

# 자기베어링 지지 연삭기 주축계의 고속 회전시 런아웃 적응제어

노승국\*(KIMM), 경진호(KIMM), 박종권(KIMM), 최언돈(주식회사 성림)

## Adaptive Runout Control of Magnetically Suspended High Speed Grinder Spindle

S. K. Ro(KIMM), J. H. Kyung(KIMM), J. K. Park(KIMM), U. D. Choi(Sung Rim Co. LTD)

### ABSTRACT

In this paper, the case study of reducing rotational errors is done for a grinding spindle with an active magnetic bearing system. The rotational errors acting on the magnetic bearing spindle are due to mass unbalance of rotor, runout, grinding excitation and unmodeled nonlinear dynamics of electromagnets. For the most case, the electrical runout of sensor target is big even in well-finished surface; this runout can cause a rotation error amplified by feedback control system. The adaptive feedforward method based on LMS algorithm is discussed to compensate this kind of runout effects, and investigated its effectiveness by numerical simulation and experimental analysis. The rotor orbit size in both bearings is reduced about to 5  $\mu\text{m}$  due to 1X rejection by feedforward control up to 50,000 rpm.

**Key Words** : magnetic bearing system(자기베어링 시스템), runout control(런아웃 제어), adaptive feedforward control(적응 피이드포워드 제어), LMS algorithm (LMS 알고리즘)

### 1. 서론

자기베어링을 이용한 공작기계 주축계에 있어서 회전정밀도는 회전속도와 함께 중요한 성능지수의 하나로 고속도를 실현하는 것과 더불어 구현해야 하는 과제이다. 회전오차가 발생하는 원인으로는 회전체불균형, 강제 진동 등에서 발생하는 외부가진과 축의 형상오차, 모터의 노이즈 등에 기인하는 런아웃과 자기베어링계의 비선형성에 의한 오차등이 있으며 제어루프내에서 증폭되기도 한다.

이중 런아웃의 경우, 와전류형 변위센서를 사용하는 자기베어링 시스템의 경우, 센서 타겟의 재질 불균일 등에 의한 electrical runout 이 발생되었을 때 제어루프내에서 증폭되어 실제 주축의 회전오차를 발생시키기 때문에 이에 대한 제어가 필요하다. 런아웃에 의한 회전 오차는 주로 회전수와 같은 주파수를 갖거나 정수배의 주파수를 갖고 있으며 이러한 특정 주파수의 주기적인 외란을 없애기 위해서는 일반적으로 노치 필터를 피이드백 제어루프 내에 포함시키는 방법과 회전에 동기되는 신호를 미리 제거해 주는 Feedforward 방법이 사용된다. Feedforward 제어의 경우 런아웃의 양상이 회전수

등의 환경에 따라 변하므로 적응제어의 방법이 효과적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 디지털 PID 제어시스템으로 제어되는 연삭기용 자기베어링 주축계의 런아웃 제어를 위하여 LMS 알고리즘의 적응 피이드포워드 제어를 검토하고, 제작된 주축의 50,000 rpm 까지의 고속회전실험을 통하여 런아웃에 의한 효과를 시험하고, 앞, 뒤 베어링에 1 차 회전성분에 대한 적응 피이드포워드 제어를 적용하여 런아웃 효과를 효과적으로 제거하였다. 이때, 센서의 출력은 런아웃 신호만을 포함하며 회전성분 진동이 제거되어 본 연구의 알고리즘이 매우 유용함을 확인하였다.

### 2. 자기베어링 시스템

#### 2.1 자기베어링을 이용한 연삭기 주축

대상 모델의 자기베어링 연삭기 주축계는 Fig.1 과 같다. 최고 50,000 rpm 의 회전수를 갖는 5.5 kW 내장형 모터와 반경방향, 축방향의 자기베어링 전자석 및 센서, 그리고 회전수 검출 및 각도 검출을 위한 센서로 구성되어 있으며 자기베어링의 제원은 Table 1 과 같이 설계되었다.

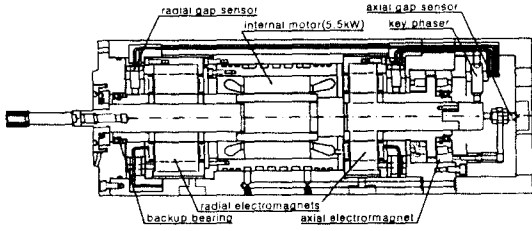


Fig.1 schematic diagram of the grinding spindle

$$G_R(s) = \frac{K_i K_s}{ms^2 - K_x} \quad (1)$$

이며, 앞베어링의 경우  $m=1.5$ , 센서의 증폭비인  $K_s=10000[V/m]$  이고 대역폭이 80 kHz 로 동특성은 무시할 수 있다. 전력증폭기의 전달함수는 실험을 통하여 2 차 시스템으로 모델링 하였다.[1] 뒷 베어링의 경우  $K_{amp}=0.8$ ,  $\omega_{np}=2500\text{Hz}$ ,  $\zeta=1.7$  이며, 앞베어링은 인덕턴스에 의하여  $\omega_{np}=1800\text{Hz}$  이다.

Table 1. the specifications of radial magnetic bearing

Item	Front Bearing	Rear Bearing
air gap, $g_0$ [mm]	0.3	0.3
area of a pole, $A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	300	200
number of turn, $N$ [times]	110	110
bias current(bias flux=0.75[T]), $I_0$ [A]	2.1	2.1
current gain, $K_x$ [N/A]	273	182
position gain, $K_x$ [N/m]	$1.77 \times 10^6$	$1.18 \times 10^6$

$$G_A(s) = \frac{\omega_{np}^2 K_{amp}}{s^2 + 2\zeta_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2} \quad (2)$$

제어기의 전달함수  $G_c(z)$ 는 비례게인  $K_p$ , 미분시간  $T_d$ 와 적분게인  $K_I$ 를 갖는 PID 제어로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_c(z) = P + D \frac{N_d(h-1)}{hN_d z + (h-1)} + I \frac{h(z+1)}{2(z-1)} \quad (3)$$

## 2.2 실험 주축의 제어시스템 구성

Fig.2 에는 런아웃과 외란모델을 포함하고 이를 제어하기 위한 적응 피드포워드 루프를 갖는 1 자유도 자기베어링 시스템의 블록 선도를 나타내었다.

여기서  $P=1.6$ , 앞베어링의  $D=0.0015$ , 뒷베어링의  $D=0.002$ ,  $I=1$ ,  $N_d=15$  이고, 샘플시간  $h=100\mu$  sec 이다.

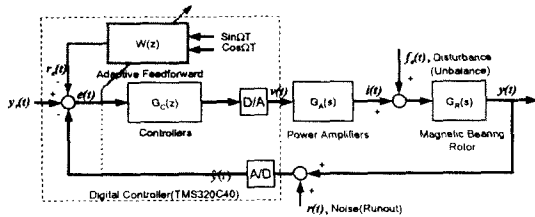


Fig.2 block diagram of magnetic bearing system with feedforward controller

## 2.3. 런아웃 제거 문제

전체 시스템에 작용하는 외란은 Fig. 2 의 입력측에 작용하는 언밸런스로 대표될 수 있는 외란하중  $f_d(t)$ 와 출력측에 작용하는 노이즈 및 런아웃  $r(t)$ 로 대표될 수 있다. 이때 런아웃  $r(t)$  만을 고려할 경우 제 주축의 변위  $y$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

제어시스템은 10kHz 로 sampling 되는 디지털 제어시스템이며 실제 제작된 주축시스템의 동역학적 제원은 질량  $M = 4.38$  kg 이며, 관성모멘트  $J_p = 0.0014$  kgm<sup>2</sup>,  $J_r = 0.0362$  kgm<sup>2</sup> 이다. 또한 제작된 스프링들의 첫 번째 유연 모드와 고유진동수는 1.16 kHz 로써 회전속도 범위를 벗어나고 있어 강제주축을 가정하고 각 베어링의 센서의 신호를 해당 베어링에 되먹임하는 직접 폐환제어 방식을 취하고 있다.

$$y = \frac{G_R G_C G_A}{1 + G_R G_C G_A} [y_r - r - r_c] \quad (4)$$

여기서  $r(t)$ 는 대체로 회전수의 여러 차수의 배수에 해당하는 주파수 성분을 가진 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum R_k \sin(k\Omega t + \phi_k) \quad (5)$$

Fig.2 의 각 블록에서의 전달함수는 1 자유도 모델을 가정할 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다. 우선 전자석과 로터의 관계에서 전달함수  $G_R(s)$ 는,

일정 성분의 런아웃 제거를 위해서는 노치필터가 유용하게 사용될 수 있으나 노치필터의 위상 왜곡으로 인하여 시스템의 안정성을 해칠 수 있으므로 이에 본 연구에서는 보상신호  $r_c(t)$ 를 피드포워드 입력하여 런아웃에 의한 로터의 변위를 최소화 할 수 있도록 하였다.

### 3 런아웃 제어 알고리즘

#### 3.1 LMS 알고리즘의 적응 Feedforward 제어

시스템의 모델이 결정되어 있는 경우, 파라미터를 실시간으로 추종하는 방법중 LMS (least mean square) 오차 목적함수  $V(\theta, t)$ 를 사용하는 LMS 알고리즘은 다음과 같이 단순한 식으로 일반화된다.[4]

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} [\xi(t) - \phi^T(t)\theta(t)]^2 \quad (6)$$

이때 파라미터의 추종값  $\hat{\theta}(t)$ 는 이전단계의 추종값  $\hat{\theta}(t-1)$ 과 수렴상수  $\mu$ 로 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \mu\phi(t)[\xi(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (7)$$

따라서 오차 목적함수를 식(6)과 같이 나타낼 경우 식(7)을 이용하여 LMS 알고리즘을 구현할 수 있다. 런아웃의 제거는 런아웃에 의한 제어력을 제거하기 위한 것으로 제어기의 입력으로 들어가는 명령오차  $e(t)$ 를 최소화 하기 위하여  $V$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$V = e^2(t) = [\hat{y}(t) + \sum (w_{k0} \sin k\Omega t + w_{k1} \cos k\Omega t)]^2 \quad (8)$$

따라서, (7)에 의해 추종된 계수는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} w_{k0}(t) \\ w_{k1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{k0}(t-1) \\ w_{k1}(t-1) \end{pmatrix} + \mu e(t) \begin{pmatrix} \sin k\Omega t \\ \cos k\Omega t \end{pmatrix} \quad (9)$$

이때 Feedforward 보상신호  $r_c(t)$ 는 다음과 같다.

$$r_c(t) = \sum [w_{k0}(t-1) \sin k\Omega t + w_{k1}(t-1) \cos k\Omega t] \quad (10)$$

즉, 명령추종오차  $e(t)$ 에 적응시키는 경우는  $e(t)$ 를 최소화하여 런아웃의 영향이 제거된다. 제거하고자 하는 신호의 배수만큼 적응시켜서 합산하는 방식으로 적용하게 된다.

#### 3.2 런아웃 제어 시뮬레이션

주축의 런아웃이 있는 경우 제어 성능을 시뮬레이션 하기 위하여 Fig.3 과 같은 런아웃을 적용하였다.[6] 뒷베어링의 경우 약 80  $\mu\text{m}$ 의 값을 가지고, 1X 과 2X 성분이 주를 이루지만 그 외의 고차 성분들도 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

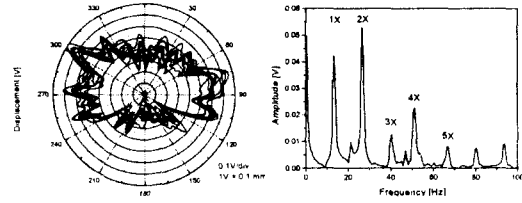


Fig. 3 example of measured runout of rear sensor target

이러한 런아웃에 대하여 6,000rpm 과 10,000rpm에서의 응답을 강체 주축계의 4 자유도 모델로 시뮬레이션한 결과(MATLAB 이용) LMS 알고리즘을 적용하여 1X와 2X 성분을 제거하였을 경우 추종오차 응답이 Fig.4와 같이 시간에 따라 줄어드는 것을 알 수 있다.

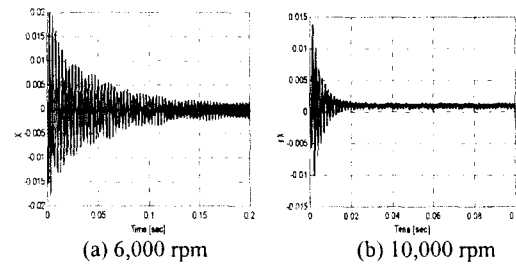


Fig.4 runout control simulation with LMS algorithm

#### 3.3 LMS 알고리즘의 실제 적용 문제

LMS 알고리즘의 피이드포워드 제어기의 실제 적용에 있어서 가장 중요한 문제는 수렴성을 보장하는 것이다. 수렴성은 전적으로 수렴상수  $\mu$ 에 의해 결정되며 보통 0.01 이하의 작은 값을 갖는다. 또한 시스템의 동특성에도 영향을 받으므로 자기베어링과 같이 불안정한 개루프계를 안정화한 시스템의 경우 변화하는 모든 회전수에 적용하기 위해서는 수렴성을 보장할 수 있는 방법이 수반되어야 한다. 특히 제어시스템의 강체 모우드를 전후하여 수렴상수의 부호가 바뀌어야 하므로 본 연구에서는 RPM에 따라 수렴상수가 0.001과 -0.001로 바뀌도록 프로그램하여 적용하였다.

### 4. 고속회전 런아웃 제어 특성 실험

#### 4.1 고속 회전 응답

Fig. 5는 제작된 주축계의 10,000 ~ 50,000 rpm까지의 회전수에 나타난 센서출력을 나타낸 것이다. 여기서 앞 베어링 약 20  $\mu\text{m}$ , 뒷 베어링 30  $\mu\text{m}$  정도를 50,000rpm에서 나타나며 응답이 회전수에 따라 감소함을 알 수 있다. 이렇게 회전수에 따라 진폭이 작아지는 것은 런아웃의 영향으로 볼 수 있다.

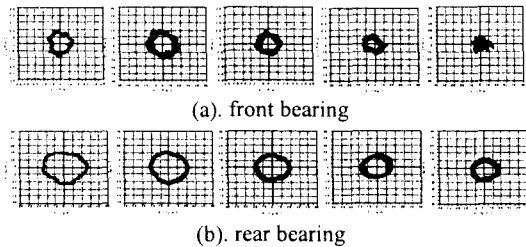


Fig. 5 rotational response at sensors (10,000 ~50,000 rpm, 10  $\mu\text{m}/\text{div}$ )

#### 4.2 런아웃 제어 결과

LMS 알고리즘을 적용하였을 때의 센서응답은 Fig. 6 과 같다. 여기서 센서의 응답이 앞, 뒤 베어링 각각 약 15  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  정도로 회전수에 따라 거의 변하지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 실제변위에서 런아웃 성분이 제거되어 센서의 런아웃만이 나타나 는 것으로 볼 수 있다.

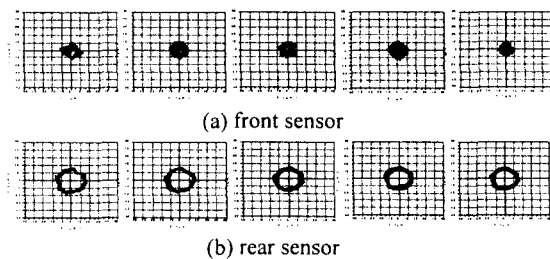


Fig. 6 measured sensor output with feedforward control (10,000~50,000 rpm, 10  $\mu\text{m}/\text{div}$ )

여기서 Fig. 7의 명령추종 오차를 보면 1X 성분이 완전히 제거 되어 고주파의 노이즈를 포함하여 5  $\mu\text{m}$ 이하의 응답을 보이고 있어, 적용된 적응제어방법이 이상적인 노치필터의 역할을 하고 있음을 알 수 있으며 주축의 회전정도는 명령추종오차의 값을 고려할 때 3  $\mu\text{m}$  이하가 되어 많이 향상되었음을 알 수 있다.

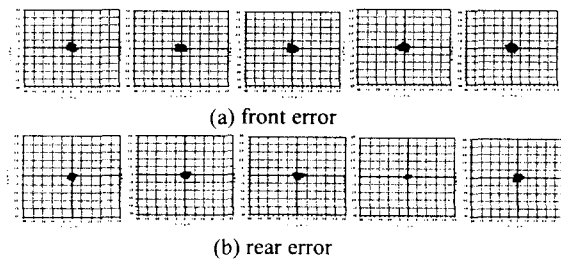


Fig. 7 command error with feedforward (10,000~50,000 rpm, 10  $\mu\text{m}/\text{div}$ )

또한, Fig. 8은 주축대의 진동을 측정 한 것으로, 적응 제어시에 회전수의 진동이 완전히 제거된 것을 알 수 있어, 본 연구에서 적용한 LMS 알고리즘의 Feedforward 제어가 회전수 성분의 전기적 런아웃을 효과적으로 제거하였음을 알 수 있다.

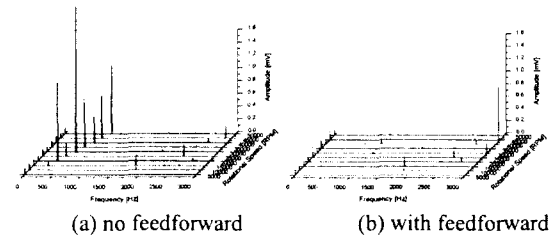


Fig. 8 Frequency response of vibration of housing

#### 5. 결론

본 연구에서 자기베어링을 이용한 연삭기 주축의 런아웃의 효과적인 제거를 위하여 LMS 알고리즘의 적응 피드포워드 제어를 제안하고 설계하였으며 실험적 검증을 수행하였다. 제작된 주축계의 1X 성분에 대하여 수렴성 보장을 위하여 속도에 따른 수렴상수 가변구조를 적용하여 0~50,000 rpm까지의 고속 회전실험 수행 결과, 회전수 성분의 런아웃의 영향이 제거되어 주축의 정밀도가 향상되고 회전성분의 진동이 제거되는 특성을 보여 제안된 적응 Feedforward 제어기의 유용성을 검증하였다.

#### 참고문헌

1. 박종권, 노승국, 안대균, "연삭기용 자기베어링 주축계의 고속화에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 15 권 11 호, pp233-243, 1998
2. 김승중, 김하용, 이종원, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃 규명", 소음진동학회 1998 추계학술대회, pp532-537, 1998
3. F. Betchon, R. Schob, "On-line-adaptive vibration control", 6th ISMB, pp362-371, 1998
4. K. Astrom, "Adaptive Control", Addison Wesley, 1995
5. 노승국, 경진호, 박종권, "적응 Feedforward를 이용한 연삭기용 자기베어링 주축계의 회전오차 제어", 한국정밀공학회 1999 춘계학술대회, pp.337-340
6. 노승국, 경진호, 박종권, "자기베어링으로 지지된 연삭 스피ن들의 런아웃 제어", 한국정밀공학회 2000 추계학술대회