

밀링 가공 시 채터 진동 예측의 해석적 방법

정 낙 신[†] · 양 민 양^{*}

(2008년 11월 21일 접수, 2009년 2월 16일 수정, 2009년 2월 23일 심사완료)

Analytical Prediction of Chatter Vibration in Milling Process

Nakshin Jeong and Min-Yang Yang

Key Words : Chatter(채터), Self-excited Vibration(자려진동), Stability Lobes(안정선도), Milling(밀링)

Abstract

This paper presents the analytical prediction of stability lobes in milling. The stability lobes are obtained by measuring the frequency response function (FRF) of a machining center at the cutting point of the end mill cutter, identifying cutting constants, and approximating cutting force coefficients. The stability lobes are experimentally verified through cutting tests.

기호설명

$u(t)$: 순간 미변형 칩두께
 $u_0(t)$: 정상상태 미변형 칩두께
 μ : 겹침율
 F_x, F_y : x, y 방향 절삭력 성분
 $x(t), y(t)$: x, y 방향 구조물의 동적 변위
 $x(t-T), y(t-T)$: 1 주기 이전의 x, y 방향 변위
 ϕ_j : j번째 공구 날의 Y축에 대한 각도
 K_t, K_r : 접선과 반지름 방향 절삭력 상수
 a_{lim} : 채터 안정 한계 절삭 깊이
 $a_{xx}, a_{xy}, a_{yx}, a_{yy}$: 동적 방향 계수
 $\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}$: 시불변 평균 방향 계수
 ϕ_{st}, ϕ_{ex} : 절삭날의 시작과 끝점의 각
 $[\Phi(i\omega_c)]$: 구조물의 전달함수
 $[\Phi_0(i\omega_c)]$: 구조물의 방향전달함수
 T : 공구 날의 회전 주기
 ω_c : 채터 주파수

Λ : 특성방정식의 고유값, $\Lambda = \Lambda_R + i\Lambda_I$
 N : 공구의 날 수
 κ : 고유값의 실수부에 대한 허수부의 비
 ε : 절삭칩의 안과 밖 파형의 위상차
 k : 절삭면에 나타난 피치간 진동 파형의 수
 c : 이송량

1. 서론

공작기계는 통상 구조물의 구조 강성 측면에서 설계 및 생산되어 왔다. 그러나 실제 제조된 공작기계는 설계 단계에서 예측하지 못한 요인들로 인해 현장에서 절삭 가공 시 특정 가공 조건에서는 동적으로 불안정한 채터가 발생하게 된다. 가공 시스템의 불안정성인 채터는 그 원인이 공작기계의 구조적 측면에서 정적 강성에만 의존하는 것이 아니라 공구 구조물, 공작물, 그리고 가공 프로세스가 통합된 절삭 메커니즘과 관련되어 있다. 채터가 발생하면 구조물의 진동이 심해져 공구는 가공 경로를 벗어나게 되고 이로 인해 값비싼 가공품의 품질은 손상되어 경제적 손실을 유발시킨다. 또한 채터로 인해 생기는 공구의 파손은 절삭 가공을 이용한 산업 분야에 있어 가공 비용을 높이고 가공 생산성을 떨어뜨리는 주요인이 되고 있다. 더욱이,

[이 논문은 2008년도 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회 (2008. 6. 4-5. 제주오리엔탈호텔) 발표논문임]

[†] 책임저자, KAIST 대학원 기계공학전공

E-mail : rakshin@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3264 FAX : (042)350-5224

* 회원, KAIST 기계항공시스템학부

잡은 chatter의 발생은 공작기계 스펀들 부를 손상시켜 공작기계 자체를 파손시키고 수명 저하를 촉진시킨다. 따라서, 사전에 chatter를 예측하고 공작기계의 chatter강성을 증가시켜 보다 질 좋은 제품을 생산하며 고부가가치 부품소재의 가공에 양질의 기술 서비스를 제공할 수 있도록 하는 공작기계의 chatter를 규명하는 연구가 요구된다.

2. chatter 진동의 이론 모델

2.1 공작기계의 자려 진동 chatter

절삭 가공에서의 자려 진동 chatter(Self-excited chatter)는 S. A. Tobias와 J. Tlusty 등에 의해 이론적으로 해석되었고 그 후 H. E. Merritt에 의해 절삭 과정(cutting process)에 제어 이론을 도입하여 페루프 모델로 정식화되었다.⁽¹⁻³⁾ chatter 모델의 안정성을 해석하면 공작기계의 스펀들 속도에 대한 절삭 깊이의 안정 한계 영역을 표시한 안정선도(stability lobes)가 작성된다.

가공의 안정성을 판정하는 안정선도는 Fig. 1 과 같이 페루프 형태의 chatter 모델로부터 유도된다. 여기서, $\Phi(s)$ 는 구조물의 동적 컴플라이언스(dynamic compliance)를 나타내고, k_c 는 정상 상태 거동으로 가정된 절삭 과정에 있어서의 정적 강성(static directional cutting stiffness)을 나타낸다. 이 상수는 Merchant에 의해 제안된 이론으로부터 유도되었고 공구와 공작물의 재질, 공구 형상, 그리고 절삭 폭에 따라 결정된다. $u_0(s)$ 는 가공하고자 하는 절삭 깊이로 시스템의 기준 입력이 되고 가공 중 실제 절삭 깊이는 $u(s)$ 가 된다. 기준 입력에 대한 제어하고자 하는 출력 $u(s)$ 의 서보 루프 시스템의 전달함수를 유도하면 식 (1)과 같다. 식 우변의 분모를 0 으로 하여 특성 방정식을 만들고 $s=j\omega$ 를 대입하여 chatter의 핵심적인 문제인 안정성을 판단하는 안정선도를 작성하게 된다.

식 (1)에서 구조물의 동적 컴플라이언스가 0 이 되거나 정적 강성이 0 이 되면 실제 절삭 깊이와 기준 절입량이 일치하게 되므로 chatter가 발생하지 않는다. 그러나, Merchant 에 의해 제안된 정적 강성은 공구와 공작물 그리고 절삭 조건에 따라 결정되므로 공작기계의 설계 변수가 아니다. 이에 반해 구조물의 동적 컴플라이언스는 기계의 설계에 따라 변경될 수 있다. 그러므로 공작기계 구조물에 적절한 동적 강성을 증가시키면 chatter 강성이 커지게 된다.

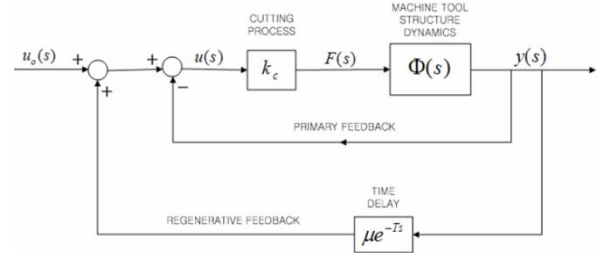


Fig. 1 Block diagram of chatter dynamics of orthogonal cutting system

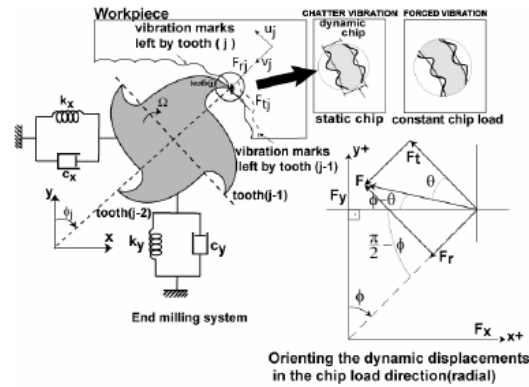


Fig. 2 Dynamic model of milling with two degrees of freedom

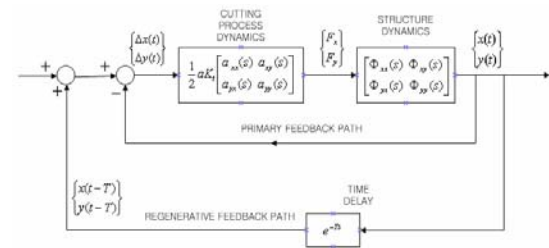


Fig. 3 Block diagram of regenerative chatter in milling process

$$\frac{u(s)}{u_0(s)} = \frac{1}{1 + (1 - \mu e^{-Ts}) k_c \Phi(s)} \quad (1)$$

2.2 chatter 모델의 밀링 가공 해석

1 차원 가공에 대한 이론의 한계점을 보완하고자 J. Tlusty와 S. Smith 등은 진동 응답을 시뮬레이션하여 안정성을 판단하거나 기존의 이론과 시뮬레이션을 결합하려는 노력들을 하였다.⁽⁴⁻¹⁴⁾ 그 후 Y. Altintas와 E. Budak 등은 1 차원 chatter 예측 이론에 해석적인 방법을 이용하여 2 차원 밀링 가공으로 확장하였다.⁽¹⁵⁻²⁰⁾ 그러나 실제 chatter의 발생은 가공 조건에 따라

안정성이 달라지기도 하며 공작기계 구조물 및 가공의 비선형 특성에 의한 불확실성에도 영향을 받는다.⁽²¹⁻²⁶⁾ 이러한 여러 문제들을 해결하기 위해 현재 다양한 연구가 진행되고 있으며 앞으로도 많은 연구가 요구된다.⁽²⁷⁻⁴¹⁾

2.2.1 밀링 가공 모델

2 차원 밀링 가공에서의 자려 진동 해석은 Fig. 2 와 같이 N 개의 날을 가진 밀링 공구를 고려한다. 공작기계를 기준으로 x-y 절대 좌표계를 설정하고 z 축을 중심으로 회전수 Ω 로 시계 방향으로 회전하는 공구의 j 번째 날 끝에 공작물에 의해 공구에 작용하는 절삭력의 방향과 동일한 방향으로 u-v 회전 좌표계를 잡는다. 여기서, 공구는 구조물의 동적 컴플라이언스에 따라 진동이 전달되나 공작물은 상대적으로 컴플라이언스가 적어 고정되어 진동하지 않는 것으로 가정한다. 2 차원 밀링 가공에서의 chatter 모델도 Fig. 3 과 같이 페루프 모델로 만든다. 첫째, 공작기계 공구 구조물의 진동에 의한 동적 변위와 공구에 작용하는 절삭력의 관계를 x-y 방향으로 수식화한다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} aK_t \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, a_{xx} , a_{xy} , a_{yx} , a_{yy} 는 공구 날의 회전에 의존하는 동적 방향 계수로 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} a_{xx} &= \sum_{j=0}^{N-1} -g_j [\sin 2\phi_j + K_r (1 - \cos 2\phi_j)], \\ a_{xy} &= \sum_{j=0}^{N-1} -g_j [(1 + \cos 2\phi_j) + K_r \sin 2\phi_j], \\ a_{yx} &= \sum_{j=0}^{N-1} g_j [(1 - \cos 2\phi_j) - K_r \sin 2\phi_j], \\ a_{yy} &= \sum_{j=0}^{N-1} g_j [\sin 2\phi_j - K_r (1 + \cos 2\phi_j)] \end{aligned} \quad (3)$$

동적 방향 계수는 공구가 회전하면서 시간에 따라 주기적으로 변하므로 푸리에 급수로 전개한다.

$$\begin{aligned} \{F(t)\} &= \frac{1}{2} aK_t [A(t)] \{\Delta(t)\} \\ [A(t)] &= \sum_{r=-\infty}^{\infty} [A_r] e^{ir\omega t}, \quad \omega = N\Omega \\ [A_r] &= \frac{1}{T} \int_0^T [A(t)] e^{-ir\omega t} dt, \quad T = 2\pi / \omega \end{aligned} \quad (4)$$

이때, 평균 요소만을 고려하고 동적 방향 계수는 공작물의 가공 시작점에서 끝점까지만

유효하므로 다음과 같이 회전 각도에 대해 정리한다.

$$[A(0)] = \frac{N}{2\pi} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} [A(\phi)] d\phi = \frac{N}{2\pi} \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, 평균 방향 계수는

$$\begin{aligned} \alpha_{xx} &= \frac{1}{2} [\cos 2\phi - 2K_r \phi + K_r \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \\ \alpha_{xy} &= \frac{1}{2} [-\sin 2\phi - 2\phi + K_r \cos 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \\ \alpha_{yx} &= \frac{1}{2} [-\sin 2\phi + 2\phi + K_r \cos 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \\ \alpha_{yy} &= \frac{1}{2} [-\cos 2\phi - 2K_r \phi - K_r \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \end{aligned} \quad (6)$$

으로 반지름 방향 계수와 절삭폭에 따라 결정된다.

둘째, chatter 모델에서 공작기계 공구 구조물의 동특성은 Fig. 4 와 같이 공작물에 의해 절삭력을 받는 가공점에 가속도 센서를 설치하고 반대쪽에서 충격 망치로 가진하여 식 (7)과 같이 2x2 행렬의 주파수 응답 함수를 측정한다.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{xx}(i\omega) & \Phi_{xy}(i\omega) \\ \Phi_{yx}(i\omega) & \Phi_{yy}(i\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} \quad (7)$$

셋째, 절삭 가공이 이루어지는 공작물은 가공 중 공구 구조물의 진동에 의해 공작물의 표면에 물결 모양의 파형이 생기게 된다. 이러한 현재 시점의 진동 파형과 한 주기 이전 시점의 진동 파형에 의해 미변형 칩두께가 결정된다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= x(t) - x(t-T), \\ \Delta y &= y(t) - y(t-T) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (2), (7)과 (8)을 조합하면 Fig. 3 과 같이 2 차원 밀링 가공에 대한 chatter 모델이 완성된다.



Fig. 4 Measurement of transfer functions using an impact hammer and two accelerometers attached to the machine tool structure

2.2.2 chatter 안정선도

가공의 안정성을 해석하기 위해 서보 루프 시스템 형태로 도시된 chatter 모델의 특성 방정식을 구성한다.

$$\det\left[I - \frac{1}{2} aK_t(1 - e^{i\omega_c T}) [A_0 [\Phi(i\omega_c)]] \right] = 0 \quad (9)$$

여기서, 식 (5)와 식 (7)을 고려하여 고유값과 방향전달함수(oriented transfer function)를 정의한다.

$$\Lambda = -\frac{N}{4\pi} aK_t(1 - e^{i\omega_c T}) \quad (10)$$

$$[\Phi_0(i\omega_c)] = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} \end{bmatrix} [\Phi(i\omega_c)] \quad (11)$$

식 (9)는 다음과 같이 간단히 나타낸다.

$$\det[[I] + \Lambda[\Phi_0(i\omega_c)]] = 0 \quad (12)$$

특성방정식을 풀면 2차 다항식이 된다.

$$a_0\Lambda^2 + a_1\Lambda + 1 = 0 \quad (13)$$

식을 풀어 고유값 Λ 를 구한다.

$$\Lambda = -\frac{1}{2a_0} \left(a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0} \right) \quad (14)$$

고유값이 복소수($\Lambda = \Lambda_R + i\Lambda_I$)인 점을 고려하여 식 (10)과 식 (14)를 연립해서 풀면 각 chatter 주파수에 대해서 스핀들의 회전 속도와 그에 따른 안정한계 절삭 깊이가 구해진다. 이를 도식화하면 안정선도가 작성된다. 여기서, 안정 한계 절삭 깊이는

$$a_{lim} = -\frac{2\pi\Lambda_R}{NK_t} (1 + \kappa^2) \quad (15)$$

이고, 이에 대응하는 스핀들 속도는

$$n = \frac{60\omega_c}{N(\varepsilon + 2k\pi)}, \quad k = 0, 1, 2, \Lambda \quad (16)$$

이다.

2.2.3 밀링 가공에서의 절삭력 상수

밀링 가공에서의 절삭력 상수는 밀링의 절삭력 모델로부터 계산된다.^(19,42) 이 실험 모델은 공구의 미소 요소에 작용하는 절삭력을 x-y방향으로 회전 변환한 후 이를 공구 날의 1 주기에 대해 적분하여 평균 절삭력을 구한다. 이 값은 이송 속도에 선형적으로 비례하게 되는데 슬로팅(slotting)으로 밀링 가공하는 경우를 고려하면 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= -\frac{Na}{4} K_{rc} c - \frac{Na}{\pi} K_{re} \\ \bar{F}_y &= +\frac{Na}{4} K_{tc} c + \frac{Na}{\pi} K_{te} \\ \bar{F}_z &= +\frac{Na}{\pi} K_{ac} c + \frac{Na}{2} K_{ae} \end{aligned} \quad (17)$$

절삭력 상수를 측정하기 위하여 실험에서는 공구의 잠입율(full immersion)과 절삭 깊이를 고정시키고 공구의 날당 이송량을 변화시켜 가며 x, y, z 방향의 평균 절삭력을 측정한다. 식 (17)은 방향에 따라 절삭 성분(cutting-edge component)으로 표현된다.

$$\bar{F}_q = \bar{F}_{qc} c + \bar{F}_{qe} \quad (q = x, y, z) \quad (18)$$

이송 속도에 따른 평균 절삭력은 회귀분석(linear regression)을 통하여 각 절삭 성분을 추정한다. 접선 방향과 반지름 방향의 절삭력 상수는 식 (17)과 (18)로부터 구한다.

$$K_{tc} = \frac{4\bar{F}_{yc}}{Na}, \quad K_{rc} = \frac{-4\bar{F}_{xc}}{Na} \quad (19)$$

3. chatter 실험

3.1 공구 구조물의 주파수 응답 함수

chatter 실험에 사용된 동작기계는 (주)남선기공의 품명NASU-4020V의 머시닝 센터로 테이블 1300mm x 500mm, 중량 7,000kg, 주축 소비 전력 7.5/11kW, 스핀들 속도는 23~5,000rpm이다. 절삭 가공이 이루어지는 공구의 가공 부위에서 공구 구조물의 X축 및 Y축 방향으로 충격가진실험을 실시하여 Fig. 5~6 과 같이 주파수 응답 함수를 구하였다.⁽⁴³⁾ X축 방향의 지배적인 모드(dominant mode)는 704.7Hz에 위치하고 두 번째 모드는 800Hz 부근에 있음을 알 수 있다. Y축 방향에 대한 지배적 모드는 600~700Hz 부근에 위치한다.

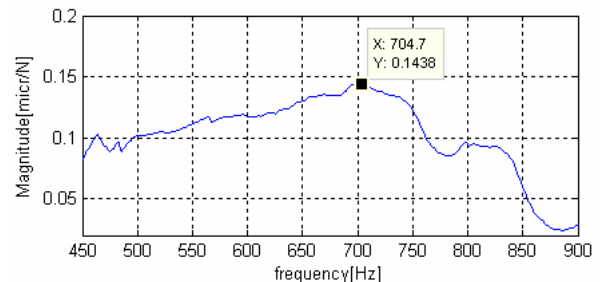


Fig. 5 Frequency Response function of the machine tool structure in x direction, $\Phi_{xx}(i\omega)$

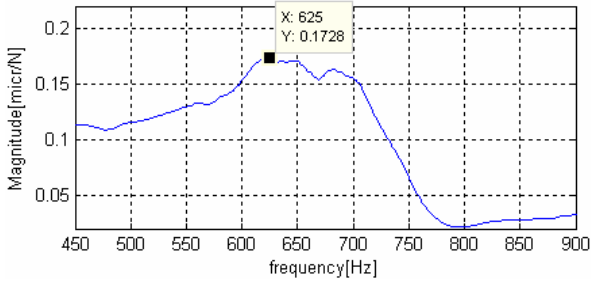


Fig. 6 Frequency Response function of the machine tool structure in y direction, $\Phi_{yy}(i\omega)$

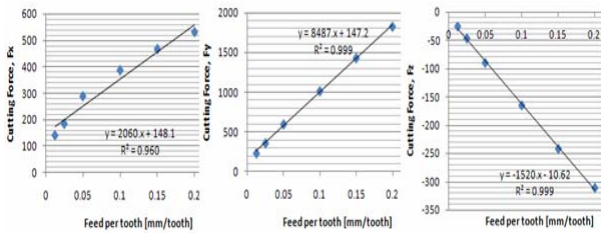


Fig. 7 Linear regression of the average cutting forces at each feed rate

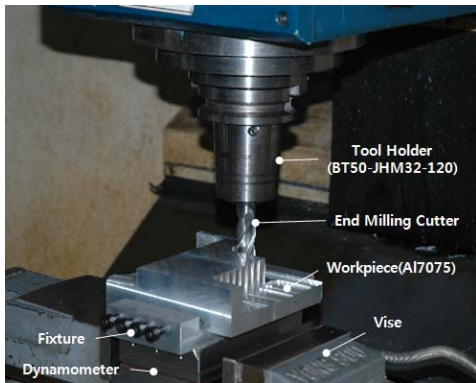


Fig. 8 Experimental setup

3.2 절삭력 상수 측정

밀링 가공 시 공구에 걸리는 평균 절삭력을 측정하기 위해 회전수 1,000rpm, 절삭 깊이 5mm 로 고정하고 이송 속도를 변화시켜가며 공구동력계로부터 절삭력 데이터를 측정하여 1 주기에 대한 평균 절삭력을 계산하였다. 이송 속도에 따른 평균 절삭력은 Fig. 7 과 같이 1 차 함수로 나타난다. 절삭 성분을 식 (19)에 대입하여 절삭력 상수를 구한다.

$$K_{tc} = \frac{4\bar{F}_{yc}}{Na} = \frac{4 \times 8487.66 \text{ N/mm}}{4 \times 5 \text{ mm}} = 1,697.53 \text{ MPa}$$

$$K_{rc} = \frac{-4\bar{F}_{xc}}{Na} = \frac{-4 \times 2060.47 \text{ N/mm}}{4 \times 5 \text{ mm}} = -412.09 \text{ MPa}$$

$$K_t = K_{tc} = 1,697.0 \text{ MPa}, \quad K_r = |K_{rc} / K_{tc}| = 0.243$$

Table 1 Experimental condition

Cutting Condition	Dry Half Immersion Up Milling
Workpiece	Al7075 (super duralumin)
Tool	4 teeth ϕ 20mm Helical Carbide End Mill
Cutting stiffness	$K_t = 1,697.0 \text{ MPa}$, $K_r = 0.243$

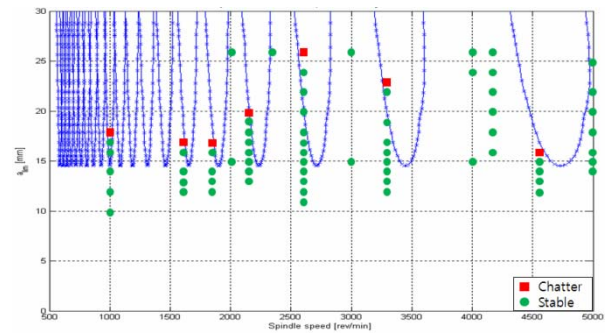


Fig. 9 Experimental verification of stability lobes for end milling of Al7075 alloy

3.3 실험 방법

실험의 장비배치와 조건은 Fig. 8 과 Table 1 과 같다. CNC 패널을 통한 입력 회전수와 실제 스피들의 회전수 사이에 오차가 없도록 근접센서를 사용하여 주파수를 분석하여 확인하였고 채터 실험에서 공구의 진행은 X 방향으로 하였다.

3.4 실험 결과

실험을 통하여 Fig. 9 와 같이 안정선도를 검증하였다. 로브 형태의 선은 채터의 안정성을 판정하는 안정선도를 표기하는데 선도의 아래 쪽은 안정한 영역을, 선도 위 쪽(안 쪽)은 불안정한 영역을 나타낸다. 여러 포물선은 식 (16)에서 $k=0,1,2, \dots$ 에 따라 그려졌기 때문인데 이는 공작물 표면에 나타나는 채터 무늬의 개수가 다른 것을 나타낸다. 안정선도 상에 표기된 파란 원은 가공 시 안정한 영역을, 빨간 사각형은 채터가 발생한 불안정한 영역을 표기한 것이다.

공구동력계로부터 얻어진 절삭력 데이터는 Fig. 10 과 같이 주파수 영역과 시간 영역으로 나누어 채터의 발생 유무를 관찰하였다. 여기서 시간 영역의 절삭력은 평균값이 영으로 조정되었다. 스피들 회전수 1,596rpm 에서 절삭 깊이가 16mm 일 때, 공구 날의 회전 주파수(tooth passing frequency)인 106.4Hz 에서 110N(RMS)의 절삭력이 지배적이다.

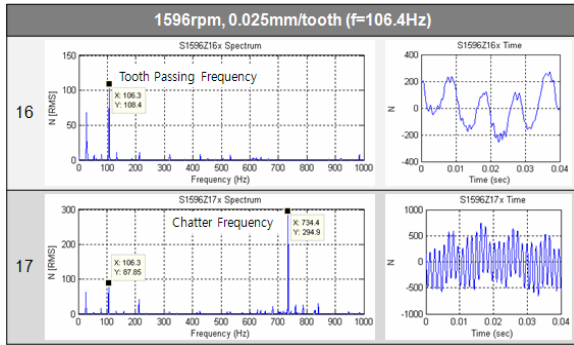


Fig. 10 Experimental result at spindle speed of 1596rpm

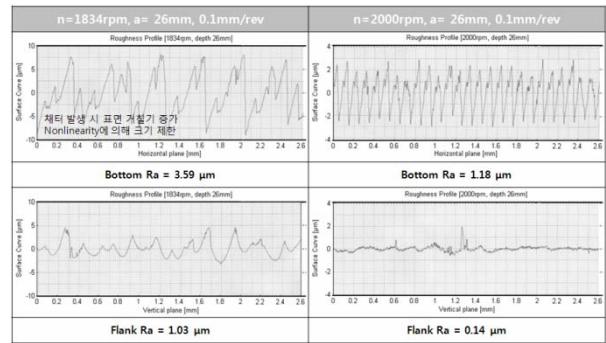


Fig. 12 Experimental comparison of Surface Roughness in 1,834rpm & 2,000rpm

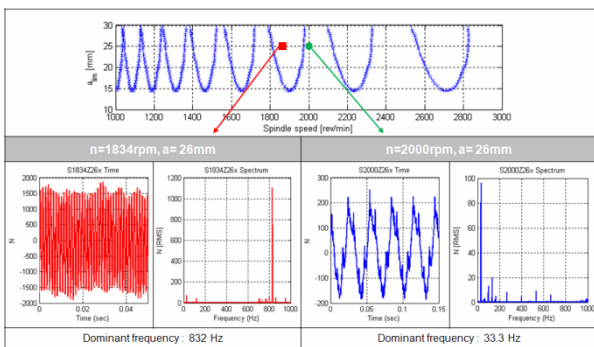


Fig. 11 Experimental comparison of cutting forces in 1,834rpm & 2,000rpm

절삭 깊이가 17mm 로 증가하자 chatter가 발생하여 구조물의 고유진동수(704.7Hz) 근처에서 약 300N 의 chatter 주파수(733.6Hz)가 발생되었다. 여기서, 공구 주파수의 절삭력은 동일하게 유지되고 있는데 이는 chatter에 의한 절삭력 성분이 공구 주파수에 중첩되어 나타나기 때문이다.

안정 영역과 불안정 영역에서의 절삭 성능을 비교하기 위해 스핀들의 회전 속도가 인접한 두 지점에서 절삭력 데이터와 표면 조도를 비교하여 평가하였다. 불안정 영역의 회전 속도는 1,834rpm 과 안정 영역은 2,000rpm 을 선정하였고 이송 속도와 절삭 깊이는 각각 0.025mm/tooth, 26mm 로 하였다. Fig. 11 은 절삭력 데이터를 시간 영역과 주파수 영역에서 비교한 것이다. 불안정 영역에서는 chatter 발생 시 공구 주파수는 그대로 유지되고 있으나 chatter 주파수(약 830Hz 부근)에서 1,200N(RMS)의 새로운 절삭 에너지가 나타난 것을 알 수 있다. 시간 영역에서는 공구의 절삭력 파형에 chatter에 의한 파형이 중첩된 결과를 나타낸다. 안정한 영역에서는 공구 날의 회전 주파수 성분만 관찰되며 공구 1 회전 성분의 경우 약 90N(RMS)의 작은 절삭력이 측정되었다.

가공 후 공작물의 Mitutoyo Inc. 의 접촉식 표면 조도계(품명: SJ-400)를 이용하여 Fig. 12 와 같이

공구가 지나간 면의 표면 거칠기를 측정하였다.

사용된 공구가 4 날이므로 이송 속도는 0.1mm/rev으로 안정 영역에서의 바닥면의 표면 거칠기 파형은 0.1mm 간격으로 요철져 있다. 그러나 불안정 영역에서의 바닥면 표면 거칠기는 0.1mm 간격의 파형이 점차 누적되어 증가하다 4-5 회전 후 다시 떨어지는 반복적인 형태를 보인다. 이러한 chatter 무늬는 chatter 발생 구조의 비선형 특성에 의한 것으로 추정할 수 있다. chatter의 비선형성(Basic Non-Linearity in Machining Chatter⁽⁵⁾)이란 chatter 발생 시 공구의 진동이 주기적인 절삭력에 의해 점차로 증가하다 공구가 가공 표면으로부터 점프해서 떨어져 나오면 절삭력이 0 이 되고 외부의 가진력이 없어져 다시 진동의 크기가 작아지는 특성을 말한다. 불안정 영역에서의 바닥면 평균 표면 조도는 3.59 μ m, 측면부의 평균 표면 조도 1.03 μ m를 가진다. 안정한 영역의 평균 바닥면 거칠기는 1.18 μ m로 약 3 배 정도 작고, 측면부의 거칠기는 0.14 μ m로 약 7 배 정도 작다.

4. 결 론

공작기계의 동특성을 평가하고 이를 향상시키기 위한 목적으로 머시닝 센터의 밀링 가공 시 나타나는 동적 불안정성인 chatter의 발생 과정을 분석하였다. 이는 제어 이론을 도입하여 chatter 모델을 만들었고 특정 공작기계의 스핀들 속도에 대한 절삭 깊이의 안정 한계를 표시한 안정선도를 작성하였다. 작성된 선도는 X 축 방향으로 특정 가공 조건에 대하여 실험을 실시한 결과 해석 결과와 일치하였다. Y 축 가공에 대한 검증과 이론에서 가정하였던 공작물의 진동 및 다양한 가공 조건에 대한 chatter의 안정성 검증은 추후 연구 과제에서 고려되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Tobias, S. A., 1965, *Machine-Tool Vibration*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Koenigsberger, F. and Tlusty, J., 1970, *Machine Tool Structures Volume I*, Pergamon Press.
- (3) Merritt, H.E., 1965, "Theory of Self-Exited Machine-Tool Chatter," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 87, pp. 447~454.
- (4) Tlusty, J., 1978, "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics," *Annals of the CIRP*, Vol. 27/2, pp. 583~589.
- (5) Tlusty, J. and Ismail, F., 1981, "Basic Non-Linearity in Machining Chatter," *Annals of the CIRP*, Vol. 30/1, pp. 299~304.
- (6) Tlusty, J. and Ismail, F., 1983, "Special Aspects of Chatter in Milling," *Transactions of the ASME*, Vol. 105, pp.24~32.
- (7) Tlusty, J., Zaton, W. and Ismail, F., 1983, "Stability Lobes in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 32/1, pp. 309~313.
- (8) Tlusty, J., 1986, "Dynamics of High-Speed Milling," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 59~67.
- (9) Ioannis Minis, Rafael Yanushevsky, Abel Tembo, 1990, "Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 459~462.
- (10) Tlusty, J., 2000, *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall.
- (11) Smith, S. and Tlusty, J., 1990, "Update on High-Speed Milling Dynamics," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 142~149.
- (12) Smith, S. and Tlusty, J., 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169~175.
- (13) Smith, S. and Tlusty, J., 1993, "Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1, pp. 463~466.
- (14) Smith, S. and Tlusty, J., 1997, "Current Trends in High-Speed Machining," *Transactions of the ASME*, Vol. 119, pp. 664~666.
- (15) Minis, I. and Yanushevsky, R., 1993, "A New Theoretical Approach for the Prediction of Machine Tool Chatter in Milling," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 1~8.
- (16) Altintas, Y. and Budak, E., 1995, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 357~362.
- (17) Budak, E. and Altintas, Y., 1998, "Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling - Part I: General Formulation," *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 120, pp. 22~30.
- (18) Budak, E. and Altintas, Y., 1998, "Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling - Part II: Application of the General Formulation to Common Milling Systems," *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 120, pp. 31~36.
- (19) Altintas, Y., 2000, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*, Cambridge University Press, New York.
- (20) Altintas, Y., 2001, "Analytical Prediction of Three Dimensional Chatter Stability in Milling," *International Journal of JSME, Section C*, Vol. 44, No. 3, pp. 717~723.
- (21) Tlusty, J., Smith, S. and Winfough, W.R., 1996, "Techniques for the Use of Long Slender End Mills in High-speed Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 45/1, pp. 393~396.
- (22) Davies, M.A., Dutterer, B., Pratt, J.R., Schaut, A.J., 1998, "On the Dynamics of High-Speed Milling with Long, Slender Endmills," *Annals of the CIRP*, Vol. 47/1, pp. 55~60.
- (23) Davies, M.A., Pratt, J.R., Dutterer, B. and Burns, T.J., 2000, "The Stability of Low Radial Immersion Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 49/1, pp. 37~40.
- (24) Davies, M.A., Pratt, J.R., Dutterer, B. and Burns, T.J., 2002, "Stability Prediction for Low Radial Immersion Milling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp. 217~225.
- (25) Bayly, P.V., Mann, B.P., Schmitz, T.L., Peters, D.A., Stepan, G. and Insperger, T., 2002, "Effects of Radial Immersion and Cutting Direction on Chatter Instability in End-Milling," *Proceedings of IMECE*, pp. 1~14.
- (26) Bayly, P.V., Halley, J.E., Mann, B.P. and Davies, M.A., 2003, "Stability of Interrupted Cutting by Temporal Finite Element Analysis," *Transactions of the ASME*, Vol. 125, pp. 220~225.
- (27) Smith, S. and Tlusty, J., 1992, "Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1, pp. 433~436.
- (28) Tlusty, J., 1993, "High-Speed Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/2, pp. 733~738.
- (29) Kwon Won-Tae, 1994, "Cutting Force Analysis under Chatter Condition with a Worn Tool," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 292~301.
- (30) Kim Gi Dae, Kwon Won Tae, Chu Chong Nam and Lee Jang Moo, 1994, "In-Process Chatter Detection Using Multiple Sensors in Turning," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 18, No. 7, pp. 1618~1631.
- (31) Jae-Hyun Park, Seong-Wook Hong, Hyun-soo Kim

- and Joong-Youn Park, 2000, "Milling Chatter Stability Analysis in Consideration of Gyroscopic Effect," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 58~63.
- (32) Moon-Ki Kim, 2001, "Diagnosis of Chatter Vibration using Frequency Domain in a Milling Process," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 12~18.
- (33) Kim, Y.K., Yoon, M.C., Ha, M.K. and Sim, S.B., 2002, "A Study on the Behavior of Chatter in Milling Operation," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 123~132.
- (34) Moon-Chul Yoon, Hyun-Deog Cho and Eung-Soog Lee, 2003, "Natural Mode Analysis for Chatter Lobe Estimation," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 2, No. 2, pp. 60~66.
- (35) Sang-Lok Oh, Do-Hun Chin and Moon-Chul Yun, 2004, "Detection and Analysis of Chatter in Endmilling Operation," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 10~16.
- (36) Faassen, R.P.H., van de Wouw, N., Oosterling, J.A.J. and Nijmeijer, H., 2003, "Prediction of Regenerative Chatter by Modelling and Analysis of High-Speed Milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1437~1446.
- (37) Ganguli, A., Deraemaeker, A. and Preumont, A., 2007, "Regenerative Chatter Reduction by Active Damping Control," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 300, pp. 847~862.
- (38) Duncan, G.S., Schmitz, T.L. and Kurdi, M., 2005, "Stability Lobe Uncertainty," *Proceedings of American Society for Precision Engineering Annual Meeting*.
- (39) Duncan, G.S., Kurdi, M., Schmitz, T.L. and Snyder, J., 2006, "Uncertainty Propagation for Selected Analytical Milling Stability Limit Analyses," *Transactions of the NAMRI/SME*, Vol. 34, pp. 17~24.
- (40) Il Hae Kim and Dong Young Jang, 2007, "A Cylindrical Spindle Displacement Sensor and its Application on High Speed Milling Machine," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 108~114.
- (41) Hun-Keun Jang, Il Hae Kim and Dong Young Jang, 2007, "Chatter Monitoring of Milling Process using Spindle Displacement Signal," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 140~145.
- (42) Budak, E., Altintas, Y. and Armarego, E. J. A., 1996, "Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 216~224.
- (43) Ewins, D.J., 2000, *Modal Testing, Theory, Practice, and Application*, Research Studies Press Ltd.