

자기베어링으로 지지된 연삭 스피ن들의 런아웃 제어

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

Runout Control of a Magnetically Suspended Grinding Spindle

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 imbalance of rotor, runout, grinding excitation and unmodeled nonlinear dynamics of electromagnets. The adaptive feedforward method based on LMS algorithm is discussed to compensate output and input disturbances, and investigated its effectiveness by numerical simulation. The feedforward control reduced external excitation and rotational error for specified frequency. The interpolation method using impulse function for cancelling the electrical runout is studied. These methods show their effectiveness for the rotational accuracy of the improving magnetic bearing spindle through some simulation results of the rotational error decreased by them.

Key Words : magnetic bearing system(자기베어링 시스템), runout control(런아웃 제어), adaptive feedforward control(적응 피드포워드 제어), LMS algorithm (LMS 알고리즘), interpolation method(보간법)

1. 서론

자기력을 이용하여 기계적 접촉 없이 지지하는 자기베어링 시스템은 고속회전이 가능하며, 반영구적인 수명을 가지고 있고 윤활 장치가 필요 없으면서 능동적 제어시스템을 통하여 진동을 억제할 수 있는 장점을 갖고 있으며 이러한 장점을 바탕으로 고속회전이 요구되는 여러 가지의 기계에 적용되어 왔으며 공작기계 분야를 비롯한 여러 산업현장에 실제 적용되고 있다.⁽¹⁾

공작기계 주축계에 있어서 회전정밀도는 회전속도와 함께 중요한 성능지수의 하나로 고속 회전을 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.

런아웃의 발생은 여러 가지 원인이 있지만 특히 오전류형 변위센서를 사용하는 자기베어링 시스템의 경우, 센서 타겟의 재질 불균일 등에 의한 electrical runout이 생길 수 있는데, 이러한 런아웃이 제거되지 않으면 제어루프내에서 증폭되어 실제 주축의 회전

오차를 발생시키기 때문에 이에 대한 제어가 필요하다.

런아웃에 의한 회전 오차는 주로 회전수와 같은 주파수를 갖거나 정수배의 주파수를 갖고 있으므로 이러한 특정 주파수의 주기적인 외란을 없애기 위해서는 일반적으로 노치 필터를 피드백 제어루프 내에 포함시키는 방법과 동기되는 주파수 신호를 미리 제거해 주는 Feedforward 방법이 사용된다. Feedforward 제어의 경우 런아웃의 양상이 회전수등의 환경에 따라 변하므로 적응제어의 방법이 효과적으로 사용되고 있다. 본 연구원에서는 적응 제어기법의 하나인 LMS 알고리즘을 이용하여 자기베어링계의 회전오차 제거 기법을 제시하여 실험한 바 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 또한 런아웃을 정확히 예측할 수 있는 경우는 런아웃신호를 저장하여 회전속도에 따라 보간한 데이터를 입력측에서 제거하여주는 방법이 사용될 수 있다.

본 연구에서는 디지털 PID제어시스템으로 제어되는 연삭기용 자기베어링 주축계의 런아웃 제어에 대한 여러 방법을 이론적 사례연구를 통하여 검토한다. 각 방법의 장단점을 분석하고, 제작된 주축의 런아웃을 실측하여 이를 이용한 런아웃 보정 시뮬레이션을 통하여 각 방법의 유용성과 특성을 연구하였

다. 이러한 연구는 현장에서 발생할 수 있는 런아웃 보정 시험시 사전연구로써 필요하다고 보여진다.

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

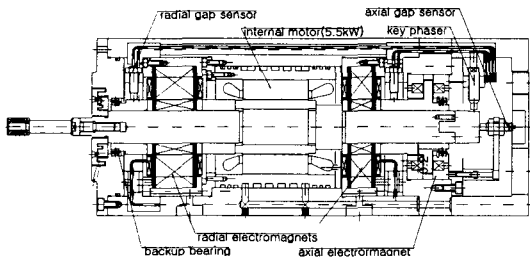


Fig.1 schematic diagram of the grinding spindle

Table 1. the designed 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_b [A]	2.1	2.1
current gain, K_x [N/A]	273	182
position gain, K_x [N/m]	1.77×10^6	1.18×10^6

2.2 제어시스템

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

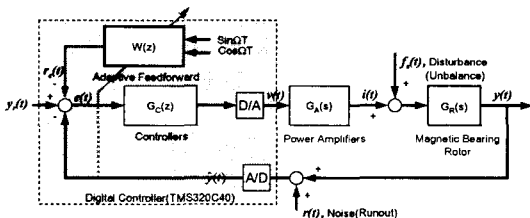


Fig.2 block diagram of magnetic bearing system with feedforward controller

제어시스템은 10kHz로 sampling되는 디지털 제어

시스템이며 각각의 자기베어링위치에서의 변위를 갠 센서를 통하여 측정하고 PID 제어알고리를 사용하여 되먹임하는 직접 개환 제어 방식을 취하고 있다.

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

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

이며, 앞베어링의 경우 $m=1.5$, $K_s=10000$ [V/m] 이다. 전력증폭기의 전달함수는 2차의 모델로 가정할 수 있다.[1] $K_{amp}=0.8$, $\omega_{np}=1700$ Hz, $\zeta=1.7$ 이다.

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

제어기의 전달함수 $G_c(z)$ 는 비례계인 K_p , 미분시간 T_d 와 적분계인 K_I 를 갖는 PID제어로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_C(z) = K_p \left[1 + \frac{T_d N_d (h-1)}{h N_d z + (h-1)} \right] + K_I \frac{h(z+1)}{2(z-1)} \quad (3)$$

여기서 $K_p=1.0$, $T_d=0.001$, $K_I=1$, $N_d=15$ 이고, 샘플 시간은 $h=100 \mu$ sec이다.

2.3. 런아웃 제거 문제

전체 시스템에 작용하는 외란은 Fig. 2의 입력측에 작용하는 외란하중 $f_c(t)$ 와 출력측에 작용하는 런아웃 $r(t)$ 로 대표될 수 있다. 이때 런아웃 $r(t)$ 만을 고려할 경우 제 주축의 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 여러 주파수 성분을 가진 함수로 다음과 같다.

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

여기서 피이드포워드의 경우 보상신호 $r_c(t)$ 를 입력측과 출력측의 외란이 상쇠되도록 설계하도록 한다.

3 런아웃 제어 알고리즘

3.1 LMS알고리즘의 적응 Feedforward제어

시스템의 모델이 결정되어 있는 경우, 파라메터를 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 파라메터의 추종값 $\hat{\theta}(t)$ 는 이전단계의 추종값 $\hat{\theta}(t-1)$ 과 상수 μ 로 다음과 같이 나타낸다.

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

따라서 최소화하려는 함수를 (6)와 같이 나타낼 경우 식(7)을 이용하여 LMS알고리즘을 구현할 수 있다. 런아웃과 같은 출력측의 주기적 외란을 없애는 것은 명령오차 $e(t)$ 를 이용하여 V 를 다음과 같이 정의한다.

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

식(7)에 의해서 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.

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

$e(t)$ 에 적용시키려는 경우는 $e(t)$ 를 최소화하여 런아웃의 영향이 제거된다. 제거하고자 하는 신호의 비수만큼 적용시켜서 합산하는 방식으로 적용하게 된다.

3.2 노치 필터를 이용한 제어

노치필터는 특정 주파수의 신호성분을 제거하기 위한 필터로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$G_{no}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_z \omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (11)$$

이때 제거대상 주파수 ω_0 에서의 증폭비는

$$|G_{no}(j\omega_0)| = \zeta_z / \zeta_p \quad (12)$$

이다. 이를 디지털 제어기로 구현하기 위해서 frequency prewarped Tustin의 방법으로 근사 변환시킬 수 있다. 이러한 노치 필터의 전달함수의 예는 Fig. 3에 나타내었다.

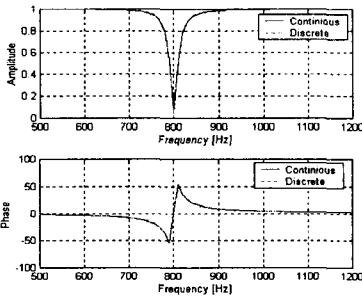


Fig. 3 transfer function of a notch filter

$$(\zeta_z = 0.001, \zeta_p = 0.02, \omega_0 = 800 \text{ Hz})$$

노치필터를 적용함에 있어서 ω_0 를 검출된 회전수와 같게 하고 2배, 혹은 그 이상의 배수를 제거하기 위해서는 해당 주파수를 노치하는 노치필터를 직렬로 설치한다.

3.3 보간법에 의한 런아웃 직접 제어

런아웃의 직접 보간법은 임펄스 함수를 이용한 보간법으로, 로타의 런아웃 량을 실측하여 이를 디

지탈 값으로 제어기에 저장한다. 운전중 로터 아나로그 응답량을 A/D 변환을 통하여 디지털 값으로 바꾸고 이 값들을 기 저장되어 있는 런아웃 값에서 직접 차감하여 런아웃을 제거하는 피드 포워드 방식의 제어이다.

Fig. 4는 보간법에 사용된 임펄스 함수이다. 임펄스 함수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$h_c(t) = \frac{\sin \pi t / T}{\pi t / T} \quad (13)$$

여기서, T : 임펄스 함수의 주기

실험으로 측정되는 런아웃 데이터는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$y_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y[n] \delta(t - nT) \quad (14)$$

여기서, $y_s(t)$: 런아웃 응답량, n : 펄스 번호

$y[n]$: 런아웃 디지털 응답량

$\delta(t - nT)$: $t = nT$ $\delta = 1$

the others $\delta = 0$

실측된 런아웃 데이터는 임펄스 함수의 조합으로 다음과 같이 근사화 될 수 있다

$$y_c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y[n] h_c(t - nT) \quad (15)$$

제어 프로그램에 위 식이 구현되며, 실제로는 무한대 개수의 임펄스 함수를 사용하지 않고 실측되는 런아웃 데이터의 개수 만큼 사용한다.

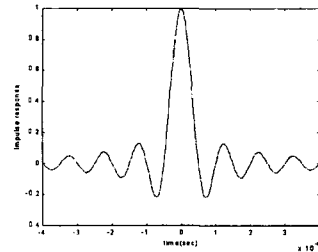


Fig. 4 Impulse function

4. 런아웃 제어 시뮬레이션

4.1 런아웃 측정 및 영향 예측

제작된 주축의 런아웃을 예측하기 위하여 저속(800rpm)의 회전 실험장치에서 변위센서를 이용하여 센서 타겟의 런아웃을 측정하였다. 측정된 결과는 Fig. 5와 같으며, 앞베어링 센서는 0.01V(10μm)이하의 결과를 보이지만 뒷베어링의 경우는 상당히 큰 값을 가지고 있고, 1산과 2산성분이 주를 이루지만 그 외의 고차 성분들도 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

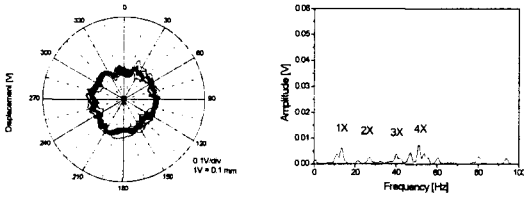


Fig. 5(a) measured runout of front sensor target

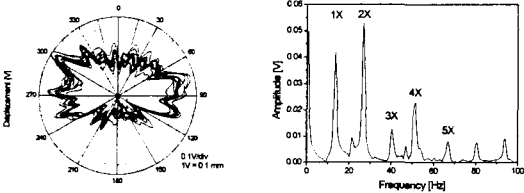


Fig. 5(b) measured runout of rear sensor target

따라서 본 연구에서는 앞베어링의 센서타겟의 런아웃은 무시하고 뒷베어링의 런아웃에 대한 영향을 시뮬레이션 하였다. 20,000rpm과 40,000rpm 에서의 응답을 강체 주축계의 4자유도 모델로 시뮬레이션한 결과(MATLAB 이용) 뒷베어링 센서타겟부의 실제 궤적은 Fig. 6과 같이 각각 0.5V(50 μ m), 0.3V(30 μ m) 정도임을 알 수 있다.

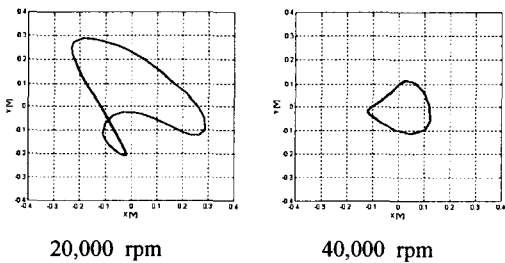


Fig. 6 rear orbit at 20,000 and 40,000 rpm without runout compensation

4.2 런아웃 제어 시뮬레이션

4.2.1 LMS 알고리즘의 적응 feedforward제어

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. 7은 수렴상수 $\mu = 0.01$ 로 설정하여 적응을 시킨후에 뒷베어링 센서의 응답을 나타낸다. 제거대상 성분인 1산과 2산성분의 오차가 제거되어 전체 궤적의 크기가 20,000rpm에서는 약 0.05V(5 μ m)이하이고 40,000rpm에서는 0.01V(1 μ m)정도로 작아짐을 알 수 있다.

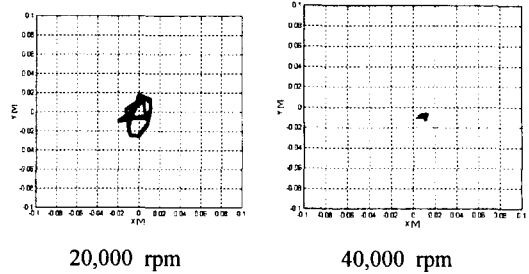


Fig. 7 rear orbit with LMS algorithm

그러나 LMS 알고리즘의 적용에 있어서 수렴성은 수렴상수 μ 에 민감하며 회전수나 PID제어제인에 따른 시스템의 동특성 변화로 모든 회전수를 같은 수렴상수로 안정화시키는건 불가능하다. 15,000rpm 이상의 회전수에서는 $\mu = 0.01$ 의 안정화가 가능하다.

4.2.2 노치필터를 이용한 제어

노치필터를 이용하는 경우도 역시 1, 2배수의 주파수에 대해 적용하였으며 런아웃이 발생하는 뒷베어링 뿐만 아니라 앞베어링에도 적용하여야 안정화가 가능하였다. 각각의 필터의 전달함수 계수는 $\zeta_z = 0.001$, $\zeta_p = 0.02$ 로 해당주파수에서 1/20의 신호감소가 있도록 하였다. 해석결과는 Fig. 8, Fig. 9에 나타나 있는데 Fig. 9의 40,000 rpm에는 1배수와 2배수 성분이 모두 없어졌음을 알 수 있으나, 20,000 rpm에서는 회전수 성분의 필터주파수가 낮아서 앞베어링의 회전이 불안정해지는 특성을 보였다. 이는 노치필터의 극점이 낮은 주파수에서 허수축에 가깝기 때문인데, 낮은 회전수에서의 노치필터는 위상 왜곡에 의하여 불안정성을 야기시킬 수 있으므로 고속에서 사용해야함을 알 수 있다.

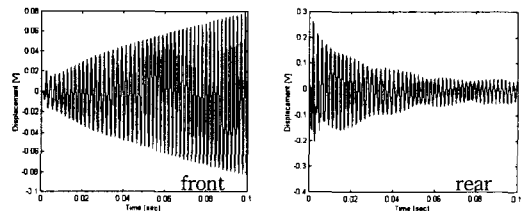


Fig. 8 rotor response at 20,000 with notch filters

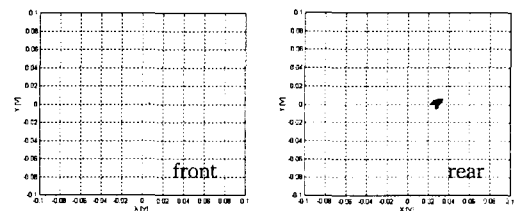


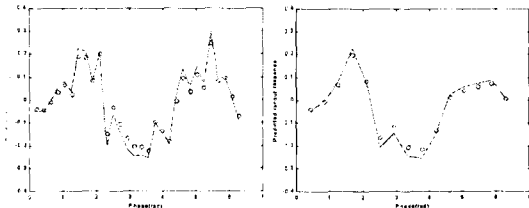
Fig. 9 orbit of spindle at 40,000 with notch filters

4.2.3 보간법에 의한 런아웃 직접 제어

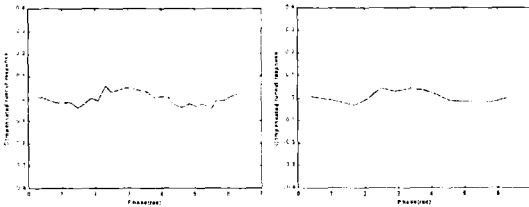
Fig. 5(b)의 실험으로 결정된 런아웃 신호를 디지털 제어기에 저장하였을 때, 20,000 rpm과 40,000 rpm에서의 보간을 시뮬레이션하였다.

Fig. 10,은 회전속도 20,000 rpm, 40,000 rpm에서 측정된 디지털 데이터(실선 표시 부분)와 결정된 보상 데이터(o 표시 선)이다. 임펄스 함수를 이용한 보상 데이터가 측정 데이터를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 5, 7은 회전속도 20,000 rpm, 40,000 rpm에서 보상된 런아웃 응답량이다. 로터의 응답량의 약 20% 수준으로 런아웃이 효과적으로 제거됨을 확인할 수 있었다.



20,000 rpm (30 samples) 40,000 rpm (15 samples)
Fig. 10 Comparison of a sampled vibration response data and a data for compensation



20,000 rpm (30 samples) 40,000 rpm (15 samples)
Fig. 11 Compensated signal inputting into the magnetic actuator

4.3 결과 및 고찰

새가지 방법에 의한 런아웃 제거 성능을 비교해 보면 우선 LMS의 경우는 런아웃 데이터를 측정할 필요가 없고 변화하는 회전오차에 적응하여 제어할 수 있는 반면, 수렴을 보장하기 위해서는 수렴상수의 제어게인 및 작동 회전수에 대한 수렴성 여부를 확인해야 한다. 가장 간단하게 구현할 수 있는 노치 필터의 경우도 우수한 런아웃 제거 성능을 보이지만, 필터의 개수를 늘릴수록 시스템 차수가 증가하며 저속의 회전수에 대해서는 필터의 극점이 시스템을 불안정하게 하는 특성을 보일 수 있다. 따라서 고속에서 사용하여야 하며 30,000 rpm 이하의 저속에서는 회전수 성분은 사용하지 않도록 한다.

직접 보간법에 의한 런아웃 제거는 간단한 알고리

즘을 제어기에 구현하여 사용할 수 있는 점이 큰 장점이다. 본 방법은 피드포워드 제어이므로 제어시스템의 안정성에는 영향을 주지 않는다. 시뮬레이션 결과를 보면 런아웃 보상을 통하여 로터의 응답량의 약 20% 수준으로 런아웃이 제거됨을 확인할 수 있었다. 보간법의 단점은 회전속도가 일정하게 유지되지 않고 가변되는 경우에 이에 빠르게 대응되지 못하는 것이 단점이다.

5. 결론

본 연구에서 자기베어링을 이용한 연삭기 주축의 런아웃 제어를 위하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정을 통하여 런아웃을 규명하고 런아웃에 의한 회전오차를 규명하였다.
2. 런아웃의 효과적인 제거를 위하여 측정된 런아웃을 직접 제거하는 방법과 LMS 알고리즘의 적응 피드포워드 제어, 노치필터를 이용한 제어법을 적용, 비교하였다.
3. 노치필터를 제어루프내에 포함하는 것보다는 피드 포워드를 사용하는 것이 넓은 회전수 범위에서 상대적으로 안정한 결과를 나타내었다.
4. 보간법에 의한 런아웃 직접 제거법은 간단한 알고리즘을 제어기에 구현하여 사용할 수 있는 점이 큰 장점이며, 시뮬레이션 결과를 보면 런아웃 보상을 통하여 로터의 응답량의 약 20% 수준으로 런아웃이 제거됨을 확인할 수 있었다.

앞으로 이러한 사례연구를 바탕으로 실제적인 회전오차를 제거하는 시험연구를 수행하고자 한다.

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, 1999