

채터 안정성 해석을 이용한 자기베어링 밀링 주축의 제어기 설계 연구

Study on Controller Design for an Active Magnetic Bearing Milling Spindle Using Chatter Stability Analysis

경 진호* · 박 종권 · 노 승국(KIMM)

J. H. Kyung, J. K. Park, S. K. Ro(KIMM)

한국기계연구원 지능형정밀기계연구부, 대전시 유성구 장동 171

Abstract

The characteristic equation for regenerative chatter loop including a delay element replaced by a rational function is presented by a linear differential-difference equation, accounting for the dynamics of the AMB controllers, the uncut chip thickness equation and the cutting process as well as the rigid spindle dynamics itself. The chatter stability analysis of a rigid milling spindle suspended by 5-axes active magnetic bearings(AMBs) is also performed to investigate the influences of the damping and stiffness coefficients of AMBs on the chatter free cutting conditions, as they are allowed to vary within the stable region formed by the AMB control gains. Several cutting tests varying the derivative gains of the AMB were performed to investigate the regenerative chatter vibrations, and it was concluded that the theoretical analysis results are in good consistency with the test results.

1. 서론

최근에 이르러 고속가공(high speed cutting)에 대한 관심이 높아 가고 있으며, 이에 따라서 고속 공작기계 주축시스템에 자기베어링이 많이 활용되고 있다. 자기베어링은, 축을 비접촉으로 지지하여서 마찰손실을 줄이고 보수유지의 필요가 거의 없고 운전 중 실시간으로 모니터링이 가능하다는 장점을 보유하고 있기 때문이다. 고속가공은 소재 제거율(material removal rate)을 향상시켜서 생산 비용 및 시간을 절약하고 고정밀도 가공이 가능하다는 장점을 보유하고 있다[1].

주축계 채터(chatter)는 주로 주축-공작물 구조와 절삭공정역학(cutting process dynamics)사이의 상호 연성에 의해 발생하는 자

려 진동 채터(self excited chatter)이다. 채터는 가공 생산성을 제한하는 주요 인자로서, 가공면의 정도를 낮추고 공구의 마모 및 파손을 유발하며 심하면 주축에 손상을 줄 수도 있다. 고속가공 시 채터없는 가공조건을 구하기 위하여는 채터 안정성 해석(chatter stability analysis)이 요구된다.

그 동안 채터 안정성에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 주요 연구결과로는, Tlustý와 Polacek[2]이 2 차원 절삭에 대한 실제적인 안정성 법칙을 제시한 바 있다. Merritt[3]은 절삭공정역학은 고려하지않고, 절삭 공정과 주축계 구조에 의한 조화응답함수(harmonic response function)의 계인과 위상을 임계계적선도에 작도하여 채터 안정선도를 계산하는 이론을 개발하였다. Sridher[4]은 처음으로 밀링 안정성 해석을 포괄적으로 수행해 보았다. Lee와 Liu[5]는 안정성 한도(stability limit)를 Nyquist 안정성 판별법으로 구하는 시도를 한 바 있다. Altintas와 Budak[6]은 엔드 밀 가공의 채터 안정성 해석에 고유치문제(eigenvalue problem)를 도입하는 새로운 방법을 제시 하였다.

자기베어링 밀링 주축계의 경우, 채터안정성에 대한 자기베어링의 제어 특성 효과가 연구되어야 한다. 즉, 채터루프(chatter loop)내에 별도의 자기베어링 제어루프가 포함되어 있으므로 두개의 안정성 문제가 연성되어 있는 것이다. 따라서, 자기베어링의 제어 계인이 안정 절삭가공을 위한 값으로 결정되도록 자기베어링 제어가 설계되어야 한다. 그러나, 지금까지는 이러한 분야의 연구가 실시되고 있지 않은 실정에 있다.

본 논문에서는, 밀링 가공 시 재생 채터

(regenerative chatter) 안정성 해석에 근거한 자기베어링 제어 계인의 설계에 관하여 연구한다. 지연성분을 포함한 재생 채터 루프의 특성방정식은 주축계 동특성, 절삭 공정, 미 절삭 칩 두께 그리고 자기베어링 제어기의 동특성을 고려한 선형 미분-차분 식으로 결정된다. 채터 안정성 해석을 통하여 안정 절삭가공에 대한 자기베어링의 제어 계인의 영향을 검토한다. 그리고 밀링 가공 실험을 통하여 채터현상을 규명해 보고, 이를 통하여 자기베어링 제어계인 설정방향을 정하고자 한다.

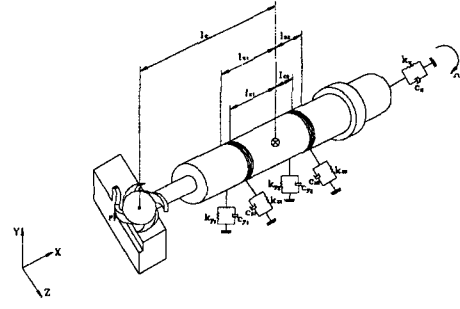


Fig. 1 Coordinate systems of the milling spindle

2. 재생채터 특성방정식 및 안정성 해석

재생채터는 이전 커터(cutter)에 의해 공작물 절삭표면에 형성된 파동에 기인한다. 채터현상을 설명하는 되 먹임 루프를 유도하기 위하여는, 미 절삭 칩 두께 방정식, 절삭 공정식, 자기베어링의 강체 주축에 대한 지배방정식 등이 요구된다. Kyung 과 Lee[7]의 논문에서 연구된 바 있는 밀링 주축의 채터루프식 및 채터안정성 선도를 구하는 방법을 정리하면 다음과 같다.

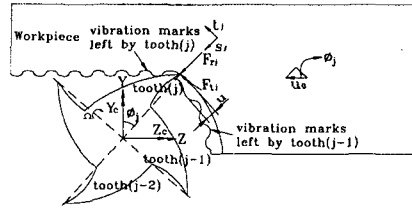


Fig. 2 Schematic representation of milling process

2.1 재생채터 특성방정식

Fig. 1 은 밀링 주축계의 좌표계를, Fig. 2 는 절삭 공정의 개략도를 나타낸다. Fig.1 에는 반경방향 및 축 방향 베어링에 의한 강성 및 댐핑, 무게중심으로부터 각각 반경방향 베어링, 변위센서 그리고 커터 사이의 거리를 나타내었다. Fig. 2 에는 비절삭 칩 두께(uncut chip-thickness), u , 반경 및 접선방향 가공력, F_r, F_t 그리고 커터의 변위, Y_c, Z_c 가 나타나 있다.

재생채터 지배방정식을 구하면 다음의 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} & M_c \ddot{\mathbf{q}}_s + (G_c + B_c K_{amp} K_d K_s) \dot{\mathbf{q}}_s + \\ & \frac{1}{2\mu} b B_F K_t A_0 T_c (\mathbf{q}_{s-1} - \mathbf{q}_s) + \\ & (K_{cy} + B_c K_{amp} K_p K_s) \mathbf{q}_s \\ & = \frac{1}{2} b B_F K_t A_0 U_0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{q}_s = \{y_1, y_2, z_1, z_2\}^T$,

$$\mathbf{q}_{s-1} = \left\{ y_1(t - \frac{T}{N}), y_2(t - \frac{T}{N}), z_1(t - \frac{T}{N}), z_2(t - \frac{T}{N}) \right\}^T$$

그리고, $M_c, G_c, K_{cy}, B_F, B_c, K_p$ 그리고 K_d 는 각각 질량, 자이로스코픽, 강성, 좌표변환, 전류강성, 비례 및 미분 계인 행렬을 나타낸다. \mathbf{q}_s 는 센서 위치에서의 변위벡터를 나타낸다. K_{amp} 와 K_s 는 파워앰프 및 센서 계인 대각 행렬을 나타낸다. K_t 와 b 는 각각 절삭계수와 절 입량을 나타낸다. A_0 는 가공계수를 나타낸다. T_c 는 센서 위치에서의 변위와 커터의 변위를 연결하는 좌표변환 행렬이다. U_0 는 이송율을 나타낸다. μ 는 겹침률(overlap factor)을 나타낸다.

식(1)에 $\mathbf{q}_s = \mathbf{q}_{s0} e^{\lambda t}$ 를 대입한 후에 제 차방정식을 유도하고 이를 통하여 다음과 같은 채터 루프 특성방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & M_c \lambda^2 + (G_c + B_c K_{amp} K_d K_s) \lambda + \\ & \frac{1}{2\mu} b B_F K_t A_0 T_c (e^{-\frac{T}{N}\lambda} - 1) + \\ & K_{cy} + B_c K_{amp} K_p K_s = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, N, T 는 각각 날 수(number of tooth), 날 주기(tooth period)를 나타낸다.

식(2)를 검토해보면, 시간지연, 절입량의 변화 그리고 자기베어링의 계인 변화가 채터 안정성에 크게 영향을 주는 요소임을 확인할 수 있다.

2.2 채터 안정성 해석

안정선도는 안정된 절삭가공을 위한 절삭 조건을 선정하는데 사용되며, 실험 또는 이론해석으로 추정할 수 있다. 안정선도는 각 열편(lobe)에 대한 절입량과 스피들 속도를 도식화하여 작성된다.

채터루프 특성방정식인 식(2)에서, 시간 지연 함수를 유리함수인 (2,2) Pade Approximant [8]로 근사화 시키고, 식(2)를 λ 의 행렬로 정리하면 일반화된 고유치문제를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A \lambda = B \quad (3)$$

식(3)과 같은 고유치 문제는 Matlab 과 같은 상용 프로그램으로 쉽게 계산할 수 있다. 채터 주파수, ω_c 를 계산하는 경우, 식(3)으로부터 시간 지연, T 를 변화시켜가면서 λ 의 실근, $\sigma = 0$ 가 되도록 하는 주파수를 구하면 이것이 채터 주파수가 된다.

안정선도는 다음의 식(4)에 나타낸 바와 같이 위에서 계산된 채터 주파수와 추정된 시간 지연량으로 안정선도를 작성한다.

$$V = \frac{f}{N(n+v)} \quad (4)$$

여기서, n, v, f, V 는 각각 한 주기의 정수배 값, 한 주기 미만의 일부분 값($0 \leq v \leq 1$), 채터 주파수(rad/sec), 그리고 스피들 속도를 나타낸다.

3. 자기베어링 밀링 주축의 안정도 해석

자기베어링 밀링 주축 설계 모델의 구조를 Fig.3에 나타내었다. 본 주축 모델은 두개의 반경방향 베어링과 하나의 축 방향 베어링, 밀링 커터 그리고 내부 모터로 구성된다. 주축 모델의 주요 재원은, 전장 280 mm, 커터를 포함한 총 중량 4.37 kg, 자기베어링 공극 0.4 mm, 바이어스 전류 3 A 등이다.

여기서는 자기베어링의 비례 및 미분 제어에 의한 채터 안정성의 영향을 검토해 보고자 한다. 안정선도는 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 결정하고 [7], 자기베어링의 제어게인의 변화는 실험으로 구한 안정 범위 안에서만 실시하였다. 안정도 해석을 위하여 사용하는 알루미늄 합금에 대한 절삭 계수는 $1,500,000,000 \text{ N/m}^2$ 로 정하였다. 인입각과 이탈각은 밀링커터가 공작

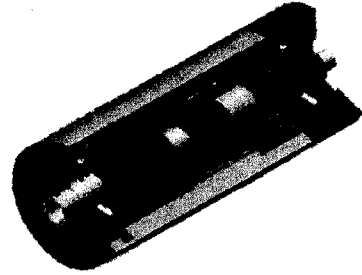


Fig. 3 Schematic diagram of a milling spindle with AMBs

물에 반경만큼 절입된 것을 가정하여서 각각 0도 및 90도로 정한다. 해석에 있어서 자기베어링의 제어게인은 기준 값에서 공히 약 35% 변화를 갖도록 하였다. 자기베어링의 제어게인 기준 값은 다음과 같다.

- 1) 앞 베어링 : $k_p(1.6), k_d(0.0016)$
- 2) 뒷 베어링 : $k_p(1.6), k_d(0.00032)$.

여기서, 앞베어링이라함은 스피들에 부착되는 커터에 가깝게 위치한 베어링을 나타낸다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 앞 베어링에서의 비례 및 미분 제어게인 변화에 따른 안정선도를 나타낸다. 이때 뒷 베어링의 비례게인은 1.6, 미분게인은 0.002로 고정해 놓았다. Fig. 4에서, 스피들 속도, 6,000 rpm 이내의 낮은 속도 범위에서 비례게인의 증가로 안정 범위가 증가하고 있음을 보이고 있으나 6000 rpm 이상의 고속 범위에서는 오히려 비례게인의 증가로 안정범위가 약간 감소됨을 알 수 있다. Fig. 5에서 미분게인의 증가로 안정 범위가 크게 확대되고 있음을 확인할 수 있다. 이상의 결과를 근거로 하면, 고속 절삭 가공 시 가능한 한 안정 제어 영역 범위 내에서, 비례게인은 낮추고 미분게인은 크게 증가시켜야 함을 알 수 있다.

뒷베어링의 안정영역은 비례 및 미분 게인의 변화에 둔감한 반응을 보이므로 [7], 본 연구에서는 고려하지 않았다.

4. 채터 안정도 실험결과

여기서는 설계/제작된 자기베어링 밀링 스피들을 이용한 측면 밀링 가공시험을 수행하여, 가공 안정성 문제를 검토하고, 자기베어링의 미분게인 증가에 의한 가공응답의 영향 등을 검토하고자 한다.

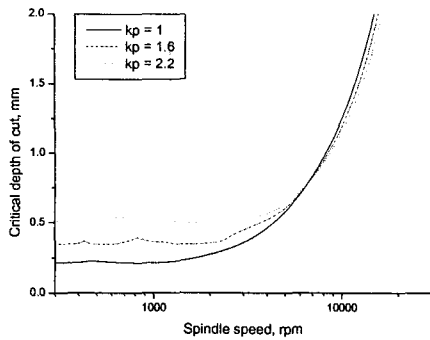


Fig. 4 Stability lobes with the proportional gain(k_p) of the front AMB changed($k_d=0.0016$ fixed)

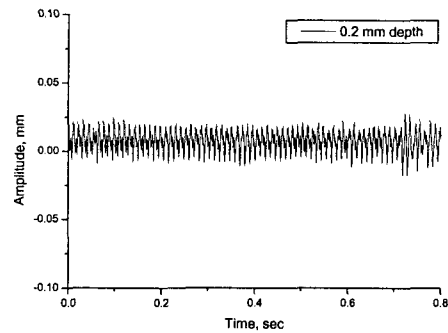


Fig. 6 Displacement of the spindle at the front bearing($k_p = 1.6, k_d=0.0005$)

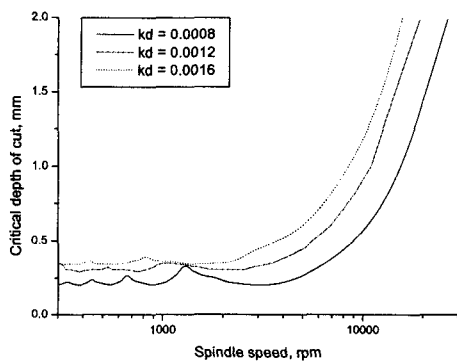


Fig. 5 Stability lobes with the derivative gain(k_d) of the front AMB changed($k_p = 1.6$ fixed)

밀링 가공에는 직경 6 mm 엔드 밀링 커터가 사용 되었고, 시편은 알루미늄 5052 합금이 사용되었다. 회전속도는 약 5,500 rpm 에서 가공이 실시 되었다.

Fig. 6 및 Fig. 7 은 밀링 가공시 앞 베어링에서의 스피들 응답이다. 가로축은 시간을 나타내고 세로축은 변위 응답량을 나타낸다. 앞 베어링에서의 자기베어링 제어 계인은 비례계인, $k_p=1.6$, 미분계인, $k_d=0.0005$ 이다. Fig. 6 은 축방향 절삭깊이가 0.2 mm 인 경우이며, 안정가공이 되고 있음을 볼 수 있으나, Fig. 7 에 나타낸 바와같이 축방향 절삭깊이가 0.5 mm 인 경우, 응답이 크게 증가 되면서 불안정 가공이 되고 있음을 확인 할 수 있었다. 불안정 가공의 원인은 Fig. 8 및 Fig. 9 의 실험결과에서 분명히 나타난다. Fig. 8 은 축방향 절삭깊이 0.2 mm 인 경우의 스피들 변위의 주파수응답 함수로써 가로축은 주파수를, 세로축은 응답진폭을 나타낸다. Fig. 9 는 축방향 절삭깊이 0.5 mm 인 경우이다. Fig. 8 에서

첫번째 피크는 회전에 동기되는 응답 성분으로 주기적인 가공응답을 나타내고, 두번째, 세번째 피크는 스피들의 런아웃(runout)에 의한 고조파(harmonics) 성분 응답이며 대체적으로 진폭이 0.02 mm 이내의 작은 응답 수준을 보인다. 그러나, Fig. 9 의 결과를 보면 약 140 Hz 의 채터 응답 성분이 나타남을 확인할 수 있었고, 이로 인하여 스피들의 응답이 진폭 0.1mm 로 크게 증가하여 불안정하게 됨을 확인할 수 있었다. 채터 현상을 보다 명확하게 확인하기 위하여 Fig. 10 에 나타낸 바와 같이 축방향 절삭깊이를 증가시켜가면서 스피들의 응답추이를 살펴보았다. 수평축은 축방향 절삭깊이를, 수직축은 스피들 변위의 최대 및 최소 값을 나타낸다. 축방향 절삭깊이가 0.2 mm 에서 0.3 mm 로 증가될 때에 스피들의 응답 변화량이 커지면서, 즉 불안정응답을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 3 장의 이론해석 결과와도 근사하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5 에서 응답이 불안정하게 되는 축방향 절삭깊이가 미분계인 0.0008 인 경우 약 0.2 mm 에서 0.3 mm 영역에 위치하므로, 이론 해석시 미고려된 불확실성 등을 감안하면 대체적으로 본 실험결과와 유사함을 알 수 있었다.

축방향 절삭깊이 0.5 mm 에서 미분계인을 0.0012 로 증가시켜보면, 미분계인의 증가로 채터진동이 발생되고 있지 않음을 Fig. 11 및 Fig. 12 의 실험결과를 통하여 알 수 있었다. Fig. 11 에서, 채터 주파수는 나타나지 않았으며 절삭깊이의 증가로 스피들의 회전속도에 동기되는 응답성분이 증가되고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 12 의 스피들 시간응답 변위에서도 안정 가공상태이기는 하나 응답이 증가된 모습을 보여주고 있다.

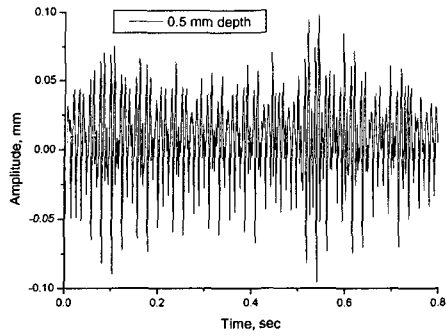


Fig. 7 Displacement of the spindle at the front bearing($k_p = 1.6, k_d=0.0005$)

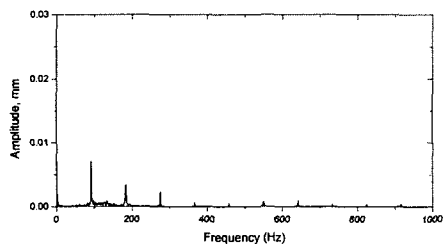


Fig. 8 Spectrum of the displacement of the spindle at the front bearing(0.2 mm depth)

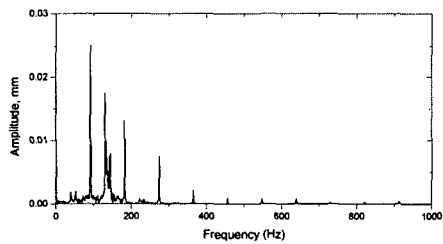


Fig. 9 Spectrum of the displacement of the spindle at the front bearing(0.5 mm depth)

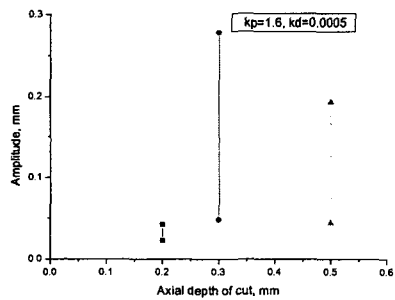


Fig. 10 Amplitude of the displacement of the spindle at the front bearing with the axial depth of cut changed

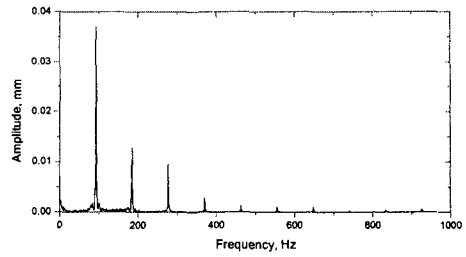


Fig. 11 Spectrum of the displacement of the spindle at the front bearing(0.5 mm depth)

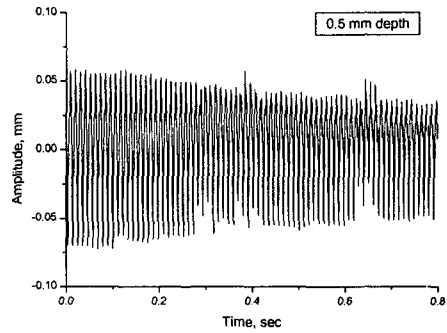


Fig. 12 Displacement of the spindle at the front bearing($k_p = 1.6, k_d=0.0012$)

이 결과 역시 Fig. 5 의 해석 결과에서 제시된 바와 같이 미분 계인의 증가로 안정가공영역이 증가되었기 때문이다.

5. 결론

이상과 같은 연구를 통하여 수행된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 자기베어링 밀링 주축에 대한 재생채터 루프 특성방정식을 정리하였다.
- 2) 채터 안정성 해석을 통하여 자기베어링의 제어게인 변화에 따른 밀링 주축의 채터 안정성 변화를 규명하였다.
- 3) 밀링가공 실험을 통하여 채터 현상을 규명하였고, 자기베어링의 제어게인 변화에 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있었다.
- 4) 자기베어링의 제어게인을 적절히 조정하면 즉 미분계인의 증가 또는 스핀들 속도에 따른 비례계인의 감소 등을 통하여 보다 안정한 고속 절삭 가공을 효과적으로 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) H. K. Tonshoff, H. G. Wobker and C. Blawit, "High speed cutting of grey cast iron", Fourth International Symposium on Magnetic Bearings, August, ETH Zurich (1994)
- (2) J. Tlustý and M. Poláček, "The stability of machine tools against self excited vibrations in machining", International Research in Production Engineering, ASME, pp. 465 - 474 (1963)
- (3) H. E. Merritt, "Theory of self - excited machine tool chatter", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 87, pp. 447 - 454 (1965)
- (4) R. Sridhar, R. E. Hohn and G. W. Long, "General formulation of the milling process equation", ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 317 - 324 (1968)
- (5) A. C. Lee and C. S. Liu, "Analysis of chatter vibration in the end milling process", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 31(4), pp. 471 - 479 (1991a)
- (6) Y. Altintas and E. Budak, "Analytical prediction of stability lobes", Annals of the CIRP, Vol. 44 (1995)
- (7) J. H. Kyung and C. W. Lee, "Controller design for a magnetically suspended milling spindle based on chatter stability analysis", Eighth International Symposium on Magnetic Bearings, Mito, Japan, August (2002)
- (8) G. F. Franklin, J. D. Powell and A. E. Naeini, Feedback control of dynamic systems. (Addison-Wesley, 1994)