

<論 文>

저강성 공구를 이용한 절삭에서의 채터 진동

김 정 석* · 이 병 호**

(1989년 1월 31일 접수)

The Chatter Vibration in Metal Cutting Using the Low Stiffness Tool

Jeong Suck Kim and Byung Ho Lee

Key Words : Chatter Vibration(채터 진동), Dynamic Cutting(동적 절삭), Dynamic Resultant Cutting Force(동적 절삭력 합력), Static Cutting Force Coefficient(정적 절삭력 계수), Dynamic Cutting Force Coefficient(동적 절삭력 계수), Critical Width of Cut(한계 절삭폭)

Abstract

A mathematical model is developed for determination of the dynamic cutting force from static cutting data. The dynamic cutting force is analytically expressed by the static cutting coefficient and the dynamic cutting coefficient which can be determined from the cutting mechanics. The proposed model is verified by the chatter stability charts. A good agreement was shown between the stability limits predicted by the theory and the critical width of cut determined by experiments. The static cutting coefficient dominates high speed chatter stability, while the dynamic cutting coefficient dominates low speed chatter stability.

기 호 설 명			
b	: 절삭폭	α	: 공구 경사각
b_{cr}	: 한계 절삭폭	β	: 마찰각
F_c	: 정적 접선분력	δ_c	: 가공면의 경사도
F'_c	: 동적 접선분력	ζ	: 감쇠비
F_t	: 정적 추력분력	λ_d	: 동적 절삭력 계수
F'_t	: 동적 추력분력	λ_s	: 정적 절삭력 계수
k	: 공구계 정강성	ϕ	: 전단각
R	: 정적 절삭력 합력	ω	: 채터 주파수
R'	: 동적 절삭력 합력	ω_0	: 공구계 고유진동수
τ_s	: 전단 응력		
u_0	: 절삭 두께		
V	: 절삭속도		
x	: 현재 절삭시 진동		
x_t	: 전회 절삭시 진동		

1. 서 론

절삭가공에서 발생하는 공구와 공작물과의 상대 진동 중 채터진동(chatter vibration)은 절삭가공면의 정밀도, 공작기계 및 공구의 수명, 가공공정의 생산성에 영향을 미치며, 공작기계부품의 설계 및 구성, 가공공정의 자동화에 중요한 변수로 작용하

*정회원, 부산대학교 공과대학 정밀기계과

**정회원, 한국과학기술원 핵공학과

게 된다^(1,2).

채터진동에 관한 연구는 오래전부터 꾸준히 이루어져 왔는데, 연구의 방향은 채터진동이 발생하지 않는 한계절삭폭(critical width of cut)을 예측하는 것이다⁽³⁾.

동적절삭력에 대한 최초의 해석적 모델⁽⁴⁾은 Tobias와 Fishwick에 의해 제안되었다. 이들은 절삭두께, 페니트레이션률(the rate of penetration) 및 절삭속도를 파라미터로 사용해 동적절삭력을 해석적으로 구하였다. 그러나 이 모델에 포함된 절삭변수를 결정하기 위해서는 동적절삭(dynamic cutting)이 이루어져야 하는데 실험적으로 많은 어려움이 있다.

그후 Das와 Tobias⁽⁵⁾는 정적절삭(static cutting)을 통해 절삭변수를 결정할 수 있는 절삭력 모델을 제안하였다. 그러나 이 모델에 의해 예측된 한계절삭폭은 실험적으로 결정된 값과는 상당한 차이가 있다⁽⁶⁾.

이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 해석적 모델^(6~8) 등은 동적절삭에서 전단각(shear angle)의 변화를 고려한 것이다. 그러나 동적전단각의 측정은 특별한 동적절삭실험장치가 요구되고, 실험적으로 결정하는데 많은 오차를 수반하게 된다. 또한 이 모델 등은 3차원 절삭이 이루어지는 절삭형태에는 이용될 수 없는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 정적절삭실험으로 결정될 수 있는 절삭변수로 표현되는 동적절삭력을 해석적으로 구한다. 이 모델은 3차원 절삭형태에도 적용될 수 있는 특성을 갖는다.

새로이 제안된 절삭 과정의 모델은 동적절삭상태에서 절삭력 합력의 변화를 고려한 절삭기구를 통해 이루어지며, 해석적으로 한계절삭폭을 구한다. 실험적 규명은 채터진동이 발생하지 않는 한계절삭폭의 측정을 통해 이루어진다. 채터진동의 형태는 공작물에 비해 공구의 강성이 상대적으로 적은 보링(boring)작업에서 발생하는 것을 대상으로 하였다.

2. 절삭과정의 모델링

Das와 Tobias가 제안한 절삭과정의 모델은 다음과 같은 기본가정을 통해서 이루어졌다. 즉, 절삭력 합력(resultant cutting force)은 채터진동 중에도 변화하지 않으며, 전단력(shear force)과 접선분력(tangential cutting force)의 비는 절삭조건에 무관하게 일정한 값을 갖게 된다는 것이다. 이는 절삭기구의 특성상 현실과 어긋난 가정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 모순을 해결하는 새로운 절삭과정의 모델을 해석적으로 구한다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 절삭과정의 기하학

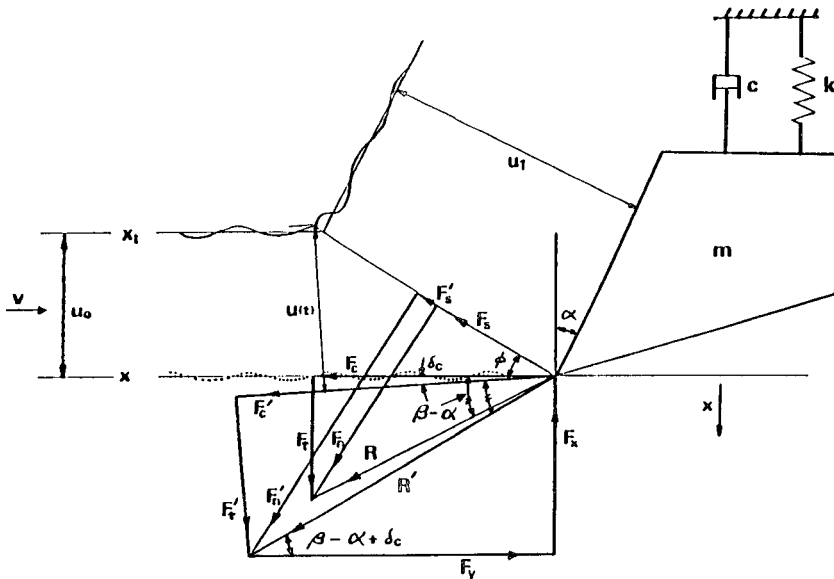


Fig. 1 Forces acting on the cutting tool during vibration

적 특성으로부터, 순간절삭깊이 (instantaneous undeformed chip thickness) $u(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$u(t) = u_0 + x - x_t + u_0 \delta_c \cot \phi \quad (1)$$

여기서 x 는 현재 절삭시의 진동 (inner modulation), x_t 는 전회 절삭시의 진동 (outer modulation), u_0 는 설정 절삭깊이 (이송량), δ_c 는 순간절삭방향 (instantaneous cutting direction) 과 정적절삭상태일 때 가공되는 공작물 표면과 이루는 사이각, ϕ 는 전단각을 나타낸다.

동적절삭상태에서도 정적절삭상태와 같이 전단각의 변화가 없다면, 순간전단면길이 (instantaneous shear plane length) l_s 는

$$l_s = \frac{u(t)}{\sin(\phi + \delta_c)} \quad (2)$$

이 된다.

정적절삭력합력 R 은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 전단력 F_s 와 수직력 F_n 과의 합력이 되고, 동적절삭력합력 R' 은 동적전단력 F'_s 와 동적수직력 F'_n 과의 합력이 된다. 여기서 정적절삭상태의 접선분력 F_c 와 추력분력 F_t 와의 비가 동적절삭상태의 동적접선분력 F'_c 와 동적추력분력 F'_t 와의 비가 같다고 가정하면, R' 의 방향과 순간절삭방향 (F'_c 방향)과 이루는 사이각은 $\beta - \alpha$ 가 된다.

Merchant⁽⁹⁾가 제시한 얇은 전단면 (thin shear plane) 모델을 이용하면, 동적절삭력합력 R' 은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} R' &= \frac{F'_s}{\cos(\phi + \beta - \alpha + \delta_c)} \\ &= \frac{\tau_s b l_s}{\cos(\phi + \beta - \alpha + \delta_c)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 τ_s 는 전단응력, b 는 절삭폭, β 는 마찰각, α 는 공구경사각을 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 식 (3)에 대입하면,

$$R' = \frac{\tau_s b (u_0 + x - x_t + u_0 \delta_c \cot \phi)}{\sin(\phi + \delta_c) \cos(\phi + \beta - \alpha + \delta_c)} \quad (4)$$

이 된다.

윗 식으로 표현된 R' 을 구하기 위해서는 τ_s , ϕ , β 를 독립변수인 절삭조건 (절삭속도, 이송량)의 함수로 나타내어야 한다.

전단응력 τ_s 는 절삭력의 접선분력 F_c 와 추력분력 F_t 와의 측정값을 이용해, Fig. 1에 보이는 바와 같은 힘의 평형조건으로부터 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_s = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{b u_0} \quad (5)$$

전단각과 마찰각의 특성은 피삭재가 중탄소강일 때 일반적으로 이용되고 있는 절삭방정식을 통해 구한다.

$$2\phi + \beta - \alpha = C \quad (6)$$

여기서 C 는 절삭조건에 따라서 변하지 않는 재료상수 (material constant) 이다⁽⁹⁾.

절삭조건에 따른 전단각의 변화특성은 실험적으로 다음과 같은 선형적인 상관관계를 갖는 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + C_v V \quad (7)$$

여기서 ϕ_0 와 C_v 는 주어진 경사각과 이송량 (절삭두께)에 대한 상수이며, V 는 절삭속도이다. 따라서 Fig. 1에 보이는 힘의 평형상태에 의해, 진동방향 (x 방향)의 동적절삭분력 F_x 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_x = R' \sin(\beta - \alpha + \delta_c) \quad (8)$$

여기서

$$\delta_c = \tan^{-1} \frac{\dot{x}}{V} \approx \frac{\dot{x}}{V}$$

식 (4)와 (6)을 식 (8)에 대입하여 δ_c 의 고차항을 무시하고 정리하면,

$$F_x = \tau_s b l_s (u_0 + x - x_t + \lambda_d \dot{x}) \quad (9)$$

여기서

$$\lambda_s = \frac{\sin(C - 2\phi)}{\sin \phi \cos(C - \phi)} \quad (10)$$

$$\lambda_d = \frac{u_0}{V} [\cot(C - 2\phi) + \tan(C - \phi)]$$

따라서 정적절삭실험에 의해 얻어진 전단응력 τ_s , 재료상수 C , 전단각 ϕ 등을 통해 결정될 수 있는 정적절삭력계수 λ_s 와 동적절삭력계수 λ_d 로 표현된 동적절삭력을 해석적으로 얻을 수 있다.

3. 채터 안정성 해석

동적절삭 시스템은 Fig. 1에 보이는 바와 같이, 1자유도 집중질량계로 가정한다. 주어진 좌표계에 따라서 진동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -F_x \quad (11)$$

여기서 m 은 진동계의 등가질량, c 는 감쇠계수, k 는 스프링 상수이다. 식 (9)를 (11)에 대입하면,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -\tau_s b l_s (u_0 + x - x_t + \lambda_d \dot{x}) \quad (12)$$

이 된다. 채터진동에서 전회 절삭시의 파형과 현재

절삭시의 파형의 크기가 설정절삭깊이(이송량)에 비해 적은 값을 갖고, 단순조화진동(single harmonic oscillation)이라 가정하면, chatter진동의 안정성이 깨지는 경계에서는 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$|x| = |x_t| \quad (13)$$

그리고

$$\begin{aligned} x &= x_0 \sin \omega t \\ x_t &= x_0 \sin(\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 θ 는 위상각 차이이고 ω 는 chatter주파수이다. 식 (13)과 (14)를 통해 전회 절삭시의 진동 x_t 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_t = x \cos \theta - \frac{\dot{x}}{\omega} \sin \theta \quad (15)$$

식 (15)를 (12)에 대입하면

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= -\tau_s b \lambda_s \left[u_0 + x(1 - \cos \theta) \right. \\ &\quad \left. + \dot{x} \left(\frac{\sin \theta}{\omega} + \lambda_d \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

자려진동계(self-excited vibration system)는 진동 중에 유입되는 가진에너지(exited energy)가 최대 로 될 때 동적으로 불안정하게 된다. chatter진동계에서 공구의 진동으로 유기된 가진에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{2\pi/\omega} -F_x \dot{x} dt \\ &= -\pi \tau_s b \lambda_s \omega x_0^2 \left(\frac{\sin \theta}{\omega} + \lambda_d \right) \end{aligned} \quad (17)$$

가진에너지가 최대가 되는 위상각 차이 θ_c 는 식 (17)을 미분하여 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_c = 2n\pi + \frac{3}{2}\pi \quad (18)$$

여기서 n 은 0을 포함한 자연수이다. 식 (18)을 식 (16)에 대입하여 구한 chatter발생의 경계에서의 진동 방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = -\tau_s b u_0 \lambda_s \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} c_{eq} &= c - \frac{\tau_s b \lambda_s}{\omega} + \tau_s b \lambda_s \lambda_d \\ k_{eq} &= k + \tau_s b \lambda_s \end{aligned}$$

식 (19)에서 상당감쇠계수 c_{eq} (equivalent damping coefficient)가 양의 값을 갖을 때, 진동 시스템은 동적으로 안정하게 된다. 또한 c_{eq} 가 음의 값을 갖을 때 진동계는 불안정하게 된다. 따라서 chatter 안정성의 임계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$c_{eq} = 0 \text{ 즉, } \tau_s b \lambda_s = \frac{c\omega}{1 - \lambda_d \omega} \quad (20)$$

그리고 절삭형태가 $\tau_s b \lambda_s / k \ll 1$ 인 조건이므로 chatter주파수는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega = \sqrt{\frac{k + \tau_s b \lambda_s}{m}} \cong \sqrt{\frac{k}{m}} \left(1 + \frac{\tau_s b \lambda_s}{2k} \right) \quad (21)$$

따라서 식 (21)을 (20)에 대입하여 고차항을 무시하고 $\lambda_d \omega \ll 1$ 이면, 한계절삭폭 b_{cr} (critical width of cut)은 다음과 같이 결정된다.

$$b_{cr} = \frac{2k\zeta(1+\zeta)}{\tau_s \lambda_s (1 - \lambda_d \omega_0)} \quad (22)$$

여기서

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

식 (22)에서 동적절삭계수 λ_d 가 0이면

$$b_{cr} = \frac{2k\zeta(1+\zeta)}{\tau_s \lambda_s} \quad (23)$$

이 되어, Merritt⁽¹⁰⁾에 의해 제시된 한계절삭폭의 표현과 같게 된다.

4. 절삭력 계수 결정

절삭실험은 무단변속이 가능한 선반에서 건식절삭으로 이루어졌으며, 절삭방법은 파이프를 절삭하는 단면가공(face cutting)으로 해서 보오링작업과 같은 상황으로 하였다. 공작물은 중탄소강(SM45C)으로 하였고, 외경은 75mm, 두께는 1.8mm로 가공하여 사용하였다. 사용되어진 공구는 경남땀한 P20 계열의 소결공구이다. 공구의 기하학적 형상은 ISO 규정에 의한 표시로(0, 6, 6, 6, 15, 0, 1)이다.

절삭조건은 칩형상이 연속형(continuous type)으로 이루어지는 영역을 선택하였다. 절삭속도는 50, 80, 100, 150, 200, 250 그리고 300m/min를 택하였다. 이송량은 0.102, 0.127 그리고 0.157mm/rev를 택했고, 절삭깊이(절삭폭)는 1.80mm로 고정하였다.

절삭력은 공구동력계를 통해 절삭력의 접선분력(수평분력)과 추력분력(수직분력)을 측정하였다. 이 절삭분력들은 마찰각과 전단응력을 결정하는데 사용하게 된다. 또한 전단각을 결정하기 위해 칩의 두께는 마이크로미터를 통해 측정하였다. 결정된 전단각과 마찰각과의 상관관계는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 선형적인 관계를 보이고 있으며, 식 (6)에 나타나 있는 재료상수 C 는 76도이다. 또한 절

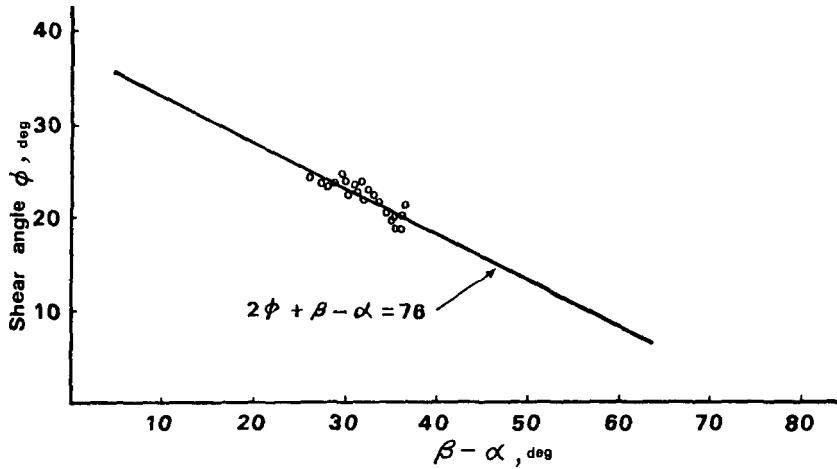


Fig. 2 Experimental shear angle relationship for orthogonal cutting

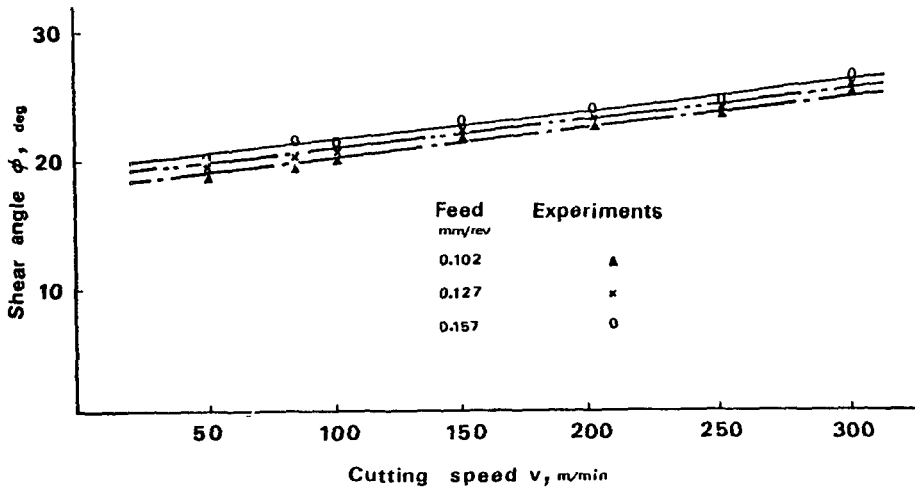


Fig. 3 Variation of shear angle as a function of cutting speed

Table 1 Constants for shear angle prediction

Feed rates mm/rev	ϕ_0	C_v /min/m
0.102	17.1	0.023
0.127	18.4	0.020
0.157	18.8	0.021

삭속도와 이송량의 변화에 따른 전단각의 특성은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 식 (7)로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 각 이송량에 따른 상수들은 Table 1에 보이는 바와 같다.

전단응력은 Fig. 4에 나타냈는데, 절삭조건에 변

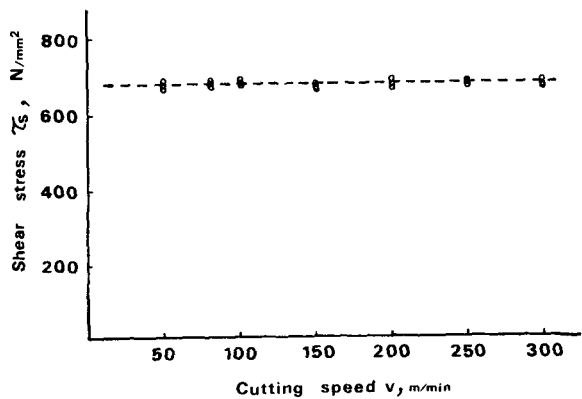


Fig. 4 Shear stress τ_s versus cutting speed

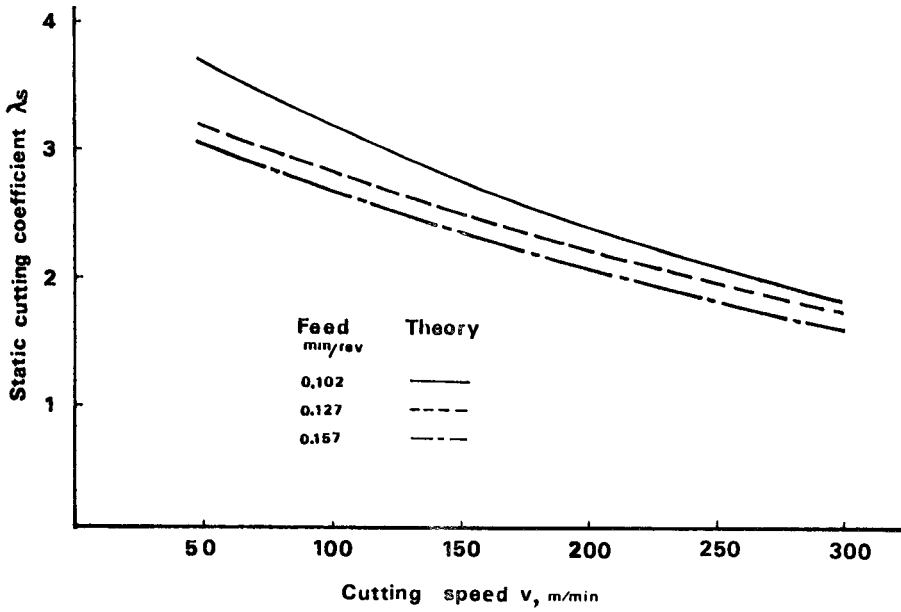


Fig. 5 Variation of static cutting coefficients with cutting speed

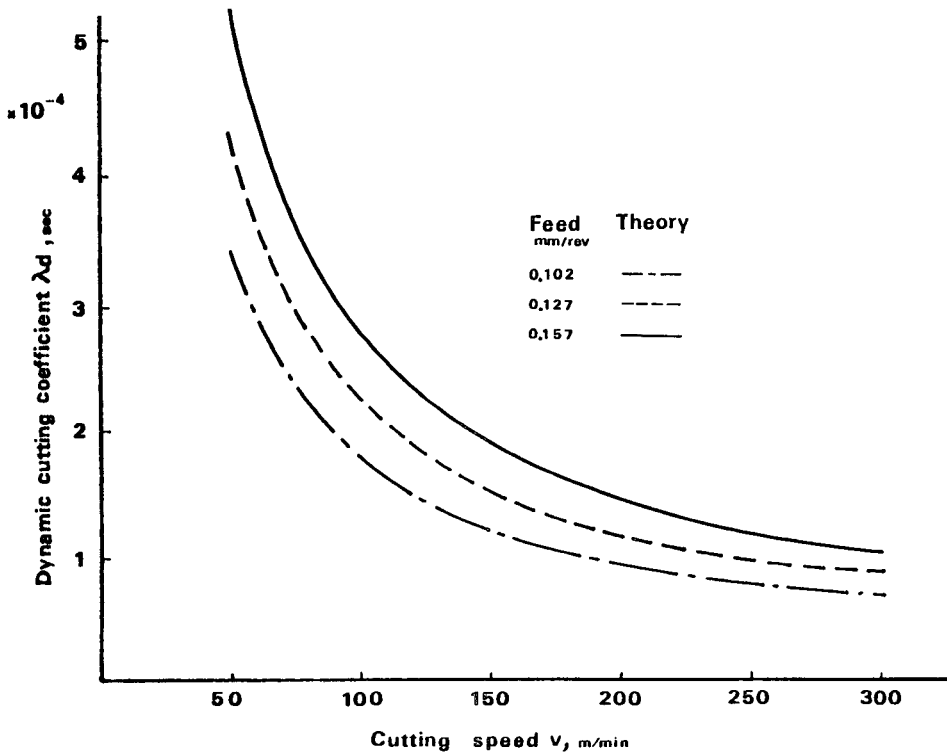


Fig. 6 Variation of dynamic cutting coefficients with cutting speed

화에 대해서도 일정한 값을 갖는 특성을 가지고 있다.

식 (10)으로 표현된 정적 절삭력 계수 λ_s 와 동적 절삭력 계수 λ_d 는 Fig. 5 및 6에 나타나 있다. 이는 정적절삭실험을 통해 쉽게 결정될 수 있는 절삭 변수로 표현되어 있다. 정적절삭력계수는 절삭력의 속도특성(즉 절삭력이 절삭속도의 증가와 함께 감소해 가는 현상)을 설명해 주고 있고, 동적절삭력 계수는 절삭과정의 감쇠계수가 저속영역에서 증가해 간다는 실험결과를 잘 설명해 주고 있다.

5. 채터 안정성 평가

채터 안정성 실험은 Fig. 7에 보이는 바와 같은 선반에서 이루어졌으며, 공구강성이 공작물의 강성에 비해 상대적으로 적어 공구가 진동하게 되는 채터 진동형태를 취했다. 공구는 x 방향으로 주진동이 발생하도록 공구대 위에 설치하였다. 가진 실험에 의하면 공구의 동특성은 고유진동수가 약 280 Hz, 감쇠비 0.047, 정강성 25.7kN/mm를 나타내었다.

공작물은 가변 절삭폭의 형태를 이루기 위해 테이퍼를 갖는 파이프 형태로 제작하여 사용하였다. 공작물의 외경은 75mm, 척으로부터 돌출된 길이는 70mm이고 테이퍼 각은 6도이다.

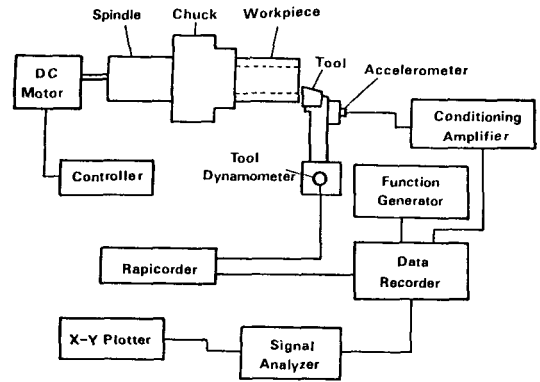


Fig. 7 Schematic diagram of experimental set up

절삭속도에 따른 채터 안정성은 Fig. 8(a)~(c)에 보이는 바와 같다. 실선은 식 (22)에 의해 얻어진 값을 도시하고 있고 점선은 식 (23)에 의한 계산결과이다. 실험결과와 비교하여 볼 때 식 (22)로 제안된 채터 안정성 선도와 잘 일치함을 알 수 있다. 저속영역에서는 실험치와 이론치가 차이가 나는 현상을 보이는데, 구성인선(built-up edge)의 발생과 칩 생성이 불안정하게 이루어짐으로 동적안정성이 저해되는 요인에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 8에 의하면 특정한 절삭속도 V^* 를 기준으로 저속 및 고속으로 변화될 때 채터 안정성이 향상되는 특성을 갖고 있다. 이는 Tlustý⁽³⁾가 실험적

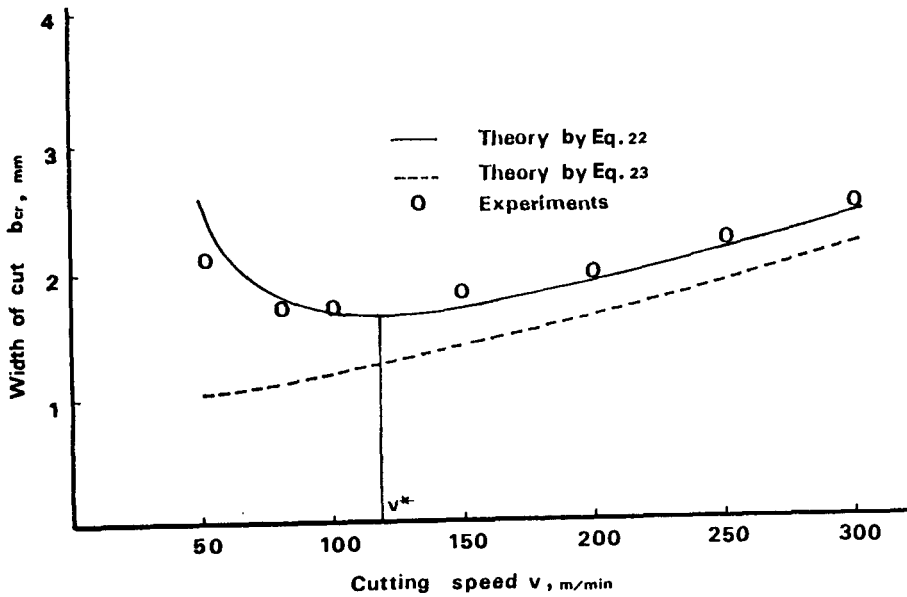
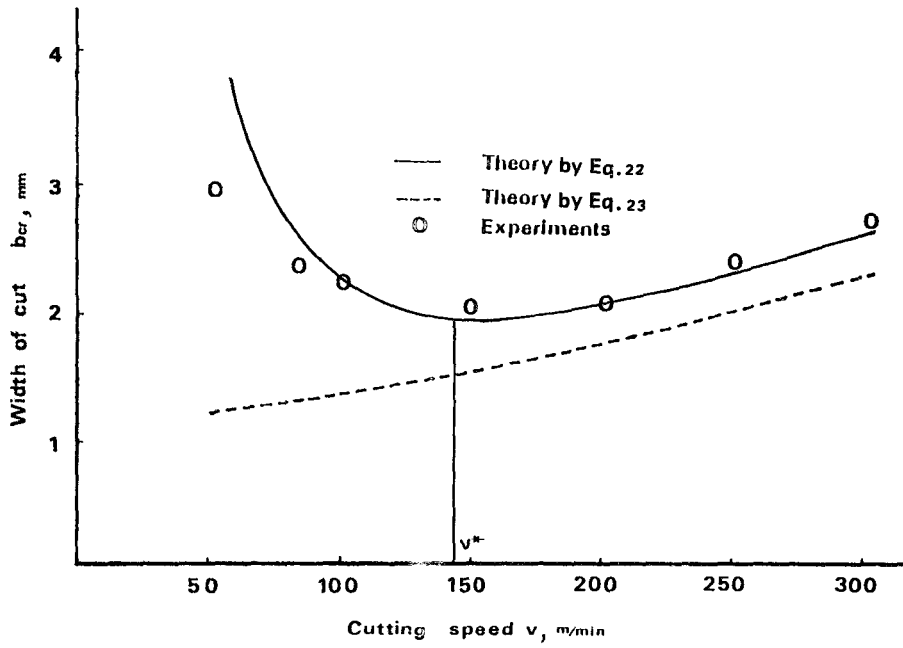
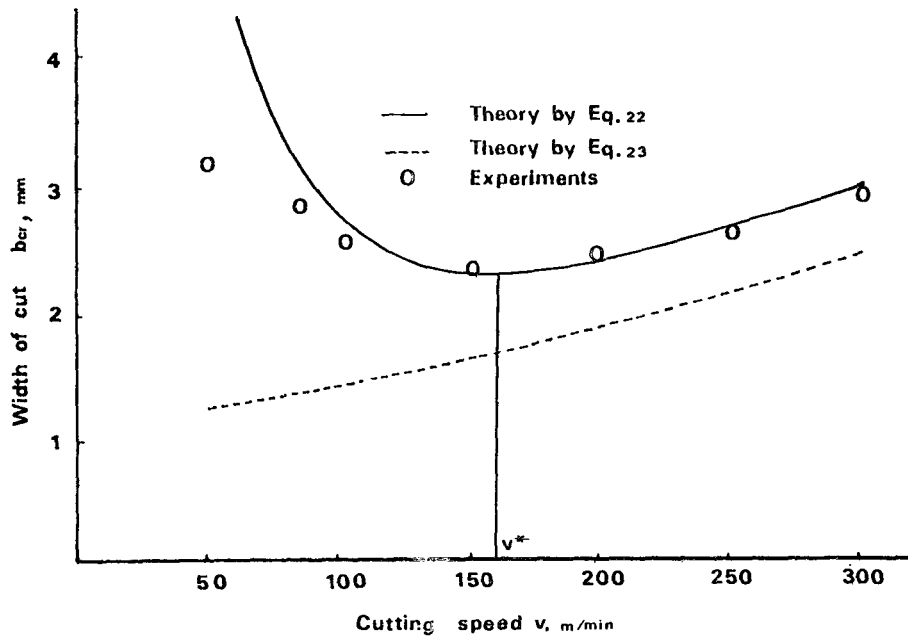


Fig. 8 Critical width of cut versus cutting speed



(b) Feed rate 0.127 mm/rev



(c) Feed rate 0.157 mm/rev

으로 밝힌 바와도 일치하고 있다.

삭 (22)에 의하면 정적절삭계수 λ_s 는 채터의 고속안정성을 지배하고 동적절삭력계수 λ_d 는 저속안정성을 지배함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 동적절삭과정의 모델에 의한 채터진동의 해석은 실험적으로 얻어지고 있는 결과들을 정량적으로 잘 설명해 주고 있으며, 정적절삭실험만으로 각 절삭계수들을 쉽게 구할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

6. 결 론

새로이 제안된 절삭과정의 동적 모델에 의한 채터진동의 해석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 정적절삭실험만으로 결정될 수 있는 절삭변수로 표현된 동적절삭력을 Merchant의 얇은 전단면 모델을 이용해 해석적으로 구하였다. 이는 3차원 절삭작업에도 쉽게 적용될 수 있으며, 채터진동의 고속안정성과 저속안정성을 설명할 수 있는 장점이 있다.

(2) 정적절삭력계수 λ_s 는 고속에서의 채터 안정성을 지배하고, 동적절삭력계수 λ_d 는 저속에서의 채터 안정성을 지배한다.

(3) 이론적으로 구한 한계절삭폭과 실험적으로 얻은 값과는 비교적 일치하고 있는 면을 보이지만, 저속 영역에서는 이론치와 실험치와의 편차가 크게 나타난다. 이는 저속에서 칩생성이 불안정하게 이루어지며, 구성인선의 발생빈도가 커져서 채터 안정성을 해치고 있음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 1988년도 문교부 지원 한국학술진흥

재단 자유공모과제 학술연구조성비의 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자께 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) Tobias, S.A., 1965, "Machine Tool Vibration", Blackie & Son, London.
- (2) Koenigsberger, F. and Tlusty, J., 1970, "Machine Tool Structure", Vol. 1, Pergamon Press, Oxford.
- (3) Tlusty, J., 1978, "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics", Annals of CIRP, 27, pp. 583~589.
- (4) Tobias, S.A. and Fishwick, W., 1953, "The Chatter of Lathe Tools under Orthogonal Cutting Conditions", Trans. ASME Vol. 75, pp. 1075~1080.
- (5) Das, M.K. and Tobias, S.A., 1967, "The Relation between the Static and the Dynamic Cutting of Metals", Int. J. MTDR, Vol. 7, pp. 63~89.
- (6) Nigm, M.M., Sadek, M.M. and Tobias, S.A., 1977, "Determination of Dynamic Cutting Coefficients from Steady State Cutting Data", Int. J. MTDR, Vol. 17, pp. 19~37.
- (7) Kainth, G.S., 1969, "Investigation into the Dynamics of the Metal Cutting Process", Ph D. Thesis, Univ. of Birmingham.
- (8) Wu, D.W. and Liu, C.R., 1985, "An Analytical Model of Cutting Dynamics Part 1, 2", Trans. ASME, J. Eng. Ind., 107, pp. 107~118.
- (9) Boothroyd, G., 1975, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", McGraw-Hill, Washington, D.C.
- (10) Merritt, H.E., 1965, "Theory of Self-excited Machine Tool Chatter", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Nov, pp. 447~454.