

<論 文>

DDS 방식에 의한 공작기계 절삭 특성 규명

변 승 완* · 이 종 원**

(1981년 4월 24일 접수)

Machine Tool Identification Under Actual Cutting Process by DDS Analysis

Seung Wan Byun and Chong Won Lee

Abstract

Machine tool dynamics is investigated under actual working conditions. Experimental evaluation of cutting dynamics in a lathe is made with cutting conditions and cutting positions varied. The thrust force and the toolpost and tailstock accelerations during turning process are modelled and analyzed by employing Dynamic Data System methodology.

It is found that two acceleration signals are good enough to replace the thrust force, when used for machine tool identification under cutting process and for chatter detection.

1. 서 론

공작기계 시스템의 규명(identification)은 절삭 과정과 공작기계의 구조로 분리하여

(1) 공작기계 구조의 규명

(2) 절삭 과정에 대한 모형의 설정

(3) (1), (2)로부터의 결과를 조합시킨 전체 시스템 모형의 확정

의 세단계를 통해 시도되어 왔다⁽¹⁾. 공작기계 구조의 규명을 위한 실험적 방법으로는 주파수 응답시험이 주종을 이루어 왔으나 실제의 절삭상태를 반영하지 못한다는 단점이 있었다^(2,3). 절삭 과정은 해석적인 방법을 동역학적인 모형으로 가정하고 동절삭 계수를 실험적인 방법으로 구하게 되는데 역시 많은 제한과 난점이 있다^(4,5). 또한 공작기계 시스템을 구조와 절삭 과정으로 나누어 분석하는 것은 그 상호작용이 전체 시스템에 미치는 동특성의 변화를 고려하지 못하

기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에 DDS (Dynamic Data System; Data Dependent System) 방법⁽⁴⁾이 공작 기계 분야에도 도입, 응용되고 있다. 이 방법은 실제 절삭 작업중 공작 기계로부터의 검출 신호를 분석하여 통계학적으로 의미가 있는 계수를 구한 후 이로부터 시스템의 동특성을 규명하는데 성공적으로 이용되고 있다^(1,2,6,7,8,9).

본 논문에서는 이 DDS 방식을 채택하여 절삭 가공시의 공작 기계계의 동특성을 수학적으로 모형화하고 그로부터 물리적인 특성을 유도·분석하였다. 관측 자료로는 배분력, 공구대와 십압대의 배분력 방향 가속도를 측정·사용했고 선삭 가공중의 선반의 동특성을 규명하기 위한 자료로서의 적합성 및 상호 관계를 검토하였다. 또한 이송속도, 절삭깊이, 절삭속도 및 절삭 위치의 변화에 따른 계의 동특성 변화 및 chatter 현상을 관찰했다.

절삭 작업중에 자주 발생하는 chatter 현상은 공작물과 공구 사이의 과도한 상대진동인 자려 진동으로 가공정밀도의 저하, 소음, 공구 마멸 등을 초래한다. 이러한 chatter 현상을 포함한 절삭에 의한 계의 진동을

* 정희원, 삼성중공업

**정희원, 한국과학기술원 기계공학과

구명하고 제어하려는 목적으로 공구 선단과 가공물의 상대운동을 측정하기도 하나 측정 및 장치상의 어려움과 실용면에서의 난점으로 효과적인 성과를 기대할 수 없다. 공구동력계를 이용한 절삭력의 측정도 행해지지만 진동계의 진동 모드(mode)는 모든계 요소에 전달된다는 가정하에 가속도계를 이용하여 심압대 및 공구대의 가속도를 측정하여 간접적으로 전체계의 안정성 및 절삭 특성을 분석·대조했다.

2. DDS 방법론

DDS는 시계열(time series) 또는 순서가 중요시되는 자료로부터 물리적으로 의미를 갖는 Stochastic 미분 또는 차등 방정식을 이끌어 내는 새로운 모형화 기법이다⁽¹⁰⁾. 어떤 계로부터 관측되는 자료는 그 계의 특성을 반영하고 있다는 전제하에 동적자료(dynamic data)라고 불리우는 시계열 자료를 통계학적으로 분석하여 계의 구조적·동적 특성을 찾아낼 수 있다. 관측된 자료는 대개 불규칙하므로 통계학적인 의미에서 가장 적합한 모형을 결정하는 방법이 사용된다⁽⁴⁾.

2.1. 이론적 배경⁽¹⁰⁾

계의 단일 동적 변수 $X(t)$ 가 Stochastic 선형 미분 방정식의 형태로 표시될 때 일반적인 연속적 자동회귀-이동평균(Continuous Autoregressive Moving Average) 모형, $AM(n, m)$ 은 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$(D^n + \alpha_{n-1}D^{n-1} + \dots + \alpha_1D + \alpha_0)X(t) = (b_nD^n + b_{n-1}D^{n-1} + \dots + b_1D + 1)Z(t) \quad (1)$$

$$E[Z(t)] = 0, \quad E[Z(t)Z(t-u)] = \delta(u)\sigma_z^2$$

여기서

n, m : 모형의 차수, $m \leq n-1$

$Z(t)$: 백색잡음

E : 기대값연산자

$\delta(u)$: Dirac delta 함수

σ_z^2 : $Z(t)$ 의 분산

α_i, b_i : 자동 회귀 및 이동 평균 계수

관측되는 연속적 불규칙 변수 $X(t)$ 를 일정한 시간 간격으로 샘플링(sampling)하면 USAM(n, m)모형(Uniformly Sampled Autoregressive Moving Average Model)이 되는데 이 때의 차등 방정식은

$$X_i - \phi_1 X_{i-1} - \phi_2 X_{i-2} - \dots - \phi_n X_{i-n} = a_i - \theta_1 a_{i-1} - \theta_2 a_{i-2} - \dots - \theta_n a_{i-n} \quad (2)$$

$$E[a_i] = 0, \quad E[a_i a_{i-k}] = \delta_k \sigma_a^2$$

이 식에서

ϕ_i, θ_i : 자동회귀 및 이동 평균 계수

X_i : 시간 t 에 관측된 자료

a_i : 이산적(discrete)백색 잡음

σ_a^2 : a_i 의 분산

δ_k : Kronecker delta

USAM(n, m) 모형은 ARMA(n, m) 모형⁽¹¹⁾과 형태상 유사하나 후자에서는 자동 회귀와 이동 평균 계수가 서로 독립인데 비해서 전자에는 일정한 함수적인 관계가 있다^(4, 9, 12). 이 때 (1)식의 $AM(n, m)$ 과 (2)식의 USAM(n, m)모형의 자동 회귀차수 n 은 동일하게 결정되는 반면 이동 평균 차수 m 은 일반적으로 다르게 결정될 수 있다.

2.2. 모형화 과정

관측된 이산적 자료를 이용하여 (2)식의 USAM(n, m) 모형의 차수 n, m 을 작은 값으로부터 추정하여 비선형 최소 오차 자승법으로 잔류 a_i^2 의 합이 최소가 되도록 ϕ_i (따라서 θ_i 도) 값을 정하며, 가장 적합한 최종 모형의 결정은 95%의 신뢰성을 갖는 잔류 a_i 의 상호 독립성을 a_i 의 자동 상관 관계를 통해 확인될 때까지 차수를 증가시킴으로서 행해졌다. 확정된 USAM(n, m) 모형으로부터 등가 $AM(n, m)$ 모형의 계수 α_i 와 b_i 를 계산하고 α_i 로 이루어지는 특성식으로부터 등가진동계의 고유 진동수와 감쇠 계수를 얻었다⁽²⁾. 또한 $X(t)$ 의 PSD(Power Spectral Density)는 ϕ_i 와 θ_i 로 직접 표시(부록참조)가 가능한데⁽¹⁰⁾, 이 때 구해진 PSD는 통계학적으로 안정된 부드러운 곡선으로 나타난다.

2.3. 공작 기계 진동 방정식

Chatter를 포함한 절삭시의 공작 기계의 진동 현상은 자려 진동의 일종으로 진동원의 양상이 명확히 규정되어 있지 않다. 절삭 작업중 공구에 가해지는 절삭력에 의해 구조물 자체의 진동을 유발하고 다시 그 구조적 진동이 절삭력에 영향을 미치게 되는데 이 현상을 간단한 2차 미분 방정식의 형태로 표시하면⁽⁹⁾

$$m \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + c \frac{dX(t)}{dt} + kX(t) = \alpha \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + \beta \frac{dX(t)}{dt} + \gamma X(t) + \tilde{Z}(t) \quad (3)$$

이 된다.

여기에서 $X(t)$ 는 계의 진동 변수이고 m, c, k 는 계의 특성 계수로서 이미 알려져 있거나 실험적으로 비절삭과정중 얻어지는 상수이며 α, β, γ 는 절삭과정중 계에 가해지는 교란에 대한 미지계수이다. 이 α, β, γ 는 공작

물의 불균질, 공구팁의 마멸등 절삭 과정중의 가변 계수들이다. $\tilde{Z}(t)$ 는 백색 잡음으로서 공구가 공작물의 불규칙하게 배열된 강한 입자에 부딪치는 것과 같은 교란에 의해 발생하는 불규칙한 충격을 나타낸다. (3)식은 다시 짧은 시간 동안을 고려할 때

$$(m-\alpha)\frac{d^2X(t)}{dt^2}+(c-\beta)\frac{dX(t)}{dt}+(k-\gamma)X(t)=\tilde{Z}(t) \quad (4a)$$

또는

$$\frac{d^2X(t)}{dt^2}+2\zeta\omega_n\frac{dX(t)}{dt}+\omega_n^2X(t)=\frac{\tilde{Z}(t)}{m-\alpha}=Z(t) \quad (4b)$$

로 쓸 수 있는데 실제 등가 감쇠 계수 ζ 및 고유 진동수 ω_n 은 시간에 따라 변하며 만약 β 값이 커지게 되어 ζ 값이 작게 되거나 음수가 되면 계가 불안정하게 되고 chatter가 발생한다. 일반화한 공작 기계의 진동 방정식은,

$$\frac{d^n X}{dt^n} + \alpha_{n-1} \frac{d^{n-1} X}{dt^{n-1}} + \dots + \alpha_1 \frac{dX}{dt} + \alpha_0 X = b_n \frac{d^n Z}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} Z}{dt^{n-1}} + \dots + b_1 \frac{dZ}{dt} + Z \quad (5)$$

로 표시할 수 있는데 짧은 시간동안의 해석을 가정하면 (5)식은 상계수 미분 방정식으로 취급할 수 있으며 이 때 계의 진동 방정식은 식(1)로 표시되는 AM(n, m) 모형과 일치한다. 따라서 절삭 과정중 관측된 이

산적 자료로부터 (2)식을 적용하여 USAM 모형을 얻은 후 (1) 또는 (5)식의 AM 모형으로 치환하면 공작 기계계의 특성 계수들을 구할 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 실험에 사용한 선반은 Ledge & Shipley의 고속 정밀 선반(10 KW, DC 구동)이고, 황삭용 드로우 어웨이 공구(대한중석, PIOS)와 절삭 날각 45°의 공구 지지대(대한중석, MSDNN 2020)를 장치했다. 공작물은 직경 40 mm, 길이 710 mm의 비교적 가늘고 긴 S45C 봉으로 절삭 실험시의 유효 길이가 680 mm가 되도록 설치했다.

절삭의 형태는 선삭 표면가공으로 했고 절삭 조건은 chatter가 발생하지 않는 임의의 정상 가공 상태를 기

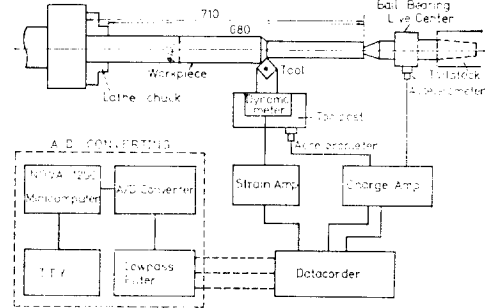
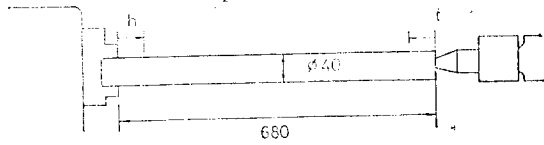


Fig. 1 Experimental setup.

Table 1 Cutting condition.

Variable	EXP#	Spindle speed rpm	Feed in/rev	Depth of cut mm	Cutting velocity m/sec	Cutting position mm
Feed	1	300	.0080	1.0	.100	중 앙
	2-2	300	.0120	1.0	.095	"
	3	300	.0163	1.0	.090	"
Spindle speed	4	200	.0120	1.0	.067	"
	2-2	300	.0120	1.0	.095	"
	5	400	.0120	1.0	.127	"
Depth of cut	6	300	.0120	0.5	.093	"
	2-2	300	.0120	1.0	.095	"
	7	300	.0120	1.5	.100	"
Cutting position	2-1	300	.0120	1.0	.095	t=50
	2-3	300	.0120	1.0	.095	h=50



준으로 이송 속도, 절삭 속도 그리고 절삭 깊이를 각 조건의 변화에 따른 영향을 관찰하기 위해 Table 1에 보인 바와 같이 각각 3 단계로 나누었다. 이 때 절삭 위치는 공작물의 중앙부에 한정했으나 기준 절삭 조건 하에서는 절삭 위치의 변화에 의한 영향을 분석하기 위해 심압대 쪽에서 50 mm, 주축대 쪽에서 50 mm, 떨어진 곳에서도 절삭 실험을 행하였다.

검출 신호로서는 절삭 배분력과 심압대 및 공구대의 배분력 방향 진동 가속도를 측정했다. 배분력 측정은 공구 동력계(Kyowa TD형, 최대측정 배분력 200 kg)와 Strain 증폭기(Kyowa DPM-6 E형)를 이용했다. 심압대 및 공구대의 가속도 측정용 가속도계로는 IMV VP 4200(최대 주파수 2 K Hz, 1000 G)와 ENDEVCO 213 E(최대 주파수 1 K Hz, 1000 G)를 병용했고 증폭용 charge amplifier(IMV VM 4115형, 5-10000 Hz)에 연결했다.

검출된 신호는 Datacorder(SONY casset type Model FRC-1402 N, 4 channel, cut-off freq. 800 Hz)에 기록되었고 datacorder에서 재생된 신호는 실험실 mini-computer(NOVA 1200 SOS System)의 A/D 변환기(date1 ADC-MA 12 2A 12 bit, ± 5 V max)를 거쳐 샘플링 주파수 2 K Hz로 샘플되었다. 재생시의 잡음을 제거하기 위해 샘플링시 키트 오프 진동수 1 K Hz인 7차 Bessel 필터를 제작·사용했으며 샘플링 분해능을 향상시키기 위해 summing 및 증폭회로를 구성하여 검출신호의 직류 성분을 제거하고 교류 성분만을 증폭시켰다.

절삭 실험은 각 절삭 조건에서 1회 시행되었으며 각 표본자료(sample data record)는 모두 800개의 자료(digitized data)로 구성했다. Fig. 2와 3에 실험장치 및 절삭 실험 상황을 보이고 Datacorder에서 재생된 신호의 전형적인 예를 Fig. 4에 보였다.

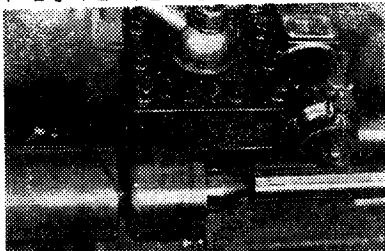


Fig. 2 Tool dynamometer and accelerometer set-up.

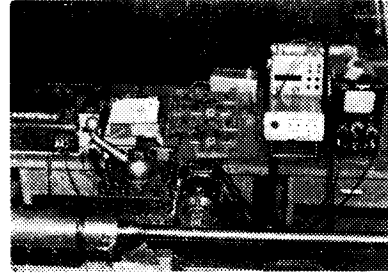


Fig. 3 Cutting experiments.

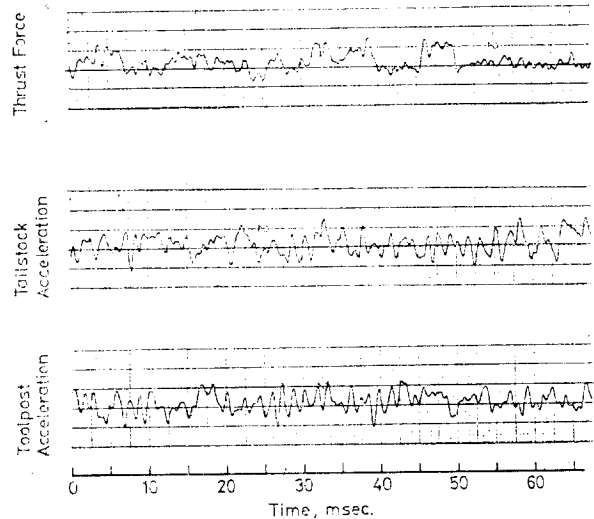


Fig. 4 Typical example of signals.

(Exp#2-2; feed=.012"/rev, depth of cut=1.0mm. Spindle speed=300 rpm)

절삭 실험에 임하기 전 각 부분의 특성을 알기 위해 충격 반응시험(impulse response test)을 행하여 각 주요 요소의 기본 고유 진동수를 측정했는데⁽³⁾ 보울 베어링 라이브 센터(ball bearing live center)부와 심압대의 경우 각각 ~ 200 Hz, ~ 360 Hz 정도였고 공작물은 ~ 180 Hz였는데 이는 고정-힌지보로 취급했을 때의 이론치와 근사하다. 또한 공구 동력계-공구대부의 기본 고유 진동수는 ~ 300 Hz였고 공구대 자체는 ~ 500 Hz 정도였다. 충격 반응 시험에서 사용된 가속도 계로부터의 응답 신호는 Transient Storage Unit(Physical Data Inc., Model 512 A)에 저장시킨 후 visicoder로 재생시켰다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 모형의 결정 및 적합성

각 검출 신호에 대한 USAM(n, m) 모형의 결정은 잔류 a_1, a_{t-1}, \dots 의 표준자동 상관 함수의 값이 지연 시간

이 크지 않을 때 95%의 신뢰도를 갖는 독립성의 기준인 $\pm \frac{2}{\sqrt{N}}$ (N 은 자료의 수) 이내가 되도록 시행 오차 방법으로 모형 차수를 점진적으로 증가시킴으로서 수행되었다. EXP. #7에 대한 최종 a_i 의 표준 자동 상관 함수를 Fig. 5에 보였다.

결정된 USAM(n, m)모형으로부터 자동 회귀 및 이동 평균 계수가 계산되면⁽³⁾ 이로부터 등가 AM(n, m)모형을 얻고 Table 2, 3, 4에 보인 각 모우드의 고유진동수와 감쇠 계수를 계산하였다. 또한 통계학적 추정의 전지에서 최적인 PSD를 구했다⁽³⁾. 기준 정상 가공 상태에서 절삭 위치의 변화에 따른 PSD의 변화를 Fig. 6, 7, 8에 보였다. 또한 정상 가공 상태를 기준으로 주축 회전 속도와 절삭 깊이를 증가시켰을 때 mild chatter가 관측되었는데 이 때의 PSD 선도를 Fig. 9와 10에 각각 보였다. 기준 정상 가공 상태는 주축 회전 속도 300 rpm, 이송속도 0.012 in/rev., 절삭 깊이 1 mm인 중앙부 절삭 상태로 정했다. USAM(n, m)모형으로부터 AM(n, m) 모형을 유도하는 과정은 부록에 요약했다.

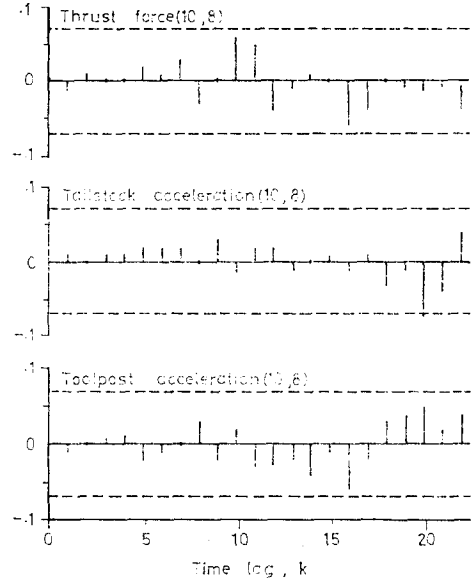


Fig. 5 Sample autocorrelation between residual at's(Exp#7 s;300rpm f_i . 012"/rev d ;1.5 mm)

Table 2 Thrust force characteristics.

EXP#	USAM(m,n)	Mode(natural frequency, damping ratio)				
		1	2	3	4	5
1	(8, 7)	187Hz, 0.176	487Hz, 0.043	751Hz, 0.058		
2-2	(8, 7)	173Hz, 0.040	446Hz, 0.134	698Hz, 0.267		
3	(10, 8)	232Hz, 0.165	505Hz, 0.244	552Hz, 0.062	924Hz, 0.045	
4	(8, 7)	264Hz, 0.059	445Hz, 0.070	797Hz, 0.026		
5*	(10, 8)	189Hz, 0.009	412Hz, 0.366	490Hz, 0.024	741Hz, 0.014	
6	(8, 7)	405Hz, 0.193	640Hz, 0.027	982Hz, 0.043		
7*	(10, 8)	181Hz, 0.003	362Hz, 0.002	514Hz, 0.247	745Hz, 0.027	
2-1	(8, 7)	180Hz, 0.394	524Hz, 0.070	837Hz, 0.063		
2-3	(9, 8)	214Hz, 0.760	443Hz, 0.130	886Hz, 0.075		

* Mild Chatter observed.

Table 3 Tail stock acceleration characteristics.

EXP#	USAM(m,n)	Mode(natural frequency, damping ratio)				
		1	2	3	4	5
1	(8, 7)	200Hz, 0.092	377Hz, 0.141	679Hz, 0.175	801Hz, 0.096	
2-2	(10, 8)	203Hz, 0.114	356Hz, 0.199	604Hz, 0.024	820Hz, 0.050	
3	(10, 7)	183Hz, 0.170	297Hz, 0.188	466Hz, 0.048	735Hz, 0.196	806Hz, 0.014
4	(8, 7)	191Hz, 0.041	351Hz, 0.157	624Hz, 0.045	814Hz, 0.037	
5*	(10, 9)	184Hz, 0.002	366Hz, 0.026	550Hz, 0.131	760Hz, 0.089	832Hz, 0.012
6	(10, 8)	216Hz, 0.122	375Hz, 0.150	606Hz, 0.032	797Hz, 0.041	

7*	(10, 8)	185Hz, 0.006	387Hz, 0.102	526Hz, 0.079	708Hz, 0.099	838Hz, 0.113
2-1	(8, 7)	185Hz, 0.297	358Hz, 0.188	666Hz, 0.057		
2-3	(10, 7)	182Hz, 0.170	297Hz, 0.188	466Hz, 0.048	735Hz, 0.196	806Hz, 0.014

* Mild Chatter observed.

Table 4 Tool post acceleration characteristics.

EXP#	USAM(m,n)	Mode(natural frequency, damping ratio)				
		1	2	3	4	5
1	(8, 7)	273Hz, 0.233	464Hz, 0.068	772Hz, 0.036		
2-2	(8, 7)	324Hz, 0.112	460Hz, 0.052	781Hz, 0.071		
3	(9, 8)	205Hz, 0.216	416Hz, 0.108	623Hz, 0.085	836Hz, 0.046	
4	(8, 7)	192Hz, 0.052	431Hz, 0.018	460Hz, 0.722	753Hz, 0.197	
5*	(8, 7)	185Hz, 0.003	438Hz, 0.297	566Hz, 0.006	734Hz, 0.053	
6	(10, 9)	191Hz, 0.130	471Hz, 0.036	545Hz, 0.014	581Hz, 0.672	883Hz, 0.163
7*	(10, 8)	182Hz, 0.022	295Hz, 0.090	362Hz, 0.034	709Hz, 0.006	857Hz, 0.061
2-1	(8, 7)	263Hz, 0.375	484Hz, 0.049	791Hz, 0.057		
2-3	(10, 7)	286Hz, 0.108	451Hz, 0.066	527Hz, 0.233	765Hz, 0.051	

* Mild Chatter observed.

4.2. 선반주요 부분의 고유 진동수

Fig. 6, 7, 8의 배분력과 공구대 가속도의 PSD를 보면 절삭 위치의 변화에 관계없이 항상 450-500 Hz 부근에서 peak를 관찰할 수 있는데 이는 공구대의 공진에 의한 것이다. 심압대에서 검출된 신호도 200 Hz와 360 Hz 부근에서 항상 peak를 보이고 있는데 이는 보울 베어링 라이브 센터부와 심압대의 고유 진동수와

근사하다.

절삭 조건이 심해짐에 따라 모든 검출 신호에 나타나는 Fig. 9, 10에서의 180 Hz 부근의 peak는 공작물에 의한 공진을 나타낸다. 각 요소들의 기본 고유 진동수는 Table 2, 3, 4에 보인 바와 같이 절삭조건이 변함에 따라 변하는 것을 관찰할 수 있는데 이는 비절삭 가공중에 행한 충격 반응 시험으로는 알 수 없었던 절삭 가공중 각 요소의 동특성 변화를 보여준다.

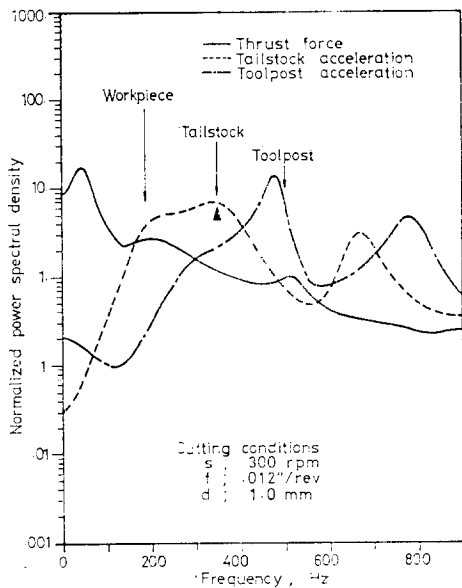


Fig. 6 PSD plot of experiment #2-1.

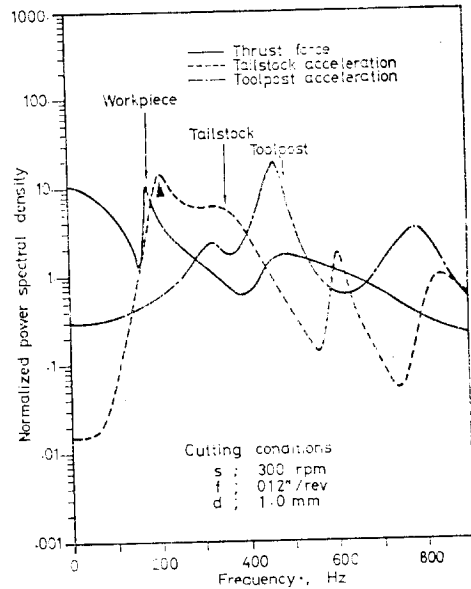


Fig. 7 PSD plot of experiment #2-2.

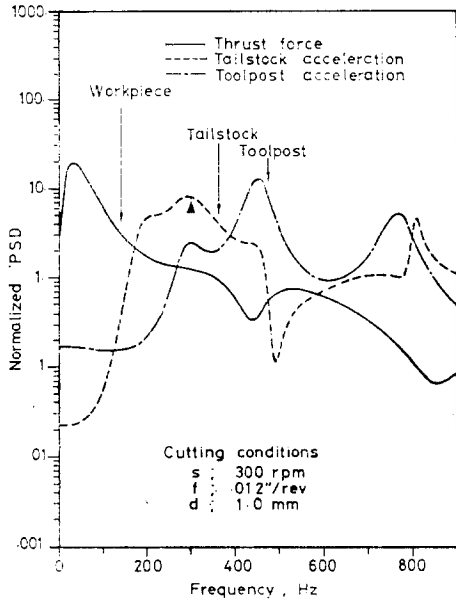


Fig. 8 PSD plot of experiment #2-3.

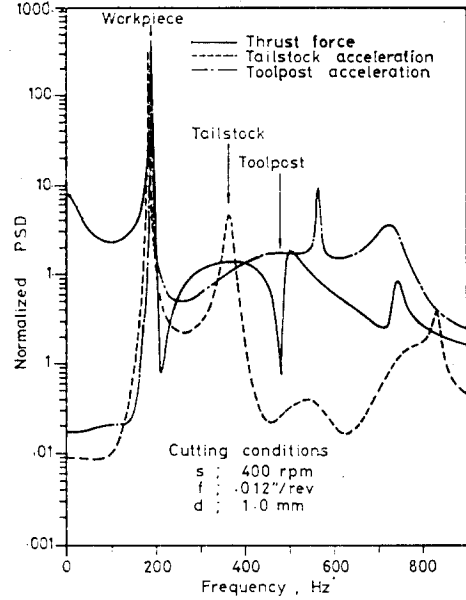


Fig. 9 PSD plot of experiment #5.

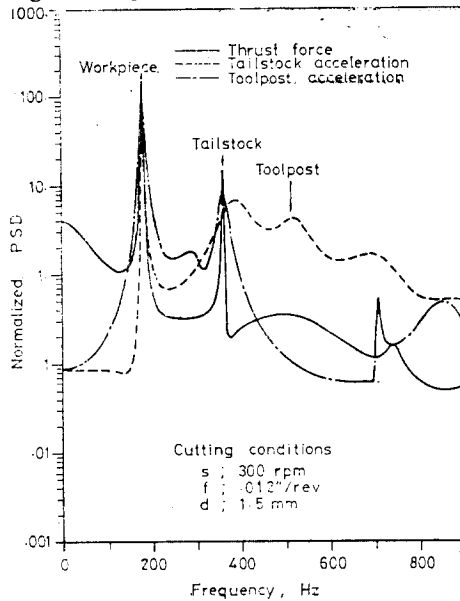


Fig. 10 PSD plot of experiment #7.

4.3. 이송 속도의 변화에 의한 영향

이송 속도의 변화에 의한 PSD의 변화는 뚜렷하지 않으나 배분력 PSD의 고주파 영역(~ 500 Hz 이상)에서 이송 속도 증가에 따른 완곡(smoothing) 현상이 관찰되는데 이는 계의 고진동 모드들의 감쇠가 증가하여 계의 안정도에 다소 기여함을 의미한다. 계의 전반적인 안정성은 기본 진동 모드들에 의해 결정되는데 Ta-

ble 5에 표시한 공구와 공작물의 상대 변위 즉 가공 정밀도와 직접 관계가 있는 배분력의 강성 및 감쇠 계수의 증가는 이송 속도의 증가가 흔히 절삭 작업을 안정하게 한다는 사실을 확인해 준다⁽⁷⁾.

4.4. 절삭 깊이와 절삭 속도의 변화에 의한 영향

절삭 깊이와 주축 회전 속도의 증가에 따른 계의 동적 특성의 변화는 Table 2의 배분력의 경우 현저한 감쇠 계수의 감소를 초래하나 Table 2와 3에 보인 심압대 및 공구대 가속도의 경우는 확실적인 변화를 관찰하기 어렵다. EXP. #5와 #7의 경우 mild chatter가 일어났는데 이 때 Fig. 9와 10의 모든 검출 신호에서 공구 공작물의 고유 진동수인 180 Hz 부근에서 감쇠 계수가 거의 영인 공진 상태를 보이고 있다. Chatter 발생시 공구대의 가속도 신호가 PSD의 형상이나 크기에 있어서 배분력의 특성을 잘 따르고 있음을 알 수 있으며 심압대의 가속도 신호도 chatter 발생을 어느 정도 예측할 수 있는 우수한 검출 신호로서 사용될 수 있음을 관찰할 수 있다.

4.5. 절삭 위치의 변화에 의한 영향

Table 6에서 배분력의 기본 진동 모드들의 고유 진동수는 절삭 위치가 심압대-중앙-주축대의 방향으로 이동할 때 180-173-214 Hz가 된다. 고유 진동수의 제곱이

Table 5 Effect of feed rate to fundamental modal parameters.

EXP #	Feed in/rev.	Measurement		
		Thrust force	Tail stock acceleration	Tool post acceleration
1	0.0080	187Hz, 0.176	200Hz, 0.092	273Hz, 0.233
2-2	0.0120	173Hz, 0.040	203Hz, 0.114	324Hz, 0.112
3	0.0163	232Hz, 0.165	194Hz, 0.078	205Hz, 0.216

대체로 강성도에 비례함을 감안할 때 절삭 위치의 변화에 따른 공작물의 등가강성도의 변화는 실제 절삭 과정 중 약 50% 증가함을 알 수 있다. 또한 이 때의 감쇠 계수의 크기는 주축대-심압대-중앙부의 순으로 감소하며 따라서 절삭 안정도도 감소한다. 위의 관측은 공작물을 고정-힌지보로 가정할 때의 기본 진동 모드도 양의 고찰로부터의 결론과도 일치한다. 심압대 및 공구대의 가속도 감쇠 계수는 대체로 배분력과 같은 경향을 갖고 변화함을 보이고 있는데 이는 chatter의 발생율이 중앙-심압대-주축대부의 순으로 높다는 것을 예측할 수 있다.

심압대 가속도 PSD는 Fig. 6, 7, 8에 보인 바와 같

이 200-400 Hz의 Band-limited random이나 절삭 위치가 심압대-중앙-주축대의 방향으로 이동함에 따라 최대 peak(Fig. 6, 7, 8에 ▲으로 표시)가 358-203-297 Hz로 변한다. 이는 절삭 위치 즉, 진동원이 이동함에 따라 이에 가장 민감한 심압대-공작물-공구 동력계-공구대부의 고유 진동에 의한 영향이 심압대의 가속도 PSD에 그대로 나타남을 알 수 있다.

공구대 가속도 PSD가 중앙과 주축대부 절삭시 300 Hz 부근에서 거의 같은 크기의 peak를 보이는 것은 공구동력계-공구대부의 구조 진동에 의한 것이며 500 Hz 부근의 최대 peak는 공구대 자체의 고유 진동으로 절삭 위치에 관계 없이 존재한다.

Table 6 Effect of cutting position to fundamental modal parameters.

EXP #	Cutting position	Measurement		
		Thrust force	Tail stock acceleration	Tool post acceleration
2-1	Tail stock side	180Hz, 0.394	189Hz, 0.297	263Hz, 0.375
2-2	Center	173Hz, 0.040	203Hz, 0.114	324Hz, 0.112
2-3	Spindle side	214Hz, 0.760	183Hz, 0.170	286Hz, 0.108

5. 결 론

DDS 방법으로 선삭 작업하의 공작 기계 동특성을 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절삭 배분력, 공구대 및 심압대 가속도 신호는 절삭 조건에 따라 차수가(8, 7)에서 (10, 8) 정도의 USAM(n, m) 또는 AM(n, m)으로의 수학적 모형화가 가능하다.
- 2) 이산적 모형을 연속적 모형으로 치환함으로써 실제 선삭 작업하에서의 절삭 과정 및 선반 구조의 동특성을 규명했다. 각 진동 모우드의 고유 진동수 및 감쇠율의 결정과 PSD 해석으로부터 절삭시 공작 기계 각 주요 요소의 동특성을 분리할 수 있다.
- 3) 정상 절삭 과정에서 절삭 조건 및 절삭 위치의 변

화에 따른 공작기계 계의 동특성을 절삭 배분력, 공구대 및 심압대 가속도 신호로부터 관찰할 수 있으며 Chatter 발생도 예측할 수 있다.

- 4) 공구-공작물의 상대 변위 측정 또는 공구 동력계의 설치가 용이하지 않을 경우 심압대 또는 공구대의 가속도 신호가 절삭 특성을 규명하는데 이용될 수 있다.

Reference

1. Burney, F.A., Pandit, S.M., and Wu, S.M. "A Stochastic Approach to Characterization of Machine Tool System Dynamics Under Actual Working Conditions," Journal of Engineering for Industry, ASME., Trans., May 1976, pp.614-618.

2. Ehmann, C.J., "Machine Tool System Identification and Forecasting Control of Chatter," Ph.D. Thesis, Mech. Eng. Dept., Univ. of Wisc., Madison, 1979.
3. Byun, Seung-Wan, "Identification of Cutting Dynamics under Actual Working Conditions Using DDS Methodology," M.S. Thesis, KAI-ST, 1981.
4. Wu, S.M., "Dynamic Data System: A New Modeling Approach," Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, August 1977, pp. 708-713.
5. Tobias, S.A., Machine Tool Vibration, Wiley New York, 1965, pp.146-180.
6. Burney, F.A., Pandit, S.M. and Wu, S.M., "A New Approach to the Analysis of Machine-Tool System Stability Under Working Condition," Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME., August 1977, pp.585-589.
7. Subramanian, T.L. and Devries, M.F., "An Investigation of Computer Control of Machining Chatter," Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME., November 1976, pp. 1209-1214.
8. Pandit, S.M., Subramanian, T.L. and Wu, S.M., "Stability of Random Vibrations with Special Reference to Machine Tool Chatter," Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME., Feb. 1975, pp.216-219.
9. Pandit, S.M., Subramanian, T.L. and Wu, S.M., "Modeling Machine Tool Chatter by Time Series," Journal of Engineering for Industry, Trans., ASME, Feb. 1975, pp.211-215.
10. Pandit, S.M. and Wu, S.M., Time Series and System Analysis: Modeling, Forecasting and Control, to be published.
11. Box, G.P. and Jenkins, G.M., Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden-Day, 1970.
12. Pandit, S.M. and Wu, S.M., "Unique Estimates of the Parameters of A Continuous Stationary Stochastic Process," Biometrika 1975.

부 록⁽¹⁰⁾

식 (2)의 특성 방정식은

$$\lambda^n - \sum_{j=1}^n \phi_j \lambda^{n-j} = 0 \tag{A-1}$$

이고 이 특성 방정식의 근은 시스템이 갖고 있는 서로 다른 유형의 자유도 1인 시스템의 진동 모우드를 나타낸다. 이 때 i 차 감쇠 진동 모우드에 대한 고유 진동수 $f_{n,i}$ 와 감쇠율 ζ_i 는

$$f_{n,i} = \frac{1}{2\pi\Delta} \sqrt{\frac{[I_n(\lambda_i, \lambda_i^*)]^2}{4} + \left[\cos^{-1} \left(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\sqrt{\lambda_i \lambda_i^*}} \right) \right]^2}$$

$$\zeta_i = \sqrt{\frac{[I_n(\lambda_i, \lambda_i^*)]^2}{[I_n(\lambda_i, \lambda_i^*)]^2 + 4 \left[\cos^{-1} \left(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\sqrt{\lambda_i \lambda_i^*}} \right) \right]^2}} \tag{A-2}$$

로 표시되는데 여기에서 λ_i, λ_i^* 는 i 차 진동 모우드에 해당하는 공액 복소근이고 Δ 는 샘플링 간격(sampling interval)이다.

식 (1)의 특성 방정식은

$$\mu^n + \sum_{j=1}^n \alpha_{n-j} \mu^{n-j} = 0 \tag{A-3}$$

이고 식(A-3)의 근 μ_i 와 식(A-1)의 근 λ_i 의 관계는

$$\lambda_i = e^{\mu_i \Delta} \quad i=1, 2, \dots, n \tag{A-4}$$

식(2)로부터 결정된 USAM(n, m) 모형의 계수 ϕ_i, θ_i 로부터 PSD 함수 $S(f)$ 를 얻는 공식은

$$S(f) = \frac{2\sigma_x^2}{\gamma_0} \frac{\left| 1 - \sum_{k=1}^m \theta_k e^{-j2k\pi f \Delta} \right|^2}{\left| 1 - \sum_{k=1}^n \phi_k e^{-j2k\pi f \Delta} \right|^2} \tag{A-5}$$

인데 이 식에서 γ_0 는 X_t 의 분산, f 는 진동수이다.