

자기베어링으로 지지된 연삭 스피ndl의 런아웃 제어 - LMS Feedforward제어를 이용한 실험적 해석 -

노승국(KIMM), 경진호(KIMM), 박종권(KIMM), 최언돈(성림)

Runout Control of Mgenetically Suspended Grinding Spindle - Experimental Analysis of Adaptive LMS Feedforward Control Method -

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

ABSTRACT

In this paper, the case studies of reducing rotational errors is theoretically 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 electrical runout form the rear sensor target of grind spindle is about $70\mu\text{m}$ with harmonic frequencies. The rotor orbit size in rear bearing is reduced about to $5\mu\text{m}$ due to 1X and 2X rejection by feedforward control.

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 구현해야하는 과제이다. 회전오차가 발생하는 원인으로는 회전체불균형, 강제 진동 등에서 발생하는 외부가진과 축의 형상오차, 모터의 노이즈등에 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 회전수등의 환경에 따라 변하므로 적응제어의 방법이 효과적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 디지털 PID제어시스템으로 제어되는 연삭기용 자기베어링 주축계의 런아웃 제어를 위하여 LMS 알고리즘의 적응 피이드포워드 제어를 검토하고, 제작된 주축의 런아웃을 실측하여 이를 이용한 런아웃 보정 시뮬레이션을 통하여 각 방법의 유용성과 특성을 연구하였다. 또한 예측된 런아웃 결과를 실제 실험결과와 비교하고, 뒤쪽 센서 타겟의 전기적 런아웃을 보정하는 실험을 수행하였다.

2. 자기베어링 시스템

2.1 자기베어링을 이용한 연삭기 주축

대상 모델의 자기베어링 연삭기 주축계는 Fig.1 과 같다. 최고 60,000 rpm의 회전수를 갖는 5.5 kW 내장형 모터와 반경방향, 축방향의 자기베어링 전자

석 및 센서, 그리고 회전수 검출 및 각도 검출을 위한 센서로 구성되어 있으며 자기베어링의 제원은 Table 1과 같이 설계되었다.

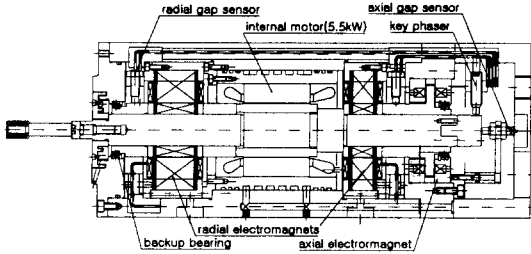


Fig.1 schematic diagram of the grinding spindle

Table 1. the specifications of radial magnetic bearings

| Item | Front Bearing | Rear Bearing |
|---|--------------------|--------------------|
| air gap, g_0 [mm] | 0.3 | 0.3 |
| area of a pole, A_p [mm ²] | 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_w [N/A] | 273 | 182 |
| position gain, K_r [N/m] | 1.77×10^6 | 1.18×10^6 |

2.2 실험 주축의 제어시스템 구성

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

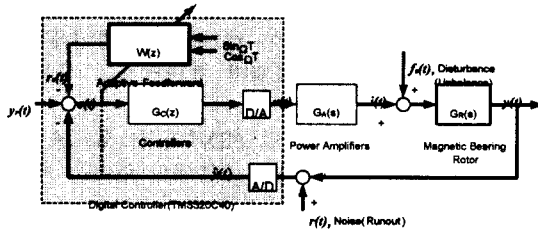


Fig.2 block diagram of magnetic bearing system with feedforward controller

제어시스템은 10kHz로 sampling되는 디지털 제어 시스템이며 실제 제작된 주축시스템의 동역학적 제원은 질량 $M = 4.38$ kg이며, 관성모멘트 $J_p = 0.0014$ kgm², $J_r = 0.0362$ kgm² 이다. 또한 제작된 스핀들의 첫 번째 유연 모드에서의 고유진동수는 1.16 kHz 로써 회전속도 범위를 약간 벗어나고 있어 강제주축을 가정하고 각 베어링의 센서의 신호를 해당 베어링에 되먹임하는 직접 궤환제어 방식을 취하고 있다.

Fig.2의 각 블록에서의 전달함수는 1자유도 모델을 가정할 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다. 우선 전

자석과 로터의 관계에서 전달함수 $G_R(s)$ 는,

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

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

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

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

$$G_c(z) = K_p + \frac{T_d N_d (h-1)}{h N_d z + (h-1)} + K_I \frac{h(z+1)}{2(z-1)} \quad (3)$$

여기서 $K_p=1.6$, 앞베어링의 $T_d=0.0012$, 뒷베어링의 $T_d=0.0016$, $K_I=1$, $N_d=15$ 이고, 샘플시간은 $h=100 \mu$ sec으로 적용되었다.

2.3. 런아웃 제거 문제

전체 시스템에 작용하는 외란은 Fig. 2의 입력측에 작용하는 언발란스로 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 제어축의 변위 y 는 다음과 같이 나타낼 수 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.

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

본 연구에서는 보상신호 $r_c(t)$ 를 피드포워드로 입력하여 런아웃에 의한 로터의 변위를 최소화 할 수 있도록 설계하도록 하는 것을 목적으로 한다.

3 런아웃 제어 알고리즘

3.1 LMS알고리즘의 적응 Feedforward제어

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]

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

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

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

따라서 오차 목적함수를 식(6)과 같이 나타낼 경우 식(7)을 이용하여 LMS알고리즘을 구현할 수 있다. 런아웃의 제거는 런아웃에 의한 제어력을 제거하기 위한 것으로 제어기의 입력으로 들어가는 명령 오차 $e(t)$ 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, $e(t)$ 에 적용시키는 경우는 $e(t)$ 를 최소화하여 런아웃의 영향이 제거된다. 제거하고자 하는 신호의 배수만큼 적용시켜서 합산하는 방식으로 적용하게 된다.

3.2 LMS알고리즘의 실제 적용 문제

LMS 알고리즘의 피이드포워드 제어기의 실제 적용에 있어서 가장 중요한 문제는 수렴성을 보장하는 것이다. 수렴성은 전적으로 수렴상수 μ 에 의해 결정되며 보통 0.01이하의 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 제

어시스템의 강제 모우드를 전후하여 수렴상수의 부호가 바뀌어야 하므로 본 연구에서는 RPM에 따라 수렴상수를 바꾸도록 프로그래밍하여 적용하였다.

4. 런아웃 제어에

4.1 런아웃 측정 및 영향 예측

제작된 주축의 런아웃을 예측하기 위하여 저속의 회전 실험장치에서 변위센서를 이용하여 센서 타겟의 런아웃을 측정하였다. 측정된 결과는 Fig. 5와 같으며, 앞베어링 센서는 0.01V(10 μ m)이하의 결과를 보이지만 뒷베어링의 경우는 상당히 큰 값을 가지고 있고, 1X와 2X성분이 주를 이루지만 그 외의 고차 성분들도 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

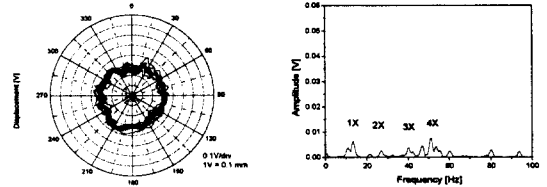


Fig. 5(a) measured runout of front sensor target

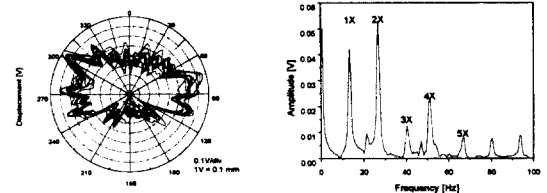
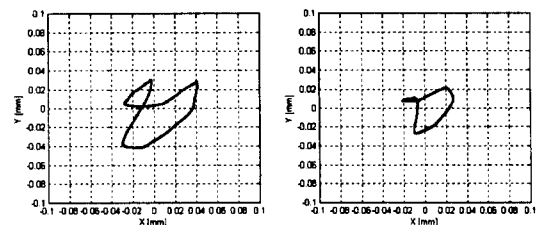


Fig. 5(b) measured runout of rear sensor target

따라서 본 연구에서는 앞베어링의 센서타겟의 런아웃은 무시하고 뒷베어링의 런아웃에 대한 영향을 예측 하였다. 6,000rpm과 10,000rpm 에서의 응답을 강제 주축계의 4자유도 모델로 시뮬레이션한 결과 (MATLAB 이용) 뒷베어링 센서타겟부의 실제 궤적 $y(t)$ 은 Fig. 6과 같이 각각 약 70 μ m, 50 μ m 정도임을 알 수 있으며 이때의 런아웃을 포함한 센서의 응답 ($\hat{y}(t)$)은 Fig. 7과 같이 각각 약 1.2V, 1V의 값을 나타낸다.



(a) 6,000 rpm

(b) 10,000 rpm

Fig. 6 rear orbit at 6,000 and 10,000 rpm

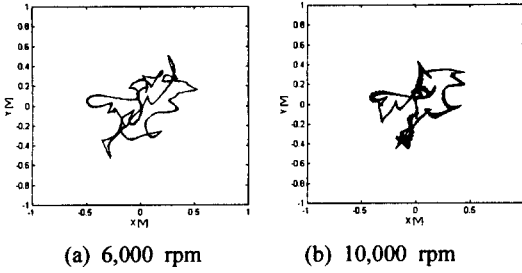


Fig. 7 rear sensor output at 6,000 and 10,000 rpm

4.2 적응 feedforward 제어 특성 해석

LMS 알고리즘의 적응 피드포워드 제어를 적용하기 위해서 모든 배수성분을 선택할 수 있으나 대체로 회전수성분과 2배수 성분의 진폭이 컸으므로 두 개의 주파수에 대하여 적응시켜 제거하도록 하였다.

Fig. 8은 1배 및 2배 성분에 대한 feedforward 제어를 적용시켰을 때 뒷베어링의 실제 변위를 나타낸다. 제거대상 성분인 1X와 2X성분의 오차가 제거되어 전체 궤적의 크기가 6,000rpm에서는 약 $11\mu\text{m}$ 이하이고 10,000rpm에서는 $5\mu\text{m}$ 정도로 작아짐을 알 수 있다. 이때의 센서에서의 응답은 Fig. 9과 같다. 센서 응답에는 주축의 런아웃이 실려 있으므로 실제 변위 보다는 크게 각각 0.8V, 0.6V 정도의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

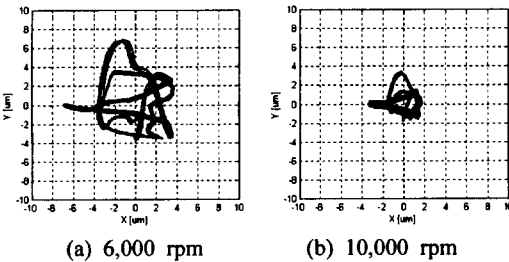


Fig. 8 rear orbit with LMS algorithm

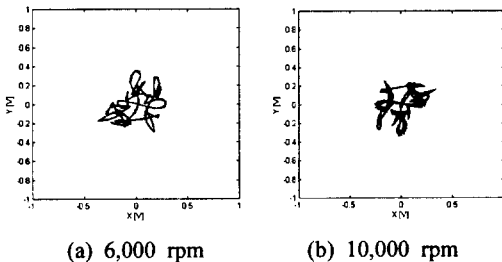


Fig. 9 rear sensor output with LMS algorithm

이때, 수렴상수 μ 는 대상주파수가 110Hz 미만에서는 0.001 120Hz 이상에서는 -0.001을 갖도록 설계

되었다.

4.3 런아웃 제어 실험

Fig. 10은 실제 주축계의 6,000 rpm과 10,000 rpm에서의 센서변위를 나타낸 것이다. Fig.7의 시뮬레이션 결과보다 약간 작은 응답으로 각각 약 1V(0.1mm)와 0.8V(0.08mm)를 보이고 있으며 수치해석결과와 궤적의 형태가 상당히 유사함을 볼 수 있다.

앞절에서의 수렴상수를 적용하여 LMS 알고리즘을 적용하였을 때의 센서응답을 Fig. 11에 나타내었다. 센서의 응답이 감소한 것을 알 수 있다. 이때 주축 실제 중심의 변위(y(t))는 정확한 측정이 불가능하므로 Fig. 9의 데이터와 비교하면 비슷한 수준으로 제어가 되었음을 알 수 있다.

이때의 센서 신호에 대한 주파수 분석을 나타낸 것이 Fig. 12 이다. 각각 제어를 안한 경우와 1X성분만 제거한 경우, 1X와 2X성분을 제거한 경우에 대한 주파수 분석결과를 나타내며 해당성분의 주파수가 제거 되었음을 알 수 있다.

10,000 rpm의 경우에는 고차 성분의 응답들이 커져 있어서 1X 및 2X 성분만의 제거로는 센서신호의 감소를 많지 않았다.

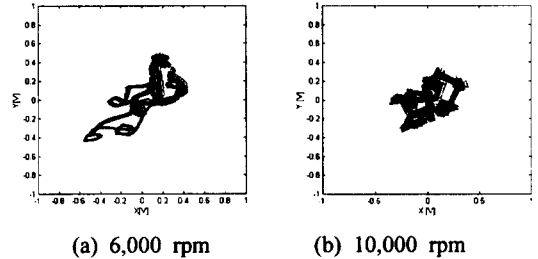


Fig. 10 measured rear sensor output

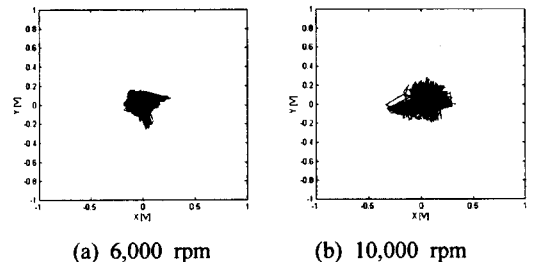


Fig. 11 measured rear sensor output with feedforward

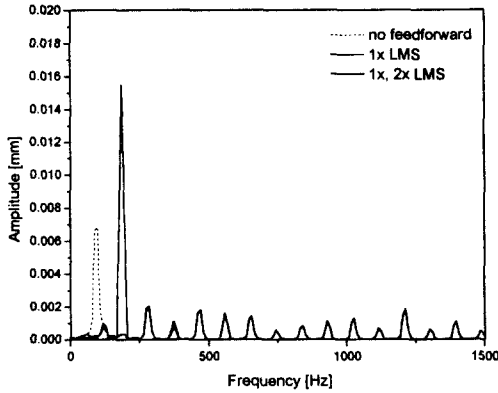


Fig. 12(a) Frequency response of rear sensor output at 6,000 rpm

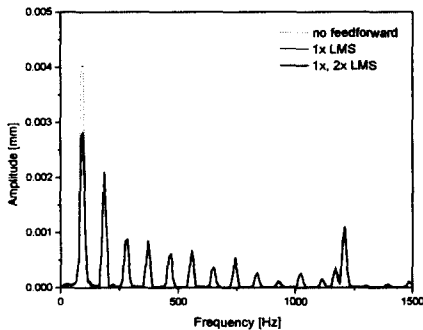


Fig. 12(b) Frequency response of rear sensor output at 10,000 rpm

5. 결론

본 연구에서 자기베어링을 이용한 연삭기 주축의 런아웃 제어를 위하여 실험 주축의 측정을 통하여 런아웃을 규명하고 런아웃에 의한 회전오차를 예측하고 실험을 통하여 확인하였다. 런아웃의 효과적인 제거를 위하여 LMS 알고리즘의 적응 피드포워드 제어를 적용하여 뒤쪽 센서타겟에서 발생하는 전기적 런아웃의 1X 및 2X 성분에 대한 제거 성능을 6,000 rpm과 10,000 rpm에서 수치해석을 수행하고 실험을 통해 검증하였으며 일치되는 결과를 보였다. 수렴을 보장하기 위해서 수렴상수는 시스템의 동특성에 의하여 회전수에 따라 변화가 필요하며 주파수에 대한 동기변화를 프로그램 함으로써 안정적인 동작을 실현하였다.

참고문헌

1. 박종권, 노승국, 안대균, "연삭기용 자기베어링 주축계의 고속화에 관한 연구", 한국정밀공학회지,

15권 11호, 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