

# 에너지 方法을 利用한 三次元 切削力의 理論的 予側에 관한 研究

金 壯 亨

## A Study on the Theoretical Prediction of Three Dimensional Cutting Force used Energy Method

Kim Jang-hyung

### Summary

The purpose of this paper is to predict the cutting force, utilizing new model of double cutting edge which have normal rake angle and tool inclination angle. Changing side and back rake angle, side cutting edge angle in the new model, I obtained three dimensional cutting force by making use of  $\eta_c = i$  proposed by stabler and energy method to obtain the three dimensional cutting force.

I calculated theoretical results with development of optimization algorithm which can be put into three dimensional theory, using the method of least square with orthogonal cutting data. The experimental and theoretical results in this paper is proved that it is possible to predict cutting force only if we could get the orthogonal cutting data.

### 序 論

三次元 切削을 해석하려는 많은 노력이 지금까지 행하여져 왔다. 즉 oblique cutting의 解析에 (Brown, R.H. 等, 1964), 또 double cutting edge의 解析 (Armarego, E.J.A. 等, 1970) 등이 그것이다. 그러나 이러한 생각은 切削力에 미치는 因子를 理論的으로 구했기 때문에 正確히 三次元 切削力을 예측하지 못했다. 여기서 M.C. Shaw는 二次元 切削實驗으로 실험적으로 예측할 수 있는 三次元 切削力을 구할 수 있다고 하였다 (Shaw, M.C. 等, 1952).

이러한 Shaw의 idea를 바탕으로 Usui, Hirota, Masuko는 double cutting edge의 새로운 모델을 提示하고 二次元 實驗 data만을 가지고 三次元 切削力을 理論的으로 解析한후 실제 實驗値와 비교하여 正確함을 증명하였다. 본 研究에서는 工具경사각( $i$ )와 수직경사각( $\alpha_n$ )을 가지는 Usui 등의 double cutting edge model에 nose radius가 없는 工具를 形狀變化시키면서 에너지 方法을 使用하고 Stabler가 제안한  $\eta_c = i$ 를 利用하여 切削力을 구하여 理論値와 實驗値가 일치함을 보였다. 그리고 二次元 切削實驗 data를 가지고 최적화 알고리즘을 開發하여 三次元 切削力을 理論的으로 구할 때 부끄

로그로 적용가능성을 나타내었다.

## 實驗裝置

### 1. 研究方法

#### 1) 三次元 切削 모델

Nose Radius는 제로이고 nose angle( $\angle BCD$ )는  $90^\circ$ 도 수직경사각( $\alpha_n$ ), 경사각( $i$ )로 직사각형 절삭단면(깊이  $t$ , 폭  $b$ )를 자른다. 칩은 Front edge( $CB$ )에 대해서는 삼각형( $CEB$ ), main edge( $CD$ )에 대해서는 사다리꼴( $CEFD$ ) 전단면이 동시에 생성되어 일정한 방향으로流出된다. Fig 1에서는 切削速度( $V$ )와 칩流出速度

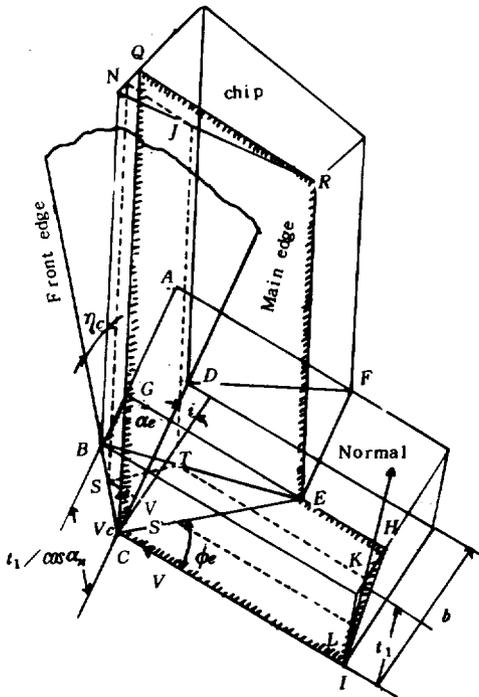


Fig 1. Double cutting edge model.

( $V_c$ )를 포함하는 평면이 강조된다. 예를들면 입의의 形成된 평면  $IHERQGC$ 를 보면 線  $CE$ 와  $HI$ 는 二次元 切削에서 각각 전단면과 切削깊이로 고려될 수가 있다. 그러므로 Fig 1에서의 切削은 유효전단각( $\phi_e$ ) 및 유효경사각( $\alpha_e$ )를 가진 二次元 切削의 同一形으로 解析되어 질 수가 있는 것이다. 유효경사각( $\alpha_e$ )는 기하학적인 方法에 의해 얻어진다.

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

여기서 Stabler의 法則  $\eta_c = i$ 를 적용하면

$$\sin \alpha_e = \sin^2 i + \cos^2 i \cdot \sin \alpha_n \dots (2)$$

그리고 nose radius가 없을시 옆날각( $C_s$ ), 상면경사각( $\alpha_s$ ), 옆면경사각( $\alpha_b$ )를 가진 工具는 공구경사각( $i$ )와 수직경사각( $\alpha_n$ )을 가진 工具로 나타낼 수가 있다. 즉 아래와 같은 關係式이 成立한다 (Cook, N.H., 1966).

$$\left. \begin{aligned} \tan i &= \tan \alpha_b \cdot \cos C_s - \tan \alpha_s \cdot \sin C_s \\ \tan \alpha_e &= \tan \alpha_s \cdot \cos C_s + \tan \alpha_b \cdot \sin C_s \\ \tan \alpha_n &= \tan \alpha_n \cdot \cos i \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

#### 2) 切削力의 豫則

切削力을 결정하기 위하여 에너지方法을 使用한다. 절삭에서의 단위시간당 총 에너지는 전단 에너지( $U_s$ ), 경사면위에서의 마찰에너지( $U_f$ ), 절삭할때 새로운 표면적의 形成으로 인한 표면 에너지( $U_a$ ), 운동량의 變化에 의해서 생기는 운동에너지( $U_m$ )의 총합과 같다. 여기서  $U_a$ 와  $U_m$ 은 극히 적은 값이므로 무시하면

$$\text{즉 } U = U_s + U_f \dots (4)$$

전단에너지는 전단응력과 전단속도로 나타낼 수 있으므로

$$U_s = \tau_s \cdot V_s \cdot A \dots (5)$$

여기서  $A$ 는 전단평면의 면적이며 삼각형  $CEB$

의 面積  $A_1$  과 사다리꼴  $CEFD$ 의 面積  $A_2$  로써 Fig 1에서 나타나는 바와 같다.

$$A_1 = \frac{t_1^2}{4 \cos^2 \alpha_n} \left[ \frac{4 \cos^2 \alpha_e}{\sin^2 \phi_e \cos^2 \eta_c} \left[ 1 + \frac{\cos^2 \alpha_e}{\sin^2 \phi_e \cos^2 \eta_c} - \frac{1}{\cos^2 \eta_c} (\sin^2 \eta_c + (\sin \alpha_e + \cos \alpha_e \cot \phi_e)^2 - 2 \sin \eta_c \sin i (\sin \alpha_e + \cos \alpha_e \cot \phi_e)) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots (6)$$

$$A_2 = \frac{t_1 \left( \frac{2b}{\cos i} - \frac{t_1 \tan \eta_c}{\cos \alpha_n} \right)}{2 \sin \phi_e \cos \alpha_n \eta_c \times [\cos^2 \alpha_e - \sin^2 \phi_e (\sin \eta_c - (\sin \alpha_e + \cos \alpha_e \cot \phi_e) \times \sin i)^2]^{\frac{1}{2}}} \dots (7)$$

$V$ 와  $V_c$ 를 평면내에 있는 hodograph가 二次元 切削과 같기 때문에

$$V_s = \frac{\cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \dots (8)$$

그러므로

$$U_s = \frac{\tau_s (A_1 + A_2) \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \dots (9)$$

으로 表示되고 工具面상의 단위시간당 마찰에너지  $U_f$ 는

$$U_f = F_t \cdot V_c = F_t \frac{\sin \phi_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} V \dots (10)$$

式 (9)와 (10)을 계산하기 위하여 다음과 같이 가정을 취한다.

(i) Fig 1에서  $\phi_e$ 와  $\tau_s$ 와  $\alpha_e$ 의 관계는 二次元 切削에서와 같은 것으로 한다.

$$\left. \begin{aligned} \phi_e &= f(\alpha_e) \\ \tau_s &= g(\alpha_e) \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

(ii) 切削깊이  $t$  및 단위 切削폭을 가진 二次元

切削에서의 마찰력  $f_t$ 는  $V$ 와  $V_c$ 를 포함하는 平面내에서 비록 이 平面이 工具面에 수직이 아니더라도 동일한 切削깊이  $t$ 의 위치에서 Fig 1에 있는 工具面의 단위폭상에 作用하는 것으로 한다.

$$f_t = g(\alpha_e) \dots (12)$$

위의 가정을 염두에 두고 Fig 2를 참조하면 단위 切削폭과 切削깊이  $t$ 를 가진 二次元 切削에서의 마찰력  $f_t$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$f_t = \frac{\tau_s \cdot t \sin \beta}{\cos(\phi + \beta - \alpha) \cdot \sin \phi}$$

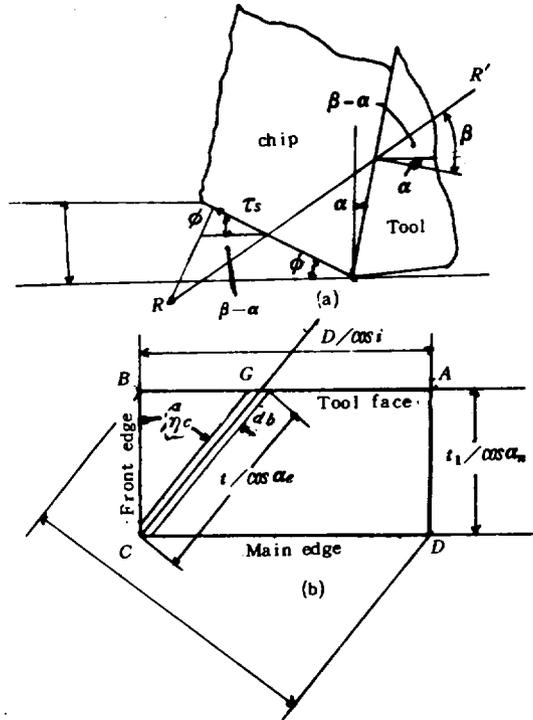


Fig 2. Calculation of frictional force on tool face.

Fig 1의 모델에서 마찰력  $F_t$ 는 Fig 2(b)를 참조하면

$$F_t = \frac{\tau_s \sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta_e - \alpha_e) \sin \phi_e} \int_0^{B_1} t db$$

$$= \frac{\tau_s \sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta_e - \alpha_e)} \frac{\cos \alpha_e}{\cos i \cos \alpha_n} b t_1 \dots (13)$$

여기서 마찰에너지  $U_f$ 는

$$U_f = \frac{\tau_s \sin \beta_e \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e + \beta_e - \alpha_e) \cos(\phi_e - \alpha_e) \cos i} \frac{b t_1 V}{\cos \alpha_n} \dots (14)$$

즉 식 (10)과 (14)는 아래와 같은 關係式이 成立한다.

$$U = U_s + U_f = F(\eta_c, \alpha_n, i, b, t_1, V)$$

여기서  $\alpha_n, i, b, t_1, V$ 는 tool geometry와 切削條件으로  $\eta_c$ 는 Stabler의 式을 代入하면 구할 수 있다.

그리고 切削態를 나타내어 주는  $\alpha_e, \phi_e, \tau_s, \beta_e$ 를 식 (1), (11), (12)를 使用하여 구할 수 있다. 切削力의 基本成分인  $F_H$ 는  $V F_H = U_s + U_f$ 를 계산하여 얻을 수 있다. 즉 식(5)와 (11)을 使用하면

$$F_H = \left[ \frac{\tau_s \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} (A_1 + A_2) + \frac{b t_1 \sin \beta \sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta_e - \alpha_e) \cos i \cos \alpha_n} \right] \dots (15)$$

式 (15)에서 구한 主分力  $F_H$ 는 工具경사면상의 수직分力  $N_t$ 와 式 (13)의 切削力  $F_t$ 의 切削速度 방향의 分力이므로

$$F_H = N_t \cos \alpha_n \cos i + F_t \sin \alpha_e \dots (16)$$

$N_t$ 가 이 式으로 결정되고  $F_v$ 와  $F_t$ 가 각각  $N_t$  및  $F_t$ 의 수직分力 및 切削速度 方向의 分力으로서 얻어진다.

$$\left. \begin{aligned} \text{즉 } F_v &= -N_t \sin \alpha_n + F_t \cos \eta_c \cdot \cos \alpha_n \\ F_T &= -N_t \cos \alpha_n + F_t \sin \eta_c \cdot \cos i - F_t \cos \eta_c \cos \alpha_n \sin i \end{aligned} \right\} \dots (17)$$

여기서 式 (3)을 代入하면 刃날각 ( $C_s$ ), 상면경사각 ( $\alpha_s$ ), 옆면경사각 ( $\alpha_5$ )를 가진 工具에 적용시킬 수 있다. 그러나 실제 使用한 工具와 Fig 1

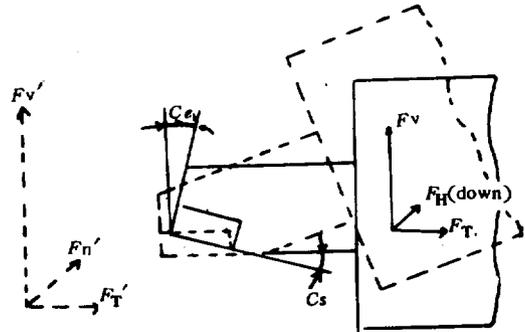


Fig 3. Rotation of main cutting edge and positive directions of force components.

을 比較하면 main cutting edge를 Fig 3과 같이 切削速度에 수직인 平面과 각  $C_s$ 만큼 회전시킨 結果가 되므로

$$\left. \begin{aligned} F_H &= F_H' \\ F_v &= F_v' \cos C_s - F_T' \sin C_s \\ F_T &= F_T' \cos C_s + F_v' \sin C_s \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

### 3) 二次元 切削 data

에너지方法을 利用하기 위하여 (11), (12) 式에 對한 二次元 切削 data가 同一 切削條件下에서 要求된다. Fig 4에 切削에서 얻어진 data를 나타낸다. 이들 data를 식 (11), (12)로 나타내기 위하여 最小자승법을 使用하면 아래와 같다. 실제 data  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_i, y_i) \dots (x_n, y_n)$ 의  $n$ 개의 data를  $y = a + bx$ 로 수식으로 表現

하여 가장 오차를 작게할 수 있는 계수  $a$ ,  $b$ 를 구하는 것이 최소자승법이다. 여기서

$$\text{error} = (a + bx_i) - y_i \dots\dots\dots (19)$$

따라서

目的 함수는

$$F = \sum_{i=1}^n \{(a + bx_i) - y_i\}^2 \dots\dots\dots (20)$$

이  $F$ 는 최소로 하는 계수  $a$ ,  $b$ 를 定하는 것이 된다.  $F$ 의 최소값은

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 0, \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \dots\dots\dots (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial a} &= \frac{\partial \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i)^2}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(a + bx_i - y_i) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} &= \frac{\partial \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i)^2}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(a + bx_i - y_i)x_i = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (22)$$

이를 정리하면

$$\left. \begin{aligned} na + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

이 연립 方程式을 풀면

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ b &= \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

와 같이 된다.

式 (24)를 利用하면 Fig 4에 나타낸 data를 式으로 나타내면 式 (25)와 같다. 여기서 각도는

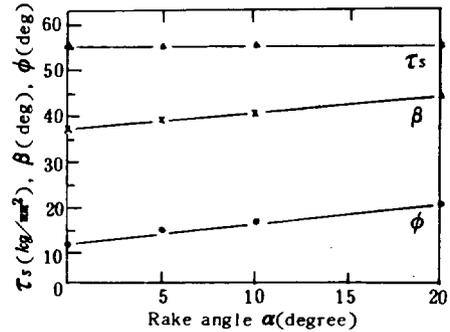
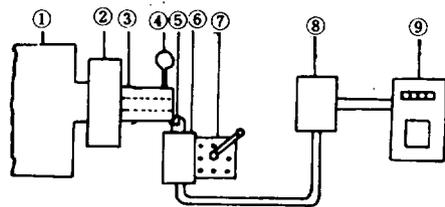


Fig 4. Experimental data of two dimensional cutting.

cutting condition ;  
 material : SM 20 C  
 cutting tool : KTP 20(0, var, 0, 7, 0, 0, 0)  
 width of cut : 2 mm  
 feed : 0.14 mm / rev  
 cutting speed : 1.54 mm / sec  
 cutting fluid : dry

radian 으로 표시된 것이다.

$$\left. \begin{aligned} \phi &= 0.2253394128 + 0.4463142857 \times \alpha \\ \beta &= 0.6574664768 + 0.3443140030 \times \alpha \\ \tau_s &= 55.3015091685 + 0.0496429114 \times \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots (25)$$



- (1) Lathe
- (2) Chuck
- (3) Work material
- (4) Dial gauge
- (5) Tool
- (6) Tool dynamometer
- (7) Tool post
- (8) Bridge head
- (9) Recorder

Fig 5. Schematic testing apparatus.

2. 實驗裝置

二次元, 三次元 切削實驗을 위하여 使用된 試  
 片은 Takiasawa Model Tal 510 이며 피삭재  
 는 KTP 20 을 使用하였다. 切削力測定을 위하  
 여 Shinkoh社의 Tool Dynamometer 을 使用  
 하고 實驗裝置는 Fig 5와 같다. 그리고 計算處  
 理는 한국과학기술원의 大型컴퓨터 CYBER 170  
 -385 에 의해 이루어졌다.

結果 및 考察

式(20)를 利用하여 式(11), (12)의 形態로 만들면

$$\left. \begin{aligned} \phi_e &= 0.2253394128 + 0.4463142857 \times \alpha_s \\ \beta_e &= 0.6574664768 + 0.3443140030 \times \alpha_s \\ \tau_s &= 55.3015091685 + 0.0496429114 \times \alpha_s \end{aligned} \right\} \dots(20)$$

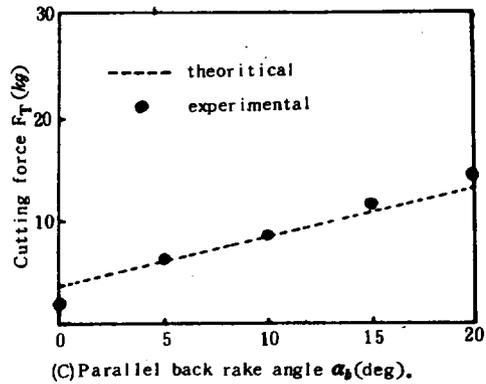
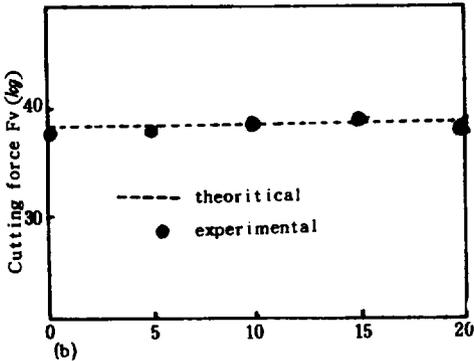
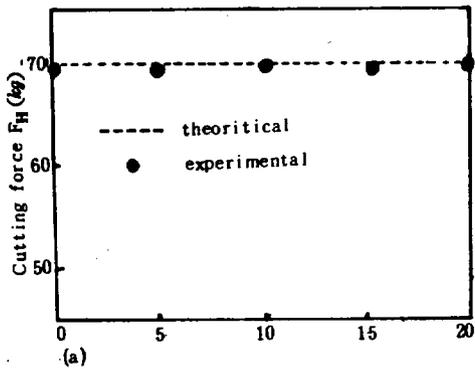
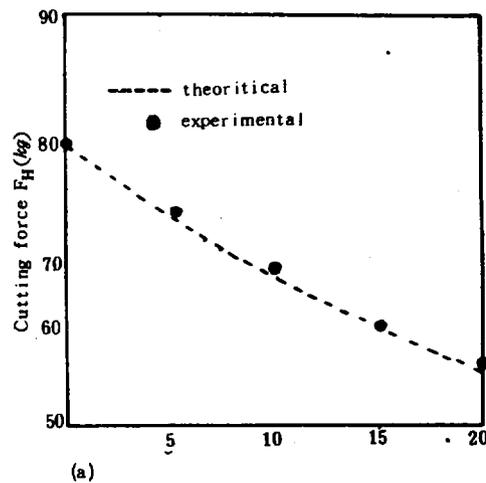
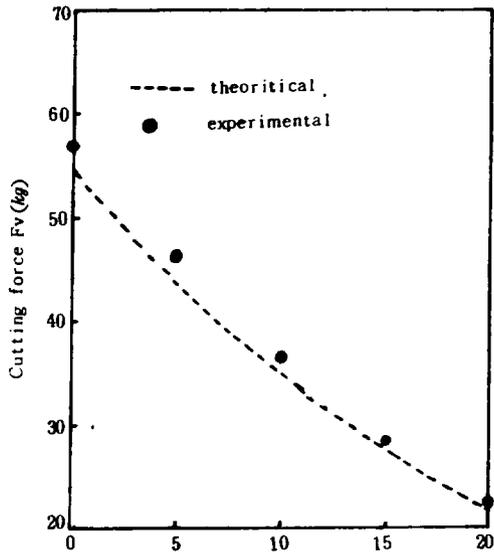


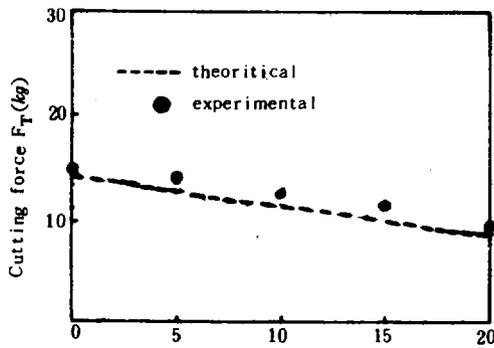
Fig 6. Variation of three components of cutting force in oblique cutting with parallel back rake angle. Cutting conditions are same as Fig. 4 excepting tool geometry (var, 10, 7, 7, 7, 7, 0).  
 (a): Principal component.  
 (b): Vertical component.  
 (c): Transverse component.

式(20)를 利用하여 (17), (18)에 代入하면 三次元切  
 削力  $F_H, F_V, F_T$ 를 구할 수 있다. Fig 6, 7,  
 8은  $C_s, \alpha_s, \alpha_b$ 의 變化에 따른 理論的인 切削  
 力을 實際 實驗値와 비교한 것이다. 그리고 최소  
 차승법을 使用하여 二次元切削 data를 함수로 나  
 타낸 프로그램을 부록에 삽입하였다.





(a)



(b)

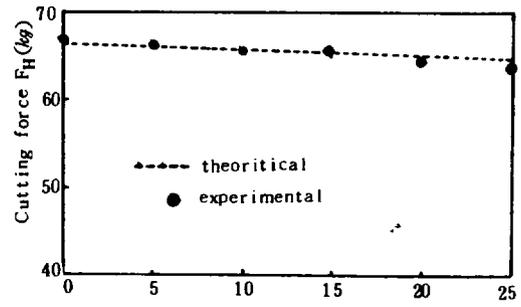
(c) Normal side rake angle  $\alpha_s$ (deg).

Fig 7. Variation of three components of cutting force in oblique cutting with normal side rake angle.

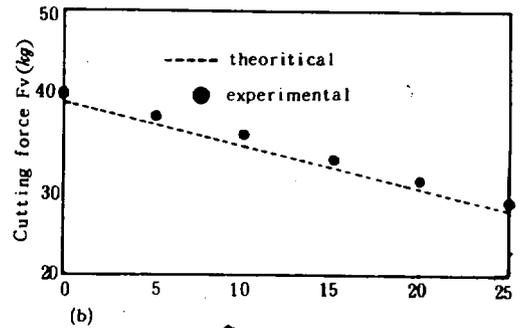
Cutting condition are same as Fig.4 excepting tool geometry(15,var,7,7,7,0)

- (a): Principal component.
- (b): Vertical component.
- (c): Transverse component.

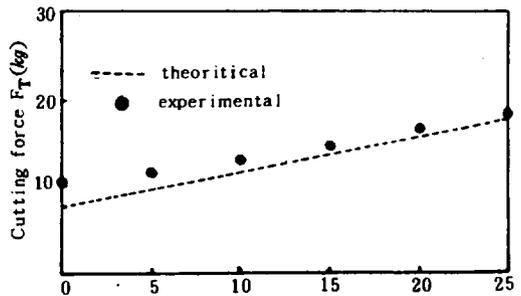
그림에서 보는 바와 같이 理論値와 實驗値가 거의 일치하고 있다. Fig 6은  $\alpha_s$ 變化에 따른



(a)



(b)



(c) Side cutting edge angle  $C_s$ (deg).

Fig 8. Variation of three components of cutting force in oblique cutting with side cutting edge angle. Cutting conditions are same as Fig.4 excepting tool geometry(15,10,7,7,7,var,0).

Cutting condition are same as Fig.4 excepting tool geometry(15,10,7,7,7,var,0)

- (a): Principal component.
- (b): Vertical component.
- (c): Transverse component.

切削力 變化를 나타내며,  $\alpha_s$ 가 증가함에 따라 주분력  $F_H$ , 이송분력  $F_v$ 는 거의 같은 경향을 보

이며 배분력  $F_T$ 는 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig 7은  $\alpha_s$  변화에 따른切削力變化를 나타내며 주분력  $F_H$ , 이송분력  $F_V$ 는 급격히 감소하며 이것은 二次元實驗에서의  $F_P$ 와  $F_Q$ 의 변화와 비슷하다. Fig 8은  $C_s$  변화에 따른切削力의變化를 나타낸 것이다.  $F_H$ 는 거의變하지 않고  $F_V$ 는 감소,  $F_T$ 는 증가하고 있다. 이것은 Brown, Usui 등의結果와 같은結果를 나타내고 있다.

### 摘 要

1. 단순한 수직경사각 ( $\alpha_n$ ), 공구경사각 ( $i$ )

를 가지는 工具에 對해 nose radius가 없이 옆날각 ( $C_s$ ), 상면경사각 ( $\alpha_s$ ), 옆날각 ( $\alpha_s$ )를 가진 工具를 Usui의 double cutting edge의 모델에 적용시킬 수가 있다.

2. 二次元 切削實驗 data를 가지고 최소자승법을 使用하여 최적화 알고리즘을 開發하고 三次元 切削實驗 結果를 理論적으로 구할 때 부프로그램으로 적용가능성을 나타내었다.

3. 二次元 切削實驗 結果만 주어진다면 에너지方法과 Stable가 제안한  $\eta_c = i$ 를 代入하여 正確히 三次元 切削力을 理論적으로 豫測할 수가 있다.

### 參 考 文 獻

- Merchant, M.E. 1944. BASIC Mechanics of the metal cutting process. Journal of Applied Mechanics TRANS.ASME. Vol 66. p. A-168-175.
- Stabler, G.V. 1951. The Fundamental Geometry of cutting tools. Proceedings of the institute of Mechanical Engineers. 1952 Vol. 165. p. 1055-1064.
- Cook, N.H., Shaw, M.C and Smith, P.A. The Mechanics of three Dimensional cutting operations TRANS.ASME. Vol. 74 p. 1055-1064.
- Armarego, E.J.A. And Brown, R.H. 64 Oblique Machining with a Single cutting edge. International Journal of Machine tool design and research Vol. 4. p. 9-25.
- Armarego, E.J.A. 1967 Machining with double cutting edge tools symmetrical triangular cuts. International Journal of machine tool design and research. Vol. 7. p. 23-37.
- Cook, N.H. Manufacturing analysis. 1966. Addition-wesley reading Mass. p. 31-75.
- Usui, B.E. and Hirota, A, Masuko, M. 1978 Analytical prediction of three dimensional cutting part I, II. TRANS.ASME, Vol. 100. p. 222-228 p. 229-235.

## Appendix

```

5      PROGRAM SIMUL(INPUT,OUTPUT,IAPE5,IAPE6=OUTPUT)
      DIMENSION FP(4),FQ(4),PHY(4)
      DIMENSION ALPHA(4),BETA(4),TOWER(4)
      DIMENSION RPHY(4),RBETA(4),RALPHA(4)
      T=C.14
      S=2.C
10     DO 1=0 I=1,4
      READ (5,1(C) FP(I),FQ(I),PHY(I),ALPHA(I)
100    RPHAT(4F6.3)
      RPHY(I)=PHY(I)+3.141592/180.0
15     RALPHA(I)=ALPHA(I)+3.141592/180.0
      RPB=FP(I)/FP(I)
      RBETA(I)=ATAN(RPB)+RALPHA(I)
      RBETA(I)=180.0/3.141592*RBETA(I)
      CC=RBETA(I)-RALPHA(I)
      DD=RPHY(I)+RBETA(I)-RALPHA(I)
20     EE=RPHY(I)
      TOWER(I)=FQ(I)/(T*B*SIN(CC))*SIN(EE)*COS(DD)
150    CONTINUE
      PAA=0.0
25     PBB=C.0
      PCC=C.0
      PDD=C.0
      PEE=C.0
      BAA=C.0
30     BBB=C.0
      BCC=C.0
      BDD=C.0
      BEE=C.0
      TAA=C.0
35     TBB=C.0
      TCC=C.0
      TDD=C.0
      TEE=C.0
      YBA=C.0
40     PYBA=C.0
      BYBA=C.0
      TYBA=C.0
      DO 350 I=1,4
      PAA=PAA+(RALPHA(I)+RPHY(I))
45     PBB=PBB+RALPHA(I)
      PCC=PCC+RPHY(I)
      PDD=PDD+(RALPHA(I)**2)
      PET=PBB
50     BAA=BAA+(RALPHA(I)*RBETA(I))
      PBB=PBB
      BCC=BCC+RBETA(I)
      BDD=PDD
      BEE=PEE
      TAA=TAA+(RALPHA(I)*TOWER(I))
55     TBB=PBB
      TCC=TCC+TOWER(I)
      TDD=PDD
      TEE=PEE
      PYBA=PYBA+RPHY(I)/4.0
60     BYBA=BYBA+RBETA(I)/4.0
      TYBA=TYBA+TOWER(I)/4.0
      XBA=XBA+RALPHA(I)/4.0
350    CONTINUE
400    B1=(4*PAA-PBB*PCC)/(4*PDD-PEE**2)
45     B2=(4*BAA-PBB*PCC)/(4*BDD-BEE**2)
      B3=(4*TAA-TBB*TCC)/(4*TDD-TEE**2)
      A1=PYBA-B1*XBA
      A2=BYBA-B2*XBA
      A3=TYBA-B3*XBA

```

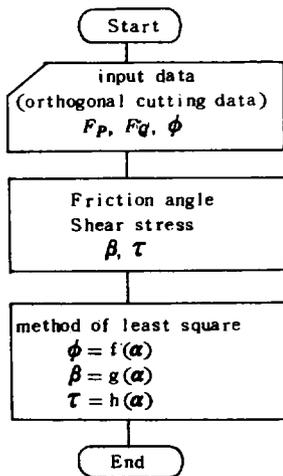
```

70      WRITE (6,500) FP
500    FORMAT(1H1,//////,11X,#FP = #,4(F7.3,5X),/)
      WRITE (6,550) FQ
550    FORMAT(11X,#FQ = #,4(F7.3,5X),/)
      WRITE (6,560) ALPHA
560    FORMAT(11X,#ALPHA = #,4(F7.3,5X),/)
75      WRITE (6,570) PHY
570    FORMAT(11X,#PHY = #,4(F7.3,5X),/)
      WRITE (6,580) BETA
580    FORMAT(11X,#BETA = #,4(F7.3,5X),/)
80      WRITE (6,590) TOWER
590    FORMAT(11X,#TOWER = #,4(F7.3,5X),/)
      WRITE (6,600)
600    FORMAT(///)
      WRITE (6,610) R1,A1
610    FORMAT(10X,#PHY = #, F14.10,##ALPHA + #, F14.10)
      WRITE (6,620) R2,A2
620    FORMAT(10X,#BETA = #, F14.10,##ALPHA + #, F14.10)
      WRITE (6,630) R3,A3
630    FORMAT(10X,#TOWER = #, F14.10,##ALPHA + #, F14.10)
90      STOP
      END
    
```

FP	= 26.200	75.800	66.800	54.900
FQ	= 66.140	52.700	40.800	24.950
ALPHA	= 0.000	5.000	17.000	20.000
PHY	= 12.925	15.040	17.500	21.800
BETA	= 37.499	39.502	41.291	44.440
TOWER	= 55.297	55.373	55.308	55.318

PHY = .4463142857\*ALPHA + .2253394128  
 BETA = .3443140030\*ALPHA + .6574664768  
 TOWER = .0496429114\*ALPHA + .53015091685

< Flow Chart >



(Computational algorithm)