

# 채터 주파수-회전 속도 선도를 이용한 채터 진단에 관한 연구

이상호\*(금오공대 대학원), 이대형(금오공대 대학원), 박종윤(금오공대), 홍성욱(금오공대)

## Diagnosis of chatter by using the chatter frequency-spindle speed diagram

S. H. Lee\*(Graduate School, KNUT), D. H. Lee(Graduate School, KNUT), J. Y. Park(KNUT),  
and S. W. Hong (KNUT)

### ABSTRACT

This paper presents a method to identify the on-set of chatter by using the chatter frequency-spindle speed diagram for a milling spindle-workpiece system in face milling process. To this purpose, the eigenvalue problem approach using frequency response function is adopted for predicting both the chatter condition and chatter frequency. The chatter frequency-spindle speed diagram for various conditions is investigated throughout simulation and experiment to diagnose the chatter. The simulation and experimental results show that the chatter frequency-spindle speed diagram is useful for diagnosis of the on-set of chatter vibration.

### 1. 서론

고품질의 제품을 생산하기 위해서는 최적의 절삭 가공조건이 필요하다. 가공조건이 나빠지면 공구와 공작물 사이에 작용하는 상대적인 진동현상인 채터 진동(Chatter vibration)이 발생하는데, 발생원인에 따라서 강제 진동 채터와 자력 진동 채터로 구분이 되어진다. 강제 진동 채터와는 달리, 자력(Self excited) 진동 채터는 보다 복잡한 현상을 수반하게 되며, 이를 예측하기 위해 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며, 안정성 로브 선도 등을 이용함으로써 대략적인 채터 예측은 가능한 것으로 알려져 있다<sup>(1)</sup>.

최근에는 채터 신호의 상관관계를 이용하는 방법이나, Coherence 함수를 이용하여 채터를 감지하는 방법, 스펙트럼 분석을 이용한 채터 감지의 새로운 방법 등도 많이 연구되어지고 있다<sup>(2-4)</sup>. 그러나, 아직 까지도 채터 발생 여부를 실험적으로 확인하는 방법은 많지 않다. 그러나, 안정성 로브 선도에서 스펙들 속도에 상응하는 예측된 채터 주파수를 고려하여 채터 발생 여부를 평가함으로써 안정성을 진단하는 사례는 많지 않다. 본 연구에서는 채터의 안정성 평가 및 채터 주파수 예측을 하기 위해서 공구와 공작물의 주파수 응답함수를 고려한 고유치 문제 해법을

적용하였고, 안정성 로브선도를 근거로 하여 각 회전 속도에 대해서 발생하는 채터주파수를 진단할 수 있는 채터 주파수-회전속도 선도를 구현하였다. 특히, 본 연구에서는 동적 변수들을 고려한 수치예제를 활용하여 채터 주파수-회전 속도 선도의 특성 및 경향을 분석하였으며 실험적으로 평면 밀링에서 발생하는 채터 주파수를 예측함으로써, 채터 발생 여부를 진단하는데 활용할 수 있음을 확인하였다.

### 2. 평면 밀링에서의 채터 진단

#### 2.1 채터 판별식

방향 동적 밀링 계수의 주기적인 변화에 따른 채터 주파수에서의 진동만을 해석하는 단일 주파수 해석법(Single frequency analysis)을 사용하여, 채터 안정성에 대한 경계치를 얻기 위해 동적 밀링 시스템의 응답을 채터 주파수에서만 고려하면 다음과 같은 페루프 동적 밀링 시스템의 특성방정식을 얻을 수 있다<sup>(1,5)</sup>.

$$\det [[I] + \lambda [H_0(i\omega_c)]] = 0 \tag{1}$$

여기서  $[H_0(i\omega_c)]$ 는 밀링에서의 전달함수이고, 고유치( $\lambda$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = -(N/4\pi)K_t \Delta a_{lim} (1 - e^{-i\omega_c T}) \quad (2)$$

절삭 깊이가 작은 경우에는 축 방향에서의 커터와 공작물의 동특성의 변화는 무시되고 ( $\Delta z_{lim} = \Delta a_{lim}$ ), 따라서, 식(2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta a_{lim} = -\lambda / (N/4\pi)K_t (1 - e^{-i\omega_c T}) \quad (3)$$

한계절삭깊이가 실수라는 조건을 식(3)에 적용하여  $\omega_c T$  에 관한 일반적인 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\omega_c T = \varepsilon + 2\pi k, \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

여기서

$$\varepsilon = \cos^{-1} \left( \frac{1-x^2}{1+x^2} \right) \quad (5)$$

$$x = \lambda_R / \lambda_I = (1 - \cos \omega_c T) / \left\{ \pm \sqrt{1 - \cos^2 \omega_c T} \right\} \quad (6)$$

## 2.2 안정성로브선도 및 채터주파수-회전속도 선도

안정성 로브 선도(Stability lobe diagram)는 식(4)와 (3)을 이용하여 각 회전속도에서 채터가 발생되기 시작하는  $a_{lim}$ (Critical depth of cut)의 값을 결정하여 이를 회전속도에 대해 나타낸 선도이다. 한편 식(2)에서 얻은 고유치( $\lambda$ )로부터  $x$ 를 구하면, 식(4)와 식(5)로부터 스피들 속도 ( $n=60/NT$ )와 채터 주파수의 관계를 결정할 수 있는데 이를 채터주파수-회전속도 선도라 한다.

Fig. 1은 스피들 속도에 대한 채터 주파수를 구하여 채터 주파수-회전 속도 선도를 구현하는 일련의 과정을 보여준다. 채터 주파수-회전 속도 선도(Chatter frequency-Spindle speed diagram)는 안정성 로브 선도를 근거로 스피들 속도 영역 별로 해당되는 로브를 선택하여 채터 주파수를 구하여 스피들 속도에 대한 채터 주파수를 선도로 작도한 것이다. 즉, 채터 발생 진단을 하기 위해 안정성 로브 선도에서 특정 스피들 속도를 포함하는 로브를 선정함으로써, 그 로브에 해당하는 스피들 속도와 채터 주파수를 가지고 채터 주파수-회전속도 선도를 작도한 것이다.

채터 주파수-회전 속도 선도는 각 회전속도에서 발생할 수 있는 채터 주파수에 대한 정보를 제공하므로 이를 근거로 채터 발생 여부를 진단을 할 수 있다. 본 연구에서는 채터 발생 여부의 진단을 위해 시뮬레이션한 채터 주파수-회전 속도 선도를 통하여 각 진동신호에 대한 스펙트럼 분석을 통하여 채터 주파수에 해당하는 주파수 성분의 발생 및 그 크기를 분석하였다.

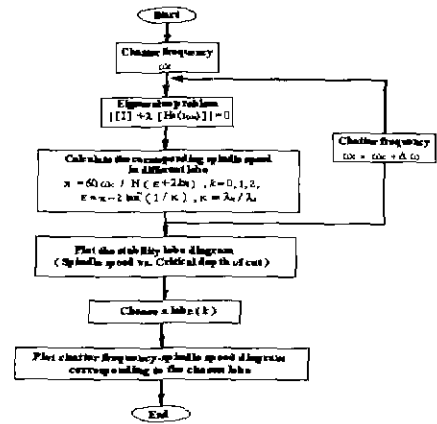


Fig. 1 Flow chart for spindle speed calculation with chatter frequency in frequency response function

Table 1 Experimental modal parameters of 1DOF face milling system

	mode	$\omega_n$ (Hz)	$k$ (MN/m)	$\zeta$
X	1	74.944	2.672	0.00958

## 3. 채터진단

### 3.1 실험 장치 및 예비 실험

본 연구에 사용된 실험 장치는 채터의 발생을 쉽게 하기 위해 공작물의 강성을 낮출 수 있는 구조로 되어 있으며 상대적으로 공구 및 스피들의 강성은 매우 크다고 볼 수 있다. 모드 시험을 통하여 얻어진 공작물의 모드 매개 변수는 Table 1에 정리된 바와 같다. 한편 Fig. 2(a),(b)는 스피들 속도 800rpm, 이송속도 87 mm/min 일 때의 절삭 깊이에 따른 정적(Static) 절삭력 실험으로 얻은 절삭력 계수들을 Curve fitting 한 것을 보여주며, 절삭 깊이에 따른 접선 방향 절삭력 계수( $K_t$ )와 반지름 방향 절삭력 계수( $K_r$ )는 각각, 평균값으로 2.6 Gpa, 0.42 으로 하였다. 절삭하는 시작각( $\phi_{sr}$ )은  $0^\circ$  이고, 끝각( $\phi_{er}$ )은  $180^\circ$  이므로, 밀링 계수( $\alpha_{xx}$ )는 -1.3195 이다.

### 3.2 수치실험

안정성 로브 선도와 채터 주파수-회전 속도 선도의 특성 및 경향을 분석하기 위해 실험 대상 시스템에 대해 수치 실험을 실시하였다. 특히, 실험에서 구해진 변수들의 변화에 대한 안정성과 채터 주파수의 변화에 대한 경향을 알아보았다.

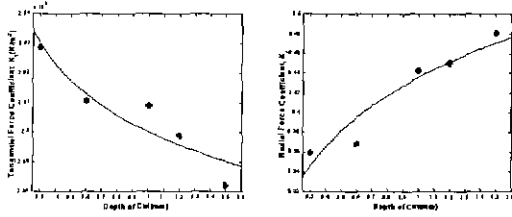


Fig. 2(a) Tangential force curve fitted      Fig. 2(b) Radial force curve fitted

Fig. 3(a),(b)는 고유 진동수가 변화할 때 안정성 로브와 chatter 주파수-회전 속도 선도의 변화를 보여주고 있다. 고유 진동수가 커질수록 chatter 주파수-회전 속도 곡선이 오른쪽 위로 이동하는 경향을 볼 수 있다. 따라서, 고유 진동수가 클수록 스피indle 속도를 증가 시킴으로써 chatter 주파수의 불확실(Uncertainty) 영역이 커짐을 알 수 있고, chatter 주파수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 4(a),(b)는 모드 강성 계수에 따른 특성을 보여주고 있다. 모드 강성 계수가 커질수록 안정성은 증가 하지만, chatter 주파수-회전 속도 곡선의 영향은 거의 없음을 볼 수 있다. Fig. 5(a),(b)는 감쇠비에 따른 안정성과 스피indle 속도에 따른 chatter 주파수의 변화를 보여주고 있다. 감쇠비가 커질수록 chatter 주파수-회전 속도 곡선은 폭이 넓어지며 상승하는 것을 볼 수 있다. 즉, 감쇠비의 증가는 스피indle 속도가 커짐에 따라서 가공 안정성을 높이는 중요한 인자가 되지만, chatter 주파수가 높아지는 경향이 있음을 알 수 있다.

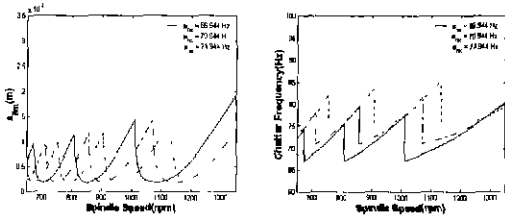


Fig. 3(a) Stability lobes with  $\omega_n$  changed      Fig. 3(b) chatter frequency-spindle speed diagram with  $\omega_n$  changed

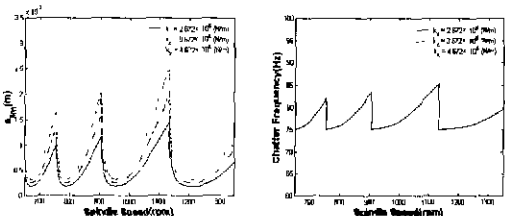


Fig. 4(a) Stability lobes with  $k_x$  changed      Fig. 4(b) chatter frequency-spindle speed diagram with  $k_x$  changed

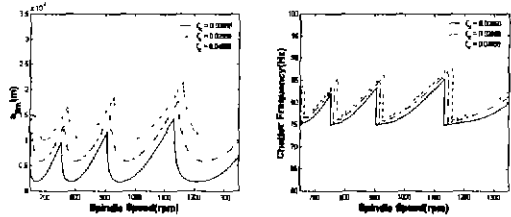


Fig. 5(a) Stability lobes with  $\zeta_x$  changed      Fig. 5(b) Predicted chatter frequencies with  $\zeta_x$  changed

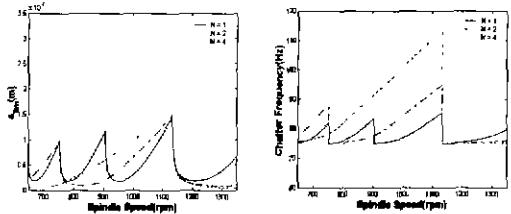


Fig. 6(a) Stability lobes with N changed      Fig. 6(b) Predicted chatter frequencies with N changed

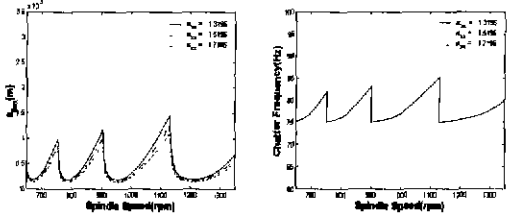


Fig. 7(a) Stability lobes with  $\alpha_{xx}$  changed      Fig. 7(b) Predicted chatter frequencies with  $\alpha_{xx}$  changed

Fig. 6(a),(b)에서는 커터의 날 수에 따른 변화를 보여주고 있는데, 커터의 날 수가 많을수록 높은 chatter 주파수가 나타남을 알 수 있고, chatter 주파수의 변화의 폭이 아주 커짐을 알 수 있다. Fig. 7(a),(b)는 밀링계수의 값을 변화시키면서 나타난 결과인데, 이것은 밀링계수의 값이 커짐에 따라 안정성은 변화되지만, chatter 주파수-회전 속도 곡선의 변화에는 거의 영향이 없음을 볼 수 있다.

### 3.3 실험적인 chatter 진단

본 연구에서 제안한 chatter 주파수-회전 속도 선도를 이용한 실험적 chatter 발생 진단을 검증하기 위해 Fig. 8과 같은 공작물을 대상으로 실험을 하였다. x 축 방향에 대한 작은 진동수를 고려하여 시스템을 제작하였다. Fig. 9(a),(b),(c)는 날 개수(N)이 1, 4에 대하여 매개 변수의 변화에 대한 chatter 주파수-회전 속도 선도의 불확실 확장 영역을 보여주고, 확장 영역에서 고유 진동수의 변화는 앞에 수치예제에서와 같이 지배적(dominant) 영향을 주는 것을 알 수 있다.

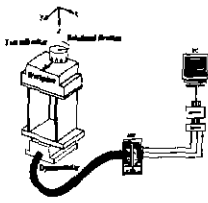


Fig. 8 Schematic diagram of chatter frequency diagnosis

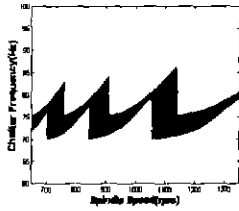


Fig. 9(a) A modified chatter frequency-spindle speed diagram at N=1

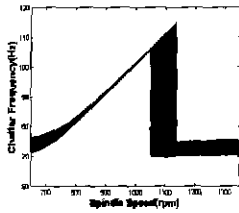


Fig. 9(b) A modified chatter frequency-spindle speed diagram at N=4

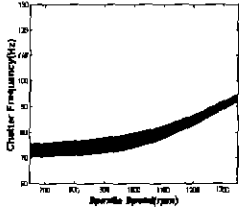


Fig. 9(c) A modified chatter frequency-spindle speed diagram at N=8

Fig. 10(a),(b)와 Fig. 11(a),(b)는 스피들 속도 800 rpm, 이송속도 87 mm/min 일 때, 절삭 깊이에 따른 각각, 날 개수(N)이 1, 4 일 때의 공구 동력계의 시간 응답과 스펙트럼 결과를 보여준다.

Fig. 12(a),(b)는 스피들 속도 1250 rpm, 이송속도 87 mm/min 일 때, 날 개수가 8 일 때의 공구 동력계의 시간 응답과 스펙트럼 결과를 보여준다.

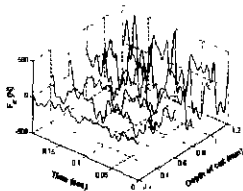


Fig. 10(a) Time domain signal of cutting force

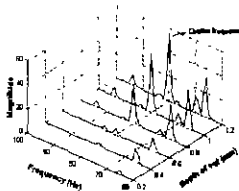


Fig. 10(b) Auto-spectrum for cutting force

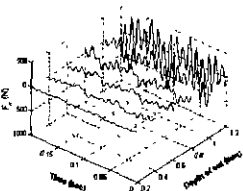


Fig. 11(a) Time domain signal of cutting force

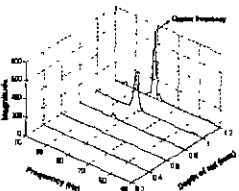


Fig. 11(b) Auto-spectrum for cutting force

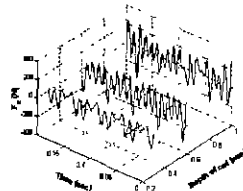


Fig. 12(a) Time domain signal of cutting force

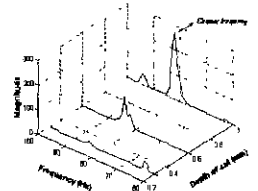


Fig. 12(b) Auto-spectrum for cutting force

#### 4. 결론

본 연구에서는 채터주파수-회전속도 선도를 이용한 채터 진단 방법을 제안하였으며 수치예제 및 실험을 통해 그 유용성을 확인하였다. 먼저 1 자유도 평면 밀링 시스템에서의 수치 예제를 통하여 채터 발생 진단을 위해 채터 주파수-회전 속도 선도의 특성을 분석하였다. 모드 매개 변수 및 동적 변수의 변화에 대한 채터 주파수-회전 속도 선도의 변화의 추이를 검토하였다. 또, 실제 1자유도 평면 밀링 시스템을 구성하여 실험한 결과, 채터 주파수의 진단 및 예측이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Budak, E. and Altintas Y., "Analytical prediction of chatter stability in milling - Part 1 : General formulation," Trans. ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 120, pp. 22-30, 1998.
- [2] Kondo, E., Ota, H., Kawal, T., "A New Method to Detect Regenerative Chatter Using Spectral Analysis, Part 1: Basic Study on Criteria for Detection of Chatter," Trans. ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 461-466, 1997.
- [3] Li, X. Q., Wong, Y. S. and Nee, A. Y. C., "Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 4, pp. 425-435, 1997.
- [4] Tarnq, Y. S. and Lee, E. C., "A critical investigation of the phase shift between the inner and outer modulation for the control of machine tool chatter," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 37, No. 12, pp. 1661-1672, 1997.
- [5] 박재현, 김현수, 박중윤, 홍성욱, "주파수 응답 함수를 이용한 평면 밀링에서의 채터 예측," 한국정밀공학회 춘계학술대회, 계명대, 1999.