

〈論 文〉

## 초음파 진동을 이용한 정밀절삭에 관한 연구

김 정 두\* · 곽 윤 근\*

(1990년 2월 15일 접수)

### A Study on Precision Machining with Ultrasonic Vibration

Jeong Du Kim and Yoon Keun Kwak

**Key Words :** Ultrasonic Vibration Machining(초음파진동절삭), Precision Machining(정밀절삭), Surface Roughness(표면거칠기), Cutting Resistance(절삭저항), Chip Formation(칩형태)

#### Abstract

In this paper, the results obtained by carrying out the precision cutting are discussed. Cutting conditions for turning, longitudinally vibrated tool (frequency 19.6kHz, amplitude  $26\mu\text{m}$ ), Cutting speed 16m/min~242m/min, feed 0.073mm/rev, depth of cut 0.02mm~0.3mm were used. Surface roughness, cutting resistance, the type of chip, and  $L_T$  pattern were examined. It is proved that the alluminium alloy can be precisely machined with diamond tool removing the flow type chip by means of Ultrasonic Vibration Machining.

#### 기 호 설 명

$a$	: 공구의 진폭 ( $\mu\text{m}$ )	$P_c$	: 주분력 절삭저항 (kgf)
$c$	: 혼 재료중의 음속도 (cm/s)	$P_t$	: 배분력 절삭저항 (kgf)
$C.T$	: 관용절삭	$S_1$	: 혼의 대 단면적 ( $\text{cm}^2$ )
$D_1$	: 혼의 대단부 직경 (mm)	$S_2$	: 혼의 소 단면적 ( $\text{cm}^2$ )
$D_2$	: 혼의 소단부 직경 (mm)	$T$	: 절삭공구의 진동주기 ( $=1/f$ ) (s)
$D_3$	: 절삭공구의 고정볼트 직경 (mm)	$t$	: 시간 (s)
$E_c$	: 탄성계수 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	$t_c$	: 절삭공구 1주기 동안의 정밀절삭시간 (s)
$f$	: 공구의 주파수 (kHz)	$td_1$	: 절삭깊이 ( $\mu\text{m}$ )
$f_e$	: 이송속도 ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )	$td_2$	: 칩두께 ( $\mu\text{m}$ )
$K_s$	: 비절삭저항 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	$t_1$	: 절삭공구와 공작물이 분리되는 시간
$l$	: 반파장 공진하는 혼의 길이 (cm)	$t_2$	: 공작물에 접촉되는 원점 0부터의 시간
$l_1$	: 혼 대단부의 길이 (mm)	$u_1$	: 혼 대단부의 진폭
$l_2$	: 혼 소단부의 길이 (mm)	$u_2$	: 혼 소단부의 진폭
$l_3$	: 절삭공구 고정볼트의 머리부길이 (mm)	$u_3$	: 절삭공구 고정 볼트부의 진폭
$L_T$	: 절삭공구 진동 1주기로 절삭방향에 절삭하는 길이 ( $\mu\text{m}$ )	$U.V.T$	: 초음파 진동절삭
		$v$	: 절삭속도 (m/min)
		$v_c$	: 임계 절삭속도 ( $=2\pi af$ ) (m/min)
		$\omega$	: 절삭공구의 각 진동수 ( $=2\pi f$ ) (rad/s)
		$y$	: 공작물 또는 절삭공구의 변위

\*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

- $\dot{y}$  : 절삭공구의 속도
- $\alpha$  : 절삭공구의 상면 경사각 (degree)
- $r_c$  : 절삭비
- $\rho$  : 밀도 (g/cm<sup>3</sup>)
- $\lambda$  : 혼재료층의 초음파 파장 (=  $c/f$ ) (cm)

1. 서 론

최근 전자 및 통신기기, 반도체 부품, 항공기 및 자동차분야 등 과학기술분야의 급속한 발전에 따라 계속 출현되는 신소재에 대한 정밀가공기술의 개발과 필요성이 대두되고 아울러 종전의 범용 절삭 방식에서 벗어난 새로운 절삭가공방식의 채용이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 최근 선진국들에서는 초음파 진동을 이용한 가공방법의 개발에 비상한 노력을 기울이고 있다<sup>(1~3)</sup>. 범용절삭에서 정밀도를 향상시키기 위하여 공작물을 고속회전시키면 공작물의 진동수가 높아지고 정현파형이 되므로 공구의 고유진동수 부근의 절삭력과 파형이 각각 존재하며, 그 순간 공작물과 공구인선의 상대위치 관계가 변동하고, 극단적인 경우에는 가공면에 채터형상을 유발시키고 가공정도를 저하시키므로 절삭가공면에 나쁜 영향을 주는 것으로 사료된다<sup>(4)</sup>.

따라서 가공정도에 관계하는 공작물과 공구인선의 상대위치 관계는 정역학적이나, 절삭가공중의 공작물과 공구인선 사이에는 상대위치 관계를 갖으

며 여기에서 공작물과 공구인선의 상대위치관계를 무변화 상태로 한다고 할 때 가공정도를 향상시키고, 다듬질면 정도를 향상시키므로서 정밀가공을 가능케 한다.

본 연구에서는 공구의 진동에 사용되는 혼(hone)의 재료로 강성과 초음파진동이 우수한 티타늄 합금을 사용하였으며, 이의 설계 및 진동절삭기구의 구성과 공구형상 및 이송에 의하여 결정되는 선삭의 이론적 표면조도를 근간으로 각종 절삭 조건 등을 변화시키면서 실험을 행하여 초음파 진동 절삭시 나타나는 특성들 중 절삭저항, 다듬질면 거칠기, 칩형태, 가공정도 등을 관찰하여 범용절삭과 비교 검토하여 초음파 진동절삭이 정밀가공 및 생산성 향상에 적합한 가공방법임을 입증코져 한다.

2. 진동절삭기구

진동절삭에서의 절삭기구는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 진동수  $f$ , 편진폭  $a$ , 진동주기를  $T$ 라고 할 때 원점 0에서부터 진동을 시작하는 바이트와 절삭속도  $v$ 는 이송하는 공작물에 대하여 시간에 따른 바이트의 변위곡선과 펄스형의 절삭력이 가해져서 2차원 절삭할 때의 절삭력 파형이 나타나고 있다<sup>(5)</sup>.

절삭공구가 원점 0에서 진동을 시작하여 절삭속도  $v$ 로 이송하는 공작물을 향하여 진행할 때 E점

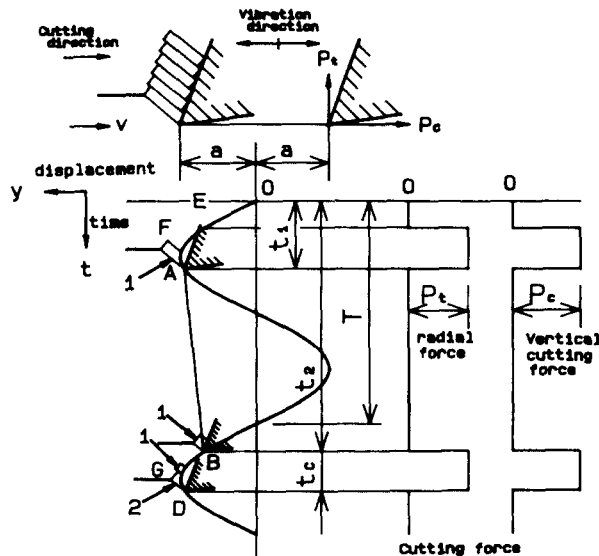


Fig. 1 Vibration cutting mechanism

에서 접촉을 하여 EF사이에 펄스형의 충격력이 작용되고 F점은 절삭공구 진행방향이 변화하는 점이고 공구의 속도는 0가 되지만 공작물은 속도  $v$ 를 가지고 있다. 여기에서  $v < 2\pi af$ 의 관계를 가진다면 공작물의 속도와 절삭공구의 속도가 동일하게 되는 A점까지 절삭되어 칩을 생성하게 되고 A점에서부터 공작물과 절삭공구의 경사면 사이에 분리가 일어난다. 절삭공구의 속도가 공작물의 속도보다 훨씬 빠르므로 절삭공구가 공작물을 향해 진행하여 되돌아 오는 시간 즉 A점에서 B점까지의 직선거리만큼 공작물이 이송하므로 B점에서 절삭공구와 공작물은 재 접촉하며 절삭하기 시작하여 BGD사이에 칩을 생성하게 된다. 이와 같은 운동을 계속하여 칩을 배출하게 되는 것이 진동절삭 기구이다.

### 2.1 절삭공구와 공작물이 분리되는 시간 $t_1$

절삭공구의 변위  $y$ 는

$$y = a \sin \omega t \quad (1)$$

절삭공구의 속도  $\dot{y}$ 는

$$\dot{y} = a\omega \cos \omega t \quad (2)$$

A, D점에서 절삭공구와 공작물의 속도가 동일하므로 A점에서 시간  $t_1$ 일때 D점에서의 시간은  $(t_1 + T)$ 이므로 속도  $v$ 는 다음과 같다.

$$-v = a\omega \cos \omega t_1 \quad (3)$$

### 2.2 임계절삭속도 $v_c$

절삭속도  $v$ 가  $a\omega$ 로 되어, 절삭공구 경사면이 공작물 및 칩과 접촉하여 진동절삭이 이루어 질 수

있는 한계 절삭속도는 다음과 같다.

$$v_c = a\omega = 2\pi af \quad (4)$$

### 2.3 절삭공구 1주기 동안의 절삭시간 $t_c$

A점에서의 바이트의 변위값은  $a \sin \omega t_1$ 이고 절삭속도가  $v$ 이므로 공작물의 변위  $y$ 는

$$y = a \sin \omega t_1 - v(t_2 - t_1) \quad (5)$$

B점에서는

$$a \sin \omega t_2 = a \sin \omega t_1 - v(t_2 - t_1) \quad (6)$$

여기에서  $\omega t_1 = 2\pi \frac{t_1}{T}$ ,  $\omega t_2 = 2\pi \frac{t_2}{T}$ 이고, 식 (3)으로부터

$$\frac{v}{a} = -\omega \cos \omega t_1 = -\frac{2\pi}{T} \cos (2\pi \frac{t_1}{T})$$

식 (6)으로부터

$$a \sin \omega t_1 + vT_1 = a \sin \omega t_2 + vt_2$$

가 되므로 양변을 진폭  $a$ 로 나누면

$$\begin{aligned} \sin (2\pi \frac{t_1}{T}) - 2\pi \frac{t_1}{T} \cos (2\pi \frac{t_1}{T}) &= \sin (2\pi \frac{t_2}{T}) \\ -2\pi \frac{t_2}{T} \cos (2\pi \frac{t_1}{T}) & \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에 의하여  $\frac{t_1}{T}$ 과  $\frac{t_2}{T}$ 의 관계를 알 수 있으며,

Fig. 1로부터 다음 식이 성립된다.

$$\frac{t_c}{T} = 1 + \frac{t_1}{T} - \frac{t_2}{T} \quad (8)$$

### 2.4 절삭공구 1주기 동안의 절삭길이 $L_T$

Fig. 2에서  $y = a \sin \omega t$ 는 절삭공구의 변위이고 그 곡선의 각 접선은 절삭공구의 속도이다. 절삭공구의 속도와 공작물의 속도가 동일한 A점에서부터

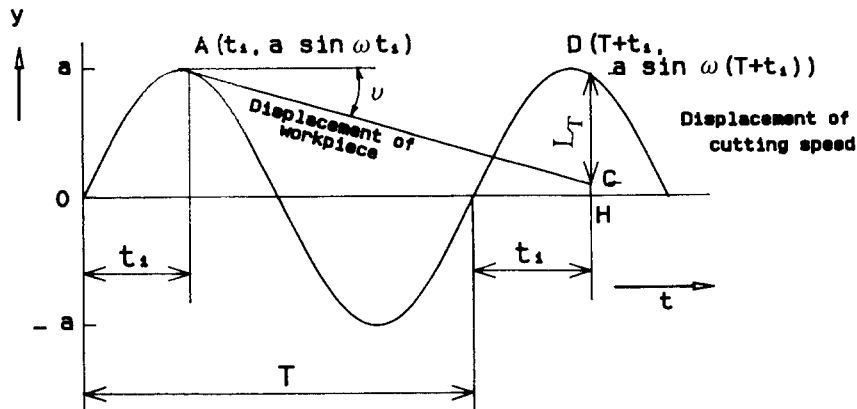


Fig. 2 Cutting length in one period of tool ( $L_T$ )

다시 절삭공구의 속도와 공작물의 속도가 동일한 D점까지가 절삭공구의 1주기이고 그 사이에 절삭 속도  $v$ 로 이동한 거리 CD가 절삭공구 1주기동안 절삭한 길이이다. A점 이후의 공작물의 변위  $y$ 는 식 (5)와 같이

$$y = a \sin \omega t_1 - v(t - t_1) \quad (9)$$

D점에서의 시간은  $T + t_1$ 이고 A점 이후의 시간은  $(T + t_1) - t_1$ 이므로

$$\overline{CH} = a \sin \omega t_1 - vT \quad (10)$$

$$\overline{CD} = L_T = \overline{DH} - \overline{CH} = vT = v/f \quad (11)$$

따라서  $L_T$ 는

$$L_T = v/f \quad (12)$$

가 된다. 진동절삭의 절삭성을 좌우하는  $L_T$ 는 이 식이 나타내고 있는 절삭공구 진동수  $f$ 가 일정할 경우는 절삭속도가 적어야 하고, 고속절삭에서는 절삭시간을 단축시켜 이상적인 진동절삭 효과를 가 능케 할 수 있는 높은 진동수가 필요하다.

### 3. 혼의 설계 및 진동분석

#### 3.1 혼의 설계

본 실험에서는 내부에너지 손실이 적고, 피로강도가 높은 재료로서 고장력 티타늄 합금(High Strength Titanium Alloy) Ti-2Al-2Mn-1Mo을 사용하였다. 이의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 같다.

이 혼의 특징은 진폭 확대율이 큰 단면과 적은 단면의 면적비에 따라, 선단부의 큰 진폭을 얻을 수 있다는 점이다. 즉 스텝부의 단면적비가 클수록 설계 계산상의 응력 연속 가정이 성립되고, 스텝부에 곡물을 첨가하여 응용하고 있다.

선단에 혼과 동일한 재료의 단면형상인 공구가 고정될 경우의 공진조건은 혼의 단면적이 일정한 균일한 봉의 경우 큰 단면에서의  $x$ 되는 점의 단면

적  $s$ , 봉의 영률을  $E$ 라 할 때, 운동방정식으로부터 다음과 같이 구해진다<sup>6)</sup>.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (13)$$

여기서  $\rho$ 는 봉의 밀도,  $u$ 는 변위,  $t$ 는 시간이라 할 때 혼 재료에서의 음속도  $c$ 는 다음과 같다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (14)$$

여기서 봉의 길이를  $l$ 이라 하고, 양단이 자유인 경우의 기본과 진동에 대하여 고려하면

$$x=0 \text{에서 } \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$x=l \text{에서 } \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

가 되므로 단면에서  $x$ 인 위치에서의 단면의 변위는 식 (13)으로부터

$$u = u_0 \cos \frac{\pi}{l} x (\cos \frac{c\pi}{l} t + \sin \frac{c\pi}{l} t) \quad (15)$$

이 된다.

여기서  $u_0$ 는 봉 단면의 진폭을 나타낸다.

또한 봉의 길이  $l$ 은 봉의 중심을 전달하는 반파장의 혼의 길이로, 공진 주파수를  $f$ 라 할 때  $l$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$l = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{f} \quad (16)$$

여기서 선단 혼과 동일한 단면 모양으로 공구가 부가된 공진조건 식 (13)을 다음의 경계조건을 이용하여 해석하면 좌단으로부터  $l_1$ 의 위치에  $x$ 축의 원점을 얻는다.

$$x = -l_1 : \frac{\partial u_1}{\partial x} = 0$$

$$x = 0 : u_1 = u_2, S_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = S_2 \frac{\partial u_2}{\partial x}$$

$$x = l_2 : u_2 = u_3, S_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = S_3 \frac{\partial u_3}{\partial x}$$

$$x = l_2 + l_3 : \frac{\partial u_3}{\partial x} = 0$$

이것으로부터 다음의 공진조건식을 얻는다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of hone material

Material	Chemical compositions(%)						Mechanical properties			
	Al	Mn	Mo	H	N	Ti	Density	Elastic modulus(E)	Tensile strength	Sound velocity(C)
Ti-2Al-2Mn-1Mo	2.0	2.0	1.0	0.015	0.05	Bal	4.5 kgf/s <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup>	1.09 kgf/cm <sup>2</sup>	95 kgf/mm <sup>2</sup>	4.92 × 10 <sup>5</sup> cm/s

$$\tan al_1 = \frac{S_3 \tan al_3 + \frac{S_2}{S_1} \tan al_2}{1 - \frac{S_3}{S_2} \cdot \tan al_2 \cdot \tan al_3} \quad (17)$$

여기서  $l_1 = \lambda/4$ 라 할 때  $x=0$ 점이 진동의 절점이 되는 지점이고 공진조건에 따라 다음식으로 유도된다.

$$\tan al_2 \cdot \tan al_3 = \frac{S_2}{S_3} \quad (18)$$

이상의 과정을 거쳐 제작된 혼의 이론적인 진폭확대율은 다음과 같다. 입력단에서의 구동진폭을  $u_1$ 이라 하고, 제 1 직선부, 제 2 직선부 및 공구부에서의 진폭은 다음 식으로 정리된다<sup>(7,8)</sup>.

$$\begin{aligned} -l_1 \leq x \leq 0 &: u = -u_1 \sin ax \\ 0 \leq x \leq l_2 &: u = -u_1 \frac{S_1}{S_2} ax \\ l_2 \leq x \leq l_2 + l_3 &: u = -u_1 \left[ \left( \frac{S_1}{S_2} \sin^2 al_2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{S_1}{S_3} \cos^2 al_2 \right) \sin al \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{S_1}{S_2} - \frac{S_1}{S_3} \right) \sin al_2 \right. \\ &\quad \left. \times \cos al_2 \cos ax \right] \quad (19) \end{aligned}$$

따라서, 입력단과 출력단의 진폭비, 즉 진폭확대율은 공구 선단의 진폭을  $u_3$ 라 할 때 다음과 같다.

$$M = \left| \frac{u_3}{u_2} \right| = \frac{S_1 \cos al_2}{S_3 \sin al_3} = \frac{S_1}{S_3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ \left( \frac{S_2}{S_3} \right)^2 - 1 \right\} \cos^2 al_3}} \quad (20)$$

따라서 실험용으로 제작된 스텝형 혼의 진폭확대율은 다음과 같다.

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{5^2}{1} = 25, \quad al_2 = 1.542, \quad al_3 = 0.254$$

$$\therefore M = 25 \times \frac{\cos al_2}{\cos al_3} = 25 \times \frac{0.0288}{0.251} = 2.87$$

여기서 진동자 주파수 20kHz의 최대허용진폭은  $7\mu\text{m}$ 이고 진폭확대율이 2.87이므로 이론적인 편진폭  $a = 20\mu\text{m}$ 이다.

본 실험에서 입력단측 직선부의 길이  $l_1 = \lambda/4$ 라 하고 단순 스텝형 혼이라 할 때  $D_1 = 50\text{mm}$ 라 하고, 선단의 공구고정나사  $D_3 = 10\text{mm}$ ,  $l_3 = 10\text{mm}$ 로 결정하였으며, 진동자의 공진주파수는 20kHz이다.

혼 재료는 티타늄 합금(Ti-2Al-2Mn-1Mo)으로 음속도  $c$ 는  $49.2 \times 10^4$ 으로 혼재료중의 초음파 파장  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{49.2 \times 10^4}{2 \times 10^4} = \frac{492,000}{20,000} = 24.6\text{cm}$$

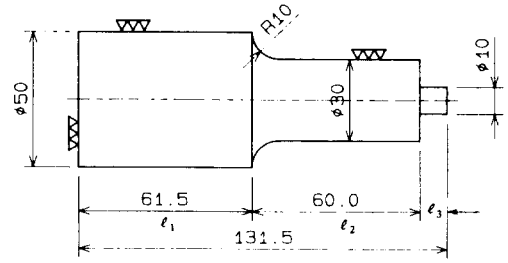


Fig. 3 The designed hone

$$\therefore l_1 = 61.5\text{mm}$$

공구 볼트의 재료는 탄소강으로 음속은  $52 \times 10^4$  cm/s이므로  $D_2$ 의 크기는  $D_1$ 과  $D_3$ 의 중간값을 선택하여 30mm로 한다고 할 때

$$\begin{aligned} al_3 &= \frac{\omega \cdot l_3}{C} = \frac{2\pi \times 2 \times 10^4 \times 1.0}{49.2 \times 10^4} \\ &= \frac{125,600}{492,000} = 0.255 \end{aligned}$$

$$\therefore \tan al_3 = 0.260$$

식 (18)로부터

$$\tan al_2 = \frac{S_2}{S_3} \cdot \frac{1}{\tan al_3} = \frac{3^2}{0.260} = 34.61$$

$$\therefore al_2 = 1.542$$

$$\therefore l_2 = 6.047 = 60\text{mm}$$

이상으로부터 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 스텝형 혼의 설계가 완료되었다. 제작상에서는 제 1과

Table 2 Performance of ultrasonic cutting tool ( $v = 16\text{m/min}$ )

Depth of Cut (mm)	Frequency (kHz)	Amp. (Acc.m/s <sup>2</sup> )	Amp. (Disp., $\mu\text{m}$ ) (a)
0.02	19.55	774107.1	25.7
0.04	19.60	775892.8	25.6
0.06	19.55	777678.6	25.8
0.2	19.60	778571.5	25.7
0.3	19.60	777678.6	25.6

( $td_1 = 0.02\text{mm}$ )

Cutting speed (m/min)	Frequency (kHz)	Amp. (Acc.m/s <sup>2</sup> )	Amp. (Disp., $\mu\text{m}$ ) (a)
16	19.55	774107.1	25.7
44	19.55	775892.8	25.7
92	19.60	775000.1	25.6



(a) Spectrum of output voltage accelerometer signal



(b) Top 10 peaks and frequencies on spectrum curve

Fig. 4 Example for spectrum analysis of ultrasonic vibration cutting tool

제 2의 스텝부에 10R의 반경을 갖도록 하였다. 한편 진동자의 결합시 경사각을 변화시키면 공진주파수<sup>(9)</sup>, 진폭<sup>(10)</sup>, 진동특성<sup>(11~13)</sup> 등에 영향을 미치게 되므로 정확한 수직선상에 놓이도록 유의하였다.

3.2 진동분석결과

Table 2는 절삭깊이에 따른 초음파 발전기의 분석결과이며 Fig. 4는 특성 일례를 나타낸 것이다. 여기에서 볼 수 있듯이 0.3mm까지의 절삭깊이 증가에 이르기까지 발진주파수나 발진진폭에 특이한 차이를 나타내지 않으며 소량의 주파수 이동은 MK310의 분석 영역에 있음을 알 수 있다.

절삭깊이 0.02mm인 경우의 절삭속도 변화에 따른 초음파 발전기의 특성에서도 발진주파수는 MK310의 분석범위 영역이며, 발진진폭의 변화도 5%이내의 변화율이 있으나 MK310의 주파수 정도의 영향을 고려하면 만족할만한 값이라 본다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 진동절삭 장치

Fig. 5는 본 실험에 사용된 절삭력 측정장치를 나타내었다. 주분력  $P_c$ 와 배분력  $P_t$ 는 진동장치 기저면에 구성된 공구동력계(AST방식)에 의하여 검출하고, 증폭기(DPM-6H)를 통하여 오실로그래프(Kyowa RMV-510A)에 의해서 기록되도록 하였다. 한편 가공면의 정도 검사는 접촉식 표면거칠기(Hommel) 및 측정기(Taylor)에 의하여 측정되

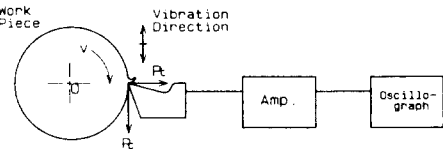


Fig. 5 Measurement system of cutting resistance

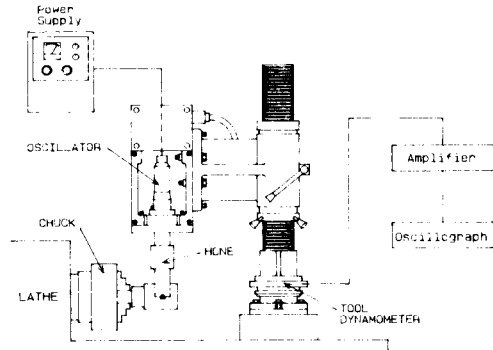


Fig. 6 Experimental apparatus ultrasonic vibration turning unit

었다.

Fig. 6은 실험장치의 외관을 나타낸 것이다. 가공형식은 선삭으로 왕복대상에 구성된 초음파 장치를 설치하였으며, 진동자는 NTK D4520 PC형을 사용하였고, 전원입력 6KVA<sub>max</sub>, 발진주파수 20 kHz~700W, 출력임피던스 30~50Ω이며 피삭재는 알루미늄합금, 공구는 인서트형으로 소결 다이아몬드를 볼트고정 방식으로 사용하였다.

4.2 피삭재 및 절삭방법

절삭방법은 선삭으로 하였으며, 측정을 위한 빈발한 작탈과정 중에서 정확한 고정이 용이하도록 내경에는 공차가공을 하였다. 피삭재는 인장강도 24kg/mm<sup>2</sup>의 알루미늄 합금재를 이용하였다. 절삭깊이는 0.02mm에서 부터 0.3mm까지 7단계로 각각 변화시켜 실험하였다. 절삭깊이는 직경 φ70에 대한 외경절삭으로 1회의 절삭후 가공면의 표면거칠기, 칩의 형태분석, 진원도 측정, 가공면의 외관 등이 검사되었다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 절삭저항

Fig. 7은 범용 및 진동절삭에서의 주분력  $P_c$ 와

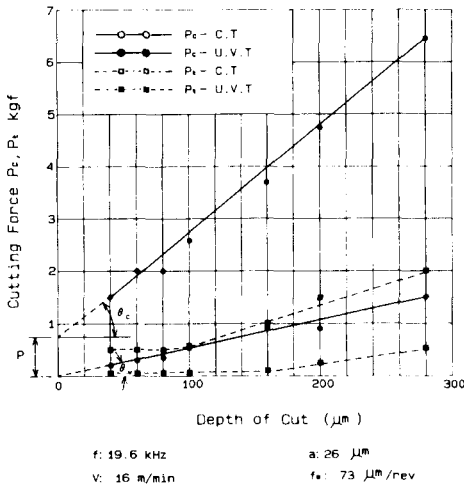


Fig. 7 Relation between depth of cut and cutting force

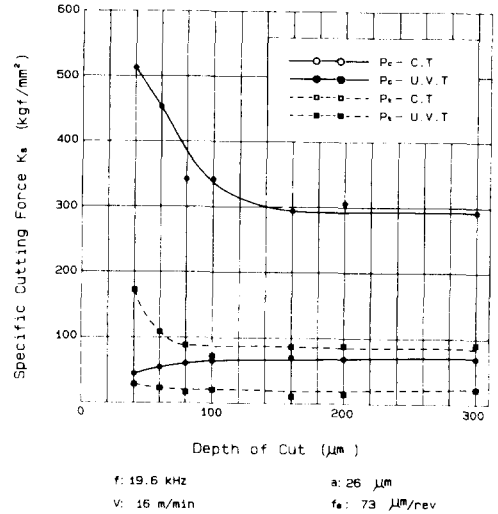


Fig. 8 Relation between depth of cut and specific cutting force

배분력  $P_t$ 값의 최대치를 측정된 결과이다. 실험 결과에 의하면 0.1mm이하의 미소절삭영역을 포함한 전범위에서 절삭력은  $P_c > P_t$ 의 관계를 유지하고 있으며 또한 진동시의 절삭저항은 범용절삭시의 절삭저항에 비하여 적은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 여기에서 진동절삭의 주분력을  $P_c(U.V.T)$ 라 하고, 범용절삭의 주분력을  $P_c(C.T)$ 라 할 때 진동절삭의 주분력  $P_c(U.V.T) = \tan \theta_v \cdot td_1$ , 범용절삭의 주분력  $P_c(C.T) = P + \tan \theta_c \cdot td_1$ 으로 정리된다고 볼 때  $\tan \theta_v$ 와  $\tan \theta_c$ 는 각각 0.087과 0.364로 계산되며, 또한 관용절삭은 진동절삭에 대하여 4배의 기울기를 갖고 있다. 또한  $P_c(U.V.T)$ 는 원점 0을 통과하는 경사각  $\theta_v$ 의 직선적 경향을 나타내고 있으며, 이에 반하여  $P_c(C.T)$ 는 원점으로부터  $P$ 에 상당하는 값으로부터 경사각  $\theta_c$ 의 직선적 경향을 나타내고 있다. 알루미늄 절삭의 경우 실험에서 얻어진 결과와 같이  $\theta_v \ll \theta_c$ 로  $P_c(U.V.T) \ll P_c(C.T)$ 의 관계가<sup>(14)</sup> 성립되며 따라서 진동절삭의 주분력은 관용절삭의 주분력에 비하여 격감된다. Fig. 8은 단위면적당의 비절삭저항 관계를 나타낸 것으로서 특히, 절삭깊이  $td_1$ 의 0.1mm이하의 영역에서 초음파 진동절삭의 효과를 알 수 있다. 즉, 범용절삭의 경우 절삭깊이  $td_1$ 이 감소할수록 비절삭저항은 소위 절삭치수효과(size effect)<sup>(15)</sup>의 영향에 의한 증기라고 이해되며, 절삭저항 중에 칩을 소성변형시키기 위한 저항이외에 절삭날을 압

입하게 되어 배분력( $P_t$ )도 증가하는 경향을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

그러나 진동절삭에서는 절삭깊이  $td_1$  0.1mm에서 0.3mm범위내에서 일정한 비절삭저항을 나타내고 있으며, 0.1mm이하의 영역에서 주분력에 대한 비절삭저항은 감소하고 있다. 이 결과로 볼 때 진동절삭에서는 절삭치수 효과에 의한 소성변형보다는 순수 절삭효과가 존재하는 것이라고 증명된다. Fig. 9는 절삭속도의 변화와 주절삭저항과의 관계를 나타낸 것이다. 절삭속도  $v$  44m/min조건에서의 범용절삭저항은 2kgf인데 비하여, 진동절삭 저항은 1/4인 0.5kgf로 나타났다. 또한 절삭속도  $v$ 를 92m/min로 증속시키면 진동절삭저항은 범용절삭저항에 접근되고 있으며 절삭속도  $v$ 를 154m/min로 더욱 증속시키면 진동절삭저항은 관용절삭저항에 일치되어 이른바 이 부근에서 임계절삭속도(critical cutting speed)<sup>(16)</sup>의 한계를 나타내고 있다. 즉 절삭속도  $v$ 가 절삭공구의 편진폭  $a$  및 절삭공구의 각 진동수  $\omega$ 와의 관계에서  $a\omega$ 로 되며, 절삭공구의 경사면이 항상 공작물 및 칩과 접촉한다고 할 때 범용절삭기구와 같이 진동절삭기구가 완전히 소멸하게 된다.

이와 같은 진동절삭시 절삭저항이 보통절삭에 비하여 매우 작게 되는 영역이 존재하는 것은 공구인선의 예리화 효과로서 절삭속도  $v$ 와, 진동수  $f \times$  진폭  $a$ 와의 비, 즉 진동속도와의 비에 관계한다.

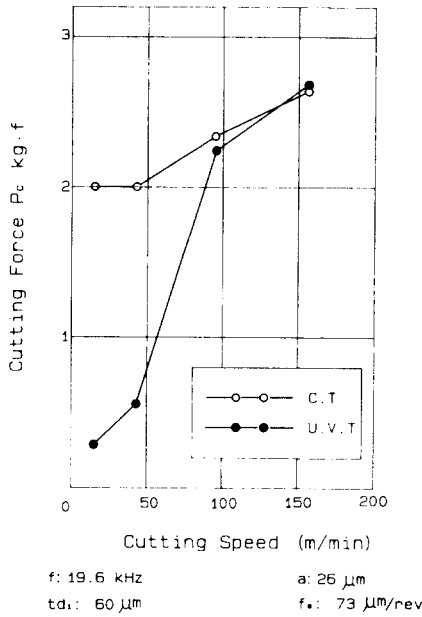


Fig. 9 Relation between cutting speed and cutting force

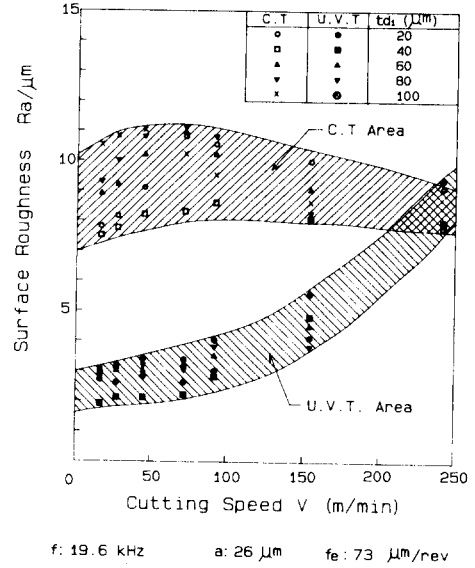


Fig. 10 Surface roughness with vibration turning and conventional turning

이것은 진동수  $f$ 를 크게 함으로써, 절삭공구 반사이클로의 절삭길이  $v/2f$ 가 적어지고  $\alpha$ 의 상면경사각이 증가하는 효과로 절삭저항이 감소한다고 본다.

### 5.2 다듬질면 거칠기

Fig. 10은 절삭깊이 변화와 절삭속도 변화에 대한 표면거칠기의 결과를 도출하였다. 절삭속도  $v$  242m/min범위를 제외한 이하의 영역에서 진동절삭의 표면거칠기는 범용절삭에 비하여 우수한 표면거칠기 결과를 나타내고 있으며, 이 경향은 저속의 절삭속도영역에서 두드러진 향상을 보이고 있다. 절삭속도의 영역이 154m/min이상이면 표면거칠기의 정도는 낮아지게 되며 범용절삭에서의 표면거칠기 정도로 접근된다. 특히 절삭속도를 242m/min로 증가시키면 진동절삭 기구는 관용절삭 기구화하여 진동특성을 상실하게 되어 범용절삭시의 표면거칠기보다 정도가 악화되었다. 이와 같이 진동절삭에서 다듬질면 거칠기가 향상하는 이유는 기하학적 다듬질면 거칠기  $R_{th}$ 와의 차  $\Delta R_{th}$ 는  $\Delta R_{th} = f_e / 4R \cdot \Delta f_e + \Delta td_1 / 2$ 로 되어 여기에서  $\Delta f_e$ 는 이송의 변화,  $\Delta td_1$ 는 절삭깊이의 변화라 할 때 진동절삭 기구에서는  $\Delta td_1 = 0$ ,  $\Delta f_e = 0$ 이므로 결국 상식의

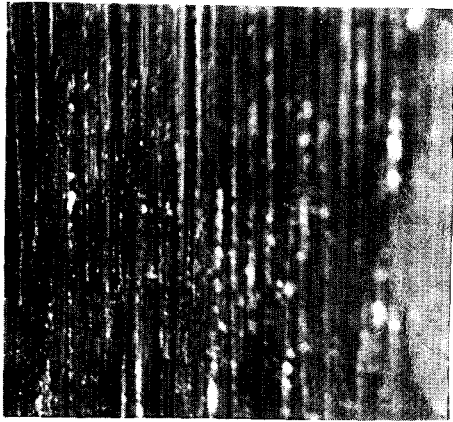
$\Delta R_{th} \rightarrow 0$ 로 되어 다듬질면 거칠기를  $R_{th}$ 에 근접하게 한다. 그러나 절삭속도가 증가하게 되면 절삭공구의 1사이클로 절삭방향에 절삭되는 길이  $L_T$ 가 증가하게 되고, 따라서 진동절삭에 대한 표면거칠기의 영향은 급격히 감소하게 된다<sup>(17)</sup>. 여기에서 사용된 절삭공구의 진동수  $f$ 가 19.6kHz이므로 절삭속도 16m/min범위에서의  $L_T$ 의 값은  $0.82\mu\text{m}$ 인 반면에 절삭속도가 242m/min로 증가하면  $L_T$ 값은  $12\mu\text{m}$ 로 증가하였고 따라서 범용절삭의 표면거칠기 값에 근접하는 경향을 나타내고 있다.

### 5.3 다듬질면의 현미경 고찰

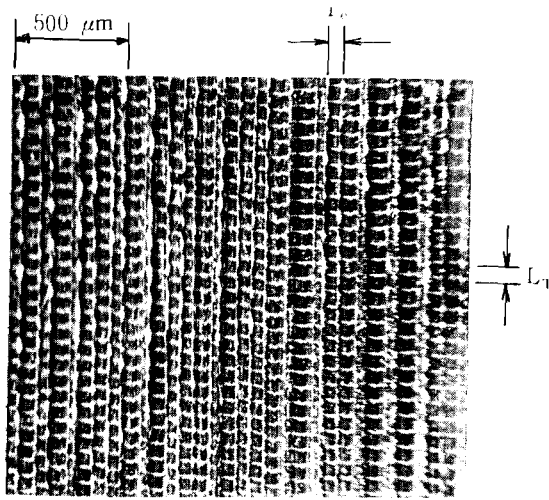
Fig. 11은 진동절삭과 범용절삭표면을 직각 위에서 금속현미경으로 관찰한 것이다. 이 그림에서 공작물 표면에 등간격으로 분포를 갖는 세로선이  $73\mu\text{m/rev}$ 의 이송속도 값이고 이것에 직각으로 나타나고 있는 가로선 간격이  $L_T (=v/f)$  마야크이다. 이것은 규칙적으로 진동펄스가 작용하고 있다는 의미이며, 절삭속도, 절삭공구의 진동수 및 진폭에 따라  $L_T$ 의 값은 좌우된다.

Fig. 12는 절삭속도 변화에 의한  $L_T$ 의 현상을 나타낸 것으로서 (a)는 표면거칠기  $R_a$ 값이  $1.8\mu\text{m}$ 을 얻었을 경우이며  $L_T$ 값은  $v/f$ 에 의하여 계산하





a) Conventional Turning



b) Ultrasonic Vibration Turning

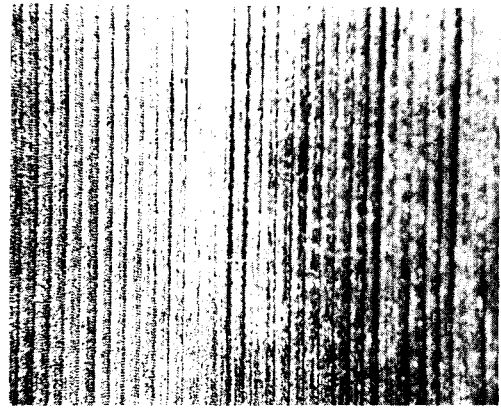
$f_c : 73\mu\text{m/rev}$      $v : 92\text{m/min}$   
 $f : 19.6\text{kHz}$      $a : 26\mu\text{m}$   
 $td_1 : 40\mu\text{m}$

Fig. 11 Metallurgical structure of conventional and vibration machining surface

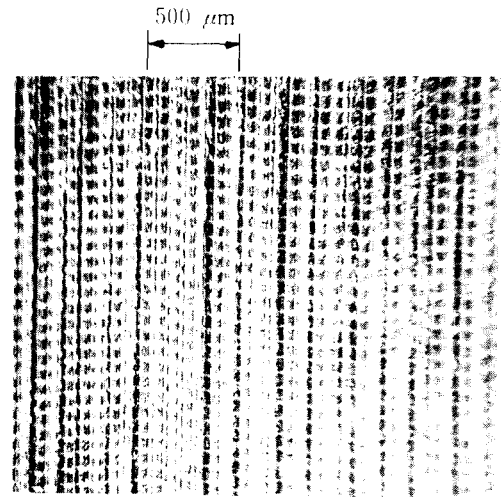
면  $0.82\mu\text{m}$  조건이다. 한편 (b)는 표면거칠기  $R_a$  값이  $4.7\mu\text{m}$ 을 얻은 경우로서  $L_T$  값은  $7.8\mu\text{m}$ 이므로  $L_T$ 의 변화값은 표면거칠기 값을 변화시키는 변수이다.

#### 5.4 절삭칩의 형태

Fig. 13은 이송  $f_c 73\mu\text{m/rev}$ , 절삭깊이  $40\mu\text{m}$  조건일 때의 절삭 칩의 형태를 나타내었다. 실험결과를 검토하면 범용절삭 조건하에서의 칩은 long



a)  $v : 16\text{m/min}$



b)  $v : 154\text{m/min}$

$f_c : 73\mu\text{m/rev}$      $f : 19.6\text{kHz}$   
 $a : 26\mu\text{m}$      $td_1 : 40\mu\text{m}$

Fig. 12 Phenomenon of  $L_T$  on various cutting speed

comma 칩의 형태를 갖는 반면, 초음파 진동절삭 조건하에서는 절삭속도의 범위에 따라 herical 칩 및 short tubular 칩의 형태를 나타내고 있다. Fig. 14는 절삭속도와 칩 두께의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 13의 칩을 측정된 것이다.

이 결과를 검토하여 볼 때 절삭속도  $16\text{m/min}$  범위에서는 진동절삭의 경우 칩이 길게 생성됨과 동시에 절삭비(cutting ratio)  $r_c$ 는  $0.91$ 로 계산되며, 반면에 범용절삭에서의 절삭비는  $0.56$ 으로 계산되

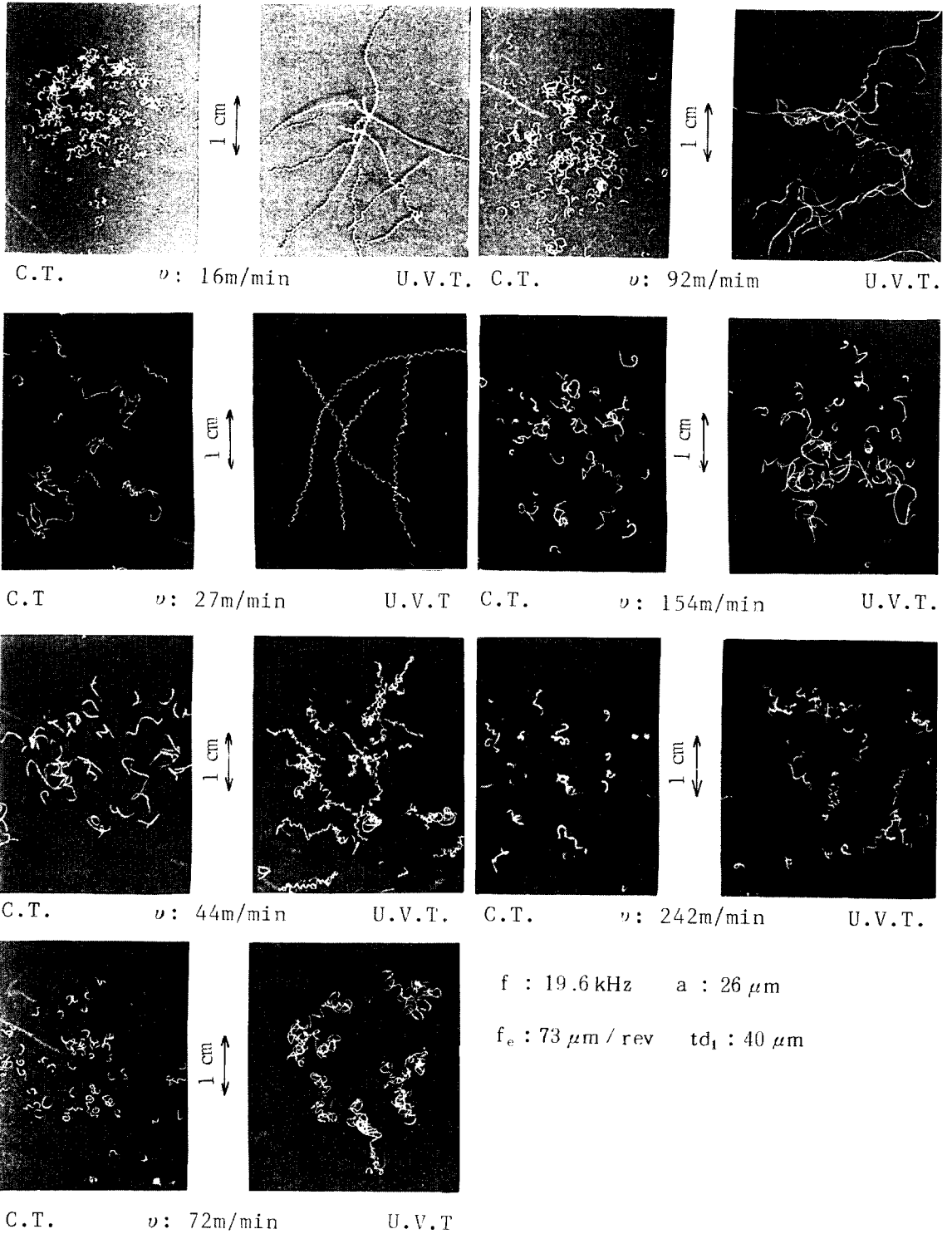


Fig. 13 Chip formation of conventional and vibration cutting condition

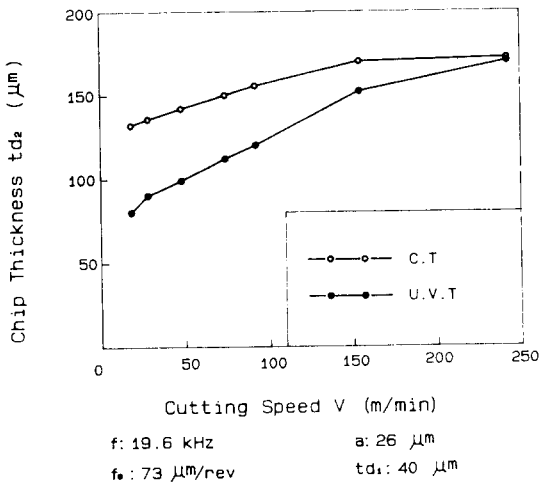


Fig. 14 Relationship of chip thickness and cutting speed

었다.

절삭속도  $v$  154m/min의 진동절삭비와 범용절삭비는 각각 0.48과 0.43으로 계산되었으며, 절삭속도  $v$ 를 242m/min로 증속시키면 절삭비는 양측 모두 0.43의 일정치로 계산되었다.

이 결과에서 절삭속도의 감소는 진동효과와 더불어 전단각  $\phi$ 는 증가하며, 칩의 두께는 범용 절삭에 비하여 얇게 생성되고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 진동절삭기구의 구성과 혼의 설계 및 제작을 중심으로 공구형상 및 이송에 의하여 결정되는 선삭의 이론적 표면조도를 근간으로 각종 절삭조건 등을 변화시키면서 실험을 행하여 초음파 진동절삭시 나타나는 특성을 관찰하여 절삭저항, 다듬질면 거칠기, 칩형태, 가공정도 등을 중심으로 비교 검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절삭속도 16m/min 조건에서의 진동절삭은 범용 절삭에 비하여 절삭저항이 낮은 값을 보이며, 절삭깊이의 증가에 따른 절삭력의 증가율이 매우 낮은 경향을 나타낸다.

(2) 진동절삭은 비절삭저항 값으로 검토할 때, 특히 절삭깊이 100μm이하의 영역에서 절삭치수 효과의 영향이 급격히 감소하고 있다.

(3) 진동절삭저항은 범용절삭저항에 비하여 저속의 범위에서는 급격히 낮아지나 절삭속도가 증속되

면 진동절삭저항은 범용절삭저항에 일치되며, 이른바 임계절삭속도의 한계를 나타내고 있다.

(4) 공구현미경으로 분석된 진동절삭 다듬질면은 등간격 분포를 갖는  $L_T$ 값이 존재하고, 절삭속도 16m/min범위에서의  $L_T$ 값은 0.8μm인 반면에 절삭속도 242m/min로 증가하면  $L_T$ 값은 12μm로 증가하였고, 진동절삭효과는 감소하였다.

(5) 초음파 진동절삭의 칩형태는 절삭속도의 범위에 따라 다르며, herical칩 및 short tubular칩의 형태로써 범용절삭시의 long comma칩에 비하여 칩이 길게 생성되고 있다.

## 후 기

본 연구는 1989년도 체신부, 한국전기통신공사, 통신개발연구원의 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Maruyama, K., Wang, J. and Tsuji, H. 1988, "Rolling of FRP Thread with Ultrasonic Vibration", JSPE, Vol. 54, No. 9, pp. 106~111.
- (2) Lijiang, W., Ji, Z. and Qingchang, T. 1987, "Kinematics of Ultrasonic Vibration-Cutting and A Study of Resulting Surface Quality", ACTA Armamentary, Vol. 3, pp. 24~31.
- (3) Ishikawa, K., Yoyoyama, Y. and Tsuwa, H. 1980, "Study on Vibration Cutting of Soft Polymers", JSPE, Vol. 46, No. 2, pp. 7~12.
- (4) Kumabe, J., Yasuba K. and Taniguchi, O. 1969, "Dynamical Analysis of Vibrating Cutting(1st Report) (Theoretical Analysis of Dynamical Behavior of Work)", JSPE, Vol. 38, No. 8, pp. 44~51.
- (5) 隈部, 1978, "精密加工, 振動切削", 實教出版(株), pp. 25~49.
- (6) 島川, 1975, "超音波工學", 工業調査會, pp. 118~130.
- (7) 島川, 1968, "超音波加工", 機械와 工具, Vol. 12, No. 3, pp. 85~92.
- (8) Nishimura, G. and Shimakawa, S. 1959, "Ultrasonic Mechanical Machining(Part 6) (Oscillational Characteristics of Two or Thress Stages Step Horn and Its Usage on Ultrasonic Mechanical Machining)", J. Faculty of Eng., Univ. of Tokyo, Vol. 26, No. 1, pp. 19~52.
- (9) Zaima, S., Suguki, Y., Kamo, S. and Uno, M. 1985,

- “Study on Machining by the Use of Ultrasonic Screw Vibration-Influences of the Transducer Inclination Angle”, JSPE, Vol. 51, No. 11, pp. 133~138.
- (10) Kumehara H. and Moro, M. 1984, “Study on Threaded Joints in Ultrasonic Vibration System, The Case Where Threaded Joints Are Located at the Node of Stress Amplitude”, JSPE, Vol. 50, No. 3, pp. 65~71.
- (11) Kumehara, H. and Mori, M. 1985, “Study on Threaded Joints in Ultrasonic Vibration System, Vibrational Characteristics of Bar having Threaded Joints”, JSPE, Vol. 51, No. 6, pp. 122~128.
- (12) Kumehara, H. and Mori, M. 1985, “Study on Threaded Joints in Ultrasonic Vibration System, The Case Where Threaded Joints Are Located Between Transducer are Horn”, JSPE, Vol. 51, No. 12, pp. 79~84.
- (13) Suzuki, Y. Kamo, S. and Uno, M. 1989, “Study on Machining by the Use Ultrasonic Screw Vibration (3rd Report)”, JSPE, Vol. 55, No. 05, pp. 65~70.
- (14) Kumabe, K. Yasuda, K. and Taniguchi, O. 1970, “Dynamical Analysis of Vibrating Cutting(2nd Report)”, JSPE, Vol. 36, No. 8, pp. 14~19.
- (15) 竹中, 1984, “超精密加工技術”, 砥粒加工研究會, 工業調査會, pp. 297~299.
- (16) Kumabe, J. 1976, “Vibration Cutting of High Speed Tool Steel”, JSPE, Vol. 42, No. 4, pp. 29~34.
- (17) Wang, L. and Zhao, J. 1987, “Influence on Surface Roughness in Turning with Ultrasonic Vibration Tool”, Int. J. Mach. Tools Manufacturing, Vol. 27, No. 2, pp. 181~190.