

〈論 文〉

자기회귀 벡터모델을 이용한 정면밀링의 동절삭력 모델해석

백대균* · 김정현** · 김희술***

(1993년 2월 10일 접수)

An Analysis of Dynamic Cutting Force Model for Face Milling Using Modified Autoregressive Vector Model

Dae-Kyum Baek, Jung-Hyun Kim and Hee-Sool Kim

Key Words : Autoregressive Vector Model(자기회귀 벡터모델), Dynamic Cutting Process(동절삭과정), Dynamic Component(동적성분), Dynamic Cutting Force(동절삭력)

Abstract

Dynamic cutting process can be represented by a closed-loop system consisted of machine tool structure and pure cutting process. On this paper, cutting system is modeled as a six degrees of freedom system using MARV(Modified Autoregressive Vector) model in face milling, and the modeled dynamic cutting process is used to predict dynamic cutting force component. Based on the double modulation principle, a dynamic cutting force model is developed. From the simulated relative displacements between tool and workpiece the dynamic force components can be calculated, and the dynamic force can be obtained by superposition of the static force and dynamic force components. The simulated dynamic cutting forces have a good agreement with the measured cutting force.

1. 서 론

최근 가공분야에서는 컴퓨터 및 제어기술의 발전으로 자동화, 정밀화, 그리고 무인화가 급속히 발전되고 있다. 이에 따라 대형화되고 복잡해지는 공작기계의 구조에 대한 해석과 순수절삭과정에 대한 관심이 한층 더 높아지게 되었다.

가공에서 동절삭과정(dynamic cutting process)은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 공작기계의 구조(machine tool structure)와 순수절삭과정(pure

cutting dynamic)으로 이루어진 폐회로시스템(closed-loop system)으로 표현할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 기계구조가 진동하여 변위를 일으키고, 변위는 칩두께변화(chip thickness variation)를 발생시켜 동적성분(dynamic component)을 유발하고, 이 동적성분은 다시 기계구조를 가진하는 구조를 이룬다.

Fig. 1과 같이 폐회로계로 묘사된 동절삭과정을 해석하기 위해서 먼저 선행되어야 할 것이 절삭력에 대한 연구이다.^(15,16) 정면밀링에서 절삭력에 대한 연구들을 살펴보면 Gygax, Ruzhong, 그리고 Wang^(4,5,6)은 단인 2차원 절삭에서 비절삭저항과 칩단면적의 곱으로 표시되는 정절삭력(static force)을 시뮬레이션하였고, 이 기본 정절삭력 모델로부

*영남대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 영남대학교 기계공학과 대학원

***정회원, 영남대학교 기계공학과

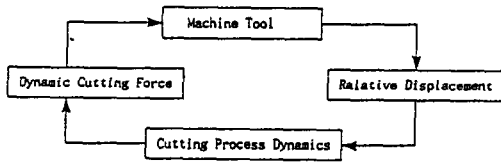


Fig. 1 Block diagram of dynamic cutting system

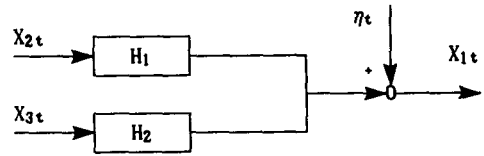


Fig. 2 Dual input system

터 Devor, Kline, Fu, 그리고 Kapoor^(7,8,9,10) 등은 커터형상과 공작물의 형상 그리고 Run Out 효과 등을 고려하여 훨씬 더 정교한 정절삭력 모델을 세웠다.

밀링작업환경이 정상상태라고 가정해서 구한 이러한 정절삭력 모델은 공구와 공작물의 상대운동에서 발생한 동적성분때문에 실제 작업에서 일어나는 동절삭력(dynamic cutting force)을 나타내기에는 부족하다. 따라서 본 논문에서는 실제 밀링작업과 거의 유사한 폐회로계로 이루어진 동절삭력 모델을 개발하고자 한다. 절삭시스템을 좀 더 정확하게 모델링하기 위해 Modified Autoregressive Vector(MARV)모델을 이용하여 X, Y, Z 방향을 각각 2자유도계로 모델링하여 동작기체구조의 특성을 나타내었다. 이 절삭시스템에 정상상태의 정절삭력을 가진하여 공구와 공작물의 상대변위로 부터 칩두께 모듈레이션을 구하였다. 칩두께모듈레이션과 동절삭력 계수의 곱으로 표시되는 동적성분을 구한 후 정절삭력과 동적성분의 합인 동절삭력을 시뮬레이션하여 실험의 결과와 비교하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 MARV 모델

Multivariate Series를 이루는 입력과 출력데이터로 구성된 시스템을 MARV(modified autoregressive vector) 모델에 적용하면 동적관계를 나타내는 전달함수를 구할 수 있다.^(1,2,3)

Fig. 2는 이중 입력시스템을 나타낸다. 여기서 X_{1t} 는 출력이고, X_{2t} , X_{3t} 는 입력이고 η_t 는 백색잡음(white noise)이다. H_1 , H_2 는 해석되어야 할 동적시스템이다.

시스템의 차분방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_{1t} = & \phi_{111}X_{1t-1} + \phi_{112}X_{1t-2} + \dots + \phi_{11n}X_{1t-n} \\
 & - \phi_{120}X_{2t} + \phi_{121}X_{2t-1} + \phi_{122}X_{2t-2} + \dots + \phi_{12n}X_{2t-n} \\
 & - \phi_{130}X_{3t} + \phi_{131}X_{3t-1} + \phi_{132}X_{3t-2} + \dots + \phi_{13n}X_{3t-n} \quad (1)
 \end{aligned}$$

전달함수는 “Backshift Operator” B 를 이용하여 다음과 같이 식(2)로 표현할 수 있는데, 여기서 식(3)은 입력 X_{2t} 에 대한 시스템 H_1 의 전달함수이고, 식(4)은 입력 X_{3t} 에 대한 시스템 H_2 의 전달함수이다.

$$X_{1t} = H_1(B) X_{2t} + H_2(B) X_{3t} \quad (2)$$

여기서

$$H_1(B) = \frac{-\phi_{120} + \phi_{121}B + \phi_{122}B^2 + \dots + \phi_{12n}B^n}{1 - \phi_{111}B - \phi_{112}B^2 - \dots - \phi_{11n}B^n} \quad (3)$$

$$H_2(B) = \frac{-\phi_{130} + \phi_{131}B + \phi_{132}B^2 + \dots + \phi_{13n}B^n}{1 - \phi_{111}B - \phi_{112}B^2 - \dots - \phi_{11n}B^n} \quad (4)$$

이 모델들의 특성들은 식(5)의 특성방정식에 의하여 나타난다.

$$\lambda^n - \phi_{111}\lambda^{n-1} - \phi_{112}\lambda^{n-2} - \dots - \phi_{11n} = 0 \quad (5)$$

샘플링구간이 Δ 일때 감쇠비(damping ratio) ζ , 그리고 고유진동수(natural frequency) f_n 은 다음의 식으로 구할 수 있다.^(1,2,3)

$$\zeta = \sqrt{\frac{[\ln(\lambda_i \lambda_i^*)]^2}{[\ln(\lambda_i \lambda_i^*)]^2 + 4[\cos^{-1}(\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\lambda_i \lambda_i^*})]^2}} \quad (6)$$

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

여기서 λ_i , λ_i^* 는 복소공액근(complex conjugate roots)이며, f_n 은 Hz이다. 또한, 식(3)과 식(4)에 $B = e^{-j\omega\Delta}$ 로 치환하면, 복소주파수 응답함수(complex frequency response function)를 다음과 같이 구할 수 있다.^(1,2,3)

$$\begin{aligned}
 H_1(\omega) = & H_1(B)|_{B=e^{-j\omega\Delta}} \\
 = & \left| \frac{-\phi_{120} + \phi_{121}B + \phi_{122}B^2 + \dots + \phi_{12n}B^n}{1 - \phi_{111}B - \phi_{112}B^2 - \dots - \phi_{11n}B^n} \right|_{B=e^{-j\omega\Delta}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$H_2(\omega) = H_2(B) \Big|_{B=e^{-j\omega\Delta}} \\ = \left| \frac{-\phi_{130} + \phi_{131}B + \phi_{132}B^2 + \dots + \phi_{13n}B^n}{1 - \phi_{111}B - \phi_{112}B^2 - \dots - \phi_{11n}B^n} \right|_{B=e^{-j\omega\Delta}} \quad (9)$$

2.2 동절삭력 모델

절삭과정중에 진동이 없는 정상상태라고 가정해서 정면밀링에서 커터의 기하학적 형상과 절삭조건에 따라 칩단면적과 비절삭 저항의 곱인 정절삭력을 많은 연구자들이 유도하였다. 또한, 절삭 중에 진동이 발생할 때 Das and Tobias, Nigm, Sadek, Opitz^(11,12,13) 등은 동적성분(dynamic component)은 공구와 공작물 사이에서 이중 모듈레이션(double modulation)원리에 의해 구할 수 있음을 보였다.

정면밀링에서 커터의 회전각이 Φ 이고, i 번째 인서트에 의한 순간 안쪽 모듈레이션(inner modulation)은 이 인서트가 절삭면에 그리는 궤적으로서 커터의 순간변위를 $X_1(\Phi)$, 공작물의 순간변위를 $X_2(\Phi)$ 라고 할때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X_1(i, \Phi) = X_1(i, \Phi) - X_2(i, \Phi) \quad (10)$$

순간 바깥쪽 모듈레이션(outer modulation)은 바로 앞의 인서트가 지나간 궤적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_0(i, \Phi) = X_1(i, \Phi - T) \quad (11)$$

여기서 T 는 바로 앞의 인서트와 i 번째 인서트가 그리는 궤적의 시간차(time delay)로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{2\pi N}{60 \cdot Z_n} \quad (12)$$

여기서 n 은 커터의 회전수(rpm)이며, Z_n 은 정면커터의 날수를 나타낸다. 칩두께 모듈레이션(chip thickness modulation)은 절삭시 발생하는 칩두께의 변화를 나타내며 안쪽 모듈레이션과 바깥쪽 모듈레이션의 차로써 구할 수 있다.

$$X_c(i, \Phi) = X_1(i, \Phi) - X_0(i, \Phi) \quad (13)$$

순간 동적성분(instantaneous dynamic component)은 순간 칩두께모듈레이션에 동절삭력계수(K_c)의 곱으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dF(i, \Phi) = K_c \cdot X_c(i, \Phi) \quad (14)$$

순간 동절삭력(instantaneous dynamic cutting

force)은 정절삭력(static force)과 순간 동적성분의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$DF(i, \Phi) = F(i, \Phi) + dF(i, \Phi) \quad (15)$$

여기서 $F(i, \Phi)$ 는 진동이 없는 정상상태의 정절삭력을 나타내고, $dF(i, \Phi)$ 는 식(14)에서 구한 순간 동적성분을 나타낸다.

2.3 절삭시스템 모델링

공구동력계와 지그(jig) 그리고 시편을 합친 질량을 공작물이라 할 때, 수직밀링 머신에서 테이블과 스피들 헤드를 완전강체로 가정하고 공작물과 공구의 운동만을 고려하면 정면밀링 절삭시스템을 Fig. 3과 같이 X, Y, Z 방향으로 각각 2자유도계로 표시할 수 있다. 이 절삭시스템에서 M_1 은 공구를 나타내고, M_2 는 공작물을 나타낸다. K_{i1}, C_{i1} 은 각 방향에서 공구와 스피들 헤드사이의 강성 및 감쇠계수를 나타내고, K_{i2}, C_{i2} 는 공작물 부분과 공구사이의 강성 및 감쇠계수, K_{i3}, C_{i3} 는 공작물 부분과 테이블 사이의 강성 및 감쇠계수를 각각 나타낸다. 여기서 $i=1$ 은 X 방향, $i=2$ 는 Y 방향, $i=3$ 은 Z 방향을 나타낸다.

한 방향의 절삭력이 실제로 다른 방향의 시스템에 영향을 미치지만 그 영향은 작기 때문에 $X, Y,$

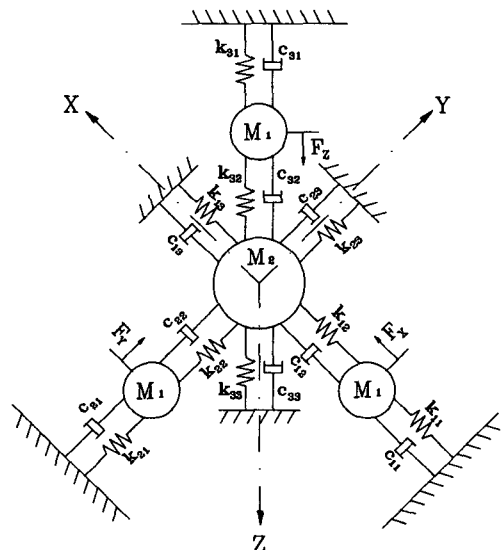


Fig. 3 Vibratory model in the three directional reference system

Z 세 방향을 각각 분리하여 해석할 수 있다. 이 때 절삭시스템의 운동방정식은 다음과 같다. 이 때 F는 초기 진동이 없는 정상상태에서는 정절삭력이고 다음부터는 동절삭력이다.

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = [F] \quad (16)$$

여기서

$$X = \{x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2\}^T$$

$$F = \{F_x, 0, F_y, 0, F_z, 0\}^T$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} + C_{12} & -C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_{12} & C_{12} + C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{12} + C_{22} & -C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{22} & C_{22} + C_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{31} + C_{32} & -C_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{32} & C_{32} + C_{33} \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} + K_{12} & -K_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{12} & K_{12} + K_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{21} + K_{22} & -K_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{22} & K_{22} + K_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{31} + K_{32} & -K_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{32} & K_{32} + K_{33} \end{bmatrix}$$

3. 실험장치 및 방법

본 논문에서 사용된 공작기계는 범용 수직 밀링머시인이고, Fig. 4와 같이 테이블 위에 공구동력계를 부착하고, 그 위에 지그(jig)를 놓고 시편을 지그에 고정하였다. 가속도계는 공구동력계 옆에 부착하였다.

정면절삭을 행할 때 발생하는 절삭력과 가속도를 Charge Amplifier에서 증폭시킨 후 A/D Converter를 통해서 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 절삭력과 가속도를 MARV 모델에 적용하여 절삭시스템을 모델링하였고, 모델링된 절삭시스템으로부터 구한 동절삭력과 실험에서 측정된 절삭력을 비교하였다. 주파수 변환(fourier transform)을 통하여 모델링에서 구한 동절삭력과 측정된 값을 서로 비교분석하였다.

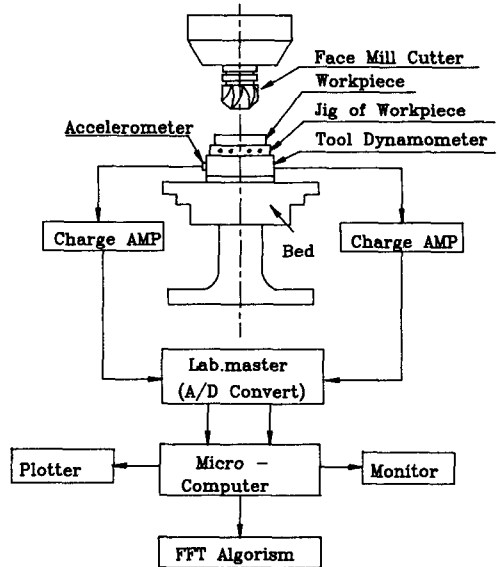


Fig. 4 Schematic diagram for experimental set-up

시편 및 사용된 공구의 사양과 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 X, Y, Z 세 방향에 대한 각 절삭시스템의 특성을 구하기 위하여 실험에서 측정된 절삭력과 가속도를 MARV 모델에 적용하였다. 변위를 사용하지 않고 가속도를 사용한 이유는 가속도를 이용할 때 고유진동수와 감쇠계수의 계산이 보다 적합함을 시뮬레이션으로 확인 하였기 때문이다. 먼저 X방향의 모델링 과정을 상세하게 기술하고자 한다.

Fig. 5와 같이 실험에서 측정된 힘 F_x 를 입력으로 하고, 가속도 A_x 를 출력으로 하여 MARV(4) 모델에 적용하여 식(6)과 식(7)에서 X방향 절삭시스템의 감쇠비와 고유진동수를 구한 결과는 Table 2와 같다. 여기서 MARV(4)는 4차 MARV를 의미한다.

절삭시스템을 정확하게 2자유도로 모델링하는 것은 상당히 힘들다. 따라서 본 논문에서는 공구에 대한 공작물의 질량비를 계산하여 먼저 질량행렬을 결정한 후 실험에서 구한 고유진동수와 감쇠비를 가지도록 감쇠행렬과 강성행렬을 결정하여 수직밀링 머신을 2자유도 진동시스템으로 모델링하였다.

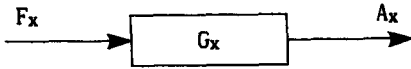


Fig. 5 X-direction cutting system

$$\begin{bmatrix} 2.393E7 & -1.923E6 \\ 1.599E8 & 2.393E7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Table 1에 나타난 사양으로 M_1 에 대한 M_2 의 질량비를 구하면 1대 7이 되므로 $M_1=1, M_2=7$ 로 하여 먼저 질량 행렬을 결정하고 실험에서 구한 표 2의 고유진동수와 감쇠비를 가지도록 강성 행렬과 감쇠 행렬을 결정하여 X방향 절삭시스템을 식(17)과 같이 구하였다. 이때 $F_x(t)$ 는 진동이없는 정상상태에서는 X방향의 정절삭력을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1433 & -477 \\ -477 & 1443 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix} +$$

X방향 절삭시스템의 감쇠행렬계수와 강성행렬계수가 제대로 결정되었는지 알아보기 위하여 식(17)의 계수들을 이용하여 이론적으로 감쇠비와 고유진동수를 구하였다. 모델링한 절삭시스템의 계수로부터 이론적으로 구한 결과를 실험에서 구한 표 2의 결과와 비교하여 Table 4에 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 식(17)의 계수로부터 구한 결과와 실험에서 구한 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

다음으로 MARV 모델을 이용하여 절삭시스템의 특성을 알아보는데 MARV 모델의 유용성을 알아

Table 1 Specification of experimental set-up and cutting condition

Milling machine	WMV-1100(1100×280(mm ²))
Face cutter	대한중석 KT식 Cutter (2.1 kg)
Insert	대한중석 SPGN120308 P20
Workpiece	S45C(150×100×50(mm ³)) (5.8 kg)
Jig of Workpiece	ss41 (1.7 kg)
Tool-dynamometer	KISLER Type 9257A (6.9 kg)
Accelerometer	One Sokki, VP-36,9257A
A/D converter	Conversion rate : 30 KHz
	Resolution : 12 bit
	Input range : ±10[V]
Charge amplifier	KISTLER Type 5008E DPM-2300
Milling type	Up-Milling
Spindle rotational speed	370 rpm
Feed	87 mm/min
Depth of cut	1 mm
Width of workpiece	46 mm
Number of insert	8

Table 2 Global characteristics of X-direction by experiment

	1 st mode		2 nd mode	
	f ₁ (HZ)	ζ ₁	f ₂ (HZ)	ζ ₂
실험결과	731.08	0.0997	384.98	0.149

Table 3 MARV(4) model parameters

	Φ_{111}	Φ_{112}	Φ_{113}	Φ_{114}
X_{1t}	-4.275E-1	-6.947E-1	-3.370E-1	-4.420E-1
X_{2t}	-4.275E-1	-6.947E-1	-3.370E-1	-4.420E-1
	Φ_{121}	Φ_{122}	Φ_{123}	Φ_{124}
X_{1t}	7.697E-5	-1.173E-4	6.359E-5	-7.330E-10
X_{2t}	-2.707E-4	-6.312E-4	-1.847E-4	1.414E-9

Table 4 Comparison between the global characteristics of system from experiment and those from model in X-direction

		1st mode		2nd mode	
		f_1 (HZ)	ζ_1	f_2 (HZ)	ζ_2
실험결과		731.08	0.0998	384.98	0.149
모 델		731.08	0.0998	384.98	0.149
MARV(4)	X_{1t}	730.10	0.0994	384.84	0.149
MARV(4)	X_{2t}	730.10	0.0994	384.84	0.149

보기 위해 식 (17)의 X방향 절삭시스템에 공구동력 계로 측정된 실측 절삭력을 M_1 에 가진하여 Wilson- θ 방법⁽¹⁴⁾으로 수치적분하여 M_1, M_2 의 변위를 0.0005 초 간격으로 계산하여 1000개의 데이터를 각각 구하였다. 수치적분한 변위를 MARV(4)모델에 적용하여 구한 모델계수는 Table 3과 같고, 이 모델계수로부터 식(6)과 식(7)을 이용하여 감쇠비와 고유진동수를 구하여 Table 4에 나타내었다.

또한, Table 3의 모델계수를 식(8)에 대입하여

가진력에 대한 질량 M_1 의 MARV(4) 모델의 전달함수를 Fig. 6에 나타내었고, 식(17)의 계수들을 이용하여 가진력에 대한 질량 M_1 의 전달함수를 이론적으로 구하여 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 8은 가진력에 대한 질량 M_2 의 MARV(4)모델의 전달함수를 나타내고, Fig. 9는 가진력에 대한 질량 M_2 의 이론적으로 구한 전달함수를 나타낸다. Table 4에서 보는 바와 같이 MARV(4)모델로부터 구한 감쇠비와 고유진동수는 모델링한 시스템의 계수들로부터 구

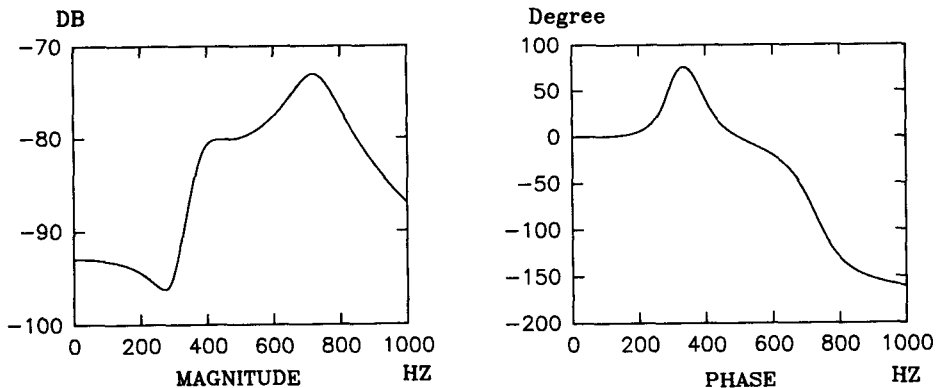


Fig. 6 Frequency response function H(1, 1) by MARV(4) model

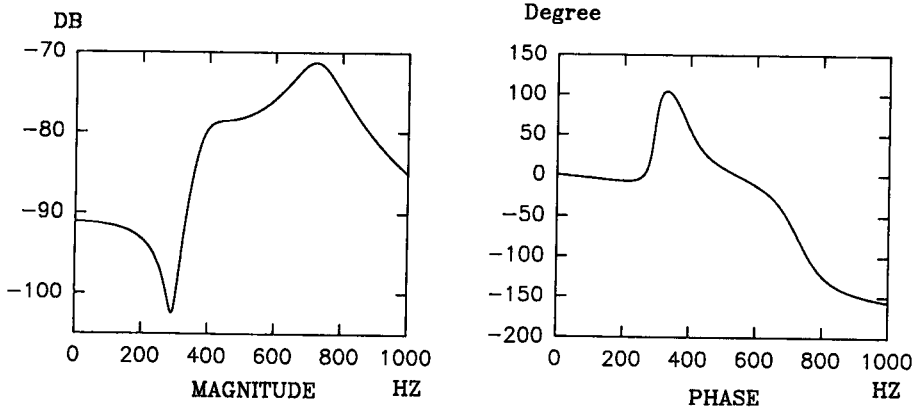


Fig. 7 Theoretical frequency response function $H(1, 1)$ of modeled system

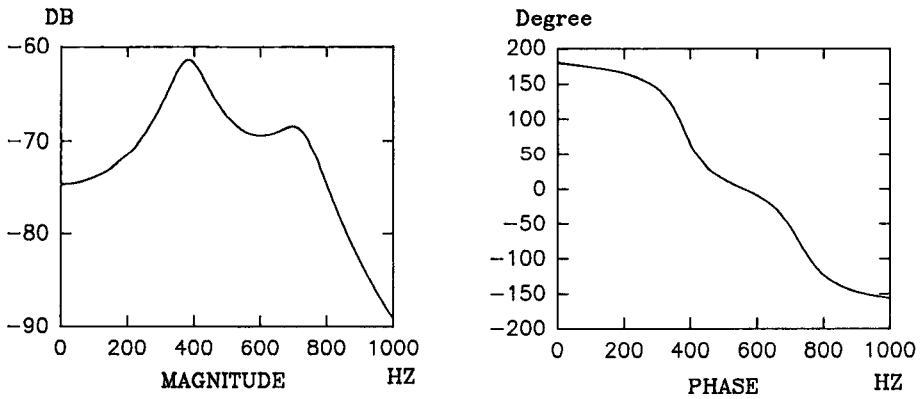


Fig. 8 Frequency response function $H(2, 1)$ by MARV(4) model

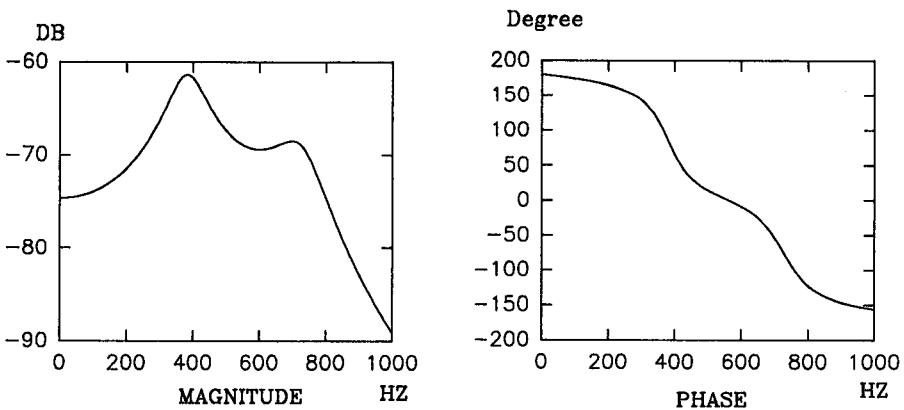


Fig. 9 Theoretical frequency response function $H(2, 1)$ of modeled system

한 값과 비교적 잘 일치하고 있으며, 전달함수를 비교하여 보면 Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 질량 M_1 의 전달함수는 약간의 차이를 보이거나 전체적으로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Y, Z 방향에 대한 모델링도 X 방향과 같이 수행할 수 있다. 모델링한 시스템의 계수로 부터 구한 이론적인 계산값과 MARV(4) 모델로부터 구한 값을 비교하여 본 결과 X 방향과 마찬가지로 비교적 잘 일

Table 5 Comparison between the global characteristics of system from experiment and those from model in Y-direction

		1st mode		2nd mode	
		f ₁ (HZ)	ζ ₁	f ₂ (HZ)	ζ ₂
실험결과		731.47	0.1092	369.53	0.1655
모 델		731.47	0.1092	369.53	0.1655
MARV(4)	X _{1t}	713.47	0.1089	369.41	0.1654
MARV(4)	X _{2t}	713.47	0.1089	369.41	0.1654

Table 6 Comparison between the global characteristics of system from experiment and those from model in Z-direction

		1st mode		2nd mode	
		f ₁ (HZ)	ζ ₁	f ₂ (HZ)	ζ ₂
실험결과		707.75	0.1474	402.50	0.1420
모 델		707.75	0.1474	402.50	0.1420
MARV(4)	X _{1t}	706.98	0.1479	402.46	0.1482
MARV(4)	X _{2t}	706.98	0.1479	402.46	0.1482

치하였다.

Y방향 절삭시스템은 식(18)과 같고, 결과의 비교는 Table 5와 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_1(t) \\ \dot{Y}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1531 & -510 \\ -510 & 1531 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.274E7 & -1.617E6 \\ 1.501E8 & 2.274E7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_y(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Z에 대한 절삭시스템은 식(19)와 같고, 결과의 비교는 Table 6에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_1(t) \\ \dot{Z}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1775 & -591 \\ -591 & 1775 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 2.337E7 & -2.617E6 \\ -1.295E8 & 2.337E7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

모델링된 X, Y, Z 절삭시스템에 질량 1 축, 공구에 정절삭력(static force)을 각 방향으로 가진하여 Wilson-θ법으로 수치적분하여 공구와 공작물의 변위를 구한다. X방향에 대한 공구의 변위는 Fig. 10에 나타내었고, 공작물의 변위는 Fig. 11에 나타내었다. 공구와 공작물의 상대변위로 부터 안쪽 모듈레이션(inner modulation)과 바깥쪽모듈레이션(outer modulation)을 구하고, 두 모듈레이션의 차가 되는 칩두께 모듈레이션(chip thickness modulation)을 식(13)을 이용하여 구한다. X방향

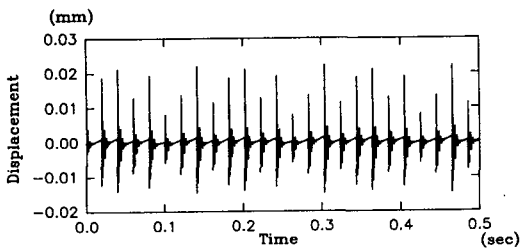


Fig. 10 Displacement of mass 1 in X-direction

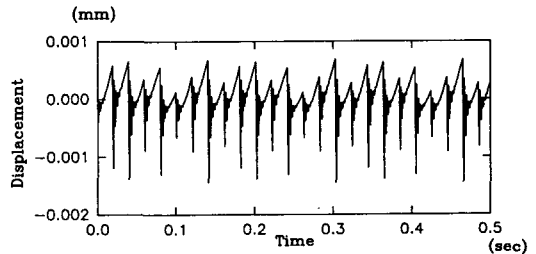


Fig. 11 Displacement of mass 2 in X-direction

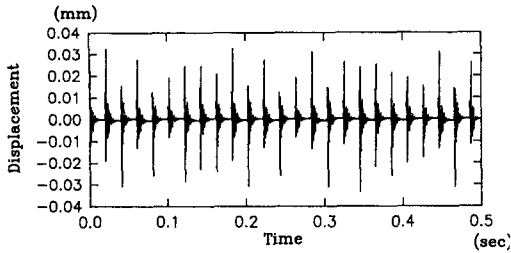


Fig. 12 Chip thickness modulation in X-direction

의 칩두께 모듈레이션은 Fig. 12에 나타내었다.

칩두께 모듈레이션과 동절삭력계수의 곱으로 표시되는 동적성분의 합인 동절삭력(dynamic force)은 식(15)에 의하여 구할 수 있다.

Fig. 13은 X방향의 절삭력들을 나타내었는데, Fig. 13의 (a)는 절삭조건으로부터 칩단면적과 비절삭저항의 곱으로 구한 정절삭력을 나타내었다. Fig. 13의 (b)는 Fig. 13(a)의 정절삭력을 식(17)로

주어지는 X방향 절삭시스템의 공구에 가진하여 구한 칩두께 모듈레이션과 동절삭력 계수를 곱하여 구한 동적성분을 나타내었다. Fig. 13의 (c)는 (a)의 정절삭력과 (b)의 동적성분을 중첩하여 구한 예측 동절삭력을 도시하였고, Fig. 13의 (d)는 공구 동력계로 부터 측정된 X방향의 절삭력을 나타내었다.

그림에서 보는 것과 같이 정절삭력(a)와 측정절삭력(d)는 (-)영역에서 특히 큰 차이를 볼 수 있다. 그러나 동적인 특성이 고려된 절삭시스템의 동절삭력과 측정절삭력은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 X방향의 절삭력을 주파수영역으로 나타낸 것으로, Fig. 14의 (a)는 정절삭력, (b)는 동적성분, (c)는 예측 동적삭력을, 그리고 (d)는 측정절삭력을 각각 주파수분석(fourier transforms)하였다. Fig. 14의 (b)에서 보는 것과 같이 동적성분은 공작기계 구조의 고유진동수 부근에서 나타나고 있는데, 이 동적성분은 정밀가공에 있어

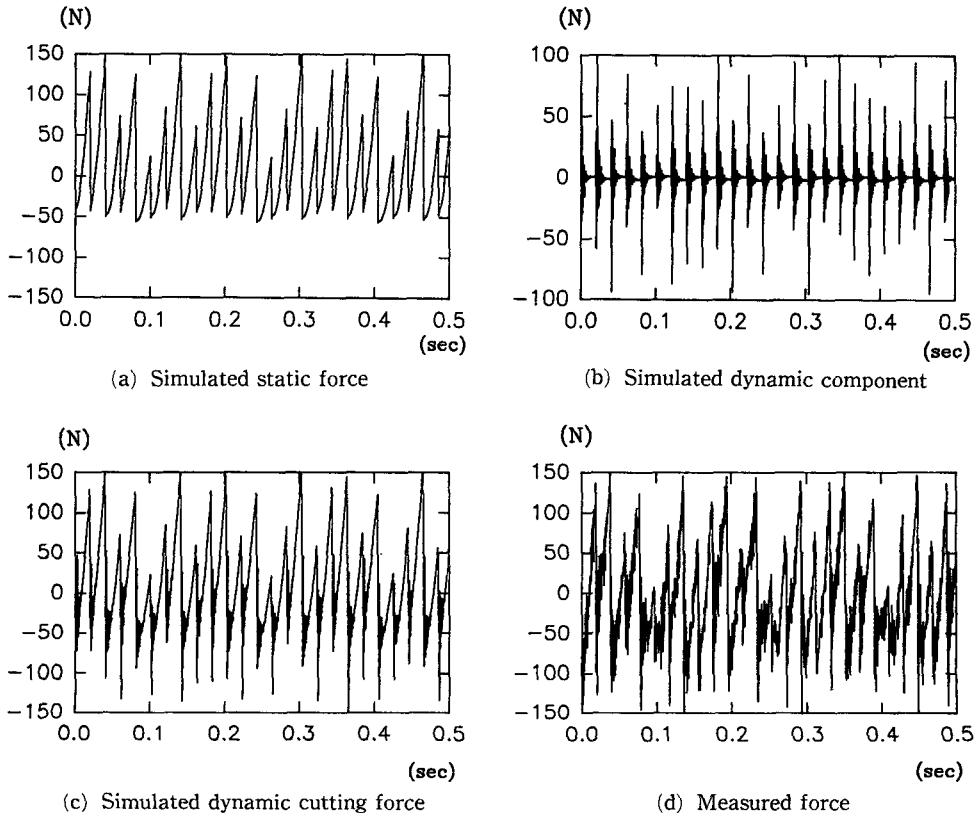


Fig. 13 X-direction forces

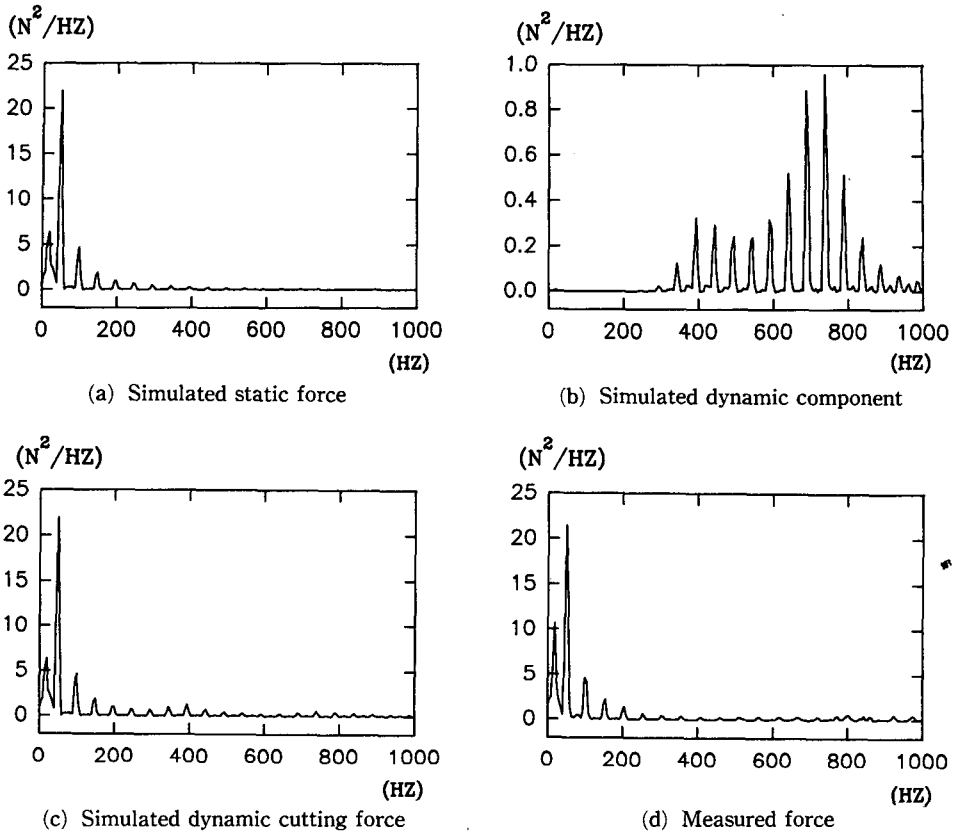


Fig. 14 Spectral density in X-direction

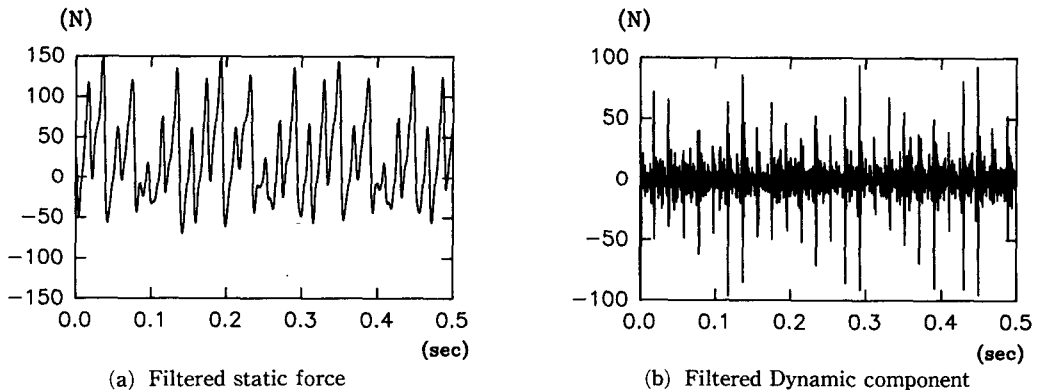


Fig. 15 Filtered forces in X-direction

서 공작기계를 불안정하게하고 가공물의 표면조도를 나쁘게하는 요인이 되는데, 주파수영역에서 볼 때는 인서트 주파수(insert frequency)에 비해 매우 작은 값에 불과하나 Fig. 13의 (a)와 (c)를 비교할 때 시간영역에서 피크값의 큰 차이를 나타내

고 있다.

Fig. 15는 시뮬레이션한 정절삭력과 동절삭력 성분이 정확한 지를 알아보기 위하여 Fig. 13의 (d)에 나타난 공구동력계로 부터 측정된 X방향의 절삭력을 200 Hz의 저역통과 필터를 거친 정절삭력

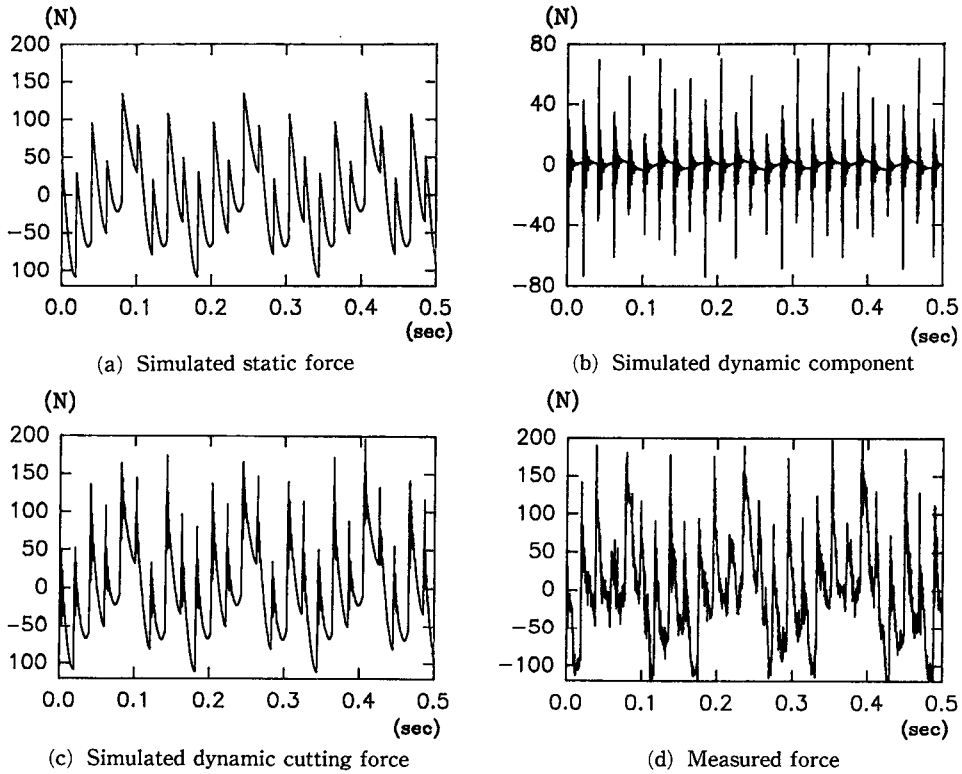


Fig. 16 Y-direction forces

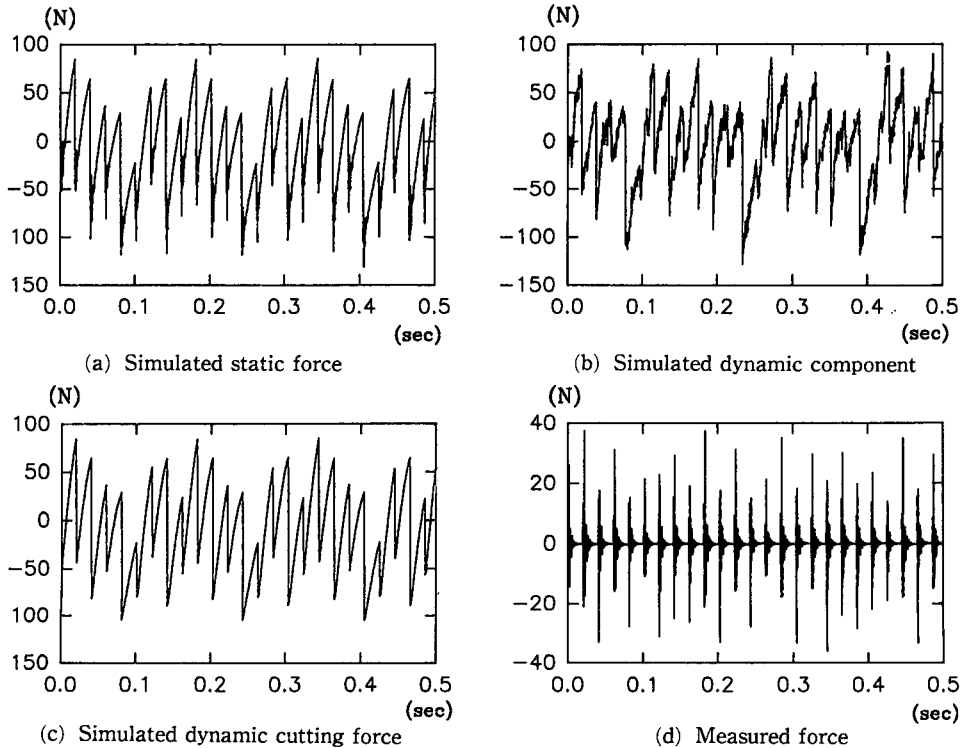


Fig. 17 Z-direction forces

을 Fig. 15의 (a)에 나타내었고, 200~900 Hz까지의 대역통과필터를 거친 동절삭력 성분을 Fig. 15의 (b)에 나타내었다. Fig. 13과 Fig. 15에서 보는 바와 같이 필터된 정절삭력과 동절삭력 성분은 시물레이션한 것과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 Y방향의 절삭력들을 나타내었는데, Fig. 16의 (a)는 X방향과 마찬가지로 절삭조건에서 구한 정절삭력을 나타내었다. Fig. 16의 (b)는 Fig. (a)의 정절삭력을 식(18)의 Y방향 절삭시스템의 공구에 가진하여, X방향과 마찬가지로 칩두께 모델레이션으로 부터 동적성분을 구하여 도시하였다. Fig. 16(c)는 Fig. 16(a)의 정절삭력과 (b)의 동적성분을 중첩하여 구한 예측 동절삭력을 나타내었고, Fig. 16(d)는 공구동력계로 부터 측정된 Y방향의 절삭력을 나타내었다.

X방향과 마찬가지로 정절삭력과 측정절삭력과는 진동에 의한 동적성분의 차이를 볼 수 있다. 동적

인 특성이 고려된 모델링한 절삭시스템의 동절삭력과 측정절삭력은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17은 Z방향의 절삭력들을 나타내었는데, Fig. 17(a)는 정절삭력, (b)는 동적성분 (c)는 동절삭력, (d)는 측정절삭력을 나타내었다.

Z방향의 정절삭력은 다른 방향에 비해 작고, 동적성분도 X, Y에 비해 상당히 작아서 정절삭력과 측정된 절삭력과의 차이는 다른 방향에 비해 상당히 작음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Z방향에서는 진동이 다른 방향에 비해 작을 뿐만 아니라 칩두께의 변화도 별로 없기 때문이다.

Fig. 18은 앞에서 구한 X, Y, Z방향의 동적성분을 비교하기 위하여 동일한 그림크기로 도시하였는데, 그림에서 보는 것과 같이 상향절삭에서는 X방향의 동적성분이 가장 크고 Z방향의 동적성분이 가장 작음을 알 수 있다. 각 동적성분은 한 인서트 가공물을 이탈하는 순간에 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있고, 이렇게 발생된 절삭력이 순간적으로 전체 절삭력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

MARV 모델을 이용하여 수직밀링머신의 절삭시스템을 모델링하여 동절삭을 시물레이션하고 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정면밀링에서 측정된 가속도를 출력으로 하고 절삭력을 입력으로 하여 MARV(4) 모델에 적용하여 고유진동수와 감쇠계수를 구하였으며, MARV(4) 모델에서 구한 이 고유진동수와 감쇠계수를 이용하여 X, Y, Z방향의 절삭시스템을 2자유도계로 각각 모델링할 수 있었다.

(2) 절삭과정이 폐회로 시스템으로 이루어진 동절삭력 모델을 개발하였고, 이 모델로 부터 동적성분을 예측할 수 있었고, 정절삭력과 동적성분을 중첩하여 동절삭력을 예측할 수 있었다.

(3) 상향절삭에서 절삭 중 발생하는 동적성분은 X방향이 가장 크고 Z방향이 가장 작으며 인서트가 이탈하는 순간에 가장 크게 발생됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Pandit, M. and Wu, S. M. "Time Series And

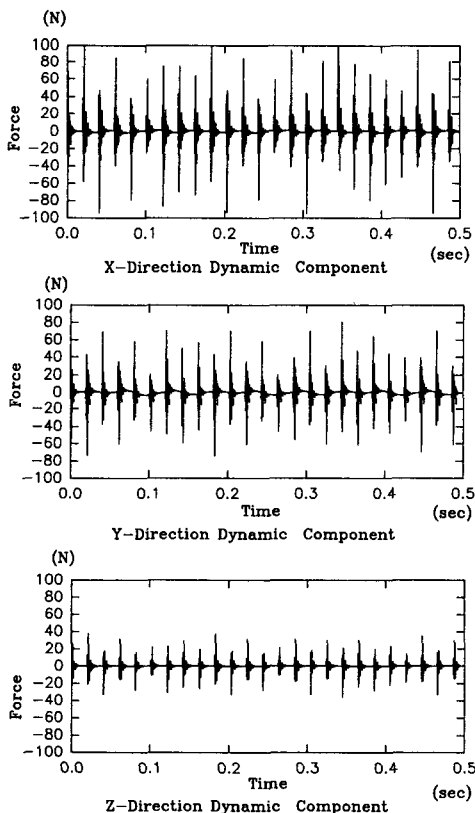


Fig. 18 Simulated dynamic components of three directions

- System Analysis With Applications," John Wiley and Son, USA, 1983.
- (2) Ahn, T. Y., Eman, K. F. and Wu, S. M., 1986, "Identification of the Transfer Function of Dynamic Cutting Process-A Comparative Assessment," *Int. J. of MTDR*, Vol. 25, No. 1, pp. 75~90.
- (3) Cho, D. W., 1986, "A New Multi-Input Modal Analysis and Three Dimensional Cutting Dynamics Identification Method Applied to Milling Operation," Ph. D. Thesis, Univ. of Wis-Madison.
- (4) Gygax, P. E., 1979, "Dynamics of Single Tooth Milling," *Annals of CIRP*, Vol. 28, Jan., pp. 65~71.
- (5) Gygax, P. E., 1980, "Experimental Full Cut Milling Dynamics," *Annals of CIRP*, Vol. 29, Jan., pp. 61~66.
- (6) Ruzhong, Z and Wang, K. K., 1983, "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling," *Annals of CIRP*, Vol. 32/1, pp. 21~26.
- (7) Fu, H. J., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., 1984, "A Mechanistic Model for Prediction of the Force System in Face Milling Operations," *Trans of ASME, J. of Engr for Ind.*, Vol. 106, Feb., pp. 81~88.
- (8) Kline, W. A. and Devor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in Milling," *J. of MTDR*, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123~140.
- (9) Kline, W. A., Devor, R. E. and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. of MTDR*, Vol. 22, No. 1, pp. 7.
- (10) Lee, S. J. and Kapoor, S.G., 1986, "Cutting Process Dynamics Simulation for Machine Tool Structure Design," *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 108, May, pp. 68~74.
- (11) 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.
- (12) Nigm, M. M., Sadek, M. M. and Tobias, S. A., 1977, "Determination of Dynamic Cutting Coefficients from Steady State Cutting Data," *Int. J. of MTDR*, Vol. 17, pp. 19~37.
- (13) Opitz, H. and Bernardi, F., 1970, "Investigation and Calculation of the Chatter Behavior of Lathes and Milling Machines," *Annals of the CIRP*, Vol. 17, pp. 335~343.
- (14) Wilson, B., 1976, "Numerical Methods in Finite Element Analysis," pp. 319~322.
- (15) 박희덕, 양민양, 1989, "불 엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제13권, 제3호, pp. 433~422.
- (16) 이우영, 신호철, 1989, "전단유동응력에 의한 정면밀링의 절삭력 해석," *대한기계학회논문집*, 제13권, 제 6 호, pp. 1170~1182.
- (17) 김희술, 이상석, 이병철, 1992, "정면밀링작업에서 동절삭력이 해석," *대한기계학회논문집*, 제16권, 제12호, pp. 1807~1815.