

## 전자기베어링에서 Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 외란보상 제어기 설계

강민식\*(경원대학교 기계공학과), 강윤식(국방과학연구소), 이대옥(국방과학연구소)

### Disturbance Compensation Control in Active Magnetic Bearing Systems by Filtered-x LMS Algorithm

M. S. Kang\*(Mech. Eng. Dept., Kyungwon Univ.), Y. S. Kang(ADD), D. O. Lee(ADD)

#### ABSTRACT

This paper concerns on application of active magnetic bearing(AMB) system to levitate the elevation axis of an electro-optical sight mounted on moving vehicles. In such a system, it is desirable to retain the elevation axis within the predetermined air-gap while the vehicle is moving. A disturbance compensation control is proposed to reduce the base motion response. In the consideration of the uncertainty of the system model, a filtered-x least-mean-square(FXLMS) algorithm is used to estimate adaptively the frequency response function of the feedforward control which cancels disturbance responses. The frequency response function is fitted to an optimal feedforward control. Experimental results demonstrate that the proposed control reduces the air-gap deviation to 27.7% that by feedback control alone.

**Key Words** : Active magnetic bearing (능동자기베어링), Disturbance compensation control (외란보상제어), Filtered-x least mean square algorithm (FXLMS: Filtered-x LMS 알고리즘)

#### 1. 서론

능동자기베어링(AMB)은 기존의 베어링에 비해 많은 장점을 갖고있어 산업계에서 적용이 증가하는 추세이다<sup>[1]</sup>. 자기베어링은 전자기력을 이용하여 부하를 부상상태로 지지하므로 부유할 및 베어링의 동특성을 조정할 수 있다는 장점을 제공한다. 지금까지 전자기베어링에 대한 연구는 주로 베이스가 정적인 상태를 대상으로 하였다. 그러나 차량 등에 적용하는 경우 베이스에 의한 영향을 무시할 수 없다. 본 연구에서는 AMB계의 안정화를 위해 케환제어와, 베이스 가속도를 측정하여 보상하는 가속도 외란보상제어를 제안한다. 외란의 영향 감소를 위해 케환로 대역폭을 넓히는 케환제어 방법을 적용할 수 있으나<sup>[2]</sup>, 이 방법은 잡음에 대한 민감도 증가나, 공진현상을 유발하는 문제가 있다. 보다 효과적인 방법은 외란보상제어를 늘 수 있다<sup>[3]</sup>. 역동력학 모델을 이용한 보상제어는 이론적으로 외란의 영향을 완전히 배제시킬 수 있으나 이 방법은 모델의 정확성이 보장되어야 한다. 그러나 실제 AMB시스템의 비선

형성, 인속계의 급사적 이산화, 센서 동특성 등 때문에 정확한 모델을 얻는 것은 쉽지 않다. 또한 이산화한 경우 빈번히 발생하는 비최소위상 특성은 제어기의 불안정성을 야기하므로 적용에 한계가 있다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서는 FXLMS 알고리즘<sup>[4]</sup>을 이용한 실험적 외란보상제어기 설계방법을 제안하였으며, 그 효과 검증은 위해 1-자유도 AMB계를 제작하여 실험하였다.

#### 2. 실험장치 및 동적모델

실험장치는 Fig. 1의 1-자유도 AMB 시스템이다. 모의 한쪽 끝은 고정된 구조물에 힌지되어 있고 자유단은 전자기 베어링에 의해 부상된다. 전자기 베어링은 베이스 운동을 발생시키는 가신기 위에 설치되었다. 전자석과 모 사이의 공극은 비접촉 변위 센서에 의해 측정되며, 전자기베어링의 상하방향 가속도 측정을 위해 가속도계가 설치되었다.

이 AMB 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{J}{x_a}(\ddot{y} + \ddot{z}) = -\frac{L}{2}mg + x_a f_c \quad (1)$$

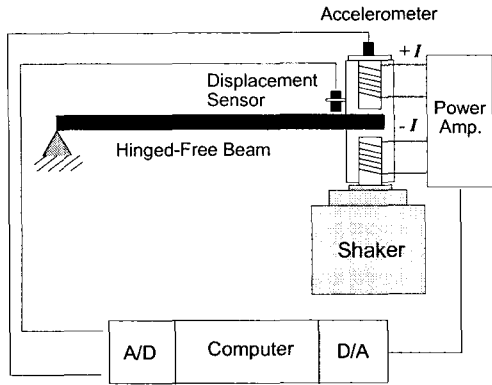


Fig. 1 Schematic of experimental setup

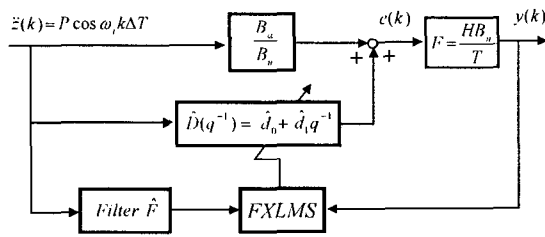


Fig. 2. Block diagram of FXLMS algorithm

식(1)에서  $J, L, m$ 은 모의 관성모멘트, 길이, 질량이며,  $x_a$ 는 전자식 위치,  $y$ 는 공칭공각으로 부터의 공각 변화,  $z$ 는 베이스 변위,  $g$ 는 중력가속도,  $f_c$ 는 전자기력을 나타낸다. 전자기력은 다음 식과 같이 선형화할 수 있다.

$$f_c = K_y y + K_v K_a v_c \quad (2)$$

여기서  $K_y$ 와  $K_v$ 는 각각 전자식의 변위강성과 전류강성이며,  $K_a$ 는 전류증폭기의 이득이다. 따라서 다음의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{y} - \frac{3K_y x_a^2}{mL^2} y = \frac{3K_v K_a x_a^2}{mL^2} v_c - \ddot{z} - \frac{3x_a}{2L} g \quad (3)$$

식(3)에서 이 AMB 시스템은 불안정하며, 모의 자중은 정적 외란으로, 베이스 가속도는 동적 외란으로 작용함을 알 수 있다.

### 3. 제어기 설계

이산제어를 위해 식(3)을 이산시간 모델로 변환하면 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{B_a(q^{-1})}{A(q^{-1})} v_c(k) + \frac{B_a(q^{-1})}{A(q^{-1})} \left\{ \ddot{z}(k) - \frac{3x_a}{2L} g \right\} \quad (4)$$

이 개의 제어를 위해 식(5)의 되먹임+앞먹임제어를 적용하면, 폐회로 응답은 식(6)이 된다.

$$v_c(k) = \frac{G(q^{-1})}{H(q^{-1})} y(k) + D(q^{-1}) \ddot{z}(k) \quad (5)$$

$$y(k) = \frac{H(B_a + B_a D)}{A H - B_a G} \ddot{z}(k) - \frac{B_a H}{A H - B_a G} \frac{3x_a}{2L} g \quad (6)$$

#### 3.1 극점배치 되먹임제어

식(6)의 폐회로 안정성을 위해서 다항식  $H, G$ 는 식(7)의  $T$ 의 모든 근이 단위원 내에 있어야 한다.

$$A(Q^{-1})H(q^{-1}) - B_a(q^{-1})G(q^{-1}) = T(q^{-1}) \quad (7)$$

식(8)는 Diophantine식으로, 원하는 극점들로 이루어진  $T(q^{-1})$ 를 선정하고 항등식을 풀어  $H$ 와  $G$ 를 결정할 수 있다. 만일  $H$ 를  $(1 - q^{-1})$ 을 포함하도록 선정하면 모의 자중에 의한 정상상태 응답을 제거할 수 있다.

#### 3.2 외란보상제어

식(6)에서 외란응답은 다음의 앞먹임제어에 의해 완벽하게 제거할 수 있다.

$$D(q^{-1}) = -\frac{B_a(q^{-1})H(q^{-1})}{B_a(q^{-1})} \quad (8)$$

이 제어기 성능은 모델의 정확도에 민감하므로 다음의 실험에 의한 제어기설계방법을 제안한다.

다음의 1차 다항식 앞먹임제어기  $D(q^{-1})$ 는 임의의 단일 주파수 조하함수 형태의 베이스 가속도에 의한 응답을 완벽하게 제거할 수 있다.

$$D(q^{-1}) = d_0 + d_1 q^{-1} \Big|_{q=e^{j\omega T}} = -\frac{B_a H}{B_a} \Big|_{q=e^{j\omega T}} \quad (9)$$

이 다항식 계수  $d_0, d_1$ 은 Fig. 2와 같이 FXLMS 알고리즘을 이용하여 추정하며, 생성식은 다음과

같다<sup>14)</sup>.

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_0(k+1) \\ \hat{d}_1(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_0(k) \\ \hat{d}_1(k) \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \hat{z}(k) \\ \hat{z}(k-1) \end{bmatrix} y(k) \quad (10)$$

Fig. 2에서 필터  $\hat{F}(q^{-1})$ 가 다음 식을 만족하면 추정계수의 평균값은 참값에 수렴한다<sup>15)</sup>.

$$Re\{E[\frac{\hat{F}(q^{-1})}{F(q^{-1})}] \} \parallel_{\sigma^{-\exp(-\mu\Delta T)}} > 0 \quad (11)$$

$$0 < \mu < \frac{1}{\max(2E[\frac{1}{\hat{r}^2(k)}])}, \quad \hat{r}(k) = F(q^{-1})\hat{z}(k) \quad (12)$$

따라서 Fig. 2와 같이 AMB 시스템을 특정 주파수를 갖는 조화함수로 가진한 상태에서 FXLMS 알고리즘을 적용하면 이 외란을 제거하는 제어기 계수  $d_0$ 와  $d_1$ 을 구할 수 있으며, 가진 주파수를 변경하면서 이상의 과정을 반복하여 외란제거보상기의 주파수응답함수를 얻는다.

이 주파수응답함수를 가장 잘 나타내는 제어기 모델은 정하고 일반적인 곡선맞춤법을 이용하여 계수를 구한다. 만일 IIR-모델이 불안정하면 안정성을 보장하는 FIR(finite impulse response)-모델 형태의 제어기를 선정할 수 있다.

#### 4. 실험 및 결과

제어기의 성능을 평가를 위해 실험을 수행하였다. 퀘환제어는 퀘환로 극점이 감쇠비=0.8, 고유진동수=60Hz를 갖도록 설계되었으며, 적분제어가 포함되었다. 샘플링 주파수는 800Hz로 선정하였다.

알박임 제어기 설계에 앞서 퀘환제어를 작동시킨 상태에서 가진기를 20Hz의 조화함수로 가진하며 FXLMS 알고리즘의 적용성을 검증하였다.

Fig. 3은 가진과 동시에 FXLMS 알고리즘을 작동시킨 경우 추정된 계수이다. 응답은 초기에 큰 진폭의 응답을 보이다 계수가 수렴함에 따라 감소됨을 확인하였다.

베이스 운동의 대역폭을 고려하여 10Hz-30Hz 선형 Chirp 신호를 가진기에 입력하면서 FXLMS 알고리즘을 실행시켰다. Fig. 4는 추정된 계수이며, Fig. 5는 이 경우의 응답으로 초기 진폭구간이 지난 후 감소함을 알 수 있다. Fig. 6, 7에서 굵은 실선은 Fig. 4의 제어기 계수를 이용하여 구한 주파수 응답함수의 크기와 위상이다. 이 주파수 응답함수를 곡선맞춤법으로 얻은 IIR(infinite impulse response)-모델은 불안정하여 FIR-모델로 곡선맞춤을 하였다. Fig. 6, 7은 실험에 의한 주파수 응답, IIR-모델,

FIR-모델의 주파수 응답을 나타낸다.

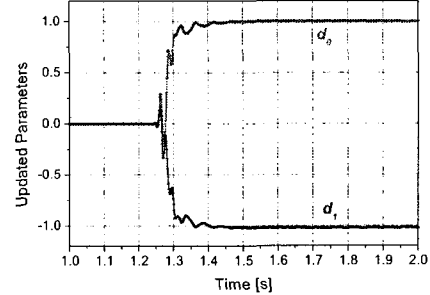


Fig. 3. Estimated parameters by FXLMS under 20Hz base motion

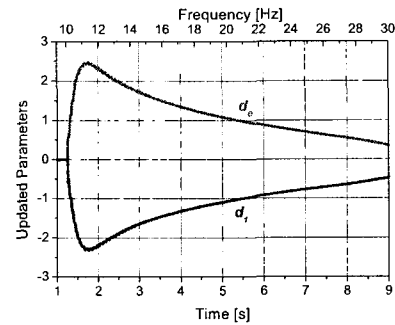


Fig. 4. Estimated control parameters

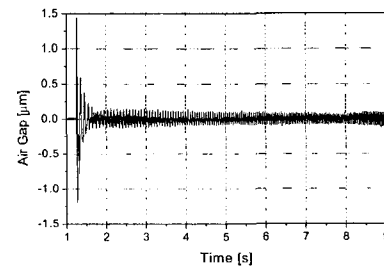


Fig. 5. Air gap with FB+FF control by FXLMS under base motion excited by chirp signal

검정된 외란보상제어의 성능을 검증하기 위해 10Hz-30Hz 대역폭을 갖는 랜덤 신호로 가진하였다. Fig. 8은 동일한 가진상태에서 각 제어기를 적용했을 때 얻은 응답의 스펙트럼을 보인다. 퀘환제어만 하였을 경우(FB Only) 응답의 표준편차는 11.13μm이었다. 퀘환제어와 25Hz의 외란을 제거하는 알박임 제어기를 적용한 경우(FB+FF, 25Hz) 응답의 표준편

차는  $5.53\mu\text{m}$ 로 개선되었다.

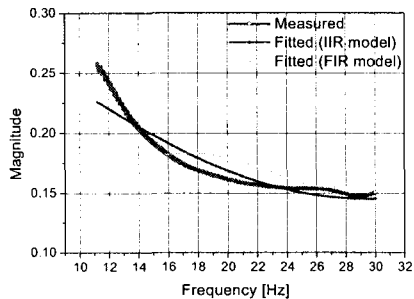


Fig. 7. Magnitudes of measured and fitted frequency response functions

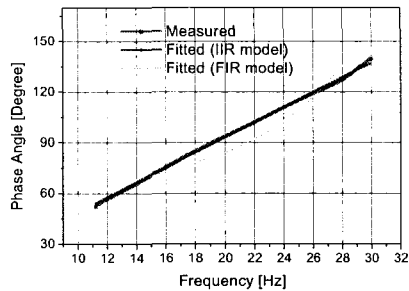


Fig. 8. Phase angles of measured and fitted frequency response functions

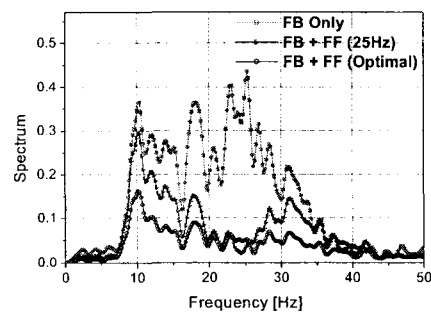


Fig. 9 Spectra of air gap with FB+FF controls under randomly excited base motion

보상제어를 적용한 경우(FB+FF, Optimal) 스펙트럼은 케환제어만 한 경우에 비해 모든 주파수 범위에서 낮았으며, FB+FF(25Hz)에 비해서도 25Hz 부근을 제외하면 전 영역에서 낮게 나타났다. 단, 15Hz 미만의 주파수 영역에서의 상대적으로 큰 오차는 곡선맞춤에서 맞춤오차가 크기 때문이다. 이 경우 응답의 표준편차는  $3.08\mu\text{m}$ 로 케환제어만을 적용

한 경우의 27.7%에 해당한다.

## 5. 결론

차량에 장착되어 운용되는 AMB 시스템에서 차량 운동으로 인한 외란응답의 감소를 위해 베이스 가속도 외란보상제어를 적용하였다. 보상제어기 설계에서 모델이 갖는 부정확성을 고려하여 FXLMS 알고리즘을 이용한 실험적 설계방법을 제안하였으며, 1-자유도 AMB 시스템에 적용하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 외란보상제어는 베이스 가신을 받는 AMB 시스템에서 베이스 응답을 감소시키는 데 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

## 후기

이 논문은 국방과학연구소 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. 하영호, 이종원, "주파수 영역 가측함수를 가진 최적제어에 의한 능동자기베어링 시스템의 불균형 응답제어," 대한기계학회 논문집 A권, 제 22권, 제 8호, pp. 1431-1441, 1998.
2. Cole, M. O. T., Keogh, P. S., and Burrows, C. R., "Control and Non-linear Compensation of a Rotor/Magnetic Bearing System Subject to base Motion," 6th Int. Symposium on Magnetic Bearings, Cambridge, MA, pp.618-627, 1998.
3. Suzuki, Y., "Acceleration Feedforward Control for Active Magnetic Bearing Excited by Ground Motion," IEEE Proc. Control Theory Appl., vol.145, no.2, pp.113-118, 1998.
4. Kuo, S. M. and Morgan, D. R., Active Noise Control Systems, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, 1996.
5. White, M. T. and Tomizuka, M., "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control and Parameter Adaptation," Control Engineering Practice, vol.5, no.6, pp.741-751, 1997.