

## 적응 Feedforward 를 이용한 자기베어링 고속 주축계의 전기적 런아웃 제어

노승국\*, 경진호\*, 박종권\*

### Runout Control of a Magnetically Suspended High Speed Spindle Using Adaptive Feedforward Method

Seung-Kook Ro\*, Jin-Ho Kyung\*, Jong-Kwon Park\*

#### ABSTRACT

In this paper, the feedforward control with least mean square (LMS) adaptive algorithm is proposed and examined to reduce rotating error by runout of an active magnetic bearing system. Using eddy-current type gap sensor for control, the electrical runout caused by non-uniform material properties of sensor target produces rotational error amplified in feedback control loop, so this runout should be eliminated to increase rotating accuracy. The adaptive feedforward controller is designed and examined its tracking and stability performances numerically with established frequency response function. The tested grinding spindle system is manufactured with a 5.5 kW internal motor and 5-axis active magnetic bearing system including 5 eddy current gap sensors which have approximately 15 ~ 30  $\mu\text{m}$  of electrical runout. According to the experimental analysis, the error signal in radial bearings is reduced to less than 5  $\mu\text{m}$  when it is rotating up to 50,000 rpm due to applying the feedforward control for first order harmonic frequency, and vibration of the spindle base is also reduced about same frequency.

**Key Words** : magnetic bearing system(자기베어링 시스템), runout control(런아웃 제어), adaptive feedforward control(적응 피드포워드 제어), LMS algorithm (LMS 알고리즘), IIR notch filter (순환형 노치 필터)

#### 1. 서론

자기베어링은 비접촉 회전 특성으로 인하여 고속회전이 가능하다는 장점을 가지고 있어 고속 회전기계에 적용되고 있으며 공작기계 분야에도 고속 가공기 및 연삭기 등에 적용되고 있다.<sup>[1]</sup> 자기베어링의 공작기계 적용을 위해서는 정밀한 회전특성을 구현하는 것이 필수적이다. 자기베어링

주축계에서 회전오차가 발생하는 원인으로는 회전체불균형, 절삭력 등 강제 진동 등에서 발생하는 외부가진과 축의 형상오차에 기인하는 런아웃과 시스템의 노이즈, 자기베어링계의 비선형성에 의한 오차 등이 있으며 자기베어링의 능동제어 특성을 이용하여 이러한 오차들을 제거하는 방법이 다각도로 연구되고 있다.<sup>[2][3]</sup>

이중 런아웃의 경우, 와전류형 변위센서를 사

\*\*\* 2002년 3월 25일 접수

\* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

용하는 자기베어링 시스템에서 센서 검출부의 가공상태가 우수하더라도 재질 불균일 등에 의한 전기적 런아웃(electrical runout)이 발생되었을 때 제어루프 내에서 증폭되어 실제 주축의 회전오차를 발생시키기 때문에 이에 대한 제어가 필요하다. 런아웃에 의한 회전 오차는 회전수와 같은 주파수를 갖거나 정수배의 주파수를 갖고 있으며 이러한 특정 주파수의 주기적인 외란을 없애기 위하여 노치 필터나 회전에 동기되는 신호를 미리 제거해주는 Feedforward 등이 일반적으로 사용된다.

노치 필터를 사용하는 경우 제어 시스템의 안정성을 해칠 수 있으므로 이에 대한 사용영역이 제한되며 런아웃 신호를 제거해주는 Feedforward 제어의 경우 제어 시스템의 안정성에는 영향을 미치지 않으나 런아웃의 위상과 진폭, 주파수 등이 변동하는 경우 런아웃 제거성능이 나빠질 수 있다.

본 연구에서는 디지털 PID 궤환 제어시스템으로 제어되는 연삭기용 자기베어링 주축계의 런아웃 제어를 위하여 LMS 알고리즘의 적응 피드포워드 제어를 제안하였으며, 적응제어의 수렴성을 수치해법으로 해석하여 넓은 회전속도 범위에서도 안정한 런아웃 적응제어가 가능하도록 적용하였다. 제작된 실험 주축에 대하여 50,000 rpm 까지의 고속회전시의 회전특성을 시험하고 전기적 런아웃에 의하여 앞, 뒤 베어링에서 주로 작용하는 1 차 회전성분에 대하여 적응 피드포워드 제어를 적용한 결과 런아웃 효과가 제거되었으며, 이 경우 센서의 출력은 런아웃 신호만을 포함하게 되며 회전성분의 진동이 제거되었다.

## 2. 자기베어링 주축 시스템

### 2.1 자기베어링을 이용한 연삭기 주축

본 연구에서 적용한 모델의 자기베어링 연삭기 주축계는 Fig. 1 과 같다.<sup>[1]</sup> 최고 50,000 rpm 의 회전수를 갖는 5.5 kW 내장형 모터가 중앙에 위치하고 있으며 앞, 뒤로 8 극 이극성(8-pole heteropolar type) 반경방향 자기베어링 전자석이 있고 축방향 자기베어링 전자석이 있으며 변위 궤환을 위한 5 축의 와전류형 변위 센서(분해능 0.1  $\mu\text{m}$ , 80kHz 대역폭), 그리고 회전수 및 각도 검출을 위한 광센서로 구성되어 있으며, 여기서 반경방향 자기베어링의 제원은 Table 1 과 같이 설계되었다.

자기베어링 시스템의 제어는 TMS320C40 을 이용한 DSP 프로세서 보드와 16-bit A/D, 12-bit D/A 로 구성된 디지털 제어시스템을 사용하고 있으며 PWM 전력 증폭기(8A)를 이용하여 자기베어링 코일을 구동하도록 구성되어 있다.

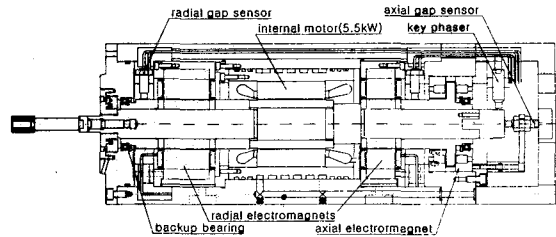


Fig. 1 Schematic diagram of the grinding spindle

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 <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, $K_{ix}$ [N/A]	273	182
position gain, $K_x$ [N/m]	$1.77 \times 10^6$	$1.18 \times 10^6$

### 2.2 자기베어링의 제어시스템

Fig.2 에는 런아웃과 외란모델을 포함하고 이를 제어하기 위한 적응 피드포워드 루프와 입력측 및 출력측 외란을 갖는 1 자유도 자기베어링 시스템의 블록 선도를 나타내었다.

제어시스템은 10kHz 로 sampling 되고 있으며 제어시스템이며 실제 제작된 주축시스템의 동역학적 제원은 질량  $M = 4.38 \text{ kg}$  이며, 관성모멘트  $J_p = 0.0014 \text{ kgm}^2$ ,  $J_l = 0.0362 \text{ kgm}^2$  이다. 또한 제작된 스피들의 첫 번째 유연 모우드의 고유진동수는 1.16 kHz 로써 회전속도 범위를 벗어나고 있어 강제주축을 가정하고 fontX, fontY, rearX, rearY axial 각 5 개 센서의 신호를 해당 액츄에이터에 직접 궤환 제어(direct feedback)하는 방식을 취하고 있다.

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,

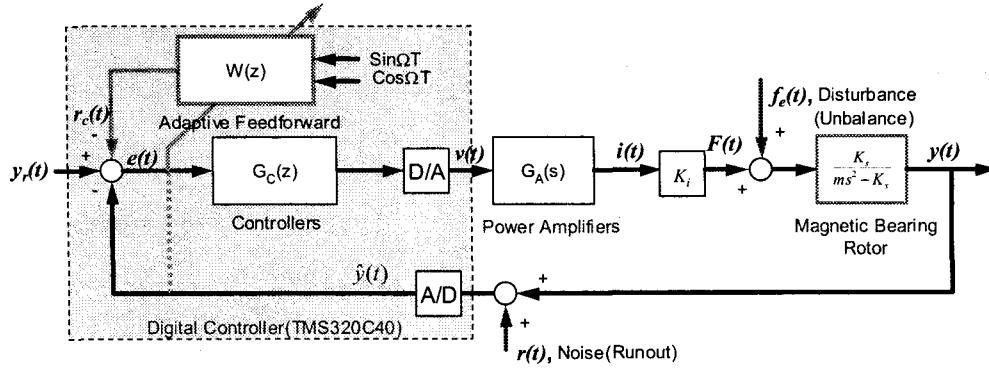


Fig. 2 Block diagram of magnetic bearing system with feedforward controller

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

이때, 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.<sup>[1]</sup> 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.

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

제어기의 전달함수  $G_c(z)$ 는 비례계인  $K_p$ , 미분 시간  $T_d$ 와 적분계인  $K_I$ 를 갖는 PID 제어로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

### 2.3 런아웃 제거 문제

전체 시스템에 작용하는 외란은 Fig. 2의 입력측에 작용하는 언밸런스로 대표될 수 있는 외란하중  $f_c(t)$ 와 출력측에 작용하는 노이즈 및 런아웃

$r(t)$ 로 대표될 수 있다. 이때 런아웃  $r(t)$  만을 고려할 경우 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 대체로 회전수의 여러 차수의 배수에 해당하는 주파수 성분을 가진 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

일정 성분의 주기적 런아웃 제거를 위해서는 notch필터가 유용하게 사용될 수 있으나 notch필터의 위상 왜곡으로 인하여 시스템의 안정성을 해칠 수 있어 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 단순한 식으로 일반화된다.<sup>[4]</sup>

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

이때 파라미터의 추종값  $\hat{\theta}(t)$  는 이전단계의 추종값  $\hat{\theta}(t-1)$  과 수렴상수  $\mu$  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)을 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

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

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

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

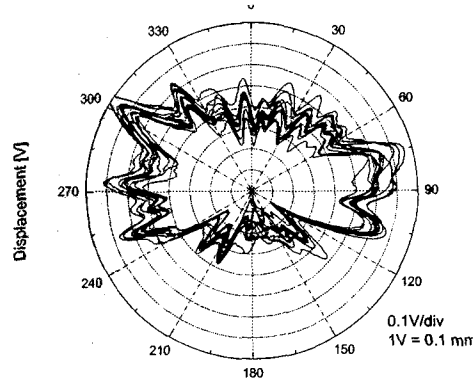
즉, 명령추종오차  $e(t)$ 에 적응시켜  $e(t)$ 를 최소화하여 런아웃의 영향이 제거하게 되며 신호의 배수  $k$  만큼 적응시켜 합산하는 방식을 적용하게 된다. 이때 수렴된 계수를 이용하면 런아웃을 규명할 수 있으므로 런아웃 규명에 적용할 수 있다.

### 3.2 런아웃 제어 수치 예

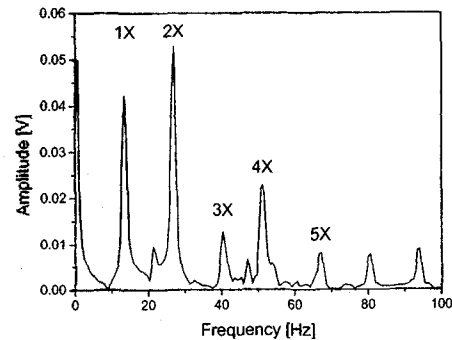
Feedforward 제어기의 특성을 시뮬레이션 하기 위하여 임의의 센서 타겟에 대하여 모의 실험을 하였으며 전기적 런아웃의 양을 측정하고자 축만을 저속회전(800rpm)하여 이때의 센서의 응답을 측정하였다.<sup>[7]</sup> 측정된 결과 Fig. 3 과 같이 전기적 런아웃의 크기는 약 80  $\mu\text{m}$ 의 값을 가지고 있으며, 1X 과 2X 성분이 주를 이루지만 그 외의 고차 성분들도 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

이러한 런아웃에 대하여 10,000 rpm 과 20,000 rpm 에서의 응답을 강제 주축계의 4 자유도 모델로 시뮬레이션 한 결과(MATLAB 이용), LMS 알고리즘을 적용하여 1X 와 2X 성분을 제거하였을 경

우 추종오차 응답이 Fig.4 와 같이 시간에 따라 줄어들며 고속에서 빠른 수렴을 보이고 있다.



(a) measured runout at 800 RPM



(b) frequency spectrum of the runout signal

Fig. 3 Example of measured runout of rear sensor target

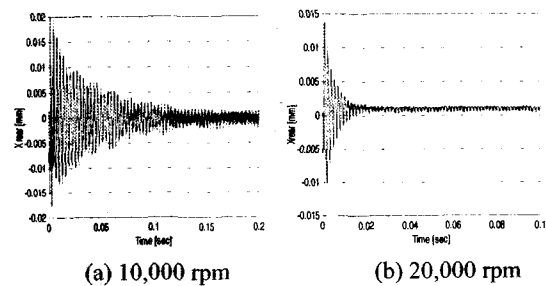


Fig. 4 Runout control simulation with LMS algorithm

### 3.3 적응 Feedforward 제어기의 안정성

적응 Feedforward 제어기를 적용하는 것은 넓은 작동범위에서의 사용이 가능하게 하기 위함이며 이를 위해서는 제어기의 수렴성 및 안정성이

우선적으로 검증되어야 한다. 수렴성은 수렴상수  $\mu$  에 의해 결정되며 보통 0.01 이하의 작은 값을 갖는다. 또한 PID 제어게인이 바뀌지 않더라도 회전수 변화에 따라 회전축계의 동특성이 변하므로  $\Omega$ 와 수렴상수  $\mu$  에 대한 수렴성을 검증하였다. 본 연구에서는 LMS 적응 제어기의 주파수 응답함수를 구하고 수치해법을 이용하여 안정성을 검토하였다.

주파수 응답 특성을 구하기 위하여 식(9), (10)을 회전수  $k\Omega$ 에서 Z-변환을 수행하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 여기서  $R_c(z)$ ,  $W(z)$ ,  $E(z)$ 는 각각  $r_c(t)$ ,  $w(t)$ ,  $e(t)$ 의 Z-변환이다.

$$R_c(z) = -\frac{1}{2}j\{W_{k0}(ze^{-jk\Omega}) - W_{k0}(ze^{jk\Omega})\} + \frac{1}{2}\{W_{k1}(ze^{-jk\Omega}) + W_{k1}(ze^{jk\Omega})\} \quad (11)$$

$$W_{k0}(z) = \frac{1}{2} \frac{\mu}{z-1} \{-jE(ze^{-jk\Omega}) + jE(ze^{jk\Omega})\} \quad (12)$$

$$W_{k1}(z) = \frac{1}{2} \frac{\mu}{z-1} \{E(ze^{-jk\Omega}) + E(ze^{jk\Omega})\} \quad (13)$$

이때, (12)와 (13)을 (11)에 대입하면 다음과 같은 주파수 응답함수를 구할 수 있다.

$$R_c(z) = \frac{\mu}{2} \left\{ \frac{1}{ze^{-jk\Omega} - 1} + \frac{1}{ze^{jk\Omega} - 1} \right\} E(z) \quad (14)$$

$$G_{ff}(z) = \frac{R_c(z)}{E(z)} = \mu \frac{\cos k\Omega z^{-1} + z^{-2}}{1 - \cos k\Omega z^{-1} + z^{-2}} \quad (15)$$

$$G_n(z) = \frac{E(z)}{R(z)} = \frac{1}{1 + G_{ff}(z)} = \frac{1 - 2 \cos k\Omega z^{-1} + z^{-2}}{1 - (2 - \mu) \cos k\Omega z^{-1} + (1 - \mu) z^{-2}} \quad (16)$$

식(16)에서 LMS 알고리즘의 적응 Feedforward 제어기의 주파수 응답은 순환형 노치필터 (IIR notch filter)와 같으며 수렴상수가 작아짐에 따라 주파수 노치 범위가 작아지게 됨을 알 수 있다.<sup>[5]</sup>

식(16)의 전달함수를 적용하여 앞 베어링에 전체 시스템의 수렴상수와 회전수에 따른 안정성을 평가하면 Fig. 5와 같다.

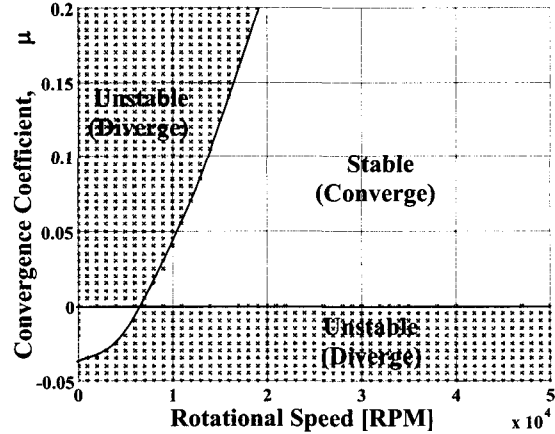


Fig. 5 Stability analysis with Feedforward Control

결과를 보면 약 6,000rpm (100Hz)을 전후하여 수렴상수의 부호가 바뀌어야 하는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 적용에 있어서 5,500rpm 이하의 저속에서는 -0.001을, 6,500rpm 이상의 고속에서는 0.001을 적용하여 수렴성을 보장하고, 5,500~6,500rpm의 구간에서는 수렴상수를 0으로 설정하였는데, 이 구간에서는  $w_{k0}(t)$ ,  $w_{k1}(t)$ 의 갱신은 이루어지지 않지만 이전 속도에서 수렴된 계수로 Feedforward 런아웃 제거성능을 유지하므로 저속에서 고속까지의 모든 회전수에서 런아웃 제거가 가능하도록 설정하였다.

#### 4. 고속 회전시 런아웃 제어 실험 결과

##### 4.1 고속 회전 응답

Fig. 6은 제작된 주축계의 10,000~50,000 RPM까지의 회전 시에 나타난 센서출력을 X-Y 그래프로 나타낸 것이다. 여기서, 앞 센서응답이 베어링 약 20  $\mu\text{m}$ , 뒷 베어링 30  $\mu\text{m}$  정도를 50,000rpm에서 나타나며, 궤적의 형태는 원형으로 응답이 회전수에 따라 감소하고 있어 회전수 성분 런아웃의 영향이 가장 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

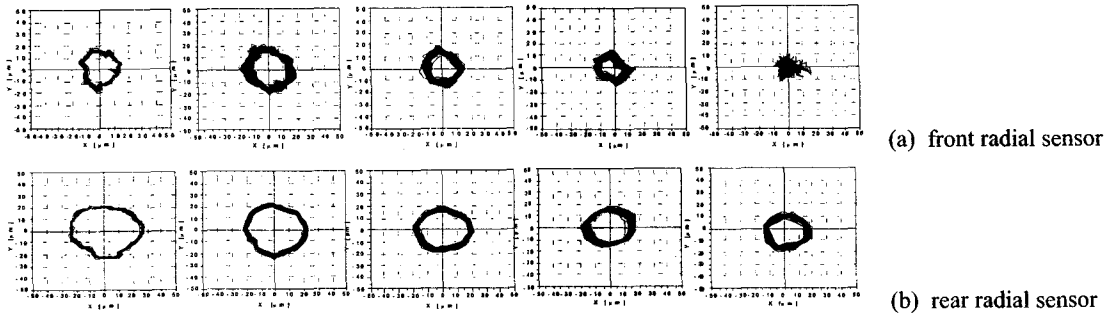


Fig. 6 Rotational response at sensors (10,000 ~50,000 rpm, 10  $\mu\text{m}/\text{div}$ )

#### 4.2 런아웃 제어 결과

LMS 알고리즘을 적용하였을 때의 A/D 로 입력된 센서응답은 Fig. 7 과 같다. 여기서 센서의 응답의 크기가 앞, 뒤 베어링 각각 약 15  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  정도로 회전수에 따라 크기가 변하지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 제어입력에서 런아웃의 영향이 제거되면서 센서 출력에 런아웃 만이 실려서

나타나는 것으로 볼 수 있다.

여기서 Fig. 8 의 명령추종 오차  $e(t)$ 를 보면 회전수 성분이 완전히 제거 되어 고주파의 노이즈를 포함하여 5  $\mu\text{m}$ 이하의 응답을 보이고 있어, 적용된 적응제어방법이 런아웃을 효과적으로 제거하고 있음을 알 수 있다.

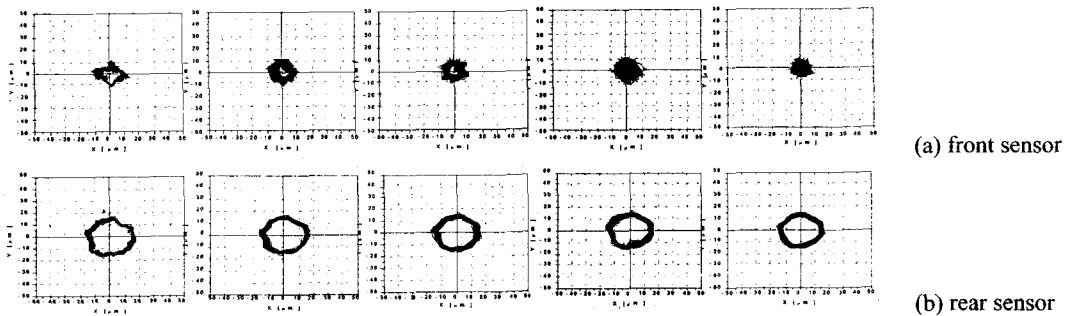


Fig. 7 Measured sensor output with feedforward control (10,000~50,000 rpm, 10  $\mu\text{m}/\text{div}$ )

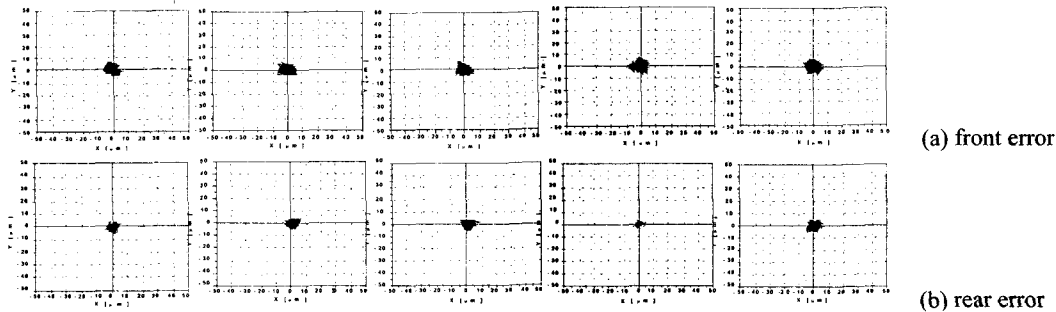


Fig. 8 Command error with feedforward (10,000~50,000 rpm, 10  $\mu\text{m}/\text{div}$ )

또한, Fig. 9는 주축 하우징의 진동을 가속도계로 측정한 것으로, Fig. 9(a)는 회전수와 같은 성분의 진동이 주로 발생하고 있으나 적응 제어시의 진동을 나타낸 Fig. 9(b)에서는 회전수의 진동이 제거되어 대부분의 진동이 없어진 특성을 볼 수 있으며, 이는 주축의 회전수 성분의 런아웃이 피드포워드로 제거되어 축의 회전이 질량 중심축을 중심으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 이때의 회전정밀도는 관성중심과 기하중심의 차이량과 비슷할 것임을 예측할 수 있어 높은 정밀도를 기대할 수 있다.

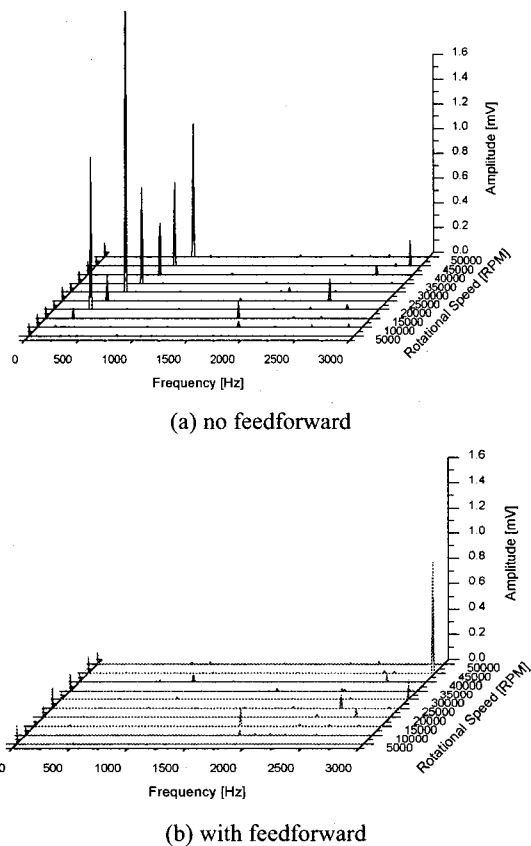


Fig. 9 Frequency response of vibration measured on the housing

### 5. 결론

본 연구에서 자기베어링을 이용한 연삭기 주축의 전기적 런아웃 효과적인 제거를 위하여 LMS

알고리즘의 적응 피드포워드 제어기를 제안하고 설계하였으며 실험적 검증은 수행하였다. 제작된 주축계의 회전수 성분에 대하여 수렴성 보장을 위하여 주파수 함수를 이용한 안정성을 검토하고 회전 속도에 따른 수렴상수 가변구조를 적용하여 50,000rpm까지의 고속 회전실험을 수행한 결과, 회전수 성분의 런아웃의 영향이 제거되어 추종오차는 앞, 뒤 각각 15  $\mu$ m, 30  $\mu$ m 정도의 런아웃이 제거되면서 5  $\mu$ m이하로 감소되어 주축의 회전 정밀도가 향상되었으며 주축의 회전성분의 진동이 완전히 제거되는 특성을 보여 제안된 적응 Feedforward 제어기의 유용성을 검증하였다.

### 후 기

본 연구는 산업기반기술개발사업의 일환으로 진행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. 박종권, 노승국, 안대균, “연삭기용 자기베어링 주축계의 고속화에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 11 호, pp. 233-243, 1998.
2. 김승중, 김하용, 이종원, “LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃 규명,” 소음진동학회 1998 추계학술대회, pp. 532-537, 1998.
3. F. Betchon, R. Schob, “On-line-adaptive vibration control,” 6th ISMB, pp. 362-371, 1998.
4. K. Åström, “Adaptive Control,” Addison Wesley, 1995.
5. Yegui Xiao, Yoshiaki Tadokoro, “LMS-based notch filter for the estimation of sinusoidal signals in noise,” Signal Processing, 46, pp. 223-231, 1995.
6. Rao, B. D., R. Peng, “Tracking characteristics of the constrained IIR adaptive notch filter,” IEEE Tans. Acoust. Speech Signal Process., ASSP-36, 1466-1479, 1988.
7. 노승국, 경진호, 박종권, “자기베어링으로 지지된 연삭 스핀들의 런아웃 제어,” 한국정밀공학회 2000 춘계학술대회, pp. 1011-1015, 2000.