

## 채터없는 안정 가공을 위한 자기베어링 밀링 주축의 PID 제어 게인 튜닝 연구

경진호\*, 노승국, 박종권(한국기계연구원 지능형정밀기계연구부),  
박선원(한국과학기술원 화학공학과)

### A study on the PID controller-gain tuning of the magnetically suspended milling spindle for chatter-free cutting

J. H. Kyung, S. K. Rho, J. K. Park(Int. & Precision Mach. Dept., KIMM), S. Park(Chem. Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

A method for PID controller tuning based on process models for unstable processes was introduced. The optimal, proportional and derivative gains of the AMBs were determined by the tuning method and utilized for the chatter stability analysis in order to search for the chatter-free cutting region. The stability analysis results showed that the optimal gains give wider chatter-free cutting region, and as a result the proposed tuning method was confirmed to be an effective tuning method for determining the optimal gains of the AMBs.

**Key Words** : Chatter-free cutting (채터없는 안정가공), Magnetic bearing (자기베어링), PID controller tuning (PID 제어 기 튜닝), Milling spindle (밀링 주축)

#### 1. 서론

자기베어링은 축을 비접촉으로 지지하므로 마찰 손실이 적고 보수유지의 필요가 거의 없으며 운전 중 실시간으로 모니터링이 가능한 장점 등을 보유하고 있다. 따라서, 최근에 이르러 고속 공작기계 주축계에 자기베어링이 많이 활용되고 있는 실정이다<sup>1,2</sup>.

주축계 채터(chatter)는 가공 생산성을 제한하는 주요 인자로서, 주로 주축-공작물 구조와 절삭공정 역학(cutting process dynamics) 사이의 상호 연성에 의해 발생하는 재생 채터(regenerative chatter)이다. 고속 가공 시 채터없는 가공조건을 구하기 위하여는 채터 안정성 해석(chatter stability analysis)이 요구된다. 또한, 자기베어링 밀링 주축계의 경우, 채터 안정성에 대한 자기베어링의 제어기의 영향이 연구되어야 한다. 즉, 채터 루프(chatter loop)내에 별도의 자기베어링 제어 루프가 포함되어 있으므로, 각각 채터 안정성 및 자기베어링 안정성의 두개의 안정

성 문제가 연성되어 있는 것이다. 따라서, 채터없는 안전한 절삭 가공이 이루어 질 수 있도록 자기베어링 제어기가 설계되어야 한다.

본 연구와 관련하여, 그동안 자기베어링 밀링 주축에 대한 채터 안정성 해석이 수행되어, 고속 가공에서 채터없는 안정 가공을 위한 제어 게인 설정에 관하여 연구된 바가 있다<sup>3</sup>. 그리고, 채터 안정성을 고려하지 않고 자기베어링의 안정성만을 고려한 제어기 설계 방법에 관하여는 많은 연구자에 의해서 관련 연구가 수행되어 온 바 있다<sup>2,4,5</sup>. 특히, 불안정 프로세스를 갖는 시스템에서도 아주 효과적으로 제어기를 튜닝할 수 있는 연구도 수행되어 왔다<sup>6</sup>. 그러나, 자기베어링의 제어 게인이 채터 안정성에 주는 영향을 검토한 연구는 수행되지 않고 있으며, 따라서 자기베어링 밀링 주축의 가공 안정성을 검토하기 위하여는 이에 대한 연구가 요구된다.

본 논문에서는, 채터없는 안전한 밀링 가공을 위한 자기베어링 제어 게인의 튜닝에 관하여 연구하고자 한다. 이력 제어시스템(cascaded control system)

으로 구성된 개루프 불안정 프로세스(open loop unstable process) 모델에 대한 PID 제어기의 게인 튜닝을 실시한다. 먼저, 원하는 계환 제어응답 특성을 갖는 이상적인 제어기를 구하고, 이 제어기를 Maclaurin series 로 전개하여 근사화된 PID 제어기를 결정한다. 결정된 자기베어링의 최적 제어 게인을 이용한 채터 안정성 해석을 통하여 안정 절삭가공 영역을 검토한다. 자기베어링의 제어 게인 변화에 대한 채터 안정 영역을 검토하고, 최적 제어 게인에서의 안정 절삭 가공 영역의 여유를 규명한다. 또한, 이를 통하여 본 연구에서 사용한 제어 게인 튜닝의 효용성도 함께 규명하고자 한다.

## 2. 자기베어링 밀링 주축 시스템

### 2.1 시스템 구조

그림 1 에 나타난 바와 같이 자기베어링 밀링 주축계는 반경방향 및 축방향 진동을 제어하기 위하여 앞/뒤에 설치된 반경방향 자기베어링과 축방향 자기베어링, 스피들, 내장모터(5.5 kW 급) 그리고 밀링 커터로 구성되어 있다. 그리고, 스피들의 진동을 측정하기 위한 갭 센서 및 앰프, 전자석 액츄에이터에 전류를 공급하는 파워 앰프 그리고 제어기로 구성된다.

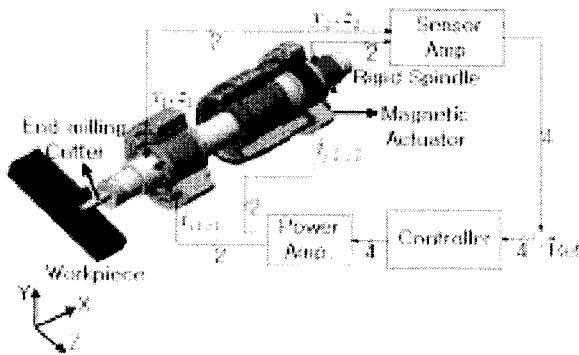


Fig. 1 Schematic diagram of an AMB milling spindle system

### 2.2 제원

주요 제원은 다음과 같다.

- 주축 : 길이(280 mm), 평균 직경(49.2 mm), 밀링 커터를 포함한 중량(4.37 kg)
- 자기베어링 : 공극(0.4 mm), 자극 면적(앞베어링 : 300 mm<sup>2</sup>, 뒷베어링 : 200 mm<sup>2</sup>), 갭은수(110 per leg), 바이어스 전류(3 A), 파워 앰프 시정수(0.0001 sec), PD 제어기의 LPF 시정수(0.000032 sec)

## 3. PID 제어기 튜닝 이론

본 연구에서는 실제 가공 시험에 적용할 자기베어링의 최적 제어 게인 값을 결정하기 위하여, 프로세스 모델에 근거한 PID 제어기 튜닝 방법이 제시되었다. 본 튜닝 방법은 먼저 그림 2 에 나타난 바와 같이 주어진 프로세스를 이용하여 익렬 제어 시스템을 구성하는 것으로 시작한다. 오우버슈트를 억제하기 위하여 목표치 필터(set point filter),  $f_R$  을 블록선도에 추가되었다. 그리고, 요구 계환 제어 응답을 만족시켜 주는 이상적인 제어기를 구하고 이를 Maclaurin serie 로 전개하여, 이상적인 제어기를 PID 제어기로 근사화 시킨다. 이 방법은 개루프 불안정 프로세스에도 적용이 가능하다. 즉, Lee 와 Park<sup>6</sup> 이 제안한 PID 제어기 튜닝 방법의 절차를 따라서 다음과 같은 이상적인 제어기,  $G_C$  를 결정할 수 있다.

$$G_C = \frac{P_M^{-1}(s) \times \left( \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i s^{i+1}}{(\lambda s + 1)^m} \right)}{1 - \frac{P_A(s) \left( \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i s^{i+1}}{(\lambda s + 1)^m} \right)}{P_M(s)}} \quad (1)$$

여기서,  $P_M$  은 주어진 프로세스 전달함수에서 분모 항을 나타내고  $P_A$  는 분자 항을 나타낸다.  $\alpha$  는  $G_D$  의 불안정한 근을 제거하는데 필요한 시정수 값이다.  $\lambda$  는 조정 가능한 시정수 이다.  $m$  은 불안정 근의 갯수를 나타내고  $n$  은 제어기가 구현 가능하도록 하기 위하여 정해지는 상수이다.

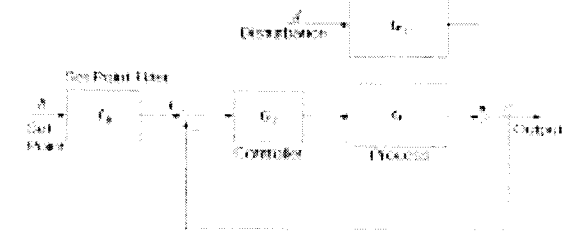


Fig. 2 Classical feedback diagram

이상적인 제어기를 PID 제어기로 근사화 시키기 위하여 다음과 같이 다시 식(1)을 정리한다.

$$G_C \equiv f(s)/s \quad (2)$$

식(2)를 Maclaurin series 로 전개하면 다음과 같다.

$$G_C(s) = \frac{1}{s} (f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2!} s^2 + \dots) \quad (3)$$

식(3)에서 처음의 세가지 항들을 이용하면 다음과 같이 PID 제어기를 제작할 수 있다.

$$G_C = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (4)$$

여기서,

$$K_c = f'(0)$$

$$\tau_I = f'(0)/f(0)$$

$$\tau_D = f''(0)/2f'(0) \quad \tau_I \geq 0 \quad \tau_D \geq 0$$

#### 4. 시뮬레이션 연구

##### 4.1 PID 제어기 튜닝

자기베어링의 최적 제어 게인 값을 결정하기 위하여 3 절에서 제시한 방법에 따라서 불안정 프로세스 모델에 근거한 PID 제어기 튜닝을 실시하였다. 먼저, 그림 3 에 나타난 바와 같이 주어진 시스템의 케환 제어 블록선도를 익털 제어시스템으로 재구성한다. 그림 3 은 Y 방향에서 일축 자기베어링 시스템의 블록 선도를 나타낸다. 이때 파워 앰프 동특성은 상수 값으로 근사화 되었다. 목표치 필터, 근사화된 PID 이상적인 제어기 그리고 프로세스(SOUP : second order unstable process)의 전달함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$f_R = \frac{1}{as+1}$$

$$G_c = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{K}{(s-1)(as+1)}$$

여기서,  $\alpha = \tau \left[ \left( \frac{\lambda}{\tau} + 1 \right)^2 - 1 \right]$

여기서,  $\lambda$  는 케환제어 시정수이다.  $\tau$ ,  $a$  는 프로세서의 시정수이고,  $K$  는 프로세서의 게인을 나타낸다.  $K_c$ ,  $\tau_I$  그리고  $\tau_D$  는 비례게인, 적분기의 시정수 그리고 미분기의 시정수를 나타낸다.

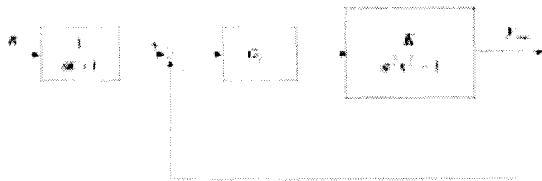


Fig. 3 Block diagram of the AMB milling spindle

2차 불안정 프로세스의 PID 튜닝 값은 다음과 같다.

$$K_c = \frac{\tau_I}{-K(2\lambda - \alpha)}$$

$$\tau_I = -\tau + a + \alpha - \frac{\lambda^2}{2\lambda - \alpha} \quad (6)$$

$$\tau_D = \frac{-\tau\alpha + a\alpha - a\tau}{\tau_I} - \frac{\lambda^2}{2\lambda - \alpha}$$

프로세스의 파라미터 값들은 다음과 같다.

$$a = \sqrt{\frac{m_{y1}}{k_{y1}}}, \quad \tau = a,$$

$$K = \frac{k_{ay1}}{R_{y1} + k_{ay1}k_{py1}} k_{y1}k_s / k_{y1} \quad (7)$$

PID 튜닝한 결과를 표 1 에 나타내었다. 그림 4 는 케환제어 시정수,  $\lambda$  의 변화에 따른 앞베어링에서의 스핀들의 계단응답을 나타낸다. 그림 4 에서, y 축은 갭 센서 출력(controlled variable,  $y_{out}$ ) (0.2 V/div.)을 나타내고 x 축은 시간(0.01 sec/div.)을 나타낸다. 케환제어 시정수가  $\lambda=0.00221$  일때 희망하는 케환제어 응답을 만들 수 있었으며 감쇠비,  $\zeta$  는 약 0.7 이 되었다. 이때 튜닝된 앞 베어링의 비례 및 미분 게인 값은 각각  $k_p=1.6$  및  $k_d=0.0035$  이 되었다. 같은 방법으로 구한 뒷 베어링에서의 케환제어 시정수는  $\lambda=0.0034$  가 되었다. 튜닝된 뒷 베어링의 비례 및 미분 게인은 각각  $k_p=1.6$  및  $k_d=0.0054$  가 되었다.

Table 1 Tuning results by the PID tuning method

	Front bearing		Rear bearing	
$\lambda$	0.00100	0.00221	0.00400	0.0034
$\zeta$	0.561	0.708	0.519	0.703
$k_p$	1.891	1.645	1.956	1.648
$k_d$	0.0035	0.0035	0.0035	0.0038
$\tau_I$	0.0025	0.0021	0.0019	0.0015
$\tau_D$	1.891	1.645	1.956	1.648
$k_d$	0.0042	0.0035	0.0020	0.0054

자기베어링의 미분 게인이 높은 경우 실제 가공 실험에서 주축의 유연 모드가 가진 되는 공진 응답 문제가 발생할 수 있다. 왜냐하면 자기베어링의 미분 게인이 높을수록 고 주파수 노이즈가 제어 시스템에 유입되어 주축을 가진하는 요인으로 작용하기 때문이다. PID 튜닝을 통하여 구한 미분 게인은 실제 가공 시험을 통하여 유연 모드 공진 응답을 발생 시키지 않는 값으로 재조정될 필요가 있다. 따라서, 이러한 공진응답이 발생하지 않도록 실제 가공실험을 통하여 미분 게인 값이 적절하게 낮은 값으로 조정되었다. 최종적으로 앞(뒤) 베어링의 최적 비례 및 미분 게인 값은  $k_p=1.6$  과  $k_d=0.0015$  ( $k_p=1.6$  과  $k_d=0.002$ )로 결정되었다.

#### 4.2 채터 안정성 시뮬레이션

지연성분을 포함한 재생 채터 루프의 특성방정식은 주축계 동특성, 절삭 공정, 미 절삭 칩 두께 그리고 자기베어링 제어기의 동특성을 고려한 선형 미분-차분 식으로 수식화 될 수 있다. 이러한 특성방정식을 이용하면 채터 안정성 해석을 수행할 수 있으며 본 연구에서는 Kyung 과 Lee<sup>3</sup> 가 정리한 해석 방법을 이용하여 주어진 자기베어링의 제어 계인에 대한 채터없는 안정 가공영역을 해석으로 구하였다.

고속 가공(5,500 rpm)에서의 채터 안정성 해석 및 관련 실험을 수행하였고 그림 5 에 그 결과를 나타내었다. 앞 베어링의 미분 계인의 변화가 임계 절삭 깊이의 변화 즉, 안정 절삭 가공에 주는 영향을 검토한 결과이다. 자기베어링의 미분 계인이 증가할수록 안정 절삭 가공 영역은 따라서 증가 되었다. 반면에 비례 계인이 안정 가공 영역의 변화에 주는 영향은 미미한 것으로 규명되었다. 본 연구에서 PID 튜닝으로 결정된 최적 제어 계인에서 안정 가공 영역이 최대가 되었고, 이를 통해 본 연구에서 사용한 제어 계인 튜닝의 효용성을 확인할 수 있었다.

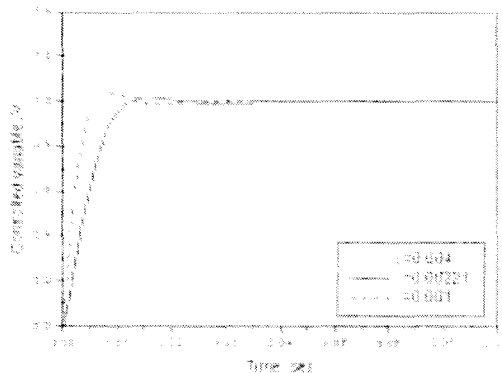


Fig. 4 Step responses of the front AMB

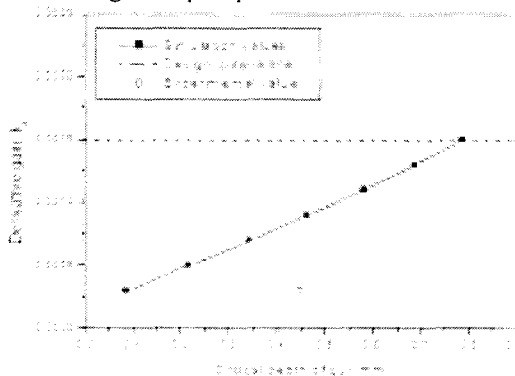


Fig. 5 Derivative gain vs. critical depth of cut

## 5. 결론

본 논문에서는, 채터없는 안전한 밀링 가공을

위한 자기베어링 제어 계인의 튜닝에 관하여 연구를 수행하였고, 이를 통하여 자기베어링의 최적 제어 계인을 결정하였다. 채터 안정성 해석을 통하여 자기베어링의 제어 계인 변화에 대한 채터없는 안정 가공영역을 검토하였다. 본 연구 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 밀링 주축에 사용되는 자기베어링 제어기의 효과적인 PID 튜닝 방법을 정리하였다.
2. 본 연구에서 제시한 제어 계인 튜닝 방법을 이용하여 밀링 주축 모델의 안정 절삭 가공을 위한 최적 제어 계인을 결정하였다.
3. 채터 안정성 해석을 통하여 고속의 안정 절삭가공에 대한 자기베어링의 제어 계인의 영향을 검토하였고 그 결과는 다음과 같다.
  - 미분 계인을 증가 시키면 채터없는 안정 가공 영역이 따라서 증가 되었고, 최적 미분 계인 값에서 안정 가공 영역이 가장 넓게 계산되었음을 확인 할 수 있었다. 즉, 최적 제어 계인에서 채터없는 안정 가공을 위한 제어 계인의 여유가 높음을 알 수 있었다.
  - 비례 계인은 안정 가공 영역의 변화에 미미한 영향을 주는 것으로 규명되었다.

## 참고문헌

1. Tonshoff, H. K., Wobker, H. G. and Blawit, C., "High Speed Cutting of Gray Cast Iron", Fourth International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, Switzerland, August 1994.
2. Schweitzer, G., Bleuler, H. and Traxler, A., "Active Magnetic Bearings: Basics, Properties and Applications of Active Magnetic Bearings", vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich, 1994
3. Kyung, J. H. and Lee, C. W., "Controller Design for a Magnetically Suspended Milling Spindle Based on Chatter Stability Analysis", Eighth International Symposium on Magnetic Bearings, Mito, Japan, 2002
4. Kim, C. S., "Dynamic Analysis and Isotropic Optimal Control of Active Magnetic Bearing System", KAIST Ph.D. Thesis, 1995
5. Lee, Y. H., Park, S. and Lee, M. Y., "PID Controller Tuning to Obtain Desired Closed Loop Responses for Cascade Control Systems", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 37, pp 1859-1865, 1998
6. Lee, Y. H., Lee, J. S. and Park, S., "PID Controller Tuning for Integrating and Unstable Processes with Time Delay", Chemical Engineering Science, Vol. 55, pp 3481-3493, 2000