

능동 자기베어링 런아웃의 적응제어

김재실(창원대 기계공학과), 배철용((주) 화인), 이재환(창원대 대학원 기계공학과),
안대균(한국공작기계 (주)), 최현오(한국기계연구원)

Adaptive control of Runout in Active magnetic bearing

Chaesil Kim, Cheolyong Bae, JaeWhan Lee, DaeKyun Ahn, HeonOh Choi

ABSTRACT

자기베어링의 회전정밀도에 영향을 미치는 인자로 PWM 전력증폭기, 위치 센서 등과 같은 자기베어링 구성 장치의 동특성 및 정밀도, 시스템의 정확한 모델링, 제어기법, 런아웃 등이 있다. 본 연구에서는 능동 자기베어링을 제어하기 위해 자기베어링의 PWM 전력증폭기와 회전축을 모델링하고 이를 바탕으로 능동 자기베어링 제어를 위한 PID 제어기를 구성하였으며, 변위 센서의 부착위치 및 회전축의 진원도의 영향으로 발생하는 주기적인 런아웃 요소를 첨가하여 런아웃의 영향을 확인하였으며, 런아웃(Runout)에 의해 발생하는 에러(Error)를 효과적으로 제어하여 자기베어링의 제어 정밀도를 향상시키기 위한 방법으로 기본적인 PID 제어기에 최소평균자승(Least Mean Square, LMS) 알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어기를 구성하여 자기베어링의 능동 제어에서 발생하는 주기적인 런아웃을 효과적으로 제어할 수 있음을 MATLAB을 통한 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

Key Words : Magnetic bearing(자기 베어링), LMS(Least Mean Square) Algorithm, Runout(런아웃)

1. 서론

산업이 발전함에 따라 각종 회전기계의 고속, 고성능 및 경량화가 요구됨에 따라 기존 베어링들의 문제점을 해결하기 위한 새로운 베어링이 필요하게 되었으며, 그 중의 하나가 자기베어링(Magnetic Bearing)이다. 자기베어링은 기계적 접촉에 의해 회전체를 지지하는 것이 아니라 전자석의 전자기력을 능동(Active) 제어함으로써, 회전체를 부상시켜 축과 접촉하지 않은 상태에서 지지한다. 특히, 전자기력을 제어함으로써 회전체의 회전을 매우 높은 정밀도($\sim 1\mu\text{m}$)로 유지할 수 있으며, 베어링의 강성 및 감쇠 특성이 제어기에 의해 조정되므로 임계속도 이상으로 안정된 가속 및 초고속 회전이 가능하다. 그리고 회전체의 상태를 모니터링 하기 위한 별도의 장치 및 장비가 불필요하며 운전 중 시스템의 이상 유무를 쉽게 규명할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점을 바

탕으로 고속회전이 요구되는 여러 가지 기계들에 적용되어 왔으며 공작기계분야 등에 실제 적용되고 있다. 자기베어링의 회전정밀도에 영향을 미치는 인자로 PWM 전력증폭기, 위치 센서 등과 같은 자기베어링 구성장치의 동특성 및 정밀도, 시스템의 정확한 모델링, 제어기법, 런아웃 등이 있다.

런아웃에는 크게 기계적 런아웃과 전기적 런아웃이 있다. 기계적 런아웃은 자기베어링의 변위 센서 부착위치와 회전축의 진원도 오차 및 표면의 분균일성 등으로 인한 주기적인 에러 변위 값이 제어기에 입력됨으로써 자기베어링의 회전 정밀도를 저하시켜 고정밀 제어를 어렵게 만든다. 전기적 런아웃은 특히 와전류형 변위 센서를 사용할 경우 자기베어링 회전체와 센서 사이에서 전기적 잡음으로 인한 측정 에러, 자기베어링 회전축 재료의 불균질성으로 인한 센서 전류의 변화로 인한 에러 및 자기베어링이 전자석의 힘을 제어하기 위해 제어전류를 발생시키는데 이때 발생한 잔류 자기로 인해 와전류형 센서의 측정이 정

확히 이루어지지 않아 제어 정밀도에 영향을 미친다.⁽¹⁾

본 연구에서는 능동 자기베어링을 제어하기 위해 자기베어링의 PWM 전력증폭기와 회전축을 모델링하고 이를 바탕으로 능동 자기베어링 제어를 위한 PID 제어를 구성하였으며, 변위 센서의 부착위치 및 회전축의 진원도의 영향으로 발생하는 주기적인 런아웃 요소를 첨가하여 런아웃의 영향을 확인하였다. 이러한 런아웃에 의해 발생하는 에러를 효과적으로 제어하여 자기베어링의 제어 정밀도를 향상시키기 위한 방법으로 기본적인 PID 제어기에 최소평균자승(Least Mean Square, LMS) 알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어를 구성하여 자기베어링의 능동 제어에서 발생하는 주기적인 런아웃을 효과적으로 제어할 수 있음을 MATLAB을 통한 시뮬레이션을 통해 확인하는데 그 목적이 있다.

2. 능동 자기베어링 모델링 및 해석

능동 자기베어링 시스템은 Fig. 2.1과 같이 회전축을 지지하기 위한 전자석, 위치센서, 제어기, PWM 파워증폭기 등으로 구성되어 있다.

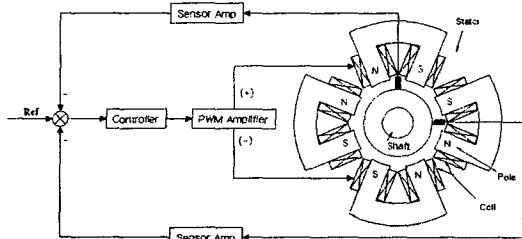


Fig. 2.1 능동 자기베어링 시스템

2.1 자기베어링의 자기력

자기베어링의 자기력은 회전축이 중심위치에서 미소변위 운동을 한다는 가정 하에 회전중심의 위치변화와 자기베어링에 여자 되는 자기력 사이의 관계를 총 전자석 에너지를 바탕으로 유도된다.

Fig. 2.2의 반경방향 자기베어링의 기하학적인 관계와 총 전자석 에너지로부터 수평방향과 수직방향의 자기력은 다음과 같이 유도된다.

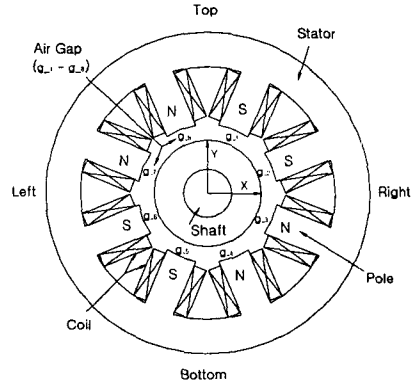


Fig. 2.2 자기베어링의 형상

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\mu_0 AN^2 \beta}{4} \left[\frac{I_R^2}{(g_0 - \beta x)^2} - \frac{I_L^2}{(g_0 + \beta x)^2} \right] \\ F_y &= \frac{\mu_0 AN^2 \gamma}{4} \left[\frac{I_T^2}{(g_0 - \gamma y)^2} - \frac{I_B^2}{(g_0 + \gamma y)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서, μ_0 : 자유공간의 투자율(permeability)

A : 전자석 폴의 단면적

N : 코일의 감김수

β, γ : 형상계수 ($\beta = \partial g / \partial x$, $\gamma = \partial g / \partial y$)

I_T, I_B : 상·하 코일에 인가되는 전류

I_R, I_L : 좌·우 코일에 인가되는 전류

식 (2.1)의 자기력은 전류와 공극에 대한 비선형 식이며 선형이론을 적용하여 자기베어링을 제어하기 위해서는 선형화가 필요하다.

각 코일에 인가되는 전류는 바이어스 전류와 제어전류로 구성되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_T = I_{BT} + i_{cy}, \quad I_B = I_{BB} - i_{cy} \quad (2.2)$$

$$I_R = I_{BR} + i_{cx}, \quad I_L = I_{BL} - i_{cx}$$

식 (2.2)을 (2.1)에 대입하여 작동점($x=y=0, i_{cy}=i_{cx}=0$)에 대해 Taylor 급수 전개 후, 1차항까지 취하여 선형화 하면 다음과 같다.

$$F_L = F_{L0} + K_L x + K_{Lc} i_{cL} \quad (2.3)$$

여기서,

$$F_{L0} = F_L(L, i_{cL})|_{L=0, i_{cL}=0} = \frac{\mu_0 A N^2 \rho}{4 g_0^2} (I_j^2 - I_k^2)$$

$$K_L = \left. \frac{\partial F_L(L, i_{cL})}{\partial L} \right|_{L=0, i_{cL}=0} = -\frac{\mu_0 A N^2 \rho^2}{2 g_0^3} (I_j^2 + I_k^2)$$

$$K_{iL} = \left. \frac{\partial F_L(L, i_{cL})}{\partial i_{cL}} \right|_{L=0, i_{cL}=0} = \frac{\mu_0 A N^2 \rho}{2 g_0^2} (I_j + I_k)$$

$L=x$ 일 때 $\rho = \beta, j=R, k=L$

$L=y$ 일 때 $\rho = \beta, j=T, k=B$

식 (2.3) F_{L0} 는 회전체를 지지하기 위해 필요한 힘이며 x 방향의 경우 값이 0이 되도록 바이어스 전류일 인가한다. K_L 은 위치강성계수(Position stiffness)라 하며 공극의 변화에 대한 자기력의 변화를 나타내며, K_{iL} 은 전류강성계수(Current stiffness)라 하며 전류의 변화에 대한 자기력의 변화를 나타낸다.

위치강성계수 K_L 이 음의 값을 가지므로 자기 베어링 시스템은 개회로(Open loop) 시스템에서 불안정하게 되며 폐환제어를 통한 안정화가 필요하다.

2.2 자기베어링의 운동방정식

선형화된 자기력을 바탕으로 Fig. 2.3의 능동자기베어링의 좌표계를 바탕으로 자기베어링의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

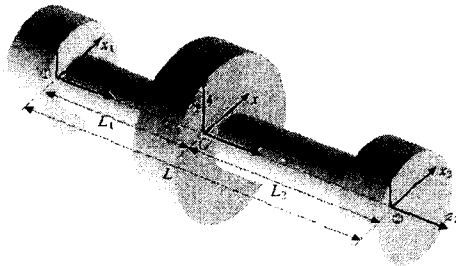


Fig. 2.3 능동자기베어링의 좌표계

$$M_u \ddot{q} + C_u \dot{q} + K_u q = B I \quad (2.4)$$

여기서,

$$M_u = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ml_2^2 + i_t & ml_1 l_2 - i_t & 0 & 0 \\ 0 & ml_1 l_2 - i_t & ml_1^2 + i_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ml_2^2 + i_t & ml_1 l_2 - i_t \\ 0 & 0 & 0 & ml_1 l_2 - i_t & ml_1^2 + i_t \end{bmatrix}$$

$$C_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i_p \Omega & -i_p \Omega \\ 0 & 0 & 0 & -i_p \Omega & i_p \Omega \\ 0 & -i_p \Omega & i_p \Omega & 0 & 0 \\ 0 & i_p \Omega & -i_p \Omega & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_u = \begin{bmatrix} -K_z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{x1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{y1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{y2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} K_{ix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{ix1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{ix2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{iy1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{iy2} \end{bmatrix}$$

$$q = \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} i_z \\ i_{x1} \\ i_{x2} \\ i_{y1} \\ i_{y2} \end{bmatrix}, L = L_1 + L_2$$

$$i_t = \frac{I_t}{L^2}, i_p = \frac{I_p}{L^2}, l_1 = \frac{L_1}{L}, l_2 = \frac{L_2}{L}$$

식 (2.4)의 질량행렬 M_u 에서 회전체와 베어링 간의 기하학적인 관계에 의해 좌,우측 베어링이 연성(coupling)되어 있음을 알 수 있는데 이는 자기베어링의 축을 $i_t = ml_1 l_2$ 가 되도록 설계함으로써 제거할 수 있다. 따라서 제어축간의 연성을 무시하면 능동자기베어링 시스템을 각 제어축마다 독립적으로 5개의 1자유도 시스템으로 모델링할 수 있으며 지배방정식은 다음과 같다.

$$m \ddot{q} - K_L q = K_{iL} i_{c\alpha} \quad (2.5)$$

식 (2.5)를 라플라스 변환하면 다음과 같이 1자유도 능동자기베어링시스템의 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{q(s)}{i_{c\alpha}(s)} = \frac{K_{iL}}{m s^2 - K_L} \quad (2.6)$$

3. 능동 자기베어링의 제어 및 시뮬레이션

3.1 PID 제어기

식 (2.5)의 1자유도 능동자기베어링 시스템의 PID 제어기는 Fig. 3.1과 같은 제어블럭도를 통해서 구현할 수 있다.

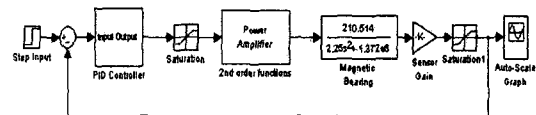


Fig. 3.1 1자유도 능동자기베어링의 PID 제어블럭도

능동자기베어링의 전달함수 식 (2.5)의 위치강성은 김⁽²⁾의 ANSYS를 이용한 2차원 자기베어링 유한요소해석을 통해 전류강성은 210.514 N/A, 위치강성은 1.372×10^6 N/m을 얻었다.

PWM 파워증폭기는 Sine Sweep Test를 통해 실험을 통해 얻은 전달함수를 Tang⁽³⁾이 제시한 curve fit방법을 적용하여 2차 시스템으로 모델링 하였으며 실험결과와 curve fit 결과는 Fig. 3.2와 같으며 전달함수는 식 (3.1)과 같다.

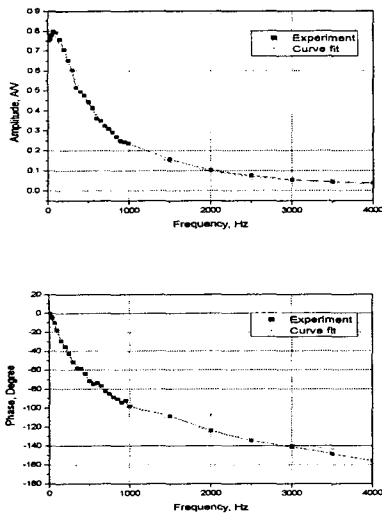


Fig. 3.2 PWM 증폭기의 주파수 응답 및 Curve Fit

$$G_{AP} = \frac{0.7919450D + 0.0}{0.3600382D - 07s^2 + 0.5379203D - 03s + 1} \quad (3.1)$$

이상의 1자유도 능동자기베어링 시스템의 계단 응답특성을 알아보면 Fig. 3.3과 같다.

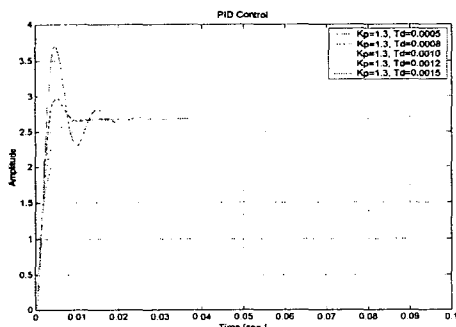


Fig. 3.3 PID 제어기의 계단응답

3.2 런아웃

자기베어링을 이용한 주축계에 있어서 회전체 불균형, 강제 진동 등에서 발생하는 외부 가진과 축의 형상오차, 모터의 노이즈 등에 기인하는 런아웃이 있으며 제어루프 내에서 증폭되어 회전 정밀도를 저하시키는 원인이 된다.

축의 진원도 및 센서 부착 위치 오차 등 주기적으로 발생하는 런아웃을 sine과 cosine의 합성으로 표현할 수 있으며 이를 사용하여 주기적인 런아웃이 축의 회전 정밀도에 미치는 영향을 알 수 있으며 PID 제어기에 런아웃항을 포함한 제어블록도는 다음과 같다.

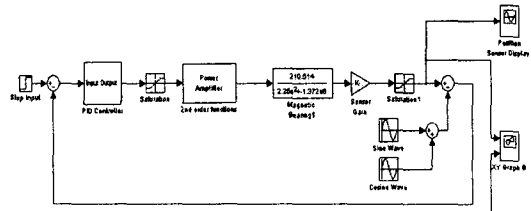
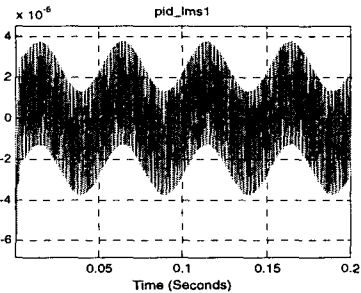
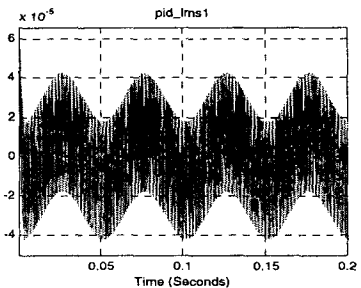


Fig. 3.4 런아웃을 포함한 PID 제어기

Fig. 3.4의 제어블록도를 바탕으로 런아웃의 영향을 알아보기 위해 기준신호를 0으로 하고 시뮬레이션하면 다음과 같이 런아웃의 영향을 확인할 수 있다.



(i) x-position display



(ii) y-position display

Fig. 3.5 런아웃을 첨가한 PID 제어기의 응답

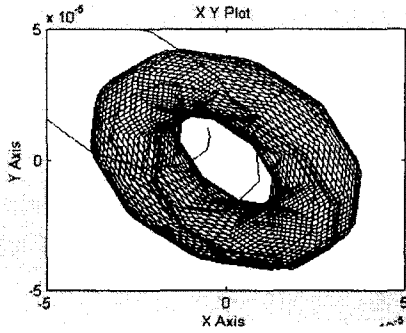


Fig. 3.6 런아웃을 첨가한 PID 제어기의 XY응답

3.3 적응알고리즘을 적용한 피드포워드 제어기

적응알고리즘을 적용한 피드포워드 제어블럭도는 Fig. 3.7과 같으며 런아웃을 보상하기 위한 신호 $r_c(k)$ 는 식(3.2)와 같이 표현될 수 있다.

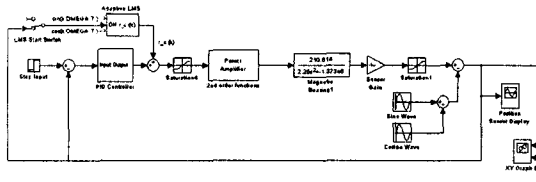


Fig. 3.7 LMS알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어기

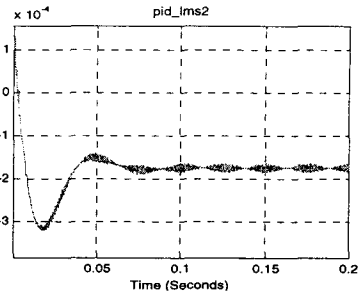
$$r_c(k) = w_{10}(k) \sin(k\Omega T) + w_{11}(k) \cos(k\Omega T) \quad (3.2)$$

여기서, w_{10} 와 w_{11} 은 적응 필터계수로서 LMS 알고리즘⁽⁴⁾을 적용하여 다음과 같은 방법으로 값을 갱신한다.

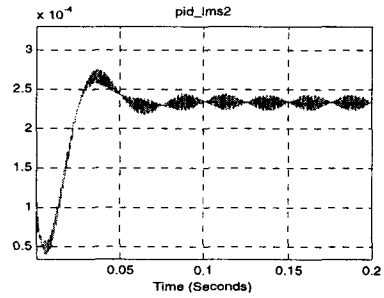
$$\begin{aligned} w_{10}(k+1) &= w_{10}(k) + 2\mu e(k) \sin(k\Omega T) \\ w_{11}(k+1) &= w_{11}(k) + 2\mu e(k) \cos(k\Omega T) \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서, μ 는 계수 조정 파라미터(Step size)로서 μ 값에 의해 반복계산의 양상이 달라지므로 시뮬레이션에 μ 값은 LMS 알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어기의 수렴정도에 따라서 $0 < \mu < 1$ 의 값을 설정할 수 있는데 본 연구에서 사용한 값은 0.6이었다.

LMS 알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어기를 시뮬레이션 하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

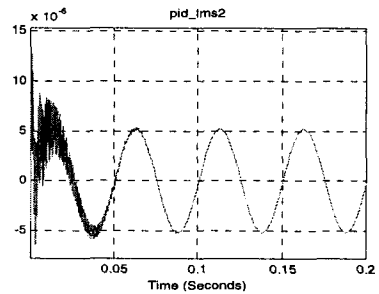


(i) w_{10} 의 변화

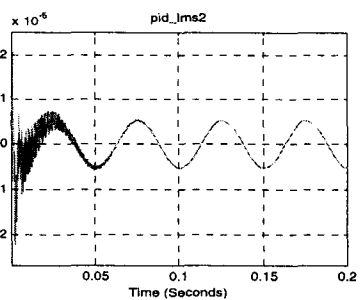


(ii) w_{11} 의 변화

Fig. 3.8 적응필터계수의 변화



(i) x-position Display



(ii) y-position display

Fig. 3.9 LMS알고리즘을 적용한 피드포워드 제어기의 응답

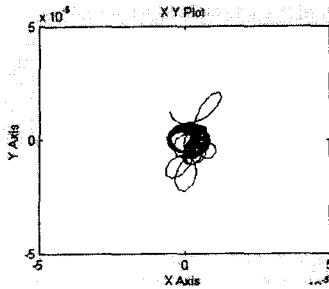


Fig. 3.10 LMS 알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어기의 XY 응답

시뮬레이션 결과로서 Fig. 3.5, Fig. 3.6의 런아웃을 적용한 PID 제어기의 응답의 진폭보다 Fig. 3.8, Fig. 3.9의 LMS 알고리즘을 적용한 적응 피드포워드 제어기의 진폭이 현저히 적음을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

총 전자석 에너지 이론을 바탕으로 비선형 자기베어링의 힘을 유도하였고 이를 테일러 급수전개를 통해 선형화하였으며, 자기베어링의 다자유도 운동방정식으로부터 자기베어링 시스템의 적절한 설계를 통한 1자유도 자기베어링 운동방정식을 유도하였다.

LMS 알고리즘을 적용한 적응피드포워드 제어기를 이용하여 능동자기베어링의 회전정밀도를 저하시키는 주기적인 런아웃을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

향후 DSP 컨트롤러를 이용한 자기베어링 시스템에 적용하여 시뮬레이션과 실험결과를 비교를 통한 검증이 뒤따라야 하겠다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. 김승중, 이종원, "확장영향 계수법을 이용한 런아웃 및 불균형질량 규명", '95 한국 자동제어 학술회의, pp. 22-25, 1995

2. 김은영, 1999, "능동진동제어 자기베어링-회전체 시스템의 안정성 연구", 석사학위 논문집, 기계공학과, 창원대학교.
3. Tang. P., Palazzolo, A. B., et al, 1994, "Electromechanical Simulation Method for Active Vibration Control of a Magnetic Bearing Supported Rotor", ASME 1994 Gas Turbine Conf., ASME paper 93-GT-382.
4. K. Astron, "Adaptive Control", Addison Wesley, 1995.
5. 노승국, 경진호, 박종권, "적응 Feedforward를 이용한 연삭기용 자기베어링 주축계의 회전오차 제어", 한국 정밀 공학회, 1999 춘계학술대회, pp. 337-340, 1999.
6. 김승중, 김하용, 이종원, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃 규명", 소음 진동학회, 1998 추계학술대회, pp. 532-537, 1998
7. D.C. Han. and I. B. Chang, "A performance of analog PID controlled Magnetic Bearing of a rotor system", Korea-U.S. Vibration Engineering seminar, Taejon, Korea, March, 1993.
8. Y. SUZUKI, "Acceleration feedforward control for active magnetic bearing systems excited by ground motion", IEEE Proc-control theory appl., Vol 145, No 2, March, 1998.