

톱니형Chip의 切削機構와 Energy에 關한 研究

金 恒永*, 吳 錫炯**, 徐 南燮***

A Study on the Cutting Mechanism and Energy with Saw-toothed Chip

Hang-Young Kim, Seok-Hyung Oh, Nam-Seob Seo

ABSTRACT

In metal cutting various types of chips are produced in consequence of cutting conditions. Flow-type chips have been studied in most cases because they are easier to be analyzed, but the actual surfaces of chips are not smooth, but crushed.

This paper deals with saw-toothed chips, special types of flow-type chips, which have deep concaves and high convexes and sharp angles on the free surfaces.

I tried to establish the theory of saw-toothed chip mechanism through experimental observation, that is, the mathematical model of the cutting energy and cutting mechanism through the geometrical observation of the chips by using a microscope.

The results obtained are as follows:

1. The mechanism of saw-toothed chips is different from that of general flow-chips.
2. In the case of saw-toothed chips, the shear angle must be measured by the

*,**全北大學校 大學院

***全北大學校 工科學大學

- hypotenuse angle and the rake angle, and the shear angle is more affected by the rake angle than by the hypotenuse angle.
3. The friction angle is represented by $\beta = \pi/4 + \alpha_n - \phi$ which is different from Merchant's equation.
 4. The pitch and the slip are greatly influenced by depth of cut, but the influence of the rake angle on it is small.
 5. The normal stress and the shear stress on the shear plane decrease with the increase of the cutting depth, and they are almost independent on the variation of a rake angle.
 6. The unit friction energy on the tool face, the unit shear energy on the shear plane, and the total cutting energy per unit volume decrease with the increase of rake angle and cutting depth.

1. 序 論

工作物の切削加工時發生되는 chip은 發生機構에 따라 流動形, 剪斷形, 耕作形, 龜裂形등으로 分類되고 있으며¹⁾, 이 chip의 形態에 따라 切削機構와 切削力등이 變化하게 된다.

그러나 從來의 切削理論의 大部分은 分析의 便利함 때문에 流動形 chip에 對해서만 研究하고 있으나, 실제 切削에서 chip들의 自由表面이 찌그러진 凹凸形態로 存在하게 된다.

最近에 이르러 많은 사람들에 의하여 chip 表面의 凹凸에 關한 研究에 관심을 갖게 된 것은 在來의 流動形 model에 對한 基準이 너무 모호하여 各條件에 對한 特性을 나타낼 수 없기 때문이다.

따라서 本 研究에서는 流動形 chip의 特殊한 形態로서 chip 表面에 심한 凹凸을 갖고, 예리한 3각형 모양의 波形斷面을 갖는 톱니형 chip(saw-toothed chip)²⁾의 生成機構를 理論的인 解析과 實驗的 觀察을 통하여 究明하려 한다.

最近의^{2),3),4)} 研究動向을 살펴보면 Nakayama는 톱니형 chip(saw-toothed chip 또는 semi-continuous chip)에 對한 研究報告에서 이 chip이 發生할 때 切削力이 減少하며, 加工物의 表面이 현저하게 改善된다고 報告하였다.

이 톱니형 chip의 發生원인에 對하여⁵⁾ R.F.

Recht는 切削加工時 發生되는 剪斷熱에 의한 剪斷破壞說을 주장하였고, Nakayama는 破削材의 脆化에 의한 脆性破壞說을⁶⁾ G. Carro Cao는 切削系의 強性에 의한 振動說을 各各 主張하였다.

本 論文에서는 切削 energy와 톱니형 chip의 현미경에 의한 幾何學的 觀察을 통하여 切削機構를 數學的으로 model化 시키는데 주목하였다. 이러한 톱니형 chip은 高速切削일 수록 잘 나타나는 것으로 알려져 있으나, 本 研究에서는 비교적 低速切削에서도 톱니형 chip이 잘 發生하는 titanium을 被削材로 택하여 切削깊이와 工具 傾斜角의 變化에 對한 切削 energy와 切削機構의 關係를 觀察하였다.

2. 理論的 考察

本 論文에 使用된 切削理論을 model化시켜 보면 다음과 같다.

Fig. 1은 幾何學的인 선도로 부터 剪斷角 θ 를 구해 보면

$$\begin{aligned} \phi + \theta + (\pi/2 - \alpha_n) &= \pi \text{이므로} \\ \phi &= \pi/2 - \theta - \alpha_n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(1)$$

로 나타낼 수 있다.

式(1)을 이용하여 chip斷面の 幾何學的인 形狀으로 부터 剪斷角 ϕ 값을 一般的인 連續形 chip理論에 代入시키지 않고 직접 얻을 수 있게된다.

여기서, α_n : 傾斜角, θ : 빗변 각(hypotenuse angle)이다.

이때 使用된 빗변角 θ 는 chip의 剪斷面과 工具傾斜面이 이루는 角으로 定義하였다.

Fig. 1에서 剪斷理論을 적용하여 chip이 合力 F_r 의 壓縮을 받는다고 가정하여 榻니 정점각을 $\pi/4$ 라고 하고 工具面에서의 摩擦角

$$\alpha_n + (\pi/2 - \beta) + \pi/4 - \phi = \pi/2$$

$$\alpha_n - \beta + \pi/4 - \phi = 0$$

$$\text{그러므로 } \beta = \pi/4 + \alpha_n - \phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

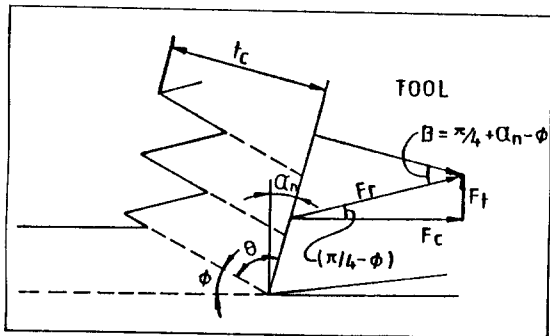


Fig. 1 Cutting mechanism.

Fig. 2는 二次元 切削에서의 切削力 vector 선도이며, 여기서 剪斷面에서의 剪斷力 F_s 를 구하면 垂置力 F_{ns} 를 구하면

$$F_s = F_c \cdot \cos \phi - F_t \cdot \sin \phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$F_{ns} = F_c \cdot \sin \phi + F_t \cdot \cos \phi \quad \dots\dots\dots (4)$$

이때 剪斷面積 A_s 는

$$A_s = \frac{A_c}{\sin \phi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $A_c = t \cdot b$: uncut chip斷面積, t : 切削깊이, b : 切削幅

또, 剪斷應力 τ_s 와 垂置應力 σ_s 는

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \cos \phi - F_t \cdot \sin \phi) \cdot \sin \phi}{A_c} \quad \dots\dots (6)$$

$$\sigma_s = \frac{F_{ns}}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \sin \phi + F_t \cdot \cos \phi) \cdot \sin \phi}{A_c} \quad \dots\dots (7)$$

工具面에서의 垂置力 F_n 과 摩擦力 F_r 를 계산하면

$$F_n = F_c \cdot \cos \alpha_n - F_t \cdot \sin \alpha_n \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$F_r = F_c \cdot \sin \alpha_n + F_t \cdot \cos \alpha_n \quad \dots\dots\dots (9)$$

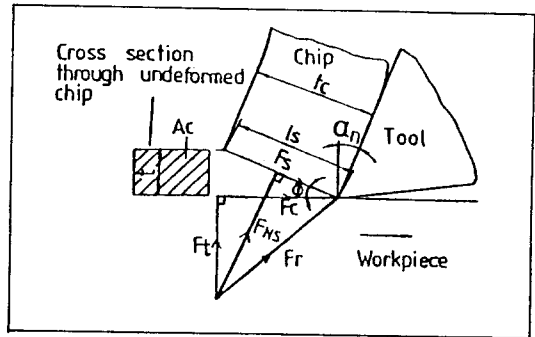


Fig. 2 Simple shear-plane model.

Fig. 3으로 부터 剪斷變形度 Γ_s 를 구하면

$$\Gamma_s = \frac{AB}{CD} = \frac{CD \cdot \cot \phi + CD \cdot \tan(\phi - \alpha_n)}{CD}$$

$$\Gamma_s = \tan(\phi - \alpha_n) + \cot \phi \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$= \frac{\cos \alpha_n}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \alpha_n)}$$

이때 剪斷面上的의 單位體積의 被削材를 剪斷하는데 必要的한 剪斷 energy u_s 는

$$u_s = \tau_s \cdot \Gamma_s = \tau_s \cdot \frac{\cos \alpha_n}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \alpha_n)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

또, 傾斜面에서의 摩擦 energy u_r 는

$$u_r = \frac{F_r}{A_c} \cdot r_c = \frac{F_r}{A_c} \cdot \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha_n)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

이다.

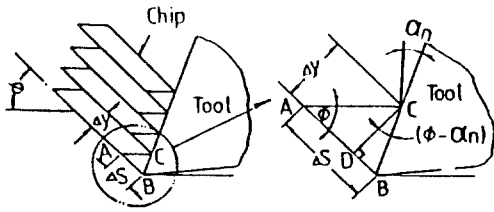


Fig. 3 Shear-strain model

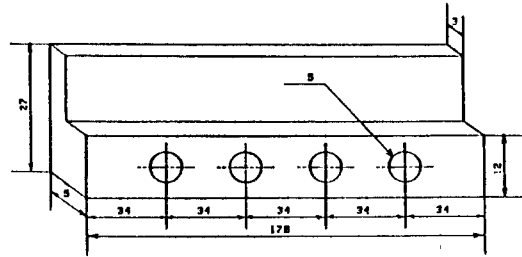


Fig. 4 Workpiece.

3. 實驗裝置 및 方法

3-1. 實驗裝置

Fig.5는 본 實驗에 使用된 實驗機器를 나타내며, 實驗에 使用된 實驗器機는 milling machine, 工具動力計(tool dynamometer), charge amplifier, multi-pen recorder, 單刀置線切削工具(single straight cutting edge tool), A/D converter(8 bit), Apple computer, 電氣 micrometer 등이며, chip의 觀察에는 工具현미경(tool microscope)을 使用하였다.

3-2. 實驗方法

Fig.6에서 보는 바와같이 milling machine의 arbor yoke에 單刀置線切削工具(single straight cutting edge tool)를 부착하여 table 위에 工具動力計(tool dynamometer)를 設置하고 小形 vise를 工具動力計위에 固定시킨 후 Fig.4와 같은 加工物을 固定하여 2次元 切削을 行하였다.

工具動力計에 charge amplifier를 連結시켜 工具動力計에서 측정된 切削力를 增幅시킨 후 A/D converter를 通하여 직접 computer에서 切削力를 計算하도록 하였다.

Fig.7은 본 實驗의 block diagram을 나타낸 것이다. 切削條件은 傾斜角을 -10° , 0° , 10° , 20° 로 變化시켰고 精度가 $0.1\mu\text{m}$ 인 電氣 micrometer를 使用하여 切削깊이를 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.15mm로 變化시키면서 實驗을 行하였다.

chip에서 측정하고자 하는 剪斷角, 摩擦角, pitch, slip, chip의 두께는 工具현미경을 使用하여

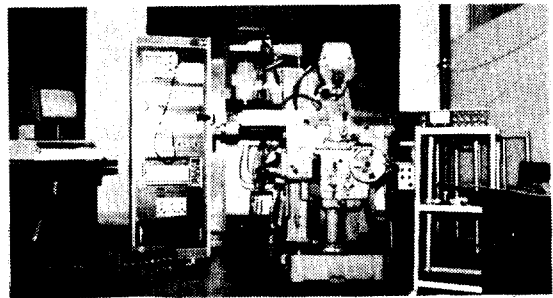


Fig. 5 Experimental apparatus.

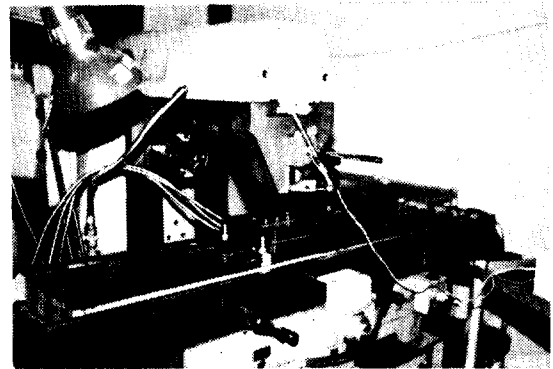


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus.

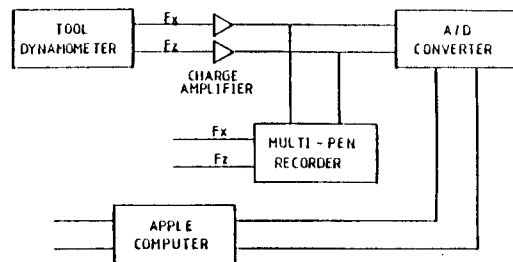


Fig. 7 The schematic diagram of experimental apparatus.

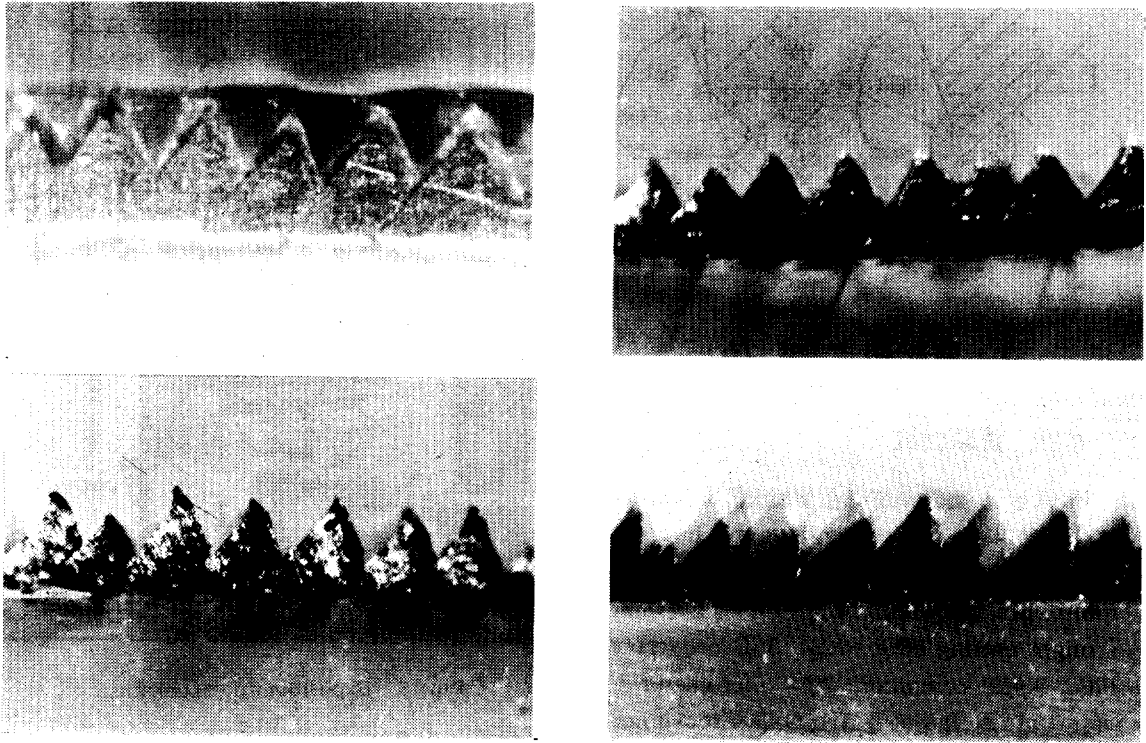


Fig. 8 Photomicrograph of chip shape pattern
 1) $\alpha_n = -10 \text{ deg}$ 2) $\alpha_n = 0 \text{ deg}$
 3) $\alpha_n = 10 \text{ deg}$ 4) $\alpha_n = 20 \text{ deg}$

얻은 사진 (Fig. 8)으로 부터 求하였다.

또, 前加工面의 不均-을 없애기 위해 0.05, 0.04, 0.03, 0.02, 0.01mm의 切削깊이로 石油를 切削油劑로 使用하여 各各 切削하고, acetone을 使用하여 세척하는 過程으로 前切削(pre-cutting)을 실시한 후에 data를 얻기위한 切削을 行하였다. Table 1은 加工物의 化學的 造成表이다.

Table 1. Chemical compositions (wt%)

Fe	Cl	Mn	Mg	Na	Si	N	C	H	O	Ti
0.05	0.2	0.02	0.0	0.15	0.03	0.01	0.03	0.01	0.1	99.4

4. 實驗結果 및 考察

Fig.9는 빗변角(hypotenuse angle)을 切削깊이

의 變化에 따라 나타낸 것으로서 切削깊이가 增加할 수록 빗변角의 값은 減少하며, 傾斜角이 增加할 수록 增加하는데, 이 빗변角은 剪斷角의 결정에 중요한 인자중의 하나가 된다.

Fig.10은 chip의 形成機構와 切削 energy 측정의 重要한 인자가 되는 剪斷角의 變化를 傾斜角의 變化에 따라 나타낸 것으로서 傾斜角과 切削깊이가 增加함에 따라 剪斷角도 增加하고 있음을 보여준다. 이때, 빗변角 θ 도 同時에 變化할 것이나, 前斷角 ϕ 가 增加하고 있는 것으로 보아 式(1)에서 剪斷角을 決定하는 두 요인 중에서 빗변角의 增加보다 傾斜角의 增加가 더 큰 영향으로 作用한다는 것을 알 수 있다. 傾斜角 20° 에서는 切削條件의 불량에 기인하여 측정된 剪斷角의 값이 一定하지 못함을 나타내고 있다.

Fig.11은 傾斜角 0° 와 10° 에서 빗변角 θ 와 剪斷

角 ϕ 와의 比較값을 切削깊이에 따라 나타낸 것으로서 빗변角의 減少量 만큼 剪斷角이 增加하고 있음을 보여준다.

Fig.12는 切削깊이의 變化에 따라 摩擦角을 표시하 것으로서, 切削깊이가 增加함에 따라 摩擦角이 減少하는 반면 傾斜角의 增加에 따라서 增加하는 양상을 나타내 주고 있다.

Fig.13은 剪斷變形도의 變化를 傾斜角의 變化에 따라 표시한 것인데 切削깊이가 增加함에 따라 剪斷變形도도 增加하는 양상을 보이나, 傾斜角의 增加에 따라서는 減少하는 경향을 나타내고 있다.

Fig.14는 pitch와 切削깊이의 관계를 각 傾斜角에 대해 나타낸 것으로서 切削깊이가 增加함에 따라 pitch는 비례적으로 增加하고 있으나 傾斜角의 영향은 뚜렷히 나타나지 않는다.

Fig.15는 傾斜角의 變化에 대한 slip 量의 관계를 나타낸 것으로서 切削깊이가 增加함에 따라 slip 量은 增加하는 반면, Fig.14에서와 같이 傾斜角의 영향은 거의 없다.

Fig.16과 17은 剪斷面上에서의 剪斷應력과 垂置應력을 傾斜面과 切削깊이의 變化에 따라 나타낸 것으로서, 剪斷應력과 垂置應력은 切削깊이가 增加하면 減少하고 傾斜面의 變化에 따라서는 거의 無關함을 보여주고 있다.

Fig.18은 傾斜面에서의 單位體積 當 摩擦energy를 나타낸 것으로서 摩擦energy는 傾斜角이 커지면 減少하고 切削깊이가 增加하면 減少한다.

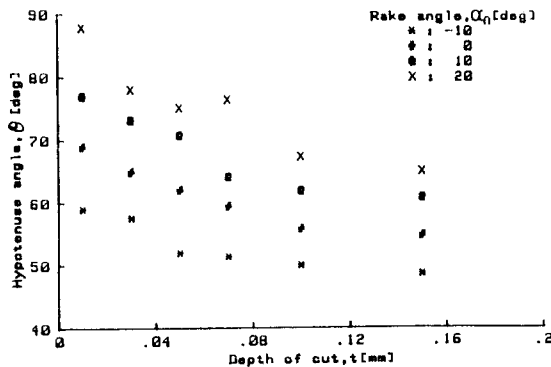


Fig. 9 The relation between hypotenuse angle and depth of cut.

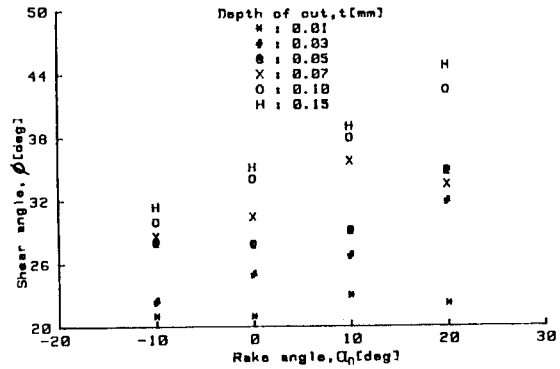


Fig. 10 The relation between shear angle and rake angle

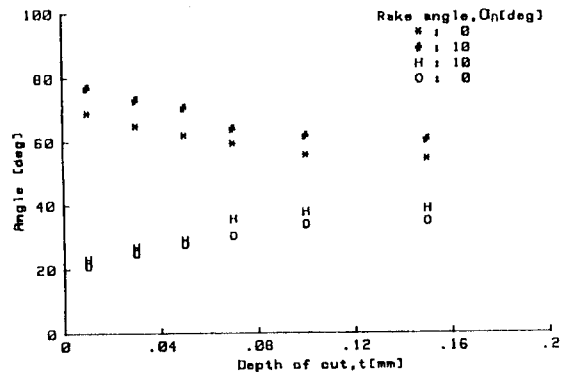


Fig. 11 Shear and hypotenuse angles VS. depth of cut.

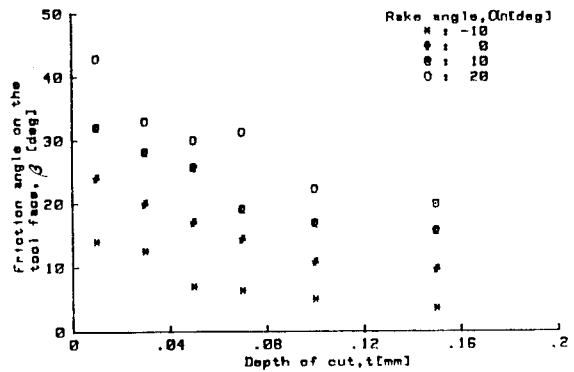


Fig. 12 The relation between friction angle and depth of cut.

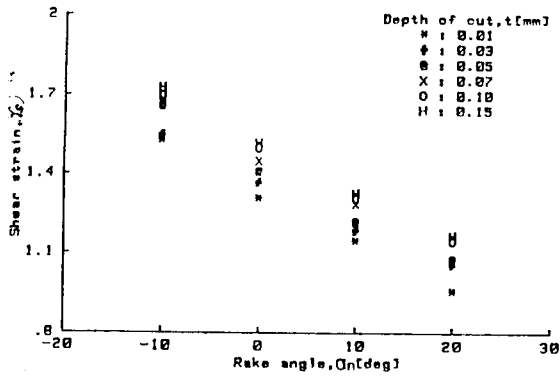


Fig. 13 The relation between shear strain and rake angle.

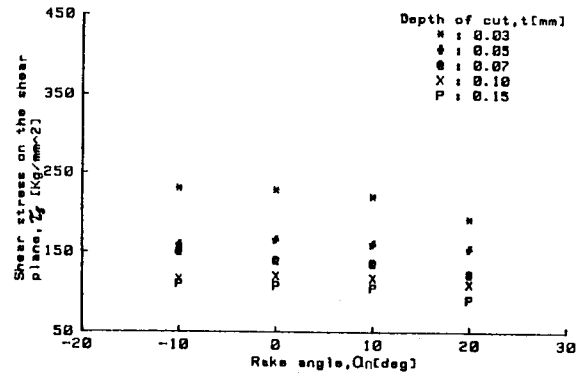


Fig. 16 The relation between shear stress and rake angle.

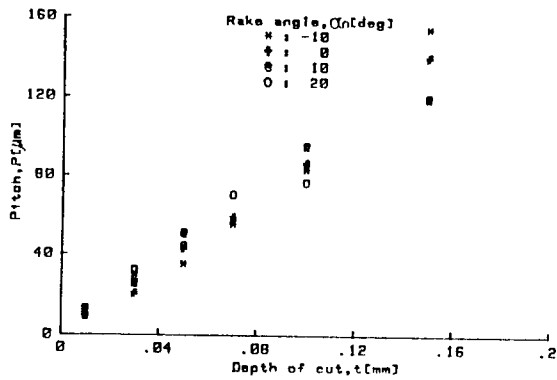


Fig. 14 The relation between pitch and depth of cut.

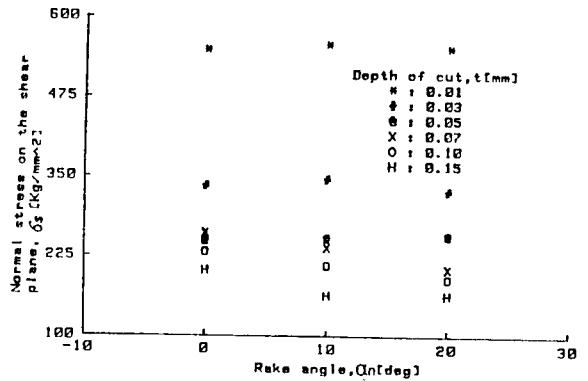


Fig. 17 The relation between normal stress and rake angle.

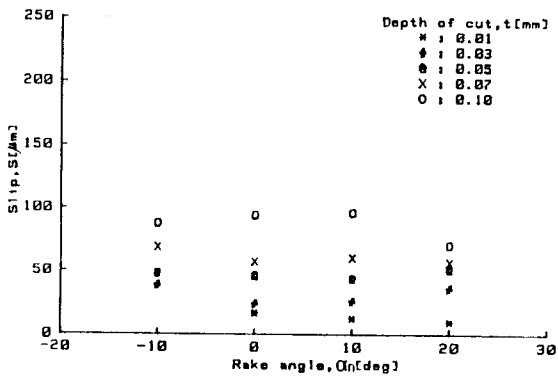


Fig. 15 The relation between slip and rake angle.

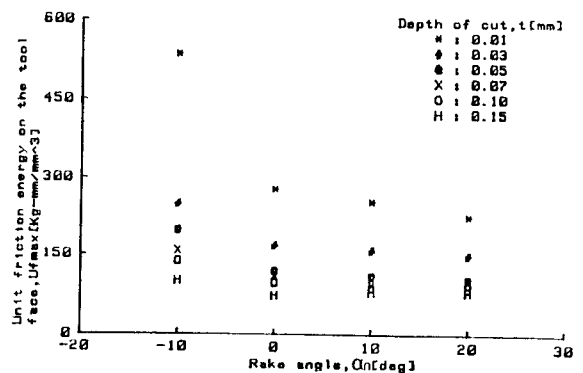


Fig. 18 The relation between unit friction energy and rake angle.

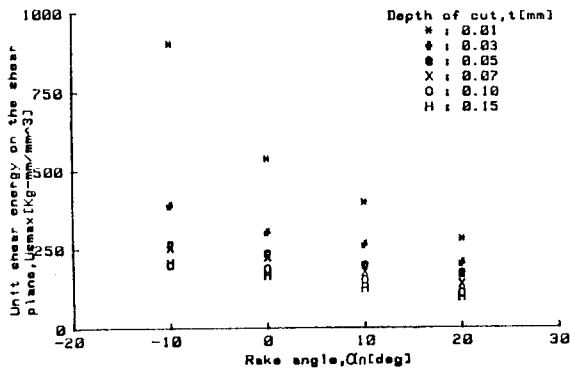


Fig. 19 The relation between unit shear energy and rake angle.

Fig.19은 剪斷面에서의 單位體積 當前斷 energy 를 나타낸 것으로서 傾斜角이 增加할수록 前斷 energy 는 減少하며, 切削깊이가 增加할 수록 減少한다. 切削깊이가 작은경우 큰 energy 값을 나타내는 것은 칩수 효과(size effect)때문인 것으로 생각된다.

5. 結 論

以上の 考察로 부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 톱니형 chip(saw-toothed chip)의 發生時 切削機構는 통상의 流動形 chip의 切削機構와 다르게 解析되어야 한다.
2. 톱니형 chip이 發生할 때 剪斷角은 빗변각(hypotenuse angle)과 傾斜角에 의해 측정하는 것이 合理的이며 剪斷角은 빗변각보다 傾斜角의 영향을 더 크게 받는다.
3. 摩擦角 β는 Merchant 式과는 달리 $\beta = \pi/4 + \alpha_n - \phi$ 로 表示된다.

4. pitch와 slip은 切削깊이에 크게 영향을 받으면 傾斜角의 영향은 적고, pitch가 增加함에 따라 剪斷角은 增加함을 보여준다.
5. 剪斷面上的 垂置應力과 剪斷應力은 切削깊이의 增加에 따라 減少하나, 傾斜角의 變化에는 거의 無關하다.
6. 單位體積當 摩擦 energy, 剪斷 energy 등은 切削깊이와 傾斜角이 增加할수록 減少한다.

Reference

1. E. Eder; Entfernung der spanelemente voneinander und ihre Bildungsfrequenz beim Drehen im File spanbereiche, VDI-Z, 107, 11(1965)489.
2. 中山一雄; 鋸齒狀切りくすの生成について, 精密機械, 43, 1,(1977)117.
3. K. Nakayama, J.Takagi and T.Nakano; Pecularity in the Grinding of Hardened Steel, to be presented at the 24th general assembly of C.I.R.P., Kyoto, August 1974.
4. K. Nakayama; Proc. of the international Production Engineering Research Conference, ASME,(1963)83.
5. R.F.Recht; Catastrophic Thermoplastic Shear, J. Appl. Mech. Trans. ASME, 2, 31, 1964, p189.
6. G. Carro Cao; Cutting Phenomena Interpretation in Machine-Workpiece-Tool System, Ann, C.I.R.P., 20, 1,(1971)25.
7. 서남섭; 金屬 切削理論, 東明社, 1985.
8. M.C. Shaw; Metal Cutting Principles, Clarendon Press, Oxford, 1984.