

자동회귀-이동평균(ARMA) 모델에 의한 초음파 진동 절삭 공정의 해석

최인휴*, 김정두**

An analysis of cutting process with ultrasonic vibration by ARMA model

In-Hyu Choi*, Jeong-Du Kim**

ABSTRACT

The cutting mechanism of ultrasonic vibration machining is characterized as two phases, that is, an impact at the cutting edge and a reduction of cutting force due to non-contact interval between tool and workpiece. In this paper, in order to identify cutting dynamics of a system with ultrasonically vibrated cutting tool, an ARMA modelling is performed on experimental cutting force signals which have a dominant effect on cutting dynamics. The aim of this study is, through Dynamic Data System methodology, to find the inherent characteristics of an ultrasonic vibration cutting process by considering natural frequency and damping coefficient. Surface roughness and stability of cutting process under ultrasonic vibration are also considered

Key Words : Ultrasonic vibration(초음파 진동), Autoregressive-Moving average model(자동 회귀-이동 평균 모형), Dynamic data(동적 자료), Cutting force(절삭력), Time series(시계열), Identification of cutting dynamics(절삭의 동적 거동 규명), Control parameter(제어변수)

1. 서 론

최근 들어 섬유 강화 플라스틱(FRP), 파인 세라믹 등과 같은 신소재의 사용이 산업용 구조재에서부터 자동차, 스포츠, 레저용품, 생활용품에 이르기까지 확대됨에 따라 정밀 가공의 필요성이 고조되고 있다. 그러나 상대적으로 난삭재에 속하는 이들재료의 범용 가공은 정밀한 가공품이 요구되는 항공기의 변속 주축, 자동차의 구동축 및 공작기계 주축 등의 용도에선 이미 한계에 도달하였으며, 그의 대안으로 여러 연구들이 공구에 초음파 진동을 주어 절삭하는 방법을 제안하고 있다(1).

초음파 진동 가공의 절삭 메카니즘은 단속 절삭에 의한 충격력과 공구와 공작물의 분리구간의 존재함에 따른 마찰력의 감소라는 크게 두가지로 대별된다(2). 이러한 초음파 진동을 이용한 가공 공정의 안정성을 검토하는 것은 가공면의 품질에 직접적인 영향을 미친다. 절삭 공정의 동적 거동을 결정하는 방법에는 단지 채터 주파수에서 절삭력과 칩두께의 변화 성분사이의 관계를 특징짓는 동절삭력 계수(DFCs, Dynamic Cutting Force Coefficients) 의한 것이 일반적이었다. 그리고, 넓은 주파수 대역에서 절삭공정의 동특성을 실험적으로 규명하기 위해 고전적인 Fourier 방법(3)과 동적 데이터

* 한국과학기술원 정밀공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

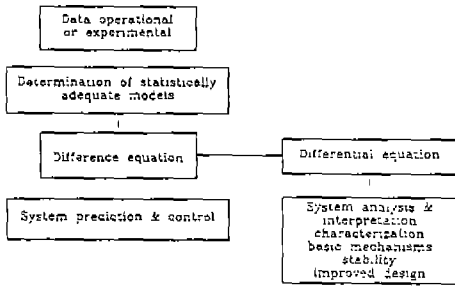


Fig. 1 Summary of DDS methodology

시스템(DDS, Dynamic Data System) 방법(4, 5)이 사용되었다. 특히 시계열 분석법인 동적 데이터 시스템 방법은 어떤 계의 출력인 시계열(time series) 형태의 동적 데이터를 관찰함으로써 영역의 변화에 기인한 정보의 손실없이 시스템의 숨겨진 특성을 실험적으로 빠르게 추출하는 이점이 있으며, 물리적으로 의미있는 통계적 차미분 방정식을 구함으로써 인프로세스 공정 규명이 가능해진다. Fig. 1에 그 개요를 나타내었다.

따라서, 본 연구에서는 절삭 과정중에 초음파 진동을 공구에 가하고, 칩 형성과 절삭의 동적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 절삭력 신호를 측정하여 이 데이터를 바탕으로 동적 데이터 시스템 모델링 기법을 적용하여 모델화를 수행하였다. 또한, 초음파 진동 가공 시스템에 대한 수치적인 모델링 결과로부터 차분 방정식을 이끌어내고, 이 식의 물리적인 의미를 구체화하기 위하여 대응하는 미분 방정식의 특성방정식을 구하였으며, 이 특성 방정식의 근으로부터 주어진 시스템의 동특성을 파악하였다. 절삭력에 미치는 영향을 알기 위해 제어 변수들의 변화에 따른 ARMA 모델의 계수 변동을 조사하였다. 실제 초음파 진동 절삭중에서의 절삭력에 대한 ARMA 모델에 의해서 그 동적 거동을 규명하였고, 가공상태의 감시(monitring) 및 예측 가능성을 제시하였다.

2. 초음파 진동 절삭 과정의 ARMA 모델

공작기계의 변수에 해당하는 n+m개의 ARMA 계수는 그 시스템의 특성을 물리적으로 가장 잘 묘사하고 제어 목적에 합당하도록 단순화된 것을 선택한다. 그리하여 본 연구에서는 ARMA(2, 1) 모델이 절삭의 동특

성을 나타내는 데에 가장 바람직한 형태로 선택되었다 (6). 절삭력의 시계열의 3-D 성분은 주절삭력 F_c , 배분력 F_t 그리고 이송분력 F_f 를 포함하므로 이 시계열의 ARMA(2, 1) 표현은 다음과 같다.

$$F(i) - \phi_1 F(i-1) - \phi_2 F(i-2) = A(i) - \theta_1 A(i-1) \quad (1)$$

그리고 이산 순간 i에서의 3-D 절삭력의 값은

$$F(i) = [F_c(i) F_t(i) F_f(i)]^T$$

$$i=1, 2, \dots, N$$

$$A(i) = [a_c(i) a_t(i) a_f(i)]^T$$

$$i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기서,

- $\phi_j (3 \times 3)$ $j=1, 2$: 자동회귀계수
- $\theta_1 (3 \times 3)$: 이동평균계수
- N : 관측된 데이터 총수
- A(i) : 백색 잡음 또는 잔여오차(residual errors)

절삭력 F(i)의 3분력 중에서 주분력 $F_c(i)$ 를 대표적인 절삭력으로 선택하고, 식(1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c(i) - \phi_1 F_c(i-1) - \phi_2 F_c(i-2) = a_c(i) - \theta_1 a_c(i-1) \quad (3)$$

$$E[A_c(i)] = 0, E[A_c(i) A_c(i-k)] = \delta_k \sigma_A^2$$

여기서,

- E : 기대값 연산자
- δ_k : Dirac delta 함수
- σ_A : $a_c(i)$ 의 분산

식(3)은 스칼라 관계식이 되고 단순화를 위하여 세 힘 성분사이의 영향은 무시하였다. 시계열 $F_c(i)$ 를 기초로 하는 ARMA 모델의 세 계수 ϕ_1, ϕ_2, θ_1 을 구하기 위해 오차 제곱의 합(sum of squares a_c 's)

$$SSA = \sum_{i=1}^N a_c^2(i) \quad (4)$$

이 최소로 되게 하고 그때의 계수 값을 취한다.

ARMA 계수 ϕ_1, ϕ_2, θ_1 는 시계열 F(i) $i=1, 2, \dots, N$ 에 직접적인 영향을 받는다. 또한 이 절삭력은 시스템 변수에 영향을 받는다. 단순화를 위해 대부분의 시스템 변수를 불변량(invariant)으로 두고, 세 변수

절삭깊이 d , 이송량 f , 절삭속도 V 를 제어 변수로써 취급한다. 이들 제어 변수들을 체계적으로 변화시켜 ARMA 계수와 각 제어 변수사이의 관계를 밝히고자 한다. 한편, 식(3)을 Backward shift 연산자 B 를 사용해서 표현하면 다음과 같다.

$$\Phi(B)F_c(i) = \Theta(B)A_c(i) \quad (5)$$

$$\Phi(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)$$

$$\Theta(B) = (1 - \theta_1 B)$$

B : 후향이동연산자 : $B^k X_t = X_{t-k}$

그러므로, ARMA(2, 1) 모델의 특성 방정식은

$$\Phi(B) = (1 - \lambda_1 B)(1 - \lambda_2 B) = 0 \quad (6)$$

와 같고, 그 특성근은 $\lambda_i, i=1, 2$ 이다. 이 ARMA(2, 1) 모델로부터 시스템의 고유 진동수 f_n 와 감쇠율 ζ 을 구할 수 있으며, 이 값으로부터 시스템의 동적 특성을 파악할 수 있다.

동적 시스템이 갖는 모우드 중에 그 계의 불안정성에 가장 큰 영향을 미치는 모우드가 있으며, 시간 t 에서 시스템으로부터 측정되는 신호가 시간이 경과함에 따라 발산하지 않는다면 그 시스템은 안정한 상태를 유지하고 있는 것이고, 그러기 위해서는 $|\lambda_i| < 1$ 이어야 한다. 즉 모형화 작업 결과로 얻은 여러 진동 모우드 중에 그 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 모우드에 주목하여 그 모우드가 갖는 특성근의 절대값 크기로부터 전체 시스템의 불안정성을 판단할 수 있다(6, 7, 8).

시스템의 특성근 중에서 공액복소근 λ_i, λ_i^* 가 존재할 때, 이 시스템은 감쇠 진동계(under-damped mode)로 볼 수 있으며 이 경우 i 번째 모드의 고유 진동수 f_{ni} 와 감쇠율 ζ_i 을 다음 식으로부터 구할 수 있다(10, 11).

$$f_{ni} = \frac{1}{2\pi\Delta} \sqrt{\frac{[\ln(\lambda_i \lambda_i^*)]^2}{4} + [\cos^{-1}(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\sqrt{\lambda_i \lambda_i^*})]^2} \quad (7)$$

$$\zeta_i = \sqrt{\frac{[\ln(\lambda_i \lambda_i^*)]^2}{[\ln(\lambda_i \lambda_i^*)]^2 + 4[\cos^{-1}(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\sqrt{\lambda_i \lambda_i^*})]^2}} \quad (8)$$

3. 실험 장치 및 방법

Fig. 2는 실험 장치의 개략도를 나타낸 것으로서, 절삭 형태는 원통 가공 선삭으로 하였고, 공구에 초음파

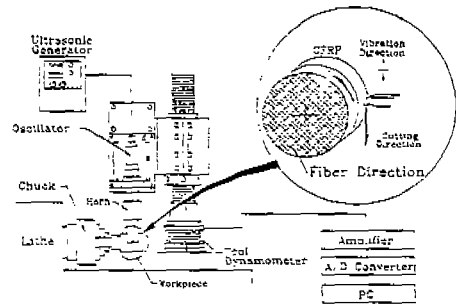


Fig. 2 Experimental apparatus of Ultrasonic vibration cutting

진동을 가할 수 있는 장치를 공구대 위에 설치하였다. 공구는 s-type 인조 다이아몬드(polycrystal diamond) 인서트로서 상면 경사각 -5 이고 여유각 5 이다. 절삭력 측정을 위해 공구동력계를 발진 장치 밑면에 설치하여 주절삭력을 측정하였다. 측정된 절삭력 신호는 변형율 증폭기(strain amp)로 증폭된후, 12비트의 분해능(resolution)을 가진 A/D 변환기(LAB-V, Nanotech 사)에 의하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환된다. 이때 2kHz의 샘플링 주파수(샘플링 간격 : 0.5E-3sec)로 각각의 경우 1500개의 데이터를 컴퓨터(IBM 486-DX)에 받아들여서 처리하였다.

사용된 초음파 진동 장치는 발진 장치에 의하여 발생된 초음파 펄스 전압이 압전소자(piezoelectric)를 진동시키고, 인서트가 부착된 혼을 통해서 그 진동폭이 약 3배 증폭되도록 설계되었다. 혼 끝단에 부착된 공구는 20 ± 0.5 kHz의 주파수로 진동하고, 그 편 진폭값은 $15 \pm 2 \mu m$ 이다. Table 1은 실험에 사용된 장비의 제원을 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 ARMA 모델화를 수행하는 흐름도를 나타낸 것이며, 실험을 통해 얻어진 초음파 진동 하에서의 절삭력 데이터를 자료로 이용한다. 이 작업을 MINITAB 이란 통계 패키지를 이용한다.

본 실험에서는 초음파 진동 하에서 절삭속도, 이송량 및 절삭 깊이의 3제어변수를 변화시켜가며 절삭력을 측정하여 이것을 ARMA모델링의 자료로 삼았다. 각 절삭 조건에서의 절삭력 신호를 Fig. 4-7에 나타내었다. 먼저

Table 1 Specification of experimental equipments

Device	Spec.
Lathe	TIPL-4 (통일)
Insert	Polycrystal diamond insert : S-type upper rake angle -5 degree relief angle 5 degree
Ultrasonic vib. device	Ultrasonic generator W-1400 (경일 초음파) Step horn : Amplitude $15 \pm 2 \mu\text{m}$ Frequency $20 \pm 0.5 \text{ kHz}$
Workpiece	CFRP (Dia. 90mm)
Tool dynamometer	Sambo electronic MFG Co. AST type
Strain amplifier	Kyowa electronic instruments. Co
Roughness tester	Mitutoyo SurfTest-402
A/D converter	LAB-V (Nano Tech Co.) resolution : 12bit conversion rate : 200 kHz max.

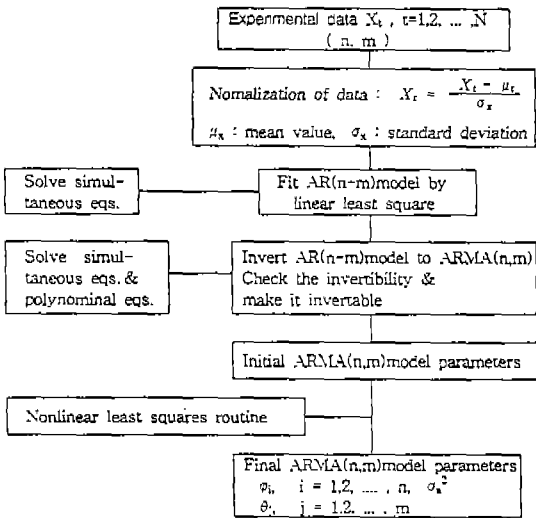
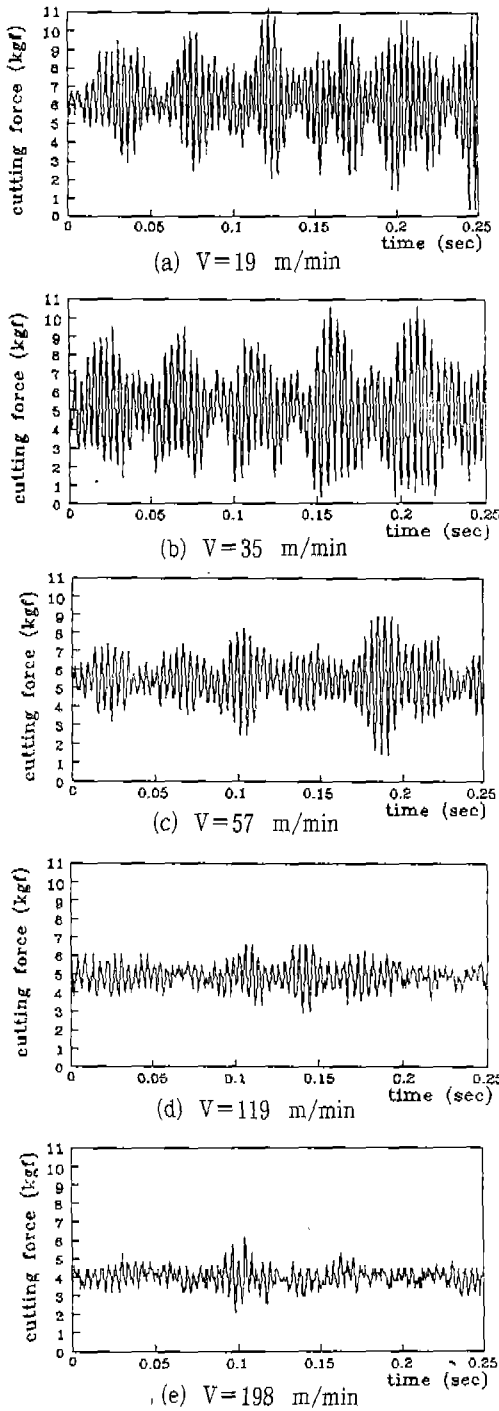


Fig. 3 Flow chart of ARMA(n, m) modeling procedure

절삭속도의 변화에 따른 절삭력 신호를 그린 Fig. 4와 5를 살펴보면 절삭력의 불규칙한 특성을 단적으로 보여 주고 있다. 초음파 진동 공구의 진동 속도와 피삭재

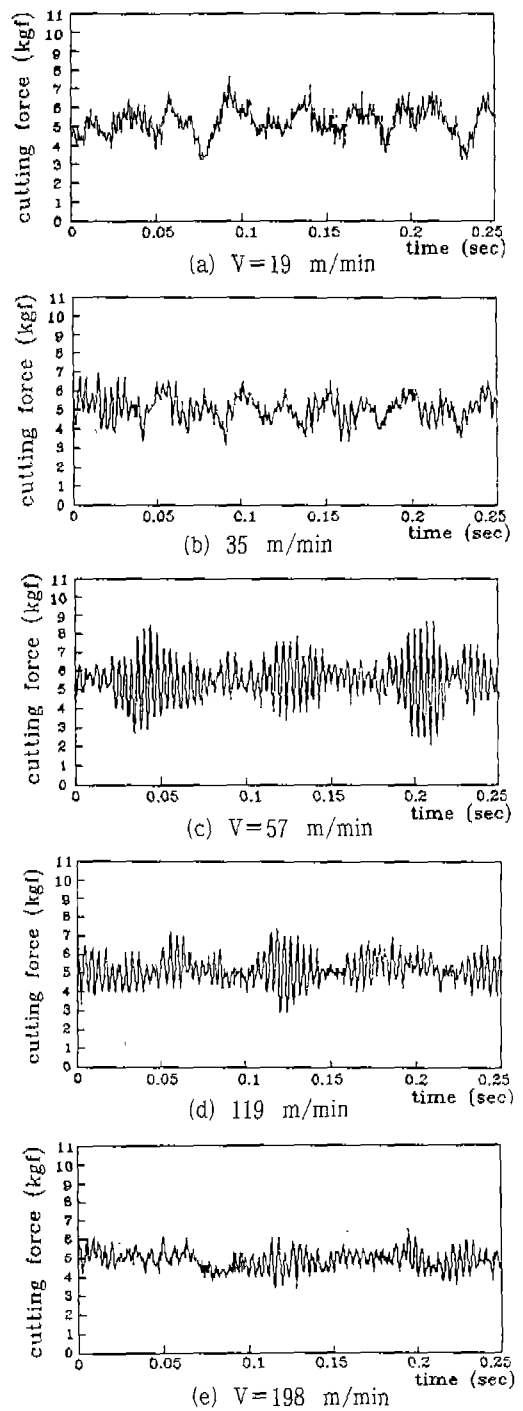
내의 절삭점에서의 속도가 같아지는 절삭속도($\pi DN \text{ m/min}$, D : 공작물 직경, N : spindle 회전수)를 임계 절삭속도라고 하며 이 속도 이하의 주축 회전수에서는 공구와 공작물 사이에 분리 구간이 존재하게 된다. 저속일수록 분리 구간이 증가하게 되고 절삭 방향으로는 충격이 발생하게 된다. 그래서 초음파 진동을 가진한 경우에 절삭력 변동이 심하게 되는 것이다. 다시 말하면 초음파 진동 가공은 임계 속도이하의 저속에서 그 효과를 발휘하고, 표면거칠기의 향상을 꾀할 수 있다. 임계 절삭속도 이상에서는 충격이 나타나지 않으므로 절삭력의 변동성분이 줄어들고 가진하지 않은 경우와 비슷함을 볼 수 있다. 초음파 진동을 가진 경우인 Fig. 4에서 절삭속도가 낮을수록 절삭력의 진동폭이 증가하고 있다. 이것은 초음파 진동 가공에서 그 임계속도 ($= 2\pi r f = 2\pi \times 15E-6 \times 20E+3 = 1.885 \text{ m/sec} = 113 \text{ m/min}$)보다 낮은 절삭 속도에서 공구와 공작물의 분리에 의한 단속절삭이 행해진다는 사실과 일치하고 있다. Fig. 6과 7은 각각 이송량 및 절삭 깊이에 따라 절삭력 신호를 나타낸 것으로 이송량과 절삭 깊이에 따라 절삭력이 증가함을 볼 수 있다.

Table 2은 ARMA(2, 1) 모델링의 결과를 나타낸다. 실험 #1~#13은 초음파 진동하에서 얻어진 절삭력 데



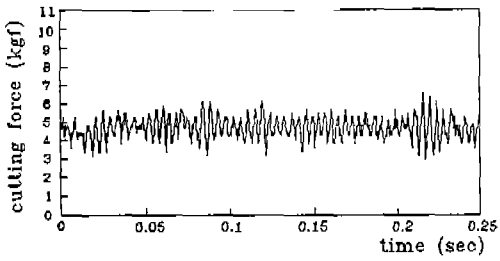
$f = 0.1$ mm/rev
 $d = 0.2$ mm

Fig. 4 Cutting force signal for varying cutting speed with ultrasonic vibration

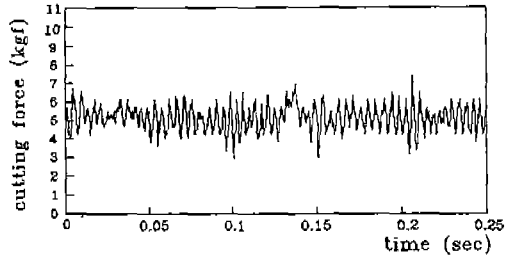


$f = 0.1$ mm/rev
 $d = 0.2$ mm

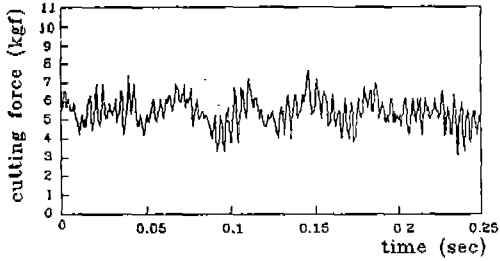
Fig. 5 Cutting force signal for varying cutting speed without ultrasonic vibration



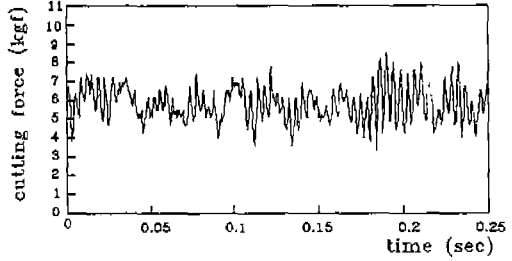
(a) $f=0.1$ mm/rev



(b) $f=0.2$ mm/rev



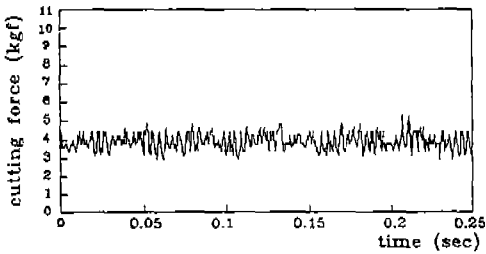
(c) $f=0.3$ mm/rev



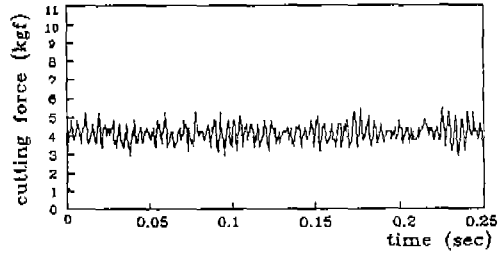
(d) $f=0.4$ mm/rev

$V = 57$ m/min
 $d = 0.2$ mm

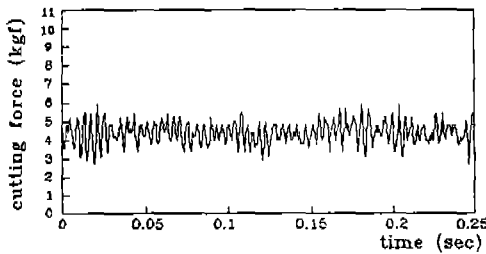
Fig.6 Cutting force signal for varying feedrate with ultrasonic vibration



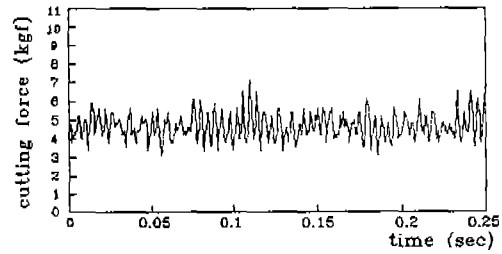
(a) $d=0.05$ mm



(b) $d=0.1$ mm



(c) $d=0.2$ mm



(d) $d=0.3$ mm

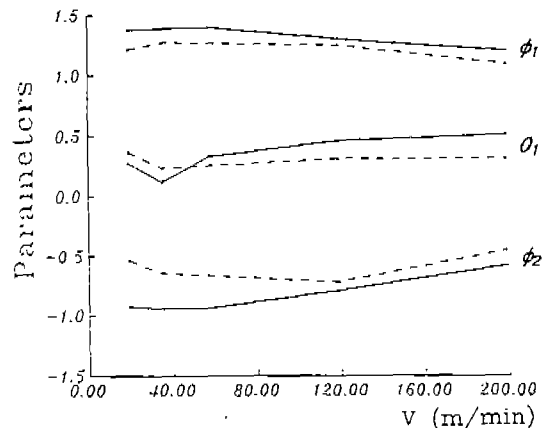
$V = 57$ m/min
 $f = 0.1$ mm/rev

Fig.7 Cutting force signal for varying depth of cut with ultrasonic vibration

Table 2 Experimental condition & estimated parameters of ARMA(2, 1) models

#	Cutting	Feed	Depth of	Parameters		
	speed (m/min)	(mm/rev)	cut (mm)	ϕ_1	ϕ_2	θ_1
1	19	0.1	0.2	1.3744	-.9298	.2719
2	35	0.1	0.2	1.3844	-.9428	.1178
3	57	0.1	0.2	1.3926	-.9399	.3289
4	119	0.1	0.2	1.2989	-.7945	.4565
5	199	0.1	0.2	1.1993	-.5823	.5093
6	57	0.1	0.2	*	*	*
7	57	0.2	0.2	1.3341	-.7126	.4573
8	57	0.3	0.2	1.2645	-.5674	.1738
9	57	0.4	0.2	1.3313	-.7047	.1847
10	57	0.1	0.05	1.1548	-.5802	.5347
11	57	0.1	0.1	*	*	*
12	57	0.1	0.2	1.2877	-.7263	.4699
13	57	0.1	0.3	1.3878	-.7458	.5061
14	19	0.1	0.2	1.2108	-.5409	.3661
15	35	0.1	0.2	1.2718	-.6481	.2344
16	57	0.1	0.2	*	*	*
17	119	0.1	0.2	1.2446	-.7242	.3086
18	199	0.1	0.2	1.0900--.4542	.3081	

이터의 추정된 모델링 계수값을 나타내고, 실험 #14~ #18은 초음파 진동을 주지 않은 상태에서의 절삭 속도 V의 변화에 따른 ARMA 모델의 계수를 나타낸다. 여기서, * 표시는 프로그램 수행중 오버플로우(overflow)가 발생하여 값을 얻을 수 없었다. Fig. 8과 9는 그리고 10은 절삭 속도, 이송량 및 절삭 깊이에 따른 ARMA 계수의 변화를 나타낸다. Fig. 8은 초음파 진동유무에 따른 ARMA 계수를 절삭 속도에 따라서 나타낸 것이다. 공구에 초음파 진동을 가하였을 때 절삭력의 ARMA 계수 ϕ_1 , ϕ_2 , θ_1 의 평균값은 각각 1.3299, -0.8379, 0.3369이고, 초음파 진동을 가하지 않았을 때는 1.2043, -0.5919, 0.3043이다. 초음파 진동유무에 따라서 이들 계수값이 차이를 보인다는 것은 초음파가 가진 이 시스템의 동특성에 영향을 미친다는 것을 의미한다. Fig. 9와 10은 이송량, 절삭 깊이에 따른 ARMA 계수의 변화를 나타낸 것으로 ϕ_1 , ϕ_2 , θ_1 값은 각각 일정한 수준을 유지함을



— With ultrasonic vibration
 - - - Without ultrasonic vibration

Cutting condition : $f = 0.1$ m/rev
 $d = 0.2$ mm

Fig. 8 Variation of ARMA(2, 1) parameters with cutting speed in a fixed feed & depth of cut

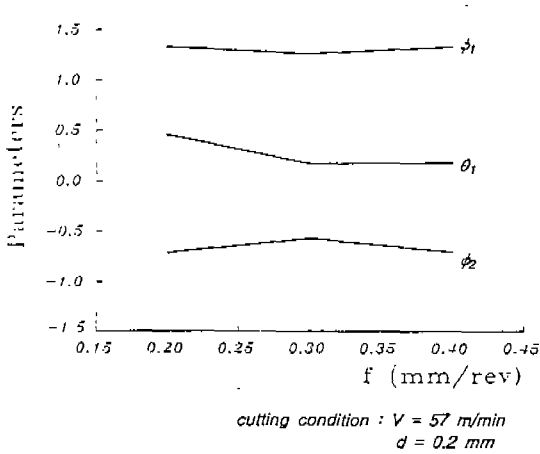


Fig.9 Variation of ARMA(2, 1) parameters with feedrate in a fixed cutting speed and depth of cut under ultrasonic vibration

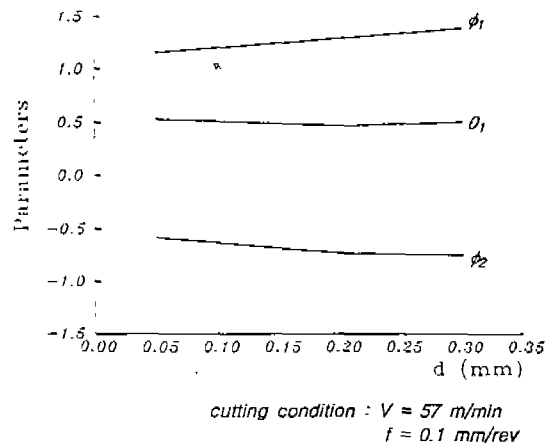


Fig.10 Variation of ARMA(2, 1) parameters with depth of cut in a fixed cutting speed and feedrate under ultrasonic vibration

볼 수 있다. 이것은 절삭 조건이 변화하더라도 내재된 시스템의 동특성은 크게 변하지 않음을 의미한다.

Table 3에서 6은 ARMA(2, 1) 모델의 특성 방정식의 근과 이 값으로부터 식 (7), (8)에 의해 구할 수 있는 초음파 진동가공 시스템의 동특성인 고유 진동수 f_n 과 감쇠율 ζ 그리고, 안정성을 나타내는 특성방정식 근의 절댓치와 그때의 피삭재의 표면 거칠기를 나타낸다. Table 3의 실험 #1~#5의 결과에서 보듯이 절삭 속도가 증가함에 따라 고유진동수가 감소하고, 감쇠율이 증가하고 있다. 실제 가공면의 표면거칠기는 저속일 때 더 양호하게 나타났다. 이는 초음파 진동의 효과가 임계 절삭속도보다 낮은 속도 범위에서 유효함을 나타낸다. 절삭력의 동특성에서 감쇠 계수가 작아진 것은 공구와 공작물의 접촉구간이 상대적으로 줄어들어서 마

찰이 작아진 것에 기인하고, 상대적으로 불안정해지고 있지만, 절대안정성 관점에서는 안정한 상태를 유지하고 있다. 그리고, 저속일수록 한 지점에서 공구가 공작물을 통과할 횟수가 많아짐으로 표면조도는 양호해짐을 볼 수 있다. Table 4의 실험 #6-#9는 이송량의 증가에 따라 고유진동수가 감소하다가 다시 증가함을 보여주고, 피삭재의 표면거칠기는 이송량의 증가에 따라 더 거칠게 된다. Table 5의 실험 #10-#13에서는 절삭 깊이가 감소할수록 고유 진동수가 증가하고, 감쇠율도 증가함을 보여준다. 또한 표면 거칠기는 양호해진다. Table 6의 실험 #14-#18은 초음파를 가하지 않은 상태에서 고유진동수는 가한 때보다 낮고 감쇠율은 높게 나타남을 보여준다. ARMA 모델로부터 구한 특성 방정식의 허근으로부터 시스템의 고유진동수를 구하는 것이

Table 3 Dynamic characteristics of ARMA(2, 1) model with cutting speed under ultrasonic vibration

#	Characteristic roots	Natural frequency f_{n1} (Hz)	Damping ratio ζ	$ \lambda_i $	R_a (μm)
1	0.6872+j0.6764	247.75	0.0468	0.9642	3.2
2	0.6922+j0.6809	247.56	0.0379	0.9710	3.4
3	0.6963+j0.6764	245.16	0.0402	0.9707	3.7
4	0.6495+j0.6105	242.92	0.1507	0.8914	4.5
5	0.5997+j0.4719	229.00	0.3758	0.7631	5.6

식 (7)이다. 여기서 f_n 은 특성방정식의 근 λ_i 에 의해 변함을 알 수 있다. 결국 f_n 은 ARMA 계수에 의해 변한다. 그러나 절삭력 신호의 불규칙성(randomness)을 감안한다면, 고유진동수는 크게 변하지 않으며, 가진할 때는 $231 \pm 16\text{Hz}$ 의 고유진동수를 가지고, 가진하지 않을 때는 $211 \pm 8\text{Hz}$ 의 고유진동수를 가진다. 즉 초음파 가진이 약 20Hz 정도의 고유진동수의 증가를 유발시켰다.

전체적으로 볼때 초음파 진동절삭 시스템에서 절삭력의 ARMA(2, 1)모델의 계수는 그 값이 어떤 일정한 범위를 갖는 것을 볼 수 있다. 즉, ϕ_1 은 1.33 ± 0.15 이

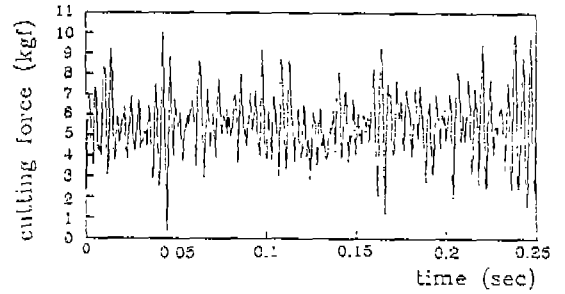


Fig.11 Cutting force signal estimated by the numerical model

Table 4 Dynamic characteristics of ARMA(2, 1) model with feedrate under ultrasonic vibration

#	Characteristic roots	Natural frequency f_{n1} (Hz)	Damping ratio ζ	$ \lambda_i $	R_a (μm)
6	*	*	*	*	4.2
7	$0.6671 \pm j 0.5273$	216.77	0.2488	0.8503	5.0
8	$0.6323 \pm j 0.4095$	203.95	0.4421	0.7533	7.0
9	$0.6657 \pm j 0.5115$	215.85	0.2580	0.8395	11.2

Table 5 Dynamic characteristics of ARMA(2, 1) model with depth of cut under ultrasonic vibration

#	Characteristic roots	Natural frequency f_{n1} (Hz)	Damping ratio ζ	$ \lambda_i $	R_a (μm)
10	$0.5774 \pm j 0.4968$	242.19	0.3577	0.7617	3.9
11	*	*	*	*	4.2
12	$0.6439 \pm j 0.5584$	233.02	0.2183	0.8523	4.0
13	$0.6939 \pm j 0.5141$	208.27	0.2241	0.8636	4.5

Table 6 Dynamic characteristics of ARMA(2, 1) model with cutting speed under no vibration

#	Characteristic roots	Natural frequency f_{n1} (Hz)	Damping ratio ζ	$ \lambda_i $	R_a (μm)
14	$0.6054 \pm j 0.4176$	215.66	0.4535	0.7355	4.8
15	$0.6359 \pm j 0.4937$	221.19	0.3121	0.8051	4.7
16	*	*	*	*	5.2
17	$0.6223 \pm j 0.5805$	244.40	0.2101	0.8510	4.7
18	$0.5450 \pm j 0.3965$	236.34	0.5314	0.6740	5.5

고, ϕ_2 는 -0.84 ± 0.22 이며, θ_1 은 0.34 ± 0.25 의 범위를 갖는다. 이 값을 식 (3)에 대입하면 초음파 진동 가공 시스템의 ARMA(2, 1) 모델을 얻을 수 있다. 즉

$$F_c(i) - 1.33F_c(i-1) - (-0.84)F_c(i-2) = a_c(i) - 0.34a_c(i-1) \quad (9)$$

이 모델의 동적 특성을 살피기 위해 특성근을 구하면 $0.6650 \pm j0.6291$ 가 되고, 고유진동수는 242.81Hz 이며 감쇄율은 0.1159 가 되었다. 특성 방정식의 근의 절댓치 $|s_i|$ 가 전 실험에서 1 이하의 값으로 나타난 것으로 보아 이 시스템은 안정한 시스템이다. 실험결과에서 얻어진 초음파 진동 시스템의 모델로부터 절삭력을 예측할 수 있다. Fig. 11은 모델에 의해 예측된 절삭력 신호를 나타낸다. 이것은 실제 초음파 진동을 가진했을 때의 절삭력 신호와 유사하다. 실험 데이터로부터 수치적으로 모델링한 것이 실제상태를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

초음파 진동 절삭 시스템에서 절삭력 신호의 ARMA(2, 1) 모델을 통하여 절삭력의 동적 거동을 규명함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공구에 초음파로 가진 한 상태에서의 절삭력에 대한 평균 ARMA(2, 1)계수 ϕ_1 , ϕ_2 , θ_1 는 각각 1.33-0.84 0.34로 얻어지며, 초음파 진동 가공 시스템의 고유진동수는 231Hz로써 비가진시 211Hz보다 약 20Hz가 증가하였고, 감쇄율은 0.1159로써 비가진시 0.3768보다 약 0.26 감소하였다.
- 2) 이산적인 모델로부터 연속적인 모델로 치환시킴으로써 선반에 장착된 초음파 진동 가공 시스템의 실제 작업하에서의 동적 거동을 규명하였다.
- 3) 임계속도 이하의 절삭속도에서 공구에 20kHz 부근의 진동수로 가진함으로써 약 30% 정도로 가공면의 표면거칠기의 향상을 달성하였다.

참고문헌

1. H. Takey, N. Lijima, Machinability of grassfiber reinforced plastics and application

- of ultrasonic machining, CIRP. 37, 1988, p.93~96
2. R. C. Skelton, Surface finish produced by a vibrating tool during furning, J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 9, 1969, p.375~389
3. M. M. Nigm, M. M. Sadek, Experimental investigation of the characteristic of the dynamic cutting process, ASME, J. Eng. Ind. 109, 1987, p.275~280
4. T. Moriwaki, K. Iwata, In-process analysis of machine tool structural dynamics and prediction of machining chatter, ASME, J. Eng. Ind. 98, 1976, p.301~305
5. T. Moriwaki, Measurement of cutting dynamics by time series analysis technique, CIRP, 22, 1973, p.117~118
6. N. Olgac, J. R. Guttermuth, A symplified identification for autoregressive models of cutting dynamics ASME, Vol. 110 Aug, 1988, p.288~296
7. S. M. Wu, Dynamic data system : a new modeling approach, ASME, Aug. 1977, p.708~713
8. 이종원, 김광준, DDS의 이론 및 응용(I) 대한기계학회논문집, Vol. 22, No. 6, 1982, p.456~462
9. F. A. Burney, S. M. Pandit, S. M. Wu, A stochastic approach to characterization of machine tool system dynamics under actual working conditions, ASME, May 1976, p.614~619
10. T. Y. Ahn, K. F. Eman, S. M. Wu, Cutting dynamic data system(DDS) modeling approach J. Eng. Industry, Vol. 107, May, 1985, p.91~94
11. Pandit, S. M. and Wu, S. M., Time series and system analysis with application, wiley, 1983