

이 논문은 1988년도 문교부 지원 학국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구구성비에 의하여 연구되었음.

티타늄의 切削性에 관한 研究
 - 剪斷角 解析을 중심으로 -
 鄭 聖奎*, 吳 錫炯*, 徐 南燮**

A Study on the Machinability of Titanium

Seong-Gyu Cheong, Seok-Hyung Oh, Nam-seob Seo

ABSTRACT

Recently, the researches on cutting the new material have been done for development of aerospace industrial engineering. Especially, titanium alloy is well known as heat resisting, antiwear, anticorrosion and difficult-to-machine materials. Many studies on the analysis of shear angle have been done for improving productivity in cutting these materials. In case of titanium alloy, the saw-toothed type of chip which has wave surface of a triangular form, an eccentric form of a continuous type of chip that is produced in the cutting process, was checked.

Nakayama supposed that a maximum shear stress plane and the shear crack in the free surface made an angle of 45°, but it's usually much larger than that.

In this paper, the author analyzed the shear conditions of the cutting process

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 기계과 교수

in the quick-stopping device with the help SEM-photographs, and measured the hypotenuse angle directly in the photographs of the chips.

In conclusion, the author tried to find the shear angle in the cutting process with the saw-toothed chip and compared it with the shear angles which can be calculated from the theories established by others.

The results obtained are as follows.

1. In case of the saw-toothed chips, the equivalent cutting ratio can be calculated by using the chip thickness to two-thirds of ramp height.
2. The theory of Ernst-Merchant is not applicable to the titanium and its alloys which does not fractured in accordance with the theory of maximum shear stress.
3. When we cut the titanium alloys which produced the saw-toothed chips, the shear angle can be found with the theories of Rowe-Spick, P.K. Wright and the measurement of hypotenuse angle.

1. 序 論

最近 항공산업의 發展과 더불어 新素材의 切削에 대한 研究가 활발하게 進行되고 있다. 특히 耐熱性과 耐磨耗性 그리고 耐蝕性에 뛰어난 티타늄합금은 難削材로 알려져 있고 이러한 金屬을 切削할 때 생산성을 향상 시키기 위한 方法을 찾는 手段으로서 칩 生成機構를 통해 剪斷角 解析에 대한 많은 研究가 行하여져 왔다. 티타늄 合金의 切削에서는, 일반 金屬의 切削過程에서 發生되는 連續形(continuous type) 칩의 特異한 形態로서 칩의 自由表面에 심한 凹凸을 갖고 예리한 三角形 모양의 波形 表面을 갖는 톱니형(saw-toothed type) 칩을 生成하게 된다. 따라서 表面이 평탄한 칩으로 생각한 切削機構의 解析을 凹凸이 심한 톱니형 칩이 發生하는 切削에 적용하는 것은 무리이다. 즉, 칩의 두께를 최대 또는 최소로 취하여 계산한 剪斷角은 실측값과 너무나 차이가 있으며 평균두께를 취하면 통상적인 연속칩과 同一時

하는 모순을 초래하게 된다.

Nakayama⁽¹⁾는 최대 剪斷應力の 面과 剪斷 crack은 自由表面에 대해 45°의 角을 이룰 것으로 가정하고 그의 理論을 발표했으나 실제로 있어서는 그보다 훨씬 크게 나타난다.

本 研究에서는 quick-stop 裝置를 이용한 切削에서 切削過程중의 剪斷상태를 SEM 사진을 통하여 分析하고, 빛변각은 칩 사진에서 직접 測定하여 구한 剪斷角과 평탄한 연속칩을 대상으로 한 剪斷角의 關係式과 比較 分析함으로써 이들 재래식의 톱니형 칩에 대한 적용여부를 판단하고 剪斷角을 구하는 별도의 方法을 모색하여 보고자 하였다.

2. 理論的 考察

剪斷角을 비교 分析 하는데 이용된 理論式을 소개하면 다음과 같다.

切削比(cutting ratio)를 이용한 剪斷角(ϕ)은

$$\phi = \tan^{-1} \frac{r_c \cdot \cos \alpha}{1 - r_c \cdot \sin \alpha} \dots\dots\dots (1)$$

단, r_c : 切削比(cutting ratio), α : 傾斜角(rake angle)

Ernst-Merchant의 方程式⁽²⁾에서

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

切削分力(F_c)와 背分力(F_t)에 의한 工具面上의 摩擦角(β)은

$$\beta = \tan^{-1} \frac{F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha}{F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha} \dots\dots\dots (3)$$

剪斷面上的 剪斷應力(τ_s)은

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \cos \phi - F_t \cdot \sin \phi) \cdot \sin \phi}{A_c} \dots\dots\dots (4)$$

단, F_s : 剪斷面上的 剪斷力, A_s : 剪斷面積
G. W. Rowe-P. T. Spick⁽³⁾가 Hamilton 原理를 이용하여 제시한 剪斷角의 關係式은

$$\cos \alpha \cdot \cos(2\phi - \alpha) - \delta \cdot \Phi \cdot \sin^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (5)$$

단, Φ : h_0 의 乘數 즉, 傾斜面에서 接觸길이를 定해주는 數이다. δ : 傾斜面에서 칩의 항복應力에 대한 剪斷應力의 比로써 0과 1사이의 값이다.

주어진 α, δ, Φ 의 값에 대한 剪斷角 ϕ 는 두 곡선 $A = \delta \cdot \sin^2 \phi$ 와 $B = \cos \alpha \cdot \cos(2\phi - \alpha) / \Phi$ 의 交점을 이용하여 구할 수 있다.

P. K. Wright⁽⁴⁾가 제시한 剪斷角(ϕ)은

$$2\phi = \sin^{-1} \left[\frac{2k_0}{k_1} \cdot \cos \left(45 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \sin \left(45 + \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \right] + \alpha \dots\dots\dots (6)$$

여기서 재료의 인장 항복強도와 극한 인장強도를 Von Mises 공식에 의해 k_0, k_1 의 剪斷應力 값으로 變換시켰다. ($k = \sigma/3$).

k_0 : 剪斷降伏強도, k_1 : 剪斷極限強도

著者は Fig. 1에서 빗변각(θ)의 測定에 의하여 剪斷角(ϕ)을 식(7)을 이용하여 구하였다.

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \theta + \alpha \dots\dots\dots (7)$$

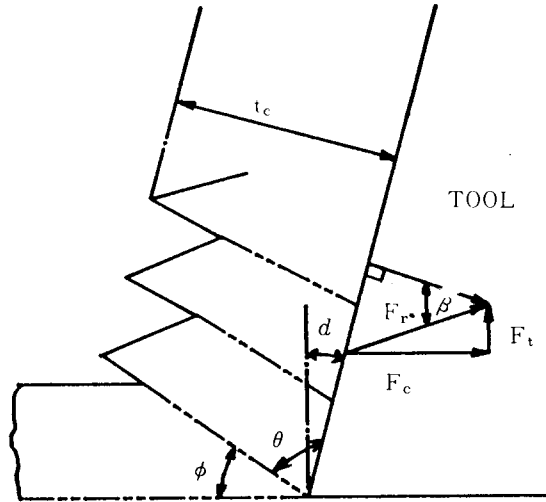


Fig 1 Cutting Mechanism

剪斷 變形度(Γ)는

$$\Gamma = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha) \dots\dots\dots (8)$$

전단면상에서의 비전단에너지 (U_s)는

$$U_s = \tau_s \cdot \Gamma$$

가 된다.

3. 實驗裝置 및 方法

Fig. 2와 같이 만능 milling M/C의 arbor yoke에 單刃直線切刃工具를 부착하고 table위에 工具動力計를 설치하여 2次元 切削을 하였다. 切削條件은 傾斜角을 $-10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 로 變換시켰으며, 切削깊이는 0.01~0.2mm이었고, 切削速度는 342mm/min로 하였다. 그리고 切削抵抗은 工具動力計, charge amplifier 및 A/D 變換기를 통하여 測定하였다. 칩의 厚度를 測定하기 위하여 광학 현미경을 사용했고, quick-stop 장치에서 切削을 시행한 후 칩의 斷面과 剪斷面을 전자 현미경을 사용하여 測定하였다.

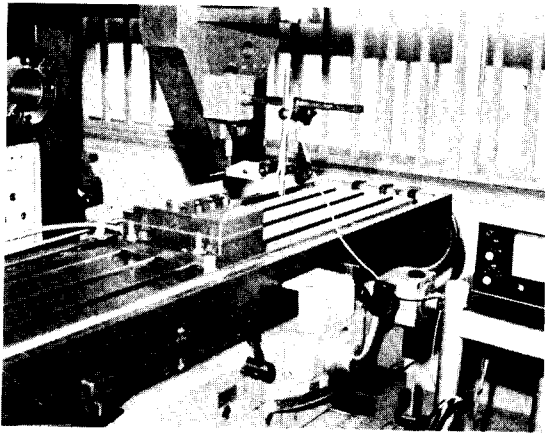


Fig. 2 Experimental apparatus

4. 實驗結果 및 分析

1) 切削比에 의한 剪斷角 解析

티타늄합금과 같은 金屬의 切削에서는 凹
 凸이 심한 톱니형 칩이 生成되어 칩두께가 部
 位에 따라 일정하지 않다. 이와같은 경우에는
 통상적인 연속형 칩이 生成되는 경우에서처럼
 칩두께를 측정하지 않고 산높이의 2/3위치까지
 의 칩두께를 測定하여 ϕ 를 산출하였다. 이 剪斷
 角의 범위가 25 ~ 48° 정도로 quick-stop 장치를
 이용한 切削에서 測定한 결과에 근사하였다.

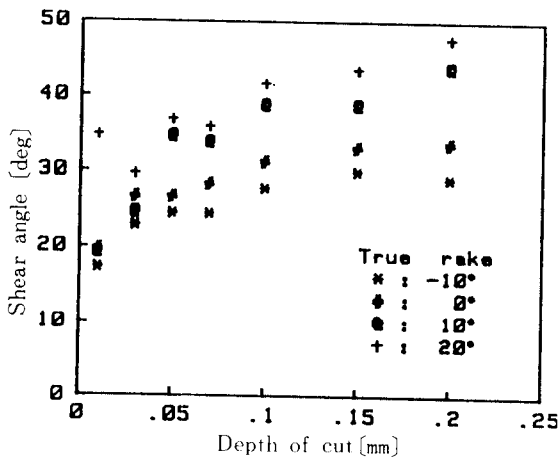


Fig. 3 The relation between shear angle and depth of cut by using 2/3 toothed height

2) Ernst-Merchant 理論에 의한 剪斷角 解釋
 Fig. 4와 Fig. 5는 摩擦角과 Ernst-Merchant
 理論에 의한 剪斷角을 도시한 것으로서 摩擦角
 의 감소로 인하여 剪斷角이 증가함을 보여준다.
 여기서 傾斜角이 증가할 때 摩擦角의 증가를
 가져오나 剪斷角이 증가하는 原因은 傾斜角의
 증가에 摩擦角의 증가가 미치지 못하기 때문이
 다. 즉, 상대적으로 작기 때문이다.

Fig. 7에서와 같이 Ernst-Merchant (E-M으로 표시) 식의 기울기가 quick-stop 장치를 이용한 실험값의 기울기와 다르게 나타나는데, 그 原因은 실제의 剪斷이 최대전단응력선에 의한 剪斷面과 일치하지 않기 때문이다. (Fig. 6).

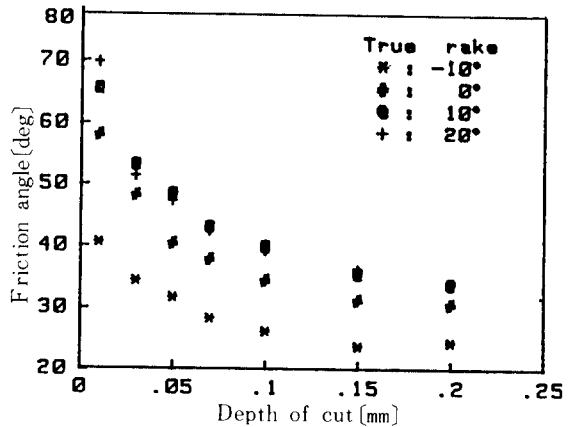


Fig. 4 The relation between friction angle and depth of cut.

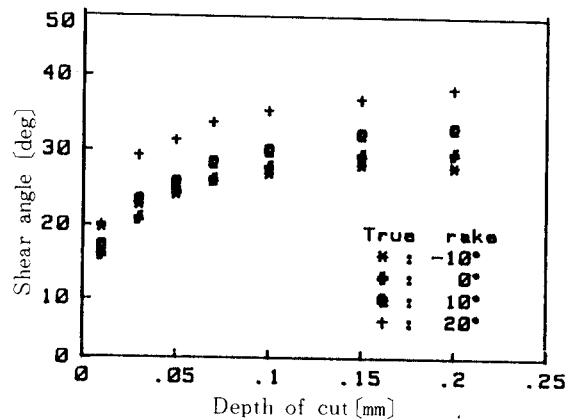


Fig. 5 The relation between shear angle and depth of cut.

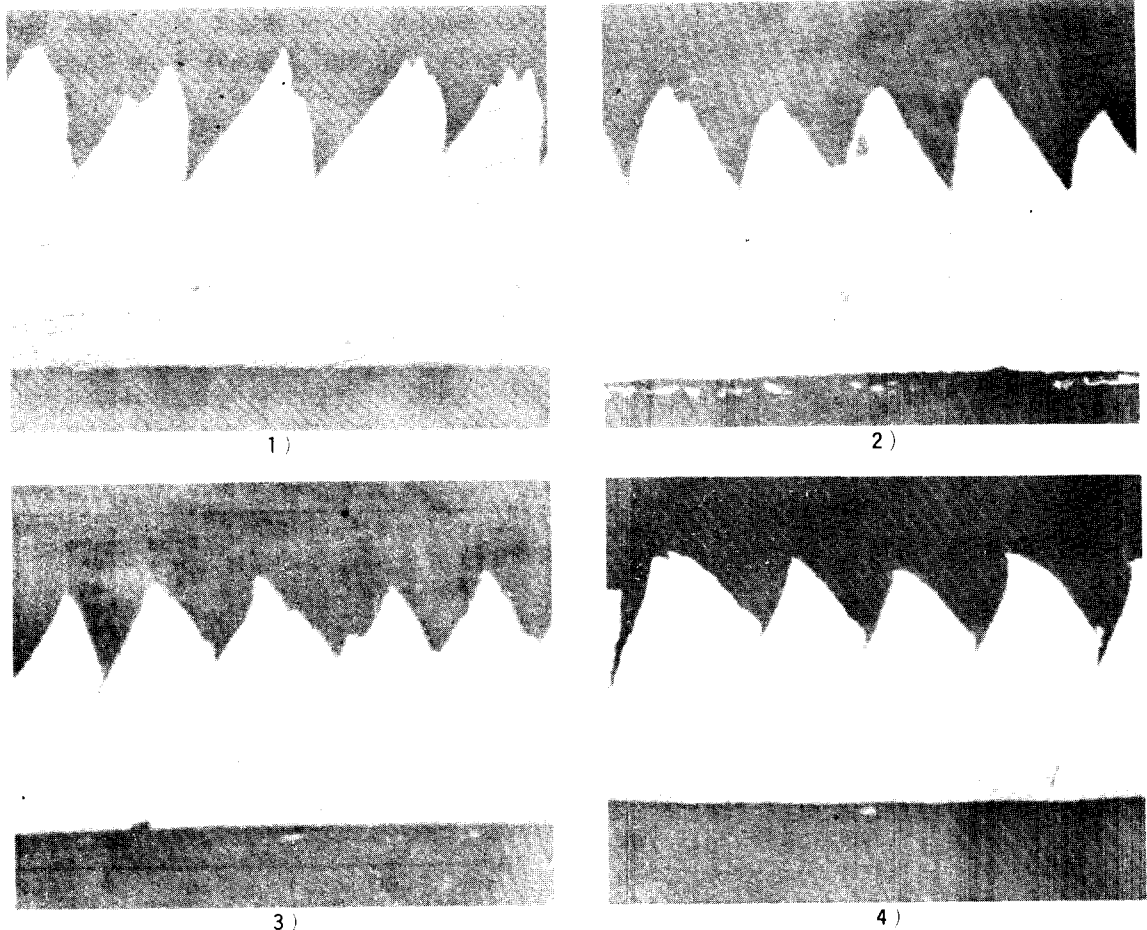


Fig. 6 Photomicrograph of chip shape pattern.

(depth of cut : 0.1mm)

1) rake angle : -10° 2) rake angle : 0°

3) rake angle : 10° 4) rake angle : 20°

3) P. K. Wright 및 Rowe-Spick의 剪斷理論

P. K. Wright는 剪斷角을 예측하는데 있어서 傾斜面上의 摩擦을 고려하지 아니하였으나 Fig. 4에 시와 같이 실제에는 摩擦角이 작은 값이지만 존재한다. 즉, 톱니형 칩이 發生하는 경우에는 切削깊이에 따른 摩擦角이 急感하여 아주 작게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 톱니형 칩이 生成될 때는 工具面 위에서의 摩擦을 무시할 수 있을만큼 작게 되고 관찰에 의하면 工具面上

의 칩 접촉길이 또한 짧았다. Rowe-Spick의 理論에 기초한 Fig. 7에서 또한 실측한 전단각의 범위에 대한 승수 $\phi = 1$ 로서 접촉길이가 짧고, 마찰력을 정해주는 $\delta = 0.2$ 로서 작기 때문에 P. K. Wright의 가정에 무리가 없음을 알 수 있다. 따라서 톱니형 칩의 剪斷角을 解析하는데 P. K. Wright와 Rowe-Spick의 理論을 이용할 수 있음을 알았고 이 사실로서 톱니형 칩이 生成될 경우 접촉길이가 매우 짧고 工具面 상에서 摩擦이 매우 작음을 확인할 수 있다.

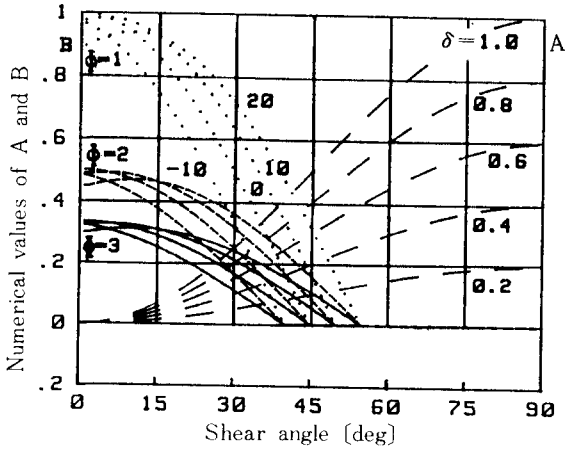


Fig. 7 Graphical solution for shear angle ϕ for different values of rake angle α , shear stress δk at tool face and rake face contact length $\phi h / \cos \alpha$. The intersections of a curve from family $A = \delta \cdot \sin^2 \phi$ with one from family $B = \cos \alpha \cdot \cos(2\phi - \alpha) / \phi$ predict shear angles.

4) 빗변각에 의한 剪斷角 解析

Fig. 6의 칩사진에서 빗변각을 測定하여 구한 剪斷角을 보여주는 Fig. 8에서 切削깊이가 증가하면 剪斷角이 증가하는 것을 보여주어 통상적 연속형 칩의 경우와 같다.

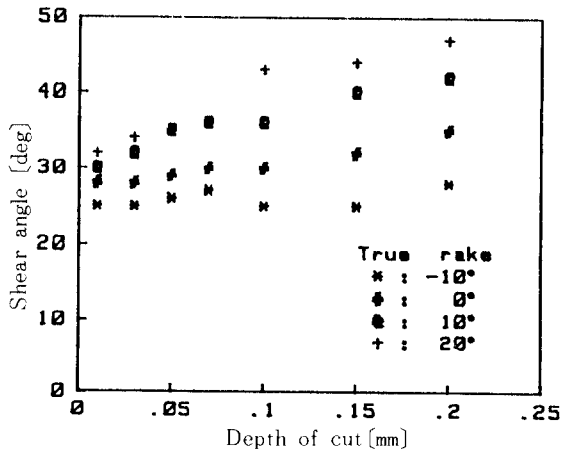
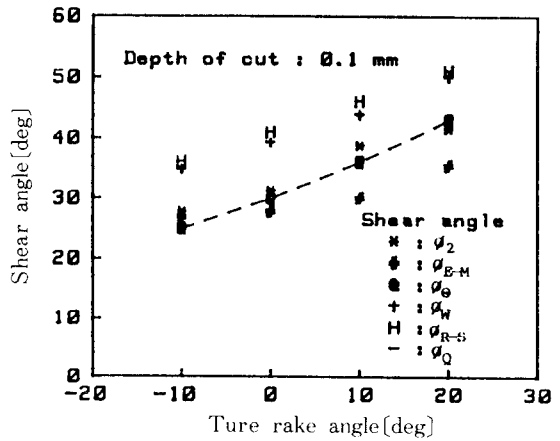


Fig. 8 The relation between shear angle and depth of cut.

Fig. 9는 주어진 切削깊이에 대한 傾斜角의 변화에 따른 剪斷角을 앞에서 열거한 剪斷角理論에 의해 나타냈는데 切削시 톱니형칩이 生成되는 티나니움합금의 경우에는 P.K. Wright理論, Row-Spick理論과 빗변각을 이용한 各各의 剪斷角들이 quick-stop 장치를 이용하여 測定한 剪斷角과 거의 유사한 경향을 나타내는 것으로 부터 톱니형 칩에서 剪斷角을 예측할 때 위의 P.K. Wright, Rowe-Spick式들을 사용할 수 있음을 알았다.



ϕ_2 : by the chip thickness to two-thirds of ramp height.

ϕ_{E-M} : by the theory of Ernst-Merchant.

ϕ_θ : by the hypotenuse angle.

ϕ_w : by the theory of Wright.

ϕ_{R-S} : by the theory of Rowe-Spick.

ϕ_Q : by observing the chip on the quick-stop device.

Fig. 9 The relation between shear angle and true rake angle.

剪斷面上에서 剪斷應力은 傾斜角의 변화보다는 切削깊이의 영향을 많이 받는것은 예측한 바와 같고, 이것은 比剪斷에너지에도 관계한다. 또한 톱니형 칩이 生成될때에는 剪斷角이 크므로 變形度가 작아진다. 따라서 式(9)에 의하여 比剪斷에너지가 작아지는 것은 당연하다.

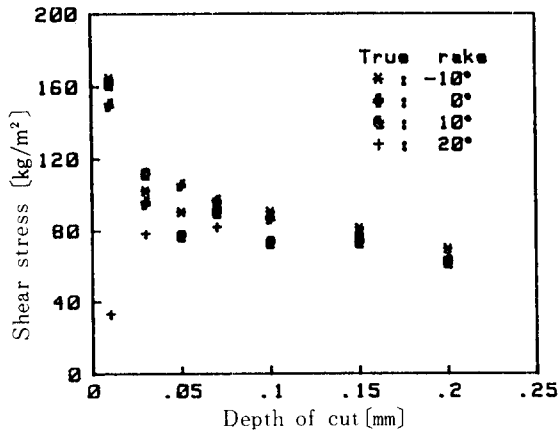


Fig. 10 The relation between shear stress and depth of cut.

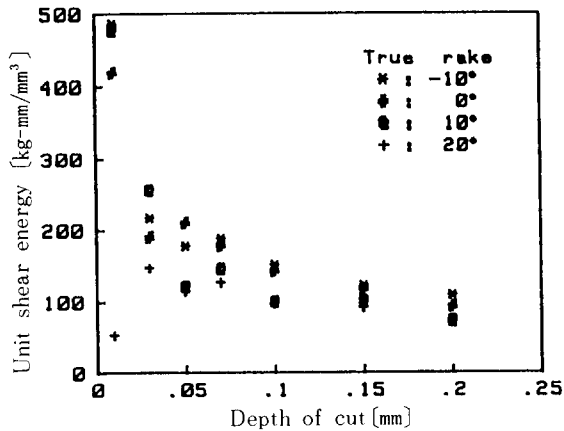


Fig. 11 The relation between unit shear energy and depth of cut.

5. 結 論

以上の 分析으로 부터 톱니형 칩이 發生하는

티타늄합금의 2次元 切削에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 절삭비에 의한 剪斷角의 계산에서는 2/3 산높이 까지의 칩두께를 이용한다.
2. Ernst-Merchant 理論은 材料가 最大剪斷應力說에 따라 破壞가 이루어지지 않을 경우에는 실제 測定한 값과 많은 차이가 있다.
3. 剪斷角을 구하는데 Rowe-Spick 理論, P.K. Wright 理論 및 빗변각의 測定을 이용할 수 있다.

參 考 文 獻

1. Nakayama, K., 1974, "The Formation of Saw-Toothed Chip in Metal Cutting", Proc. of the Int. Conf. on Prod. Engg., Tokyo, pp.572-577.
2. M.C. Shaw, 1968, "Metal Transformation", Gordon and Breach, Science Publishers, N.Y., pp.233.
3. Rowe, G.W. & Spick, P.T., 1967, "A New Approach to Determination of the Shear Plane Angle in Machining", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 89, pp.530-538.
4. P.K. Wright, Aug. 1982, "Predicting the Shear Plane Angle in Machining from Workmaterial Strain-Hardening Characteristics", Journal of Engineering for Ind., Vol.104, pp.285-292.
5. 徐南燮, 1988, "金屬 切削理論", 東明社, pp.45-61.