

금형 가공기의 엔드밀 가공 및 구조 동특성 해석

이 신 영*, 김 성 겔**, 이 장 무***

Analyses of Structural Dynamic Characteristics and End Milling in a Vertical Machining Center

S. Y. Lee*, S. G. Kim**, J. M. Lee***

ABSTRACT

In a high speed and high precision vertical machining center, chatter vibration is easily generated due to unbalanced masses in rotating parts and changes of cutting forces. In this paper, modal test is performed to obtain modal parameters of the vertical machining center. In order to predict the cutting forces of end-milling process for various cutting conditions, a mathematical model is given and this model is based on chip load, cutting geometry, and relationship between cutting forces and the chip load. Specific cutting constants of the model are obtained by averaging forces of cutting tests. The interactions between the dynamic characteristics and cutting dynamics of the vertical machining center make the primary and the secondary feedback loops, and we make use of the equations of system to predict the chatter vibration. The chatter prediction is formulated as linear differential-difference equations, and simulated for several cases. Trends of vibration as radial and axial depths of cut are changed are shown and compared.

Key Words : Vertical Machining Center(금형가공기), Chatter Analysis(채터 해석), End Mill Process(엔드밀 공정), Structural Dynamic Characteristics(구조동특성), Cutting Dynamics(절삭동역학), Feedback(피드백)

1. 서 론

가공공정에 있어서 이송량 혹은 절삭 깊이는 채터(chatter)로 인하여 종종 제한을 받게 된다. 채터 현상은 공구와 공작물 사이에 존재하는 진동 운동의 결과이고 공작물의 표면에 불규칙한 패턴을 초래한다¹⁾. 공작기계와 공작물은 매우 복잡한 동특성을 갖는 구조계를 이루고,

공작기계의 거동을 모사(模寫)하기 위해서는 많은 인자들이 필요하게 된다. 채터는 대부분의 절삭 공정이 중첩 절삭을 포함하므로 발생되고, 계가 기본적으로 안정적이라 할지라도 공작물이나 공구의 행정 또는 회전에 의하여 굴곡진 표면의 가공으로부터 유래되는 강제진동이 이전의 진동을 확대시킬 수 있다.

고속 고정밀 금형가공기에 있어서 회전부의 불평형질량

* 정회원, 군산대학교 기계공학부
 ** 정회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
 *** 정회원, 서울대학교 기계설계학과

이나 절삭력의 변동에 의하여 chatter 진동이 쉽게 발생된다. 금형가공기의 chatter 특성을 해석하기 위해서는, 기계 구조의 동적 특성과 절삭 동역학을 인지하는 것이 필요하다⁽²⁾. 다양한 절삭 조건에 대한 밀링 공정의 절삭력을 예측하기 위하여 많은 방법들이 연구되어 왔다. 나선 엔드밀에 의한 가공에 대하여 일정한 원주절삭저항과 절삭력 비 상수가 사용되었고⁽³⁾, Altintas 등⁽⁴⁾과 Minis 등⁽⁵⁾은 직선 엔드밀 가공에 있어서 일정한 비절삭압력과 절삭력 비를 제시하였다. Targn은 증분식 접선력에 대한 비절삭압력과 접선방향 힘에 대한 반경방향 힘의 비율을 회전당 평균 칩 두께의 지수함수로써 표현하였다⁽⁶⁾. Smith 등⁽⁷⁾은 일정한 절삭강성을 도입하였고 반경방향 힘을 접선방향 힘에 비례한다고 고려하였다. 칩 부하와 절삭 기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에 기초를 둔 수학적 모델이 주어졌다⁽⁸⁾. 이 모델의 비절삭상수는 절삭실험에서 얻어진 평균 절삭력으로부터 얻어진다. 금형가공기의 경우에도 동특성과 절삭동역학 사이의 상호작용에 의해 1차 피드백 루프(feedback loop)와 2차 피드백 루프가 구성되고, chatter 진동을 예측하기 위한 계의 방정식에 사용되어 진다^(2,4,5,7). chatter 예측은 미분-차분 방정식으로 형성된다.

본 논문에서는, 금형가공기의 동적 성능을 예측/평가하기 위한 방안으로써, 금형가공기의 chatter 해석에 대한 해석적 모델을 제시하였으며, 이 모델은 구조동역학과 절삭동역학의 상호작용에 의한 관계를 해석한다. 절삭동역학 모델은 칩 부하와 절삭 기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에 기초를 두고 있다. 이 모델을 가지고 엔드밀 공정의 절삭력을 예측하기 위하여 다양한 절삭 조건에 대하여 절삭실험을 수행하였다. 이 모델의 비절삭상수는 절삭실험에서 얻어진 평균 절삭력으로부터 얻어진다. 또한 구조동역학에 대한 해석 모델 수립 방안으로서는 금형 가공기의 모달 상수를 구하기 위하여 모달 실험을 수행하였다. 특정한 절삭 조건하에서의 동적 변위를 해석하는 프로그램을 개발하였고, 여러 가지 절삭조건에 대하여 동적 변위를 계산하였다.

2. 금형가공기의 구조동역학

금형가공기의 구조는 공작물이 설치되는 테이블 부분이 강성이 크고 주축-공구계가 상대적으로 가장 유연한 부분이므로 2개의 직교모드로 표현될 수 있다고 가정한다. 이 가정은 보통의 밀링머신에 대해서도 일반적으로 적용된

다. 금형가공기의 구조동역학은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} + b_1 \dot{x} + k_1 x &= F_x(t) \\ m_2 \ddot{y} + b_2 \dot{y} + k_2 y &= F_y(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 m_1, b_1, k_1 축 x 방향(이송방향)의 질량, 감쇠, 강성을 나타내고 m_2, b_2, k_2 는 y 축 방향(이송방향과 직교)의 질량, 감쇠 및 강성을 나타낸다. 절삭동역학에 의하여 $F_x(t)$ 와 $F_y(t)$ 를 구하면 계의 운동방정식을 풀 수 있다.

3. 금형가공기의 절삭동역학

절삭력 예측의 기본 요소는 공구에 작용하는 칩 부하(chip load)이다. 칩 두께에 대하여 제안된 많은 식 중에서 가장 기본적인 것은 (2) 식이다.

$$t_c = f \sin \beta \quad (2)$$

여기에서 t_c 는 순간적인 칩두께, f 는 날당 이송이고 β 는 절삭중 공구날의 각 위치(angular position)을 나타낸다. 임의의 순간에 대한 엔드밀 칩 부하의 총합은 공구의 축을 따라서 분할된 얇은 원판 형상의 각각의 칩 부하를 합한 것이다. 밀링가공에는 상향절삭과 하향절삭이 있는데 금형가공 작업에 있어서 하향절삭이 일반적으로 사용되므로 본 논문에서는 하향절삭에 대하여 고려한다.

절삭력은 칩부하에 비례하는 접선절삭력과 접선절삭력에 비례하는 반경방향 절삭력으로 구성된다.

$$\Delta F_{tan} = K_{T0} D_z t_c \quad (3)$$

$$\Delta F_{rad} = K_R \Delta F_{tan} \quad (4)$$

여기에서 ΔF_{tan} 는 해당하는 날에 대한 접선 방향 힘, ΔF_{rad} 는 날에 대한 반경방향 힘, D_z 는 미소절삭폭, t_c 는 식 (2)의 칩두께, K_{T0} 와 K_R 는 실험에서 구해지는 상수들이다.

비절삭력(specific cutting force) K_{T0} 는 칩두께에 따라서 변화하지만 개략적으로 다음과 같이 사용할 수 있다.

$$\Delta F_{tan} = K_T D_z f \sin \beta \quad (5)$$

식 (5)의 비절삭 상수 K_T 는 이송, 반경방향절삭깊이, 축방향 절삭깊이 등의 각종 절삭조건에 따라 변한다. 반지름이 Rad , 엔드밀의 날 수가 N_f 이고 나선각이 α_{hx} 인 공구에 의한 하향절삭의 경우에 대하여 적용하면

$$\beta(i, k, t) = -\theta(t) + \frac{2\pi}{N_f}(k-1) + (i - \frac{1}{2})D_z \cdot \frac{\tan \alpha_{hx}}{Rad} \quad (6)$$

여기에서 i 는 축방향 미소원판의 번호, t 는 경과시간, k 는 날의 번호이다. 이 $\beta(i, k, t)$ 값 중에서 절삭범위 안에 해당하는 경우만이 절삭력에 기여하게 된다. 접선방향과 반경방향은 전체좌표계 X, Y 로 분해될 수 있고, 그 합이 절삭력이 된다.

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{-\Delta F_{rad}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)] + \Delta F_{tan}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)]\} \quad (7)$$

$$F_y(t) = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{+\Delta F_{rad}(i, k, t) \cos[\beta(i, k, t)] + \Delta F_{tan}(i, k, t) \sin[\beta(i, k, t)]\}$$

특정한 절삭조건(주어진 공구에 대한 반경방향 및 축방향 절삭깊이, 이송)에 대하여 평균절삭력을 구하면, 평균절삭력은 K_R, K_T 의 함수이므로 1회의 실험에서 1쌍의 K_R, K_T 를 구할 수 있다. 이송 (f)과 반경방향 절삭깊이 (RD), 축방향 절삭깊이 (AD)를 각각 변화시켜 가면서 최소자승법(least square method)에 의하여, 이송, 반경방향 절삭깊이 및 축방향 절삭깊이의 함수 형태로 K_T 와 K_R 을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_T = a_0 + a_1RD + a_2AD + a_3f + a_4RD \cdot AD + a_5f \cdot RD + a_6f \cdot AD + a_7RD^2 + a_8AD^2 + a_9f^2 \quad (8)$$

$$K_R = b_0 + b_1RD + b_2AD + b_3f + b_4RD \cdot AD + b_5f \cdot RD + b_6f \cdot AD + b_7RD^2 + b_8AD^2 + b_9f^2$$

4. 동적 절삭 상태

동적 절삭 상태(dynamic cutting state)에서는 절삭력으로 인하여 계의 거동이 발생하고, 다시 이것이 절삭깊이에 영향을 미쳐서 절삭깊이에 변화를 주게 된다⁽²⁾. 우선 再生(regeneration)이 없는 경우를 고려하면, 다음

식 (9)와 같이 칩두께의 변화를 나타내는 1차 피드백 편차 u_p 에 대한 식이 주어진다.

$$u_p(i, k, t) = +x(t) \sin \beta(i, k, t) - y(t) \cos \beta(i, k, t) \quad (9)$$

여기에서 陽(+)의 부호는 상대진동시 칩두께가 증가함을, 陰(-)의 부호는 상대진동시 칩두께가 감소함을 나타낸다.

칩두께는 앞의 날에 의하여 남겨진 양에 의해서도 변화하며 이것을 재생이라고 한다.

$(K-1)$ 날에 의하여 남겨진 양은 T 초 후에 k 번째 날이 이 위치에 올 때 k 번째 날의 칩두께를 증가시킨다. 이것을 재생 피드백(regeneration feedback)이라고 한다. 재생 피드백에 의한 편차, 즉 재생편차 u_R 을 수식으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$u_R(i, k, t) = -\mu x(t-T) \sin \beta(i, k, t) + \mu y(t-T) \cos \beta(i, k, t) \quad (10)$$

여기에서 $T = \frac{60}{n \cdot N_f}$

칩두께의 총편차(total deviation)는 1차 및 재생편차의 합이고, 순간적인 칩두께는 공칭 칩두께와 총편차의 합이다.

$$t_c(i, k, t) = f \sin \beta(i, k, t) + \{u_p(i, k, t) + u_R(i, k, t)\} \quad (11)$$

$$= [\sin \beta(i, k, t), \cos \beta(i, k, t)] \begin{Bmatrix} x(t) - \mu x(t-T) + f \\ -y(t) + \mu y(t-T) \end{Bmatrix}$$

절삭력을 정리하면 다음의 식 (12)와 같이 된다.

$$F_x(t) = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{-K_R K_T D_z \sin \beta(i, k, t) + K_T D_z \cos \beta(i, k, t)\} t_c(i, k, t)$$

$$F_y(t) = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{+K_R K_T D_z \cos \beta(i, k, t) + K_T D_z \sin \beta(i, k, t)\} t_c(i, k, t) \quad (12)$$

따라서

$$\begin{Bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{Bmatrix} = K_T D_z \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \begin{bmatrix} -K_R \sin^2 \beta + \cos \beta \sin \beta & -K_R \sin \beta \cos \beta + \cos^2 \beta \\ K_R \cos \beta \sin \beta + \sin^2 \beta & K_R \cos^2 \beta + \sin \beta \cos \beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} +x(t) - \mu x(t-T) + f \\ -y(t) + \mu y(t-T) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

(단 $\alpha_{ex} \leq \beta \leq \alpha_{en}$)

식 (13)을 식 (1)에 대입하면 최종적으로 금형가공기에 대한 채터진동의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

절삭의 이송길이가 0부터 공구직경까지인 구간을 해석 대상으로 하고 구간을 충분히 큰 정수인 N 으로 나눈다. 날 사이의 시간 간격은 미소시간 구간크기의 정수배가 되도록 한다. 유한차분 개략화 또는 Nemark방법 등에 의하여 다음시간구간에서의 속도와 변위를 설정할 수 있으며, 식 (13)에 대입하면 절삭력을 계산할 수 있다. 시간의 경과에 따른 공구 중심과 공작물 절삭 개시점의 x 축 및 y 축 상대좌표는 식 (14) 및 (15)와 같다.

$$X_L(t) = \sqrt{RD(2Rad - RD)} - \frac{n \cdot N_f \cdot f \cdot t}{60} - x(t) \quad (14)$$

$$Y_L(t) = Rad - RD + y(t) \quad (15)$$

절삭도입각과 절삭후퇴각은 다음의 식 (16)과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} \alpha_{en}(t) = \cos^{-1}\left(\frac{Rad - RD + y(t)}{Rad}\right) \\ \alpha_{ex}(t) = 0 \text{ or } \sin^{-1}\left(\frac{X_L(t)}{Rad}\right) \end{cases} \quad (16)$$

5. 비절삭 상수의 실험적 결정

금형가공기에서 다양한 조건하에 절삭실험에 의하여 비절삭상수를 실험적으로 결정하고, 최소자승법에 의하여 개발된 프로그램으로부터 식 (8)의 상수들을 구하였다. 본 논문에 사용된 금형가공기는 ACE-V35이고 절삭력 측정을 위하여 공구동력계(tool dynamometer, Kistler 9257B)를 사용하였다. 실험에서의 절삭조건은 Table 1과 같고, 비절삭상수의 계수들은 Table 2와 같이 구해졌다. Photo. 1은 금형가공기에서 엔드밀 가공 중인 상태를 나타낸다.

Table 1. Cutting conditions for tests

end mill	diameter 16 mm, 2 flutes				
radial depth of cut (mm)	2,	3,	4,	5,	6
axial depth of cut (mm)	10,	13,	16		
feed rate (mm/min)	80,	100,	120		
spindle speed (R. P. M.)	400,	600			

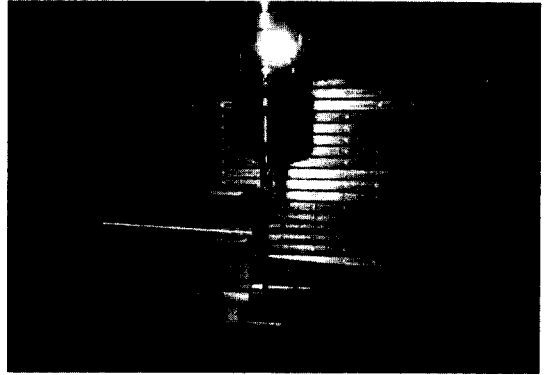


Photo. 1 End milling in a vertical machining center

Table 2. Specific cutting force coefficients

a_i	0.107E11,	-0.114E13,	-0.232E12,	-0.282E14,	0.212E14
	0.611E15,	-0.192E15,	0.683E14,	0.268E13,	0.890E17
b_i	0.538,	-33.6,	2.247,	-331.3,	-1120.
	-0.102E06,	-0.375E05,	0.409E04,	0.355E03,	-0.208E06

6. 수치해석 결과

개발된 프로그램을 사용하여 여러 절삭 조건하에서의 동적 변위를 계산하였다. 식 (1)에서 사용되는 금형가공기의 x 방향 및 y 방향 모달(modal) 상수를 구하기 위하여 충격가진법을 이용한 모달실험(modal testing)을 수행하였으며, HP 워크스테이션과 LMS 모달소프트웨어의 1자유도법을 이용하였다. 그 결과 얻어진 모달 상수를 Table 3에 나타낸다.

Table 3. The modal parameters of the vertical machining center by LMS

	equivalent mass (kg)	equivalent damping (kg/s)	equivalent stiffness (N/m)
x-direction	44.840	4367.5	1.3613E08
y-direction	36.355	3387.4	1.3199E08

네 가지의 동적 해석결과를 제시한다. 첫째는 축방향 절삭깊이 16 mm, 주축 회전속도 600 R.P.M., 이송속도 120 mm/min이고 반경방향 절삭깊이는 2, 4, 6과 8 mm 이었다. 이 해석결과를 Table 4에 나타내었으며, 이것으로부터 반경방향 절삭깊이가 증가할수록 x 와 y 방향 동적 변위가 증가함을 알 수 있다. Fig. 1은 반경방향 절삭깊이가 2 mm인 경우를 나타내고, Fig. 2는 반경방향

절삭깊이가 4 mm인 경우를, Fig. 3은 반경방향 절삭깊이가 6 mm인 경우를 나타낸다. 반경방향 절삭깊이가 2 mm인 Fig. 1을 보면 시간의 증가에 따라서 동적 변위가 증가하지만 일정한 시간 이후에는 안정적인 또는 일정한 진폭을 갖는데 비하여, 반경방향 절삭깊이가 4 mm 이상인 Fig. 2와 Fig. 3을 보면 x와 y방향 동적 변위가 천이 구간을 거쳐 급격히 증가하여 전형적인 채터 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

둘째 해석은 반경방향 절삭깊이가 6 mm, 주축 회전속도 600 RPM, 이송속도가 120mm/min이고, 축방향 절삭깊이는 10, 13과 16 mm이었다. 둘째 해석의 결과중 최대변위를 Table 5에 나타내며, 이것으로부터 축방향 절삭깊이가 증가할수록, x와 y 방향 동적 변위가 증가함

Table 4. The results of the dynamic analysis I (maximum displacement only)
(axial depth of cut=16mm, velocity of spindle=600rpm, feed rate=120mm/min.)

radial depth of cut	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm
x-displacements (μm)	7.49	42.25	105.5	434.3
y-displacements	10.41	75.50	188.2	744.9

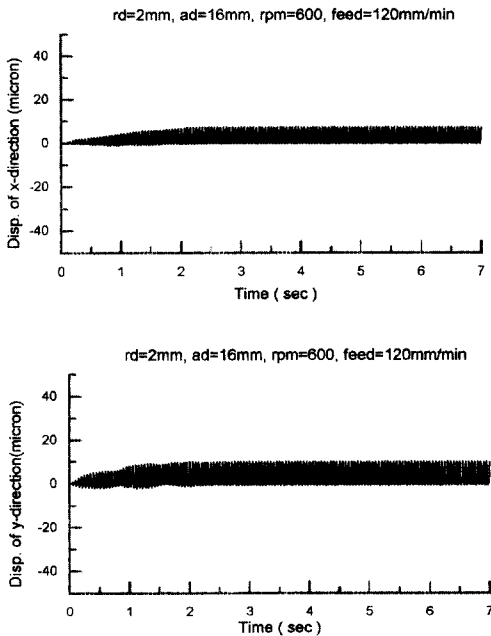


Fig. 1 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=2mm, axial depth of cut=16mm, 600RPM, feed=120mm/min)

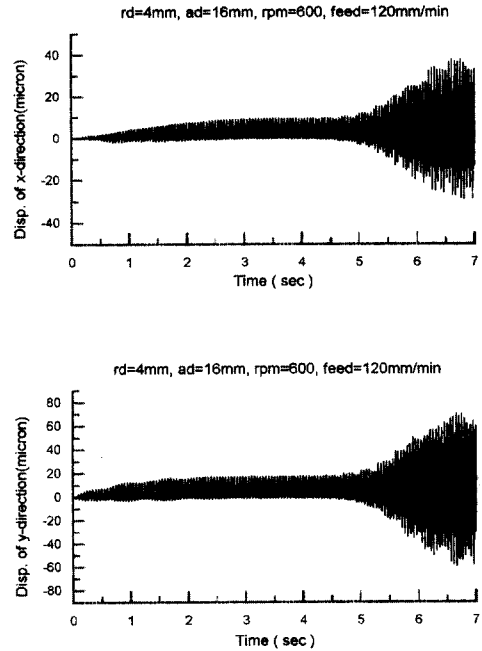


Fig. 2 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=4mm, axial depth of cut=16mm, 600RPM, feed=120mm/min)

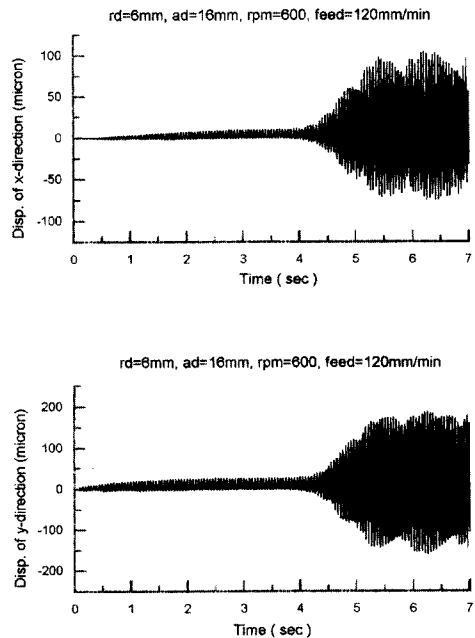


Fig. 3 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=6mm, axial depth of cut=16mm, 600RPM, feed=120mm/min)

을 알 수 있다. Fig. 4는 축방향 절삭깊이가 10 mm인 경우의 결과를 나타내며 시간의 증가에 따라서 동적 변위가 증가하지만 일정한 시간 이후에는 일정한 진폭을 갖게 됨을 나타낸다. Fig. 5는 축방향 절삭깊이가 13 mm인 경우의 결과를 나타내고 있으며 x와 y방향 동적 변위가 천이구간을 거쳐 급격히 증가하여 채터 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 축방향 절삭깊이가 16 mm인 경우는 앞의 Fig. 3과 같다.

Table 5. The results of the dynamic analysis II (maximum displacement only)(radial depth of cut=6mm, velocity of spindle=600rpm, feed rate=120mm/min.)

axial depth of cut \ disp. (μm)	10 mm	13 mm	16 mm
x-displacements	8.76	36.16	105.5
y-displacements	24.57	59.45	188.2

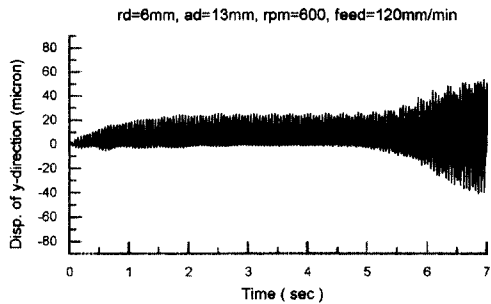
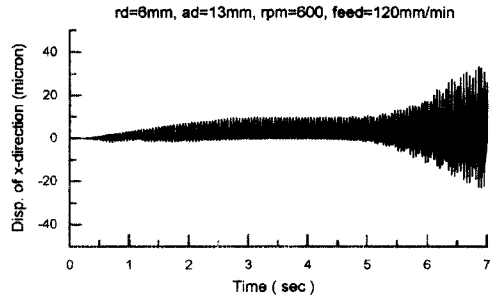


Fig. 5 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=6mm, axial depth of cut=13mm, 600RPM, feed=120mm/min)

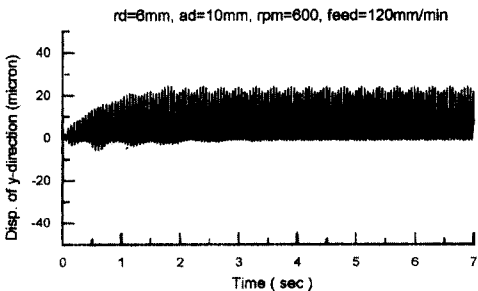
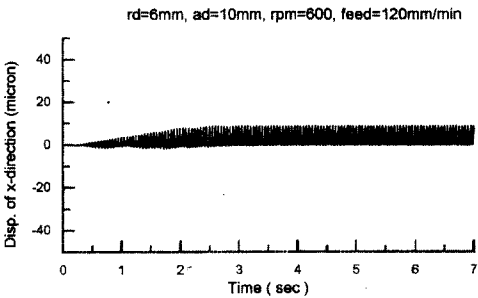


Fig. 4 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=6mm, axial depth of cut=10mm, 600RPM, feed=120mm/min)

셋째는 축방향 절삭깊이가 16 mm, 주축 회전속도 400 R.P.M., 이송속도 120 mm/min이고 반경방향 절삭깊이는 2, 6, 8과 10 mm 이었다. 이 해석결과 중 최대진폭을 Table 6에 나타내었고, 이것으로부터 반경방향 절삭깊이가 증가할수록 x와 y방향 동적 변위가 증가함을 알 수 있으며 Table 4의 경향과 유사하다. Fig. 6은 반경방향 절삭깊이가 2 mm인 경우를 나타내고, Fig. 7은 반경방향 절삭깊이가 6 mm인 경우를, Fig. 8은 반경방향 절삭깊이가 8 mm인 경우를, Fig. 9는 10mm인 경우를 나타낸다. 반경방향 절삭깊이가 2 mm인 Fig. 6과 6 mm인 Fig. 7을 보면 시간의 증가에 따라서 동적 변위가 증가하지만 일정한 시간 이후에는 일정한 진폭을 나타낸다. 반경방향 절삭깊이가 8 mm인 Fig.8은 Fig. 6이나 Fig. 7보다 약간 큰 진폭을 나타내지만 2초 이후에는 일정한 진폭을 가지므로 채터 진동이 아님을 알 수 있다. 반경방향 절삭깊이가 10 mm인 Fig. 9를 보면 x와 y방향 동적 변위가 천이구간을 거쳐 급격히 증가하여 전형적인 채터 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

넷째 해석은 반경방향 절삭깊이가 6 mm, 주축 회전속도

400 RPM. 이송속도가 120mm/min이고, 축방향 절삭깊이는 10, 13, 16과 19 mm이었다. 넷째 해석의 결과중 최대변위를 Table 7에 나타내며, 이것으로부터 축방향 절삭깊이가 증가할수록, x와 y방향 동적 변위가 증가함을 알 수 있다. Table 6의 결과와 비교하면 축방향절삭깊이가 13 mm이상인 경우 넷째 해석의 경우가 둘째해석의 경우보다 안정적이고 또한 진폭의 증가율이 상당히 낮음을 알 수 있다. Fig. 10은 축방향 절삭깊이가 13 mm인 경우의 결과를 나타내며 시간의 증가에 따라서 동적 변위가 증가하지만 일정한 시간 이후에는 일정한 진폭을 갖게됨을 나타낸다. Fig. 11은 축방향 절삭깊이가 19 mm인 경우의 결과를 나타내고 있으며, Fig. 10의 경우와 같이 시간에 따라서 x와 y방향 동적 변위가 증가하지만 일정한 시간 이후에는 일정한 진폭을 갖게됨을 나타낸다. 넷째 해석의 경우에는 채터양상을 나타내는 절삭조건이 없었다.

Table 6. The results of the dynamic analysis III (maximum displacement only)(axial depth of cut=16mm, velocity of spindle=400rpm, feed rate=120mm/min.)

radial depth of cut	2 mm	6 mm	8 mm	10 mm
x-displacements	10.18	15.60	19.11	519.0
y-displacements	12.49	33.28	50.47	853.9

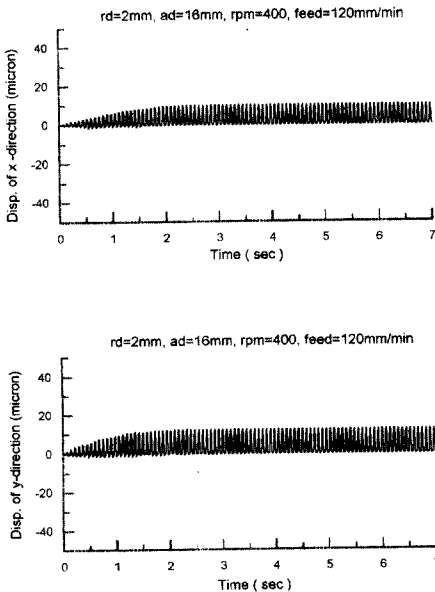


Fig. 6 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=2mm, axial depth of cut=16mm, 400RPM, feed=120mm/min)

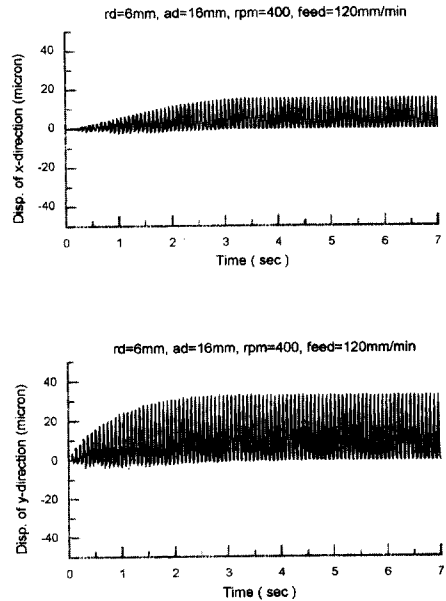


Fig. 7 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=6mm, axial depth of cut=16mm, 400RPM, feed=120mm/min)

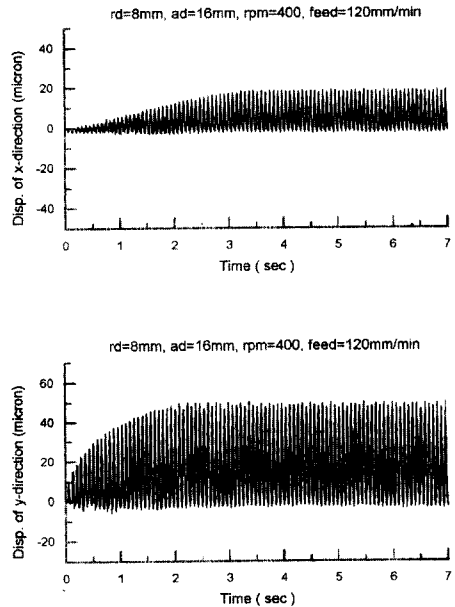


Fig. 8 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=8mm, axial depth of cut=16mm, 400RPM, feed=120mm/min)

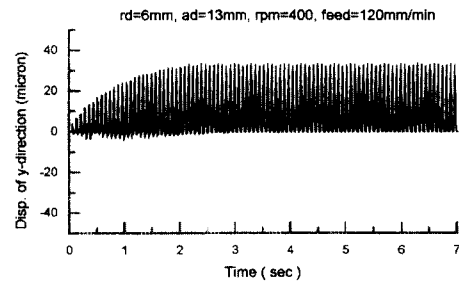
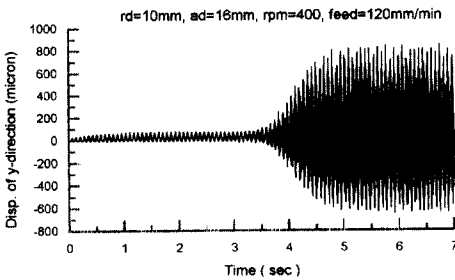
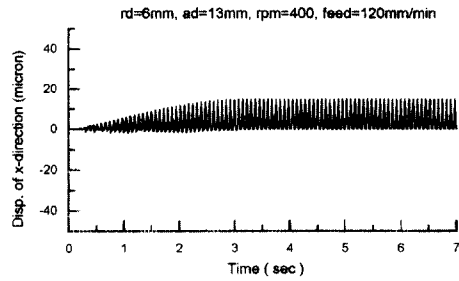
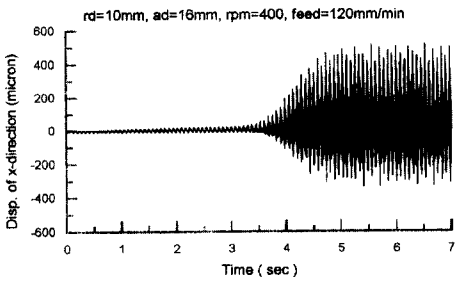


Fig. 9 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=10mm, axial depth of cut=16mm, 400RPM, feed=120mm/min)

Fig. 10 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=6mm, axial depth of cut=13mm, 400RPM, feed=120mm/min)

Table 7. The results of the dynamic analysis IV (maximum displacement only) (radial depth of cut=6mm, velocity of spindle=400rpm, feed rate=120mm/min.)

axial depth of disp. (μm)	10 mm	13 mm	16 mm	19 mm
x-displacements	13.22	14.92	15.60	16.23
y-displacements	31.49	33.36	33.28	34.90

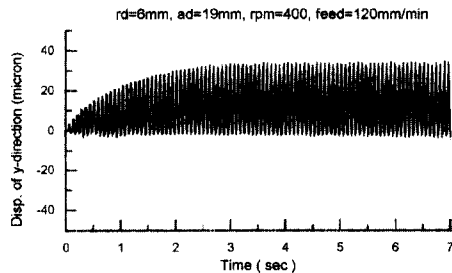
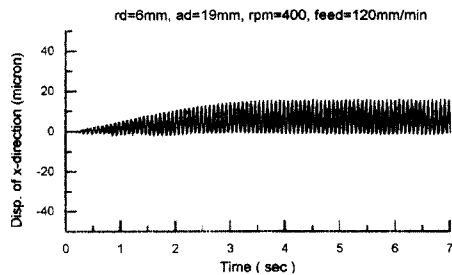


Fig. 11 Dynamic displacement analysis of a vertical machining center (radial depth of cut=6mm, axial depth of cut=19mm, 400RPM, feed=120mm/min)

7. 결론

본 논문에서는, 금형가공기의 동적 성능을 예측/평가하기 위한 방안으로써, 금형가공기의 채터 해석에 대한 해석적 모델을 제시하였으며, 이 모델은 구조동역학과 절삭동역학의 상호작용에 의한 관계를 해석한다. 절삭동역학 모델은 칩 부하와 절삭 기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에 기초를 두고 있다. 이 모델을 가지고 엔드밀 공정의 절삭력을 예측하기 위하여 다양한 절삭 조건에 대하여 절삭실험을 수행하였다. 절삭동역학 모델의 비절삭상수는 절삭실험에서 얻어진 평균 절삭력으로부터 구하였다. 또한 구조동역학에 대한 해석 모델 수립 방안으로서

는 금형 가공기의 모달 상수를 구하기 위하여 모달 실험을 수행하였다. 주어진 절삭 조건하에서의 동적 변위를 해석하는 프로그램을 개발하였고, 여러 가지 절삭조건에 대하여 동적 변위를 계산하였다. 반경방향 절삭깊이가 변화되었을 경우와 축방향 절삭깊이가 변화되었을 경우에 대한 해석 결과를 비교 제시하였다. 이러한 방법에 의하여 절삭과 연관되도록 동특성을 예측하고 평가하는 방안이 금형가공기 뿐 아니라 일반적인 공작기계를 설계하고 개발하는데 합리적인 방법이 될 것이다.

감 사 의 글

본 논문의 일부는 과학기술처 특정연구개발과제(공작기계 기본설계 시스템 개발) 중 위탁과제 “고속 고정도 금형가공기의 주축구조물/베이스의 동특성 해석과 실험적 평가”의 결과이며, 이에 과학기술처 및 (주)대우중공업의 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Boothroyd, G., Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, McGraw-Hill International Book Co, 1981.
2. Sridhar, R., Hohn, R. E. and Long, G. W., "A General Formulation of the Milling Process Equation", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 90, pp. 317-324, 1968.
3. Ber, A., Rotberg, J. and Zombach, S., "A Method for Cutting Force Evaluation of End Mills", Annals of the CIRP, Vol. 37/1, pp. 37-40, 1988.
4. Altintas, Y. and Ghan, Philip K., "In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 32, No. 3, pp. 329-347, 1992.
5. Minis, I., Yanushevsky, R. and Tembo, A., "Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling", Annals of the CIRP, Vol. 39/1, pp. 459-462, 1990.
6. Tarng, Y. S., Cheng, C. I. and Kao, J. Y., "Modeling of Three-Dimensional Numerically Controlled End Milling Operations", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 35, No. 7, pp. 939-950, 1995.
7. Smith, S. and Tlustý, J., "Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling", Annals of the CIRP, Vol. 42/1, pp. 463-466, 1993.
8. Kline, W. A., DeVor, R. E. and Lindberg, J. R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, No. 11, pp. 7-22, 1982.