일반 구조용 탄소강 (SM20C, SM45C)에 절삭조건과 BITE 형상을 변화시키면서 실험한 실험값과 비교하고자 하였다.

### 2. 관련이론

Fig 2-1.은 3차원 평삭의 기본적인 절삭 상태를 도시한것으로 다음과 같은 가정하에서 절삭이론을 전개한다.

- i) 연속형 칩이 형성되고, 구성인선이 없는 정상상태이다
- ii) 절삭력은 모두 공구경사면위에 작용한다
- iii) 2차원 절삭에서의 상면경사각  $\alpha$ 와 전단각  $\phi$ 의 관계는 3차원 절삭에서의 유효경사각  $\alpha_0$ 와 유효 전단각  $\phi_0$ 의 관계와 같다.

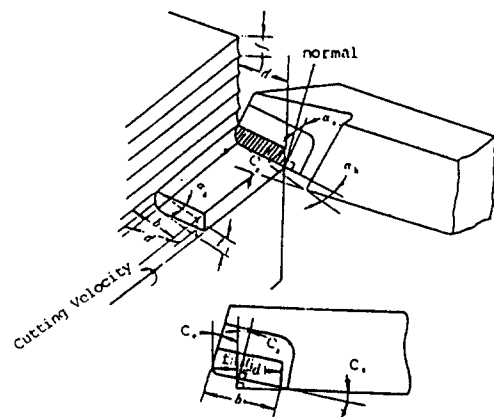


Fig2-1. 3-Dimensional Cutting Condition of Plane Cutting

Fig 2-1. 에서와 같이 옆날각 (Side Cutting Edge Angle)  $C_s$ 와 옆면경사각 (Side Rake Angle)  $\alpha_s$ , 그리고 절삭조건으로부터  $t_1=f \cos C_s, b=d/\cos C_s$  인 관계식을 얻을수 있고 일반적으로 절삭 가공은 절입 깊이가  $d$ 가 feed 보다 크며, 또한 일부의 나사가공을 제외하고는 Nose 반경  $R$ 이 Feed보다 크다. Fig 2-1.을 좀 더 일반화시켜 Double Cutting Edge를 갖는 절삭공구에 칩형성기구를 나타낸것이 Fig 2-2.이다.

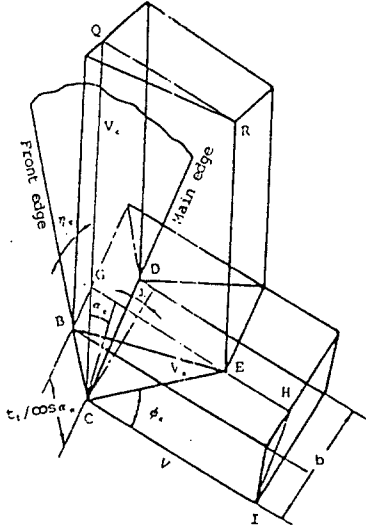


Fig2-2. Basic Chip Formation Model of Double Edge Cutting

전절인 (front edge) CB와 주절인 (main edge) CD에서 전단변형을 받아 칩이 형성되며 이는 공구면상을 따라 특정방향으로 흘러간다. 이때 칩과 전절인 사이의 각을 칩유출각  $\eta_c$ 라한다. 평면 IHERQC는 기울임각(inclination angle)  $i$ 로 인한  $t_1$ 의 변화만 제외하면  $V, V_c$ 를 하나의 평면으로 하는 2차원 절삭에서의  $\phi, \alpha$ 의 관계와 같다. Fig 2-2.의 모델은 Nose 반경을 갖는 다양한 형태의 절삭공구의 응력해석에 적용시킬수 있는 가장 기본적인 모델이다.

Fig 2-2. 에서와 같이 칩유출각도  $\eta_c$ 와 기울임각  $i$ 를 이용하여 다음과 같이 유효경사각  $\alpha_e$ 에 대한 식을 얻을수 있다.

$$\sin \alpha_n \cos i \cos \eta_c + \sin \eta_c \sin i = \sin \alpha_e \quad (1)$$

그리고 수직경사각  $\alpha_n$ 과 속도경사각  $\alpha_v$  사이에는  $\tan \alpha_n = \tan \alpha_v \cos i$ 의 관계식이 성립하고 3차원 절삭공구의 형상으로부터

$$\tan \alpha_n = \tan \alpha_v \cos C_s - \tan \alpha_b \sin C_s$$

$\tan \alpha_v = \tan \alpha_s \cos C_s + \tan \alpha_b \sin C_s$  인 관계식을 얻을수 있다. 또한 전단 속도  $V_c$ 와 칩유출 속도  $V_c$ , 그리고 절삭속도  $V$ 를 하나의 평면으로 하여 다음의 속도관계식을 얻을수 있다.

$$V_s = \frac{\cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \quad (2)$$

$$V_c = \frac{\sin \phi_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \quad (3)$$

절삭가공시 발생하는 에너지는 전단면위에서의 단위 체적에 대한 전단에너지  $U_s$ 와 공구경사면과 칩과의 마찰에 의한 마찰에너지  $U_f$ , 절삭할때 형성되는 새로운 표면적의 형성으로 인한 표면에너지  $U_n$ , 그리고 전단면을 평탄하는 금속과 더불어 생기는 운동량변화에 의한 운동에너지  $U_m$ 으로 나눌수 있으나, 표면에너지  $U_n$ 와 운동에너지  $U_m$ 은 다른 에너지에 비하여 무시할수 있으므로<sup>[22]</sup> 본 연구에서는 전단에너지  $U_s$ 와 마찰에너지  $U_f$ 만을 고려하기로 한다. 단위시간당 전단면에서 발생하는 전단에너지  $U_s$ 는 전단응력  $\tau_s$ 와 전단속도  $V_s$ , 그리고 전단면적  $A$ 의 곱으로 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$U_s = \tau_s V_s A, \quad \text{여기에 (2)식을 대입하면}$$

$$U_s = \frac{\tau_s A \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \quad (4)$$

을 얻을수 있다. 또한 단위시간당 공구경사면 위에서 발생하는 마찰에너지  $U_f$ 는 공구경사면과 칩과의 마찰력  $F_f$ 와 칩의 유출속도  $V_c$ 의 곱으로 나타낼수 있다.

$$U_f = F_f V_c = F_f \frac{\sin \phi_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \quad (5)$$

그런데 절입깊이가  $t_1$ 일때 단위절삭폭에 대한 마찰력  $F_f$ 는 2차원 절삭에서와 마찬가지로 절삭속도와 칩유출속도를 포함하는 평면내에서 동일한 절입깊이와 단위 절삭폭상에 작용하는 마찰력으로 작용한다고 가정하고 이를 공구면과 칩 사이의 전체 접촉 면적에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$F_f = \int_0^{B_1} \frac{\tau_s \sin \beta}{\cos(\phi + \beta - \alpha) \sin \phi} t db \quad (6)$$

여기서

$$\int_0^{B_1} t_1 db = \cos \alpha_e \int_0^B t db = \cos \alpha_e \frac{b t_1}{\cos i \cos \alpha_n} \text{ 이고}$$

$\alpha_e, \phi_e$ 는 2차원 절삭의  $\alpha, \phi$ 와 같으므로 (6)식은 다음과 같다.

$$F_f = \frac{\tau_s \sin \beta}{\cos(\phi + \beta - \alpha) \sin \phi} \frac{\cos \alpha_e}{\cos i \cos \alpha_n} b t_1 \quad (7)$$

$$\therefore U_f = \frac{\tau_s \sin \beta \cos \alpha_e}{\cos(\phi + \beta - \alpha) \cos(\phi_e - \alpha_e) \cos i \cos \alpha_n} b t_1 V \quad (8)$$

그러므로 (4)식과 (8)식에 의하여 전체에  
너지  $U_{total}$ 을 다음과 같이 구할수 있다.

$$U_{total} = U_s + U_f$$

$$= V \left[ \frac{\tau_s \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} \left\{ A + \frac{bt_1 \sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \cos i \cos \alpha_n} \right\} \right] \quad (9)$$

(9)식에서와 같이  $U_{total}$ 은 공구형상으로부터  
정하여지는  $i, \alpha_n$ 과 절삭조건으로부터 결정  
되어지는  $A, b, t_1, V$  그리고  $\tau_s, \phi_e, \beta, \alpha_e$ 를  
변수로 하고 있다. 유효전단각  $\phi_e$ 는 피삭재의  
물성치와 상면경사각  $\alpha$ 에 대한 함수식<sup>[13]</sup> 나타  
낼수 있다. 즉,

$$\cos(\phi - \alpha) \sin \phi = K_0 / K_1 \cos(45 - \alpha/2) \sin(45 + \alpha/2) \quad (10)$$

(10)식을 다시  $\phi$ 에 대하여 전개하면

$$\phi = \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left\{ \frac{2K_0}{K_1} \cos(45 - \frac{\alpha}{2}) \sin(45 - \frac{\alpha}{2}) - \sin \alpha \right\} + \alpha \right]$$

로 나타낼수 있다.

(여기서  $K_0$ 는 피삭재의 항복강도,  $K_1$ 은 인장강  
도를 나타낸다)

또한 2차원 절삭 실험을 통하여 전단응력에 대  
한 연구가 많은 학자<sup>[14, 15, 16, 17]</sup>들에 의하여 이루  
어졌으며 광범위한 실험 결과<sup>[7, 18, 19, 20]</sup>에 의하여  
전단응력을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\tau_s = K_0 + (K_1 - K_0) / \sqrt{3} \quad (11)$$

그리고 마찰각  $\beta$ 는 (10)식에서 구한  $\alpha, \phi$ 에  
의하여

$$\beta = \pi/4 + \alpha - \phi \quad (12)$$

인 관계에 있다<sup>[21]</sup>.

그러므로 식(10), (11), (12)에 의하여  $U_{total}$ 은  $\alpha_e$   
의 함수이고  $\alpha_e$ 는  $\eta_c$ 를 최적화변수로하므로  
 $U_{total}$ 을 최소화하는  $\eta_c$ 를 구하고 그때의  $U_{total}$ 을  
이론값으로 한다.

주분력  $F_H$ 를 구하기 위해서는 다음의 에너지방  
정식을 이용한다.

$$V F_H = (U_s + U_f)_{min} \\ \therefore F_H = \left[ \frac{\tau_s \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} \left\{ A + \frac{bt_1 \sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \cos i \cos \alpha_n} \right\} \right] U_{min} \quad (11)$$

fig 2-3. 의 (a) 에서 공구경사면에 수  
직인 성분  $N_t$  에 의하여

$$\begin{aligned} F_H^{(1)} &= N_t \cos \alpha_n \cos i \\ F_V^{(1)} &= -N_t \sin \alpha_n \\ F_T^{(1)} &= -N_t \cos \alpha_n \cos i \end{aligned} \quad (12)$$

와 같고 fig 2-3. 의 (b) 로부터

$$\begin{aligned} F_H^{(2)} + F_H^{(3)} &= F_t \sin \eta_c \sin i + F_t \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n \\ F_V^{(2)} &= F_t \cos \eta_c \cos \alpha_n \\ F_T^{(2)} + F_T^{(3)} &= F_t \sin \eta_c \cos i - F_t \cos \eta_c \sin \alpha_n \sin i \end{aligned} \quad (13)$$

그리고 (11)식의  $F_H$ 와 (12), (13)식으로부터 다음과  
같이  $F_H$ 를  $N_t$ 와  $F_t$ 의 조합으로 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} F_H &= F_H^{(1)} + F_H^{(2)} + F_H^{(3)} \\ &= N_t \cos \alpha_n \cos i + F_t (\sin \eta_c \sin i + \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n) \\ &= N_t \cos \alpha_n \cos i + F_t \sin \alpha_e \end{aligned} \quad (14)$$

$$\therefore N_t = \frac{F_H - F_t \sin \alpha_e}{\cos \alpha_n \cos i}$$

같은 방법으로

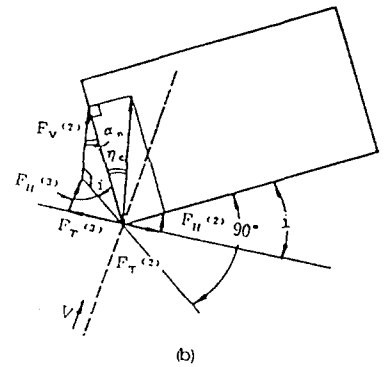
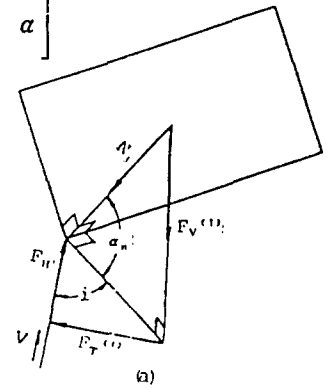


Fig2-3. Calculation of Resistance Force  $F_V, F_T$

$$\begin{aligned} F_V &= F_V^{(1)} + F_V^{(2)} \\ &= -N_t \sin \alpha_n + F_t \cos \eta_c \cos \alpha_n \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_T &= F_T^{(1)} + F_T^{(2)} \\ &= -N_t \cos \alpha_n \sin i + F_t \sin \eta_c \cos i - F_t \cos \eta_c \sin \alpha_n \sin i \end{aligned} \quad (18)$$

를 얻을수 있다.

### 3. 실험 방법

본 실험에 사용된 절삭 공구는 강재에 사용되는 P20소결 초경합금 공구를 사용하였으며, 이를 일반 기계구조용 탄소강 SM45C로 만든 shank의 선단에 용접을 하여 접합한 다음, tool grinding machine (프랑스 Dev-Bove Co.제)으로 뒷면경사각(Back Rake Angle)을 4°로 고정하고, 옆면경사각(Side Rake Angle)을 -5°에서 15°까지 5°간격으로 변화시켜 가공한후 Profile Projector와 Radius gage를 사용하여 Nose Radius가 0.2mm가 되도록 하였다. 또한 Bite 날부분의 형상은 Fig 3-1.에 표시한 바와 같고, 피삭재는 기계구조용 탄소강 (SM20C, SM45C)으로 지름 80mm, 길이 400mm인 환봉을 산화 피막을 제거하고 center가공을 하였으며, 각 시편의 기계적 성질 및 화학적 성분은 Table 3-1. 과 Table 3-2. 에 표시하였다.

Element	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HB)
Material				
SM20C	32	52	32	143
SM45C	40	72	18	178

Table 3-1. Mechanical Properties of Test Materials

Test Material	Chemical Composition					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
SM20C	0.2	0.06	0.48	0.015	0.018	0.02
SM45C	0.45	0.23	0.75	0.016	0.004	0.02

Table 3-2. Chemical Composition of Test Materials

절삭 저항을 측정하기 위하여 옆면 경사각(Side Rake Angle)을 -5°, 0°, 5°, 10°, 15°로 변화시켜 만든 Bite를 사용하여 절삭 속도 80 m/min, Feed 0.05 mm/rev, 0.1 mm/rev, 절삭 깊이 0.25mm, 0.35mm, 0.5mm, 0.7mm의 조합으로 피삭재인 SM20C, SM45C를 건식 절삭 하였다.

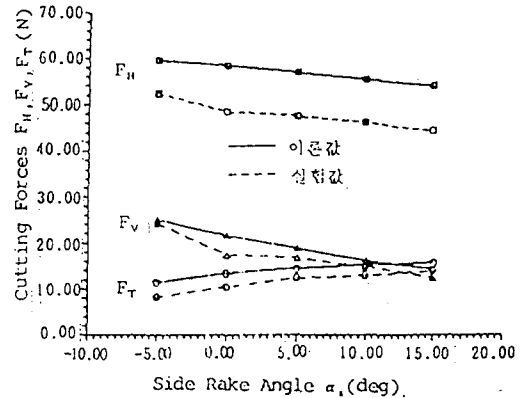
공구 동력계에 공구의 돌출부가 30mm가 되도록 고정시키고 공구 동력계에 Strain Amplifier, Recorder를 연결하고 절삭 작업을 수행하면서 주 분력, 배분력, 이송분력에 대한 Strain값을 얻었다. 또한 공구마모에 의한 영향을 줄이기 위하여 각 조건별 절삭 실험이 끝난후 Bite의 각 부위를 Profile Projector 와 Radius Gage 그리고 공구 현미경을 이용하여 측정한후 마모된 부위를 다시 가공하여 실험하였다.

Chip 윤출각을 측정하기 위하여 CNC선반위에 High Speed Camera를 설치하였으며 16\*100ft인 High Speed Camera용 Eastman Negative Color Film을 사용하여 Shutter 속도 1/4000 sec의 속도로 촬영하였다.

### 4. 결론

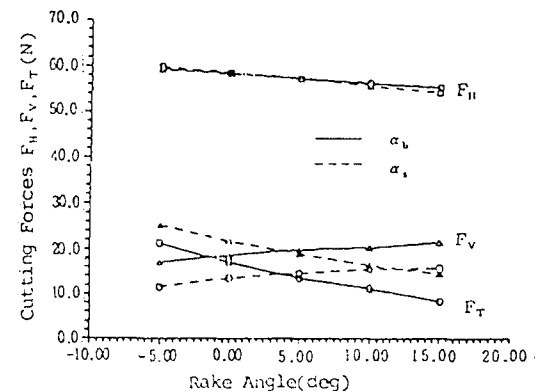
본 연구에서는 절삭 공구에 미치는 절삭저항을 예측하는 방법을 제시하고 이의 타당성을 알아보기 위하여 소결초경합금 P20 의 옆면경사각을 변화 시키고 절삭조건을 바꾸어가면서 실험한 실험값과 관련이론을 Computer를 이용하여 얻은 이론값과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 옆면경사각의 변화에 따른 절삭저항은 이론값이 실험값보다 약간 높게 나타났으나 그 경향은 일치 하였다.  $\alpha_s$ 가 증가함에 따라  $F_T$ 가  $F_V$ 보다 커지는 현상이 발생하였고 이는 절삭 깊이가 작을수록 더욱 현저하게 나타났다.



2.  $\alpha_s$ 와  $\alpha_b$ 의 변화에 의한 절삭 저항

다음 그림에서와 같이  $\alpha_b$ 가 증가함에 따라  $F_H$ 와  $F_T$ 는 감소하나  $F_V$ 는 증가함을 알 수 있다. 그리고  $\alpha_b$ 가 증가함에 따라  $F_V$ 는 증가하고  $F_T$ 는 감소하나,  $\alpha_s$ 가 증가할때  $F_T$ 는 증가하고  $F_V$ 는 감소함을 볼 수 있다.  $\alpha_s$ 의  $F_V$ 가  $\alpha_b$ 의  $F_T$ 보다 5(N)정도 크게 나타났으며,  $\alpha_b$ 의  $F_V$ 는  $\alpha_s$ 의  $F_T$ 보다 약 5(N)정도 높게 나타났다.  $\alpha_s$ 의 증가에 따른  $F_H$ 의 감소경향은  $\alpha_b$ 의 증가에 따른  $F_H$ 의 변화와 거의 같은 경향을 보여주고 있다.



### 3. 칩유출각 $\eta_c$ 와 $F_H, \alpha_s, A$ 의 변화

Feed 0.1 mm/rev, 절삭속도 80 m/min, 절입깊이 0.5 mm, 공구형상(4, 0, 10, 5, 4, 2, 0, 2)일때 최적화 변수  $\eta_c$ 에 대한 에너지 U를 다음그림에 나타내었으며, 여기에 전단면적 A와 유효경사각  $\alpha_s$ 의 변화도 함께 도시하였다.  $\eta_c$ 가 21°일때 에너지가 최소가 됨을 알 수 있다. 전단면적 A는 에너지와 유사한 경향을 보여주고 있으나 유효경사각  $\alpha_s$ 는 에너지와 무관하였다. 즉 전체에너지 U가 최소가 되기 위해서  $\alpha_s$ 의 최대값을 요구하지 않은 것으로 보아 칩의 흐름이 절삭공구의 최적 유효경사면을 따라 진행되지만은 않는다는 것을 알 수 있다.

또한 칩 유출각  $\eta_c$ 가 20° 전후에서는  $F_H$ 에 큰 변화가 없으나 그 이외의 구역에서는  $\eta_c$ 의 변화에 따라 큰 영향을 받고 있으므로 만일 비정상적인 절삭상태 (Chipping, BUE 등)로 절삭작업이 진행될 경우  $\eta_c$ 의 급격한 변화로 인하여 절삭력에 매우 큰 영향을 주므로 절삭공구에 진동 및 마모촉진등의 영향을 미칠것으로 판단된다. 칩 유출각  $\eta_c$ 를 측정하기 위하여 High Speed Camera로 촬영한 사진을 Photo 4-1.에 나타내었다.

절삭속도 V에 수직한 평면으로 투영된 칩 유출각  $\eta_c'$ 는 그림과 동일한 조건에서 약 19.98°가 되며 이는 Photo 4-1.에서와 같이 실제 측정각 20°와 매우 근사한 값으로 최소에너지 이론이 칩 유출각 예측에 매우 적절한 방법임을 보여주고 있다.

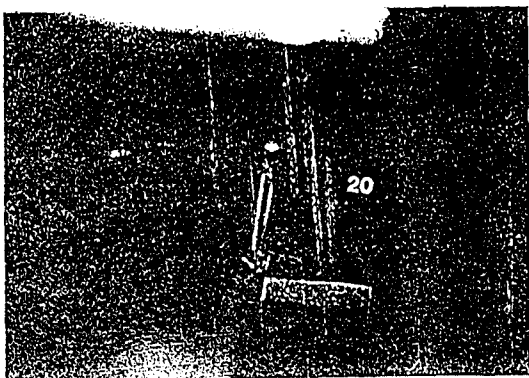
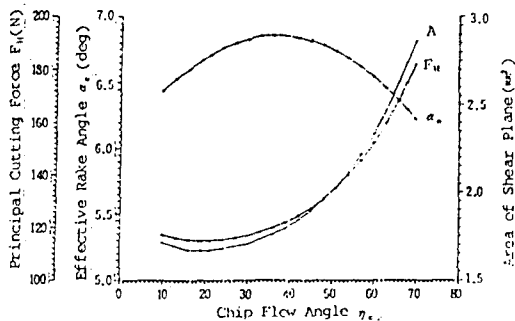
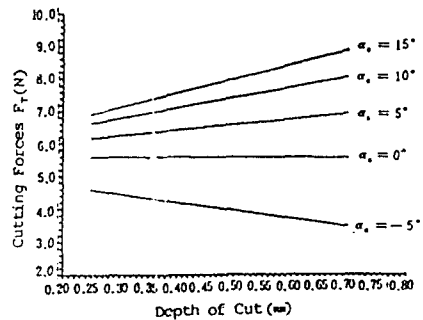


Photo4-1. General View of Chip Flow Angle

### 4. 절삭깊이와 절삭저항

절삭깊이와 옆면경사각  $\alpha_s$ 가 증가함에 따라  $F_H$ 와  $F_v$ 는 감소하고  $F_T$ 는 감소하였으며  $\alpha_s$ 가 5°, 10°, 15°일때 절입깊이가 증가함에 따라  $F_T$ 는 증가하나  $\alpha_s$ 가 -5°, 0°인 경우  $F_T$ 는 감소하였다. 즉  $\alpha_s$ 가 음의 값을 갖을때에는 절입깊이가 증가함에 따라  $F_T$ 는 감소하고  $\alpha_s$ 가 양의 값을 갖을때에는 절입깊이가 증가함에 따라  $F_T$ 는 증가함을 알 수 있다.



## REFERENCE

- (1) M. C. Shaw, N. H. Cook & P. A. Smith, "The Mechanics of Three-Dimensional Cutting Operation." TRANS. ASME Vol 74 1952 pp. 1055-1061.
- (2) M. Eugene Merchant, "Basic Mechanics of The Metal-Cutting Process." J of APPL Mech. TRANS. ASME .Vol 66. 1944, pp. A-168-175.
- (3) G. V. Stabler, "The Fundamental Geometry of Cutting Tools." Proc Inc Mech Eng 1951 pp. 165-171.
- (4) R. H. Brown, & E. J. A. Armarego, "Oblique Machining with a Single Cutting Edge." INT J of Mach Tool D&R Vol 4. 1964 pp. 9-25.
- (5) E. J. A. Armarego, "Metal Cutting Analyses for Turning Operations." INT J of Mach Tool D&R Vol 10, 1970, pp. 361-379.
- (6) N. N. Zorev, "Some Regularities of the Process of Non-Free Cutting." Metal Cutting Mechanics. Pergamon Press Oxfords. 2966 pp. 347-377.
- (7) 兒井英治, 益子正巳, "3次元 切削の 基礎的研究". 日本機械學會 論文集 38卷 316號 1971 pp. 3255-3263.
- (8) E. J. A. Armarego, "Machining with Double Cutting Edge Tools." INT J of Mach Tool D and R Vol 7. 1967 pp. 23-37.

- (9)E.Usui,A.Hirota,M.Masuko"Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process." TRANS. ASME. 1978 pp. 222-229
- (10)M.Eugene.Merchant."Mechanics of Cutting Process."J of Appl Phys,Vol 16 1945 pp. 267-318.
- (11)M.C Show,"Metal Cutting Principles."MIT Press. 1957 ppl3-40.
- (12)N.H.Cook,"Manufacturing Analysis." "Addison-Wesley. 1966,pp. 31-75.
- (13)P.K.Wright."Predicting The Shear Plane Angle in Machining from Workmaterial Stain-Hardening Characteristics."J of Engineering for Industry Vol 104.1982 pp. 285-292 .
- (14)J.T.Black."Flow Stress Model in Metal Cutting ."J of Engineering for Industry.Vol 101 1979 pp 403-415 .
- (15)M.H.Pleck,L.D.Metz,T.F.Conry."The Use of Decelerative Metal Cutting in Design of Energy Managenent Systems." J of Engineering for Industry Vol 101.1975 pp. 867-872 .
- (16)Y.Kita,M.Ido,N.Kawasaki."A Study of Metal Flow Ahead of Tool Face with Large Negative Rake Angle."J of Engineering for Industry. Vol 104 1982 pp. 319-325.
- (17)T.H.C.Childs."Elastic Effects in Metal Cutting Chip Formation."Int J Mech,Sci.Vol 22.1980 pp 457-466
- (18)T.C.Hsu."AN Analysis of The Plastic Deformation Due to Orthogonal and Oblique Cutting."J of Stain Analysis.Vol 1 No 5.1966 pp. 375-379
- (19)J.S.Strenkowski,J.T.Carrol.III."A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting . "J of Engineering for Industry.Vol 107,1985. pp. 349-354 .
- (20)J.S.Strenkowski,J.T.Carrol.III."Finite Element Models of Orthogonal Cutting with Application to Single Point Diamond Turning ."Int J of Mech,Sci.Vol 30 No 12,1988 pp. 899-920 .
- (21)E.H.Lee,B.W.shaffer."The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining."J of Applied Mech TRANS ASME Vol 73 1951 pp. 405-413 .
- (22)中山一雄."切削加工論." CORONA Pub.1978 pp 37-42..