

베이스 가진을 받는 능동자기베어링 시스템에서 Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 가속도 앞먹임 제어

강 민 식*

(2003년 3월 4일 접수, 2003년 8월 5일 심사완료)

Acceleration Feedforward Control in Active Magnetic Bearing System Subject to Base Motion by Filtered-x LMS Algorithm

Kang, Min Sig

Key Words: Acceleration Feedforward Control(가속도 앞먹임제어), Base Motion(베이스 운동), Active Magnetic Bearing(능동자기베어링), Filtered-X Least-Mean-Square Algorithm(Fxlms 알고리즘), Curve Fitting(곡선맞춤)

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. An optimal base acceleration feedforward 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 the frequency response function of the feedforward control which cancels base motions. 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.

기호설명

$A(q^{-1}), B_u(q^{-1}), B_a(q^{-1})$: 시스템 다항식
 $D(q^{-1}), G(q^{-1}), H(q^{-1})$: 제어기 다항식
 $\tilde{\alpha}_0(k), \tilde{\alpha}_1(k)$: 제어기 계수 추정치
 $\hat{F}(q^{-1})$: 전달함수 $F(q^{-1})$ 의 추정
 g : 중력 가속도
 i_c : 제어전류
 I_o : 바이어스 전류
 J : 보의 관성모멘트

K_a : 전력증폭기 이득
 K_i : 전자기 베어링의 전류강성
 K_y : 전자기 베어링의 위치강성
 L : 보의 길이
 m : 보의 질량
 v_c : 전력증폭기 입력 전압
 x_a : AMB의 길이방향 위치
 y : 공칭공극 기준 공극 변화량
 y_o : 보와 전자기베어링 고정자의 공칭공극
 \dot{z} : 베이스 가속도

† 경원대학교 기계공학과

E-mail : mskang@kyungwon.ac.kr

TEL : (031)750-5524 FAX : (031)750-5273

1. 서론

조준경은 이동하는 차량에 장착되며, 목표물을 추적하여 목표물 영상을 운용자에게 제공하는 역할을 한다. 이 조준경은 선회측과 고각측이 서로

직교하는 2-자유도 감발 구조로 구성되며, 고각축에는 목표물 영상을 90도 반사시키는 거울이 고정되어 있다. 따라서 차량에 탑승한 운전자에게 안정된 목표물 영상을 제공하기 위해서 고각축은 차량의 전후 회전각의 절반만큼 반대방향으로 회전해야 된다. 고각축의 회전은 서어보 제어계에 의한다. 기존의 고각축은 반경방향의 조립강성을 높이기 위해 선하중(pre-load)을 가한 상태에서 조립한 기계적 베어링에 의해 지지되며, 따라서 강성을 높이기 위해 선하중을 키울수록 고각축 회전 마찰력은 증가하게 된다. 서어보 제어계에서 마찰은 정상상태 오차 또는 스틱-슬립(stick-slip)과 같은 불안정성을 야기하므로 안정된 목표물 영상을 제공하기 어렵다. 특히 조준경의 고각축은 회전속도가 낮고 회전방향이 자주 바뀌므로 마찰에 의한 성능저하가 크다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 기계적 베어링 대신 능동자기베어링(AMB, active magnetic bearing) 시스템을 적용코자 한다.

AMB 시스템은 기존의 베어링에 비해 많은 장점을 갖고 있어 산업계에서 적용이 증가하는 추세에 있다. 기존의 베어링이 유막 또는 직접적인 접촉에 의해 부하를 지지하는데 비해 자기베어링은 전자기력을 이용하여 부하를 부양상태로 지지하므로 무윤활에서 오는 많은 장점을 제공하며, 특히 베어링의 동특성을 조절할 수 있는 장점이 있다. 지금까지 전자기베어링에 관한 연구들은 주로 베이스가 정적상태인 경우를 대상으로 하였으며,^(1,2) 베이스가 움직이는 경우에 대한 연구는 미진한 편이다. 그러나 본 연구의 대상은 이동하는 차량에 적용되는 AMB 시스템이므로 베이스가 움직이는 경우에 대한 연구가 필요하다.

AMB 시스템에서 베이스 운동의 영향을 감소시키기 위해 되먹입제어를 통해 베어링계의 대역폭을 증가시킬 수 있으나^(3, 4) 이 방법은 공진을 야기할 수 있다. 보다 효과적인 방법으로는 베이스의 가속도를 측정하여 베이스 운동의 영향을 보상하는 가속도 앞먹입제어를 들 수 있다. Suzuki⁽⁵⁾는 가속도를 측정하여 앞먹입제어하는 방법이 제어입력 에너지의 증가 없이 베이스 외란의 영향을 감소시키는데 효과가 있음을 보였다. 그러나 이 제어기는 계의 수학적 모델을 기반으로 설계되므로 정확한 모델이 필요하다. 그러나 실제로 AMB 시스템의 비선형성, 연속계의 근사

적 이산화 오차, 센서의 동특성 등 때문에 정확한 모델을 얻기 어렵다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서는 FXLMS(filtered-x least-mean-square) 알고리즘을 이용한 앞먹입제어기 설계방법을 제안하였으며, 그 효과를 검증하기 위해 조준경 고각축이 갖는 특성을 최대한 갖는 1-자유도 AMB 시스템을 제작하여 실험하였다.

2. 실험장치 및 동적 모델

본 논문에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같은 1-자유도 AMB 시스템으로, 보, 한 쌍의 전자석, 전력증폭기, 가진기, 변위센서, 가속도계 및 컴퓨터로 구성되었다. 보의 한쪽 끝은 고정된 구조물에 힌지되어 있고 자유단은 전자기 베어링에 의해 부양된다. 전자기 베어링은 베이스 운동을 발생시키는 가진기 위에 설치되었다. 가진기는 외부의 입력 신호에 의해 원하는 형태로 가진시킬 수 있다. 전자기베어링과 보 사이의 공극은 비접촉 변위센서에 의해 측정되며, 전자기베어링의 상하방향 가속도 측정을 위해 가속도계가 전자석 구조물에 설치되었다.

이 AMB 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

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

식 (1)에서 f_c 는 보의 힌지점 기준 관성모멘트, L 은 보의 길이, m 은 보의 질량, x_a 는 전자석

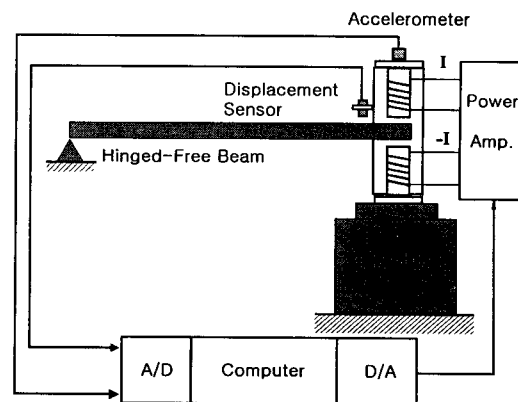


Fig. 1 Schematic diagram of test rig

의 길이방향 위치, y 는 공칭공극으로부터의 공극 변화, z 는 베이스 변위, g 는 중력가속도, f_c 는 전자기력을 나타낸다.

전자석에 의해 보에 전달되는 전자기력은 운용점(공칭공극, 바이어스 전류)을 기준으로 미소 변화를 가정하여 다음 식과 같이 선형화할 수 있다.

$$f_c = K_y y + K_i i_c \quad (2)$$

여기서 K_y 와 K_i 는 각각 전자석의 변위강성과 전류강성이며, i_c 는 제어전류를 나타낸다.

전력증폭기는 전류되먹임을 이용하여 대역폭을 높일 수 있으므로 입력전압 v_c 와 출력인 제어전류 i_c 는 다음의 비례관계로 나타낼 수 있다.

$$i_c = K_a v_c \quad (3)$$

여기서 K_a 는 전력증폭기의 이득이다.

식 (2)와 (3)을 식 (1)에 대입하여 다음의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{y} - \frac{3K_y x_a^2}{mL^2} y = \frac{3K_i K_a x_a^2}{mL^2} v_c - \ddot{z} - \frac{3x_a}{2L} g \quad (4)$$

식 (4)에서 이 AMB 시스템은 불안정하며, 보의 자중은 정적 외란으로, 베이스 가속도는 동적 외란으로 작용함을 알 수 있다.

3. 제어기 설계

전자기베어링계는 Fig. 1에서와 같이 이산제어를 하므로 식 (4)를 이산시간 모델로 변환하면 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{B_u(q^{-1})}{A(q^{-1})} v_c(k) + \frac{B_a(q^{-1})}{A(q^{-1})} \left\{ \dot{z}(k) - \frac{3x_a}{2L} g \right\} \quad (5)$$

여기서 $y(k)$, $v_c(k)$, $\dot{z}(k)$ 는 각 신호의 샘플 데이터, q^{-1} 은 한스텝 지연 연산자, B_u , B_a 는 계의 다항식으로 다음과 같다

$$A(q^{-1}) = 1 - 1.3283q^{-1} + 0.2679q^{-2}$$

$$B_u(q^{-1}) = -0.986q^{-1} + 1.1622q^{-2}$$

다항식 B_a 는 센서의 위치 및 센서의 동특성의 영향을 포함하고 있으며, 실험적으로 구한 B_a 는 외란의 형태에 따라 그 계수의 변화가 커져 제시하지 않았다. 본 논문에서 제시하는 제어기 설계 방법은 모델 기반 제어기 설계가 아니므로 정확한 모델 B_a 가 필수조건은 아니다.

식 (5)의 계의 제어를 위해 다음의 일반적인 되먹임+앞먹임제어를 고려하자.

$$v_c(k) = \frac{G(q^{-1})}{H(q^{-1})} y(k) + D(q^{-1}) \dot{z}(k) \quad (6)$$

식 (6)의 우항 첫 번째 요소는 되먹임제어, 두 번째 요소는 앞먹임제어에 해당되며, $H(q^{-1})$, $G(q^{-1})$, $D(q^{-1})$ 는 설계해야 될 다항식이다. 물론 이 제어기는 가장 보편적으로 사용되는 PID-제어기를 포함한다. 식 (6)의 제어기를 적용한 폐회로 응답은 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{H(B_u + B_u D)}{AH - B_u G} z(k) - \frac{B_u H}{AH - B_u G} \frac{3x_a}{2L} g \quad (7)$$

3.1 극점배치 되먹임제어

식 (7)의 폐회로가 안정하기 위해서는 다항식 $H(q^{-1})$ 와 $G(q^{-1})$ 가 식 (8)의 $T(q^{-1})$ 의 근이 모두 단위원 내에 있도록 설계되어야 한다.

$$A(Q^{-1})H(q^{-1}) - B_u(q^{-1})G(q^{-1}) = T(q^{-1}) \quad (8)$$

식 (8)은 Diophantine식으로, 원하는 극점들로 이루어진 $T(q^{-1})$ 를 선정하고 항등식을 풀어 H와 G를 결정할 수 있다.⁽⁶⁾ 만일 $H(q^{-1})$ 를 식 (9)와 같이 $(1 - q^{-1})$ 을 포함하도록 선정하면 식 (7)에서와 같이 정적 외란인 보의 자중에 의한 정상상태 응답을 제거할 수 있을 뿐 아니라 가속도 신호에 포함되어 있는 DC-오프셋에 의한 응답의 정상상태오차를 제거할 수 있다. 식 (9)는 적분제어가 포함됨을 의미한다.

$$H(q^{-1}) = (1 - q^{-1})H'(q^{-1}) \quad (9)$$

3.2 앞먹임제어

앞먹임제어는 베이스 가속도 응답을 최소화하는데 목적이 있다. 외란의 앞먹임제어를 하기 위해서는 외란을 측정해야되는 부담은 있지만, 되먹임제어가 외란에 의한 응답을 감소시키는데 비해 앞먹임제어는 외란이 계에 영향을 미치기 전에 미리 보상하므로 외란응답 감소에 보다 효과적이다. 식 (7)에서 베이스 가속도의 영향은 다음의 앞먹임제어에 의해 완벽하게 제거할 수 있다.

$$D(q^{-1}) = -\frac{B_a(q^{-1})}{B_u(q^{-1})} \quad (10)$$

이 제어기는 계의 모델에서 유도되므로 제어기 성능은 모델의 정확도에 민감하다. 그러나 모델은 AMB의 비선형성, 연속계를 등가 이산계모델

로 변환하는 데에서 발생하는 근사화 오차, 가속도계의 동특성 등과 같은 요인에 의해 정확한 모델을 얻기 어렵다. 또한 $B_u(q^{-1})$ 는 단위원 외부에 근이 존재하는 경우가 많으므로⁽⁶⁾ 적용에 제약이 많다. 따라서 실험에 의해 제어기를 직접 설계하는 방법을 제안코자 한다. 이 방법은 다음과 같이 두 단계로 구성된다.

첫 번째 단계에서는 FXLMS 알고리즘을 이용하여 각각의 단일 주파수 외란응답을 제거하는 각각의 제어기 다항식들을 실험적으로 추정하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구한 제어기 다항식들의 주파수 응답을 주파수 영역에서 최적모델맞춤을 통해 앞먹임제어기를 결정한다.

3.2.1 단일 주파수 외란제거 제어기 추정

식 (11)을 만족하는 1차 다항식 앞먹임제어기 $D_i(q^{-1})$ 는 주파수 ω_i 를 갖는 단순 조화함수 형태의 베이스 가속도에 의한 응답을 완벽하게 제거할 수 있다.

$$\left[D_i(q^{-1}) = d_0 + d_1 q^{-1} \right]_{q=e^{j\omega_i \Delta T}} = - \frac{B_u(q^{-1})}{B_v(q^{-1})} \Big|_{q=e^{j\omega_i \Delta T}} \quad (11)$$

여기서 ΔT 는 샘플링 간격이다. 그러나 식 (11)과 같이 모델을 기반으로 설계된 앞먹임제어기는 모델의 정확성에 민감하므로 앞의 논의와 같이 FXLMS 알고리즘을 이용한 실험에 의한 제어기 설계 방법을 제안코자 한다. FXLMS 알고리즘은 신호처리나 능동소음제어 분야에서 널리 사용되는 방법이다.^(7,8) Fig. 2는 FXLMS 알고리즘을 이용한 제어기 계수 추정을 보인다. 여기서 제어기의 계수는 다음의 갱신식을 이용하여 추정한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_0(k+1) \\ \hat{\alpha}_1(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_0(k) \\ \hat{\alpha}_1(k) \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \hat{z}(k) \\ \hat{z}(k-1) \end{bmatrix} y(k) \quad (12)$$

여기서 μ 는 수렴상수이다.

Fig. 2에서 필터 $\hat{F}(q^{-1})$ 는 FXLMS 알고리즘의

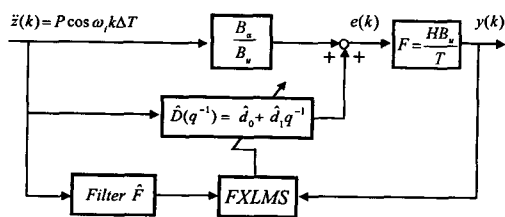


Fig. 2 Block diagram of FXLMS algorithm

수렴성을 보장하기 위한 위상보상필터로 이 필터가 다음 식을 만족하면 계수추정오차의 앙상블평균(ensemble average)은 영이 된다.⁽⁹⁾

$$\text{Re} \left[\frac{\hat{F}(q^{-1})}{F(q^{-1})} \right]_{q=\exp(j\omega \Delta T)} > 0 \quad (13)$$

$$0 < \mu < \frac{1}{\max(2E[\hat{h}^2(k)])}, \hat{h}(k) = \hat{F}(q^{-1}) \hat{z}(k) \quad (14)$$

식 (13)은 $\hat{F}(q^{-1})/F(q^{-1})$ 가 양실함수(positive real function)이어야 한다는 의미로, 즉 $\hat{F}(q^{-1})/F(q^{-1})$ 의 위상 $\phi(\omega)$ 가 $-\pi/2 < \phi(\omega) < \pi/2$ 의 범위 내에 있어야 한다. $\hat{F}(q^{-1})$ 는 $F(q^{-1})$ 의 추정치로 식 (13)의 조건을 만족하도록 추정하는 것은 크게 어렵지는 않다. 또한 외란의 주파수 대역은 그리 넓지 않으므로 이 주파수 대역에서 이 조건을 만족하는 것은 그리 엄격한 조건은 아니다. 식 (14)에서 $E[*]$ 는 *의 앙상블평균이다. 수렴상수 μ 의 크기는 알고리즘의 수렴속도와 잡음에 대한 민감도에 영향을 미친다. 즉, μ 가 크면 수렴속도는 향상되지만 잡음에 대한 민감도는 증가하며, 그 반대도 성립된다. 일반적으로 μ 는 최대 크기의 1/10 정도를 취한다.⁽⁹⁾

따라서 Fig. 2와 같이 AMB 시스템을 특정 주파수를 갖는 조화함수로 가진한 상태에서 식 (13)과 (14)를 만족하는 FXLMS 알고리즘을 적용하면 이 주파수를 갖는 베이스 가속도 응답을 제거하는 식 (11)의 제어기 계수 d_0 와 d_1 을 결정할 수 있다. 가진 주파수를 변경하면서 이상의 과정을 반복함으로써 원하는 주파수에서의 외란 제거 제어기 다항식을 구할 수 있다. 단 이 실험은 AMB 시스템이 원래 불안정하므로 되먹임제어를 통해 계를 안정화시킨 상태에서 수행한다.

3.2.2 주파수 영역에서 모델 곡선맞춤(curve fitting)

앞의 3.2.1에서 얻은 각 주파수에서의 외란제거 제어기를 이용하여 제어기의 주파수 응답을 얻을 수 있으며, 이 주파수 응답을 가장 잘 표현하는 제어기를 구할 수 있다. 구하고자 하는 제어기 전달함수를 $G_{ff}(q^{-1})$ 이라면 이 전달함수는 다음의 가격함수 최소화를 통해 얻을 수 있다.

$$J = \sum_{i=1}^n W(\omega_i) \left[\hat{D}_i(q^{-1}) - G_{ff}(q^{-1}) \right]_{q=e^{j\omega_i \Delta T}}^2 \quad (15)$$

여기서 $\hat{D}_i(q^{-1})$ 는 주파수 ω_i 를 갖는 외란이 작용할 때 단계 (1)에서 구한 제어기 다항식이며,

$\mathcal{W}(\omega_i)$ 는 이 주파수 응답에 대한 가중치이다. 식 (15)를 최소화하는 제어기는 불안정한 극점을 가질 수 있다. 그 이유는 이상적인 경우 식 (15)의 가역함수를 최소화하는 제어기는 식 (10)의 제어기와 일치할 것이며, $B_u(q^{-1})$ 는 단위원 외부에 존재하는 근을 가질 수 있기 때문이다. 일반적으로 연속계에서는 최소위상계라 하더라도 이산계로 나타낼 경우 비최소위상계가 되기 쉽다.(6) 이러한 경우 제어기는 항상 안정성을 보장하는 FIR(finite impulse response)-모델 형태의 제어기를 적용할 수 있다.

이상의 두 단계를 통해 외란이 갖고 있는 주파수 대역에서 외란에 의한 응답을 최소화하는 앞먹임제어기를 실험을 통해 설계할 수 있다.

4. 실험 및 결과

앞에서 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위한 Fig. 1의 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 우선 되먹임제어는 폐회로 극점이 감쇠비 = 0.8, 고유진동수=60Hz를 갖도록 다음과 같이 설계되었으며, 적분제어가 포함되었다. 샘플링 주파수는 800Hz로 선정하였다.

$$H(q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 + 0.2864q^{-1}) \quad (16-1)$$

$$G(q^{-1}) = -1.0891 + 1.4737q^{-1} - 0.3933q^{-2} \quad (16-2)$$

베이스 운동이 없는 정적 상태에서 되먹임제어만을 수행했을 경우 공극의 표준편차는 $0.18\mu\text{m}$ 로 나타났다.

앞먹임제어기 설계에 앞서 되먹임제어를 작동시킨 상태에서 가진기를 20Hz의 조화함수로 가진 하며 FXLMS 알고리즘의 적용성을 검증하였다. Fig. 2의 $\hat{F}(q^{-1})$ 는 수학적으로 유도된 모델을 이용하였다

Fig. 3은 되먹임제어만 한 경우 $t=1.25$ 초에 시작된 20Hz 가진에 의한 응답을 보인다. Fig. 4는 가진과 동시에 FXLMS 알고리즘을 작동시킨 경우 제어기 계수들이 초기치 영역에서 최종치로 수렴함을 보이며, 이에 따른 응답은 Fig. 5에서 초기에 큰 천이응답을 보이다 제어기 계수가 수렴함에 따라 감소되었다. 정상상태에서의 응답은 20Hz 성분은 매우 적었으며, 기타의 주파수 성분이 나타났다. 이는 가진기가 정확한 조화함수 운동을 하지 못하기 때문이다.

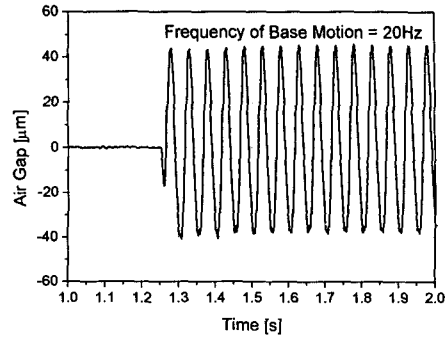


Fig. 3 Air-gap with FB control under 20Hz base motion

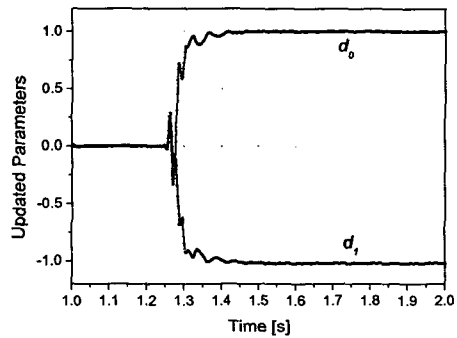


Fig. 4 Estimated parameters by FXLMS under 20Hz base motion

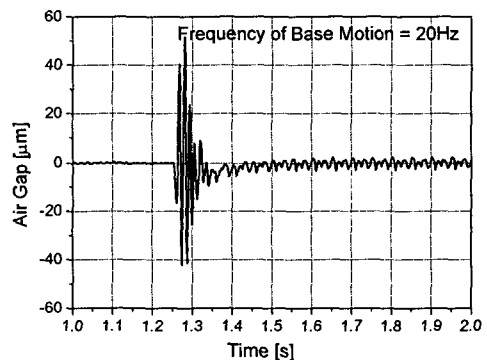


Fig. 5 Air-gap with FB+FF control by FXLMS under 20Hz base motion

이 결과로부터 FXLMS 알고리즘은 단일 주파수를 갖는 외란을 제거하는 제어기 계수를 빠르

계 추정함을 알 수 있다. 또한 Fig. 5의 응답에는 중력에 의한 영향이 나타나지 않았는데, 이는 되먹임제어기에 적분기가 포함된 때문이다.

조준경 장착 부위의 운동은 대역폭 10Hz-30Hz 성분이 주성분이므로 이 대역폭 내의 각 주파수에서 베이스 가속도에 의한 응답을 제거하는 제어기 계수를 구하는 실험을 수행하였다. FXLMS 알고리즘의 수렴속도를 고려하여 8.75초 동안의 10Hz-30Hz 선형 Chirp 신호를 만들어 가진기에 입력하면서 FXLMS 알고리즘을 실행시켰다.

Fig. 6은 되먹임제어만 한 경우 이 Chirp 신호에 의한 응답을 보인다. 시간에 따라 응답의 주파수가 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 7은 되먹임제어 상태에서 FXLMS 알고리즘을 적용하여 얻은 제어기 계수를 보인다. 제어기 계수는 가진 주파수가 증가함에 따라 변화하였다. 가진주파수가 20Hz일 때 제어기 계수는 앞의 Fig. 4의 계수와 거의 일치함을 확인하였다. Fig. 8은 이 경우의 응답으로 초기 천이구간이 지난 후 감소함을 알 수 있다. 천이구간 이후의 응답은 앞에서와 같이 주로 가진기의 비선형적 동적특성에서 기인된다. 이 결과로부터 Fig. 7의 각 제어기 계수는 해당 주파수를 갖는 외란응답을 제거하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9, 10에서 굵은 실선은 Fig. 7의 제어기 계수를 이용하여 구한 주파수 응답함수의 크기와 위상이다. 크기는 주파수의 증가에 따라 감소하지만 위상은 증가하는 특성을 보이는데, 이 특성은 주로 비최소위상계(non-minimum phase system)에서 볼 수 있다. 이 주파수 응답함수를 식 (15)에 따라 곡선맞춤법으로 얻은 IIR(infinite impulse response)-모델은 다음 식으로 결정되었다.

$$G_{ff}(q^{-1}) = \frac{-0.757 + 1.292q^{-1} - 0.577q^{-2}}{1 - 1.147q^{-1}} \quad (17)$$

이 제어기는 불안정한데, 이는 식 (5)의 다항식 $B_d(q^{-1})$ 가 단위원 외부에 근을 갖기 때문으로 판단된다. 따라서 주파수 응답함수를 FIR-모델로 곡선맞춤을 하였다. FIR 필터의 차수가 증가할수록 맞춤오차는 감소하였는데, 차수의 증가에 따른 맞춤오차의 감소 효과도를 고려하여 다음과 같은 3-차의 FIR-모델을 얻었다.

$$G_{ff}(q^{-1}) = 37.44 - 105.20q^{-1} + 100.23q^{-2} - 32.37q^{-3} \quad (18)$$

Fig. 9, 10은 실험에 의한 주파수 응답, 식 (17)

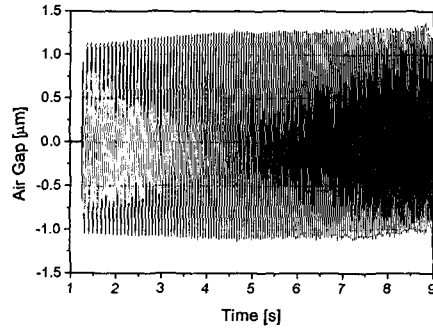


Fig. 6 Air-gap with FB control under base motion excited by chirp signal

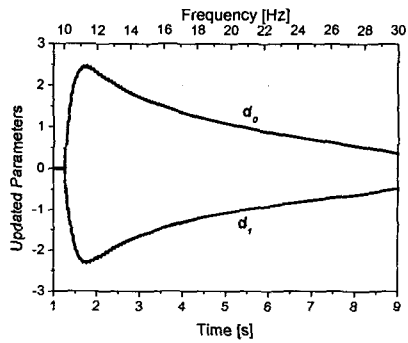


Fig. 7 Estimated control parameters by FXLMS under base motion excited by chirp signal

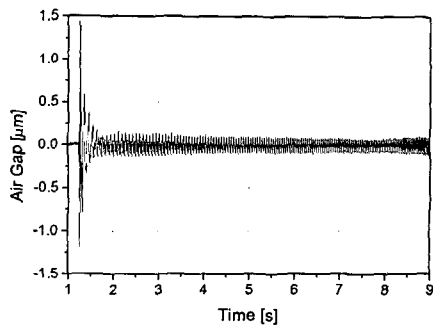


Fig. 8 Air-gap with FB+FF control by FXLMS under base motion excited by chirp signal

의 IIR-모델, 식 (18)의 FIR-모델의 주파수 응답을 나타낸다. IIR-모델이 FIR-모델에 비해 실험으로

얻은 주파수응답에 더 근사함을 알 수 있으며, FIR-모델의 경우 15Hz 미만과 28Hz 이상의 주파수 영역에서의 크기 오차가 크며, 위상오차는 상대적으로 작음을 알 수 있다.

결정된 식 (17)의 최적 앞먹입제어기 $G_{ff}(q^{-1})$ 의 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 베이스 운동은 실질적인 조준경 베이스 운동을 모사하도록 10Hz-30Hz 대역폭을 갖는 랜덤 신호를 이용하여 가진하였다. 가속도의 표준편차는 0.32g였다. Fig. 11은 동일한 가진상태에서 각 제어기를 적용했을 때 얻은 응답의 스펙트럼을 보인다. 뒤먹입제어만을 하였을 경우(FB Only) 응답의 표준편차는 $11.13\mu\text{m}$ 이었다. 뒤먹입제어와 25Hz의 외란을 제거하는 앞먹입제어기를 적용한 경우(FB+FF, 25Hz) 스펙트럼은 25Hz 성분은 거의 제거되었으나 다른 주파수 성분은 남아있는 것을 알 수 있다. 이 때의 응답의 표준편차는 $5.53\mu\text{m}$ 로 계산되었다. 뒤먹입제어와 식 (18)의 앞먹입제어를 적용한 경우(FB+FF, Optimal) 스펙트럼은 뒤먹입제어만 한 경우에 비해 모든 주파수 범위에서 낮았으며, FB+FF(25Hz)에 비해서도 25Hz 부근을 제외한 전 영역에서 낮게 나타났다. 단, 15Hz 미만의 주파수 영역에서는 제거 성능이 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 앞의 곡선맞춤에서 이 주파수 영역에서의 맞춤오차가 크기 때문이다.

이 경우 응답의 표준편차는 $3.08\mu\text{m}$ 로 뒤먹입제어만을 적용한 경우의 27.7%에 해당한다. 이러한 외란제거 성능은 Fig. 12의 시간영역에서의 응답 비교를 통해 확인할 수 있다.

이상으로 본 연구에서 제안한 최적 베이스 가

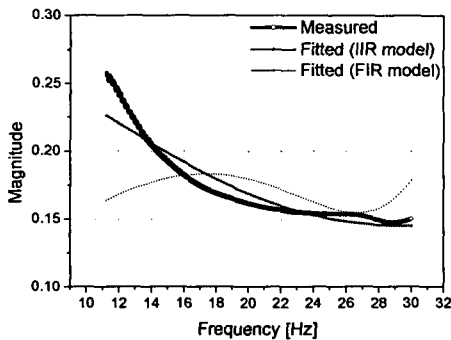


Fig. 9 Magnitudes of measured and fitted frequency response functions

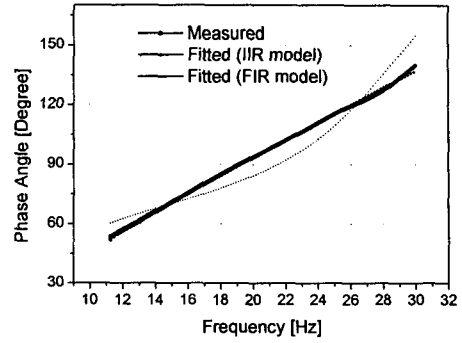


Fig. 10 Phase angles of measured and fitted frequency response functions

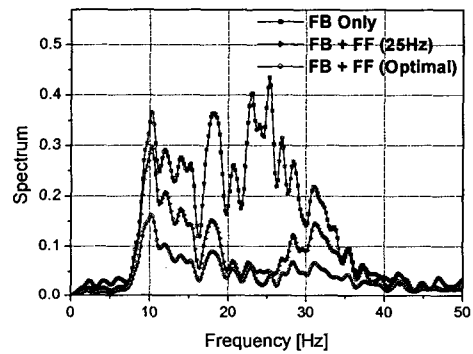


Fig. 11 Spectra of air-gap with FB+FF controls under randomly excited base motion

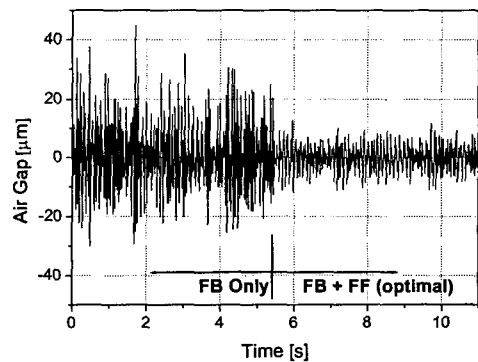


Fig. 12 Air-gap with FB+FF controls under randomly excited base motion

속도 앞먹임제어가 이동하는 차량에 장치되는 AMB 시스템에서 베이스의 가속도에 의한 응답을 감소시키는데 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 차량에 장착되어 운용되는 AMB 시스템에서 차량 운동으로 인한 외란응답의 감소를 위해 베이스 가속도 앞먹임제어 적용하였다. 앞먹임제어 설계에서 수학적 모델이 갖는 부정확성을 고려하여 모델 기반 제어기 설계 방법 대신 FXLMS 알고리즘을 이용한 실험적 설계방법을 제안하였으며, 1-자유도 AMB 시스템에 적용하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 베이스 가속도 앞먹임제어가 베이스 가진을 받는 AMB 시스템에서 베이스 운동에 의한 응답을 감소시키는데 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 이로써 제안된 방법은 조건경 고각축 제어에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-003-D00019).

참고문헌

- (1) Young-Ho Ha and Chong-Won Lee, 1998, "Unbalance Response Control in Active Magnetic Bearing System by Optimal Control with Frequency-Shaped Cost Functional," *Trans. of the KSME A*, Vol. 22, No. 8, pp. 1431~1441.
- (2) Jeon, s., Ahn, H. J., and Han, D. C., 2002, "Model Validation and Controller Design for Vibration Suppression of Flexible Rotor Using AMB" *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 12, pp. 1583~1593.
- (3) Cole, M. O. T., Keogh, P. S., and Burrows, C. R., 1998, "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.
- (4) Kasada, M. E., Clements, J., Wicks, A. L., Hall, C. D., and Kirk, R. G., 2000, "Effect of Sinusoidal Base Motion on a Magnetic Bearing," *Proc. IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 144~149.
- (5) Suzuki, Y., 1998, "Acceleration Feedforward Control for Active Magnetic Bearing Excited by Ground Motion," *IEEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 145, No. 2, pp. 113~118.
- (6) Astrom, K. J. and Wittenmark, B., 1990, *Computer-Controlled Systems*, Prentice-Hall, Inc.
- (7) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, *Active Noise Control Systems*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- (8) Seung-Jong Kim and Chong-Won Lee, 1998, "On-Line Identification of Position and Current Stiffnesses in Active Magnetic Bearing System Equipped with Built-in Force Transducers by LMS Algorithm," *Trans. of the KSME A*, Vol. 22, No. 12, pp. 2261~2268.
- (9) White, M. T. and Tomizuka, M., 1997, "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control and Parameter Adaptation," *Control Engineering Practice*, Vol. 5, No. 6, pp. 741~751.