

<論 文>

선삭공정에서 공작기계의 절삭성능 개선을 위한 임팩트댐퍼의 응용

정성종* · 김옥현** · 박정근***

(1986년 1월 21일 접수)

Application of Impact Dampers to Improve Cutting Performance of Machine Tools in Turning Process

Sung-Chong Chung, Ock-Hyun Kim and Jeong-Geun Park

Key Words: Impact Damper(임팩트댐퍼), Loss of Contact(접촉이탈), Nonlinear Chatter(비선형 chatter), Multiple Regenerative Effect(다중재생효과), Asymmetrical Gain(비대칭이득)

Abstract

During turning process chatter may be occurred due to regenerative effects. Once, the chatter occurs its amplitude increases with time, then loss of contact between the workpiece and the cutter is developed. In this paper, nonlinear chatter loop representing the loss of contact as an element of asymmetrical gain is derived during multiple regenerative machining process. The analysis is carried out in the time domain by numerical simulation. It is shown that two typical patterns of chatters due to the nonlinearity may be developed which are denominated as limit cycle and irregular chatter. To suppress the chatter an impact damper is applied to the cutting process. The control effects of design parameters of an impact damper during machining are analysed in two aspects, one is a point of view of stability and the other is a viewpoint of productivity. Design strategy of an optimal impact damper is proposed, also.

1. 서 론

공작기계의 절삭성능 개선을 위하여 절삭작업에 있어서 chatter 방지의 중요성은 주지의 사실이다. chatter현상 중에서 공작기계의 결합 또는 외부 교란에 의

한 강제진동의 경우는 공작기계의 고급화와 주변환경의 개선으로 비교적 쉽게 해결할 수 있으나, 절삭공정 자체에서 유래되는 자력진동(self-excited vibration)에 의한 것은 높은 생산성을 유지하는 수준에서 극복하기란 쉽지 않다. 그동안 많은 연구가 절삭작업 중의 chatter를 억제하기 위하여 chatter의 특성해석^(1,2)과 진동흡수장치의 일종인 임팩트댐퍼(impact damper)의 응용에 관하여 수행 되어져 왔다⁽³⁻⁷⁾. 그러나 이들 연구는 대부분 절삭공정 중에 chatter진폭이 충분히 증가했을 때 발

* 정희원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과

** 정희원, 충북대학교 공과대학 기계공학과

*** 한양대학교 대학원 기계설계학과

생하는 공작물로부터의 공구의 접촉이탈(loss of contact), 즉 공구의 칩탈현상을 고려하지 않고 어떠한 경우에도 절삭이 이루어진다는 선형채터에 관한 해석이거나, 공구의 칩탈현상에 따른 비선형성이 고려되었다 하더라도 공작기계의 뱀핑 증가효과에만 관심을 둔 해석이었다.

본 연구에서는 절삭공정 중 발생하는 공구의 접촉이탈 현상에 의하여 공작물의 절삭된 표면중에 한회전 및 그 이전 회전에 절삭된 절삭면의 형상이 현재의 절삭 깊이에 영향을 미치는 다중재생효과(multiple regenerative effect)가 존재하는 선삭작업에서 공구의 칩탈현상을 고려한 비선형채터(nonlinear chatter)를 공작기계의 생산성의 관점에서 절삭공정의 특성을 고려하여 해석하였으며, 수동제어기의 일종인 임팩트뱀퍼를 절삭공정에 응용하여 절삭작업중에 공작기계의 안정성향상 뿐만 아니라 생산성의 증가효과를 규명하였다. 아울러 뱀퍼 자체의 설계변수에 따른 채터 억제효과를 고려하여 최적의 뱀퍼를 설계하는 방법을 제시하였다.

2. 비선형채터의 해석

선삭과정에 관한 변수들 사이의 관계를 Fig. 1에 보였으며 Fig. 2는 선삭작업에서 공구와 공작물간의 기하학적 형상을 보이고 있다. 절삭작업시 공구는 충분한 강성을 지니고 있어 마모되지 않으며, 절삭폭과 절삭두께 스피들 속도 이외의 다른 절삭조건은 일정하다고 가정하여 해석한다. 즉, 이송량은 일정하며 공작물은 균일한 재질로 이루어졌고 칩의 발생상태 등의 영향은 무시한다. 절삭폭을 증가시키에 따라 채터는 더

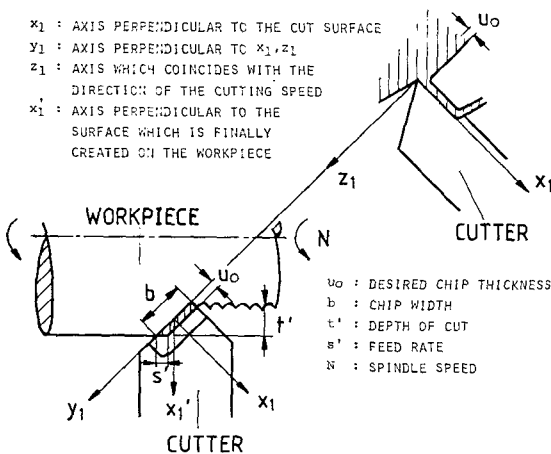
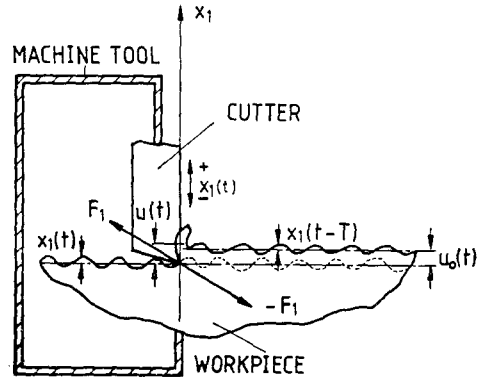


Fig. 1 Parameters of the turning process



- F_1 : Resultant cutting force
- u_0 : Desired chip thickness
- u : Instantaneous uncut chip thickness
- x_1 : Relative displacement between tool and workpiece perpendicular to the cut surface
- T : Time interval per one revolution of workpiece

Fig. 2 Geometric shape of the turning process

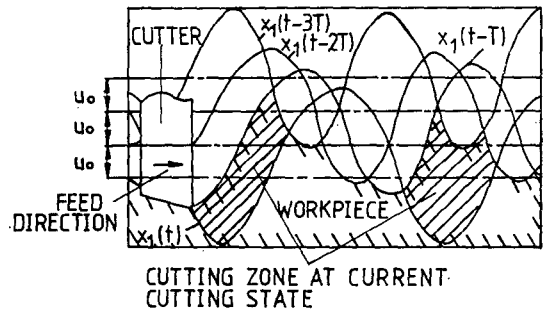


Fig. 3 Multiple regenerative effect in the machining process

욱 심화되어 Fig. 3에 보인 것처럼 이전의 절삭면 중 최소값을 갖는 면이 현재의 절삭에 영향을 미치게 되며⁽²⁾ Fig. 2와 Fig. 3으로부터 공구대 이송방향의 칩두께 $u(t)$ 는 다중재생효과를 고려한 경우 아래와 같이 표현된다.

$$u(t) = u_0(t) - x_1(t) + \mu \cdot x_{1, \min} \tag{1}$$

여기에서,

$$T = 1/N, N = \text{스피들 속도, rps}$$

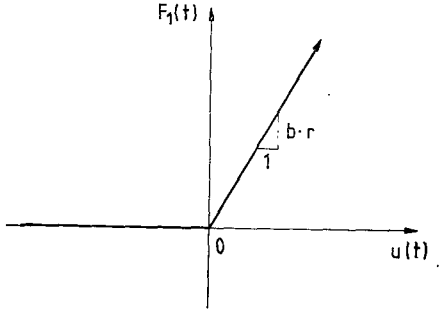
$$u_0(t) = \text{요구되는 칩두께, mm}$$

$$x_1(t) = \text{절삭면에 수직인 방향의 공구와 공작물 사이의 상대변위, mm}$$

$$\mu = \text{중복비 (overlap factor), dimensionless}$$

그리고,

$$x_{1, \min} = \text{minimum of } \{x_1(t-T), x_1(t-2T) + u_0, x_1(t-3T) + 2u_0, \dots\}$$



F_1 : Resultant cutting force
 b : Chip width
 r : Cutting stiffness per unit length
 u : Instantaneous uncut chip thickness

Fig. 4 Nonlinear element between the cutting force and the instantaneous chip thickness

으로 한회전 및 그 이전의 절삭면 중 현재의 칩두께에 영향을 미치는 최소 절삭면의 공구와 공작물 사이의 상대변위이고, μ 는 나사절삭의 경우는 0이고 Fig. 1과 Fig. 2에 보인 것과 같은 선삭작업에서는 1이 된다.

절삭작업시에 발생하는 공구와 공작물의 착탈현상에 따라 칩두께 $u(t)$ 와 절삭력 $F_1(t)$ 와의 관계는 Fig. 4와 같은 비선형 요소인 비대칭 게인(asymmetrical gain)으로 표현된다. 즉 공구와 공작물이 접촉하기 위한 조건식은

$$u(t) > 0 \tag{2}$$

이 되고, 이 때 절삭력 $F_1(t)$ 는 절삭과정의 특성이 정적인 경우 칩두께에 비례하는

$$F_1(t) = bru(t) \tag{3}$$

이 되며⁽⁶⁾ 여기서, b 는 절삭폭이고 r 은 단위 길이당 절삭강도(cutting stiffness)로 b 를 제외한 다른 절삭조건에 따르게 된다. 공작물로부터 공구는 칩두께

$$u(t) \leq 0 \tag{4}$$

이 될 때 이탈하며 이 때의 절삭력은 존재하지 않으므로 다음의 식을 얻는다.

$$F_1(t) = 0 \tag{5}$$

절삭과정중에 발생하는 절삭력 $F_1(t)$ 에 의하여 공작기계의 진동이 유발되며 라플라스 영역(Laplace domain)에서 공구와 공작물간의 상대변위 $x_1(t)$ 와 절삭력 $F_1(t)$ 사이의 리셉턴스(receptance)는

$$\frac{x_1(s)}{F_1(s)} = \frac{1}{k_1} G_1(s) \tag{6}$$

와 같이 표현되고 공작기계 구조물을 1자유도 계로 가정하면 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{x_1(s)}{F_1(s)} = \frac{1}{k_1} \frac{w_1^2}{s^2 + 2\zeta_1 w_1 s + w_1^2} \tag{7}$$

여기서 k_1 은 공작기계의 변형강도이고, ζ_1 과 w_1 은 각각 공작기계의 감쇠비와 고유진동수이다.

Fig. 5는 실제 절삭작업중 공구와 공작물의 착탈현상에 의하여 공작물의 n 회전 전까지의 절삭면의 형상중 최소면이 재생효과로서 작용하는 다중재생효과를 고려한 비선형 체터 루우프이다. Table 1과 같은 절삭특성을 갖는 선삭작업에서 식 (1)~(7)의 초기조건을 $u(0) = u_0$ 그리고 $x_1(0) = 0$ 으로 하여 4차 Runge-Kutta 방법으로 Table 2와 같은 절삭조건에 대하여 선삭공정을 시뮬레이션 한 결과 비선형 효과에 의하여 두가지 형태의 체터가 발생함을 보였다. Fig. 6은 Table 1과 같은 절삭특성을 갖는 선삭공정에서 절삭폭 b 가 선

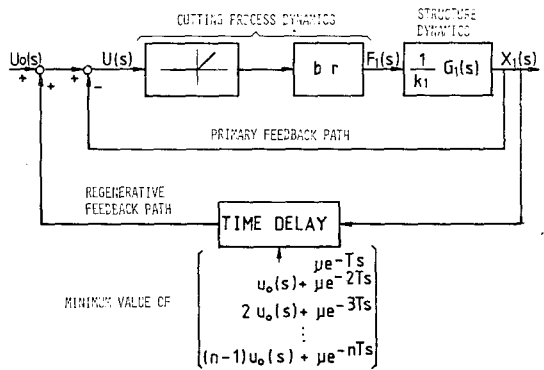


Fig. 5 Block diagram of the nonlinear chatter system

Table 1 Characteristics of a machine tool

Directional static stiffness, k_1	18000 Newton/mm
Damping ratio, ζ_1	0.05
Undamped natural frequency, w_1	1884 rad/sec (300 Hz)
Cutting stiffness per unit length, r	2000 Newton/mm ²

Table 2 Cutting conditions

	Chip width, b (mm)	Desired chip thickness, u_0 (mm)	Spindle speed, N (rpm)
Case 1	1.2	0.15	1200
Case 2	2.2	0.15	1200
Case 3	1.2	0.15	600
Case 4	1.2	0.3	1200
Case 5	1.1	0.15	1200
Case 6	1.3	0.15	1200
Case 7	2.0	0.15	1200
Case 8	2.4	0.15	1200

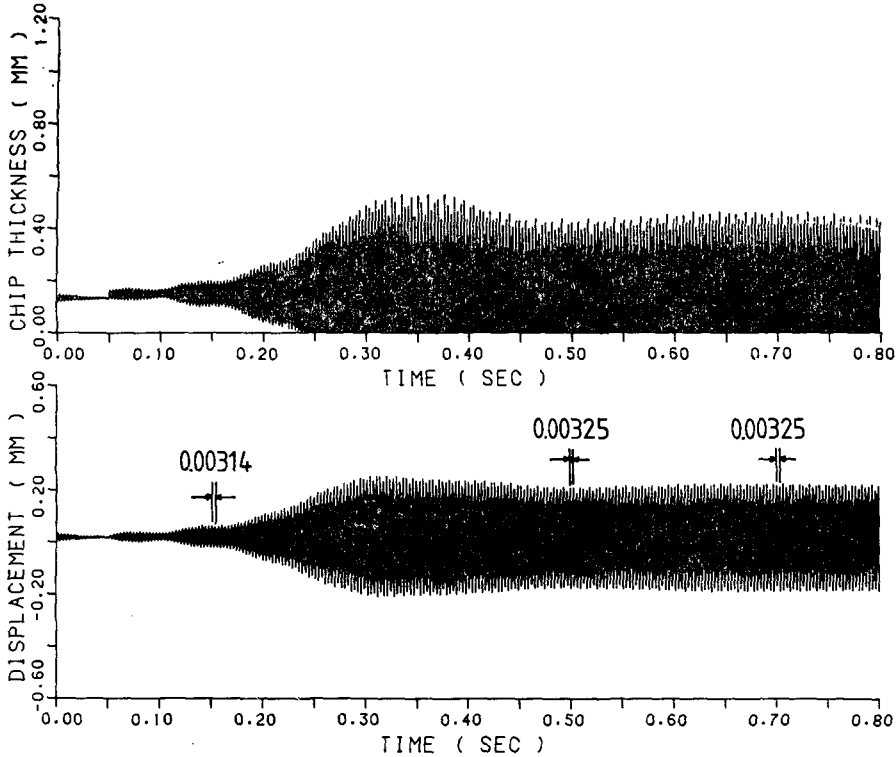


Fig. 6 Record of the instantaneous chip thickness and the machine tool vibration under cutting conditions(1)

형채터시 Merritt의 채터발생의 안정성 경계인 $0.945 \text{ mm}^{(9)}$ 를 넘는 $b=1.2 \text{ mm}$ 인 불안정한 절삭조건에서 0.8 sec 까지 0.25 msec 의 시간간격으로 절삭과정을 시뮬레이션한 결과이다. 시간이 증가함에 따라서 채터의 진폭이 증가하여 $t=0.23 \text{ sec}$ 가 될 때 공구가 공작물 표면에서 이탈하기 시작하고, 이후로부터 공구와 공작물은 접촉과 이탈을 반복하면서 채터의 진동수는 이탈 효과에 의하여 절삭과정의 절삭강도에 영향을 적게 받게 되므로 공작기계의 감쇠 고유진동수에 접근하게 되며 $t=0.3 \text{ sec}$ 까지 채터진폭은 점차 증가하였다가 약간 감소한 후 대체로 일정한 진폭과 진동수를 유지하는 한계사이클 채터(limit cycle chatter)를 일으키며, 이는 일정한 형태의 채터무늬가 공작물 표면에 새겨지는 경우가 된다. Fig. 7은 Fig. 6과 같은 절삭조건에서 생산성을 좌우하는 변수인 절삭폭의 변화에 따른 안정성을 판별하기 위하여 절삭폭만을 $b=2.2 \text{ mm}$ 로 증가시킨 경우로 $b=1.2 \text{ mm}$ 인 경우보다 0.16 sec 이전인 0.07 sec 에서 공구는 이탈을 시작하고, 칩두께와 채터진폭이 한계 사이클채터의 경우와는 달리 불규칙적으로 변화하며 또한 채터의 진동수는 공작기계의 감쇠 고유

진동수 근방에서 변화가 일어나는, 즉 공작물 표면에서 심각한 뜯어먹음 현상이 발생하는 불규칙 채터(irregular chatter)의 경우이다. 절삭두께와 스피indel 속도가 변화되는 경우 및 절삭폭이 위에서 취한 값이 아닌 Table 2의 case 3~8과 같은 경우에도 시뮬레이션을 수행한 결과 Fig. 6 및 Fig. 7과 유사한 결과를 얻었다⁽⁹⁾. 이상의 결과로부터 생산성을 좌우하는 절삭폭 b 가 증가하면, 이는 절삭강도의 증가를 의미하며⁽⁹⁾ 절삭강도가 증가하면 비선형 채터의 발생중 안정한 한계사이클 채터가 존재하지 않는 불규칙 채터가 발생함을 알 수 있고⁽¹⁰⁾ 다중재생효과와 공구의 칩탈현상을 고려한 본 시뮬레이션은 실제 선삭공정을 거의 정확하게 묘사하게 된다.

3. 임팩트댐퍼의 응용

가공상태 및 작업조건을 크게 악화시키는 공작기계의 채터발생을 피하기 위하여 절삭가공 현장에서는 절삭폭, 칩두께 및 절삭속도 등을 채터가 발생하지 않는 영역으로 낮추어 가공하고 있다. 본 선삭작업의 경우

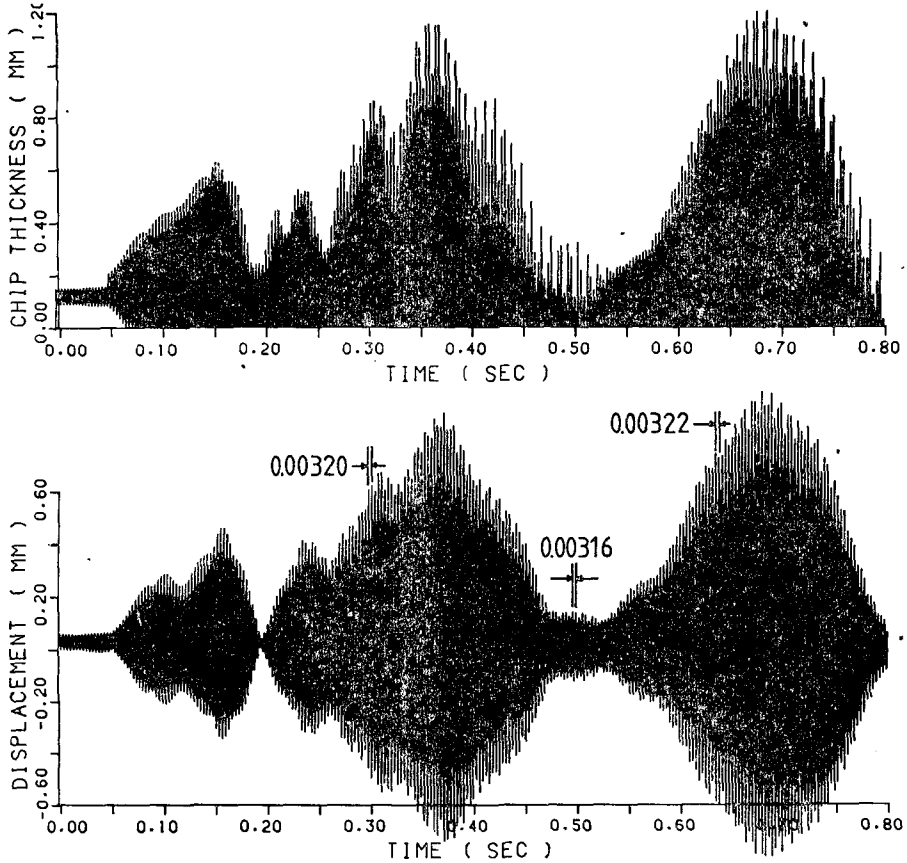


Fig. 7 Record of the instantaneous chip thickness and the machine tool vibration under cutting conditions(2)

가공하고자 하는 칩두께 $u_0=0.15$ mm, 스피들 속도 $N=1200$ rpm 으로 고정된 경우, 칠테는 절삭폭의 변화에 좌우되며 이에 따른 선삭작업에서 칠테진폭의 RMS (root mean square) 값은 초기 절삭조건에 영향을 배제하기 위하여 공작물이 절삭 시작 후 3회전 한 후인 0.15 sec로부터 0.8 sec, 16회전까지 0.25 msec의 시간간격으로 2600개의 데이터를 샘플링하여 얻은 결과 Fig. 8과 같이 안정성의 경계를 넘으면 절삭폭 b 가 1.0~2.0 mm 부근에서는 한계사이를 칠테가 발생하는 부분으로 시간지연에 의한 재생효과에 의하여 지수적으로 그의 RMS 값이 증가하게 되지만, 절삭폭 b 가 그 이상으로 커지게 되면 불규칙 칠테가 발생하게 되어 절삭력이 충분히 커지면서 절삭력과 절삭폭 사이의 관계가 선형적인 관계를 갖는 절삭공정 자체의 선형성에 의하여 대체로 선형적으로 증가된다. 이와 같은 생산성을 좌우하는 절삭폭의 증가에 따른 칠테발생을 억제하기 위하여 Fig. 9와 같은 임팩트뎀퍼를 공작기계에

응용하였다. 여기서 k_2 는 지지스프링, c_2 는 임팩트뎀퍼의 상당 감쇠계수 그리고 m_2 와 l 은 각각 충돌질량과 용기와 충돌질량 사이의 틈새를 표시한다. 절삭력 $F_1(t)$ 만이 공작기계를 가진시킨다고 가정하면 Fig. 9에서 충돌이 발생하지 않는

$$|x_1(t) - x_2(t)| < l \quad (8)$$

과 같은 경우 임팩트뎀퍼를 부착한 공작기계 계의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1(t) + (2\zeta_1 w_1 + 2\mu_m \zeta_2 w_2) \dot{x}_1 + (w_1^2 + \mu_m w_2^2) x_1 \\ - 2\mu_m \zeta_2 w_2 \dot{x}_2 - \mu_m w_2^2 x_2 = w_1^2 F_1 / k_1 \\ \ddot{x}_2(t) + 2\zeta_2 w_2 \dot{x}_2 + w_2^2 x_2 - 2\zeta_2 w_2 \dot{x}_1 - w_2^2 x_1 = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

여기서 x_1, x_2 는 각각 m_1, m_2 의 변위이고 μ_m 은 질량비 m_2/m_1 이다. 충돌은

$$|x_1(t) - x_2(t)| \geq l \quad (10)$$

인 조건에서 순간적으로 발생한다고 하면, 반발계수 e 를 갖는 경우 운동량 보존법칙으로부터 충돌 직후의 공작기계와 임팩트 질량, 즉 질량 m_1, m_2 의 속도는

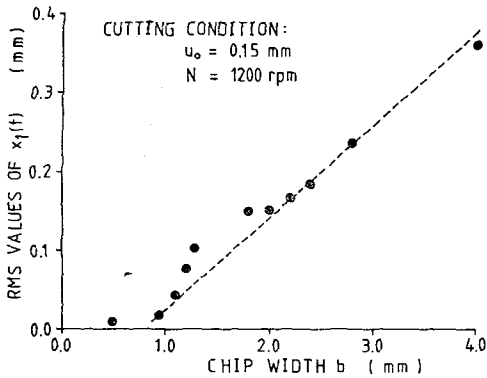


Fig. 8 RMS values of the machine tool vibration for various values of the chip width b

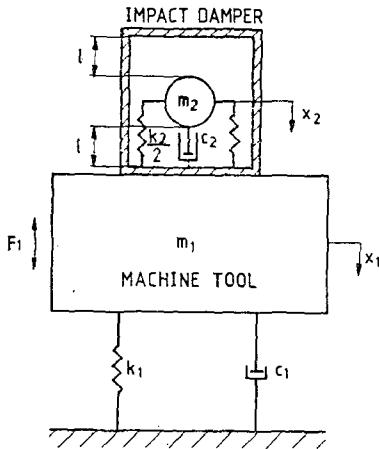


Fig. 9 Schematic diagram of a machine tool system with an impact damper

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1f} &= \frac{1-\mu_m l}{1+\mu_m} \dot{x}_{1i} + \frac{\mu_m + \mu_m l}{1+\mu_m} \dot{x}_{2i} \\ \dot{x}_{2f} &= \frac{1+l}{1+\mu_m} \dot{x}_{1i} + \frac{\mu_m - l}{1+\mu_m} \dot{x}_{2i} \end{aligned} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 하첨자 i, f 는 각각 충돌직전과 직후의 값을 표시한다.

이상의 운동방정식으로부터 Table 2의 case 2의 불규칙 채터가 발생하는 절삭조건에 대하여 임팩트댐퍼에 의한 채터 억제효과를 해석하였다.

시뮬레이션은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 식 (1)~(11)의 초기조건을 $u(0)=u_0, x_1(0)=x_2(0)=0$ 로 하여 수행하였다. 수치계산 시의 샘플링 시간은 $t_s=0.25$ msec로 하고, 충돌이 발생시에는 $t_{sc}=0.05$ msec로 하여 bisection 방법으로 3단계까지 t_{sc} 를 분할하여 충돌시의 시간을 구하고 불연속적으로 변화된 충돌 직후의 속도를 찾아 이를 이용하여 다음 샘플링 단계의

값들을 구하였다.

임팩트댐퍼의 주요 설계변수로서 알려진 틈새비 $p=1/(F_0/k_1)$, 여기서 F_0 는 절삭과정 중의 절삭력의 RMS 값, 와 질량비 μ_m 에 의한 효과와 함께 고유진동수비 w_2/w_1 와 임팩트댐퍼의 감쇠비에 의한 영향을 파악하였다. 초기 절삭조건에 영향을 배제하기 위하여 공작물이 절삭 시작후 3회전 한 후인 0.15 sec부터 0.5 sec, 10회전까지의 공작기계의 진동진폭 $x_1(t)$ 로부터 1400개의 데이터를 구하여 그 RMS 값을 구하였고 이것을 임팩트댐퍼의 채터 억제효과를 해석하는 비교기준으로 삼았다.

4. 결과 및 토의

임팩트댐퍼의 질량비 $\mu_m=0.15$ 인 경우 틈새비 p 의 변화에 따른 공작기계의 절삭과정에서 채터 진폭의 억제효과를 관찰한 결과 Fig. 7의 불규칙 채터가 발생하는 절삭조건에 대하여 Fig. 10과 같은 결과를 얻었으며 다른 질량비를 갖는 경우에도 유사한 채터억제 효과를 관찰할 수 있었다⁽⁹⁾. 채터진폭 $x_1(t)$ 는 질량비가 일정한 경우 틈새비의 변화에 따라 임팩트댐퍼를 부착하지 않았을 때의 경우와 비교하여 크게 억제됨을 알 수 있으며, 임팩트댐퍼의 각 설계변수들이 채터억제에 미치는 효과를 알아보기 위하여 틈새비의 변화에 따른 채터진폭 $x_1(t)$ 의 RMS 값과 임팩트댐퍼를 부착하지 않았을 때 $x_1(t)$ 의 RMS 값의 비를 구한 결과 Fig. 11~13과 같이 나타났다.

Fig. 11은 총돌질량이 진동억제에 미치는 효과를 보여준다. 각 질량비에서 틈새비 0.05 부근까지는 총돌에 의해 RMS 값의 비가 불규칙적으로 증감하였다가 틈새비 0.05를 넘어서면 RMS 값의 비는 틈새비 0.09까지 감소하다가 다시 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 각 질량비에서 $x_1(t)$ 의 RMS 값의 비를 최소로 하는 최적 틈새비가 존재한다는 것을 나타내며 질량비의 변화에 따라서도 RMS 값의 비는 감소하였다가 증가하게 되므로 최적 질량비가 존재함을 알 수 있다. 결과 중의 질량비 $\mu_m=0.05$ 일 때 틈새비 0.09에서 불규칙적으로 RMS 값의 비가 증가한 것은 질량비와 틈새비 선택의 중요성을 의미하며 이 때의 총돌은 절삭력 $F_1(t)$ 와 함께 공작기계를 가진시키는 항으로 작용한 것으로 추측된다. Fig. 11의 결과 다중재현효과가 존재하는 절삭과정에서 RMS 값의 비를 최소로 하는 최적 질량비는 $\mu_m=0.10$ 이고 최적 틈새비는 $p=0.09$ 부근에서 존재하게 된다. 이 때 RMS 값의 비는 0.22가 되

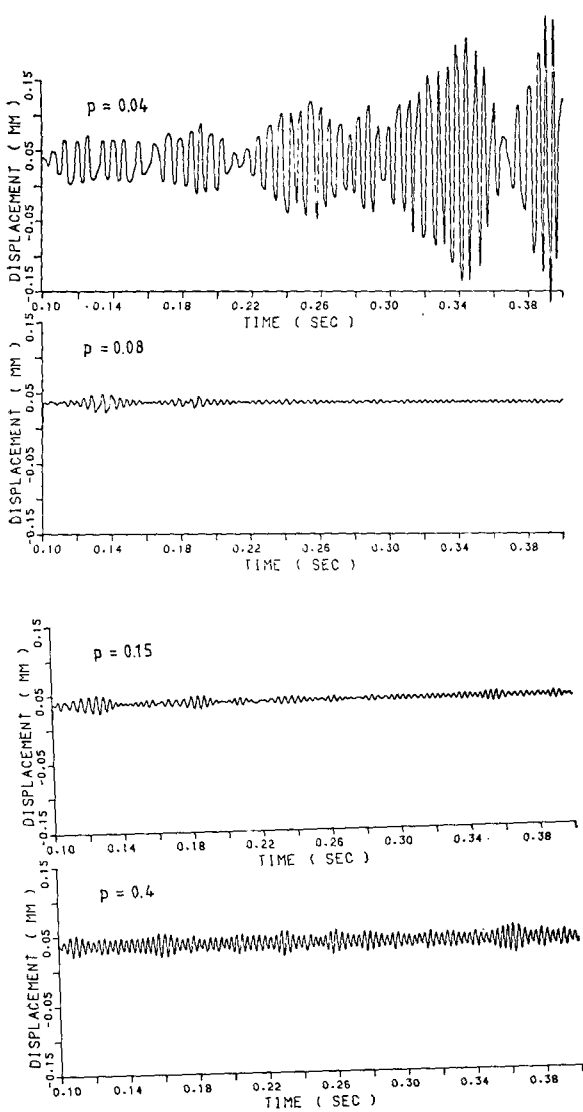


Fig. 10 Record of the machine tool vibration for various values of the gap ratio p under cutting conditions(2) where $w_2/w_1=0.1$, $\zeta_2/\zeta_1=1.0$, $e=0.6$, $\mu_m=0.15$

어 약 5배의 진동 억제효과를 보인다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 질량비 0.15와 0.05에서 임팩트램퍼의 감쇠효과에 관한 영향과 고유진동수비에 대한 영향을 틸새비의 변화에 따라 보인 것이다. 고유진동수비와 감쇠비의 영향에 따른 RMS값의 비의 변화량은 틸새비나 질량비가 RMS값의 비에 미치는 영향과 비교하여 약 10% 이내의 범위에 있는 것으로 보아 임팩트램퍼의 성능에는 크게 영향을 끼치지 않음

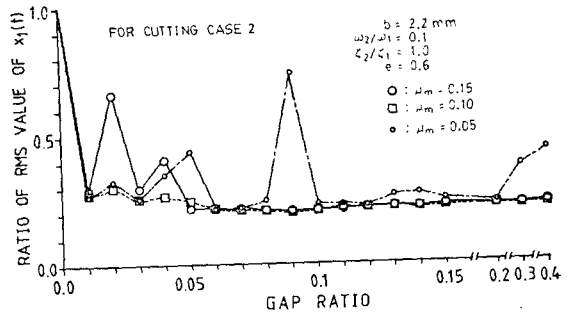


Fig. 11 Ratios of RMS value of machine tool vibration according to the mass and gap ratio

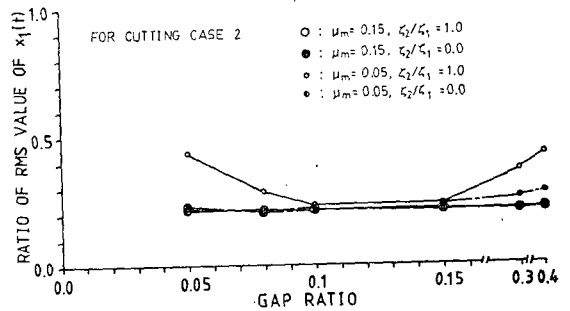


Fig. 12 Ratios of RMS value of machine tool vibration according to the damping effect and gap ratio

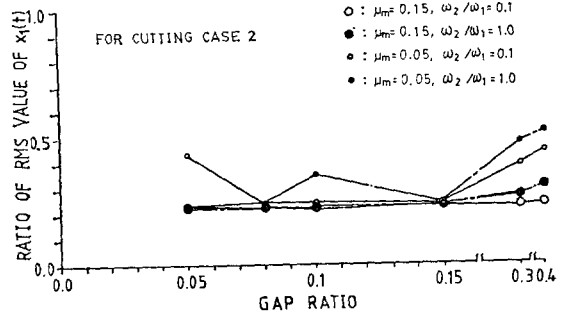


Fig. 13 Ratios of RMS value of machine tool vibration according to the damper stiffness and gap ratio

을 알 수 있다. 이로부터 임팩트램퍼 성능은 주 관심 범위에서 틸새비와 질량비에 의해 크게 좌우되며 고유진동수비와 감쇠비의 영향은 크지 않음을 알 수 있으며 임팩트램퍼의 틸새비는 0.06~0.15에서 RMS값의 비가 5% 이내의 변화를 보이므로 제작능력에 따라 위의 범위에서 선택할 수 있다.

Fig. 14는 생산성의 관점에서 임팩트의 설계변수의

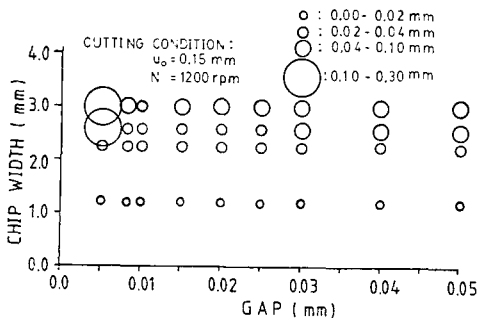


Fig. 14 Effect of gap on the cutting performance of a machine tool system with an impact damper

영향을 파악하기 위하여 질량비 $\mu_m = 0.15$ 에서 임팩트 댐퍼 틸새의 변화에 따라 절삭시의 안정성을 좌우하는 절삭폭을 증가시켜 가면서 chatter진폭의 RMS 값을 구한 결과이다. 일정한 진동진폭으로 chatter를 억제하는 경우 임팩트댐퍼의 틸새가 0.01 mm 부근일 때 최대의 절삭폭으로 가공할 수 있음을 볼 수 있다.

본 논문은 임팩트댐퍼가 특정한 가진 주파수, 즉 스피들 속도 1200 rpm, 에서 효과를 발휘하는 경우에 대한 그의 제어효과에 대한 해석이지만 이 경우 그 설계 변수들의 제어효과에 대한 것을 해석하여 그 타당성을 증명하고 제어방법을 제시한 것으로 모든 주파수 영역에서 최적의 댐퍼를 설계하기 위하여는 절삭조건에 따라서 제시한 설계 방법을 응용하면 될 것이다.

5. 결 론

선삭공정에서 공구의 착탈현상에 의하여 발생되는 비선형 절삭시의 chatter현상을 규명하였고, 수동제어기의 일종인 임팩트댐퍼를 사용하여 절삭성능의 개선을 이룩하였으며 댐퍼의 설계변수에 따라서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) chatter진폭이 충분히 증가한 후에 발생하는 공구 착탈현상에 의해 chatter진폭과 진동수가 일정하게 유지되는 한계사이를 chatter와 진폭 및 진동수가 불규칙적으로 변하는 불규칙 chatter의 두가지 비선형chatter 현상이 발생한다.

(2) 임팩트댐퍼의 chatter 억제효과는 주로 틸새비와 질량비의 영향을 받으며 고유진동수비와 댐퍼내의 감쇠비의 영향은 크지 않음을 알았다.

(3) chatter진폭의 RMS 값을 비교하여 임팩트댐퍼의 최적 질량비와 최적 틸새비는 각각 0.10 과 0.09 부근에서 존재하며 댐퍼를 부착하지 않은 경우와 비교하여

약 5배의 진동억제 효과를 관찰하였다.

(4) 절삭과정 중에 chatter진폭을 일정한 수준으로 억제하며 생산성을 최대로 할 수 있는 임팩트댐퍼의 최적 설계방법을 제시하였다.

후 기

본 연구는 1985년도 문교부의 학술연구조성비로 이루어졌으며 이에 감사하는 바입니다.

참 고 문 헌

- (1) H.E. Merritt, Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter, Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 87, pp.447~454, Nov. 1965
- (2) J. Tlustý and F. Ismail, Basic Non-linearity in Machining Chatter, Annals of C.I.R.P., Vol. 30, pp.299~304, Jan. 1981
- (3) M.M. Sadek and B. Mills, The Application of Impact Damper to the Control of Machine Tool Chatter, 7 th MTDR Conference, pp.243~257, 1966
- (4) J.A. Bonesho and J.G. Bollinger, Theory and Design of a Self-Optimizing Damper, 7 th MTDR Conference, pp.229~241, 1966
- (5) M.D. Thomas, W.A. Knight and M.M. Sadek, The Impact Damper as a Method of Improving Cantilever Boring Bars, Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 97, pp.859~865, Aug. 1975
- (6) K. Iwata, T. Moriwaki and S. Ueno, Analysis of Dynamic Characteristics of Boring Bar with Impact Damper, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe Univ. Vol. 27, pp.85~94, 1981
- (7) 김옥현, A Study of Self-Excited Vibration and Effectiveness of an Impact Damper in Grinding Process, Ph. D thesis of KAIST, 1983
- (8) F. Koenigsberger and J. Tlustý, Machine Tool Structures, Pergamon Press, 1970
- (9) 정성중, 임팩트 댐퍼를 사용한 공작기계 동특성개선을 위한 최적수동제어기의 설계, 문교부 학술진흥재단 연구보고서, 1985
- (10) 김옥현·김성청·임영호, 접촉이탈 현상에 의한 비선형 연삭 chatter의 해석이론, 대한기계학회논문집 제 9권, 제 6 호, pp.706~713, 1985